

LOS YACIMIENTOS MUNDIALES DE BORATOS NEÓGENOS Y CLAVES PARA SU PROSPECCIÓN EN LOS ANDES CENTRALES

Ricardo N. ALONSO
(UNSa-CONICET)

Resumen

En el planeta Tierra hay sólo cuatro provincias metalogénicas mayores, de boratos continentales exógenos, que en orden de importancia son: 1) Anatolia en Turquía, 2) SW-USA (California, Nevada), 3) Andes Centrales de Sudamérica y 4) Tíbet en Asia Central. Estas provincias tienen características en común con analogías y diferencias. La génesis está relacionada con volcanismo y termalismo asociado, cuencas cerradas y clima árido. Salvo el Tíbet (plateau colisional), las demás provincias se han originado en marcos tectónicos de plateau continentales no colisionales, por subducción. Tres provincias (Anatolia, Tíbet y SW-USA) se encuentran en el hemisferio norte y una (Andes Centrales) en el hemisferio sur. La edad es Cenozoico, y principalmente Neógeno y Cuaternario. Boratos miocenos se encuentran en las provincias de Anatolia (ca. 18 Ma), SW-USA (ca. 22-6 Ma), y Andes (ca. 7-5 Ma). Tíbet tiene sólo boratos cuaternarios, mientras que Anatolia sólo tiene boratos miocenos. Existen cuatro yacimientos miocenos de tincal: uno en Anatolia (Kirka), uno en California (Boron) y dos en los Andes Centrales (Tincalayu y Loma Blanca). Kirka, Boron y Loma Blanca tienen similitudes en cuanto a la zonación química y mineralógica de los boratos, con secuencias Ca/CaNa/Na/CaNa/Ca (colemanita y/o inyoita/ulexita y/o probertita/tincal/ulexita y/o probertita/colemanita y/o inyoita). Los boratos están incluidos en secuencias volcánoclasticas lacustres, evaporíticas, de colores verdes, poco deformadas. Tincalayu (Salta) es diferente con secuencias compuestas por halita/yeso/tincal/ulexita. El tincal es texturalmente distinto en los cuatro yacimientos: ritmitas finas (Kirka), ritmitas gruesas (Boron), masivo (Tincalayu) y evapocristales disseminados (Loma Blanca, Jujuy). Depósitos de colemanita con o sin probertita e hidroboracita están presentes en Anatolia (e.g.,

Emet), Death Valley, Ca. (Furnace Creek Fm.), y Sijes (Argentina). Salares boratíferos ocurren en Tíbet (ulexita y boratos magnesianos), Death Valley (ulexita, bórax), y Andes Centrales (ulexita, bórax, inyoita). También existen depósitos de géiseres boratíferos y los mejores ejemplos del mundo se encuentran en la Puna Argentina. Comprender el origen, yacencia y génesis de los boratos en los diferentes ambientes geodinámicos resulta clave para la prospección de nuevos yacimientos soterrados. Los boratos son sales solubles que desaparecen de la superficie por meteorización. Eventualmente un residuo de ulexita, el más estable y ampliamente distribuido de las especies de boratos puede denunciar la proximidad de un cuerpo profundo. Los depósitos neógenos de boratos aparecen adosados a fallas o bien están soterrados por aluviones o materiales volcánicos (ignimbritas, coladas, tobas). La extensión de esas rocas en los Andes Centrales y la fácil lixiviación de los boratos en superficie, juegan a favor de la potencialidad de cuerpos ocultos interstratificados en las secuencias sedimentarias neógenas. Entre las pautas a tener en cuenta en la prospección se tiene el marco espacial de la Provincia Boratífera Centroandina, el “timing” de generación boratífera cuyo clímax se encuentra en (6±1 Ma), facies lacustres, secuencias volcanoclásticas, evaporitas asociadas (yeso, halita), zonación de evaporitas, calizas y brechamiento de calizas, travertinos, ulexita secundaria y anomalías geoquímicas de arsénico, litio y estroncio, entre otros. Se da a conocer en este trabajo las guías básicas para la búsqueda de depósitos de boratos en los Andes Centrales así como la potencialidad de la región para nuevos descubrimientos. En igual sentido, las claves de prospección son útiles para otras evaporitas fósiles tal el caso de sales de alta hidratación como sulfato de sodio o carbonato de sodio.

Palabras clave: Boratos, Provincias Boratíferas, Evaporitas, Andes Centrales, Prospección.

Abstract

Neogene borate deposits of the world and keys for their prospection in the Central Andes. There are four main metallogenic borate provinces, with exogenous deposits of continental environments, recognized in global scale. They are Anatolia (Turkey), California (USA), Central Andes (South America) and Tibet (Central Asia). These provinces have several common characteristics and some differences. Generally, the origin of the borate deposits is associated to Cenozoic volcanism, thermal spring activity, endorheic basins and arid climate. With the exception of the Tibet collisional plateau, the other provinces were generated in a

tectonic framework of non-collisional continental plateaus characterized by plate subduction. The age of the borates is Cenozoic, principally, Miocene and Quaternary. Miocene borate deposits are present in Anatolia (ca. 18 Ma), California (ca. 22-6 Ma) and the Andes (ca. 7-5 Ma). Tibet has only Quaternary borate deposits and Anatolia only Miocene borate deposits. Four main tincal deposits are known in the world: one in Anatolia (Kirka), another in California (Boron), and two in the Andes (Tincalayu and Loma Blanca). Kirka, Boron and Loma Blanca have similarities in the chemical and mineralogical composition of the borate minerals with sequences Ca/CaNa/Na/CaNa/Ca (colemanite and/or inyoite - ulexite - tincal - ulexite - colemanite and/or inyoite). Borate minerals are included in greenish volcanoclastic lacustrine evaporitic sequences, with scarce tectonic deformation. On the other side, Tincalayu looks different, with evaporites included in red beds, with disharmonic deformation, and a lithologic sequence composed from base to top of halite/gypsum/tincal/ulexite. Tincal textures are different in these four deposits: chemical fine varves (mm) in Kirka, chemical thick varves (cm) in Boron, massive (m) in Tincalayu, and disseminated evapocrystals (mm to cm) in Loma Blanca. Colemanite deposits with or without probertite and hydroboracite are present in Anatolia (e.g., Emet), Death Valley, Ca. (Furnace Creek Fm.), and Sijes (Argentina). Quaternary borates are present in salares (Andes) and playa-lakes and salt pans (USA-Tibet). Deposits in California and the Andes are made by calcium and calcium sodium borates (ulexite, tincal, inyoite), and in Tibet (ulexite and Mg-borates). Thermal springs and geysers, with related borate deposits, are common in the Central Andes. The four metallogenic provinces described here contain the most important borate reserves in the world. The understanding of the space-time distribution, occurrence and genesis of borates in the different geodynamical settings is a key for the prospection of new deposits. Borates are soluble salts that are strongly weathered at the surface. This paper deals with the indicators for borate prospection in the Central Andes, as well as for potential new discoveries in Neogene rocks. I present some of the most important clues for borate exploration in the Puna region and by extension in the Central Andes Borate Province. Up to the present time, six borate-bearing basins have been discovered in the Argentine Puna: three in Jujuy province (Morro Blanco, Loma Blanca and Cauchari), two in Salta province (Sijes and Tincalayu) and one in Catamarca province (Antofalla). Volcanic rocks and alluvium deposits have covered large surfaces with buried Neogene formations. Both, borate solubility and extensive volcanic and sedimentary formations suggest the presence of hidden deposits. In the target definition, I use several parameters such as space location (Central Andean Borate Province), timing of borate formation (Neogene, 6 ± 1 Ma), lacustrine facies,

volcanoclastic sequences, associated evaporites (gypsum, halite), evaporite zonation (*bull-eye* pattern), limestone and limestone brecciation, travertines, secondary ulexite, and geochemical anomalies of As, Li and Sr. In the same sense, prospection clues are useful to look for other soluble evaporites such as sodium sulphate or sodium carbonate.

Key words: Borate, World Borate Provinces, Evaporites, Central Andes, Prospection

Introducción

Los boratos son las sales del ácido bórico con la unión de metales. Conforman la clase VI de la sistemática de Strunz (1997), Strunz y Nickel (2001). Hay boratos endógenos formados por metasomatismo en skarns, greisens o como turmalinitas. Allí los boratos se encuentran formando especies minerales junto a elementos como Fe, Mn, Sn, Be, entre otros. Los boratos exógenos son marinos o continentales. Los marinos son especialmente boratos magnesianos que se forman en las últimas etapas de la evaporación de una cuenca marina restringida una vez que han precipitado los carbonatos, sulfatos y cloruros (ejemplo Zechstein en Alemania).

Los boratos de importancia económica son sales exóticas y exógenas asociadas con otras evaporitas que tienen una edad entre el Mioceno inferior y la actualidad. Las especies minerales dominantes son boratos hidratados de Na (bórax o tincal, kernita, tincalconita), Ca-Na (ulexita, probertita), Ca (colemanita), Mg (kurnakovita, inderita) o Ca-Mg (hidroboracita). Los depósitos son escasos y se encuentran restringidos a unas pocas provincias metalogénicas: Provincia Boratífera Turca o de Anatolia, Provincia Boratífera Norteamericana, Californiana o del SW de Estados Unidos, Provincia Boratífera Tibetana y Provincia Boratífera Centroandina. Salvo el Tíbet, en todas las demás comarcas se conocen boratos depositados en tiempos neógenos. Al presente, en los Andes Centrales se han descubierto boratos neógenos únicamente en la Puna Argentina.

Los boratos constituyen el ítem de explotación continua más longevo, especialmente en la Puna Argentina, donde las primeras faenas mineras se remontan a la década de 1870. Esta región y otras de afloramientos neógenos de Bolivia, Chile y Perú siguen siendo promisorias desde un punto de vista prospectivo. En este trabajo se destacan particularmente las claves para la prospección de boratos neógenos y evaporitas asociadas de interés económico así

como también algunas de las regiones con mayor potencialidad en el marco del edificio andino. El interés suscitado en las salmueras de litio ha desplazado en los últimos años los trabajos en el rubro boratífero.

El uso de los boratos se encuentra reflejado en cientos de aplicaciones de la vida moderna, entre los cuales se destacan los vidrios, cerámica, farmacéutica, jabones, detergentes, aplicaciones agrícolas, fibras de vidrio, y otros. El principal productor mundial es Estados Unidos seguido por Turquía y en tercer lugar los países de los Andes Centrales de Perú, Bolivia, Chile y Argentina. Si bien los depósitos más grandes están en Turquía, el mayor yacimiento en explotación sigue siendo Boron (California).

