

DEPÓSITOS DE LITIO EN SALMUERAS DE CUENCAS CERRADAS DE LA REPÚBLICA ARGENTINA: DISTRIBUCIÓN Y CONDICIONES DE FORMACIÓN

Martín R. Gozálvez, Dolores Álvarez, Raúl E. Seggiaro



Salar del Hombre Muerto

SERIE CONTRIBUCIONES TÉCNICAS - RECURSOS MINERALES N° 51

DEPÓSITOS DE LITIO EN SALMUERAS DE CUENCAS CERRADAS DE LA REPÚBLICA ARGENTINA: DISTRIBUCIÓN Y CONDICIONES DE FORMACIÓN

Martín Gozalvez¹, Dolores Álvarez², Raúl Seggiaro²

¹ Servicio Geológico Minero Argentino – Instituto de Geología y Recursos Minerales

² Servicio Geológico Minero Argentino – Centro Salta

Validación: Inés Korzeniewski

Edición: Marcos Vila

ISSN 2618-5032

BUENOS AIRES 2023

SERVICIO GEOLÓGICO MINERO ARGENTINO

Presidente: Dr. Eduardo O. Zappettini

Secretaria Ejecutiva: Lic. Silvia Chavez

INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERALES

Director: Dr. Martín Gozalvez

DIRECCIÓN DE RECURSOS GEOLÓGICO-MINEROS

Director: Lic. Pablo E. Johanis

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Esta publicación debe citarse como:

Gozalvez, M.R., Alvarez, D., Seggiaro R.E. 2021. Depósitos de litio en salmueras de cuencas cerradas de la República Argentina: distribución y condiciones de formación. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Serie Contribuciones Técnicas Recursos Minerales N° 51, 20 pp. Buenos Aires.

ISSN 2618-5032

ES PROPIEDAD DEL INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERALES - SEGEMAR
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN



Av. General Paz 5445 (Colectora provincia) 1650 - San Martín - Buenos Aires - República Argentina

Edificios 14 y 25 | (11) 5670-0100

www.segemar.gov.ar

CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. MARCO TECTÓNICO REGIONAL	3
3. DEPÓSITOS DE LITIO EN SALMUERAS CONTINENTALES DE ARGENTINA	5
3.1. Cuenca Salar Olaroz-Cauchari.....	5
3.2. Cuenca Salar Centenario-Pastos Grandes.....	9
3.3. Cuenca del Salar del Hombre Muerto.....	9
3.4. Cuenca del Salar del Rincón	10
3.5. Cuenca de la Laguna Verde	10
3.6. Cuenca del Salar Llullaillaco	10
3.7. Cuenca de Carachi Pampa	11
3.8. Cuenca de Arizaro-Río Grande.....	11
4. FACTORES DE IMPORTANCIA EN LA GÉNESIS DE LOS DEPÓSITOS DE LITIO EN SALMUERAS DE ARGENTINA	12
5. CONSIDERACIONES FINALES	15
6. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO	16

RESUMEN

Argentina es el segundo país con mayores recursos de litio identificados del mundo (18,35 Mt Li) y cuarto productor mundial con una producción en 2021 de 33.000 t de carbonato de litio equivalente. Su potencial productivo es muy alto siendo que cuenta con más de veinte proyectos mineros con diversos grados de avance.

Los recursos de litio se encuentran en el extremo noroeste del país, en la región de la Puna, ocupando el extremo sur del denominado “Triángulo del Litio” que comprende la región norte de Chile y sur de Bolivia. Esta región del planeta contiene el 56 % de los recursos de litio del mundo y se presentan en depósitos de salmueras de cuencas cerradas con salares.

Los depósitos de litio en salmueras de la Puna se caracterizan por presentar leyes mayores a 200 mg L^{-1} Li acompañadas generalmente por potasio ($> 4.000 \text{ mg L}^{-1}$ K) y boro ($> 700 \text{ mg L}^{-1}$ B) en cuencas con relleno de secuencias clásticas interestratificadas con niveles piroclásticos y evaporíticos y en ocasiones con presencia de cuerpos salinos. La formación de estos depósitos tuvo lugar en una región donde el clima árido, la actividad ígnea y/o hidrotermal y la subsidencia tectónica fueron continuas durante millones de años lo que permitió la estructuración de cuencas cerradas con formación de salares.

El origen del litio estaría vinculado a los contenidos anómalos de litio del Altiplano-Puna, que define un dominio metálico. El aporte de litio a los sistemas hidrogeológicos de cuencas cerradas se habría producido a través de procesos de lixiviación hidrotermal del basamento paleozoico y rocas volcánicas cenozoicas, así como de la meteorización química y la lixiviación hídrica de las rocas aflorantes.

Si bien, cuencas con salmueras con contenidos anómalos de litio se encuentran en todo el ámbito de la Puna, aquellas que conforman grandes depósitos de litio presentan patrones de distribución espacial distintivos, definidos por las intersecciones de grandes estructuras y fallamientos. En este sentido se destacan la discontinuidad cortical de rumbo NNE, que coincide con la zona de sutura entre los terrenos de Pampia y Antofalla, y las fallas transcurrentes oblicuas al orógeno andino (NO-NE). Este arreglo estructural habría generado sectores de la Puna con alta permeabilidad de la corteza somera resultando en una mayor circulación de fluidos magmáticos y aguas meteóricas y su interacción con rocas circundantes. Este incremento sectorizado en la disponibilidad de litio es una condición fundamental para la formación de depósitos de litio en salmueras de gran tonelaje en la Puna.

Palabras clave: Puna, Argentina, litio, cuencas cerradas, permeabilidad cortical somera

CLOSED-BASIN LITHIUM-BEARING BRINES DEPOSITS IN ARGENTINE REPUBLIC: DISTRIBUTION AND FORMATION CONDITIONS

ABSTRACT

Argentina is the second country in the world with the largest lithium resources identified (18.35 Mt Li) and the fourth world producer with a 2021 production of 33,000 tons of lithium carbonate equivalent. Its productive potential is very high, having more than twenty mining projects in different degrees of development.

Lithium resources are located in the Puna region, constituting the southeastern part of the “Lithium Triangle” that comprises also Chilean and Bolivian salars. This region concentrates 56% of the world's lithium resources occurring as Li-rich continental brines. Lithium brine deposits in the Puna region have $>200 \text{ mg L}^{-1}$ Li, commonly associated with potassium ($> 4,000 \text{ mg L}^{-1}$ K) and boron ($> 700 \text{ mg L}^{-1}$ B) hosted in aquifers of basins filled with clastic sedimentary rocks, interbedded with pyroclastic and evaporitic layers as well as local saline bodies. These were formed in a region with several millions years of arid climate, igneous and / or hydrothermal activity, in closed basins that contain a salar and tectonic subsidence.

The origin of lithium would be linked to the anomalous lithium contents of the Andean plateau, which defines a metal domain. The input of lithium into the hydrogeological systems of closed basins is through hydrothermal leaching processes of Paleozoic basement and Cenozoic volcanic rocks as well as chemical weathering and hydric leaching of outcropping rocks.

Though Li brine-type deposits exhibit homogeneous distributions, large and superlarge deposits show distinctive spatial distribution patterns, defined by the intersections of large structures and faults. In this sense, the NNE trending crustal discontinuity, which coincides with the suture zone between Pampia and Antofalla terranes, and the transcurrent faults oblique to the Andean orogen (NW-NE) stand out. This structural arrangement would have generated sectors of the Puna where the permeability in the shallow crust is higher, allowing the availability of lithium from a greater circulation of magmatic fluids and meteoric waters and its interaction with surrounding rocks. This sectorized increase in the availability of lithium is a formation condition to large and superlarge lithium brine deposits in Puna.

Keywords: Puna, Argentina, lithium, closed basins, permeability in the shallow crust

1. INTRODUCCIÓN

Los depósitos de litio en salmuera son acumulaciones de aguas subterráneas salinas que están enriquecidas en litio disuelto ($> 100 \text{ mg L}^{-1}$) (Bradley *et al.* 2013). Estas salmueras alojadas en acuíferos de cuencas cerradas forman cuerpos que tienden a ubicarse en el centro de las cuencas. En este tipo de depósitos, el cálculo de los recursos depende del conocimiento detallado de la geometría del acuífero, la porosidad (total y efectiva) y la ley en la salmuera (Houston *et al.* 2011). Estos depósitos actualmente representan alrededor del 40 % de la fuente mundial de Li (U.S. Geological Survey 2022), típicamente con leyes promedio de 160 a 1.400 mg L^{-1} Li (Munk *et al.* 2016).

Los Andes centrales de América del Sur contienen varios depósitos económicos de litio en salmueras (Houston *et al.* 2011, Munk *et al.* 2016). En Argentina los recursos de litio más importantes se concentran en la región de la Puna (Fig. 1) donde se encuentran numerosas cuencas de drenaje interno (Viramonte *et al.* 1984a, Alonso 1999a, López Steinmetz *et al.* 2020).

Los primeros estudios e investigaciones en la Puna, que definieron la presencia de cantidades anómalas de Li, fueron realizados en las décadas de 1970 y 1980 por distintas Agencias del Estado (Igarzábal y Poppi 1980, Nicolli *et al.* 1980, 1982a, 1982b, Viramonte *et al.* 1984a). A finales de la década de 1990, la empresa FMC Minera del Altiplano inició la producción de litio en el Salar del Hombre Muerto

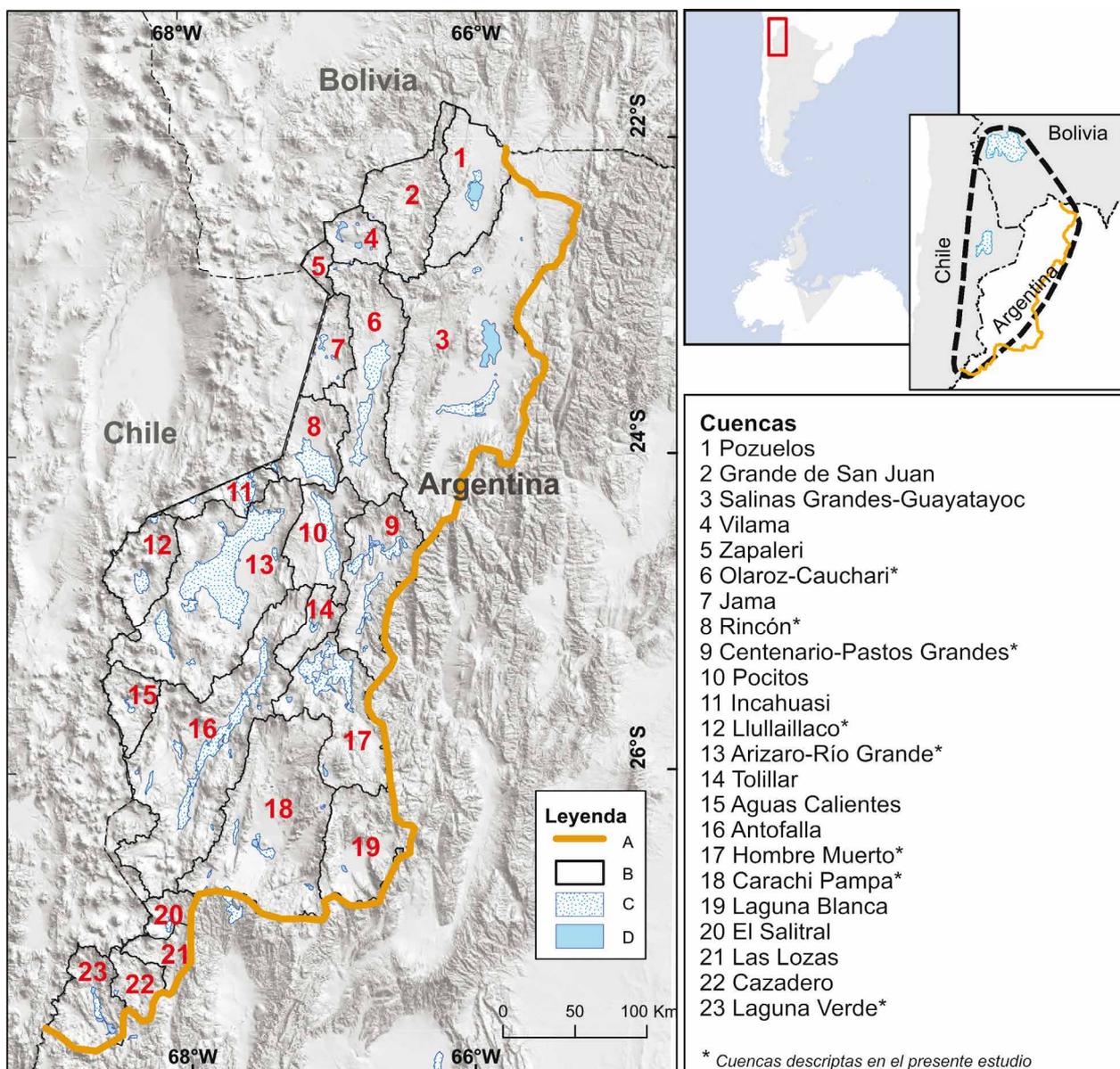


Figura 1. Mapa de ubicación de la Puna en América del Sur y en el denominado "Triángulo del Litio". Identificación de las cuencas de la Puna, en base al mapa de Paoli *et al.* (2011). Referencias: A: Límite de la Puna (Argentina). B: Límite de cuencas (modificado de Paoli *et al.* 2011). C: Salares. D: Lagunas.

luego de un proceso de investigación liderado por Fabricaciones Militares. En las décadas de 2000 y 2010, hubo una proliferación de proyectos de litio en la mayoría de los salares de la Puna en respuesta a la demanda mundial de fabricación de baterías. En 2015, la actividad de exploración evolucionó satisfactoriamente con la apertura de una nueva mina en el Salar de Olaroz, propiedad de Orocobre Ltda., además de la cuantificación de recursos en 22 proyectos. Con dos minas activas, Argentina es el cuarto productor de litio en el mundo con una producción en 2021 de 33.000 t de carbonato de litio equivalente (U.S. Geological Survey 2022). En ambas minas, el proceso productivo se basa en la extracción de salmueras de litio por bombeo, concentración primaria en piletas de evaporación y posterior tratamiento de las salmueras que se concentran por adsorción selectiva.

