UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

ESCUELA DE POSGRADO
UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS

"OCURRENCIAS DE BORATOS EN EL SUR DE PERÚ EN CUENCAS SEDIMENTARIAS LACUSTRES DEL CENOZOICO (NEÓGENO – CUATERNARIO)"

Tesis presentada por el Bachiller:
Gonzales Cardenas, Juan Jose

Para optar el grado académico de Maestro en Ciencias de la Tierra, con mención en Exploración Geológica

Asesor: M.SC Pablo Rubén Meza Arestegui

AREQUIPA- PERÚ

2021

DEDICATORIA

En primer lugar, dedico este trabajo a Dios por permitirme llegar a este momento de poder cumplir en subir un peldaño más en mi vida profesional.

A mis padres quienes hoy no están presentes conmigo, pero con su gran amor supieron encaminarme para ser personas de bien y este logro profesional, es para ellos, que desde el cielo estarán muy felices.

A mis hermanos que siempre han compartido muchos momentos de alegría, recordando con mucho cariño y amor a mi hermano Roberto, que está en la gloria de Dios

A mí querida y adorada esposa que con su constancia y perseverancia supo alentarme y motivarme para hacer posible cumplir en el logro de la Maestría

A mis hijos por su compresión que alentaron a seguir adelante y pueda haber cumplido con mi objetivo.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a Dios por protegerme y de haberme guiado en muchos lugares que he conocido gracias a la profesión, gracias Dios mío por darme fuerzas para superar los obstáculos que se presentaron.

A mis padres por su gran amor.

A mi esposa por su amor, constancia, perseverancia y abnegada labor de madre por su dedicación a mis hijos.

Agradecer a mi colega y asesor Msc. Pablo Meza por la revisión y sugerencias a la presente tesis

Al Ing Mario Pepi y al Dr. Ricardo Alonso por sus enseñanzas y apoyo para poder cumplir en la presentación de la Tesis.

Finalmente, a todos los que una u otra manera apoyaron en la elaboración de los mapas y figuras que forman parte de la tesis.

RESUMEN

Los boratos son un grupo de minerales de boro los cuales se encuentra emplazados en cuencas sedimentarias de edad cenozoica concretamente del neógeno y cuaternario. El presente proyecto de investigación es de interés geológico nacional, puesto que se tratan de recursos poco estudiados, por ende, poco prospectados, explorados, por lo que existe una necesidad trascendental de ubicar zonas potenciales de boratos que sirvan de guía en la prospección y exploración de estos recursos, especialmente en el sur del Perú. Por consiguiente, la presente Tesis tiene el objetivo de poner a consideración información una amplia área potencial para la exploración mediante la elaboración de mapas geológicos, con ubicación de las unidades geológicas, dataciones radiométricas, información geoquímica de elementos químicos asociados a este tipo de yacimientos. La determinación del área potencial se basa en el conocimiento de la ocurrencia de boratos en Sudamérica las cuales se encuentran de dos tipos: en rocas sedimentarias del neógeno (mioceno) y en los salares actuales. El modelo de formación de los boratos andinos fue desarrollado por Alonso (1986, 1998) y Alonso y Viramonte (1993). Se sostiene que la formación de yacimientos de boro de interés económico está en relación a la concurrencia de factores como: 1) Volcanismo 2); Cuencas cerradas 3); Clima semiárido; 4) Fuentes termales. En base a las imágenes satélite en el sur del Perú se pudo delimitar el área potencial la cual, está comprendida por la ocurrencia de boratos en la Laguna Parinacochas en el extremo NW, hasta la Laguna Blanca en el extremo SE, entre el arco volcánico que va desde el Volcán Sara Sara en Ayacucho hasta el volcán Casiri en Tacna, en la cual se encuentran numerosas fuentes termales, que sumados a un clima semiárido de los andes centrales del sur del Perú, se concluye que el área es potencialmente importante para la prospección de boratos tanto de salares como interestratificados. Por lo mencionado líneas arriba, el Perú tiene un gran potencial de boro, por descubrir que le permitirá contar con nuevos recursos considerados de valor estratégico considerando también su asociación con su par geoquímico que es el litio elemento que hoy en día está cobrando mucho interés en cuanto a su prospección y exploración.

Palabras clave: boratos, cuencas cenozoicas, neógeno, fuentes termales.

ABSTRACT

Borates are a group of boron minerals which are located in sedimentary basins of the Cenozoic age, specifically the Neogene and Quaternary. This research project is of national geological interest, since they are little studied resources, therefore, little prospected, explored, so there is a transcendental need to locate potential areas of borates that serve as a guide in prospecting and exploration. of these resources, especially in southern Peru. Therefore, this thesis has the objective of considering information a wide potential area for exploration through the elaboration of geological maps, with the location of the geological units, radiometric dating, geochemical information of chemical elements associated with this type of deposits. The determination of the potential area is based on the knowledge of the occurrence of borates in South America, which are found of two types: in neogene (Miocene) sedimentary rocks and in current salt flats.

The Andean borate formation model was developed by Alonso (1986, 1998) and Alonso and Viramonte (1993). It is argued that the formation of boron deposits of economic interest is related to the concurrence of factors such as: 1) Volcanism 2); Closed basins 3); Semi-arid climate; 4) Hot springs.

Based on satellite images in southern Peru, the potential area could be delimited, which is comprised of the occurrence of borates in the Parinacochas Lagoon at the NW end, to the White Lagoon at the SE end, between the volcanic arc that It goes from the Sara Sara Volcano in Ayacucho to the Casiri volcano in Tacna, in which there are numerous hot springs, which added to a semi-arid climate of the central Andes of southern Peru, it is concluded that the area is potentially important for prospecting of borates both from salt flats and interstratified.

Due to the aforementioned lines, Peru has a great potential for boron, to be discovered, which will allow it to have new resources considered of strategic value also considering its association with its geochemical pair, which is lithium, an element that today is gaining much interest in regarding its prospecting and exploration.

Keywords: borates, cenozoic basins, neogene, hot springs.

ÍNDICE

DEDICATORIA i
AGRADECIMIENTOS ii
RESUMEN iii
ABSTRACT iv
CAPITULO I 1
INTRODUCCIÓN 1
1.1. Antecedentes de la investigación 1
1.1.1. Antecedentes de la ocurrencia de boratos 1
1.1.2. Antecedentes de la ocurrencia de boratos en el Perú. 2
1.2. Justificación 3
1.3. Formulación del problema 3
1.4. Variables de la investigación 4
1.4.1. Variable Independiente 4
1.4.2. Variable Dependiente 4
1.5. Hipótesis 4
1.6. Ubicación y accesibilidad. 5
1.7. Objetivos 7
1.7.1. Objetivo General. 7
1.7.2. Objetivos Específicos 7
CAPÍTULO II 8
MARCO TEÓRICO 8
2.1. Marco Geomorfologico 8
2.1.1. Cordillera Occidental. 8
2.1.2. Depresión Interandina. 9
2.1.3. Cuenca del Titicaca. 9
2.1.4. Cordillera Oriental. 9
2.2. Marco Geológico 11
2.2.1. Cenozoico. 13
2.2.1.1. Neógeno 13
2.2.1.1.1. Formación Huaylillas (Nm-huay). 13
2.2.1.1.3. Grupo Palca (Nm-p). 19
2.2.1.1.4. Grupo Maure (Nm-ma). 22
2.2.1.1.6. Formación Capillune (Np-ca). 31
2.2.1.1.7. Formación Taraco (NQ-ta). 35
2.2.1.1.8. Formación Arco Aja (Np-aa). 36
2.2.1.1.9. Formación Yauri (Np-y). 38
2.3. Bases Teóricas de los Boratos 39
2.3.1. Génesis de los yacimientos de Boratos. 39
2.3.2. Modelo de Formación de los Boratos. 44

