

Historia del litio en la Puna

Ricardo N. Alonso

Universidad Nacional de Salta-CONICET (INSUGEO-CEGA), Salta, Argentina

Fecha de recepción del manuscrito: 09/03/2020

Fecha de aceptación del manuscrito: 12/03/2020

Fecha de publicación: 15/04/2020

Resumen— El litio se ha convertido en un elemento clave de las tecnologías en la segunda década del siglo XXI. Sus aplicaciones y su uso han crecido exponencialmente. En igual sentido las investigaciones relacionadas con el elemento tanto en los aspectos geológicos, metalogénicos, químicos e industriales. En el ámbito mundial el litio fue identificado por primera vez en Suecia por Johan August Arfvedson en 1817. El químico y geólogo argentino Luciano R. Catalano llamó la atención sobre su presencia en los salares puneños en la década de 1920. Los estudios intensivos comienzan en la década de 1970 y 1980 donde participan la Universidad Nacional de Salta, la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales y la Dirección General de Fabricaciones Militares. Luego de un intento fallido de explotación en el salar del Rincón, dan su fruto con el primer proyecto en marcha en el salar del Hombre Muerto a comienzo de los noventa. En este trabajo se realiza una breve síntesis de la historia de las investigaciones geológicas y químicas en torno al litio y de los hombres que la llevaron a cabo.

Palabras clave— Litio, salares, evaporitas, salmueras, Puna.

Abstract— Lithium has become a key element of technologies in the second decade of the 21st century. Its applications and use have grown exponentially. Similarly, research related to the element in both geological, metallogenic, chemical and industrial aspects. Globally, lithium was first identified in Sweden in 1817 by Johan August Arfvedson. Argentine chemist and geologist Luciano R. Catalano drew attention to its presence in the Puna salars in the 1920s. Intensive studies begin in the decade of 1970 and 1980 where they participate the National University of Salta (UNSa), the National Commission of Space Investigations (CNIE) and the General Direction of Military Fabrications (DGFM). After an unsuccessful attempt at exploitation in the salar del Rincón, they bear fruit with the first project underway at the salar del Hombre Muerto (Fénix Project, FMC) in the early 1990s. In this work a brief synthesis of the history of the geological and chemical investigations around lithium and the men who carried it out is made.

Keywords— Lithium, salars, evaporites, brines, Puna.

INTRODUCCIÓN

El litio se convirtió en las últimas décadas en el metal de moda. Pasó de ser una curiosidad de la química del siglo XIX a un soporte de la tecnología del siglo XXI. Especialmente por estar incorporado en las baterías de “ión litio”, -recargables-, de la mayoría de los teléfonos celulares. Así como también en las computadoras portátiles, tablets y otros dispositivos electrónicos. Y más aún en los actuales automóviles híbridos o eléctricos y con más razón en el futuro de los autos eléctricos, al igual que en el almacenamiento de las energías verdes. Sin contar los otros cientos de aplicaciones químicas, farmacéuticas e industriales (Baran, 2017).

En consecuencia, con la ola de interés por el litio, se han publicado en las últimas décadas cientos de trabajos científicos, libros y artículos. Asimismo las empresas

mineras que cotizan en las bolsas de valores y que exploran en cualquier lugar del planeta, deben presentar los “National Instruments” (NI-43101), o documentos similares según los países (ej., JORC), dando cuenta completa del recurso investigado en todos los aspectos técnicos, geológicos y mineros.

Los salares de los Andes Centrales en general y los de la Puna Argentina en particular, se han visto beneficiados con esos estudios que comprenden especialmente exploración geofísica, perforaciones sistemáticas y ensayos de bombeo. Ello permitió que se conociera a los salares -y a las cuencas que los albergan- en su tercera y cuarta dimensión, esto es la profundidad del basamento y el tiempo geológico del relleno sedimentario (Alonso, 2017 a,b; 2018). A ello deben sumarse numerosos estudios geológicos, tectónicos, paleoclimáticos, radimétricos que completan el cuadro global (ej., Méndez et al., 1979; Sureda et al., 1986; Godfrey et al., 2013; Pingel et al., 2019, 2020).

Así pudo entenderse la naturaleza y arquitectura de la sedimentación, las facies y evapofacies, los centros de acumulación de máxima profundidad (depocentros), tipo o tipos de basamentos involucrados, entre otros elementos geológicos. Asimismo se establecieron las características físico-químicas de las salmueras litíferas, la naturaleza y el potencial de los acuíferos, la porosidad y permeabilidad de las facies hospedantes de las salmueras enriquecidas, la

Dirección de contacto:

Ricardo N. Alonso, Av. Bolivia 5150, FCEyN, UNSa, 4400 Salta, Argentina,
malonso@unsa.edu.ar

respuesta hidráulica, los recursos o reservas, entre otros parámetros de interés (Fig. 1)

Lo cierto es que se acumuló una gran cantidad de información científica y técnica sobre el tema litio, hoy de interés para el público en general, pero donde casi no existen trabajos de divulgación ni que aborden el tema histórico de las investigaciones (Alonso, 2019).

El suscrito comenzó a interesarse por la temática del litio desde la década de 1970 y a partir de mediados de la

década de 1980 ha publicado sobre el tema artículos científicos, capítulos de libros, ensayos de divulgación y notas periodísticas; actuó en la dirección de tesis y becarios de universidades argentinas y extranjeras; ha brindado conferencias nacionales e internacionales, entre otros asuntos relacionados (Alonso, 2018).

Este artículo es una síntesis histórica de algunas de las principales investigaciones que se llevaron a cabo en la Puna Argentina desde la mirada del autor.



Fig. 1: El salar de Arizaro y el volcán Aracar. (Foto: Ossian Lindholm).

EL ELEMENTO LITIO

El litio es el tercer elemento químico de la tabla periódica. Es un metal alcalino, plateado y blando que se puede cortar con un cuchillo. Es tan ligero que pesa la mitad del agua y flota sobre gasolina. Tiene la densidad de la madera de pino. Es por cierto el metal menos denso de todos y es muy reactivo. El litio no se encuentra en esa condición de metal en la naturaleza, a diferencia de lo que ocurre con el oro, la plata o el cobre. El litio se presenta concentrado como iones libres en las salmueras de salares; en ciertas rocas de origen granítico llamadas pegmatitas y, en arcillas del tipo de las hectoritas.

Fue descubierto por el sueco Johan August Arfvedson en 1817. Recibió el nombre de litio, propuesto por el sabio químico J. Jakob Berzelius, en razón de haber sido aislado de un mineral llamado petalita, cuya composición química es la de un aluminosilicato de litio. La petalita fue descubierta por uno de los “padres” de la independencia de Brasil, el geólogo José Bonifacio de Andrada y Silva, quien estudió en la Academia de Minas de Freiberg bajo la tutela del célebre Abraham G. Werner. Litio proviene de “lithos” que significa roca en griego y de allí tomaron su nombre los mencionados Arfvedson y Berzelius. Esto lo diferenciaba de los otros elementos alcalinos descubiertos antes, el sodio y el potasio, que fueron aislados a partir de cenizas de plantas.

Por su ubicación en la tabla periódica de los elementos (N° 3), continúa al hidrógeno (N° 1) y al helio (N° 2) y antecede al berilio (N° 4). El átomo de litio tiene un núcleo

con tres (3) protones, tres (3) neutrones y está rodeado por una nube donde se mueven tres (3) electrones. Es uno de los primeros elementos químicos en formarse en los procesos de la nucleosíntesis estelar. Es más, está considerado como uno de los tres elementos que se formaron durante el Big Bang, esto es la gran explosión que dio lugar al universo actual. El litio tiene además dos isótopos estables Litio-6 y litio-7, con una abundancia relativa de 7,5 y 92,5% respectivamente.

El litio es un metal alcalino que comparte propiedades afines con el sodio, potasio, rubidio, cesio y francio; este último producto de la desintegración radiactiva con una vida media de sólo 21 minutos. Todos ellos pertenecen al Grupo 1 de la tabla periódica y tienen un solo electrón en la última capa lo que los hace muy reactivos. Sus vecinos en la tabla son el Grupo 2, esto es los metales alcalinotérreos, entre los cuales se tienen berilio, magnesio, calcio, estroncio, bario y radio. Poseen dos electrones en la última capa y en consecuencia son menos reactivos que los elementos alcalinos del Grupo 1. Además tienen puntos de fusión y ebullición más altos que los metales alcalinos.

El litio funde a 181°C y tiene un punto de ebullición de 1342°C. A la llama del mechero da un color rojo carmesí característico lo que permite identificarlo cualitativamente. Desde el punto de vista de la geoquímica se considera al litio entre los elementos litófilos que son aquellos que tienen preferencia por asociarse con el oxígeno y el silicio. La concentración promedio de litio en la corteza continental es de unas 20 partes por millón (ppm). El litio se encuentra empobrecido en las rocas basálticas (15 ppm) y enriquecido

en las rocas graníticas (40 ppm). El agua de mar contiene en promedio sólo 0,17 ppm de litio. Sin embargo, los océanos del planeta albergan decenas de millones de toneladas de litio pero su extracción con fines comerciales resultaría antieconómica.