Antecedentes

La bibliografía sobre boratos es abundante pero solo se conocen unos pocos trabajos de síntesis (e.g., Watanebe, 1964; Aristarain y Hurlbut, 1972; Alonso, 1986; Kistler y Helvaci, 1994; Barker y Lefond, 1995; Grew y Anovita, 1996; Smith y Medrano, 1996; Garrett, 1998; Helvaci et al., 2012). En la última década se han realizado además numerosos trabajos sobre los aspectos mayores de los Andes Centrales, desde el punto de vista de la evolución del orógeno y su volcanismo asociado. Entre ellos pueden consultarse a Coira et al. (1982), Jordan et al., (1983 a, b), Schawb (1985), Sureda et al (1986), Alonso y Viramonte (1987), Isacks (1988), Kay et al., (1995), Allmendinger et al. (1997), Strecker et al. (2007). El tema de los boratos desde el punto de vista mineralógico ha sido abordado principalmente por Aristarain (1992, y trabajos allí citados), Sureda (1991); y la geología de los depósitos por Alonso (1986, 1999) y Alonso et al (2106, y trabajos allí citados).

Provincia Boratífera de Anatolia (Turquía)

Contiene los mayores depósitos de boratos del mundo. Sólo se presentan boratos de edad Neógeno, mientras que los salares están ausentes dado el clima mediterráneo de la región. La provincia boratífera se encuentra hacia el noroeste de Anatolia. La región está enmarcada por los montes Póntides en el norte (sobre el Mar Negro) y los montes Táurides en el sur (sobre el Mar Mediterráneo). Durante el Mioceno inferior (entre 19 y 17 Ma), la región de Anatolia albergó lagos en un ambiente volcánico activo con aportes de aguas termales ricas en boro que lograron precipitar ingentes cantidades de boratos sódicos (tincal), calco-sódicos (ulexita)

y cálcicos (colemanita). Las secuencias que albergan secciones boratíferas son de naturaleza volcánico-lacustre, verdosas con importantes intercalaciones de travertinos en base y techo. Las evaporitas convencionales, halita y yeso, están ausentes salvo en un depósito con capas de yeso (Sultancahir). Los yacimientos más notables son Kirka, Emet, Bigadic y Kestelek. Kirka es el depósito más grande del mundo de boratos de sodio. La secuencia boratífera muestra una zonación química y mineralógica con el siguiente orden de base a techo: colemanita (Ca), ulexita (Ca-Na), tincal (Na), ulexita (Ca-Na), colemanita (Ca). El tincal se presenta en ritmitas finas milimétricas formadas por capas de tincal separadas por una película de arcillas hectoríticas (Li). Emet es el yacimiento más grande de colemanita. La secuencia es similar a la de Kirka pero sin la facies boratada sódica. El mineral dominante es colemanita que está acompañada por grandes cantidades de sulfuros de arsénico (rejalgar, oropimente). La colemanita ocurre en forma nodular donde los nódulos alcanzan desde pocos centímetros hasta un metro de diámetro. El interior de los nódulos muestra un crecimiento esferulítico en capas catafilares separadas por niveles de rejalgar. Lucen similares al crecimiento de los anillos de los árboles. Las principales referencias sobre los boratos de Turquía corresponden a Helvacı (1977, 1978, 1984, 1994, 1995), Kistler y Helvacı (1994), Palmer y Helvacı (1995, 1997), Helvacı y Alonso (2000), Helvacı y Orti (1998, 2004), Helvacı et al (2012).

Provincia boratífera norteamericana

Los depósitos de boratos en América del Norte se encuentran en el SW de los Estados Unidos (California, Nevada) y norte de México (Sonora). Forman parte de la provincia morfo-tectónica del “Basin and Range”, un área extensional al nivel del mar. Se conocen depósitos neógenos y cuaternarios. Los neógenos tienen rangos de edades entre 24 y 6 Ma, estando los más antiguos en el norte de México en el desierto de Sonora (Tubutama, Magdalena). Los cuaternarios corresponden a playas, playas-lake o salinas (salt pan), donde el mayor ejemplo es el Valle de la Muerte (Death Valley, Harmony Borax). El principal depósito Neógeno es Boron (o Kramer) en el desierto de Mojave. Se trata de un yacimiento cuyo “Open Pit” es la mayor explotación y productora de boratos a nivel mundial (US Borax). La columna estratigráfica está formada por una colada basáltica (F. Saddleback) sobre la que se apoya una sección volcánico-lacustre, boratífera, verdosa, con una edad de 18 Ma, integrada de base a techo por colemanita/ulexita/tincal-kernita/ulexita/colemanita. El bórax se presenta en ritmitas centimétricas y se formó en un lago alcalino poco profundo

como lo demuestra la presencia de icnitas de aves (Anatidae). En discordancia se apoyan areniscas arcósicas de edad NALMA Hemigfordiano (Mioceno superior). En los laterales del Death Valley se encuentra la Formación Furnace Creek, de 6 Ma, que alberga una sección boratífera formada principalmente por facies boratadas cálcicas y calco-sódicas (colemanita, probertita y ulexita). Actualmente es un parque nacional. Los depósitos históricos de boratos son Ryan, Sigma, White Monster, Cerro Blanco, Widow, y fuera del valle, Billie, Terry, Shoshone, Amargosa, Three Kids, entre otros. En Nevada se encuentra Anniversary, con una secuencia lacustre acompañada de travertinos que conservan las paleo bocas termales y abundantes pisadas de aves. La mineralización dominante allí es colemanita. Referencias sobre los depósitos norteamericanos corresponde a Kistler y Smith (1983), Smith (1985), Barker y Barker (1985), Barker y Lefond (1985), Alonso (1986), Kistler y Helvacı (1994), Smith y Medrano (1996), Garret (1998), Tanner (2002), Helvacı et al (2012), entre otros.

Provincia boratífera tibetana

La provincia boratífera del Tíbet se encuentran en un marco geodinámico completamente diferente a todas las demás. El alto Plateau del Tíbet es una consecuencia de la colisión de dos placas continentales: India y Asia. Con alturas de 4 a 5 km sobre el nivel del mar, alberga salares boratíferos magnesianos, formados por el aporte de aguas termales y la evaporación del ambiente árido. No se conocen depósitos neógenos al presente. Los salares albergan especialmente ulexita y boratos de magnesio, eventualmente tincal, y las salmueras tienen contenidos en litio. Las principales referencias corresponden a Zheng Mianping (1989), Sun Dapeng (1990), Sun Dapeng, y Li Bingxiao (1993), Kistler y Helvacı (1994), Garrett (1998), Zheng Mianping, et al (2005), Helvacı et al (2012).

Provincia boratífera centroandina

La “Provincia Boratífera Centroandina” (o sudamericana) se encuentra localizada entre la Cordillera de la Costa en Chile y el borde oriental del Altiplano-Puna. Comprende depósitos de boratos neógenos y cuaternarios, formados en los últimos 7 Ma. Los boratos neógenos yacen en serranías sobre el flanco de algunos salares mayores como Antofalla, Hombre Muerto (Tincalayu), Pastos Grandes (Sijes) y Cauchari, o bien en depocentros aislados (Loma Blanca, Morro Blanco). Todos ellos responden a secuencias volcaniclásticas, lacustres, evaporíticas, formadas en un ambiente de volcanismo activo, cuencas cerradas, termalismo

hídrico y clima árido. Los minerales dominantes son bórax o tincal (Tincalayu, Loma Blanca), hidroboracita y colemanita (Sijes), inyoita (Sijes, Loma Blanca). Ulexita está presente en todos los depósitos neógenos y cuaternarios. Los boratos cuaternarios se han formado en salares activos al menos desde el Pleistoceno medio hasta la actualidad. Los depósitos cuaternarios más antiguos corresponden a la Formación Blanca Lila (0,3 Ma) en el salar de Pastos Grandes con presencia de inyoita y ulexita. Los demás depósitos de boratos en salares se han estado formando al menos en los últimos 100 ka. Las especies boratíferas en salares corresponden mayormente a ulexita de amplia distribución y en menor medida a bórax o tincal (Cauchari, Turi Lari, Lina Lari) e inyoita (Laguna Salinas, Perú; Lagunita, Jujuy). También tiene importancia la presencia de géiseres y manantiales boratíferos, activos y extinguidos, que han derramado soluciones boratíferas (Chillicolpa, Tacna, Perú; Arituzar, Jujuy, Antuco, Salta). Para mayor referencia véase Alonso y Viramonte (1985), Alonso (1986), Alonso et al. (1985, 1987, 1990), Alonso y Viramonte (1996); Alonso et al. (2016) y los trabajos allí citados.

Los Andes Centrales

Los Andes Centrales contienen a la “Provincia Boratífera Centroandina o Sudamericana” (Alonso y Viramonte, 1985). Distintos autores se han referido al origen y evolución del edificio andino. Un completo trabajo de síntesis corresponde a Allmendinger et al. (1997). Los Andes Centrales constituyen el principal orógeno no colisional a escala planetaria y contienen el segundo plateau de importancia mundial luego del Tíbet (Isacks, 1988). El orógeno centroandino se formó por la convergencia y subducción de la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana. Es interesante destacar que la zona donde se desarrolla el arco volcánico es la misma que contiene al plateau del Altiplano-Puna y coincide con una subducción considerada normal de 30°E. Al norte y sur del segmento centroandino, esto es donde termina el arco volcánico aproximadamente a los 15° N y 28° S se extienden segmentos de subducción somera conocidos como “flat slab regions” (Jordan et al., 1983,a,b). La provincia volcánica centroandina (CVZ), coincidente con la “subducción normal” acompaña al plateau Altiplano-Puna y es la portadora de una anomalía planetaria en boro y otros elementos volcanogénicos. La concurrencia de numerosos factores asociados dio lugar a la formación de yacimientos económicos tanto miocenos como cuaternarios.

La génesis de estas particulares sales de boro, asociadas con otras evaporitas continentales, es consecuencia de múltiples parámetros geológicos que actúan en conjunto y que reflejan las singularidades del edificio andino. Entre ellas se destacan las siguientes mencionadas, tomadas aproximadamente en la misma latitud: 1) Los Andes Centrales contienen el mayor relieve a escala planetaria, dado por la fosa de Atacama de 8 km de profundidad y las alturas del arco volcánico que rozan los 7 km, generando así una diferencia de relieve del orden de los 15 km en una distancia vertical menor a 300 kilómetros; 2) Un espesor de corteza continental que supera los 70 km y que tiene su mejor expresión en la región del punto tripartito Bolivia, Argentina, Chile; 3) Precipitaciones pluviales que superan los 3000 mm/a sobre el borde oriental y valores de sequedad extrema en el hiperárido desierto de Atacama; 4) Temperaturas que se aproximan a los 50°C en la llanura chaqueña y temperaturas invernales por debajo de -30°C en la región de la Puna. A su vez, la región altiplánico-puneña se caracteriza por su sequedad, altura a más de 3800 msnm, alta heliofanía, grandes amplitudes térmicas diarias, vientos constantes, fuertes diferencias de albedo entre los salares y su marco geológico, escasez de vegetación, alta evaporación, y otras características geológicas y meteorológicas que favorecen la génesis de evaporitas y entre ellas las de los boratos.