La presente contribución realiza una revisión de las características geológicas de la Puna como así también de los principales depósitos de litio en salmueras de esa región, con el objetivo de resaltar los controles geológicos que juegan un papel en la distribución y formación de los depósitos de litio grandes a muy grandes.

2. MARCO TECTÓNICO REGIONAL

La Puna argentina integra parte de los Andes Centrales, donde la placa de Nazca subduce a la placa Sudamericana con un ángulo de aproximadamente 30°E (Jordan *et al.* 1983, Isacks 1988, Allmendinger *et al.* 1997). Constituye una altiplanicie ubicada al este del arco magmático Mioceno-Holoceno con elevación media de 3.700 m s.n.m., alongada 700 km en sentido norte sur y 100 a 200 km de ancho. El vector de convergencia E-O, generado por la subducción, estructuró en el orógeno andino una cuenca de antepaís fragmentada durante el Paleógeno y sistemas de corrimientos NNE y cuencas intramontanas en el Neógeno. Así, el relieve actual de la Puna está caracterizado por sierras alongadas en dirección meridiana separadas por amplios valles con depocentros ocupados por salares y lagunas salinas (Fig. 2) (e.g. Alonso *et al.* 1991, Vandervoort *et al.* 1995, Alonso *et al.* 2006).

La geología de la Puna se caracteriza por una secuencia de sedimentitas y leptometamorfitas de edad ordovícica, con presencia de rocas volcánicas intercaladas e intrusiones plutónicas también ordovícicas (Méndez *et al.* 1973; Palma *et al.* 1986). En el

límite con Chile se observan en discordancia angular sobre rocas ordovícicas, depósitos silúricos y devónicos de ambiente marino y depósitos continentales neopaleozoicos (Aceñolaza *et al.* 1973, Ramos 1999). Los eventos extensionales del Mesozoico quedaron registrados en depósitos de *rift*, en su mayor parte continentales (Salfity y Marquillas 1994). A partir del Cenozoico se instaló un profuso volcanismo de arco con estratovolcanes y domos volcánicos de composición andesítica y dacítica, calderas volcánicas asociadas a flujos ignimbríticos y conos basálticos monogénicos (Petrinovic *et al.* 2017). 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 (Ramos 1999).

La región central de la Puna registra evidencias de estructuras paleozoicas y cretácicas reactivadas, todas ellas de orientación aproximadamente NNE, que habrían controlado las primeras etapas del acortamiento andino y la fragmentación de la cuenca de antepaís en el Eoceno medio. La reactivación de viejas estructuras explica también la generación de corrimientos con vergencias opuestas durante la orogenia andina (e.g. Grier *et al.* 1991, Mon y Salfity 1995, Salfity *et al.* 1976, Hongn *et al.* 2010, Seggiaro *et al.* 2017b).

El levantamiento moderado de la Puna durante el Neógeno, con poca deformación y desarrollo de cuencas intermontanas, implicó un cambio en la relación de los procesos regionales con predominio del magmatismo sobre la tectónica (Perkins *et al.* 2016). La mayoría de los estudios cinemáticos y cronológicos regionales sustentan la idea de que el levantamiento de la Puna ocurrió entre mediados y finales del Mioceno, debido al efecto combinado del acortamiento tectónico y la adición magmática en la corteza inferior (Perkins *et al.* 2016, Allmendinger *et al.* 1983, Jordan y Alonso 1987, Allmendinger *et al.* 1997, Isacks 1988).

Estudios paleomagnéticos realizados por Prezzi *et al.* (1998) en la Puna austral, muestran rotación de bloques desde cuyas elevaciones se produjeron aportes a cuencas restringidas durante el Paleógeno. Estos movimientos de bloque fueron también registrados por la presencia de estratos de crecimientos en los depósitos fluviales paleógenos en la Puna y en la Cordillera Oriental (Hongn *et al.* 2007, Quade *et al.* 2015, Del Papa y Petrinovic 2017, Seggiaro *et al.* 2017a, Del Papa *et al.* 2013). En la mayoría de los casos los bloques colgantes de los corrimientos configuran sierras integradas por unidades neopro-

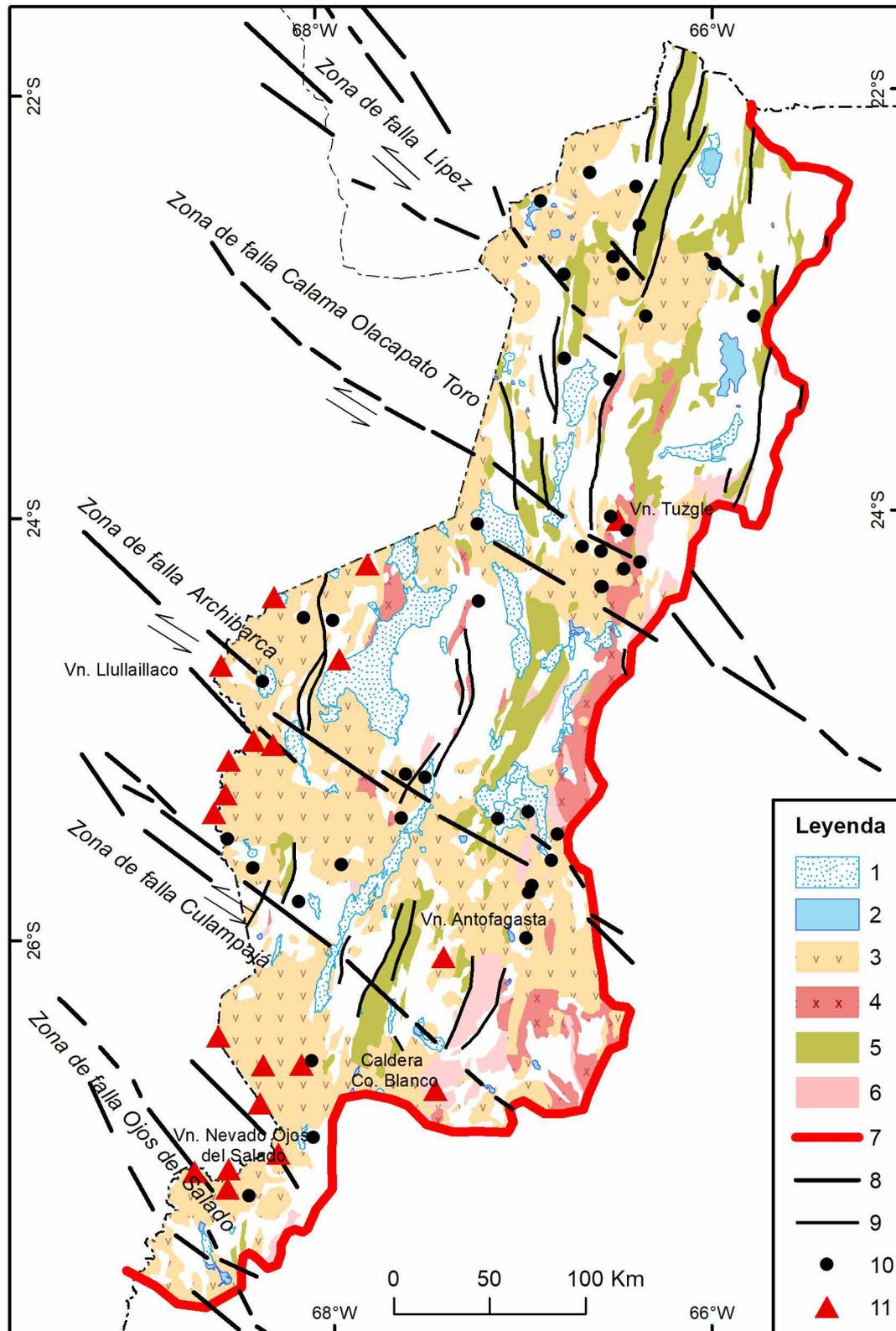


Figura 2. Mapa geológico de la Puna (modificado de Viramonte y Petrinovic 1990; Lizuain Fuentes *et al.* 2018). 1) Salar 2) Laguna, 3) Rocas volcánicas cenozoicas, 4) Granitoides ordovícicos, 5) Depósitos marinos ordovícicos, 6) Basamento ígneo-metamórfico neoproterozoico-cámbrico, 7) Límite de la Puna, 8) Fallas transversales NO-SE, 9) Corrimientos NNE, 10) Emisiones de aguas termales, 11) Volcanes activos.

terozoicas a eopaleozoicas y paleógenas, mientras que los bloques yacientes constituyen valles rellenos con unidades volcano-sedimentarias neógenas y cuaternarias. Las unidades neógenas se encuentran deformadas en pliegues suaves y corrimientos de poco rechazo que contrastan con la intensa deformación que presentan las unidades paleógenas subyacentes (e.g. Seggiaro *et al.* 2017a).

Varias fallas transversales de rumbo NO-SE atraviesan la Puna, intersectan los corrimientos NNE y se extienden al oeste hacia Chile destacándose de norte a sur las fallas Lípez, Calama-Olacapato-El Toro, Archibarca, Culampajá y Ojos del Salado (Fig. 2) (Salfity 1985, Viramonte *et al.* 1984b, Chernicoff *et al.* 2002, Lizuain Fuentes *et al.* 2018). El origen de las fallas transversales NO-SE es parte de una controversia entre quienes asumen que estas estructuras se formaron como resultado de cambios en el ángulo de convergencia de la placa de Nazca (Allmendinger 1986), cambios en la dirección del movimiento de la placa Sudamericana (Marrett *et al.* 1994), resultado de un estiramiento paralelo al orógeno (e.g. Riller y Oncken 2003, Riller *et al.* 2001) o que son zonas de transferencia que acomodan desplazamientos diferenciales durante la compresión (Seggiaro y Hongn 1994, Petrinovic *et al.* 2010, Norini *et al.* 2013, Acocella *et al.* 2011, Lanza *et al.* 2013, Giordano *et al.* 2013).

Cabe mencionar que la relación espacial entre fallas, centros magmáticos y depósitos minerales hidrotermales es bien conocida en la región de la Puna (Chernicoff *et al.* 2002, Gozalvez *et al.* 2016). En este sentido, una característica morfológica distintiva e importante de las fallas transversales es que sobre sus trazas se disponen cadenas de volcanes (e.g. Viramonte *et al.* 1984b) y mega calderas (e.g. Guzmán *et al.* 2017 y trabajos allí citados) como Coranzulí (Seggiaro y Hongn 1994), Aguas Calientes (Petrinovic *et al.* 2010), Galán (Sparks *et al.* 1985) y Cerro Blanco (Seggiaro *et al.* 2000), todas ellas con presencia de aguas termales actuales en su interior.

Un rasgo estructural sobresaliente de la Puna lo constituye un extenso y continuo lineamiento de rumbo NNE (Fig. 3), identificado a través del análisis de datos aeromagnéticos regionales, coincidente con la traza que limita los dominios magnéticos de las rocas del Neoproterozoico-Cámbrico y Paleozoico y que los autores han interpretado como posible zona de sutura paleozoica entre los terrenos de Pampia y Antofalla (Chernicoff *et al.* 2002, Álvarez 2020). Esta discontinuidad está caracterizada por dominios magnéticos alargados NNE-SSO a lo largo de 800 kilómetros, desde la frontera con Bolivia en el norte

de la provincia de Jujuy hasta la Precordillera de Jagüé, en la provincia de La Rioja. Su traza se ve interrumpida por las anomalías que corresponden al magmatismo cenozoico que se extiende a lo largo de las fallas transversales oblicuos al orógeno. Estos lineamientos no desplazan el rasgo lateralmente, solo se observa un leve curvamiento en el tramo central. Este rasgo de gran extensión coincidiría con el límite entre los terrenos de Pampia y Antofalla propuesto por Ramos *et al.* (2010) y por lo tanto también con el límite entre las Fajas Eruptivas de la Puna Oriental y Occidental (Viramonte *et al.* 2007). La coincidencia de este rasgo lineal regional con los límites de terrenos definidos en base a la distribución de afloramientos y datos isotópicos es indicativa del significado geológico del mismo.