El litio se asocia con otros elementos químicos formando distintos tipos de minerales. Se conocen más de un centenar de especies minerales que contienen litio en su estructura. Fundamentalmente el litio se encuentra en silicatos y fosfatos de rocas pegmatíticas. Los elementos que acompañan al litio son, entre otros, aluminio, sodio, potasio, hierro, manganeso, flúor, boro y berilio. Entre los minerales más abundantes y ricos en litio se encuentran espodumeno y petalita (aluminosilicatos de litio), lepidolita (mica de litio y potasio), ambligonita (aluminofosfato de litio y sodio), trifilita-litiofilita (serie de fosfatos de litio, hierro y manganeso), elbaíta (turmalina de litio), hectorita (arcilla de litio), entre muchos otros. Una cita de hectorita para la Puna Argentina corresponde a un hallazgo realizado en el salar de Turi Lari, Jujuy (Muessig, 1958).

Si bien las pegmatitas litíferas se encuentran en numerosas partes del mundo, los países donde han sido explotadas con éxito económico son Australia, Estados Unidos y China. Zaire, Namibia, Canadá, Rusia y Portugal son también poseedores de importantes reservas de litio en pegmatitas. Las arcillas de litio aparecen generalmente en cuencas sedimentarias de edad neógena con fuerte actividad volcánica en el pasado y que se desarrollaron en un clima árido. Hay depósitos importantes de arcillas litíferas en el suroeste de los Estados Unidos, norte de México, Turquía y muy probablemente en los Andes Centrales. El litio se encontró también en las aguas residuales de campos petroleros.

En Estados Unidos se hallan los clásicos depósitos de Silver Peak y Searles Lake, donde se explotan salmueras de litio desde hace varias décadas. En los Andes Centrales se encuentran salares con salmueras de litio en Perú, Bolivia, Chile y Argentina. Perú cuenta con una cuenca cerrada intervolcánica (Laguna Salinas) que alberga un rico yacimiento de boratos y sulfato de sodio, mientras que las salmueras contienen litio y potasio. Bolivia posee muchos salares y lagos salinos pero entre todos se destaca Uyuni, una gran cuenca de diez mil kilómetros cuadrados que se extiende en el centro del Altiplano. Uyuni es rico en litio, pero tiene relaciones muy altas de magnesio que lo hacen inviable para su explotación por los métodos tradicionales.

Chile es también poseedor de numerosos salares litíferos entre los que destacan Atacama y en menor medida Maricunga. Atacama es el salar más concentrado en salmueras de litio, las que están embebidas en sal gema porosa y permeable (halita). Es el primer productor mundial de salmueras de litio y el segundo productor mundial de sales de litio por detrás de Australia donde se explota litio en roca a partir de pegmatitas. Argentina contiene el tercer salar en importancia que es el de Hombre Muerto y es además el segundo productor mundial de sales de litio a partir de salmueras y el tercer productor mundial luego de Australia y Chile (Fig. 2).

Otros 15 salares de la Puna Argentina tienen importancia económica por sus salmueras de litio, entre ellos Antofalla, Río Grande, Lullaillaco, Incahuasi, Pular, Arizaro, Centenario-Ratones, Diablillos, Pastos Grandes, Tolillar,

Pozuelos, Rincón-Pocitos, Cauchari-Olaroz y Salinas Grandes-Guayatayoc, sin contar otras numerosas cuencas pequeñas pero de gran potencial (Fig. 3,4).

Una sorpresa de los modernos trabajos de exploración, fue no sólo conocer la tercera dimensión de los salares, sino también descubrir salmueras profundas, entre 100 y 500 m, densas y ricas en litio. Los usos del litio y sus productos son en orden de importancia: cerámica y vidrio, baterías, grasas lubricantes, tratamiento de aire, fundición, polímeros, producción primaria de aluminio, productos farmacéuticos, entre otros. Desde 1992 a 2012 la producción de litio se incrementó 500 por ciento y también el precio de los distintos compuestos manufacturados con dicho elemento químico. Las reservas mundiales de litio comprobadas a 2019 son de 40 millones de toneladas.



Fig. 2: Vista del salar del Hombre Muerto. (Foto: Ossian Lindholm).

HISTORIA MUNDIAL DEL LITIO

El elemento químico litio fue descubierto en 1817 y, en 2017, se cumplió el bicentenario desde que fue dado a conocer por primera vez en Suecia. Sin embargo ya los antiguos griegos sospecharon que algo había en las aguas termales que resultaban benéficas y tranquilizantes especialmente para personas que sufrían desórdenes mentales. Tal vez sea pura curiosidad pero es probable que fuese Soranus de Éfeso (98 al 138, d.C.) quien, quizás por accidente, descubrió el uso del litio para el tratamiento de manías y melancolías, ya que en el segundo siglo de la era cristiana, trataba pacientes afectados por enfermedades mentales con aguas alcalinas de Éfeso que tienen contenidos altos de litio. Bañarse en piscinas minerales y beber aguas minerales, han sido tratamientos populares para promover tanto la salud mental como la física. Lo anterior no deja de ser estrictamente anecdótico.

Como se mencionó el autor del hallazgo del elemento litio fue el químico y mineralogista sueco Johan August Arfwedson Holtermann (1792-1841). Arfwedson o Arfwedson nació en Skagersholms Bruk el 12 de enero de 1792 y falleció en Hedenso el 28 de octubre de 1841, a los 49 años de edad. Arfwedson provenía de una familia rica y era hijo del próspero comerciante Jacob Arfwedson y su esposa Anna Elisabeth Holtermann. Por el hecho de venir de una familia acomodada pudo ingresar muy joven en la universidad de Upsala donde ya aparece matriculado en 1803 a los 11 años de edad, habiéndose graduado en leyes en 1809 y como mineralogista en 1812. A los 20 años ya

contaba con una carrera profesional que le permitió ingresar en la Oficina Real de Minas de Suecia, en Estocolmo. Fue en esta última ciudad en que una feliz circunstancia lo puso en contacto con el químico y sabio Jons Jakob Berzelius (1779-1848), considerado el padre de la química en Suecia y uno de los padres fundadores de la química moderna.

A diferencia de Arfvedson, Berzelius quedó huérfano de ambos padres a temprana edad y a cargo de familiares. Fueron sus condiciones innatas, demostradas desde niño, lo que le llevaron a ocupar los más altos puestos en la ciencia sueca y universal. Berzelius contaba con un importante laboratorio químico donde concurrían varios de sus discípulos. En ese laboratorio se descubrieron elementos químicos como el selenio, torio y cerio. Fue el primero en aislar el silicio, el circonio y el titanio. Además se redescubrió y se puso nombre al vanadio, elemento que fuera primero identificado en México por el español Andrés Manuel del Río quien lo bautizó “eritronio”.

Arfvedson, descubrió el nuevo elemento químico mientras estudiaba el mineral petalita. Dice Berzelius “El Sr. August Arfvedson, un químico joven y muy meritorio, que ha trabajado en mi laboratorio durante un año, descubrió durante un análisis de petalita de la mina de hierro de Uto, un componente alcalino. Lo llamamos “lithion”, para aludir así a su primer descubrimiento en el reino mineral, ya que los otros dos fueron descubiertos por primera vez en la naturaleza orgánica. Su radical se denominará “lithium” (Journal für Chemie und Physik, 21: 44–48, 1817). Queda claro que el autor del nombre fue Berzelius que le dio el crédito a su discípulo como descubridor. La designación litio toma su raíz del griego “lithos”, o sea etimológicamente roca.

Es interesante destacar que el hallazgo original del litio se logró del mineral petalita procedente de pegmatitas de 2000 millones de años de antigüedad de la mina Uto en Suecia. La petalita y el espodumeno, junto a otros minerales, habían sido identificados allí en 1800 por el sabio brasileño José Bonifacio de Andrada y Silva (1763-1838), quien estudió geología y mineralogía en la famosa Academia de Minas de Freiberg bajo la dirección de Abraham G. Werner. Andrada y Silva fue uno de los padres de la independencia de Brasil. El litio fue identificado más tarde en el espodumeno y la lepidolita, todos minerales procedentes de rocas pegmatíticas. Los nombres de Arfvedson y Berzelius han quedado así unidos al hallazgo de este importante elemento químico de notables aplicaciones tecnológicas modernas.

Arfvedson y Berzelius son recordados además por haber recibido sendos nombres de minerales como el anfíbol arfvedsonita (aluminosilicato de sodio y hierro), que fuera descubierto en 1823 en Groenlandia por Henry James Brooke (1771–1857); y la berzelianita (seleniuro de cobre) descubierto en Kalmar (Suecia) y descrita en 1832 por el mineralogista y geólogo francés Francois S. Beudant (1787-1850).