Modelo de formación de los boratos

El modelo de formación de los boratos andinos fue desarrollado por Alonso (1986, 1998) y Alonso y Viramonte (1993). Se sostiene que la concentración de boro para dar lugar a depósitos y yacimientos de interés económico está relacionada con la concurrencia de varios factores asociados como son: 1) Volcanismo activo; 2) Cuencas cerradas; 3) Clima árido; 4) Fuentes termales. El segmento centroandino contiene todos estos elementos. Por un lado, el arco volcánico principal que en algunos tramos sirve de divisoria a los países de la región. De dicho arco, nacen cadenas transversales que se dirigen hacia el Este y que están claramente identificadas en la Puna argentina. El plateau altoandino, está cerrado como una sola gran cuenca precisamente entre el arco volcánico principal y una cadena tectónica que lo acompaña paralelamente en su flanco oriental. Esta cuenca altiplánico puneña altoandina de primer orden está a su vez dividida en otras cuencas menores que se endorreizan ya sea por las cadenas volcánicas transversales, volcanes saltuarios o bloques tectónicos elevados internos. El clima es propio de una región a más de 3700 m.s.n.m., que se encuentra limitada por una barrera orográfica que frena la entrada de los vientos húmedos, más precisamente los

vientos húmedos atlánticos. Los vientos descargan gran parte de su humedad en las montañas orientales y pasan secos a la región altoandina que se convierte así en un desierto a la sombra de las lluvias. Las precipitaciones pluviales y nivales, alcanzan para generar una semiaridez con agua suficiente para alimentar fuentes termales y cuerpos de tipo “playa-lake”. Las fuentes termales ubicadas en los bordes de los salares o en quebradas de los bloques montañosos laterales han sido las encargadas de transportar el boro, dando incluso lugar a ejemplos espectaculares de manantiales boratíferos (Coyahuaima, Arituzar Alumbrio, etcétera) incluso en algunos casos activos como ocurre con la fuente termal de Antuco (Olacapato, Salta) o el géiser de Chillicolpa (Tacna, Perú) (Muessig, 1966; Alonso y Viramonte, 1985a; Alonso, 1986; Alonso, 1999).

Edad de formación de los boratos

No existe todavía una cronología detallada que incorpore a todas las manifestaciones de boratos conocidas. Sin embargo se puede decir que los boratos se han formado en dos periodos principales: 1) Durante el Mioceno superior entre 7 y 5 Ma., y 2) Durante el Cuaternario (< 75 ka al presente). Se conocen boratos pleistocenos más antiguos como las terrazas del salar de Pastos Grandes datadas en 300 ka o las de la península de Los Negros en el salar del Hombre Muerto, cuyos sedimentos se apoyan sobre una ignimbrita de 2 Ma. Lo importante es reconocer que hay dos pulsos principales de formación boratífera y que se encuentran acotados en 6 ± 1 Ma y en <10 ka. El primer pulso da lugar a la tipología de formación de los boratos interestratificados en rocas neógenas y el segundo a los boratos de salares (Alonso, et al., 1989; Alonso y Ruiz, 1997, Vandervoort et al., 1992, 1995).

El volcanismo al tiempo de la generación de los boratos

El primer pulso boratífero correspondería a la tercera etapa de volcanismo identificada por Allmendinger et al. (1997). De acuerdo con esos autores el Mioceno tardío (12-5 Ma) marca la iniciación de un intenso y voluminoso periodo de erupciones ignimbríticas que duraron hasta el Plioceno tardío (3-2 Ma). Extensos flujos de ignimbritas fueron erupcionados desde los centros inmediatamente detrás del arco frontal y a lo largo de las cadenas transversales de rumbo WNW-ESE que atraviesan el plateau Altiplano-Puna. Las coladas de retroarco en el norte de la Puna y sur del Altiplano se apoyan sobre la ampliamente reconocida superficie San Juan de Oro, la cual es posterior a la deformación miocena en la parte oriental del plateau

(Sempere et al 1990). Particularmente espectaculares son los centros gigantescos entre los 21.5° y 23°S extendidos a través del plateau sobre una región volcánicamente tranquila del Mioceno temprano (Coira et al 1993, de Silva 1989). De Silva (1989) asignó a estos centros al también llamado Complejo Volcánico Altiplano-Puna (APVC). Kay et al (1995) sugirieron que la erupción de esos centros se correlaciona con un marcado empinamiento de la zona de subducción en la Puna septentrional y el Altiplano austral, análogo a la “ignimbrite flare-up” del oeste de los Estados Unidos. La adición magmática asociada con tal intenso volcanismo en esta región podría ayudar a explicar el extremo engrosamiento cortical inferido por los estudios geofísicos de Zandt et al (1994). Gigantescas ignimbritas del Mioceno tardío-Plioceno fueron también erupcionadas fuera del APVC. Las más importantes fueron las erupciones de 8-6.5 Ma provenientes del Altiplano oriental y del Oeste de la Cordillera Oriental, así como las erupciones tempranas de la caldera del Cerro Galán (Sparks et al 1985) en el retroarco de la Puna austral cerca de los 26°S. Complejos de calderas y estratovolcánicos de retroarco también entraron en erupción durante ese tiempo (Coira et al 1993). El segundo pulso boratífero correspondería a la cuarta etapa de volcanismo identificada por Allmendinger et al. (1997). Sostienen esos autores que el periodo más joven del magmatismo del plateau (0-3 Ma) está dominado por complejos dómicos-estratovolcánicos de composición andesítica a dacítica y en menor grado por pequeñas tobas riodacíticas en el arco volcánico de la Cordillera Occidental, así como pequeños conos monogénicos máficos y coladas de fisura en el retroarco. Las más grandes coladas máficas, las cuales tienen un quimismo de tipo intraplaca, están concentradas sobre la moderna zona de silencio sísmico en la placa subducida mientras que las coladas medianas que son calcoalcalinas ricas en potasio se hallan principalmente entre los 26° y 27°S y desde alrededor de 25° a 23°S. Pequeñas coladas shoshoníticas ocurren próximas al Lineamiento Calama-Olacapato-El Toro a los 24°S y en el Altiplano. El único gran estratovolcán cuaternario de retroarco es el Cerro Tuzgle (dacítico a basáltico andesítico) en la parte más oriental de la Puna a los 24°S (Coira y Kay 1993), y la única gran ignimbrita es la del cerro Galán (Plioceno tardío) de 1000 km³, en la Puna austral (Sparks et al 1985). El volumen de material volcánico Cuaternario es mucho menor que aquel proveniente de los centros de edad Mioceno-Plioceno.

Principales depósitos y manifestaciones neógenas

1) Depósitos del Mioceno

a) **Tincalayu**

Se ubica en una península del interior del salar del Hombre Muerto en el límite de las provincias de Salta y Catamarca. Pertenece a los yacimientos de boratos de sodio. Se trata de un depósito de tincal que se apoya sobre un basamento de sal de roca y está cubierto por sedimentitas pelíticas rojas. Todo el conjunto está deformado disarmónicamente. Es el único yacimiento de tincal de los cuatro que se conocen en el mundo que está relacionado con halita y yeso. Existen facies de yeso-anhidrita hacia el Este que serían cambios laterales del tincal. La datación de una toba tomada en el cuerpo de tincal dio una edad de 5.86 ± 0.14 Ma. Estaría asociado a la evolución del volcán Ratonés, un complejo estrato-volcánico mioceno muy erosionado que se encuentra algunos kilómetros al noreste. Coladas de basalto pleistocenas lo cubren en su flanco occidental. Tiene una mineralogía compleja donde se han descrito 17 especies de boratos (Aristarain, 1991, 1993; Aristarain y Rossetto, 1993). Se explota mediante un open-pit. Sus reservas eran de 700.000 toneladas de anhídrido bórico en la década de 1980 (Alonso y González Barry, 1989; Alonso et al., 2016).

b) **Loma Blanca**

Loma Blanca es un depósito de boratos, compuesto principalmente por inyoita, ulexita y tincal, de edad Mioceno superior, localizado en la Puna de Jujuy (departamento Susques). Se encuentra ubicado a unos 10 km al sudoeste del pueblo de Coranzulí. Sus coordenadas geográficas aproximadas son: $23^{\circ} 03' S$ y $66^{\circ} 27' O$ este, y su altura es de unos 4.150 m.s.n.m. Las capas de boratos están intercaladas en sedimentitas que se correlacionan cronológicamente con la Fm. Sijes, la cual es la unidad litoestratigráfica portadora de boratos en la Puna. La secuencia boratífera se presenta en facies lacustres de tufitas finas, verdes a grisáceas, de unos 30 m de espesor. En ellas ocurren unas 10 capas de boratos de 1 a 3 m de potencia. Los minerales de boratos (inyoita, ulexita, tincal, teruggita, colemanita), aparecen como nódulos o cristales crecidos singenéticamente en el depósito fangolítico. Una toba en la base de la secuencia con boratos arrojó una edad K-Ar de 6.99 Ma. Las facies lacustres se extienden unos 2 km y luego gradúan lateralmente a facies fluviales. Puede reconocerse en el depósito una zonación mineralógica vertical con el siguiente orden: inyoita-ulexita-tincal-ulexita-inyoita. En superficie los boratos están reemplazados por calcita pudiendo reconocerse pseudomorfos holoédricos de calcita según tincal. El estudio sobre el origen del depósito revela un cuerpo salino evaporítico, formado en el Mioceno superior, en un clima

árido con volcanismo activo próximo (Coyahuaima-Coranzulí). Fuentes termales con aguas ricas en boro alimentaron una depresión fangosa sometida a fuerte evaporación lo que permitió el crecimiento de los cristales. Depósitos actuales similares corresponden a los salares Turi Lari, Lina Lari y Cauchari. Sobre la base de unos 5.000 m de sondajes se calcularon reservas globales de boratos del orden de los 20 millones de toneladas con una ley de 15% de anhídrido bórico. Se explota a cielo abierto (Alonso et al., 1988 a, b; 2015; 2016).

c) Sijes

Se ubica en la Puna de Salta, en el interior de la depresión del salar de Pastos Grandes. Se trata de un distrito con varios depósitos y manifestaciones, que afloran a lo largo de una sierra de 30 km de longitud y que representa la mayor acumulación de boratos neógenos de América del Sur. Se presentan dos formaciones estratigráficas con numerosos miembros y que cubren un lapso cronológico entre aprox. 7 y 5 millones de años. La más antigua es la Fm. Pozuelos, formada mayormente por halita y que en su parte superior presenta niveles de ulexita e inyoita designados como Miembro El Zorro (Salim, 1997). Luego le sigue la Fm. Sijes que consta de cuatro miembros, designados en orden cronológico como: M. Ona (colemanita, ulexita, inyoita); M. Monte Amarillo (hidroboracita, inyoita); M. Monte Verde (colemanita, inyoita) y M. Esperanza (colemanita, hidroboracita) (Alonso, 1986; Rojas y Alonso, 1998 a,b). Las minas más importantes del distrito y que tienen explotaciones sistemáticas son las de Monte Amarillo, Monte Azul, Monte Verde, Santa Rosa, Esperanza (Borax Argentina S.A.) y Sol de Mañana (Ulex S.A.). Sus reservas se encuentran en el orden de las 7.500.000 de toneladas de anhídrido bórico. Una síntesis de este distrito corresponde a Alonso y González Barry (1990) y Alonso et al (2016).