2.3.3. Edad de Formación de los Boratos. 46
2.3.4. Los Yacimientos de Boratos en el Mundo. 48
2.3.4.1. Provincia Boratífera de Anatolia (Turquía). 50
2.3.4.2. Provincia Boratífera norteamericana. 51
2.3.4.3. Provincia Boratífera Tibetana. 53
2.3.4.4. Provincia Boratífera Centroandina. 53
2.3.5. Los Yacimientos de Boratos en Sudamérica. 55
2.3.5.1. Tipos de depósitos de boratos en los Andes. 56
2.3.5.1.1. Estratos de boratos intercalados en rocas terciarias. 56
2.3.5.1.2. Boratos en fuentes termales y géiseres 58
2.3.5.1.3. Boratos evaporíticos en salares recientes. 60
2.3.5.2. Subprovincias boratíferas. 62
2.3.5.2.1. Subprovincia Pampa del Tamarugal Borato. 62
2.3.5.2.2. Subprovincia Altoandina de Borato. 62
2.3.5.2.3. Subprovincia de Borato de la Puna Oriental 63
2.3.6. Mineralogía de los boratos más comunes en Sudamérica. 64
2.3.6.1. Mineralogía de los boratos. 64
2.3.6.1.1. Inyoita. 64
2.3.6.1.2. Ulexita. 65
2.3.6.1.3. Colemanita. 66
2.3.6.1.4. Hidroboracita 67
2.3.6.1.5. Borax. 68
2.4. Depositos de Boratos en el Sur del Perú 69
2.5. Aprovechamiento de Boratos 70
2.5.1. Industria del Vidrio. 70
2.5.2. Industria Metalúrgica. 70
2.5.3. Industria militar y Energética. 70
2.5.4. Añadido para esmaltes y porcelanas. 71
2.5.5. En limpieza y perfumería. 71
2.5.6. Agricultura. 71
2.5.7. Anticongelante. 71

CAPITULO III 72

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN 72

3.1. Diseño y Tipo de Investigación 72
3.1.1. Enfoque. 72
3.1.2. Alcance. 72
3.1.3. Diseño. 72
3.2. Población del Estudio 73
3.2.1. Tipo de Muestreo. 73
3.3. Metodología Propuesta 73
3.3.1. Etapa I: 73
3.3.1.1. Investigación y recopilación de información. 73

3.3.1.2. Revisión de los estudios anteriormente efectuados. 74
3.3.1.3. Elaboración de un marco teórico se considera la génesis de los yacimientos boratiferos y algunas claves para la prospección geológica. 75
3.3.1.4. Revisión de la Base de datos del INGEMMET con información relacionada a la Geología, Geocronología y Geoquímica. 76
3.3.2. Etapa II: 78
3.3.2.1. Procesamiento de la información. 78
3.3.2.2. Elaboración de mapas finales. 78
3.3.2.3. Análisis e interpretación de los resultados. 79

CAPÍTULO IV 80

OCURRENCIA DE BORATOS EN EL SUR DEL PERU 80

4.1. Los yacimientos de Boratos en el Perú 80
4.1.1. Yacimientos Terciarios (boratos en rocas neógenas). 80
4.1.2. Yacimientos Cuaternarios. 81
4.1.2.1. Laguna Salinas. 82
4.1.2.2. Géiser boratífero activo de Chillicolpa. 83
4.1.2.3. Laguna Blanca. 84
4.1.2.4. Laguna Parinacochas. 85
4.2. Dataciones Radiométricas en el Área de Estudio 86
4.3. Geoquímica 88
4.3.1. Introducción 88
4.3.2. Geoquímica de fuentes termales. 88
4.3.2.1. Caracterización Geoquímica de Fuentes Termales. 88
4.3.2.2. Comparación de datos geoquimicos de las fuentes termales. 96
4.3.2.3. Geoquímica del Litio. 97
4.3.2.4. Geoquímica del Estroncio. 100
4.3.2.5. Geoquímica del Arsénico. 102
4.3.3. Geoquímica en Roca-Sedimentos 104
4.3.3.1. Geoquímica del Litio. 106
4.3.3.2. Geoquímica del Estroncio. 108
4.3.3.3. Geoquímica del Arsénico. 110

CAPÍTULO V 112

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 112
5.1. Introduccion 112
5.2. Guías para la prospección de boratos terciarios. 112
5.3. Área prospectiva de Boratos del neógeno 114
5.3.1. Área Tincopalca – Tolapalca. 115
5.3.2. Área de Chojata. 117
5.3.3. Área Lagunillas – Canas. 119

CONCLUSIONES 121
RECOMENDACIONES 123
BIBLIOGRAFÍA 124
ANEXOS 130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación y accesibilidad del área de estudio. 6
Figura 2. Mapa de unidades morfoestructurales del Perú. 10
Figura 3. Mapa de unidades sedimentarias del cenozoico. 12
Figura 4. Área de extensión de la Formación Huaylillas. 16
Figura 5. Área de extensión de la Formación Tinajani. 18
Figura 6. Área de extensión del Grupo Palca 22
Figura 7. Área de extensión del Grupo Maure 29
Figura 8. Área de extensión de la Formación Aniso 31
Figura 9. Área de extensión de la Formación Capillune. 34
Figura 10. Área de extensión de la Formación Taraco. 36
Figura 11. Área de extensión de la Formación Arco Aja 37
Figura 12. Área de extensión de la Formación Yauri 39
Figura 13. Depósitos conocidos y modelo de exploración de boratos según el modelo tectónico de subducción para el Mediterráneo oriental (15-20 Ma). 40
Figura 14. Esquema del ciclo del boro. 42
Figura 15. Modelo deposicional de un lago de playa generalizado que muestra la formación de depósitos de borato en las cuencas neógenas del oeste de Anatolia, Turquía. 44
Figura 16. Marco de la generación de evaporitas en las cuencas de intra-arco/intra-plateau andinas. 45
Figura 17. Área acumulada de producción de boratos hasta el año 2013. 48
Figura 18. Distribución geográfica de las minas más importantes de boratos en el mundo. 49
Figura 19. Mapa que muestra los depósitos de borato en el oeste de Anatolia (Turquía). 51
Figura 20. Modelo de exploración de borato relativo al modelo tectónico de subducción para el oeste de América del Norte (15-20 Ma). 52
Figura 21. Mapa de elevación de la provincia boratífera centroandina. 54
Figura 22. Modelo de exploración de boratos relativo al modelo tectónico de subducción para el oeste de Sudamérica. 55
Figura 23. Modelo de una cuenca volcano-tectónica de la Puna y su relleno clástico y evaporítico conformando un depocentro salino. 61
Figura 24. Mapa que muestra la forma y el tamaño de las subprovincias que contienen borato. 63
Figura 25. Mineral Inyoita. 64
Figura 26. Mineral Ulexita. 65
Figura 27. Mineral Colemanita. 66
Figura 28. Mineral Hidroboracita. 67
Figura 29. Mineral Borax. 68
Figura 30. Yacimientos de boratos del cuaternario en el Perú. 81

Figura 31. Mapa de dataciones radiométricas. *87*
Figura 32. Mapa de localización de las fuentes termales y frías en la ZGC - Moquegua. *89*
Figura 33. Mapa de localización de las fuentes termales y frías en la zona de Borateras. *90*
Figura 34. Localización de fuentes termales y frías asociadas al volcán Ubinas *91*
Figura 35. Perfiles de elementos para las fuentes termales y salares. *96*
Figura 36. Mapa que muestra las concentraciones de Litio en fuentes termales. *99*
Figura 37. Mapa que muestra las concentraciones del Estroncio en fuentes termales. *101*
Figura 38. Mapa que muestra las concentraciones de Arsénico en fuentes termales. *103*
Figura 40. Mapa geoquímico del Litio en Roca - Sedimentos. *107*
Figura 41. Mapa geoquímico del Estroncio en Roca - Sedimentos. *109*
Figura 42. Mapa geoquímico del Arsénico en sedimentos. *111*
Figura 43. Mapa de ubicación de zonas prospectables: Tincopalca –Tolapalca. Con base en imagen satelital de Bing Maps (GEOCATMIN). *116*
Figura 44. Mapa de ubicación de zonas prospectables: Chojata. Con base en imagen satelital de Bing Maps (GEOCATMIN). *118*
Figura 45. Mapa de ubicación de zonas prospectables: Lagunillas. Con base en imagen satelital de Bing Maps (GEOCATMIN). *120*

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Vista del lado oeste de la Laguna Salinas. 82
Imagen 2. Mineralización de Ulexita visto en un pozo de exploración.. 83
Imagen 3. Deposito superficial de Boratos 84
Imagen 4. Vista panorámica del salar de Laguna Blanca 85
Imagen 5. Realización de una calicata. 85
Imagen 6. Vista de la Laguna Parinacochas al fondo el Volcán Sara Sara y en primer plano las parihuanas que habitan en lagos salados 86
Imagen 7. Vista panorámica de la fuente termal de Cutimbo.. 97
Imagen 8. Muestra de agua de 300 ppm de litio y 1100 ppm de boro. 98
Imagen 9. Hydroboracita (Borato de Calcio y Magnesio Hidratado) en cristales aciculares con celestina 108
Imagen 10. Oropimente intercalado con capas de ulexita, yeso y halita 110
Imagen 11. Foto de Fuentes termales en Tolapalca. 115
Imagen 12. Foto de potentes capas de yeso. 117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química (mg/L) de las fuentes termales de la zona geotermal de Calacoa, Moquegua. *89*
Tabla 2. Composición química (mg/L) de las fuentes termales de Borateras, Tacna. *90*
Tabla 3. Resultados de la composición química de las aguas termales y frías asociados al volcán Ubinas. *91*
Tabla 4. Datos composicionales de las salmueras superficiales del Salar Llamara, Chile. *93*
Tabla 5. Salmueras y aguas de la Puna (Ion composition). *95*

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes de la investigación

1.1.1. Antecedentes de la ocurrencia de boratos.

Se tiene una abundante bibliografía sobre los boratos, pero solo se conocen unos pocos trabajos de síntesis tales como Watanabe (1964); Aristarain y Hurlbut (1972) y Helvaci (1994). La geología de los depósitos de boratos fue abordada por Alonso (1986-2016) y desde el punto de vista mineralógico han sido abordados principalmente por Aristarain (1992).