Arfvedson y Berzelius tienen así el crédito de haber descubierto una sal de litio a partir de la petalita y haber dado el nombre al elemento litio. Lo que no pudieron hacer fue aislar al elemento químico. Esta tarea la lograron un año después, en 1818, los químicos británicos William Thomas Brande (1788-1866) y Sir Humphry Davy (1778-1829) quienes a través de la electrólisis del óxido de litio lograron finalmente separar el elemento y estudiar sus propiedades.

El litio resultó ser un metal alcalino, blanco plata, blando y muy ligero, al punto que es el metal menos denso. Es altamente reactivo e inflamable por lo que debe conservarse en aceite mineral. Además flota sobre los líquidos. Por sus características nunca ocurre libre en la naturaleza sino en minerales en rocas o en forma de iones en las aguas continentales o marinas.

El litio reconoce entonces a cuatro descubridores, los suecos Arfvedson y Berzelius así como los británicos Brande y Davy; aunque es el primero el que figura como tal en la historia de la química. Como se dijo Soranus de Éfeso, médico griego, prestó atención a que ciertas aguas curaban o al menos aliviaban a pacientes con desórdenes mentales. Precisamente la región de Anatolia se caracteriza por poseer los yacimientos más ricos del mundo de boratos. Las aguas que formaron esos depósitos en la actual Turquía son ricas en boro y en litio.

Esto que los griegos sospechaban sin saber a qué atribuirlo va a encontrar una respuesta a mediados del siglo XX por parte del médico australiano John Frederick Cade (1912-1980). Cade descubrió que el carbonato de litio era una medicación eficaz en el tratamiento del desorden bipolar o maníaco depresivo, en una época en que los tratamientos de enfermedades mentales se realizaban con terapias de shocks eléctricos o lobotomías. Es interesante saber que el Dr. Cade estuvo como prisionero de guerra en un aterrador campo de concentración japonés en Singapur. Sufrió allí toda clase de penurias junto a los demás prisioneros, muchos de los cuales perdían la razón, asunto que lo llevó a interesarse profundamente en las cuestiones psiquiátricas.

Al finalizar la Segunda Guerra Mundial, Cade se dedicó a experimentar con ratones de guinea (cuisés). La idea original era que había una relación entre la urea, el ácido úrico y los pacientes maníacos. Buscando un solvente agregó litio y se percató que había un comportamiento diferente en los ratones que se mostraban calmos antes que excitados. Prosiguió cuidadosamente la aplicación de litio en diversas dosis, incluso aplicándose la él mismo, hasta que logró lo que buscaba. Fue una extraordinaria casualidad. Publicó los resultados en 1949 en el Medical Journal of Australia, un trabajo ahora clásico, titulado “Sales de litio en el tratamiento de las excitaciones psicóticas”.



Fig. 3: Piletas de evaporación con salmueras ricas en litio en Salinas Grandes. (Foto: Ossian Lindholm).

Desde entonces las sales de litio se han estado usando en medicamentos contra los desórdenes bipolares en todo el mundo y constituyen uno de los usos frecuentes del

carbonato de litio. Las demás aplicaciones son en baterías, lubricantes, cerámicas, vidrios especiales, aleaciones livianas, entre muchas otras. En 200 años desde su descubrimiento el litio se ha convertido desde una curiosidad de la química en el siglo XIX a un soporte de la tecnología del siglo XXI.

PRIMERA MENCIÓN

El litio exógeno se presenta como ion en las salmueras híper concentradas de los salares. Tal vez la primera cita de litio exógeno de los Andes Centrales corresponda al trabajo publicado en 1906 sobre los lagos del Altiplano boliviano por el Dr. Maurice Neveu-Lemaire y colaboradores de la Misión Créqui-Montfort llevada a cabo en 1903. La misión francesa de Créqui-Montfort y Sénéchal de La Grange estaba conformada por miembros de la nobleza y la alta burguesía europeas. Para entonces los mecenazgos y filantropías con fines científicos eran una especie de moda. Aunque muchas veces se mezclaron los intereses académicos con otros políticos o económicos. Y en donde la masonería jugó un papel importante. Baste como ejemplo la conexión Humboldt, Bolívar, Jefferson y su rol en la independencia de las naciones americanas.

El líder de la misión fue el marqués Henri-Marie-Georges Le Compasseur Créqui-Montfort Courtivron (1877-1966) quien destacó como explorador, antropólogo, militar, diplomático, empresario y tirador deportivo francés. Estuvo acompañado por Eugene Sénéchal de Lagrange como segundo jefe. La otra docena de miembros de la expedición eran reconocidos científicos franceses especialistas en el amplio campo de las ciencias naturales, así como arqueólogos, antropólogos y cartógrafos. También participó y realizó un trabajo monumental el sueco Eric Boman que ya había visitado el noroeste argentino en la expedición de la nobleza sueca de 1901.

La expedición se dividió en varios grupos, duró entre uno y dos años y al regresar a París se comenzaron a publicar los resultados que sumaron una obra enciclopédica de 12 volúmenes; algunos de ellos de varios tomos, y escrita en francés en su totalidad. Todos fueron publicados por la Imprenta Nacional de París (Librería H. Le Soudier). Los expedicionarios partieron de Francia en el vapor Amazonas el 3 de abril de 1903. Cruzaron el Atlántico hasta Buenos Aires y luego atravesaron la pampa, traspasaron la alta cordillera de los andes mendocinos hasta Chile y se embarcaron nuevamente en Valparaíso en el vapor Loa que los llevó hasta Antofagasta. Desde allí comenzaría el viaje de estudio para alcanzar las cumbres volcánicas y estudiar el ambiente de los Andes Centrales de Perú, Chile, Bolivia y Argentina. En el plan estaba investigar la flora y la fauna, las rocas y minerales, las minas en explotación, los lagos y salares, los yacimientos arqueológicos, los pueblos andinos y sus lenguas, la meteorología, entre otros temas. Algo de ese trabajo lo había hecho en soledad otro francés, el sabio Alcides D'Orbigny en la década de 1820 y también autor de una obra monumental sobre América del Sur.

La mayor parte de la obra de la misión Créqui-Montfort se publicó entre 1904 y 1908, pero siguieron saliendo volúmenes hasta 1914 en que al parecer se interrumpieron por la Primera Guerra Mundial donde el propio marqués Créqui-Montfort tuvo un rol destacado que le valió condecoraciones como la "Cruz de Guerra", entre otras. El

primer reporte de la misión, bajo la autoría de sus jefes, apareció en París en 1904. En 1906 se publica el enjundioso trabajo sobre los lagos del Altiplano boliviano que firman el Dr. Maurice Neveu-Lemaire (1872-1951) y al que acompañan como coautores A. Bavay, E.-A. Birge, E. Chevreux, G. Marsh, J. Pellegrin y Julien Thoulet, todos ellos reconocidos científicos. Enfocan el estudio en los lagos Poopó y Titicaca, tomando medidas de profundidad para hacer cartas batimétricas e investigaciones sobre la química de las aguas, la flora y fauna, la naturaleza del fondo de los lagos, topografía, cartografía, etcétera. Lo más llamativo es la mención de litio en el lago Poopó, lo que tal vez constituya la primera cita de litio en los ambientes salinos y lacustres del Altiplano.



Fig. 4: Clásica superficie poligonada en los salares. (Foto: Ossian Lindholm).

EL APORTE DE LUCIANO CATALANO

El primero que vislumbró el potencial del litio en la Puna Argentina fue el sabio argentino Luciano R. Catalano (Buenos Aires, 1890-1970), quien exploró los salares de la altiplanicie andina en la década de 1920. Catalano fue un estudioso de intereses múltiples, que entregó su vida a la ciencia, y que permanece desconocido para las jóvenes generaciones de nuestro país. Era un hombre austero, de honestidad cabal, y a él se le deben hallazgos trascendentes para la minería argentina que sería largo enumerar.

Se doctoró en química en 1917, y se especializó en geología, mineralogía y física, llegando a dominar esas disciplinas como lo prueban los más de 200 libros y artículos que publicó. Técnicamente Catalano era químico y se dedicaba a la geología. Fue un precursor en el país de la "química geológica", "geología química" y "geoquímica", todas ramas de nombres parecidos pero diferentes en su campo de acción. Fue asimismo uno de los primeros en sistematizar la geología de la Puna argentina. Además veía los asuntos de la naturaleza de forma holística y se interesaba por el clima, las aguas, la flora, la fauna y todo lo que hoy constituye el Medio Ambiente. Muchos de sus aportes tienen vigencia y pueden utilizarse con sobrado provecho.

A él le debemos los estudios sobre el hierro de Zapla, sobre los minerales radiactivos de Córdoba, sobre los boratos de la Puna, y un sinnúmero de ocurrencias metalíferas y no metalíferas a lo largo y ancho del país. A la par de las ciencias químicas, le interesaba la cosmología y la física, así como los aspectos del desarrollo económico y social argentino. Hay que destacar el pensamiento de

Catalano en cuanto a las aplicaciones de la ciencia a la economía y generación de riqueza de un país. Especialmente deben valorarse sus largas campañas en la Puna donde pasaba hasta seis meses estudiando los salares, en una época en que sólo había viajes a mula.