2) Manifestaciones del Mioceno

a) Cauchari

Sobre la margen oriental del salar Cauchari se extienden importantes afloramientos de rocas neógenas, entre las cuales ha sido definida la Fm. Trinchera (Schawb, 1973). Esta formación presenta afinidades litológicas y cromáticas con la Fm. Sijes del área tipo, pero con edades radiométricas algo más antiguas (Schawb y Lippolt, 1974). La primera mención sobre boratos (en este caso silicoboratos) corresponde a Gay et.al. (1972), quienes reportan el hallazgo de

nódulos de howlita asociados con yeso en un lugar conocido como cerro Codo de Agua, aproximadamente en la parte centro-oriental del salar. En el extremo nororiental del salar se encuentra una serranía conocida como cerro Negro u Overo. Está integrada por afloramientos de la Fm. Trinchera, principalmente limoarcilitas, areniscas y tufitas, de colores claros hasta rojizos, los cuales están cubiertos en discordancia angular por vulcanitas básicas. En la ladera occidental de la serranía se observaron potentes bancos de travertinos interestratificados. Algunos metros por encima de los travertinos se presenta una manifestación boratífera integrada por capas rítmicas de ulexita y finos niveles de colemanita (Alonso, 1986). La ulexita se intercala rítmicamente con limolitas en capas de 3 a 5 cm. La colemanita aparece junto con calcita, en agregados radiales o como pequeños cristales. Un análisis químico dio 48,36% de anhídrido bórico. El espesor de la zona mineralizada es de 1 a 1,5 m y la extensión longitudinal de unos 10 metros. Se trata de una manifestación lenticular en superficie. Perforaciones realizadas por Boroquímica Samicaf en la década de 1980 no detectaron la continuación areal de estos afloramientos. En la misma serranía se encuentran algunas otras venas transgresivas aisladas de ulexita y también ulexita diseminada en las sedimentitas. Todo el cordón oriental de Cauchari es promisorio para la prospección de cuerpos ocultos de boratos.

b) Antofalla

El borde oriental del salar de Antofalla presenta extensos afloramientos de rocas neógenas que alcanzan su mejor expresión en la zona central y sur. Las litologías evaporíticas dominantes son halita y yeso. Se ha mencionado la presencia de ulexita en el interior de la sal de roca (Alonso, 1986). Exploraciones llevadas a cabo por la empresa Borax Argentina S.A., habrían alumbrado acumulaciones de otros boratos pero la información es reservada. Todo el cordón oriental del salar es prospectivo para boratos y evaporitas asociadas.

c) Morro Blanco

Se trata de afloramientos neógenos extensos que se encuentran a lo largo del río Grande de Coranzulí y al oeste del yacimiento de tincal de Loma Blanca. En un sector conocido como Punta Corral se encontraron niveles de colemanita nodular de alta ley. Están protegidos legalmente como mina Narciso (Alonso et al., 2004).

Claves para la prospección de boratos terciarios en los Andes Centrales

En este trabajo se aportan algunas de las claves principales que deben tenerse en cuenta en la prospección de boratos neógenos. Además de las condiciones de espacio, tiempo, facies adecuadas, entre otros factores positivos, dos cosas juegan a favor de probables depósitos ocultos de boratos en las rocas terciarias andinas. Uno es que los boratos son sales solubles fácilmente meteorizables en superficie. Es importante destacar que por su solubilidad los boratos desaparecen en superficie o se transforman en otros minerales más estables por pseudomorfosis. Un ejemplo lo constituye Loma Blanca (Jujuy) donde los boratos se transformaron en calcita en superficie. El otro aspecto es que las rocas que son portadoras potenciales de boratos y evaporitas fósiles asociadas se encuentran en gran parte cubiertas por materiales sueltos (aluviones, dunas, etc.) o flujos volcánicos (ignimbritas, basaltos, etc.). Entre los factores que deben considerarse para la prospección se tiene:

- a) **Espacio.** La prospección de boratos en América del Sur se limita a la Provincia Boratífera Centroandina cuyos límites han sido establecidos por Alonso y Viramonte (1985). La distribución de las rocas neógenas y la evolución de las cuencas andinas fue sintetizado por Jordan y Alonso (1987).
- b) **Edad.** Los boratos de la Puna argentina se encuentran estrechamente acotados en un rango de edad que va entre 7 y 5 millones de años atrás. Por lo tanto y al menos en la Puna Argentina, rocas sedimentarias con esa edad pueden considerarse de interés prospectivo. Se ha observado que los yacimientos de la Puna Argentina son más antiguos a medida que se avanza hacia el norte, exactamente al revés de lo que ocurre en Estados Unidos donde los yacimientos son más antiguos en dirección sur; al punto que los más viejos se encuentran en territorio mexicano (desierto de Sonora, depósitos del Mioceno inferior de Magdalena y Tubutama). De confirmarse esta tendencia, cabría esperar boratos neógenos más antiguos en Bolivia y todavía más antiguos en Perú (Mioceno inferior a medio). Todo ello está ligado a la evolución del volcanismo por un lado y de las cuencas por otro como ha sido sintetizado por Allmendinger et al. (1997). La reflexión sobre este punto es que no necesariamente debe tomarse como absoluto el “timing” de generación de boratos de la Puna argentina para extrapolarlo al resto del edificio centroandino.
- c) **Facies sedimentarias.** Deben considerarse varios elementos tales como: i) Presencia de evaporitas. La experiencia indica que en la mayor parte de los yacimientos y

manifestaciones descubiertos en la Puna argentina, los boratos están acompañados de otras evaporitas tales como yeso y halita ya sea en facies basales, cuspidales o laterales. Loma Blanca constituye una excepción ya que muestra únicamente facies boratíferas. Sin embargo la presencia de evaporitas integradas en el contexto más amplio es un indicio valioso; ii) Episodios lacustres. Los boratos son sales formadas en ambientes ácuos y cerrados del tipo salares o playa-lakes. La presencia de capas verdes, arcillosas, volcánicas, es otro de los indicios favorables, más aun cuando aparecen asociadas con evaporitas. La presencia de huellas de aves tal el caso de Sijes (Salta), Boron (California), Anniversary (Nevada), puede ser de interés (Alonso, 1987b; Alonso, 2012); iii) Tobas. Prácticamente todos los yacimientos de boratos conocidos a escala planetaria están asociados con cenizas volcánicas que indican un volcanismo explosivo sincrónico. En muchos casos la matriz de los boratos es volcánica tobacea o tuffítica; iv) Travertinos. Los boratos se han formado por aguas termales que han surgido en los planos de fallas asociados a las cuencas y que han depositado mantos de travertinos. La presencia de facies travertínicas en un contexto más amplio de capas lacustres, evaporitas y cenizas volcánicas, es otra guía valiosa a la exploración de los boratos; v) Diatomitas. La presencia de capas de diatomitas asociadas a boratos es otra guía indirecta; vi) Zonación. Los boratos tienden a formar sistemas evaporíticos tipo “*bull-eye*”, con una zonación química y mineralógica que gradada desde los bordes hacia el centro de la cuenca en el siguiente orden químico: Ca/Ca-Na/Na; y mineralógico: colemanita o inyoita/ulexita o probertita/tincal-kernita. Sólo cuatro yacimientos a nivel mundial tienen la secuencia completa: Kirka, Boron, Tincalayu y Loma Blanca. El resto de los depósitos neógenos puede tener representadas las facies de boratos de Ca y/o Ca-Na.

- d) **Ulexita secundaria.** La presencia de este borato puede ser una guía directa. La ulexita es el borato más ampliamente distribuido y aparece en toda clase de depósitos. Por ser el más estable en condiciones atmosféricas y por formarse de la alteración de otros boratos, puede ser un indicador directo de mineralización subsuperficial. Si no existe dicha mineralización, al menos indica que los sedimentos son muy ricos en boro y que el área resulta de interés prospectivo.
- e) **Anomalías geoquímicas.** Asociado a los depósitos de boratos se han encontrado con frecuencia mineralizaciones de sulfuro de arsénico (rejalgar, oropimente), sulfato de estroncio (celestina), arcillas con litio (hectorita, Muessig, 1958), óxidos de hierro y manganeso relacionados a los travertinos, sulfuro de antimonio (antimonita), entre

otros. Anomalías geoquímicas de arsénico, estroncio y litio pueden tomarse como guías útiles positivas en la búsqueda de evaporitas boratíferas.