Uno de los estudios más recientes realizado por Alonso (2017) titulado “Los yacimientos mundiales de boratos neógenos y claves para su prospección en los Andes Centrales”. Da a conocer las guías básicas para la búsqueda de depósitos de boratos en los Andes Centrales así como la potencialidad de la región para nuevos descubrimientos. Por otra parte, proporciona una gran fuente de información sobre boratos, puesto que cita numerosos estudios, como los previamente mencionados.

1.1.2. Antecedentes de la ocurrencia de boratos en el Perú.

Si bien la existencia de los Boratos en el Perú se conoce desde 1870, recién se tiene una contribución destacable años más tarde por Jochamowitz (1921) en su investigación de “Los boratos de América y en especial los boratos del Perú”. La prospección llevada a cabo durante la década de 1990 permitió descubrir numerosos depocentros neógenos con presencia de secuencias volcanoclásticas lacustres verdes y evaporíticas, con facies de yeso y carbonatos, y valores anómalos en boro y litio (Alonso, 2016).

Escritos sobre los boratos en el Perú fueron realizados por Alonso (1995) en “The biggest boron, lithium and sodium sulphate deposit of Perú" (Laguna Salinas, Arequipa Department). Además de tener estudios realizados por el INGEMMET en su serie B de geología económica. Se tienen también estudios sobre el yacimiento de la Laguna Salinas, en “El yacimiento boratífero de Laguna Salinas” Alonso (1996) realiza un estudio global del yacimiento y Rodríguez, José (1968) lleva a cabo un estudio donde se describen la Geología y la factibilidad técnico-económica de la explotación del depósito. Por otra parte, dentro de los estudios sobre el yacimiento de Chillicolpa, se tiene uno realizado por Aurcano, Eugenio (2005) donde se analiza la importancia de la explotación de la concentración de los depósitos geológicos de boratos para el desarrollo sostenido de la comunidad de Chillicolpa en la región Puno.

Uno de los estudios más recientes sobre el potencial boratífero en el Sur del Perú fue realizado por Alonso (2016) en “Prospección de boratos neógenos en el sur de Perú.” Donde, se da a conocer el resultado de los trabajos de prospección llevados a cabo en el sur del Perú para la búsqueda de cuerpos ocultos de boratos neógenos, concluyendo que, si bien hay la presencia de algunos depósitos de boratos cuaternarios especialmente el cuerpo evaporítico de la Laguna Salinas y los géiseres de Chillicolpa, no se han encontrado hasta ahora capas de boratos intercaladas en

rocas miocenas como las presentes en la Puna Argentina. No obstante, el potencial para la búsqueda de boratos y evaporitas asociadas queda demostrado en algunas de las secciones analizadas en el trabajo.

1.2. Justificación

Los boratos son recursos minerales de un valor económico importante considerando que su ocurrencia en el planeta es limitada, hay sólo cuatro provincias metalogénicas mayores, de boratos continentales exógenos a nivel mundial, que en orden de importancia son: 1) Anatolia (Turquía), 2) SW USA (California, Nevada), 3) Andes Centrales (Sudamérica) y 4) Tíbet (Asia Central). En Sudamérica, los recursos de boro se ubican entre los países de Argentina, Chile, Bolivia y Perú. En el Perú el principal yacimiento de boro se encuentra en la Laguna Salinas en Arequipa, el único explotado comercialmente. No se conoce de otros yacimientos de Boro.

En este contexto la presente tesis, se busca investigar las ocurrencias de boratos y relacionarlos en el marco geológico del arco volcánico del sur del Perú desde el Neógeno al Cuaternario, de este modo, estableciendo nuevas guías de prospección de boratos, en los Andes Centrales.

1.3. Formulación del problema

En la actualidad, los yacimientos de boratos tienen un gran valor geológico y económico, sin embargo, en el Perú se tiene poco conocimiento con respecto a su génesis y de áreas favorables para prospección. Esto afecta de manera directa al país, puesto que se deja de prospectar un recurso importante.

La búsqueda de nuevos yacimientos es una tarea compleja que involucra aspectos geológicos, técnicos, económicos, etc. Por ello, con la información de la presente investigación se podrá generar conocimiento académico-practico que incentive la prospección e investigación por boratos en el país.

Problema	Causa	Efecto
¿Existe en el Perú solo un yacimiento de boratos con valor económico (Laguna Salinas)? ¿Qué criterios se deben usar para prospectar más áreas de boratos, especialmente en el sur del Perú?	La prospección en busca de nuevos yacimientos es una tarea compleja que implica aspectos geológicos, técnicos, económicos, para desarrollar políticas que permitan incrementar la poca información de ocurrencia de boratos en el Perú.	Con el apoyo de data e información del INGEMMET y tesis actualmente existentes, integrar la información que sea de utilidad para la prospección por boratos.

1.4. Variables de la investigación

1.4.1. Variable Independiente.

- Área de estudio (ubicación geográfica)
- Arcos magmáticos.
- Tipo de magmatismo y vulcanismo
- Cuencas Lacustres.
- Formación y deposición de la cuenca sedimentaria

1.4.2. Variable Dependiente.

- Unidades sedimentarias del cenozoico
- Edad de las cuencas sedimentarias
- La geoquímica de los elementos

1.5. Hipótesis

Este trabajo partió de la siguiente hipótesis: En el Perú, se conoce solo un yacimiento de boratos con valor comercial. La edad de este yacimiento es del cuaternario.

Sin embargo, al igual que en los sistemas volcánicos actuales, se desarrollaron sistemas volcánicos antiguos, los cuales también formaron cuencas lacustres donde existe potencial deposición de boratos, por lo que, planteamos la idea, la existencia de yacimientos de boratos no solo del cuaternario, sino también a partir del neógeno tal como ocurre en yacimientos ampliamente estudiados y explotados especialmente en

Argentina, más aún si consideramos que la franja boratifera de Sudamérica se prolonga hasta sur del Perú.

1.6. Ubicación y accesibilidad.

El área de estudio se encuentra ubicada en el Sur del Perú, comprendiendo los departamentos de Ayacucho, Arequipa, Cuzco, Puno, Moquegua y Tacna (Fig. 1). Pasando por el arco volcánico del Plio-Cuaternario, que contiene los volcanes: Sara Sara, Solimana, Coropuna, Ampato, Sabancaya, Chachani, Misti, Ubinas, Huaynaputina, Ticsani, Tutupaca, Yucame, Purupuruni y Casiri.

Además, como principales puntos de estudio se tienen los de las Lagunas; Blanca (Tacna), Parinacochas (Ayacucho) y Salinas (Arequipa), asimismo los de Chojata (Moquegua) y Chillicolpa (Tacna).