Su amigo personal, el Dr. Arturo Illia (1900-1983), lo nombró durante su presidencia como subsecretario de minería de la Nación y fue uno de los que portó el féretro a su muerte. Entre 1923 y 1927, Catalano recorrió la Puna en todas direcciones, en campañas largas que duraban hasta seis meses, reconociendo su geología, explorando sus salares, y describiendo sus yacimientos minerales. Gran parte de sus investigaciones las realizó en la altiplanicie puneña, más precisamente en los salares, y estuvieron centradas en la investigación de los boratos.

En aquella época descubrió el yacimiento de Tincalayu, que se transformaría en una de las minas de bórax más importantes del mundo. Descubrió, exploró y realizó la evaluación de los yacimientos de ulexita de los salares puneños. Si bien estudió la geología de muchos depósitos minerales del país y otras cuestiones sobre la geología argentina, estaba principalmente interesado en la Puna y fue un gran estudioso de sus minerales, geología, hidrología y condiciones climáticas. Publicó interesantes trabajos sobre los particulares fenómenos atmosféricos que ocurren en la región, así como del origen y formación de los curiosos penitentes de nieve.

Así, entre sus mayores logros se tiene que descubrió el yacimiento de bórax de Tincalayu; completó el estudio de los depósitos de ulexita en salares que había iniciado Fritz Reichert en 1907; escribió acertadamente sobre la génesis de los boratos; y publicó el primer ensayo general sobre la

geología de la Puna. Volvió a Salta y a la Puna Argentina en reiteradas oportunidades hasta la década de 1960 y siguió publicando sobre diferentes aspectos de sus yacimientos minerales.

Tal vez uno de sus mayores méritos es el haber sido el primero en advertir sobre la presencia de litio en los salares, metal que hoy se explota con éxito de las salmueras del salar del Hombre Muerto y que ha destapado una fiebre mundial por su uso en baterías ecológicas, especialmente para automóviles eléctricos, pero también para celulares y computadoras personales. Las salmueras de los salares de los Andes Centrales de Perú, Bolivia, Chile y Argentina son muy ricas en dicho elemento alcalino, metálico, de muy baja densidad, que ha probado ser de interés para muy diversas industrias. Los salares de los Andes Centrales de América del Sur contienen las más grandes concentraciones de salmueras con litio en el mundo, y más de la mitad de la producción mundial proviene del salar de Atacama en Chile y del salar de Hombre Muerto en Argentina. El litio es hoy un metal imprescindible en la industria, aunque nadie sabe cuánto tiempo permanecerá en la lista de los estratégicos antes de ser desplazado por otro elemento químico o producto sustituto como ha sucedido a lo largo de la historia.

En 1964, Catalano publicó su viejo trabajo sobre el "Litio: una nueva fuente natural de energía", en la Serie Argentina N° 3, de los "Estudios de Geología y Minería Económica", editado en Buenos Aires por la Subsecretaría de Minería de la Nación, y acompañado de otros dos estudios, uno sobre boro y el otro sobre berilio (Fig. 5). Debe dejarse constancia expresa que ese y otros trabajos los escribió en las décadas de 1920 y 1930 y quedaron inéditos.

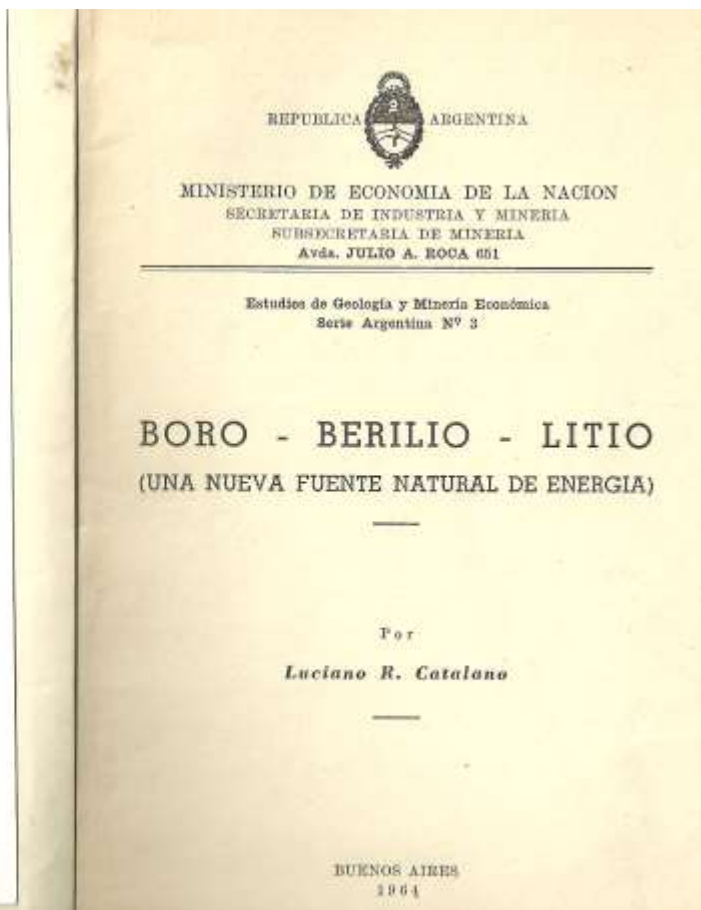


Fig. 5: Luciano R. Catalano y su clásico libro sobre boro, berilio y litio de 1964. (Foto del autor).

En dicho trabajo, Catalano señala los distintos yacimientos argentinos de litio, las reservas, los usos, las posibles aplicaciones futuras, el rol del estado y de las empresas, entre otros puntos. Menciona veinte grandes usos y aplicaciones del litio, entre ellos los concernientes a la energía atómica. Estaba muy preocupado en las energías futuras de la humanidad y concretamente en nuestro país.

Si bien en su trabajo señala que hay pilas alcalinas que usan litio, está lejos de sospechar que llegaría el día en que se comenzaría a usar en baterías para automóviles híbridos o eléctricos, al igual que para motocicletas eléctricas. Sin contar las baterías de litio que se usan hoy en los teléfonos celulares y en las computadoras personales. Menciona también que debe buscarse el litio “en las cuencas salíferas del alto bloque puneño, junto a minerales de boro” (p. 21). Hoy el litio, y el sueño profético de Catalano, son una realidad.

Marca además, con énfasis, que los minerales deben tener valor agregado en el país, ya que así “crearemos riqueza social, capacidad técnica y no exportaremos materias primas, porque ello significa exportar trabajo, que origina pobreza y atraso”. La decisión de procesar las salmueras en el país para obtener productos valiosos como el carbonato de litio, cloruro de litio, y hasta baterías va en esa dirección.

LA CONFERENCIA DE GUILLERMO CHONG

El Dr. Guillermo Chong Díaz es uno de los grandes científicos chilenos. Nadie como él ha penetrado en la geología profunda del desierto de Atacama. Conoce en profundidad la geología, geografía, historia, depósitos minerales, fósiles, flora, fauna y clima del hiper árido desierto que se extiende entre la costa del Océano Pacífico a occidente y la alta Cordillera Volcánica de los Andes hacia oriente. En ese ambiente reseco y singular, formado por el doble efecto de la barrera orográfica de los Andes que frenan las lluvias amazónicas y por la corriente oceánica fría de Humboldt que no evapora, se generan condiciones de hiperaridez que han dado lugar a la generación de sales exóticas como son los nitratos. Chong está considerado la máxima autoridad mundial en el estudio de los nitratos. Por sus profundos conocimientos sobre los ambientes desérticos fue contratado por la NASA en sus programas de búsqueda de vida en Marte para rastrear la presencia de extremófilos, o sea organismos que se desarrollan en condiciones físico-químicas extremas para la vida.

Guillermo Chong es el máximo especialista en la geología del norte de Chile (Chong, 1971, 1984). Es además el continuador en el tiempo de la obra que realizaron los grandes sabios decimonónicos como Ignacio Domeyko, Rodolfo Phillipi, Claudio Gay, Pedro J. A. Pissis; así como Juan Bruggen o Humberto Fuenzalida en el siglo XX. Los intereses científicos de Chong abarcaron -y abarcan- el amplio espectro de las ciencias naturales. En estas lides describió minerales nuevos para la ciencia, formaciones geológicas desconocidas, huesos de grandes reptiles marinos, yacimientos minerales de muchos tipos, invertebrados, vertebrados y plantas fósiles de distintos periodos geológicos, fenómenos curiosos y otras cuestiones relacionadas con el desierto como un todo. Chile lo ha reconocido nombrándolo Académico nacional, doctor

Honoris Causa y haciéndolo acreedor de numerosos premios y distinciones, entre ellos la “Medalla Juan Bruggen” (2003), que es el mayor galardón para un científico dedicado a las Ciencias de la Tierra en su país.