Potencialidad del Neógeno de la Puna argentina

a) En áreas de yacimientos conocidos

Los yacimientos de Tincalayu y Loma Blanca, así como el distrito de Sijes, no se agotan en los depósitos conocidos. i) Tincalayu y la península homónima que lo contiene cuentan con varias decenas de miles de metros de perforación. El cuerpo de tincal yace sobre un potente manto de halita que contiene mineralización diseminada de tincal y kernita. El mineral es singenético y no fue lavado desde el horizonte mineralizado superior. De allí entonces que sería posible que exista un ciclo previo de mineralización, probablemente desplazado del depocentro que da lugar al cuerpo principal. En algunas perforaciones, debajo de la sal volvió a cortarse tincal (Raskovsky, com. Personal, 1982). Esto puede ser parte del enrollamiento tectónico sufrido en la interfase halita-bórax o parte de un ciclo anterior. Un estudio integral del yacimiento que abarque sedimentología, tectónica, análisis de facies y cuestiones de génesis pueden ayudar a alumbrar nuevos cuerpos ocultos; ii) Loma Blanca está bastante bien delimitado por perforaciones, aunque aún resta por conocer el potencial de su mitad austral; iii) Sijes representa 30 km de afloramientos neógenos boratíferos a lo largo de una sierra que alberga dos formaciones de interés: Fm. Pozuelos y Fm. Sijes, con sus correspondientes cambios faciales. Estas formaciones suman unos 2000 m de espesor y tienen numerosos depósitos de boratos incluidos destacando los de hidroboracita y colemanita, secundados por ulexita e inyoita. La base y el techo de la secuencia se hunden debajo del salar de Pastos Grandes o bien están cubiertos por extensas superficies aluvionales. La fuerte deformación tectónica y los extensos sectores cubiertos, son todavía blancos de interés prospectivo.

b) En facies neógenas promisorias

En la Puna de Catamarca, las facies neógenas de interés se encuentran ubicadas a lo largo del borde oriental del salar de Antofalla. En la Puna de Salta, los depocentros principales son los ya mencionados de Tincalayu (y toda la cuenca neógena del salar del Hombre Muerto), de Sijes (y toda la cuenca neógena de Pastos Grandes) y algunos afloramientos aislados en la gran cuenca de Arizaro. La Puna de Jujuy es un territorio prácticamente inexplorado desde el

punto de vista de sus potenciales yacencias de boratos terciarios. En 1982 se descubrió tincal en Loma Blanca (Alonso y Viramonte, 1985), un depósito que había sido considerado erróneamente como una fuente termal pleistocena. El hallazgo de mantos de tincal lo convirtieron en el cuarto depósito de ese mineral en rocas neógenas descubierto en el mundo, luego de Kirka (Turquía), Boron (Estados Unidos) y Tincalayu (Argentina). Otros dos depocentros de sedimentación neógena (Mioceno) han dado evidencias de boratos. Uno de ellos, es la faja de sedimentitas clásticas, piroclásticas y evaporíticas que se extienden a todo lo largo del salar de Cauchari, donde se observa ulexita epigenética ampliamente distribuida y en un caso colemanita (cerro Negro). Otros afloramientos miocenos con interés prospectivo se encuentran distribuidos a lo largo y ancho de la geografía puneña de Jujuy (ej. Alrededores de Turi Lari, Susques, Lina Lari, etc.). En un afluente del río Grande de Coranzulí, al oeste de mina Loma Blanca, se descubrió capas de colemanita intercaladas en una secuencia volcanoclástica lacustre. La secuencia yace en discordancia por debajo de una ignimbrita de 6.5 Ma, procedente del complejo volcánico Coranzulí. Este hallazgo habilita para su exploración a la extensa área de afloramientos conocida como Morro Blanco. La Puna jujeña, al igual que la Puna salteña donde se encuentran los yacimientos boratíferos más grandes de América del Sur, así como la inexplorada Puna catamarqueña, tienen un interesante potencial para la prospección de cuerpos ocultos de boratos. Este potencial está dado por la presencia de depocentros de sedimentación neógena, con facies clásticas, piroclásticas y evaporíticas, que representan un clásico ambiente de cuencas de intra-arco/intra-plateau en clima árido.

Potencialidad del Neógeno de Chile, Bolivia y Perú

Las cuencas neógenas con interés prospectivo para boratos se encuentran distribuidas en el norte de Chile, en el oeste de Bolivia (Altiplano) y en el sur del Perú (Puna peruana). En Chile, se extiende una importante faja de afloramientos neógenos evaporíticos al oeste del salar de Atacama (Cordillera de la Sal). En Bolivia, si bien se tiene numerosos depocentros neógenos, los mismos no afloran como ocurre en la Puna argentina a falta de una tectónica que rompa bloques y los exponga a la erosión. El Altiplano es una cuenca llana, cuaternaria, que esconde importantes afloramientos neógenos de probable interés prospectivo (Orris, 1992). En el sur del Perú, el Neógeno de intra-arco, especialmente el Grupo Maure, tiene potencialidad a diferencia del Neógeno de la costa que es más antiguo. Las exploraciones desarrolladas en facies neógenas en los departamentos de Arequipa, Moquegua, Puno y Tacna dieron valores anómalos de boro en las sedimentitas y en un caso se descubrieron

potentes facies de yeso-anhidrita (Tincopalca, carretera Puno-Arequipa) (Alonso, en preparación).

Potencialidad del Neógeno centroandino para evaporitas fósiles

Existe una clara relación de herencia metalogénica entre el Neógeno y la actualidad. Los salares portadores de boratos y otras sales que conforman el *bull-eye* de evapofacies muestran correlación genética con antiguos depocentros. La presencia de yacimientos de mirabilita (ej., Rio Grande, Pocitos) o carbonato de sodio (ej., Laguna de Santa María) no tienen su correlación con depósitos neógenos. Dado que se trata de sales altamente solubles, sólo es esperable su hallazgo como depósitos soterrados en las secuencias neógenas.

Potencialidad de los salares andinos

Los salares han mostrado al presente únicamente facies superficiales de boratos donde domina la ulexita y en algunos casos puntualmente el tincal. Existen muy pocas perforaciones publicadas que permitan conocer la tercera dimensión de los salares. Entre los escasos ejemplos se cuenta Uyuni, Atacama, Laguna Salinas (Peru), Hombre Muerto y Rincón (véase Ballivián y Risacher, 1981; Schalamuk et al., 1983, Igarzabal y Alonso, 1990; Vila, 1990; Godfrey et al., 1997). Las exploraciones por litio llevadas a cabo en los últimos años en salares de la Puna que fueron dadas a conocer en informes de bolsa (NI-43 101), permiten conocer la estratigrafía profunda de algunos salares (ej., Salinas Grandes, Olaroz, Cauchari, Rincón, Hombre Muerto, entre otros). Dado que se trata de sistemas de cuencas hidrológicas, tectono-volcánicas, con una fuerte influencia climática, su evolución está aún mal comprendida. Es probable que exista más de un pulso mineralizante de boro en los salares altoandinos. La ausencia de dataciones impide conocer mejor el “timing” de generación de boratos en los salares. Como ejemplo, puede tomarse el salar de Pastos Grandes donde una terraza levantada con niveles boratíferos dio una edad de 0.3 Ma y los boratos en el piso del salar son más jóvenes que 10 ka. (Vandervoort et al., 1995). De todas maneras, el hallazgo de facies profundas podría tener interés si se tratara de boratos solubles que puedan ser explotados a la manera del yacimiento de Searles Lake (USA). Por otro lado resulta de interés destacar que los salares boratíferos son muy ricos en salmueras con altos contenidos del elemento boro, acompañado generalmente por potasio y litio. Las reservas de boro en salmueras en los salares sudamericanos no ha sido evaluada, pero alcanza a decenas de

millones de toneladas. Como ejemplo, el salar de Atacama contiene 11 millones de toneladas equivalentes de ácido bórico (Chong, 1987).

Usos de los boratos

Los boratos tienen más de 1500 aplicaciones conocidas. Se los usa principalmente en los vidrios para aumentar su resistencia a los cambios bruscos de temperatura (vidrios borosilicatados tipo pírex), en el vidriado de las cerámicas (azulejos, porcelanas, artefactos sanitarios), como fundente de distintos metales para bajar el punto de fusión, en detergentes y blanqueadores, en medicina (gotas para los ojos, talcos para los pies), en cosmética (cremas faciales, lociones capilares), dentífricos, enjuagues bucales, fibras de vidrio, chalecos antibalas, como minerales agrícolas (agrominerales), combustibles especiales, electroimanes de neodimio-boro para trenes de levitación magnética e imanes varios, nylon, caucho, plásticos, papel, pinturas, tratamiento de maderas, fungicida, bactericida (en naftas de aviones), ignífugo, cucarachicida, aleaciones, anticorrosivo, abrasivos (la combinación del boro con el nitrógeno o el carbono dan sustancias que casi alcanzan la dureza del diamante), y un sinnúmero de usos químicos e industriales desde los más sencillos a los más sofisticados.

El tincal es el borato de sodio hidratado que viene mezclado con arcillas o arena y que al ser soluble en agua se disuelve y puede volver a recristalizar en un material puro decahidratado (bórax). Puede deshidratarse hasta obtener el bórax pentahidratado o directamente eliminarse el agua hasta convertirlo en bórax anhidro. Cada uno de ellos con distintas aplicaciones, especialmente en vidrios, jabones, detergentes y polvos de lavar. La colemanita (borato de calcio hidratado) se usa principalmente para fibras de vidrio y la hidroboraquita (borato de calcio y magnesio hidratado) como fundente de metales, especialmente para separar el hierro y el titanio de las arenas negras magnéticas de playas marinas. La ulexita (borato de calcio y sodio hidratado), es el borato común de los salares donde se encuentra en forma de papas o bolas de algodón o bien en barras o capas. La ulexita cruda se usa para el agro como micronutriente de boro y para vidrios y fritas de cerámicas. También sirve para la fabricación del ácido bórico que de acuerdo a su pureza puede ser de grado técnico, farmacéutico y nuclear. Todos estos productos se fabrican en Salta. Es interesante destacar que los productos bóricos que se usan en reactores nucleares tienen la capacidad de captar la emisión de neutrones por su contenido en el isótopo-10 del boro. También se fabrican numerosos productos como los octoboratos de sodio para el tratamiento de las maderas contra las termitas y el fuego; los perboratos de sodio (boratos combinados con agua oxigenada) como

un potente agente blanqueador; boratos de zinc (retardantes del fuego en tejidos, plásticos y pinturas); fosfato de boro (porcelanas traslúcidas de alta calidad); pentaborato de amonio (recubrimiento de papel); pentaborato de potasio (fundente de soldaduras para aceros inoxidables); y muchos más. Lo importante a destacar es que la Puna tiene esas riquezas, que las empresas trabajan en la extracción de los minerales de los salares o en su procesamiento y que esos productos se exportan al mundo.