3. DEPÓSITOS DE LITIO EN SALMUERAS CONTINENTALES DE ARGENTINA

Argentina representa el segundo país con los mayores recursos de litio identificados en el mundo, después de Bolivia, alcanzando 18,35 Mt de litio en salmueras. Del total de esos recursos el 72 % se encuentra en las cuencas Olaroz-Cauchari, Centenario-Ratones y Hombre Muerto (Cuadro 1).

En la región de la Puna se reconocieron 23 cuencas, cuyos límites fueron establecidos siguiendo a Paoli *et al.* (2011), donde la mayoría presenta salmueras someras y profundas caracterizadas por concentraciones variables de litio, con leyes medias que oscilan entre 57 y 650 mg L⁻¹ Li (e.g. Munk *et al.* 2016, López Steinmetz *et al.* 2020, López Steinmetz y Salvi 2021). Del total de cuencas de la Puna, en sólo ocho de ellas se han cuantificado recursos de litio en cantidades económicas (Cuadro 1) y son objetivos prioritarios para las empresas de exploración minera. Siguiendo la clasificación de Tkachev *et al.* (2018), estas cuencas deben ser consideradas como depósitos grandes a muy grandes de litio (Fig. 4). A continuación, se describen los rasgos fisiográficos y geológicos más sobresalientes de estos grandes yacimientos de litio haciendo hincapié en la morfología de las cuencas y las secuencias estratigráficas de sus rellenos.

3.1. CUENCA SALAR OLAROZ-CAUCHARI

La cuenca está ubicada en el extremo occidental de la provincia de Jujuy, a 220 km de la ciudad

de San Salvador de Jujuy, y constituye el depósito de litio en salmueras más grande de Argentina. Es una cuenca alargada en sentido N-S de aproximadamente 174 km de largo y 33 km de ancho, que ocupa un área de 5.794 km². La cuenca presenta dos depocentros, separados por un abanico aluvial, uno al norte denominado salar de Olaroz y otro al sur llamado salar de Cauchari. En el depocentro norte se encuentra la mina de litio Salar de Olaroz (Sales de

Jujuy S. A.) la cual produce carbonato de litio grado batería desde 2015 con una producción en 2021 de 13.000 t de carbonato de litio equivalente (CLE) y una capacidad instalada para 2022 de 42.500 t/año. Abarcando parte de ambos depocentros se encuentra el proyecto “Cauchari-Olaroz” en el cual se está construyendo una nueva mina de litio (Minera Exar S. A.) que producirá carbonato de litio grado batería con una capacidad instalada de 25.000 t/año.

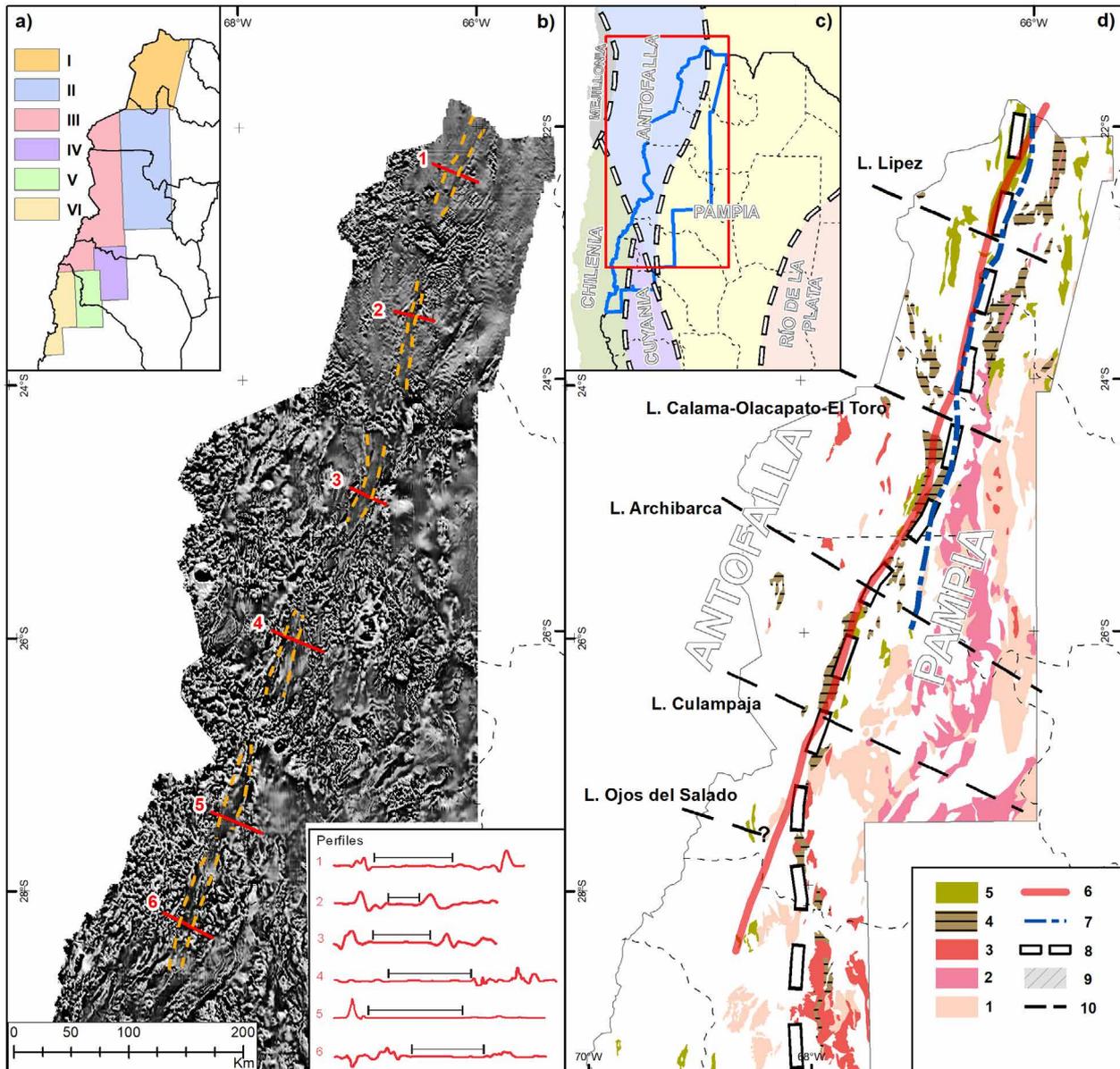


Figura 3. Rasgo lineal magnético regional en el noroeste argentino (extraído de Álvarez 2020). a) Mapa de ubicación de los bloques de datos utilizados: I) Puna Norte, II) Salta-Catamarca, III) Puna Austral, IV) Famatina, V) Precordillera Norte, VI) Cordillera Frontal. b) Rasgo lineal regional resaltado sobre la grilla de primera derivada vertical (línea punteada amarilla). Perfiles de la grilla de primera derivada vertical realizados en diferentes tramos del rasgo regional, indicados con líneas rojas. c) Mapa de límite de terrenos, modificado de Ramos *et al.* (2010), en línea roja se indica la zona de estudio y la línea azul marca la zona con cobertura de datos geofísicos. d) Mapa de interpretación donde se indica la geología del Paleozoico inferior (modificado de Lizuain Fuentes *et al.* 2018), y los principales lineamientos, incluido el rasgo magnético lineal regional: 1) basamento ígneo-metamórfico (Pampia, Neoproterozoico-Cámbrico), 2) Granitoides y volcanitas de retroarco famatinianos, 3) Granitoides de arco famatinianos, 4) Depósitos marinos volcanosedimentarios del Ordovícico, 5) Depósitos marinos del Ordovícico, 6) Rasgo magnético lineal regional interpolado, 7) Límite entre las fajas eruptivas de la Puna Oriental y Occidental (según Viramonte *et al.* 2007), 8) Límite entre terrenos (según Ramos *et al.* 2010), 9) Dominio magnético asociado al volcanismo cenozoico, 10) Lineamientos transversales al orógeno.

Cuenca	Lat.	Long.	Salzar	Clasificación ^a	Área de la cuenca [Km ²]	Elevación [m a.s.l.]	Litología [%] ^b (Km ²)				Total Li Recursos [Mt]	Ley media Li [mg L ⁻¹]	Total KCl Recursos [Mt]	Ley media K [mg L ⁻¹]	Total B Recursos [Mt]	Ley media B [mg L ⁻¹]
							PC	Pz	Cv	Otra						
Caucharí-Olaroz	-23,536279	-66,732354	Olaroz	I	5794	4092	0	14,6	19,9	65,5	6,70	74,1	4.545	1,8	NA	
			(0)	(845)			(1153)	(3795)								
Centenario-Pastos Grandes	-24,796100	-66,685167	Pastos Grandes	I	4453	4096	7,6	38,7	20,4	33,3	3,82	26,3	500	1,4	700	
			Pozuelos	I												
			Centenario	M												
			Ratones	I												
			Diablillos	I												
Hombre Muerto	-25,398654	-66,987283	Hombre Muerto (W)	M	4823	4096	8	11,5	48,9	31,6	2,70	38,8	7.132	0,0	NA	
			Hombre Muerto (E)	I												
Rincón	-23,944942	-67,108789	Rincón	M	2376	4096	0	13,2	34,3	52,5	1,63	0,6	NA	NA	NA	
Leguna Verde	-27,461493	-68,718638	Tres Quebradas	M	2639	4573	0	2,2	41,1	56,7	1,29	23,9	5.970	1,7	830	
Llullaillaco	-24,706016	-68,280552	Llullaillaco	M	2474	3865	0	0 (0)	81,1	18,9	0,97	59,0	10.050	0,0	NA	
Carachi-Pampa	-26,337602	-67,408935	Carachi Pampa	I	9494	3771	15,6	14,2	38,5	31,7	0,82	30,7	4.380	NA	NA	
Arizaro-Río Grande	-24,874002	-67,768847	Arizaro	M	10629	4096	0	4,1	43,7	52,2	0,41	NA	NA	NA	NA	
			Río Grande	M												

Cuadro 1. Resumen de depósitos grandes y muy grandes de litio en salmueras de la región de la Puna. Todas las referencias de datos del cuadro se detallan en el texto. NA = no disponible.
^aClasificación según Houston *et al.* (2011): I= salar inmaduro, M= salar maduro.

^bAfloramientos por tipo de rocas en cada cuenca, según mapa geológico de la figura 2: PC: Basamento ígneo-metamórfico Neoproterozoico-Cámbrico; Pz: Depósito marino ordovícico+granitoides ordovícicos; Cv: Rocas volcánicas cenozoicas.

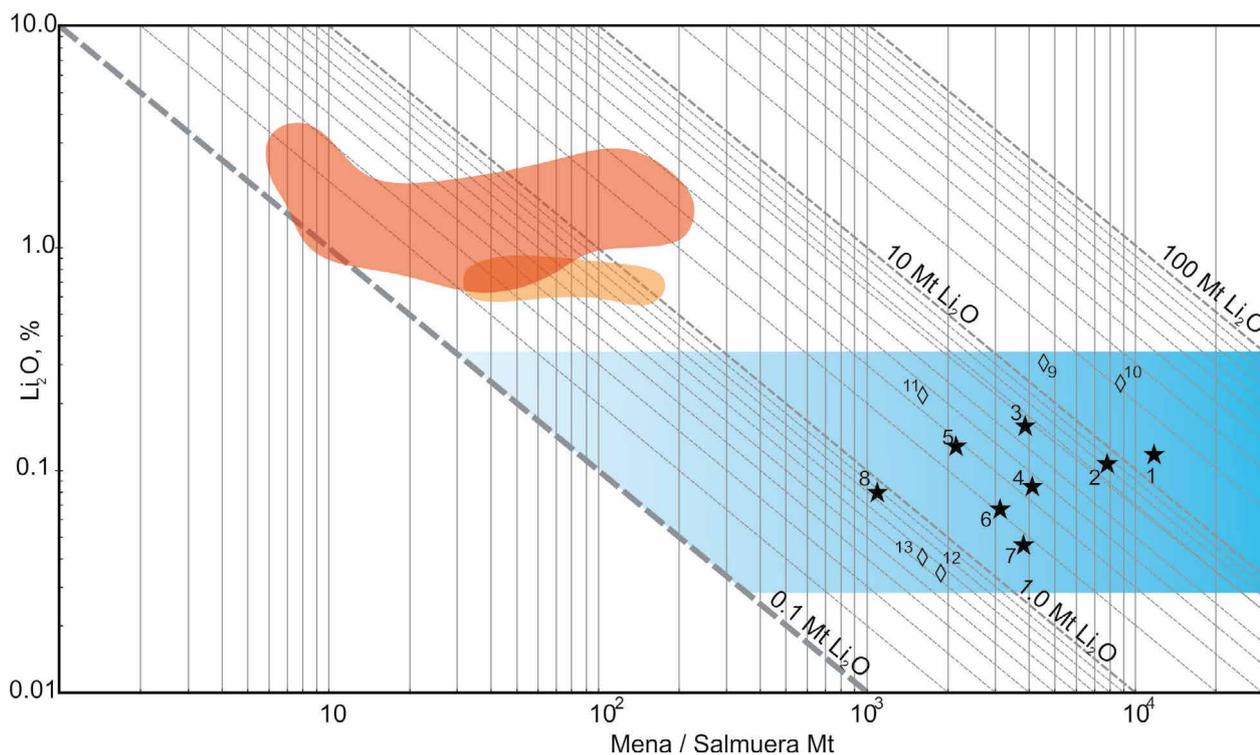


Figura 4. Diagrama ley-tonelaje de depósitos grandes y muy grandes de litio. Referencias: rojo: pegmatitas; naranja: granitos Li-F; azul: salmuera en salares (modificado de Tkachev *et al.* 2018). Depósitos de la Puna (Cuadro 1): 1 Olaroz-Cauchari; 2 Centenario Pastos Grandes; 3 Hombre Muerto; 4 Rincón; 5 Laguna Verde; 6 Llullaillaco; 7 Carachi Pampa; 8 Arizaro-Río Grande. Otros depósitos de salmuera de litio (Munk *et al.* 2016): 9 Atacama; 10 Uyuni; 11 lago Zhabuye; 12 Valle de Clayton; 13 Mar de Saltón.