Las coordenadas se presentan entre las latitudes: 12° – 18°S y entre las longitudes: 75° - 69° W, con DATUM: WGS-84, ZONAS: 18-19S y BANDAS: L-K

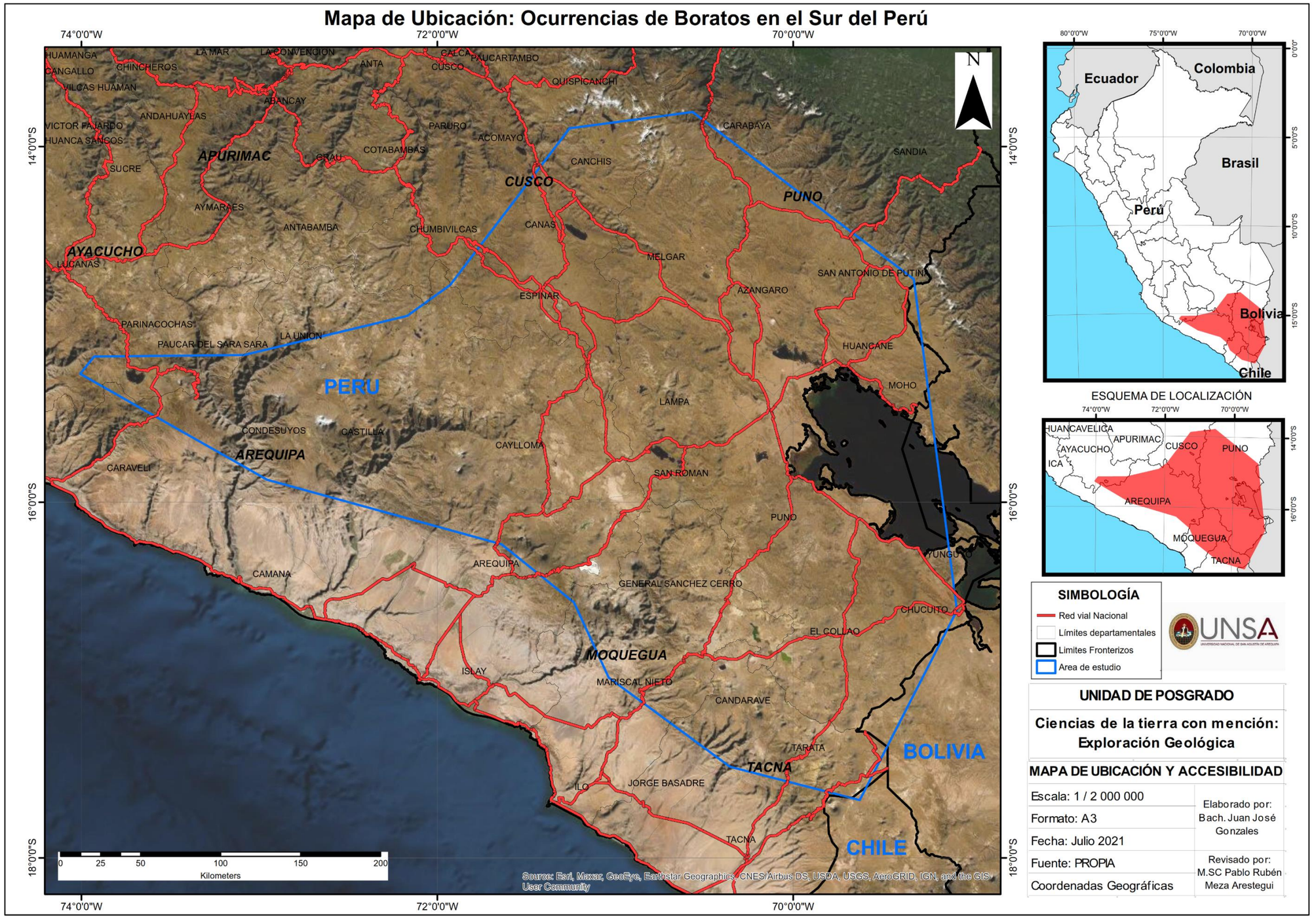


Figura 1. Mapa de ubicación y accesibilidad del área de estudio.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo General.

Identificar en el sur del Perú áreas con potencial de ocurrencia de boratos especialmente en cuencas sedimentarias lacustres del Cenozoico (Neógeno – Cuaternario) para incrementar y aprovechar los recursos estratégicos de nuestro país.

1.7.2. Objetivos Específicos.

- Revisar toda la información geológica tomando como referencia las cartas geológicas de INGEMMET; así como, la información contenida en el GEOCATMIN, para seleccionar la información de interés, materia del presente estudio
- Localizar, mediante el uso de información georreferenciada y bibliográfica, formaciones sedimentarias lacustres del Neógeno – Cuaternario con posible ocurrencia de boro.
- Ubicar centros volcánicos relacionados a la presencia de arcos volcánicos y su relación con cuencas lacustres.
- Relacionar dataciones radiométricas existentes con cuencas lacustres de edad cenozoica.
- Localizar fuentes termales dentro de las áreas investigadas.
- Elaborar mapas de geoquímica de elementos asociados al boro.
- Determinar áreas prospectivas con posibilidades de ocurrencia de boratos.
- Generar una base de información que sirva de guía para la prospección por boratos

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Marco Geomorfologico

2.1.1. Cordillera Occidental.

Es la unidad geomorfológica más elevada de la Cordillera de los Andes, que constituye una cadena montañosa de dirección NO-SE, con rumbos regionales que cambian hacia el Oeste en las proximidades de las deflexiones de Abancay (Latitud 13° S-14° S), y Huancabamba (Latitud 5° 30'S). La línea de cumbres de la Cordillera Occidental determina la divisoria continental entre las cuencas hidrográficas del Pacífico y del Atlántico (INGEMMET, 1995).

La Cordillera Occidental está constituida por un núcleo Paleozoico cubierto por rocas mesozoicas y cenozoicas, deformadas por intenso plegamiento. Entre Ayacucho (Latitud 15° 30' S), y la frontera con Chile, la Cordillera Occidental alberga una notoria franja de conos volcánicos terciario-cuaternarios que siguen el alineamiento andino (INGEMMET, 1995).

2.1.2. Depresión Interandina.

Esta unidad geomorfológica comprende los valles longitudinales interandinos de dirección NO-SE, ubicados entre la Cordillera Occidental y la Oriental, los cuales son cortados por valles transversales de rumbo NE a SO (INGEMMET, 1995).

Su formación está relacionada al fallamiento andino longitudinal desde el Nudo de Loja (Ecuador), hasta el Nudo de Vilcanota en Cusco, pasando por el Nudo de Paseo en el centro del Perú. El fallamiento longitudinal controla el drenaje regional, a cuyo sistema pertenecen los ríos Marañón, Mantaro, Apurímac y Vilcanota. Este fallamiento afecta en muchos casos al basamento Precámbrico-Paleozoico. Los cambios de orientación de carácter regional, de los valles interandinos, reconocidos en las deflexiones de Pisco-Abancay y Cajamarca-Huancabamba, están vinculadas a fallas de rumbo Este-Oeste que segmentan la Cordillera de los Andes (INGEMMET, 1995).

2.1.3. Cuenca del Titicaca.

Esta unidad geomorfológica se ubica en el Sureste del territorio peruano continuando con mayor extensión en territorio boliviano. Geomorfológicamente se trata de una meseta elevada conocida como la "Meseta del Callao" o genéricamente "Altiplano", formada entre las cordilleras Occidental y Oriental. El Nudo de Vilcanota la separa de la Depresión Andina al norte constituyendo una cuenca cerrada con drenaje radial. Su basamento está constituido por rocas paleozoicas sobre las que yacen rocas del Mesozoico jurásicas y cretáceas, cubiertas a su vez por una potente secuencia volcánica cenozoica (INGEMMET, 1995).

2.1.4. Cordillera Oriental.

La Cordillera Oriental constituye una de las unidades morfológicas más relevantes del territorio peruano, por su continuidad, mayor elevación y donde mejor se observan las rocas precámbricas y paleozoicas (INGEMMET, 1995).

Esta unidad geomorfológica tiene de Sur a Norte del Perú un rumbo paralelo a la Cordillera Occidental teniendo un fuerte arqueamiento Este Oeste conocido como la Deflexión de Abancay. La Cordillera Oriental por causa de la Deflexión de Huancabamba desaparece debajo de la cobertura mesozoica reapareciendo al Norte en territorio ecuatoriano (INGEMMET, 1995).

La Cordillera Oriental es menos elevada que la Cordillera Occidental, salvo en su sector meridional, siendo su relieve en general más abrupto, especialmente en los sectores donde la cortan transversalmente los ríos Marañón, Mantaro, Apurímac y Urubamba. La formación de la Cordillera Oriental se inicia durante el tectonismo Hercínico (Devónico) sobre un basamento ó núcleo pre-cambriano. El levantamiento fue controlado por fallas regionales longitudinales (INGEMMET, 1995).