En la década de 1970, junto a científicos chilenos y norteamericanos, entre ellos el Dr. George Ericksen (1920-1996), fue uno de los descubridores del gigantesco yacimiento de litio del salar de Atacama que convirtió a Chile en el primer productor mundial de ese metal alcalino en salmueras. Fue también en la década de 1970 que el Dr. Chong comenzó a frecuentar la geología del norte argentino, especialmente con la creación de la Universidad Nacional de Salta. En una de sus recordadas conferencias abordó la temática del litio y planteó la necesidad de explorar los salares de la Puna Argentina como se había hecho antes en Chile. En dicha conferencia estaban presentes el geólogo Antonio P. Igarzábal (1925-1997), el ingeniero químico Rolando F. Poppi (1935-1983), junto a otros profesores universitarios y el suscrito en calidad de estudiante de geología. Tanto Igarzábal como Poppi tomaron la responsabilidad de las investigaciones de reconocimiento geológico, análisis químicos y tratamiento de salmueras. Ello llevó a que la UNSa participara desde el origen en la exploración del litio de los salares puneños (Alonso, 2018).

ANTONIO IGARZÁBAL Y SU APORTE A LA GEOLOGÍA DEL LITIO

Antonio P. Igarzábal (1925-1997), nació un 26 de enero de 1925 en Concepción del Uruguay (Entre Ríos), como comprovinciano de quién fuera uno de los primeros geólogos egresados de una universidad argentina y uno de los grandes de la geografía nacional: el Dr. Juan José Nágera. Arrastrado por una fuerte vocación naturalista, tal vez atávica en una tierra que vio pasar a insignes viajeros como Martín de Moussy, Bravard, D'Orbigny y tantos otros, Igarzábal decidió que estudiaría geología en la Universidad Nacional de Córdoba. Egresó como Geólogo en 1948 y dos años más tarde recibió el título de grado académico de Doctor en Ciencias Naturales (especialidad Mineralogía y Geología). Sus primeros trabajos profesionales los encaró en el área de hidrogeología, desempeñándose en la empresa Cura-Co entre 1950 y 1952. Ingresó luego al "Banco Industrial de la República Argentina" (BIRA), institución en la que permanecerá desde 1952 hasta 1959 y en la cual tendrá como tarea mayúscula el estudio de proyectos mineros potenciales para su futuro desarrollo económico. En esta etapa realizó informes técnico-geológicos de las más variadas sustancias metalíferas, no metalíferas y de rocas de aplicación a lo largo y ancho del país los cuales mantuvieron su carácter inédito. Su valor queda claramente expuesto en el extensivo uso que de los mismos hicieron autores posteriores tal el caso del Ing. Victorio Angelelli para sus importantes síntesis sobre la minería y la metalogenia argentina. Entre 1959 y 1962 se hace cargo de la dirección del yacimiento argentífero "Pan de Azúcar" en la provincia de Jujuy. Y con ello cierra definitivamente su "etapa minera", desarrollada a lo largo de 12 años de fructífera labor.

La segunda, más prolongada y rica etapa de su vida profesional, sobrevendrá en el ámbito académico. En 1963 es contratado por la Universidad Nacional de Tucumán para

desempeñarse tanto como profesor de "Geografía Física" de la Facultad de Ciencias Naturales de Salta como así también de la sección docente de la Escuela de Minas de Jujuy (ambas dependientes de Tucumán en aquel tiempo). Desde ese momento se radica definitivamente en Salta. En 1973 rinde por concurso el cargo de Profesor Asociado de Geomorfología, llegando a Profesor Titular en 1984, Profesor Consulto en 1991 y finalmente se había votado su elevación a "Profesor Emérito", grado que no llegó a recibir por su prematura y repentina muerte, pero que sin embargo fue otorgado "post-mortem" en 1997. Acompañando la tarea docente le tocó asumir numerosos cargos universitarios directivos, desde presidente del claustro de profesores, director de la carrera de Geología, vicedecano, decano, vicerrector e incluso rector interino de la UNSa. Igarzábal fue un docente completo, ya que no solo enseñó sino que también investigó (Fig. 6).



Fig. 6: Prof. Dr. Antonio P. Igarzábal. (Foto: gentileza de la familia Igarzábal).

Su pasión fue la geomorfología y es en esa disciplina donde dejó trabajos de alta calidad y ya verdaderos clásicos, tal el caso de los que realizó sobre aspectos morfológicos de la Puna argentina y en especial de sus salares, a los cuales destinó intensos estudios para interpretar su génesis, evolución, geoquímica y contenido de elementos químicos valiosos de sus salmueras, especialmente el litio. Su obra publicada abarca más de 40 trabajos, entre los que se destaca un importante capítulo en un libro editado por la Universidad de Barcelona; y un libro (inédito) sobre los salares de la Puna Argentina. Igarzábal y Rolando Poppi encararon el estudio sistemático de los salares, realizando perforaciones, muestreando salmueras, analizando su naturaleza química y características geoquímicas, entre otros aspectos (Igarzábal, 1979, 1984, 1991, 1996; Igarzábal y Poppi, 1980; Igarzábal y Alonso, 1990).

Igarzábal y Alonso (1990) propusieron caracterizar a los salares como "cristalinos" y "terrosos". Se reconocen así dos tipos de salares: terrosos (inmaduros) y cristalinos

(maduros), de acuerdo con Igarzábal y Alonso (1990) y Houston (2011). En los inmaduros, las facies clásticas (terrosas) dominan sobre las cristalinas (evaporitas) y viceversa con los maduros. Una gran cuenca salina puede tener ambientes maduros e inmaduros respectivamente. El salar de Hombre Muerto es inmaduro en la mitad oriental y, maduro, en la mitad occidental; mientras que el salar de Arizaro es maduro en toda su extensión. De acuerdo con esto las salmueras pueden estar embebidas en los núcleos de sal gema que ocupan el centro de las depresiones o en acuíferos arenosos intercalados en las facies terrosas. Estas cuestiones junto a múltiples parámetros es lo que hay que dilucidar al final de la exploración. Por lo pronto, en salares maduros, la sal gema tiene porosidad decreciente con la profundidad alcanzando un mínimo entre los 30 y 40 metros. Más abajo puede presentarse una porosidad secundaria por fracturamiento.

ROLANDO POPPI Y SU APORTE A LA QUÍMICA DEL LITIO

Hoy es un lugar común escuchar hablar del litio. Y también de que los Andes Centrales contienen el 80 por ciento de las reservas mundiales de litio en las salmueras de los salares, en el llamado triángulo ABC, por Argentina, Bolivia y Chile. Sin embargo algunas décadas atrás la situación era muy diferente. Si bien ya el químico y geólogo Luciano R. Catalano (1890-1970) había advertido en la década de 1960 sobre el litio como una nueva fuente de energía, los primeros trabajos específicos en orden a evaluar científicamente un salar y poner en marcha su producción de salmueras, fueron realizados por los geólogos chilenos en la década de 1970 en el salar de Atacama. Uno de aquellos estudiosos chilenos era el Dr. Guillermo Chong Díaz quien brindó una conferencia en la Universidad Nacional de Salta sobre el tema de los salares con litio. Allí estaban presentes el geólogo Dr. Antonio Igarzábal (1925-1997) y el Ing. Químico Rolando Federico Poppi (1935-1983). En una muy positiva sinergia académico científica, ambos investigadores decidieron encarar un estudio geológico y químico de los salares de la Puna Argentina en orden a averiguar el contenido y la tipología de sus salmueras, así como también el origen y evolución de las cuencas. Este esfuerzo mancomunado daría sus frutos y hoy ambos científicos deben considerarse entre los pioneros en el estudio y descubrimiento de los salares con litio de la Puna. Junto a otros investigadores que contemporáneamente y desde la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales y desde la Dirección General de Fabricaciones Militares llevaron adelante estudios similares en la región.

El Ing. Rolando F. Poppi, santafesino, había estudiado en la prestigiosa Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Litoral donde egresó como ingeniero en 1960. Apenas graduado recibió una oferta para trasladarse al Instituto Politécnico de Milán donde le tocó en suerte trabajar junto al Premio Nobel de Química, Dr. Giulio Natta (1903-1979). Natta fue galardonado con el Nobel junto al alemán Karl Ziegler, por su trabajo en el estudio de catalizadores para la polimerización estereoselectiva de polialquenos terminales, los llamados Catalizadores Ziegler-Natta. En 1964, Poppi fue contratado por la Universidad Nacional de Tucumán para hacerse cargo de la cátedra de Procesos Unitarios. En el ínterin fue

designado profesor visitante de la Universidad de Buenos Aires. Al crearse en 1973 la Universidad Nacional de Salta, por sus sólidos antecedentes académicos y de investigación Poppi fue nombrado profesor titular con dedicación exclusiva. Poppi comenzó con sus estudios sobre catálisis, diseño de reactores y optimización de procesos. Se hizo cargo de cátedras sobre fundamentos de la ingeniería química. Fue dejado cesante por el gobierno militar y luego reincorporado.