Asimismo, en el depocentro sur hay otro proyecto de litio, denominado “Cauchari” (South American Salars S.A.), que ha finalizado la etapa de evaluación económica preliminar.

Los recursos totales de la cuenca son de 6,7 Mt Li con una ley promedio de 590 mg L^{-1} Li, 1,8 Mt B_2O_3 con una ley promedio de 995 mg L^{-1} B, y 74 Mt potasa con una ley promedio de 4.545 mg L^{-1} K, además de una relación Mg/Li promedio de 2,5 (Houston y Gunn 2011; Reidel 2019, Burga *et al.* 2019).

Los salares de Olaroz y Cauchari son los depocentro de una cuenca intermontana endorreica controlada por fallas. Esta cuenca es el resultado de procesos de subsidencia a lo largo de fallas normales de alto ángulo, como consecuencia de una tectónica extensional N-S acaecida durante el Cuaternario (Costa *et al.* 2006). La cuenca Olaroz-Cauchari está delimitada al oeste por una serranía de rocas clásticas marinas de edad ordovícica y al este por afloramientos de rocas sedimentarias cretácicas y terciarias. Ambas serranías corresponden a altos estructurales relictos del acortamiento de la Puna durante el Mioceno. El relleno de la cuenca es producto del aporte de material clástico aluvional y de fluidos termales sumados a los depósitos lacustres-evaporíticos propios de las salinas.

La secuencia estratigráfica e identificación de los acuíferos con salmueras surgen de los estudios geológicos llevados a cabo por las empresas mineras quienes han definido modelos conceptuales de la cuenca en base a métodos directos (pozos) e indirectos (geofísica) (King 2010, Houston y Gunn 2011, Reidel 2019, Burga *et al.* 2019). La secuencia sedimentaria del centro de la cuenca Olaroz-Cauchari tiene en su techo depósitos evaporíticos formados por niveles de halita intercalados con arcillas y limos que hacia los laterales se interdigitan con arcillas y limos de facies marginales seguidas por arenas y gravas de abanicos aluviales. En profundidad se repiten facies de halita+arcillas para luego pasar a cuerpos de halita masiva con escaso material clástico. Los mantos evaporíticos se intercalan entre capas de arcillas y arenas. Cabe mencionar que algunas perforaciones han atravesado capas de travertino de origen termal, y sectores de sedimentos clásticos cementados por calcita. Los estratos de sedimentos clásticos comúnmente presentan cristales de yeso (selenita) y ulexita.

Desde el punto de vista estructural la cuenca de la salina Olaroz-Cauchari es de tipo *basin and range*, alargada en sentido norte-sur y flanqueada al este y oeste por fallas. Internamente en el centro de la cuenca King (2010) ha identificado varias fallas

normales menores, también orientadas norte-sur y que generan pequeños *horst* y *graben*. Cortan todo este sistema fallas inversas, de orientación SSE, con un fuerte componente lateral dextrógiro, asociadas al lineamiento Calama-Olacapato-El Toro que flanquea la cuenca por el sur (King 2010).

3.2. CUENCA SALAR CENTENARIO-PASTOS GRANDES

Es una cuenca alargada en sentido NNE de 134 km de largo y un ancho medio de 33 km, ocupando una superficie de 4.453 km². Se localiza mayormente en la provincia de Salta y el extremo sureste ingresa a la provincia de Catamarca. Se reconocen cinco depocentros, llamados salar de Pastos Grandes que cuenta con una laguna, salar de Pozuelos, salar Centenario, salar Ratones y salar Diablillos. Todos estos salares han sido explotados para la extracción de boratos y en la última década fueron explorados por litio. En base a los reportes técnicos elaborados por las respectivas compañías mineras los recursos medidos + indicados + inferidos de la cuenca ascenderían a 3,82 Mt Li, 28 Mt potasa y 4,5 Mt B₂O₃. Las salmueras de esta cuenca presentan leyes que varían entre 550 y 460 mg L⁻¹ Li, 640 a 740 mg L⁻¹ B y 4.770 a 6.200 mg L⁻¹ K (Braun *et al.* 2011, Reidel 2016, Hains y Fourie 2018a, Lefavre y Henchel 2019).

La cuenca está limitada al este por unidades metasedimentarias neoproterozoicas que consisten en pizarras y filitas. Parte del borde norte y oeste de la cuenca presenta afloramientos de turbiditas del Ordovícico Inferior con lutitas y areniscas. Estas unidades están intruidas por pórfiros dacíticos, granitos y granodioritas del Ordovícico Superior. También en el sector norte y parte del borde occidental afloran sedimentitas continentales neógenas, caracterizadas por estratos rojos, tobas y mantos de evaporitas (halita, boratos, yeso). El límite sur de la cuenca está principalmente formado por secuencias volcánicas del Mioceno superior constituidas por coladas de lava dacítica e intrusiones subvolcánicas, además de tobas e ignimbritas dacíticas.

El relleno de la cuenca se caracteriza por una capa superior de costra salina delgada (< 15 m) seguida de una secuencia formada por niveles y mantos de halita intercalados con estratos de arena, pelitas y arcillas (Braun *et al.* 2011, Hains 2017). Por debajo de esta secuencia se incrementa la participación clástica con mantos potentes de arena y niveles de halita separados por conglomerados. En el salar Centenario se ha reconocido un cuerpo de

halita, potente, rodeado por sedimentos clásticos de grano fino (Orberger *et al.* 2015). En el salar de Pastos Grandes la secuencia descrita se identificó hasta los 600 m de profundidad sin alcanzar el basamento de la cuenca el cual se estimó, por métodos geofísicos, en 800 m (Hains y Fourie 2018a). En el salar de Diablillos, el basamento se alcanzó a los 264 m de profundidad (Braun *et al.* 2011).

3.3. CUENCA DEL SALAR DEL HOMBRE MUERTO

Es una cuenca extensa de geometría alargada en dirección NNO con un eje mayor de aproximadamente 113 km y un ancho medio de 42 km, totalizando un área de 4.823 km². La cuenca se desarrolla esencialmente en territorio de la provincia de Catamarca, estando una porción pequeña del extremo norte en la provincia de Salta.

Esta cuenca fue la primera productora en Argentina de carbonato y cloruro de litio a partir de salmueras, a través de la mina Fénix operada actualmente por Minera del Altiplano S.A. (Livent Corporation). En 2021 la producción fue alrededor de 20.000 t CLE y con una proyección de capacidad instalada para 2021 de 40.000 t/a CLE. Asimismo, en la cuenca hay otros proyectos de Li-K con diferente grado de desarrollo entre ellos Sal de Vida, de la empresa Galaxy Resources Limited, con estudios de factibilidad finalizados, el proyecto Salar del Hombre Muerto Norte (NRG Metals Inc.) con evaluación económica preliminar y Sal de Oro (POSCO) en exploración avanzada.

Esta cuenca representa uno de los depósitos de litio más importantes de Argentina, con 2,7 Mt Li de recursos medidos + indicados + inferidos además de 30,6 Mt potasa. Las salmueras presentan leyes promedio de 691 mg L⁻¹ Li y 7.132 mg L⁻¹ K (Galaxy 2018, Goodwin *et al.* 2019).

La cuenca Salar del Hombre Muerto se localiza en el borde oriental de la Puna, su límite oriental está integrado por esquistos y gneises con intercalaciones de calizas y anfibolitas de edad neoproterozoica del ámbito de Sierras Pampeanas. El depocentro de la cuenca se localiza en su extremo norte donde aflora un sector de sedimentitas paleozoicas de dirección N-S, denominado Farallón Catal, que divide el salar en dos subcuencas definidas como Occidental y Oriental (Vinante y Alonso 2006). En este sector norte de la cuenca también se destacan los afloramientos de sedimentitas neógenas, con importantes estratos de rocas clásticas continentales y mantos

evaporíticos de boratos, halita y yeso subordinado (Alonso 1999b). En el sector central y sur de la cuenca los afloramientos más conspicuos son lavas y piroclastitas neógenas, fundamentalmente depósitos de la actividad de la caldera Cerro Galán (Hongn y Seggiaro 2001).

La superficie del salar del Hombre Muerto está representada en su mayor extensión por una costra salina, rugosa, compuesta principalmente por cloruro de sodio acompañado por cantidades subordinadas de boratos y sulfatos de sodio y calcio. Intercalándose en esta secuencia y también en los bordes y sectores marginales del salar afloran niveles arenosos, limosos y arcillosos, generalmente saturados en sales sódicas. En la subcuenca Occidental, en el sector central del salar, se encuentra un potente cuerpo salino con escasos niveles de sedimentos clásticos. La subcuenca Oriental presenta en la superficie una capa de sal de poco espesor que corona una secuencia clástica, de arena, limos y arcillas intercaladas con niveles y capas de evaporitas y tobas.

3.4. CUENCA DEL SALAR DEL RINCÓN

Es una cuenca de geometría rectangular, orientada en sentido NNE, de 63 km de largo y aproximadamente 37 km de ancho cubriendo una superficie de 2.376 km². Se localiza en el extremo occidental de la Puna, ocupa territorios de las provincias de Jujuy y Salta. La cuenca tiene un depocentro donde se ha formado el salar del Rincón el cual ha sido motivo de importantes campañas exploratorias para la determinación de recursos de litio los cuales ascienden a 1,63 Mt Li con una ley media de 398 mg L⁻¹ Li (Enirgi Group 2016, PepinNini Lithium 2018).

La cuenca está limitada al este por una sierra de orientación NNO con afloramientos de sedimentitas ordovícicas y reducidos afloramientos de sedimentos continentales paleógenos. Al oeste por volcanitas miocenas y en el sector austral cierran la cuenca los volcanes neógenos Tul - Tul, del Medio y Pocitos y hacia el norte el piedemonte de los ríos Huaitiquina, Pompón y Catua.

El salar se caracteriza por la presencia de un cuerpo halítico desde la superficie y hasta los 50 m de profundidad, acompañada por yeso, mirabilita, thenardita, glauberita, hidroglauberita, eugsterita, calcita y ulexita (Ovejero Toledo *et al.* 2009). La base está definida por la presencia de un lecho arenoso de color negro. En la masa salina se han reconocido niveles de sedimentos clásticos finos.

3.5. CUENCA DE LA LAGUNA VERDE

Se localiza en el extremo suroeste de la provincia de Catamarca, presenta geometría elipsoidal con el eje mayor N-S de aproximadamente 75 km de longitud y un ancho máximo de 35 km, siendo su superficie de 2.639 km². Presenta un depocentro alargado en dirección NO conformado en su extremo norte por la laguna Tres Quebradas, en la parte central por la laguna Verde y en el extremo sur por la laguna Negra, a su vez las lagunas están separadas por salares. Los principales cauces de la cuenca son los ríos Salado, Tres Quebradas, Valle Ancho y Piscis. Los trabajos exploratorios realizados en esta cuenca permitieron cuantificar recursos medido + indicados + inferidos de 1,29 Mt Li (ley media 630 mg L⁻¹ Li), 23 Mt KCl (ley media 5.970 mg L⁻¹ K) y 1,7 Mt B (ley media 830 mg L⁻¹ B) (King y Zandonai 2019).

Las divisorias de aguas de la cuenca se caracterizan por ser cadenas montañosas muy altas con picos que superan los 6.000 m s.n.m. Las partes altas de la cuenca están conformadas por depósitos pirolásticos y lávicos del cenozoico mientras que en sectores más internos de la cuenca afloran volcanitas pérmicas (andesitas, riolitas, basaltos, brechas) parcialmente cubiertas por depósitos clásticos continentales con intercalaciones de evaporitas del Paleógeno-Mioceno y lavas andesíticas, basálticas y dacíticas del Plioceno. En el extremo sureste de la cuenca afloran secuencias metasedimentarias ordovícicas.