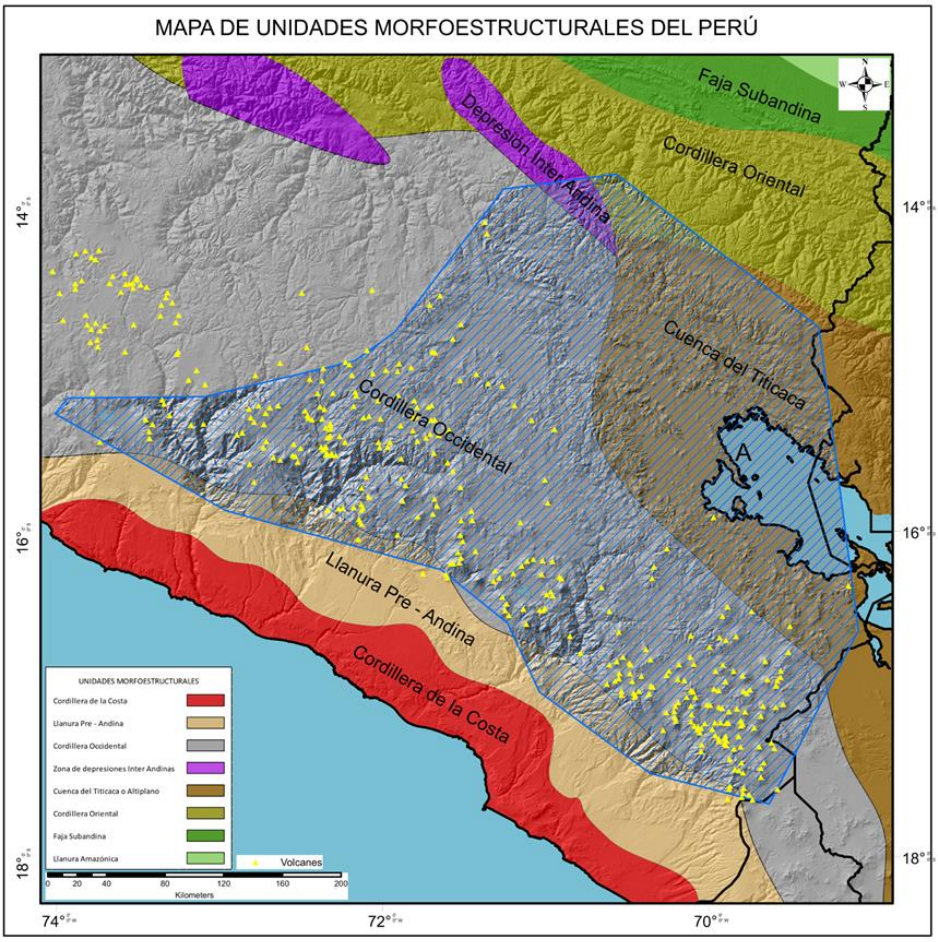


Figura 2. Mapa de unidades morfoestructurales del Perú. Adaptado del Boletín A-055 Carta Geológica Nacional de INGEMMET, 1995.

2.2. Marco Geológico

La región en estudio se encuentra dentro del arco volcánico de los Andes Centrales (CVZ) que se extiende desde la latitud del volcán Sara Sara (15º S) hasta el límite con Chile. La actividad volcánica se registra desde el Oligoceno a la actualidad. Numerosas cuencas cerradas albergaron cuerpos lacustres durante el Neógeno (Alonso, 2016), siendo este periodo un factor clave para la prospección de boratos en el Perú, identificándose formaciones terciarias como la Formación Maure y Formación Callipune (Fig. 3) como altamente prospectables para la identificación de boratos en los departamentos de Tacna, Moquegua, Arequipa, Puno, Apurímac y Ayacucho.

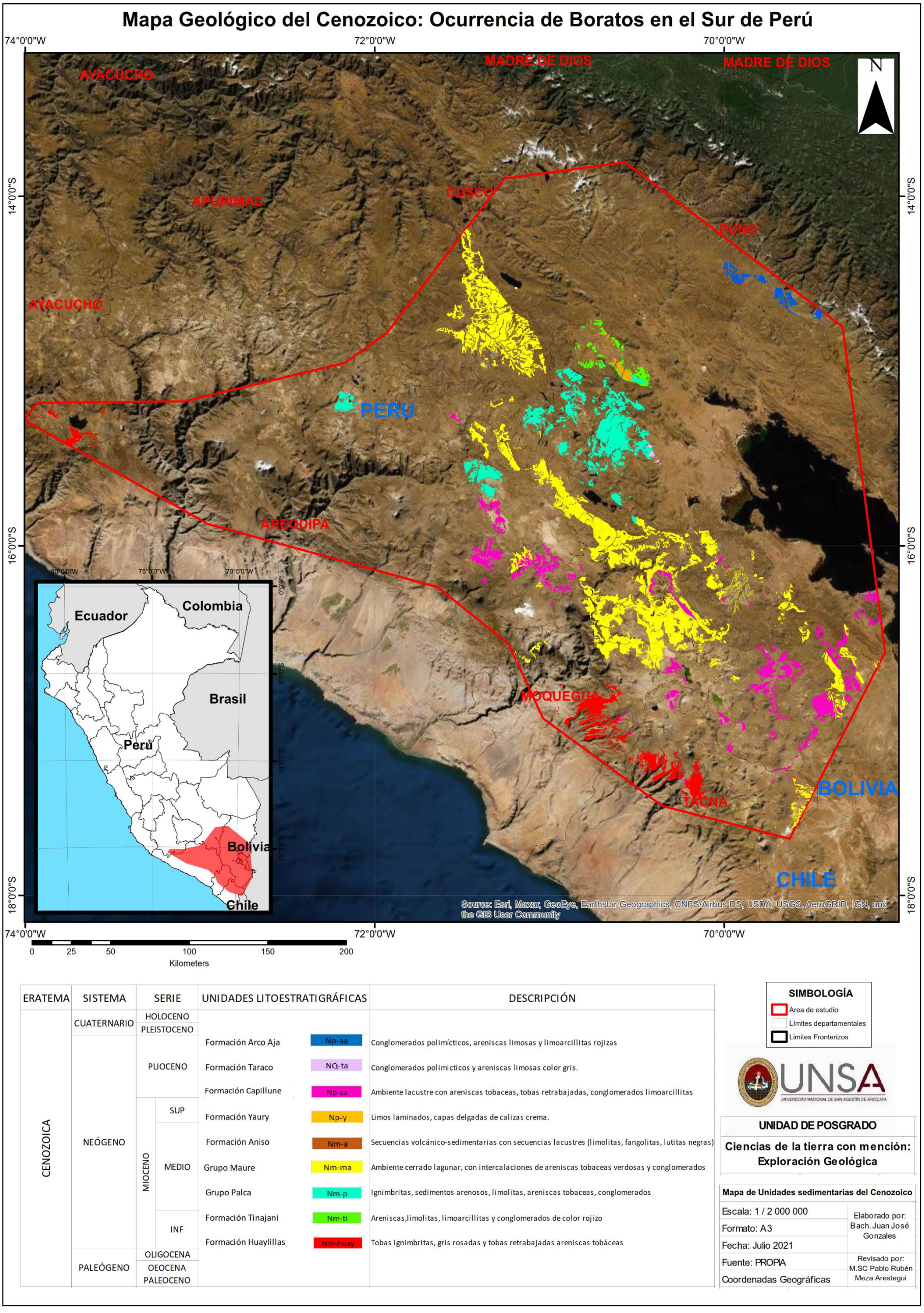


Figura 3. Mapa de unidades sedimentarias del cenozoico. Adaptado de la Carta Geológica Nacional.

2.2.1. Cenozoico.

Durante el Mioceno hasta parte del cuaternario, la actividad volcánica explosiva fue intensa en la Cordillera Occidental, desarrollándose una gruesa y variada secuencia de piroclásticos mezclados en muchos lugares con sedimentos lacustrinos, cumpliendo las condiciones necesarias para la formación de boratos ya que las condiciones de un ambiente de volcanismo activo, cuencas cerradas, termalismo hídrico y clima árido son fundamentales para su génesis.

2.2.1.1. Neógeno.

2.2.1.1.1. Formación Huaylillas (Nm-huay).

La Formación Huaylillas fue nombrada por Wilson & García, (1962), refiriéndose a una gran superficie piroclástica que cubre tanto en el extremo sur del territorio peruano como el Norte Chileno. Los afloramientos de la Formación Huaylillas se hallan cubriendo casi íntegramente al cuadrángulo de Huaylillas (37-x-IV) y gran parte del cuadrángulo de Tacna (37-v-I y 37-v-IV). El espesor de estos depósitos es variable, desde unas decenas de metros hasta aproximadamente 250 m (INGEMMET, 2012).