Conclusiones

- 1) Los boratos son sales del ácido bórico, mayormente hidratados, que forman especies por la unión con elementos alcalinos o alcalino-térreos, especialmente Na, Ca y Mg. Se clasifican en endógenos y exógenos. Los exógenos en marinos y continentales. Estos últimos constituyen los depósitos minerales de importancia geológica y económica a escala global.
- 2) Los boratos son sales exóticas que requieren de un marco tectono-volcánico y climático especial para su generación. Hay cuatro provincias boratíferas mundiales de boratos continentales exógenos a saber: Anatolia (Turquía), Tíbet, Norteamericana (USA, México) y Centroandina (Perú, Bolivia, Chile, Argentina). A excepción del Tíbet, las demás provincias tienen boratos neógenos. A excepción de Anatolia todas las demás provincias tienen boratos en salares o playa-lakes.
- 3) El *timing* de generación de boratos es Mioceno inferior a la actualidad. Los depósitos más antiguos se encuentran en el sur de Estados Unidos y norte de México con edades entre 22 y 24 Ma. En Estados Unidos, Tíbet y Andes Centrales hay fuentes termales ricas en boro que están depositando aguas boratadas en la actualidad.
- 4) Al presente hay dos tipos principales de boratos en la Puna Argentina que son: a) boratos en rocas neógenas y b) boratos en salares.
- 5) Las mayores reservas se encuentran en los boratos interestratificados en rocas neógenas de los cuales los principales yacimientos son: a) Tincalayu; b) Sijes y c) Loma Blanca. Estos tres depósitos en conjunto superan las 50 millones de toneladas de boratos.
- 6) El yacimiento de Loma Blanca fue descubierto en la década de 1980 (1984) y desarrollado en la década siguiente. Las perforaciones demostraron la presencia de 20 millones de toneladas de tincal, ulexita e inyoita en un depocentro de unos 700 m de diámetro con espesores máximos mineralizados de 50 m. Situaciones similares, esto es depocentros miocenos formados en un ambiente volcaniclástico lacustre-evaporítico se

conocen en otros lugares de la Puna y la mayoría aún no han sido perforados. La presencia potencial de otros yacimientos neógenos de boratos en la Puna argentina surge a partir de evidencias directas e indirectas.

- 7) El modelo de formación de los boratos establecidos para la Puna Argentina está relacionado con cuencas cerradas, clima árido, volcanismo y fuentes termales. Las claves o guías para la prospección tienen que ver con la ubicación espacial dentro de la Provincia Boratífera Centroandina; la presencia de rocas de una edad adecuada (5 a 7 millones de años en la Puna Argentina; quizás un poco más antiguas en los Andes bolivianos y peruanos); facies lacustres, evaporitas, tobas, travertinos y eventualmente ulexita singenética o epigenética.
- 8) El modelo es válido para la Puna Argentina. Para el resto de los Andes Centrales, deben considerarse las cuencas neógenas que cumplan las condiciones de los parámetros prospectivos señalados.
- 9) Los salares eran prácticamente desconocidos en su tercera dimensión. Sus recursos de boro en salmueras alcanzan cifras muy importantes. En la última década se ha realizado geofísica (sísmica, geoelectrica, magnetotelúrica) y perforaciones profundas en muchos de los salares en busca de acuíferos profundos portadores de salmueras de litio. Esto permitió un mejor conocimiento de la tercera dimensión de algunos salares importantes (ej., Hombre Muerto, Diablillos, Ratones, Centenario, Pozuelos, Rincón, Salinas Grandes, Olaroz y Cauchari, entre otros).
- 10) El marco metalogénico con una herencia marcada desde el Neógeno a la actualidad, permite inferir la presencia potencial de evapofacies Na-sulfatíferas y Na-carbonatíferas, en capas miocenas, tal como ocurre en los salares actuales.

Agradecimientos

El presente trabajo se realizó sobre la base de la conferencia brindada por el autor el 4 de julio de 2017 en el marco de su incorporación como Académico Correspondiente Argentino a la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires. Deseo agradecer especialmente al Dr. Alberto Riccardi por la presentación realizada, su acompañamiento en todas las etapas formales y la sugerencia de la temática a desarrollar. En idéntico sentido al Ing. Juan Carlos Ferreri (Académico Presidente) y Dr. Fausto T. Gratton (Académico prosecretario). También deseo agradecer a quienes me acompañaron en estas investigaciones a lo largo de los años, en especial Dra. Teresa Jordan, Dr. Cahit Helvacı, Dr. Lorenzo Aristarain, Dr. Víctor A. Ramos,

Dr. Manfred Strecker, Dr. José Viramonte, Dr. Ricardo Sureda, Dra. Teresita Ruiz, Geól. Alicia Quiroga, Dra. Simone Kaseman, Dra. Linda Godfrey, Dr. Tim Lowenstein, Geól. Donald Robertson, Dr. Carlos Sorentino, Geól. César González Barry, Geól. Walter Rojas, así como también a los numerosos tesis que hicieron sus tesis sobre el tema de los boratos bajo mi dirección. El presente trabajo se enmarca en los proyectos de investigación que el suscrito desarrolla en el CONICET, en el CIUNSa y en el INSUGEO-CEGA.

Bibliografía y trabajos citados

Allmendinger, R., Jordan, T., Kay, S. y Isacks, B., 1997. The evolution of the Altiplano-Puna plateau of the Central Andes. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 25:139-174.

Alonso, R.N., 1986. Ocurrencia, posición estratigráfica y génesis de los depósitos de boratos de la Puna Argentina. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Salta, 196 p. Salta.

Alonso, R.N., 1987a. Bórax (tincal) en la Puna Argentina. X Congreso Geológico Argentino. Actas II: 161-164. Tucumán

Alonso, R.N., 1987b. Valoración icnoavifaunística de ambientes boratíferos. IV Congreso Latinoamericano de Paleontología, Tomo I: 586-597. Santa Cruz de la Sierra

Alonso, R.N., 1988. Los boratos de salares en Argentina. Asociación Argentina de Geólogos Economistas, Revista, 6(6):11-22. Buenos Aires.

Alonso, R.N., 1990. Distribución de facies en depósitos de boratos neógenos de Argentina. Tercera Reunión Argentina de Sedimentología, Actas, p.7-12, San Juan.

Alonso, R.N., 1991. Evaporitas Neógenas de los Andes Centrales. Capítulo 5 del libro "Génesis de formaciones evaporíticas: modelos andinos e ibéricos". Coordinador: Dr. J.J. Pueyo-Mur. Universidad de Barcelona, capítulo 5, p.p. 267-332. ISBN 84-7875-666-3, Barcelona.

Alonso, R.N., 1992a. Geología de la mina Monte Verde (colemanita, inyoita), Salta, República Argentina. IV Congreso Nacional y I Congreso Latinoamericano de Geología Económica, Actas, pp. 215-225. Córdoba.

Alonso, R.N., 1992b. Sedimentología evaporítica en la Puna. IV Jornadas Argentinas de Sedimentología, Actas, Tomo II, pp. 9-16, La Plata.

Alonso, R.N., 1992c. Estratigrafía del Cenozoico de la Cuenca de Pastos Grandes (Puna salteña) con énfasis en la Fm. Sijes y sus boratos. Asociación Geológica Argentina, Revista, 47(2):189-199. Buenos Aires.

Alonso, R.N. 1995. Diccionario minero. Con más de 2.500 voces del habla de los mineros de Iberoamérica. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 263 p. Madrid.

Alonso, R.N., 1996. El yacimiento boratífero de Laguna Salinas, Perú. XIII Congreso Geológico Argentino. Actas, Vol. III, pp. 297-308. Buenos Aires.

Alonso R.N., 1998. Los Boratos de la Puna. Edición Cámara de la Minería de Salta. 196 pp. Salta.

Alonso, R.N., 1999a. El Terciario de la Puna salteña. Relatorio. XIV Congreso Geológico Argentino. Tomo I: 311-316. Salta.

Alonso, R.N., 1999b. An Active Boratiferous Geyser in the Andes of Peru. American Geophysical Union, Fall Meeting, Tectonophysics, N° 6096. San Francisco.

Alonso, R.N., 2012. Icnitas de aves en depósitos de boratos y su contribución a la reconstrucción paleoambiental. Volumen Especial 70° Aniversario Dr. Alberto Riccardi. Revue de Paléobiologie (ISSN: 0253-6730 printed, 1661-5468 on-line). Vol. spéc. 11: 429-445. Genève.

Alonso, R.N. y Argañaraz, R., 1990. Minería y Beneficio de los Boratos de Argentina. IV Jornadas Argentinas de Ingeniería de Minas, Tomo I, p.145-156. Jujuy

Alonso, R.N. y Chávez, I., 1990. Explotación y beneficio del yacimiento de boratos Loma Blanca, Jujuy. IV Jornadas Argentinas de Ingeniería de Minas, Tomo I, p.137-143. Jujuy.

Alonso, R.N. y Gonzalez-Barry, C., 1989. Geología del yacimiento de bórax Tincalayu (Salta). III Congreso Nacional de Geología Económica, Tomo III, p.21-36. Olavarría, Buenos Aires.

Alonso, R.N. y Gonzalez-Barry, C., 1990. Geología y distribución de los depósitos de boratos del distrito minero Sijes, Salta. IV Jornadas Argentinas de Ingeniería de Minas, Tomo II, pp. 55-64. Jujuy.

Alonso, R.N. y Gutiérrez, R., 1984. Zonación de ulexita en los salares de la Puna Argentina. Asociación Geológica Argentina, Revista, 39(1-2):52-57. Buenos Aires

Alonso, R.N. y Helvacı, C., 1988. Mining and Concentration of Borates in Argentina. AYTEKIN, YAVUZ (Ed.). Proc. of the II Intern. Mineral Processing Symp., p. 551-558. Izmir, Turquía.

Alonso, R.N. y Menegatti, N., 1990. La Formación Blanca Lila (Pleistoceno) y sus depósitos de boratos (Puna Argentina). XI Congreso Geológico Argentino, Tomo I, pp. 295-298. San Juan.

Alonso, R.N. y Robertson, D.B., 1991. Kernite: Is It Primary in Neogene Sodium Borate Deposits? Suggestive Evidence from Sodium Borate Ore Bodies. Geological Society of America, Abstract with Programs, p. A465. San Diego, California.

Alonso, R.N. y D.B. Robertson, 1992. La génesis de kernita en los yacimientos de bórax. I Reunión de Mineralogía y Metalogenia, Actas, pp. 1-8. La Plata.

Alonso R.N. y T. Ruiz, 1997. Asociaciones minerales en depósitos de boratos. En Atlas de Asociaciones Minerales en Lámina Delgada. Cap. 16, pp 237-248. Coord. Joan Carles Melgarejo. Ediciones de la Universidad de Barcelona. España. ISBN 84-89829-24-1.

Alonso, R.N., y Viramonte, J. 1985a. Geyseres boratíferos de la Puna Argentina. IV Congreso Geológico Chileno, Actas II: 23-44. Antofagasta

Alonso, R.N. y Viramonte, J., 1985b. Provincia Boratífera Centroandina. IV Congreso Geológico Chileno, Actas II: 45-63. Antofagasta

Alonso, R.N. y Viramonte, J., 1987. Geología y Metalogenia de la Puna. Estudios Geológicos, 43:393-407. Madrid.

Alonso, R.N. y Viramonte, J., 1990. Borate Deposits in the Andes. In: Amstutz, G.C. (Ed.) "STRATABOUND ORE DEPOSITS IN THE ANDES". Capítulo 2.2.4., 40 c. pp.721-732. Springer Verlag, Berlin.

Alonso, R.N. y Viramonte, J.G., 1993. La cuestión genética de los boratos de la Puna. XII Congreso Geológico Argentino (Mendoza), Tomo V, pp. 187-194. Buenos Aires.