Una de sus mayores obras fue la creación el 27 de Noviembre de 1980, junto a un grupo de colaboradores, del Instituto de Beneficio de Minerales (INBEMI) a través de un convenio entre la Universidad Nacional de Salta y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Dicho instituto, hoy en plena actividad, se creó con la intención de desarrollar tecnología e interactuar con el sector productivo en el tratamiento de menas minerales, actuando en el ámbito académico, tecnológico, productivo y social de la provincia. Sus actividades se encuentran orientadas tanto en la faz pedagógica, de investigación, como de asesoramiento técnico en el campo del beneficio de minerales. Para ello cuenta con una planta piloto de tratamiento de minerales y laboratorios de análisis físicos y químicos. Por otro lado la Biblioteca "Ing. Rolando Federico Poppi" de la Facultad de Ingeniería de la UNSa, lleva su nombre. Además debe destacarse la dirección de tesis y becarios, el dictado y dirección de cursos de postgrado, la participación en congresos nacionales e internacionales de la especialidad, el haber sido representante del CONICET en el Noroeste Argentino, entre otros múltiples aspectos de la vida académica (Fig. 7).



Fig. 7: Prof. Dr. Rolando F. Poppi. (Foto: gentileza de la familia Poppi).

Con respecto al litio, los primeros trabajos de Poppi se remontan a fines de la década de 1970. En la faz química trabajó junto a los ingenieros Ricardo Borla, F. Abán, A. Gadín, Horacio Flores, entre otros, y dejaron decenas de informes inéditos sobre el tema. Con el Dr. Igarzábal publicaron un primer trabajo completo sobre el salar del Hombre Muerto y sus salmueras de litio (Igarzábal y Poppi, 1980). En 1994 se instalaría en aquel salar la empresa FMC-Minera del Altiplano que explota litio hasta la actualidad y lo procesa en sus plantas de Hombre Muerto y en la ciudad de General Güemes (Salta).

Falleció en Salta el 15 de mayo de 1983, a los 48 años de edad, demasiado joven y cuando aún era mucho lo que podía aportar a la ciencia en Salta.

EL PROYECTO PARTY DEL SALAR DEL RINCÓN

Los estudios de la Universidad Nacional de Salta (UNSA), tanto de la Escuela de Geología a cargo de Antonio Igarzábal y del INBEMI a cargo de Rolando Poppi encuentran un inversor entusiasta en el Sr. Luis Party propietario de una extensa superficie salina en el salar del Rincón. La empresa Party SACIMAGI, establece piletas de evaporación y una planta piloto para la concentración de salmueras de litio con apoyo de la Secretaría de Minería de la Nación y el aval académico de la UNSa a comienzos de la década de 1980. Poppi fallece en 1983 lo que resiente el desarrollo del proceso metalúrgico que se estaba desarrollando. Una de las fuertes limitantes eran los altos contenidos de magnesio de dicho salar. Finalmente el proyecto se abandona en 1986 y luego se inicia un largo pleito en el cual el suscripto actuó como Perito judicial (Designado Perito por el Juez Federal de Salta para entender en la Causa N° 14659; Party SACIMAGI c/ Res. N° 119/87 de Secretaría de Minería de la Nación, 1987).

LAS INVESTIGACIONES DE LA CNIE Y LA DGFM

A comienzos de la década de 1980 se hacen presentes en la Puna investigadores geólogos y químicos de la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales (CNIE) y de la Dirección General de Fabricaciones Militares (DGFM). El objetivo fue explorar los salares en busca de litio con fines de uso militar y en la industria aeroespacial. Tanto en aleaciones, combustibles especiales y también en su uso en reactores nucleares. Entre los científicos dedicados al tema y que dejaron su nombre en publicaciones específicas merece destacarse a Hugo B. Nicolli, Alejo Brodtkorb, Jorge F. Kimsa, José M. Suriano, Miguel Ángel Gómez, Arturo J. Barros, Vicente Méndez, entre otros. A ellos deben sumarse los investigadores del Observatorio de Física Cósmica de San Miguel que realizaron estudios junto a los doctores Lorenzo Aristarain, Cornelius Hurlbut (Jr.) y Jorge Rusansky. En especial merecen destacarse los aportes de Nicolli (1980, a,b; 1982) que fueron publicados en sendas misceláneas de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba y en el V Congreso Latinoamericano de Geología de 1982.

TUFIÑO, BALLIVIÁN Y FMC

El interés por el litio atrajo durante la década de 1980 a geólogos extranjeros como Oscar Ballivián, quien tenía amplia experiencia en el salar de Uyuni. Él realizó los estudios geológicos de base en el salar de Hombre Muerto para la empresa FMC-Minera del Altiplano. El gobierno de Salta se interesó en el tema litio a través de su gobernador Roberto Romero y dos geólogos que lo acompañaban: Jaime Hernán Figueroa (Vicegobernador) y Mario Alberto Raskovsky (Secretario de Minería). Con Raskovsky habíamos trabajado en la vieja Boroquímica SAMICAF, él como Superintendente de Minas y yo como Jefe de Exploración. En ese entonces me pidió que lo ayudara en un *dossier* sobre el tema para interesar al gobierno de Salta con el litio de los salares. El proyecto "Fénix" de FMC-

Minera del Altiplano, en el salar del Hombre Muerto (actualmente LIVENT), comenzó su producción en 1995. La dirección técnica, puesta en marcha y producción estuvo bajo la dirección del Geól. Gonzalo Tufiño y un equipo de químicos y geólogos egresados de la Universidad Nacional de Salta. El salar del Hombre Muerto, de tipo cristalino (maduro), había sido señalado por los estudios de la Universidad Nacional de Salta y Fabricaciones Militares como el de mejores condiciones técnicas en cuanto a la calidad geoquímica de la salmuera, entre otros parámetros físico-químicos (Fig. 8). Dicha empresa construyó en la década de 1990 una planta de carbonato de litio en el salar del Hombre Muerto (Catamarca) y una planta de cloruro de litio en la ciudad de General Güemes (Salta).



Fig. 8: Vista occidental del salar del Hombre Muerto. (Foto: Ossian Lindholm).

TRABAJO PIONERO

Hace ya más de tres décadas, en uno de los más recordados e importantes Congresos Geológicos Argentinos (Bariloche, 1984), se publicaron *in extenso* distintos trabajos, muchos de los cuales constituyeron una de las bases de la geología moderna de nuestro país. Uno de esos artículos fue “Génesis del Litio en Salares de la Puna Argentina” (Viramonte et al., 1984). Se señalaba y visualizaba allí la importancia de las anómalas concentraciones de litio en distintos salares de la Puna aportando nuevos datos e ideas acerca del porqué de esa anómala concentración. En dicho trabajo se planteaba la estrecha asociación del boro con el litio y se compilaba e historiaba sobre los trabajos de los primeros investigadores sobre el tema, especialmente los realizados por el Ing. Rolando Poppi que había fallecido recientemente (el trabajo era un homenaje *In Memoriam* de ese científico). También los trabajos del Dr. A. Igarzábal ambos de la Universidad Nacional de Salta, los trabajos pioneros de Catalano en Argentina, Ericksen, Moraga y Chong en Chile y Miranda Luizaga en Bolivia; así como Nicolli, Suriano y otros en el Salar de Hombre Muerto. Asimismo se vinculaba por primera vez la anómala presencia de Li y B en algunos salares de la Puna, con una anomalía regional de estos elementos en las rocas del basamento Precámbrico y Paleozoico, así como su posterior concentración y removilización por la acción del volcanismo Neógeno, el hidrotermalismo, la lixiviación y las fuentes termales (Fig. 9). Esta línea de investigación se continua en los trabajos de Alonso, 1991, 1995, 1999, 2006, 2017 a, b; Alonso et al.,

1984 a, b, 2012, 2017; Alonso y Rojas, 2020; Chanampa y Alonso, 2017; Chanampa et al., 2018; Hoyos et al., 2015; Martínez et al., 2018 a, b, c; 2019; Rojas y Alonso, 2017, 2018; Rojas, et al., 2018.