Composición y Ambiente de depositación

Se describe la litología y ambiente sedimentario de los tres miembros que conforman la Formación Huaylillas:

- Miembro Inferior: El miembro inferior está compuesto por tobas rosáceas con abundantes fragmentos líticos y fragmentos de pómez, intercalados con niveles de conglomerados con clastos de roca sedimentaria y volcánica subredondeadas. Estos conglomerados poseen matriz de areniscas cuarzo-feldespática con tonalidad verdosa con fuerte influencia ignimbritica. Presenta además canales de arcosas de grano medio a grueso con abundante matriz limolítica de color gris a rojizo (INGEMMET, 2012).

- Miembro Medio: El miembro medio de la Formación Huaylillas comprende una sucesión de tobas riolíticas y riodacíticas, de color rosáceo, con fragmentos de pómez y líticos, intercalados con delgados niveles de areniscas masivas de color verde. Estas tobas tienen espesores entre 50 y 250 m al este del cuadrángulo de Tacna y al noreste del cuadrángulo de Huaylillas, incrementando su espesor hacia territorio chileno. Regionalmente se observa una clara disminución de espesores de las ignimbritas de este miembro hacia el suroeste, es decir, mientras más cerca al mar los espesores del miembro medio de la Formación Huaylillas son cada vez más delgados (INGEMMET, 2012).
- Miembro Superior: Los estudios hechos por Flores y Sempere (2002) y Flores et al. (2004) describen a una serie de sedimentos que denominan como Formación Magollo. Los sedimentos de esta unidad constan de conglomerados y areniscas de coloración gris oscura, con clastos mayormente andesíticos y delgados niveles evaporíticos. Por el análisis estratigráfico se determinó que las facies que conforman estos sedimentos disminuyen progresivamente en tamaño de grano hacia el oeste. Por otro lado, en el extremo oeste de los afloramientos de este miembro, específicamente por las partes altas de los cerros Los Pabellones, Miraflores, Siete Colores, Fuerte Los Españoles, La Mina y Canicora está conformados por una intercalación de conglomerados con clastos de roca volcánica andesítica en matriz arenosa cuarzo feldespática que se intercalan con arcosas de grano medio a fino y una considerable proporción de material evaporítico constituido principalmente por yesos. Se considera como pertenecientes al miembro superior de la Formación Huaylillas en base a la datación hecha por Martinez y Cervantes (2003) en 11,2 Ma (K-Ar) a rocas volcánicas depositadas a manera de flujos de lava andesítica porfirítica distribuidas a lo largo de los cerros Unión, Campanani, Peña Chica y Encanto en la frontera con Chile. Estas rocas volcánicas se presentan a

manera de domos como el de Pucamarca y Huilacollo en el cuadrángulo de Palca (36-x) o a manera de flujos lávicos fisurales (INGEMMET, 2012).

Sectores y Ubicación (Fig.4)

Wilson & García (1962) dividen a esta formación en tres miembros, donde destaca que entre los miembros existe poca diferencia litológica, por tratarse en todos los casos de tufos ácidos de composición dacitica y riolítica, con leves diferencias en el color, textura y mineralogía.

Los afloramientos del Miembro inferior de la Formación Huaylillas está restringida a los cerros El Perdido, y quebrada Viñani en el cuadrángulo de Tacna, mientras que, en el cuadrángulo de Huaylillas se encuentra restringido al noroeste, al fondo de la quebrada Tembladera. Los afloramientos del Miembro medio de la Formación Huaylillas están distribuidos por casi todos los cuadrángulos de La Yarada, Tacna y Huaylillas. En el cuadrángulo de Tacna sus afloramientos cubren más del 50% del área, mientras que, en el cuadrángulo de Huaylillas sus afloramientos alcanzan a cubrir hasta el 90% del área total (INGEMMET, 2012).

El miembro medio de la Formación Huaylillas se encuentra sobreyaciendo al miembro inferior en forma concordante entre los cerros El Perdido y quebrada Viñani en el cuadrángulo de Tacna; del mismo modo, se observa este tipo de relación en la quebrada Tembladera ubicada al extremo noroeste del cuadrángulo de Huaylillas. La relación de techo del miembro medio está conformada por un contacto erosivo con los conglomerados del miembro superior de la Formación Huaylillas entre los cerros Alto de la Alianza, Magollo, Chastudal, El Camaleón e Inquieto en el cuadrángulo de Tacna (INGEMMET, 2012).

Los afloramientos del Miembro superior se hallan a partir de los alrededores de la ciudad de Tacna con dirección hacia la costa y Cordillera de la Costa. También afloran en el extremo SO del cuadrángulo de Huaylillas entre la quebrada Escritos y La Concordia. En el cuadrángulo de Tacna tienen su mayor extensión de

afloramiento, hallándose siempre sobre las tobas del miembro medio de esta formación en discordancia erosional, como lo apreciado al este y sureste de la ciudad de Tacna en los cerros Inquieto, lomada Espíritus, lomada El Camaleón, Los Churcos, Los Molles y cerro Chastudal; mientras que, al oeste y suroeste de esta ciudad, se aprecian en los cerros de Para, La Cruz y cerro Magollo (INGEMMET, 2012).

Edad

Regionalmente la Formación Huaylillas tiene mucha influencia litológica del arco volcánico Huaylillas de edad 24 a 10 Ma. Rango de tiempo definido a partir de sus características geoquímicas (Mamani et al. 2010). Bajo este punto se considera a la Formación Huaylillas en el Mioceno inferior a medio.

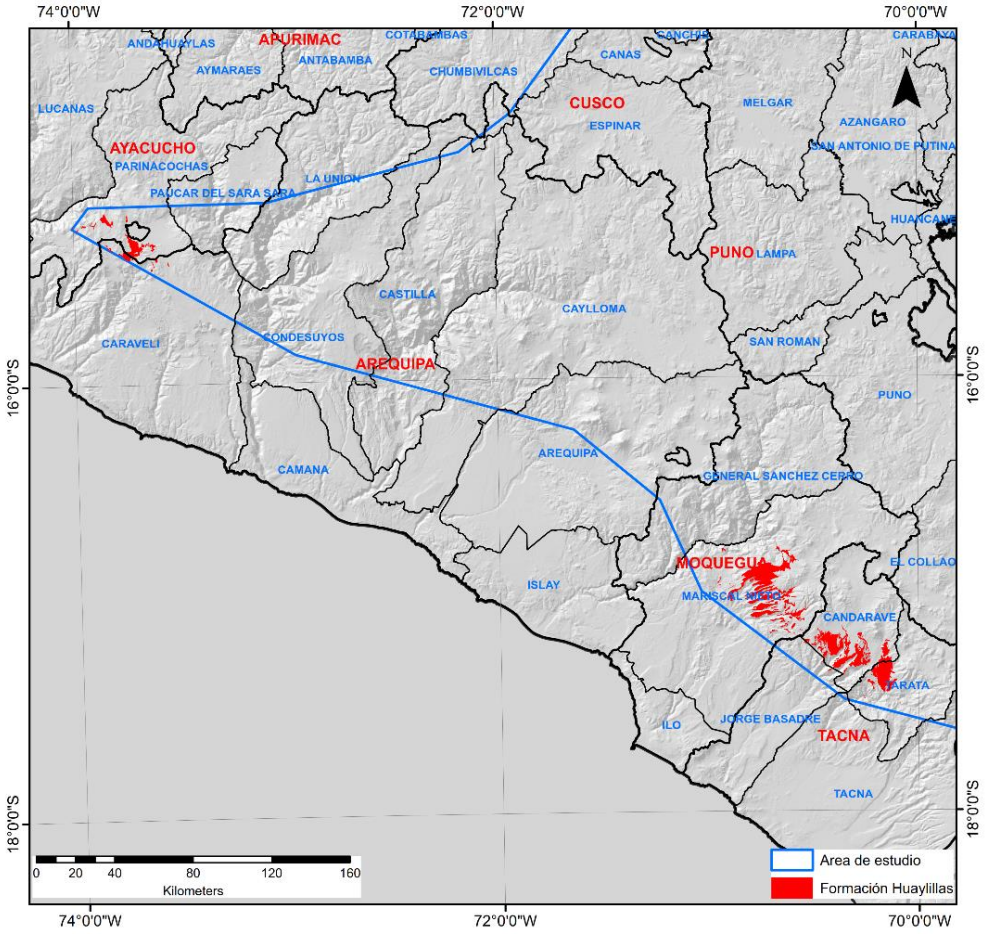


Figura 4. Área de extensión de la Formación Huaylillas.