El relleno de la cuenca está integrado por una base de fanglomerado, areniscas medias a gruesas y brechas sedimentarias cubiertas por un manto de areniscas y pelitas. Por encima se apoya un cuerpo de halita masivo, con una base de grano grueso y escasa porosidad seguido por halita de grano medio a grueso y porosidad moderada a alta. Continúan en la secuencia areniscas rojas, areniscas limosas y lutitas que infrayacen a un importante cuerpo de halita muy poroso, que en la parte central del salar aflora y alcanza los 89 m de potencia (King y Zandonai 2019).

3.6. CUENCA DEL SALAR LLULLAILLACO

Es una cuenca de geometría rectangular, con un eje mayor orientado en dirección NE de aproximadamente 83 km, un ancho medio de 34 km y cubre una superficie de 2.474 km². Se localiza en el oeste de la provincia de Salta, presenta un depocentro representado por el salar homónimo y el principal

curso de agua que descarga en la cuenca es el arroyo Callejón de Quebrada del Agua. En los últimos años ha sido explorada por litio en salmueras con una cuantificación de recursos medidos + indicados + inferidos de 0,97 Mt Li (ley media de 319 mg L⁻¹ Li) y 59 Mt potasa (ley media de 10.050 mg L⁻¹ K) (Sawyer *et al.* 2020).

La geología de la cuenca está caracterizada por extensos afloramientos en el borde oriental de piroclastitas y lavas andesíticas del Oligoceno y Mioceno inferior, mientras que el borde occidental está integrado mayoritariamente por lavas andesíticas y dacíticas y piroclastitas del Mioceno superior. Los afloramientos de ambos arcos volcánicos se unen sobre el borde sur de la cuenca. En la parte central y hacia el norte se destacan los afloramientos de piroclastitas, lavas y domos asociados a sistemas de estartovolcanes del Plioceno inferior.

El relleno de la cuenca, descrito en los reportes técnicos de la compañía que explora el salar (Sawyer *et al.* 2020), se caracteriza por un cuerpo salino de estructura masiva, textura porosa en la parte superior y compacta en la parte inferior, compuesto mayoritariamente por halita con sulfatos subordinados e intercalaciones de niveles piroclásticos muy delgados. Este cuerpo aflora y presenta, según los sectores del salar, espesores variables entre 30 y 100 metros. Debajo de este cuerpo salino se destaca un manto de lavas andesíticas, aglomerados volcánicos y piroclastitas con escasas intercalaciones de lentes de halita. Esta unidad presenta espesores variables entre 50 y 150 metros. En algunas perforaciones se ha identificado un cuerpo de halita a profundidad de aproximadamente 120 m, con geometría aparentemente lenticular, estructura masiva y textura compacta de espesor máximo de 80 metros. La base de la cuenca está formada por rocas volcánicas del Terciario y el espesor total de la secuencia se estima, en los sectores más profundos, de 250 metros.

3.7. CUENCA DE CARACHI PAMPA

Se localiza en la provincia de Catamarca, presenta una geometría rectangular de orientación NNE con un eje mayor de 149 km, un ancho medio de 64 km y una superficie de 9.494 km². Presenta dos depocentros definidos por las lagunas Antofagasta y Carachi Pampa, esta última rodeada por un salar. Los principales cauces de la cuenca son los arroyos Carbones, Calalaste, Molla, Nacimiento, Beltrán, Concha Argolla, Toconquis, Del Corral, Miriguaica, Las Pitás, Ilanco, Colorado, El Peñón, Pirica y

Pánfilo. La actividad exploratoria desarrollada en estos últimos años ha permitido la cuantificación de recursos en la región del salar totalizando recursos inferidos + indicados de 0,82 Mt Li (ley 211 mg L⁻¹ Li) y 30,7 Mt KCl (ley 4.380 mg L⁻¹ K) (Lake Resources 2018).

La cuenca está limitada al este por serranías formadas por rocas ígneas y metamórficas del Neoproterozoico-Cámbrico y al oeste por un sistema montañoso donde afloran sedimentitas ordovícicas. Los extremos norte y sur están cerrados por importantes afloramientos de lavas e ignimbritas cenozoicas. Dentro de la cuenca, y bisecando el salar, se encuentra un cono basáltico e intrusivos asociados del Plioceno.

El relleno de la cuenca se caracteriza por un predominio de arena con intercalaciones de limos y arcillas y muy escasos niveles de halita. A lo largo de la secuencia se han reconocido niveles de ignimbritas y tobas. Toda esta secuencia alcanza los 300 metros de potencia, siendo la base mantos potentes de ignimbritas y conglomerados cementados. Se han realizado perforaciones hasta 400 metros de profundidad sin alcanzar el basamento de la cuenca el cual ha sido identificado por métodos geofísicos a los 700 metros de profundidad (Lake Resources 2018).

3.8. CUENCA DE ARIZARO-RÍO GRANDE

Es una de las cuencas más grandes de la Puna, presenta geometría rectangular con un eje mayor de orientación NE de aproximadamente 178 km y un eje menor de 59 km de longitud. La cuenca se ubica mayoritariamente en la provincia de Salta y su extremo sur ingresa a la provincia de Catamarca, cubriendo un área de aproximadamente 10.629 Km². Presenta dos salares, uno mayor denominado Arizaro ubicado en la parte central y uno menor llamado Río Grande ubicado en el extremo sur, conocido históricamente por sus recursos de sulfatos de sodio (Alonso 1999a). Los recursos de la cuenca Arizaro-Río Grande, reportados para el salar de Río Grande, son de 0,41 Mt de Li (ley promedio de 374 mg L⁻¹ Li) (Hains y Fourie 2018b). Cabe mencionar que, si bien el salar de Arizaro ha sido explorado con cierta intensidad, no tiene reportes de recursos siendo la única información disponible la composición química de salmueras someras, donde la concentración media de Li es de 191 mg L⁻¹ y la concentración media de K es de 3.655 mg L⁻¹ K (López Steinmetz *et al.* 2020).

El borde oriental de la cuenca está definido por la sierra de Macón, formada por granitoides ordovícicos cubiertos parcialmente por una secuencia sedimentaria continental del Mioceno inferior a medio. Al oeste de la cuenca afloran granitoides ordovícicos y granitos pérmicos, parcialmente cubiertos por sedimentitas continentales del Eoceno y secuencias lávicas y piroclásticas dacíticas del Eoceno-Oligoceno. En los extremos norte y sur de la cuenca afloran principalmente rocas volcánicas producto de la actividad efusiva desde el Oligoceno al Cuaternario (Zappettini y Blasco 2001, DeCelles *et al.* 2015).

La cuenca tiene una historia de aproximadamente 21 Ma en los cuales hasta los 9 Ma fue rellenada por más de 3,5 km de sedimentos eólicos, aluviales, fluviales y lacustres, además de tobas de caída de ceniza del arco magmático andino (DeCelle *et al.* 2015). A partir de los 9 Ma, la intensa compresión generó acortamiento e inversión de la topografía (Sierra de Macón).

En el salar de Arizaro el relleno cuaternario está caracterizado por una secuencia continental clástica con intercalaciones de mantos de halita y un cuerpo de halita de aproximadamente 100 m de potencia (Alonso 1999a). En el salar Río Grande el relleno del depocentro lo compone esencialmente un cuerpo de halita de hasta 100 m de potencia con diferente grado de competencia de la evaporita e intercalaciones menores de niveles de yeso, arcillas y limos (Hains y Fourie 2018b).

4. FACTORES DE IMPORTANCIA EN LA GÉNESIS DE LOS DEPÓSITOS DE LITIO EN SALMUERAS DE ARGENTINA

Las condiciones esenciales para la formación de depósitos de litio en salmueras continentales son: (1) clima árido; (2) cuenca cerrada que contiene un salar; (3) actividad ígnea y/o hidrotermal asociada; (4) subsidencia tectónica; (5) fuentes de Li adecuadas; y (6) tiempo suficiente para concentrar Li en la salmuera (Bradley *et al.* 2013). A continuación, se detallan las particularidades de cada una de estas características además de la “permeabilidad cortical” como un nuevo factor que consideramos determinante en el ámbito de la Puna, en la distribución y conformación de un depósito grande a muy grande de litio en salmueras.

Clima árido: el orógeno andino constituye el relieve tectónico más grande presente en la superficie

de la Tierra (13 km en vertical), evolucionó a partir de un proceso de crecimiento escalonado donde se destacan dos pulsos, en el Eoceno superior y el Mioceno medio, concomitantes con el crecimiento acelerado del orógeno, la formación de peneplanicies y eventos de rápido aumento de la aridez (Armijo *et al.* 2015). En consecuencia, en el Altiplano-Puna las condiciones de aridez imperan desde los 33 Ma y las de hiperaridez desde los 10 Ma. En particular la Puna presenta precipitación media anual menor a 100 mm en el oeste y 200 mm en el sector este, temperatura media anual del aire de aproximadamente 2°C en la porción austral y 5°C en el sector norte y condiciones de hiperaridez en la mayoría de su extensión (Bianchi y Cravero 2010). Estas condiciones climáticas a lo largo de millones de años han favorecido la formación de salares en las cuencas cerradas con concentraciones muy elevadas de Li, B y K en las salmueras subyacentes.

Cuenca cerrada: a diferencia de lo que se observa en el Altiplano chileno (salar de Atacama) y boliviano (salar de Uyuni) donde el ambiente está dominado por escasas cuencas con salares inmensos y cuerpos salinos gigantes en subsuelo, en la Puna argentina se formaron numerosas cuencas con salares de extensión más reducida. Consisten en cuencas cerradas, estructuradas a partir del Mioceno medio y en su mayoría rellenas por una secuencia de sedimentos clásticos intercalados con niveles de tobas, ignimbritas y evaporitas (halita) y sólo en algunos salares con cuerpos de sal de cientos de metros de potencia. A partir de la información de perforaciones de exploración y datos geofísicos se estima que la mayoría de las cuencas supera los 700 m de potencia y contienen numerosos acuíferos con salmueras. El Cuadro 1 muestra una clasificación de los salares en la región de la Puna en términos de “inmaduro clástico” o “maduro halita”, según Houston *et al.* (2011), utilizando la cantidad relativa de sedimento clástico versus evaporítico. Como se desprende de dicho Cuadro, los grandes depósitos de litio en salmueras de la Puna se encuentran en cuencas con acuíferos clásticos como evaporíticos. A grandes rasgos, los salares inmaduros están ubicados a lo largo de la parte central de la Puna, donde las condiciones áridas son menores (Fig. 5a), mientras que los salares maduros se ubican al oeste donde prevalecen condiciones climáticas hiperáridas (Fig. 5a).

Actividad ígnea: los valores elevados de flujo térmico (Ibarra y Prezzi 2019), en coincidencia con anomalías de conductividad, velocidad y atenuación sísmica, sugieren la presencia en gran parte de la