LAS ÚLTIMAS DÉCADAS

En las primeras dos décadas del siglo XXI se desarrolló el proyecto de salar del Rincón que tuvo como responsable al Dr. Carlos M. R. Sorentino. El viejo proyecto “Party” se reactivó como un potencial depósito de magnesio y luego tornó a litio cuando cambiaron las condiciones de mercado. Hubo varias oleadas de inversiones en exploración, toma de activos en salares y avances en nuevas tecnologías para la extracción del elemento litio a partir de las salmueras. A partir del 2010 comenzó el llamado “boom” del litio, donde medio centenar de empresas tomaron posesión sobre unos 20 salares, para la realización de estudios exploratorios de cuantificación de recursos de litio. Se perforaron pozos profundos que permitieron conocer la tercera dimensión de los salares, la arquitectura de su relleno y la distribución de evapofacies. Decenas de geólogos y químicos, tanto de empresas y universidades, están involucrados en estos recientes desarrollos. Se puso en producción el proyecto del salar de Olaroz de la empresa Oro-Cobre en Jujuy. Compañías canadienses, francesas, australianas, chinas, coreanas, están invirtiendo activamente en la Puna Argentina. Investigadores del Instituto GEONORTE de la UNSa, en colaboración con investigadores alemanes, especialmente Friedrich Lucassen, Annette Meixner y Simone Kasemann, realizaron numerosos trabajos sobre la isotopía y proveniencia del boro y el litio (Kasemann et al, 2018; Meixner et al., 2015, 2017). A ello deben sumarse las investigaciones que lleva adelante el Cega-Insugeo de Salta-Tucumán, el INEcoa (CONICET-UNJu), y las universidades de Catamarca, Córdoba, Buenos Aires, entre otras (Alonso, 2017b, 2018).



Fig. 9: Ambiente evaporítico de la Puna con cuencas cerradas, volcanismo, clima árido y fuentes termales en los bordes de los salares. (Foto: Ossian Lindholm).

AGRADECIMIENTOS

No puedo dejar de nombrar a mi viejo profesor Antonio P. Igarzábal, pionero de la geología del litio en Salta, con quien publicamos juntos en la década de 1990 acerca de la génesis del elemento, participamos en cursos de postgrado en Salta y en Potosí (Bolivia) y escribimos capítulos para un libro que realizamos conjuntamente con científicos de la Universidad de Barcelona. En igual sentido a los doctores

Donald E. Garrett (California), Tim K. Lowenstein (State University of New York at Binghamton), Linda V. Godfrey (Rutgers University, New Brunswick), Teresa E. Jordan (Cornell University, NY), Guillermo Chong Díaz (Chile), Juan José Pueyo Mur (Barcelona), Carlos M. R. Sorentino (Sídney, Australia), Federico Ortí Cabo (Barcelona), Cahit Helvacı (Izmir, Turquía), Manfred Strecker (Potsdam), Simone Kasemann (Bremen), Víctor A. Ramos (UBA), Enrique J. Baran (Buenos Aires), Alberto C. Riccardi (La Plata), Florencio G. Aceñolaza (Tucumán), Milka K. de Brodtkorb (Córdoba), Fernando G. Sardi (Tucumán), Guillermo Aceñolaza (Tucumán), entre muchos otros. También deseo agradecer a mis colegas José Viramonte, Claudia Galli, Teresita Ruiz, Ricardo Sureda, Walter Rojas, Vanina López de Azarevich, Eliana Chanampa, Verónica Rocío Martínez, César E. González-Barry, Gonzalo Mauro de la Hoz, Raúl Gutiérrez, Rafael Argañaraz y demás integrantes de la Universidad Nacional de Salta-CIUNSA y CONICET (CEGA-INSUGEO). Un agradecimiento especial al Dr. Rodrigo Castañeda, abogado minero experto en la temática legal y ambiental sobre el litio. A los estudiantes Franco Tito y Rocío Sabio Collado. El fotógrafo Ossian Lindholm ha cedido generosamente sus fotos de la Puna para ilustrar los diferentes libros del suscripto, motivo de mi especial gratitud. Una mención especial para el Dr. Guillermo Albanesi por la invitación a escribir el capítulo ampliado del resumen original y su permanente acompañamiento.

REFERENCIAS

- [1] Alonso R. N. (1991), "Evaporitas Neógenas de los Andes Centrales". Capítulo 5 del libro "Génesis de Formaciones Evaporíticas: Modelos Andinos e Ibéricos". Coordinador: Dr. Pueyo Mur J. J. *Universidad de Barcelona*, España, ISBN 84 7875 666 3, capítulo 5, pp. 267-332.
- [2] Alonso R. N. (1995), "The biggest boron, lithium and sodium sulphate deposit of Peru (Laguna Salinas, Arequi pa Department)". Symposium: Geology and Ore Deposits of the American Cordillera. *Program with Abstracts*, Reno, Nevada, p. 10.
- [3] Alonso R. N. (1999), "Los salares de la Puna y sus recursos evaporíticos", en: Recursos Minerales de la República Argentina. (ed., Zappettini E. O.), *Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR*, ISSN 0328-23-25. Buenos Aires, Anales 35, Volumen II, pp. 1907-1921.
- [4] Alonso R. N. (2006), "Ambientes Evaporíticos Continentales de Argentina", en: Temas de la Geología Argentina, I. *Serie Correlación Geológica, INSUGEO*, Tucumán., 21(2):155-170.
- [5] Alonso R. N. (2017a), "Los salares de la Puna argentina y su recurso minero", en: Muruaga, C.M. y Grosse, P. (eds.), Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales del NOA, *Relatorio del XX Congreso Geológico Argentino*, San Miguel de Tucumán, ISBN: 978-987-42-6666-8, Tucumán. 1194 p. (1018-1038 pp).
- [6] Alonso R. N. (2017b), "Depósitos de litio en salares de Argentina", en: Baran, Enrique José (ed.), Litio: un Recurso natural estratégico desde los depósitos minerales a las aplicaciones Tecnológicas, Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ANCEFN). *Serie Publicaciones Científicas N° 12*, ISBN 978-987-4111-19-7, Buenos Aires, 230 p; pp. 49-68,
- [7] Alonso R. N. (2018), "Litio. El Metal de los Salares Andinos. Curiosidad de la Química en el siglo XIX a Soporte de la Tecnología del Siglo XXI". Con prólogo del Dr. Baran E. J. Ira. ed., *Mundo Gráfico Salta Editorial*, Salta, 120 p.; 22 x 15 cm. ISBN 978-987-698-210-8.
- [8] Alonso R. N. (2019), "Historia de los Boratos y el Litio en la Argentina". V Congreso Argentino de Historia de la Geología: La Geología en el Sesquicentenario de la Academia Nacional de Ciencias, *Academia Nacional de Ciencias*, Miscelánea N° 107, ISSN 0325-3406, Córdoba, pp.12-14.
- [9] Alonso R. N., Chanampa, E. y Martínez V. R. (2017), "Litio en el salar de Pozuelos (Salta)", en: Simposio N° 2: "Geología endógena y exógena del litio en Argentina", *XX Congreso Geológico Argentino*, Tucumán, 7-11 de agosto de 2017, Sardi, F., Alonso, R.N. y Colombo, F. (eds.), Tucumán, Actas, pp. 1-8.
- [10] Alonso R. N., Gutierrez R. y Viramonte J. G. (1984 a), "Megacuercos salinos cenozoicos de la Puna Argentina", *IX Congreso Geológico Argentino*, Bariloche, Actas, Buenos Aires, I: 25 42.
- [11] Alonso R. N. and Rojas W. (2020), "Origin and Evolution of the Central Andes: Deserts, Salars, Lakes, and Volcanoes", Part I: General Considerations (pp. 3-19), en: Farías Maria Eugenia (ed.), *Microbial Ecosystems in Central Andes Extreme Environments Biofilms, Microbial Mats, Microbialites and Endoevaporites*, ISBN 978-3-030-36191-4 ISBN 978-3-030-36192-1 (eBook). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-36192-1>. Springer Nature, Switzerland, 286 p.
- [12] Alonso R. N., Ruiz T., y A. G. Quiroga (2012), "Mineralogía de los boratos de la República Argentina". Prólogos Dr. Lorenzo Aristarain, Dra. Milka K. de Brodtkorb, *Mundo Gráfico Salta Editorial*, ISBN 978-987-1618-94-1, Salta, 280 p.
- [13] Alonso R. N., Viramonte J. G., y Gutierrez R. (1984 b), "Puna Austral. Bases para el subprovincialismo geológico de la Puna Argentina", *IX Congreso Geológico Argentino*, Bariloche, Actas, Buenos Aires, I: 43 63.
- [14] Baran E. J. (2017), "Litio: un Recurso natural estratégico desde los depósitos minerales a las aplicaciones tecnológicas". 1ª edición especial. Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ANCEFN), 2017. ISBN 978-987-4111-19-7. *Publicaciones científicas N° 12*, Buenos Aires. 230 p.,
- [15] Catalano L. R. (1964), Boro, Berilo, Litio: Una nueva fuente de energía. Secretaría de Minería de la Nación, *Serie Argentina N° 3*, Buenos Aires.
- [16] Chanampa E. y Alonso R. N. (2017), Litio en el salar de Pocitos (Salta, Argentina). En: Simposio N° 2: "Geología endógena y exógena del litio en Argentina". XX Congreso Geológico Argentino, Tucumán, 7-11 de agosto de 2017, Sardi, F., Alonso, R.N. y Colombo, F. (Eds.), Actas, pp. 12-16. Tucumán.
- [17] Chanampa E. G., Martínez V. R., Alonso R. N., Galli C. I. y De la Hoz M. (2018), "Las Paleofuentes termales pleistocenas del salar de Pozuelos (Puna Argentina)", *Séptimo Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Naturalia Patagónica*, ISSN 2591-6653, Volumen 10, Puerto Madryn, pp. 327-330.
- [18] Chong G. (1971), "Depósitos salinos en el Norte de Chile y el salar de Atacama", *Geochile*, 3:13-27.
- [19] Chong G. (1984), "Die salare in Nordchile-Geologie, Structure und Geochemie", *Geotektonische Forschungen*, 67(I-II): 1-146.
- [20] Godfrey L. V., Chan L.-H., Alonso R. N., Lowenstein T. K., McDonough W. F., Houston J., Li J., Bobst A., Jordan T.E. (2013), "The role of climate in the accumulation of lithium-rich brine in the Central Andes", *Applied Geochemistry*, 38, 92–102.
- [21] Houston, J., Butcher, A., Ehren, P., Evans, K., Godfrey, L. V. (2011), "The evaluation of brine prospects and the requirement for modifications to filing standards", *Economic. Geology*, 106, 1225–1239.
- [22] Hoyos A. R., Alonso R. N., del V. Ruiz T (2015), "Potencial litífero de las minas Rodrigo y Eugenia. Salar del Hombre Muerto (Salta, Argentina)". *X Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades de Ingeniería del NOA. Universidad Nacional de Salta, Mayo de 2015*, Actas, Salta, ISSN 1853-7871, pp.710-715.
- [23] Igarzábal A. (1979), "Los rasgos geomorfológicos y su relación con el origen del salar Pastos Grandes, departamento Los Andes, Provincia de Salta". *Séptimo Congreso Geológico Argentino*, Actas I: 199-209.
- [24] Igarzábal A. (1984), "Origen y evolución morfológica de las cuencas evaporíticas cuaternarias de la Puna Argentina", *Noveno Congreso Geológico Argentino*, Buenos Aires, Actas III: 595-607.
- [25] Igarzábal A. (1991), "Evaporitas cuaternarias de la Puna Argentina", en: *Génesis de formaciones evaporíticas: modelos andinos e ibéricos*, Coord.: Dr. Pueyo Mur J. J., Universidad de Barcelona, ISBN 84 7875 666 3, Barcelona, pp. 233-374.