2.2.1.1.2. Formación Tinajani (Nm-ti).

AUDEBAUD, E. y VATIN-PERIGNON, (1974) describen con esta denominación a una serie detrítica y volcánica que aflora en los alrededores del paraje Tinajani, en el cuadrángulo de Ocuviri.

Ambiente de depositación

Se presenta en ambientes volcánicos y sedimentarios diferenciados por unidades detríticas y volcánicas. Está compuesta por sedimentos continentales principalmente fluviales y en menor proporción, lacustres.

Composición y Sectores

En esta formación se han diferenciado dos unidades, una detrítica y otra piroclástica.

- Unidad Detrítica (Nm-ti/se) Compuesta por conglomerados en capas masivas de clastos polimícticos, subredondeados y heterométricos, pudiendo llegar hasta 30 cm de eje mayor, areniscas feldespáticas de grano grueso con presencia de canales rellenados de conglomerados y algunos niveles microconglomerádicos. Hacia la parte superior la secuencia está conformada por una intercalación de areniscas feldespáticas en capas gruesas y limoarcillitas y arcillitas en capas delgadas. Todo este conjunto se caracteriza por su color rojo ocre. Se calcula un grosor de 200 m en promedio (INGEMMET, 2003).
- Unidad Tobácea (Nm-ti/tb) Es una unidad de un flujo piroclástico diferenciada en la secuencia detrítica, caracterizada por su petrografía tobácea que marcan una fase de vulcanismo explosivo. Petrográficamente, la toba es de composición riolítica de color blanco rosácea de naturaleza lapillítica y litoclástica rica en cristales de biotita y pómez, abundante lítico volcánico heterométricos en una matriz de ceniza. Estas tobas se encuentran bastante cohesionadas y parcialmente soldadas (INGEMMET, 2003).

Edad

Se tiene algunas dataciones radiométricas en K/Ar en roca total de 18,0 ±0,6 Ma (Bonhomme et al., 1985) que le asignan al Mioceno inferior

A partir de las dataciones obtenidas en la parte media de la formación y por sobreyacer a los Volcánicos Monterino, se confirma que la Formación Tinajani es atribuida al Oligocena Superior-Miocena inferior.

Ubicación

Los mejores afloramientos se ubican en las inmediaciones y hacia el sur del poblado de Umachiri, así como a lo largo de la carretera Ayaviri-Chuquibambilla. Tambien se observan en el poblado de Tinajani al sur de Ayaviri en el departamento de Puno.

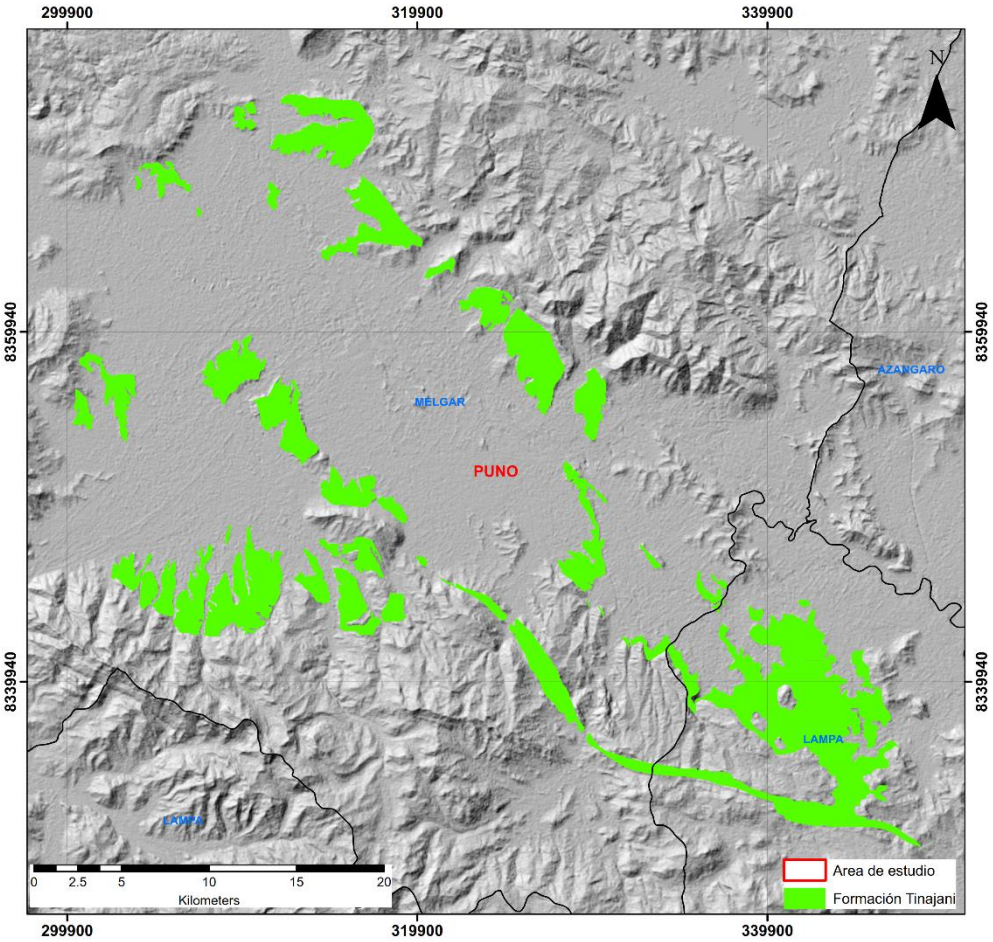


Figura 5. Área de extensión de la Formación Tinajani.

2.2.1.1.3. Grupo Palca (Nm-p).

Definiciones y relaciones estratigráficas

El nombre de este Grupo ignimbrítico, ha sido tomado del pueblo de Palca, en el cuadrángulo de Ocuviri. Se denomina Grupo Palca (Klinck, 1986) a los centros volcánicos que tienen un rango de edad entre 24-18 Ma y donde se han reconocido cuatro centros volcánicos que van de Oeste a Este.

Este grupo tiene una gran extensión areal en el Cuadrángulo de Ocuviri, pasando a la esquina NO y SO del Cuadrángulo de Juliaca y a la parte NE del Cuadrángulo de Lagunillas, donde se le encuentra infrayaciendo a la secuencia de la Cordillera de Sillapaca. La base está expuesta al Norte de Palca, donde este grupo descansa en discordancia angular sobre el Grupo Tacaza. El contacto superior tiende a ser transicional con el Grupo Sillapaca suprayacente. Se observa un contacto interdigitado con las lavas de Sillapaca, en la Laguna Chilapata, así como también en el Cerro Hanquerani, un centro volcánico de Sillapaca. En la parte SO del cuadrángulo de Ocuviri, hay una transición gradual de secuencia piroclástica a sedimentaria que también reposa discordante sobre el Tacaza. En la parte norte del Cuadrángulo de Lagunillas parecen estar digitadas en la parte superior con las lavas de Tacaza. En el cuadrángulo de Puno se presentan depósitos de flujos piroclásticos en el extremo sur de la laguna Umayo, donde sobreyace en discordancia angular a rocas del Grupo Puno y a su vez infrayace en discordancia angular a lavas afaníticas del Grupo Barroso (INGEMMET, 1993).

Ambiente de depositación

Se considera que el Grupo Palca se ha originado por la erupción de una sucesión de cenizas fluidas a lo largo de una fractura prominente en la corteza teniendo debajo una cámara magmática altamente fraccionada. Esta fractura al este puede haberse conducido como una bisagra a lo largo de un bloque romboidal ahora cubierto por los actuales afloramientos creando dentro de la cámara originalmente una caldera que fue subsecuentemente rellenada por las tobas. Willlams y Mcbirney (1979) apuntan que es un consenso general, el

que las ignimbritas asociadas a envolturas y conos volcánicos por fracturamiento y concentración de volátiles, están en el techo de la cámara magmática. Como corolario se propone que el fraccionamiento de una cámara magmática en el área de Palca puede haber causado fisuras abiertas preferentemente a lo largo de un conjunto de fracturas pre-existentes, probablemente por un abovedamiento dando lugar a erupción de tobas está asociada especialmente a una posición inferida de una de estas fracturas mayores (Línea Ocuviri). Se ha propuesto que las tobas más proximales a la línea principal, tuvieron suficiente calor para soldarse una vez depositadas, mientras que las tobas más distales se han enfriado por debajo de una temperatura mínima a la que ha tenido lugar la soldadura. (INGEMMET, 1993).