Alonso, R.N., Gutiérrez, R. y Viramonte, J., 1984a. Megacuerpos salinos cenozoicos de la Puna Argentina. IX Congreso Geológico Argentino, Bariloche, Actas I: 25-42. Buenos Aires.

Alonso, R.N., Viramonte, J. y Gutiérrez, R., 1984b. Puna Austral. Bases para el subprovincialismo geológico de la Puna Argentina. IX Congreso Geológico Argentino, Bariloche, Actas I: 43-63. Bs.As.

Alonso, R.N., Sureda, R., y Viramonte, J., 1988. Geología del yacimiento de Boratos Loma Blanca (Jujuy). III Congreso Nacional de Geología Económica. Olavarria. Tomo I: 205-220.

Alonso, R.N., Helvaci, C., Sureda, R. y Viramonte, J., 1988. A New Tertiary Borax Deposit in the Andes. Mineralium Deposita, 23: 299- 305. Springer-Verlag

Alonso, R.N., Jordan, T., y Tabbutt, K., 1989. Neogene Sedimentary Basins of Argentine Southern Puna Plateau, Central Andes Mountains. 28th International Geological Congress, Volume 1, p. 33-34. Washington D.C.

Alonso, R.N, Jordan, T., Tabbutt, K. y Vandervoort, D., 1991. Giant Evaporite Belts of the Neogene Central Andes. Geology, 19: 401- 404.

Alonso, R.N., Ruiz, T., y Quiroga, A.G., 2004. Nueva localidad con colemanita en la Puna Argentina (Mina Narciso, Departamento de Susques, Jujuy). 7º Congreso de Mineralogía y Metalogenia, Río Cuarto, Córdoba, Actas, ISBN, pp. 1-6.

Alonso, R.N., Ruiz, T., y A.G. Quiroga, 2016. Mineralogía de los boratos de la República Argentina. Prólogos Dr. Lorenzo Aristarain, Dra. Milka K. de Brodtkorb. Mundo Gráfico Salta Editorial, ISBN 978-987-698-132-3, 22 x15 cm, 284 p. Salta.

Aristarain, L.F., 1989. Meyehofferita del distrito de Sijes, Salta, Argentina. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales "Bernardino Rivadavia", Geología, T. 9, N° 1, 1-19. B.Aires.

Aristarain, L.F., 1991. Probertita de Tincalayu, Salta, Argentina. Revista del Museo de La Plata, Nueva Serie, Sección Geología, Tomo X, pp. 277-292. La Plata.

Aristarain, L.F., 1991. Colemanita del distrito de Sijes, Salta, Argentina. Revista del Museo de La Plata, Nueva Serie, Sección Geología, Tomo X, pp. 319-333. La Plata.

Aristarain, L.F., 1992a. Hidroboracita del distrito de Sijes, Salta, Argentina. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales "Bernardino Rivadavia", Geología, T. 10, N° 1, p.3-24. B.Aires.

Aristarain, L.F., 1992b. Inderborita del distrito de Sijes, Salta, Argentina. Revista del Museo de La Plata, Nueva Serie, Sección Geología, Tomo XI, pp. 33-44. La Plata.

Aristarain, L.F., 1992c. Gowerita y nobleita del distrito de Sijes, Salta, Argentina. Revista del Museo de La Plata, Nueva Serie, Sección Geología, Tomo XI, pp. 81-88. La Plata.

Aristarain, L.F., 1993. Nahcolita y sanbornita de Tincalayu, Salta, Argentina. Revista del Museo de La Plata, Nueva Serie, Sección Geología, Tomo XI, N° 107, pp. 93-97. La Plata.

Aristarain, L.F. y Erd, R., 1971. Inyoita, $2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ de la Puna Argentina. Anales de la Sociedad Científica Argentina. Tomo CXCI, Entrega V-VI. Buenos Aires.

Aristarain, L.F. y Hurlbut, C., 1967a. Macallisterite from Salta, Argentina. Its occurrence in the world. American Mineralogist, 52:1176-1784.

Aristarain, L.F. y Hurlbut, C., 1967b. Ameghinite, $2\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. A New Borate from Argentina. *American Mineralogist*, 52:935-945.

Aristarain, L.F. y Hurlbut, C., 1968. Teruggite, $4\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 6\text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{As}_8\text{O}_5 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ a new mineral from Jujuy, Argentina. *American Mineralogist*, 53:1815-1827.

Aristarain, L.F. y Hurlbut, C., 1972. Boron, Minerals and Deposits. *Mineralogical Record*, 3(5):213-220. Tucson.

Aristarain, L.F. y Rosseto, H.L., 1993. Kurnakovita de Tincalayu, Salta, Argentina. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales "Bernardino Rivadavia"*, Geología, T. 10, N° 2, p. 25-44. B.Aires.

Aristarain, L.F., Rusansky, J. y Walker, M.F., 1977. Ulexita de Sijes: Provincia de Salta (Argentina) y características generales de la especie. *Obra del Centenario del Museo de La Plata*. Tomo IV:23-47. Buenos Aires.

Ballivián, O., y Risacher, F., 1981. Los salares del Altiplano Boliviano. *UMSA-ORSTOM*, 246 p., París.

Barker, Ch.E., Barker, J.M., 1985. A re-evaluation of the origin and diagenesis of borate deposits, Death Valley Region, California. In: Barker, J.M., Lefond, S.L. (Eds.), *Borates: Economic Geology and Production*. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. New York, 101-135.

Barker, J.M., Lefond, S.L., 1985. *Borates: Economic Geology and Production*. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. New York, 274 pp.

Battaglia, R.R. y R.N. Alonso, 1992. Geología y minería de ulexita en el grupo minero "Maggie", Salar Centenario, Salta. *IV Congreso Nacional y I Congreso Latinoamericano de Geología Económica*, Actas, pp. 241-252. Córdoba.

Catalano, L., 1926. Geología de los yacimientos de boratos y materiales de las cuencas. Salar de Cauchari. Puna de Atacama. Dirección General de Minas, Geología e Hidrología, Publicación No.23, 110p. Buenos Aires.

Catalano, L., 1964a. Cuenca de Diablillos. Secretaría de Minería, Serie Argentina No.2:1-70, 28 láminas. Buenos Aires.

Catalano, L., 1964b. Estudio geológico-económico del salar del Hombre Muerto. Secretaría de Minería. Serie Argentina No. 4:1- 133, mas láminas, mapas y figuras. Buenos Aires.

Chong, G.,1971. Depósitos salinos en el Norte de Chile y el salar de Atacama. Geochile, 3:13-27. Santiago.

Chong, G., 1984. Die salare in Nordchile-Geologie, Structure und Geochimie. Geotektonische Forschungen, 67(I-II):1-146. Stuttgart.

Chong, G., 1988. The Cenozoic Saline deposits of the Chilean Andes. Lecture Notes in Earth Sciences, 17. Springer Verlag.

Coira, B. y Kay, S., 1993. Implications of Quaternary volcanism at cerro Tuzgle for crustal and mantle evolution of the Puna plateau, Central Andes, Argentina. Contr. Mineral. Petrol., 113:40-58.

Coira, B., Davidson, J., Mpodozis, C. y Ramos, V., 1982. Tectonic and magmatic evolution of the Andes of Northern Argentina-Chile. Earth Science Reviews, 18:303-332. Amsterdam.

Coira, B., Kay, S., y J. Viramonte, 1993. Upper Cenozoic Magmatic Evolution of the Argentine Puna. A model for changing subduction geometry. Int. Geol. Rev., 35:677-720.

De Silva, S.L., 1989. Altiplano-Puna volcanic complex of the Central Andes. Geology, 17: 1102-1106.

Garret, D.E., 1998. Borates, Handbook of deposits, processing, properties, and use. Academic Press. 483pp.

Gay, H. y Hillar, N., 1972. Howlita del cerro Codo de Agua, Jujuy. Boletín de la Asociación Geológica de Córdoba, 1:130-132. Córdoba

Godfrey L.V., Lowenstein T.K., Li J., Luo S, Ku T.L., Alonso R.N. y T.E. Jordan, 1997. Registro continuo del Pleistoceno Tardío basado en un testigo de halita del salar de Hombre Muerto, Argentina. VIII Congreso Geológico Chileno. Vol. I, pp. 332-336. Antofagasta, Chile.

Gonzalez-Barry, C. y Alonso, R.N., 1987. El depósito neoterciario de boratos "Esperanza", Salta. X Congreso Geológico Argentino. Actas II: 63-66. Tucumán.

Grew, E.S. and Anovita, L. M. (eds). 1996. Boron. Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Reviews in Mineralogy 33. Washington DC: Mineralogical Society of America.

Helvacı, C., 1977. Geology, mineralogy and geochemistry of the borate deposits and associated rocks at the Emet Valley, Turkey. Ph. D. Thesis, Univ. Nottingham, United Kingdom, 338 pp. (unpublished).

Helvacı, C., 1978. A review of the mineralogy of the Turkish borate deposits. *Mercian Geology* 6, 257-270.

Helvacı, C., 1984. Occurrence of rare borate minerals: veatchite-A, tunellite, teruggite and cahnite in the Emet borate deposit, Turkey. *Mineral. Deposita* 19, 217-226.

Helvacı, C., 1994. Mineral assemblages and formations of the Kestelek and Sultançayır borate deposits. In: Nishiyama, T., Kumon, F. and Watable, Y. (Eds), 29th Inter. Geol. Cong., Proceedings, Part A, 245-264.

Helvacı, C., 1995. Stratigraphy, mineralogy and genesis of the Bigadiç borate deposits, western Turkey. *Economic Geology* 90, 1237-1260.

Helvacı, C. and Alonso, R.N., 1994. An occurrence of primary inyoite at Lagunita playa, Northern Argentina. Proceedings of the 29th International Geological Congress (Kyoto), Part A, pp.299-308 VSP Utrecht, (ISBN 90-6764-173-1). The Netherlands.

Helvacı, C., Alonso, R.N., 2000. Borate Deposits of Turkey and Argentina: A Summary and Geological Comparison. Turkish Journal of Earth Sciences 9, 1- 27.

Helvacı, C., Ortí, F., 1998. Sedimentology and diagenesis of Miocene colemanite-ulexite deposits (western Anatolia,Turkey). Journal Sedimentary Research 68, 1021-1033.

Helvacı, C., Ortí, F., 2004. Zoning in the Kırka borate deposit, western Turkey: primary evaporitic fractionation or diagenetic modifications? Canadian Mineralogists 42, 1179-1204.

Helvacı, C., Ortí, F., García-Veigas, J., Rosell, L., Gündoğan, I., Yücel-Öztürk, Y. (2012). Neogene borate deposits: Mineralogy, Petrology and Sedimentology; A workshop with special emphasis on the Anatolian deposits. International Earth Science Colloquium on the Aegean Region, IESCA-2012, 63 p. İzmir (Turkey).