- [26] Igarzábal A. (1996), "Los salares de la Puna Argentina (provincias de Jujuy, Salta y Catamarca)", *Instituto de Beneficios de Minerales, Universidad Nacional de Salta*, Inédito.
- [27] Igarzábal A. P. y Alonso R. N. (1990), "Origen del Boro y Litio", *IV Jornadas Argentinas de Ingeniería de Minas*, Tomo I, Jujuy, p.35-55.
- [28] Igarzábal A. y Poppi R. (1980), "El salar de Hombre Muerto", *Acta Geológica Lilloana*, Tucumán, 15(2):103-117.
- [29] Kasemann S, Alonso R. N., Meixner A. and Lucassen F. (2018), "Lithium and strontium isotope composition of typical salar deposits from the Salar de Pozuelos, Argentine Puna: Implication for the source of lithium". *15th IAGOD Symposium*, Aug. 2018, Salta: 28-31
- [30] Martínez V. R., Alonso R. N. y Galli C. I. (2018 a), "Morfología de las costras evaporíticas del salar de Pozuelos (Puna Austral)", Séptimo Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, *Naturalia Patagónica*, ISSN 2591-6653, Puerto Madryn, Vol. 10, pp. 311-313.
- [31] Martínez V. R., Alonso R. N., Galli C. I. y Chanampa E. G. (2018 b), "Geomorfología del salar de Pozuelos (Puna salteña)". Séptimo Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, *Naturalia Patagónica*, ISSN 2591-6653, Puerto Madryn. vol. 10, pp. 324-326.
- [32] Martínez V. R., Alonso R. N. y Galli C. (2018 c), "Historia evolutiva paleoambiental del depocentro del salar de Pozuelos (Puna Austral)", *Serie Correlación Geológica*, INSUGEO, Tucumán, ISSN 1514-4186 - ISSN on-line 1666-9479, 34 (2): 42-55.
- [33] Martínez V. R., Sabio Collado R. M., Galli C. I., Alonso R. N., Ruiz T. V. y González E. D. (2019), "Dominios evaporíticos del salar de Pozuelos (Puna salteña)". *V Simposio del Mioceno-Pleistoceno del Centro y Norte de Argentina. Instituto de Geología y Minería. Universidad Nacional de Jujuy, Actas de Resúmenes*, ISBN 978-987-698-277-1, pp. 37-40.
- [34] Meixner A., Lucassen F., Alonso R. N., Heit B., Kasemann S. (2015), "Sr and Li isotope distribution in space and time - Salar de Pozuelos, NW Argentina". *Abstract and Poster. GeoBerlin*, Berlin.
- [35] Meixner A., Lucassen F., Rosner M., Becchio R., Alonso R. N., Kasemann S. A. (2017), "Lithium isotope signatures of Andean Palaeozoic basement and Cenozoic volcanic rocks", *Poster, GeoBremen*, Bremen.
- [36] Méndez V., Turner J., Navarini A., Amengual R. y Viera O. (1979), "Geología de la Región Noroeste, Provincias de Salta y Jujuy, República Argentina". *Dirección General de Fabricaciones Militares*, 118 p., 1 mapa a escala 1:400.000. Buenos Aires.
- [37] Muessig S. (1958), "Turi Lari, a bórax crystal playa deposit in Argentina". *Geological Society of America*, Bulletin, 69:1696-1697.
- [38] Muessig S. (1966), "Recent South American Borate Deposits". 2nd Symposium on Salt, Rau J. L. (ed.), Vol. 1. *Northern Ohio Geological Society*, Cleveland: 151-159.
- [39] Nicolli, H., Suriano J., Kimsa J. y Brodtkorb A. (1980), "Características geoquímicas generales de aguas y salmueras de la Puna Argentina", *Academia Nacional de Ciencias, Córdoba, Miscelánea N° 63*, 38 p.
- [40] Nicolli H., Suriano J., Kimsa J. y Brodtkorb A. (1982a), "Geochemical characteristics of brines in evaporitic basins, Argentinian Puna". *Academia Nacional de Ciencias, Córdoba, Miscelánea N° 64*, 19 p.
- [41] Nicolli H., Suriano J., Méndez V. y Gómez M. (1982 b), "Salmueras ricas en metales alcalinos del salar Hombre Muerto, Catamarca, Argentina". *Quinto Congreso Latinoamericano de Geología*, Buenos Aires, Actas III: 187-204.
- [42] Reichert F. (1907), "Los yacimientos de boratos y otros productos minerales explotables del territorio de los Andes (Puna de Atacama)". *Anales del Ministerio de Agricultura. Sección Geología, Mineralogía y Minera*, Buenos Aires, Tomo II, N° 2.
- [43] Rojas W. y Alonso R. N. (2017), "Isótopos de litio en salares de la Puna Austral", en: Simposio N° 2: "Geología endógena y exógena del litio en Argentina", *XX Congreso Geológico Argentino, Tucumán*, Sardi, F., Alonso, R. N. y Colombo, F. (eds.), Tucumán, Actas, pp. 20-25.
- [44] Rojas W. and Alonso R. N. (2018), "Sources of lithium analysis (Li-H-O isotopes) in Centenario-Ratones basin, Puna, Argentina". *11th SSAGI, South American Symposium on Isotope Geology, Latin America*, Cochabamba, Bolivia.
- [45] Rojas W., Strecker M., Pingel H. and Alonso R. N. (2018), "A Mio-Pliocene Li-bearing ignimbrite in the Ratones endorheic basin, Puna Plateau, Salta, Argentina", *Poster. 15th IAGOD Symposium*, Salta.
- [46] Pingel H., Alonso R. N., Altenberger U., Cottle J., Strecker M. R. (2019), "Miocene to Quaternary basin evolution at the southeastern Andean Plateau (Puna) margin (~24°S lat, Northwestern Argentina)", *Basin Research*, doi:10.1111/bre.12346, V. 31, N° 4, pp. 808-826.
- [47] Pingel H., Strecker M. R., Mulch A., Alonso R., Cottle J. and Rohrmann, A. (2020), "Late Cenozoic topographic evolution of the Eastern Cordillera and Puna Plateau margin in the southern Central Andes (NW Argentina)", *Earth and Planetary Science Letters*. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116112>.
- [48] Sureda R., Galliski M., Argañaraz P. y Daroca J. (1986), "Aspectos metalogenéticos del noroeste argentino", *Universidad Nacional de Salta, Capricornio*, 1(1):39-95,
- [49] Viramonte J. G., Alonso R. N., Gutierrez R. V. y Argañaraz R. A. (1984), "Génesis del litio en los salares de la Puna Argentina". *IX Congreso Geológico Argentino, Bariloche*, Buenos Aires, Actas III: 471-481.