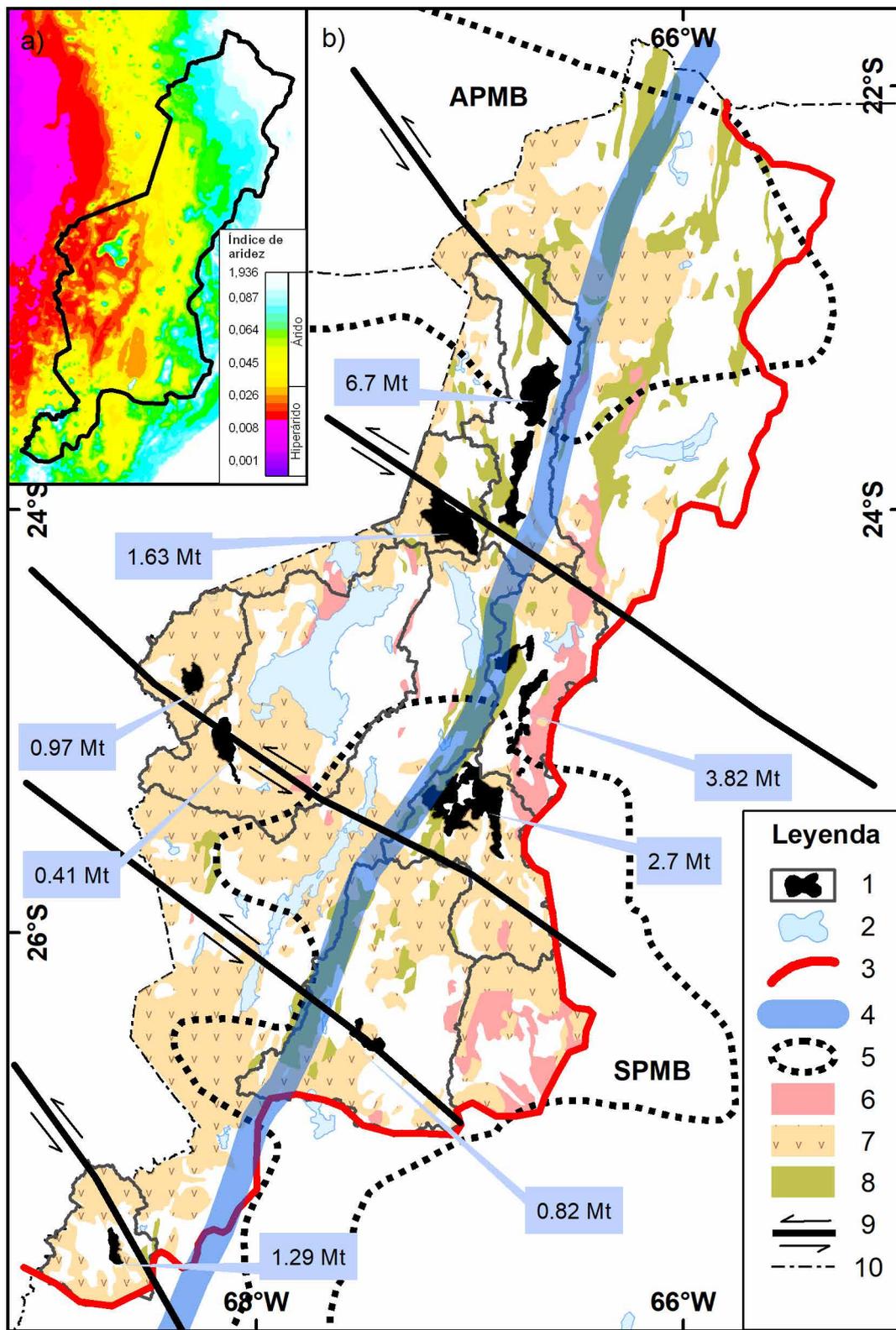


Figura 5. a) Mapa del índice de aridez en la Puna (modificado según Bianchi y Cravero 2010). b) Distribución de los recursos de litio y su relación espacial con las principales discontinuidades corticales de la Puna. 1) Salares de cuencas con depósitos grandes y muy grandes de litio en salmueras, 2) Salares y lagunas, 3) Límite de la Puna, 4) Discontinuidad cortical con rumbo NNE (Álvarez 2020), 5) APMB: Cuerpo de Magma Altiplano Puna (Zandt *et al.* 2003), SPMB: Cuerpo de Magma de la Puna del Sur (Bianchi *et al.* 2013), 6) Basamento ígneo metamórfico del Neoproterozoico-Cámbrico, 7) Rocas volcánicas del Cenozoico, 8) Depósitos marinos del Ordovícico, 9) Fallas transversales de rumbo NO-SE, 10) Límite internacional Argentina-Chile-Bolivia.

Puna y del Altiplano de Bolivia, de una capa fundida en niveles intermedios de la corteza conocida como Cuerpo de Magma del Altiplano Puna (APMB) (Chmielowski *et al.* 1999, Zandt *et al.* 2003) y Cuerpo de Magma de la Puna del Sur (Bianchi *et al.* 2013). El gradiente térmico anómalo de la corteza en la Puna, sumado a dominios estructurales con fallas profundas, facilitaron la movilidad de flujos magmáticos configurando un contexto favorable para la migración y concentración hacia la superficie de fluidos enriquecidos en minerales y zonas de alteración hidrotermal (Chernicoff *et al.* 2002). Esta actividad del arco magmático activo favorecería la extracción de Li desde la roca fuente mediante procesos de lixiviación en sistemas hidrotermales.

Subsidencia tectónica: el engrosamiento cortical y la elevación superficial de la Puna generó como respuesta un régimen extensional de colapso orogénico evidenciado por el desarrollo de fallas normales en las proximidades del arco volcánico (Giambiagi *et al.* 2016). De esta manera se diferencian cuencas evaporíticas de intraarco, con regímenes de esfuerzos extensionales entre las que se destacan Río Grande, Lullailaco, Olaroz - Cauchari y Rincón, de las cuencas de piggy back delimitadas por corrimientos desarrolladas en la parte central de la Puna donde se disponen las cuencas de Hombre Muerto y Centenario-Pastos Grandes (Allmendinger *et al.* 1997, Hongn *et al.* 2010).

Fuentes de Li adecuadas: el basamento paleozoico de la Puna presenta contenido promedio de Li significativamente por encima del promedio de abundancia de la corteza superior (Meixner *et al.* 2019). Asimismo, el abundante magmatismo cenozoico que caracteriza al Altiplano-Puna presenta para un mismo grado de diferenciación, contenidos más altos de Li que los registrados en rocas volcánicas de la Zona Volcánica Norte (NVZ) y Zona Volcánica Sur (SVZ) del orógeno andino (Meixner *et al.* 2019). Todas estas características definirían al Altiplano-Puna como una provincia o dominio que explicaría la fuente primaria de litio. Los posibles mecanismos de extracción de Li tanto de las rocas del basamento paleozoico como de las vulcanitas y piroclastitas cenozoicas son la (i) lixiviación en sistemas hidrotermales someros del arco magmático, y (ii) meteorización química y lixiviación de agua en o cerca de la superficie. Para la Puna varios autores señalan que las ignimbritas del Cenozoico serían la principal roca fuente de Li y la meteorización química el mecanismo dominante (Risacher *et al.* 2011, Vinante y Alonso 2006, Meixner *et al.* 2021) mientras que otros destacan el rol importante que jugarían el hidrotermalismo y su interacción con las rocas circundantes

(Peralta Arnold *et al.* 2017, López Steinmetz 2017, López Steinmetz *et al.* 2018). Es importante resaltar que las cuencas con depósitos grandes y muy grandes de litio presentan afloramientos de rocas lávicas y piroclásticas cenozoicas que en ocasiones alcanzan los 800 km² totales mientras que en otras cuencas supera los 4.000 km² (Cuadro 1). Estos datos muestran que no existe una correlación entre la superficie de rocas volcánicas cenozoicas aflorantes y el tonelaje de litio cuantificado en la cuenca.

Permeabilidad cortical: la relación entre la permeabilidad y la profundidad es fundamental para explicar la dinámica del agua subterránea en la corteza poco profunda (< 2,5 km). La permeabilidad en la roca cristalina es predominantemente secundaria y está controlada por la densidad, apertura y conectividad de fracturas (Berkowitz 2002, Neuman 2005, Ingebritsen *et al.* 2006). A su vez, todos estos parámetros son función de la litología, el historial de deformaciones y el entorno tectónico actual (Ranjram *et al.* 2015). A partir de resultados obtenidos por Ranjram *et al.* (2015) se asume que la roca cristalina tiene un control débil sobre las relaciones de permeabilidad-profundidad en la superficie cercana en comparación con la configuración tectónica que parece ser un control más fuerte. En la Puna sobresalen tres elementos estructurales: (1) Sistema de corrimientos meridianos, que corresponden a fallas paleozoicas y mesozoicas reactivadas durante el acortamiento andino (Mon y Salfity 1995, Allmendinger *et al.* 1997, Prezzi *et al.* 1998, Perkins *et al.* 2016), (2) Fallas transversales NO-SE que cortan los corrimientos andinos y en cuya traza se disponen cadenas volcánicas y emplazamiento de mega calderas (Viramonte *et al.* 1984b, Salfity 1985, Guzmán *et al.* 2017 y trabajos allí citados) y (3) discontinuidad cortical NNE de primer orden, identificada a partir de datos de magnetometría aérea como un rasgo regional en la grilla de primera derivada vertical (Chernicoff *et al.* 2002 Álvarez 2020). La distribución de los depósitos grandes a muy grandes de litio en salmuera alrededor del lineamiento de rumbo NNE (Fig. 5b), particularmente en los salares próximos a la intersección con fallas transversales NO-SE, proporciona evidencia de control estructural en estos depósitos. Consideramos que esta discontinuidad cortical ejerce un fuerte control sobre la permeabilidad de la corteza de la Puna permitiendo, principalmente en los sectores de intersección con fallas transversales NO-SE, una mayor permeabilidad para la circulación e interacción de fluidos de origen magmático (hidrotermal) con aguas meteóricas, además de favorecer las interacciones fluido-roca (lixiviación).

5. CONSIDERACIONES FINALES

- 1) El noroeste de Argentina (región Puna), el norte de Chile y el suroeste de Bolivia ocupan una porción de la corteza terrestre con contenidos anómalos de litio, lo que define a este sector como una provincia o dominio litífero y que se puede circunscribir al área conocida informalmente como "Triángulo del Litio".
- 2) Argentina es el segundo país con mayores recursos de litio identificados (18,35 Mt Li) del mundo. Estos recursos se encuentran en ocho cuencas con salares, de los cuales el 72% están contenidos en las cuencas de Olaroz-Cauchari, Centenario-Pastos Grandes y Hombre Muerto. Si bien en la Puna se reconocen 23 cuencas cerradas, la mayoría de ellas con salares, sólo ocho tienen concentraciones económicas de litio ya que son depósitos de litio grandes a muy grandes.
- 3) En la región de la Puna, alrededor del 70% de los recursos de litio identificados se encuentran en salmueras alojadas en acuíferos clásticos y el 30% en cuerpos de sal. La distribución de recursos en diferentes tipos de salares indicaría que la composición litológica y geoquímica de los acuíferos no son factores de control en relación a la ley-tonelaje de los depósitos grandes y muy grandes de litio en salmueras.
- 4) La Puna presenta extensos afloramientos de rocas con contenidos anómalos de Li (basamento paleozoico y rocas volcánicas cenozoicas). Varios autores han postulado que las ignimbritas del Cenozoico son la principal fuente de Li y que la meteorización química es el mecanismo dominante de extracción. Sin embargo, los afloramientos de este tipo de rocas en las cuencas con depósitos grandes y muy grandes de litio en salmueras oscilan entre 800 y 4.600 km². Estos datos muestran que no existe correspondencia entre el área de afloramientos de roca volcánica cenozoica en la cuenca y el tonelaje de Li cuantificado, siendo también probable que tanto el basamento paleozoico como la lixiviación en sistemas hidrotermales someros jueguen un papel importante como fuente de litio y mecanismo de extracción, respectivamente.
- 5) La mayoría de los depósitos grandes y muy grandes de litio en salmueras de la Puna se distribuyen a lo largo de la discontinuidad cortical de extensión NNE, evidenciada por un rasgo magnético lineal regional, constituyendo un factor de control estructural notable en este tipo de depósitos.
- 6) Se interpreta que en la Puna, las zonas de intersección entre la discontinuidad cortical de extensión NNE y las fallas transversales NO-SE son áreas con alta permeabilidad de la corteza somera, que favorecerían el desarrollo de depósitos grandes y muy grandes de litio en salmuera. La permeabilidad en la corteza somera jugaría un rol crucial en la formación de estos depósitos ya que permitiría la disponibilidad de litio a partir de una mayor circulación de fluidos magmáticos y aguas meteóricas y su interacción con rocas de niveles someros de la corteza (Fig. 6).
- 7) Estudios futuros sobre densidad, apertura y conectividad de fracturas permitirán desarrollar herramientas prospectivas que favorezcan el descubrimiento de nuevos depósitos económicos de litio en salmueras.

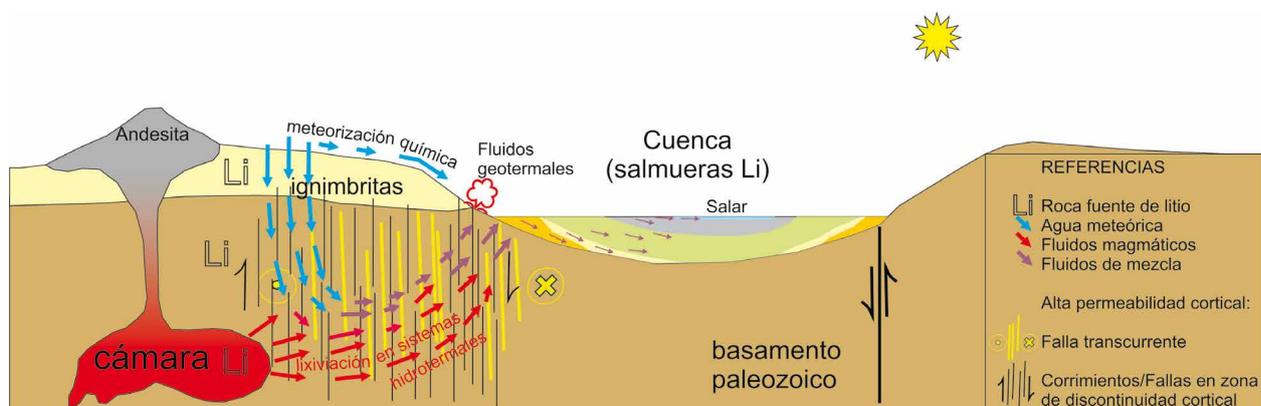


Figura 6. Esquema del modelo de depósito de litio en salmueras de cuencas cerradas, para el ámbito de la Puna, indicando la interacción de los factores geológicos y climáticos necesarios para su génesis.

6. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Aceñolaza, F.G., Benedetto, J.L., Salfity, J.A. 1973. El Neopaleozoico de la Puna Argentina: su fauna y relación con áreas vecinas. Simposio Internacional sobre os sistemas Carbonífero e Permiano do América do Sul (Sao Paulo, 1972). Academia Brasileira de Ciências, Anais 44 (Suplemento): 5-20.
- Acocella, V., Gioncada, A., Omarini, R., Riller, U., Mazzuoli, R., Vezzoli, L. 2011. Tectonomagmatic characteristics of the back-arc portion of the Calama–Olacapato–El Toro Fault Zone, Central Andes. *Tectonics* 30: TC 3005.
- Allmendinger, R.W. 1986. Tectonic development, southeastern border of the Puna Plateau, northwestern Argentine Andes. *Geological Society of America Bulletin* 97(9): 1070-1082.
- Allmendinger, R.W., Ramos, V.A., Jordan, T.E., Palma, M., Isacks, B.L. 1983. Paleogeography and Andean structural geometry, northwest Argentina. *Tectonics* 2: 1–16.
- Allmendinger, R.W., Jordan, T., Kay, S., Isacks, B. 1997. The evolution of the Altiplano – Puna Plateau of the central Andes. *Annual Review Earth Planet Sciences* 25: 139–174.
- Alonso, R.N. 1999a. Los salares de la Puna y sus recursos evaporíticos, Jujuy, Salta y Catamarca. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E. O. Zappettini). Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Anales 35: 1907-1021, Buenos Aires.
- Alonso, R. N., 1999b. Boratos terciarios de La Puna, Jujuy, Salta y Catamarca. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E. O. Zappettini). Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Anales 35: 1779-1826, Buenos Aires.
- Alonso, R.N., Jordan, T.E., Tabbutt, K.T., Vandervoort, D.S. 1991. Giant evaporite belts of the Neogene central Andes. *Geology* 19(4): 401–404.
- Alonso, R.N., Carrapa, B., Coutand, I., Haschke, M., Hilley, G.E. 2006. Tectonics, climate, and landscape evolution of the southern Central Andes: the Argentine Puna Plateau and adjacent regions between 22° and 28°S lat. In Oncken, O., Chong, G., Franz, G., Giese, P., Gotze, H.J. (Eds.). *The Andes Active Subduction Orogeny*. *Frontiers in Earth Sciences*: 265–283. Springer, Berlin.
- Armijo, R., Lacassin, R., Coudurier-Curveur, A., Carrizo, D. 2015. Coupled tectonic evolution of Andean orogeny and global climate. *Earth Science Reviews* 143: 1-35.
- Berkowitz, B. 2002. Characterizing flow and transport in fractured geological media: a review. *Advances in Water Resources* 25: 861–884.
- Bianchi, A.R., Cravero, S.A.C. 2010. Atlas climático digital de la República Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. <https://inta.gob.ar/documentos/atlas-climatico-digital-de-la-republica-argentina>.
- Bianchi, M., Heit, B., Jakovlev, A., Yuan, X., Kay, S.M., Sandvol, E., Alonso, R.N., Coira, B., Brown, L., Kind, R. Comte D. 2013. Teleseismic tomography of the southern Puna plateau in Argentina and adjacent regions: *Tectonophysics* 586: 65–83. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.11.016>.
- Bradley, D., Munk, L., Jochens, H., Hynek, S., Labay, K. 2013. A preliminary deposit model for lithium brines. United State Geological Survey, Open-File Report 2013–1006, 6 pp.
- Burga, D., Burga, E., Genck, W., Weber, D. 2019. NI 43-101 Technical report and Updated Mineral Resource Estimate for the Cauchari-Olaroz Project, Jujuy Province, Argentina: report prepared for Lithium Americas, March 1, 2019.
- Braun, T., Cinq-Mars, B., Larrondo, P. Ugorets, V., 2011. NI 43-101 Technical Report and Preliminary Economic Assessment Salar de Diablillos Project, Salta, Argentina: report prepared for Rodinia Lithium, Inc., December 22, 2011.
- Chernicoff, C.J., Richards, J.P., Zappettini, E.O. 2002. Crustal lineament control on magmatism and mineralization in northwestern Argentina: geological, geophysical, and remote sensing evidence. *Ore Geology Reviews* 21: 127 – 155.
- Chmielowski, J., Zandt, G., Haberland, C. 1999. The central Andean Altiplano-Puna magma body. *Geophysical Research Letters* 26(6): 783-786.
- Costa, C.H., Audemard, F.A., Bezerra, F.H.R., Lavenu, A., Machette, M.N., Paris, G. 2006. Main Quaternary deformation in South America: An overview. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61 (4): 461-479.
- DeCelles, P.G., Carrapa, B., Horton, B.K., McNabb, J., Gehrels, G.E., Boyd, J. 2015. The Miocene Arizaro Basin, central Andean hinterland: Response to partial lithosphere removal?. In DeCelles, P.G., Ducea, M.N., Carrapa, B., Kapp, P.A. (Eds.). *Geodynamics of a Cordilleran Orogenic System: The Central Andes of Argentina and Northern Chile*. *Geological Society of America Memoir* 212, 359–386 pp, doi:10.1130/2015.1212(18).
- Del Papa, C., Hongn, F., Payrola Bosio, P., Powell, J., Deraco, V., Herrera, C. 2013. Relaciones Estrati-

- gráficas de las Formaciones Quebrada de los Colorados y Angastaco (Paleógeno-Neógeno), Valles Calchaquíes, Salta (Argentina): significado en el análisis de la cuenca del Grupo Payogastilla. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 20(1): 51-64.
- Del Papa, C., Petrinovic, I.A. 2017. The development of miocene extensional and short-lived basin in the Andean broken foreland: The Conglomerado Los Patos, Northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 73: 191–201.
- Enirgi Group 2016. Enirgi Group announces positive results of definitive feasibility study for Salar Del Rincón Lithium Project. JCNNewswire, July 7, 2016 <https://www.jcnnewswire.com/pressrelease/31026/2/Enirgi-Group-Announces-Positive-Results-of-Definitive-Feasibility-Study-for-Salar-Del-Rincon-Lithium>.
- Galaxy 2018. Sal De Vida - Updated Feasibility Study. Asx Announcement / Media Release, May 15, 2018. https://www.miningdataonline.com/reports/Sal_de_Vida_FS_2018.pdf
- Giambiagi, L., Alvarez, P., Spagnotto, S. 2016. Temporal variation of the stress field during the construction of the central Andes: Constrains from the volcanic arc region (22–26°S), Western Cordillera, Chile, during the last 20 Ma. *Tectonics* 35: 2014–2033. doi:10.1002/2016TC004201.
- Giordano, G., Pinton, A., Cianfarra, P., Baez, W., Chiodi, A., Viramonte, J., Norini, G., Gropelli, G. 2013. Structural control on geothermal circulation in the Cerro Tuzgle–Tocomar geothermal volcanic area (Puna plateau, Argentina). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 249: 77–94.
- Goodwin, R., Mezei, A., Embree, K. Rosko, M. 2019. NI43-101 Technical report and Preliminary economic assessment report for the Hombre Muerto Norte project, Salta province, Argentina: report prepared for NRG Metals Inc., June 3, 2019.
- Grier, M.E., Salfity, J.A., Allmendinger, R.W. 1991. Andean reactivation of the Cretaceous Salta rift, northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 4: 351–372.
- Guzmán, S., Grosse, P., Martí, J., Petrinovic, I., Seggiaro, R. 2017. Calderas cenozoicas argentinas de la zona volcánica central de los Andes – procesos eruptivos y dinámica: una revisión. En: Muruaga, C.M., Grosse, P. (Eds.). *Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales del NOA. XX Congreso Geológico Argentino (Tucumán)*, Relatorio: 518-547.
- Hains, D.H. 2017. NI 43-101 Technical report and Review of Four Lithium Exploration Projects in Argentina: report prepared for LSC Lithium, January 27, 2017.
- Hains, D.H., Fourie L.F. 2018a. NI 43-101 Technical Report on Pastos Grandes lithium project: report prepared for LSC Lithium, October 19, 2018.
- Hains, D.H., Fourie, L.F. 2018b. NI 43-101 Technical Report on the Salar de Río Grande project: report prepared for LSC Lithium, February 15, 2018.
- Hongn, F.D., Seggiaro, R. E. 2001. Hoja Geológica 2566-III, Cachi. Provincias de Salta y Catamarca. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 248, 87 pp. Buenos Aires.
- Hongn, F.D., Del Papa, C., Powell, J., Petrinovic, I., Mon, R., Deraco, V. 2007. Middle Eocene deformation and sedimentation in the Puna-Eastern Cordillera transition (23°-26°S): Control by preexisting heterogeneities on the pattern of initial Andean shortening. *Geology* 35(3): 271-274.
- Hongn, F., Mon, R., Petrinovic, I., Del Papa, C., Powell, J. 2010. Inversión y reactivación tectónicas cretácico-cenozoicas en el noroeste argentino: Influencia de las heterogeneidades del basamento neoproterozoico-paleozoico inferior. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66(1): 38-53.
- Houston, J., Gunn, M. 2011. NI 43-101 Technical report on the Salar de Olaroz Lithium-Potash Project, Jujuy Province, Argentina: report prepared for Orocobre Ltd, May 13, 2011.
- Houston, J., Butcher, A., Ehren, P., Evans, K., Godfrey, L. 2011. The Evaluation of Brine Prospects and the Requirement for Modifications to Filing Standards. *Economic Geology* 106: 1225–1239.
- Ibarra, F., Prezzi, C. 2019. The thermo-mechanical state of the Andes in the Altiplano-Puna region: insights from Curie isotherm and effective elastic thickness determination. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 76(4): 352-362.
- Igarzábal, A., Poppi, R. 1980. El salar de Hombre Muerto. *Acta Geológica Lilloana* 15 (2): 103-117.
- Ingebritsen, S.E., Sanford, W.E., Neuzil, C.E. 2006. *Groundwater in Geologic Processes* (2nd Ed.). Cambridge University Press, New York. 564 pp.
- Isacks, B.L. 1988. Uplift of the central Andean plateau and bending of the Bolivian orocline. *Journal of Geophysical Research* 93: 3211–3231.
- Jordan, T., Alonso, R. 1987. Cenozoic stratigraphy and basin tectonics of the Andes Mountains, 20°28' South latitude. *American Association of Petroleum Geologist, Bulletin* 71: 49-64.
- Jordan, T.E., Isacks, B.L., Allmendinger, R.W., Brewer, J.A., Ramos, V.A., Ando, C.J. 1983. Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate. *Geological Society of America Bulletin* 94, 341–361.