Igarzabal, 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.

Igarzabal, A., 1982. El relieve de la Puna Argentina. Revista del Instituto de Ciencias Geológicas de Jujuy. 5:45-65. Jujuy.

Igarzabal, A., 1984. Origen y evolución morfológica de las cuencas evaporíticas cuartáricas de la Puna Argentina. Noveno Congreso Geológico Argentino, Actas III:595-607. Buenos Aires.

Igarzábal, A.P. y Alonso, R.N., 1990. Origen del Boro y Litio. IV Jornadas Argentinas de Ingeniería de Minas, Tomo I, p.35-55. Jujuy.

Igarzabal,A. y Poppi, R., 1980. El salar de Hombre Muerto. Acta Geológica Lilloana, 15(2):103-117. Tucumán.

Isacks, B., 1988. Uplift of the Central Andean plateau and bending of the Bolivian orocline. *J. Geophys. Res.*, 93:3211-3231.

Jordan, T.E. y Alonso, R.N., 1987. Cenozoic stratigraphy and Basin Tectonics of the Andes Mountain, 20-28 South Latitude. *American Association of Petroleum Geologist*, 71(1):49-64. Tulsa

Jordan, T.E., Isacks, B., Allmendinger, R., Ramos, V. y Ando, C., 1983a. Andean Tectonic related to the geometry of subducted Nazca Plate. *Geological Society of America, Bulletin*, 94:341-361.

Jordan, T.E., Isacks, B., Ramos, V. y Allmendinger, R., 1983b. Mountain Building in the Central Andes. *Episodes*, 3:20-26.

Jordan, T.E., Alonso, R.N., y L.V. Godfrey, 1999. Tectónica, subsidencia y aguas en el salar del Hombre Muerto, Puna Argentina. *XIV Congreso Geológico Argentino. Actas I: 254-256. Salta.*

Kasemann S., Franz G., Erzinger J., Viramonte J.G. y R.N. Alonso, 1998. "Boron isotopic composition of Tertiary borate deposits in the Puna plateau of the Central Andes, NW Argentina". *X Congreso Latinoamericano de Geología y VI Congreso Nacional de Geología Económica. III: 56. Buenos Aires.*

Kay, R. y Kay, S., 1993. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics* 219:177-189.

Kay, S., Coira, B., y Mpodozis, C., 1995. Neogene magmatic evolution and the shape of the subducting slab beneath the Central Andes (20°-33°). *IUGS 21th General Assembly*, pp. A440. Boulder.

Kistler, R.B. y Smith, W.C., 1983. Boron and Borates. In, Lefond ed., *Industrial Mineral and Rocks*, 5th ed. Society of Mining Engineers of AIME, pp. 533-560.

Kistler, R. B. y Helvacı, C. 1994. Boron and borates. In: Carr DD (ed.) *Industrial Minerals and Rocks*, 6th edn, pp. 171–186. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc.

Marrett, R.A., Allmendinger, R.W., Alonso, R.N., y Drake, R.E., 1994. Late Cenozoic tectonic evolution of the Puna Plateau and adjacent foreland, northwestern Argentine Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 7, N°2, pp.179-207.

Mendez, 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.

Muessig, S., 1958. Turi Lari, a bórax crystal playa deposit in Argentina. *Geological Society of America, Bulletin*, 69:1696-1697.

Muessig, S., 1966. Recent South American borate deposits. In: Rau JL (ed.) *Proceedings of 2nd Symposium on Salt*, Northern Ohio Geological Society, Cleveland, vol. 1, pp. 151–159.

Orris, G.J., et al., 1992. Undiscovered nonmetallic deposits. In: *Geology and Mineral resources of the Altiplano and Cordillera Occidental, Bolivia*. U.S. Geological Survey, Report N° 1975.

Ortí Cabo F. y R.N. Alonso, 2000. Gypsum-Hydroboracite Association in the Sijes Formation (Miocene, NW Argentina): Implications for the Genesis of Mg-Bearing Borates. *Journal of Sedimentary Research*, 70 (3):664-681.

Palmer, M. R. y Helvacı, C. 1995. The boron isotope geochemistry of the Kirka borate deposit, western Turkey. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59: 3599–3605.

Palmer, M. R. y Helvacı, C. 1997. The boron isotope geochemistry of the Neogene borate deposits of western Turkey. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61: 3161–3169.

Rojas W.R. y R.N. Alonso, 1998a. Geología económica de la mina Apalacheana (hidroboracita), sierra de Sijes, Salta. X Congreso Latinoamericano de Geología y VI Congreso Nacional de Geología Económica. III: 13-18. Buenos Aires.

Rojas W.R. y R.N. Alonso, 1998b. Estudio geológico económico de la mina Ona (colemanita), sierra de Sijes, Salta. X Congreso Latinoamericano de Geología y VI Congreso Nacional de Geología Económica. III: 19-24. Buenos Aires.

Rojas, W.R. y R.N. Alonso, 1998c. El Miembro Boratífero Ona (Nom. Nov.) de la Formación Sijes, Puna Argentina. VII Reunión Argentina de Sedimentología, Actas, 117-127. Salta.

Salim, F., 1991. Estudio geológico del grupo minero El Zorro. Tesis profesional de Geología. UNSa, Salta.

Schalamuk, I., Fernández, R. y Etcheverry, R., 1983. Los yacimientos de minerales no metalíferos y rocas de aplicación de la región NOA (provincias de Catamarca, Jujuy, La Rioja, Salta y Tucumán). Ministerio de Economía. Subsecretaría de Minería, Anales XX: 208 p. Buenos Aires.

Schwab, K., 1972. Cenozoic volcanism in the Argentine Puna and its relationship to tectonic movements. International Geological Congress, Report 24, Sess. Canada, Proc. Section 2, Petrology, 211-274.

Schwab, K., 1985. Basin formation in a thickening crust. The intermontane basins in the Puna and the Eastern Cordillera of NW Argentina (Central Andes). Cuarto Congreso Geológico Chileno, Actas I:2-139/2-159. Antofagasta.

Schwab, K. y Lippolt, H., 1974. K-Ar mineral ages and late Cenozoic history of the salar Cauchari área (Argentine Puna). International Association Volcanism Chemical Earth, Proceedings, 698-714. Santiago.

Sempere, T. et al 1990. The Altiplano... 1st. Int. Symp. Andean Geodyn. Grenoble, France, pp.167-170.

Smith, G.I., 1985. Borate deposits in the United States: dissimilar in form, similar in geologic setting. In: Barker, J.M., Lefond, S.L. (Eds.), Borates: Economic Geology and Production. Society of Mining Engineers, New York, 37-51.

Smith, G.I., Medrano, M.D., 1996. Continental borate deposits of Cenozoic age. In: Grew, E.S., Anovitz, L.M. (Eds.), Boron: Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Amer. Miner. Soc. Reviews in Mineralogy 33, 263-298.

Sparks, R.S.J., et al., 1985. Ignimbrites of the Cerro Galan Caldera. J. Volc. Geoth. Res., 24:205-248.

Strecker, M. R., R. N. Alonso, B. Bookhagen, B. Carrapa, G. E. Hilley, E. R. Sobel, and M. H. Trauth, 2007. Tectonics and climate of the southern central Andes, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 35, 747-787.

Strunz, H., 1997. Classification of borate minerals. European Journal of Mineralogy, Vol. 9 (2): 225-232. Amsterdam.

Strunz, H. y Nickel, E. H., 2001. Strunz Mineralogical Tables. Chemical-Structural Mineral Classification System. 9th Edition. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, pp. 870. Stuttgart.

Sun Dapeng, 1990. Origin of borate deposits in Xiao Qaidam Lake, Qaidam Basin, China. China Earth Science 1, 253-266.

Sun Dapeng, Li Bingxiao, 1993. Origin of borates in the saline lakes of China. Seventh Symposium on Salt, vol 1. Elsevier, 177-193.

Sureda, R., Galliski, M., Argañaraz, P. y Daroca, J., 1986. Aspectos metalogenéticos del noroeste argentino. Capricornio, No.1, 1-38 p. Universidad Nacional de Salta.

Sureda, R., 1991. Mineralogía de las rocas evaporíticas. In: Pueyo, J. J., (Coor.), Génesis de formaciones evaporíticas. Modelos andinos e ibéricos. Universitat de Barcelona, Estudi General 2, 15-86.

Tanner, L.H., 2002. Borate formation in a perennial lacustrine setting: Miocene–Pliocene Furnace Creek Formation, Death Valley, California, USA. *Sedimentary Geology* 148, 259-273.

Turner, J.C., 1972. Puna. *Geología Regional Argentina*. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba. (A. Leanza, Ed.), pp.91-116. Córdoba.

Turner, J.C. y Mendez, V., 1979. Puna. *Geología Regional Argentina*. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba, pp.13-56. Córdoba.

Vandervoort, D., T.E. Jordan, P.K. Zeitler y R.N. Alonso, 1992. Neogene Intraplateau Basins of the Southern Puna Plateau, Central Andes, NW Argentina. *Geological Society of America, Abstracts with Programs*, p. A-356. Cincinnati, Ohio.

Vandervoort, D.S., Jordan, T.E., Zeitler, P.K. and R.N. Alonso, 1995. Chronology of internal drainage development and uplift, Southern Puna plateau, Argentine Central Andes. *Geology*, February, 23(2):145-148.

Vila, T., 1990. Salar Deposits in Northern Chile. In Fontboté, et al., *Stratabound Ore Deposits in the Andes*. 703-720. Springer Verlag.

Viramonte, J., Alonso, R.N., Gutiérrez, R. y R. Argañaraz, 1984. Génesis del litio en los salares de la Puna Argentina. IX Congreso Geológico Argentino, Bariloche, Actas III: 471-481. Buenos Aires.

Watanebe, T. 1964. Geochemical cycle and concentration of boron in the Earth's crust. *Verdenskii Institute Geochemistry and Analytical Chemistry USSR* 2: 167–177.

Zandt, G., Velasco, A. A. y S. L. Beck, 1994. Composition and thickness of the southern Altiplano crust, Bolivia. *Geology*, 22:1003-1006.

Zheng Mianping, 1989. Saline Lakes on the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. Beijing Scientific and Technical Publishing, 431 pp.

Zheng Mianping., Qi, W., H. Yuan, 2005. Characteristics of salt lake boron deposits and magnesium borate deposits of the Qinghai-Tibet Plateau, China. In Mao, J. and Bierlein, F.O., (Eds): Mineral deposit research: Meeting the Global Challenge. Springer Berlin Heidelberg, 1123-112.