- King, M., 2010. NI 43-101 Technical report and measured, indicated and inferred resource estimation of lithium and potassium at the Cauchari and Olaroz salars, Jujuy province, Argentina: report prepared for Lithium Americas Corp., December 6, 2010.
- King, M., Zandonai, G., 2019. NI 43-101 Technical report and Preliminary Feasibility Study (PFS) - 3Q Project, Catamarca, Argentina: report prepared for NEO Lithium Corp, May 8, 2019.
- Lake Resources 2018. Maiden 4.4 Mt LCE Resource Estimate - Kachi Lithium Brine Project. ASX Market Announcements Office, November 27, 2018. <https://lakeresources.com.au/wp-content/uploads/2019/09/02052872.pdf>.
- Lanza, F., Tibaldi, A., Bonali, F.L., Corazzato, C. 2013. Space-time variations of stresses in the Miocene-Quaternary along the Calama-Olacapato-El Toro Fault Zone, Central Andes. *Tectonophysics* 593: 33-56.
- Lefavre, A., Henchel, L.D. 2019. NI43-101 Technical report and Preliminary Economic Assessment (PEA) - Pozuelos - Pastos Grandes Project: report prepared for LSC Lithium, January 18, 2019.
- Lizuaín Fuentes, A., Panza, J.L.A., Zappettini, E., Seggiaro, R., Candiani, J.C., Miró, R., Marengo, H., Pereyra, F., Silva Nieto, D., Folguera, A., Fauqué, L., Rodríguez, M.F., Silva Nieto, D., Panza, J.L.A., Franchi, M., Ardolino, A., Escosteguy, L., Anselmi, G., Negro, C., Wilson, C., Dalmolin, C., Urien, C., Paterlini, M., 2018. Mapa Geológico del Sector Continental e Insular Americano de la República Argentina - Mapa Geológico del Sector Antártico Argentino. Escala 1:2.500.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Buenos Aires <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/3184>.
- López Steinmetz, R. L. 2017. Lithium- and boron-bearing brines in the Central Andes: exploring hydrofacies on the eastern Puna plateau between 23° and 23°30'S. *Mineral Deposita* 52: 35-50.
- López Steinmetz, R.L., Salvi S. 2021. Brine grades in Andean salars: When basin size matters A review of the Lithium Triangle. *Earth-Science Reviews* 217: 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103615>.
- López Steinmetz, R.L., Salvi, S., Garcia, M.G., Peralta Arnold, Y., Beziat, D., Franco, G., Constantini, O., Córdoba, F., Caffè, P.J. 2018. Northern Puna-scale survey of Li-brine deposits in the Andes of NW Argentina. *Journal of Geochemical Exploration* 190: 26-38.
- López Steinmetz, R.L., Salvi, S., Sarchi, C., Santamans, C., López Steinmetz, L.C. 2020. Lithium and Brine Geochemistry in the Salars of the Southern Puna, Andean Plateau of Argentina. *Economic Geology* 115(5): 1079-1096. doi:10.5382/econgeo.4754.
- Meixner, A., Sarchi, C., Lucassen, F., Becchio, R., Caffè, P.J., Lindsay, J., Rosner, M., Kasemann, S.A. 2019. Lithium concentrations and isotope signatures of Palaeozoic basement rocks and Cenozoic volcanic rocks from the Central Andean arc and back-arc. *Mineralium Deposita* 55: 1071-1084. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00915-2>.
- Meixner, A., Alonso, R.N., Lucassen, F., Korte, L., Kasemann, S.A. 2021. Lithium and Sr isotopic composition of salar deposits in the Central Andes across space and time: the Salar de Pozuelos, Argentina. *Mineralium Deposita* 57: 255-278 <https://doi.org/10.1007/s00126-021-01062-3>.
- Marrett, R.A., Allmendinger, R.W., Alonso, R.N., Drake, R.E. 1994. Late Cenozoic tectonic evolution of the Puna Plateau and adjacent foreland, northwestern Argentine Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 7: 179-207.
- Méndez, V., Navarini, A., Plaza, D., Viera, O. 1973. Faja Eruptiva de la Puna oriental. V Congreso Geológico Argentino, Actas 4: 89-100.
- Mon, R., Salfity, J.A. 1995. Tectonic evolution of the Andes of northern Argentina. In Tankard, A.J., Suárez Soruco, R., Welsink, H.J. (Eds.). *Petroleum basins of South America*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 62: 269-283.
- Munk, L.A., Hynek, S.A., Bradley, D.C., Boutt, D., Labay, K. Jochens, H. 2016. Lithium Brines: A Global Perspective. *Reviews in Economic Geology* 18: 339-365.
- Neuman, S.P. 2005. Trends, prospects and challenges in quantifying flow and transport through fractured rocks. *Hydrogeology Journal* 13: 124-147.
- Nicolli, H., Suriano, J., Kimsa, J., Brodtkorb, A. 1980. Características geoquímicas generales de aguas y salmueras de la Puna Argentina. *Academia Nacional de Ciencias, Miscelánea* 63, 38 pp. Córdoba.
- Nicolli, H., Suriano, J., Kimsa, J., Brodtkorb, A. 1982a. Geochemical characteristics of brines in evaporitic basins, Argentinian Puna. *Academia Nacional de Ciencias, Miscelánea*, 19 pp. Córdoba.
- Nicolli, H., Suriano, J., Méndez, V., Gómez, M. 1982b. Salmueras ricas en metales alcalinos del salar Hombre Muerto, Catamarca, Argentina. V Congreso Latinoamericano de Geología, Actas 3: 187-204. Buenos Aires.
- Norini, G., Baez, W., Becchio, R., Viramonte, J., Giordano, G., Arnosio, M., Pinton, A., GropPELLI, G. 2013. The Calama-Olacapato-El Toro fault system in the Puna Plateau, Central Andes: Geodynamic impli-

- cations and stratovolcanoes emplacement. *Tectonophysics* 608: 1280-1297. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.06.013>.
- Orberger, B., Rojas, W., Millot, R., Flehoc, C., 2015. Stable isotopes (Li, O, H) combined with brine chemistry: powerful tracers for Li origins in salar deposits from the Puna region, Argentina. *Procedia Earth and Planetary Science* 13: 307-311. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.07.072>.
- Ovejero Toledo, A., Alonso, R.N., Ruiz, T.V., Quiroga, A.G. 2009. Evapofacies halítica en el salar del Rincón, Departamento Los Andes, Salta. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 64 (3): 493 – 500.
- Palma, M.A., Párica, P., Ramos, V.A. 1986. El Granito Archibarca: su edad y significado tectónico. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 41(3-4): 414-418.
- Paoli, H.P., Elena, H.J., Mosciaro, M.J., Ledesma, F.M., Noé, Y.E. 2011. Caracterización de las cuencas hídricas de las provincias de Salta y Jujuy. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. <https://inta.gob.ar/documentos/caracterizacion-de-las-cuencas-hidricas-de-las-provincias-de-salta-y-jujuy>.
- PepinNini Lithium 2018. Salta Lithium Rincon Project Initial JORC Resource. Asx release, June 27, 2018. <https://www.61financial.com.au/news/eng-pdf/505359.pdf>.
- Peralta Arnold, Y., Cabassi, J., Tassi, F., Caffè, P.J., Vasselli, O. 2017. Fluid geochemistry of a deep-seated geothermal resource in the Puna plateau (Jujuy Province, Argentina). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 338: 121–134.
- Perkins, J.P., Ward, K.M., De Silva, S.L., Zandt, G., Beck, S.L., Finnegan, N.J. 2016. Surface uplift in the Central Andes driven by growth of the Altiplano Puna Magma Body. *Nature Communications* 7(1): 1–10.
- Petrinovic, I.A., Martí, J., Aguirre-Díaz, G.J., Guzmán, S., Geyer, A., Salado Paz, N. 2010. The Cerro Águas Calientes caldera, NW Argentina: an example of a tectonically controlled, polygenetic collapse caldera, and its regional significance. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 194: 15–26.
- Petrinovic, I.A., Grosse, P., Guzmán, S., Caffè, P.J. 2017. Evolución del volcanismo cenozoico en la Puna argentina. En: Muruaga, C.M., Grosse, P. (Eds.). *Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales del NOA. XX Congreso Geológico Argentino (Tucumán)*, Relatorio: 469-483.
- Prezzi, C., Singer, S., Allmendinger, R. 1998. Estudio paleomagnético de rocas cenozoicas aflorantes en Juncal Grande, Puna catamarqueña, Argentina: Rotación local de Bloques. *X Congreso Latinoamericano de Geología y VI Congreso Nacional de Geología Económica*, Actas 2: 128-133. Buenos Aires.
- Quade, J., Dettinger, M.P., Carrapa, B., DeCelles, P., Murray, K.E., Huntington, K.W., Cartwright, A., Canavan, R.R., Gehrels, G., Clementz, M. 2015. The growth of the central Andes, 22°S–26°S. In DeCelles, P.G., Ducea, M.N., Carrapa, B., Kapp, P.A., (Eds). *Geodynamics of a Cordilleran Orogenic System: The Central Andes of Argentina and Northern Chile*. Geological Society of America Memoir 212: 277–308. doi:10.1130/2015.1212(15).
- Ramos V.A 1999. Las provincias geológicas del territorio argentino. En: Caminos R. (Ed). *Geología Argentina*. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. *Anales* 29 (3): 41 – 96.
- Ramos, V. A., Vujovich, G., Martino, R., Otamendi, J. 2010. Pampia: a large cratonic block missing in the Rodinia supercontinent. *Journal of Geodynamics* 50: 243-255.
- Ranjram, M., Gleeson, T., Luijendijk E. 2015. Is the permeability of crystalline rock in the shallow crust related to depth, lithology or tectonic setting?. *Geofluids* 15: 106–119
- Reidel, F. 2016. NI43-101 Technical report and Resource Estimate for Lithium and Potassium Sal de Los Angeles Project: report prepared for LithiumX, August 29, 2016.
- Reidel, F. 2019. NI 43-101 Technical Report: Cauchari JV Project Updated Mineral Resource Estimate: report prepared for Advantage Lithium, April 19, 2019.
- Risacher, F., Fritz, B., Hauser, A. 2011. Origin of components in Chilean thermal waters. *Journal of South American Earth Science* 31: 153–170.
- Riller, U., Oncken, O. 2003. Growth of the central Andean Plateau by tectonic segmentation is controlled by the gradient in crustal shortening. *Journal of Geology* 111: 367-384.
- Riller, U., Petrinovic, I.A., Ramelow, J., Strecker, M., Oncken, O. 2001. Late Cenozoic tectonism, collapse caldera and plateau formation in the Central Andes. *Earth and Planetary Science Letters* 188: 299–311.
- Salfity, J.A. 1985. Lineamientos transversales al rumbo andino en el Noroeste Argentino. *IV Congreso Geológico Chileno (Antofagasta)*, Actas (1–2): 119–137.
- Salfity, J.A., Marquillas, R.A. 1994. Tectonic and sedimentary evolution of the Cretaceous-Eocene Salta Group basin, Argentina. En: Salfity, J.A. (Ed.). *Cretaceous Tectonics of the Andes*. Vieweg ed., 266-315.
- Salfity, J.A., Omarini, R., Baldis, B., Gutiérrez, W.J. 1976. Consideraciones sobre la evolución geológica del Precámbrico y Paleozoico del norte argentino. *II Congreso Ibero-Americano de Geología Económica (Buenos Aires)*, Actas 4: 341-361.

- Sawyer, L., Hutton, M., Curnow, G. 2020. NI43-101 Technical report: Update of Lithium Brine Mineral Resources, Mariana Project, Salar de Llullaillaco, Argentina: report prepared for Mariana Lithium Corp, January 12, 2020.
- Seggiaro, R., Hongn, F. 1994. Tectónica transcurrente asociada al volcán Coranzulí, Jujuy, Argentina. VII Congreso Geológico Chileno (Concepción), Actas (1):169-173
- Seggiaro, R., Hongn, F., Folguera, A., Clavero, J. 2000. Hoja Geológica 2769-II, Paso de San Francisco, provincia de Catamarca. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín N° 294, 76 pp. Buenos Aires.
- Seggiaro, R.E., Villagrán, C.A., Celedón, M.R., Barrabino, E., Apaza, F.D. 2017a. Reactivación de fallas paleozoicas durante la tectónica andina en la Cordillera Oriental-noroeste argentino. En: Muruaga, C.M., Grosse, P. (Eds.). Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales del NOA. XX Congreso Geológico Argentino (Tucumán), Relatorio: 602-623.
- Seggiaro, R.E., Guzmán, S.R., Apaza, F.D. 2017b. Control estructural sobre el magmatismo en los alrededores de San Antonio de Los Cobres, sector oriental de la Puna central. XX Congreso Geológico Argentino (Tucumán), Actas ST2: 142-146.
- Sparks, S.R., Francis, P., Hamer, R., Pankhurst, R., O'Callaghan, L., Thorpe, R.S., Page, R. 1985. Ignimbrites of the Cerro Galán caldera, NW Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 24: 205-224.
- United States Geological Survey (USGS) 2022. Mineral commodity summaries 2022. U.S. Geological Survey, 200 pp. <https://doi.org/10.3133/mcs2022>.
- Tkachev, A.V., Rundqvist, D.V., Vishnevskaya, N.A. 2018. Metallogeny of lithium through geological time. *Russian Journal of Earth Sciences* 18: 1-13. doi:10.2205/2018ES000635
- Vandervoort, D.S., Jordan, T.E., Zeitler, P.K., Alonso, R.N. 1995. Chronology of internal drainage development and uplift, southern Puna plateau, Argentine Central Andes. *Geology* 23: 145-48
- Vinante, D., Alonso, R. N. 2006. Evapofacies del Salar del Hombre Muerto, Puna Argentina: distribución y génesis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61(2): 286-297.
- Viramonte, J.G., Petrinovic, I.A. 1990. Calderas asociadas a megafracturas transcurrentes en los Andes Centrales del Sur. XI Congreso Geológico Argentino (San Juan), Actas 2: 369-372.
- Viramonte, J., Alonso, R., Gutierrez, R., Argañaraz, R. 1984a. Génesis del litio en los salares de la Puna Argentina. IX Congreso Geológico Argentino (Bariloche), Actas 3: 471-481. Buenos Aires.
- Viramonte, J.G., Omarini, R.H., Araña Saavedra, V., Aparicio, A., Garcia Cacho, L. 1984b. Edad, génesis y mecanismos de erupción de las riolitas granatíferas de San Antonio de Los Cobres, Provincia de Salta. IX Congreso Geológico Argentino (Bariloche), Actas 3: 216-233.
- Viramonte, J.M., Becchio, R.A., Viramonte, J.G., Pimentel, M.M., Martino, R.D. 2007. Ordovician igneous and metamorphic units in southeastern Puna: New U-Pb and Sm-Nd data and implications for the evolution of northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 24: 167-183.
- Zandt, G., Leidig, M., Chmielowski, J., Baumont, D. 2003. Seismic detection and characterization of the Altiplano-Puna magma body, Central Andes. *Pure and Applied Geophysics* 160: 789-807. <https://doi.org/10.1007/PL00012557>.
- Zappettini, E., Blasco, G. 2001. Hoja Geológica 2569-II, Socompa, Provincia de Salta. Escala 1:250.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentina, Boletín N°260, 62 pp. Buenos Aires.