Litología

El vulcanismo mayormente explosivo que dio lugar a la Formación Palca, se encuentra focalizado al este de la localidad del mismo nombre, conforma actualmente el nevado San Carlos (5 350 msnm). Se han podido reconocer hasta cuatro eventos:

- Miembro basal: (Nm-pa/tbk) Tobas de cristales y cristalolíticas de composición riolítica a dacítica, estratificados ocasionalmente con vulcarenitas rojas. Ampliamente expuesta en el extremo sureste del cuadrángulo, localidad de Paratía.
- Miembro inferior: (Nm-pa/tbka) Tobas cristalolíticas de composición riolítica a dacítica, con biotitas parcialmente alteradas a óxidos de hierro, y líticos alterados a sericita y clorita. Extensionalmente son las de mayor distribución, tal como se puede observar entre la localidad de Palca y la quebrada Tinajani, lugar donde se interdigita con las sedimentitas de la Formación Tinajani.
- Miembro medio: (Nm-pa/tbx) Tobas brechosas expuestas en el sector oeste del cuadrángulo, en el río Ocuviri, formando parte de los cerros Añacañe, Tucra y Santuccacca; anteriormente

cartografiados como Grupo Tacaza. Han sido datadas en (16 Ma).

- Miembro superior: (Nm-pa/tbc) Tobas de caída y de cristales, de composición riodacítica con niveles de cenizas soldadas. Se tienen dataciones de 12,7+/-0,25 Ma en el cerro Coline Apacheta, y de 11,2+/-2,0 Ma en los alrededores de la localidad de Chijchijane (INGEMMET, 2003).

Sectores (Fig.6)

Sus afloramientos se localizan en los extremos noroeste y sureste del cuadrángulo de Juliaca, que corresponden a los límites orientales de este vulcanismo que está ampliamente distribuido en dirección sureste-noroeste, a lo largo de los cuadrángulos de Ocuviri y en sectores restringidos de los cuadrángulos de Yauri y Ayaviri. Constituye un nivel guía en las relaciones estratigráficas de la cuenca Tinajani con cuencas miocénicas localizadas en la parte más occidental.

Al norte de la laguna Umayo, se encuentran tobas de lapilli blanca con abundante fragmento lítico y biotitas. Asimismo, al norte de Antarape, Mita Ají, Airampune y Huilanacce sobreyacen en discordancia angular a la Formación Vilquechico tobas cristalolíticas con fragmentos de pómez cristales de cuarzo fracturados, angulosos a subangulosos en soporte de ceniza con biotitas fracturadas frescas y alteradas.

En Cantería, frente a la laguna Umayo, el Grupo Palca sobreyace al Grupo Puno e infrayace a la Formación Sillapaca, presenta tobas con vidrio, fragmentos líticos y cristales de plagioclasa dentro de una matriz afanítica marrón claro.

En el cuadrángulo de Callalli, corresponde a una secuencia piroclástica, que se encuentra entre la localidad del mismo nombre y la hacienda Pulpera, denominada anteriormente como parte de la Formación Pichu. Además, el cuerpo subvolcánico localizado en el sector de Chalhuanca corresponde a domos de composición riodacítica atribuidos a la etapa final del vulcanismo Palca.

Edad

La edad de esta formación la determinó Bonhomme(1985), por el método K/Ar en biotitas, realizando dataciones en el cuadrángulo de Ocuviri, obteniendo una edad de 16.9 Ma, lo que indica una edad Miocénica.

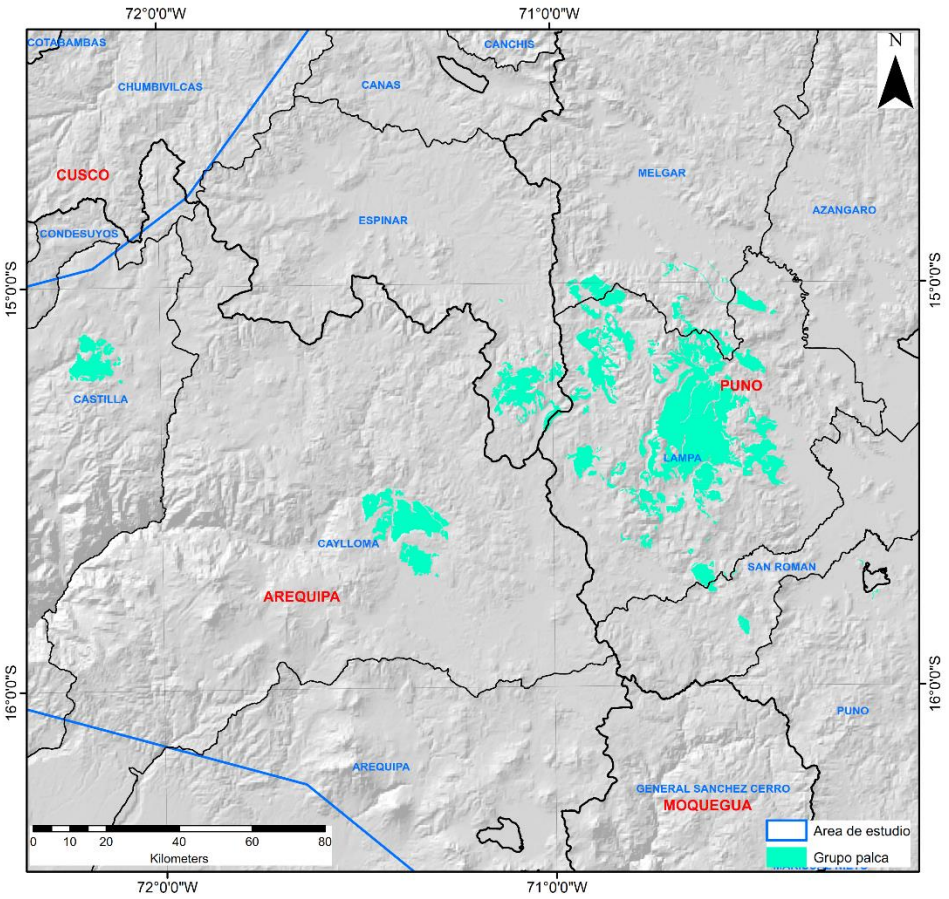


Figura 6. Área de extensión del Grupo Palca

2.2.1.1.4. Grupo Maure (Nm-ma).

La Formación Maure (Wilson y García, 1962) originalmente fue definida para agrupar a una secuencia sedimentaria y volcano-sedimentaria en el área de Palca. Posteriormente Mendívil (1965) utilizó este término para los sedimentos de la cuenca Maure (Fig.7). En la zona de estudio, Palacios (1993) y Klinck (1986) elevaron la formación al rango de grupo para reunir a las secuencias sedimentarias y volcano-sedimentarias presentes en el sur del Perú, criterio que fue seguido por otros autores (Velarde, 2004; Carlotto, 2002).

Ambiente de depositación

La combinación en el Maure de volcánicos subaéreos interestratificados (lavas no almohadilladas e ignimbritas) y sedimentos de aguas someras con grietas de desecación, huellas de gotas de lluvias, vestigio de cristal de halita, marcas de algas y restos de plantas, incluyendo arcillas in situ sin fósiles marinos sugieren un tipo de playa efímero dentro de un ambiente de deposición lacustre, sujeto a desecaciones periódicas. El aumento de la salinidad, la desecación y la influencia ocasional de material piroclástico puede haber sido la causa del establecimiento de fauna muy restringida (INGEMMET, 1993).

Escasos detritos clásticos, comprendiendo areniscas poco clasificadas y conglomerados pueden haber estado restringidos a las márgenes de la cuenca Maure, sugiriendo que la topografía en áreas adyacentes fue suave y las proporciones de erosión subsecuentemente baja. Gradientes de fondos poco profundos y la ausencia de corrientes fuertes impidieron la dispersión más amplia del material detrítico por lo que la mayor parte de la secuencia Maure, comprende sedimentos clásticos de grano fino, piroclásticos y calizas, con una actividad mínima de corriente para las numerosas calizas delgadas y finamente laminadas (INGEMMET, 1993).

Las calizas pueden representar precipitación química proveniente de la saturación de carbonato de calcio, aunque algunos contienen también pequeñas y delgadas conchas de bivalvos. Los horizontes de las lutitas negras se interpretan como acumulaciones representativas de materiales provenientes de plantas, preservadas quizás por un rápido enterramiento debajo de los piroclásticos. Algunos de los carbonatos disueltos pueden haber sido introducidos dentro de las aguas de los lagos por manantiales, los cuales han depositado travertinos en algunas áreas (Río Blanco) se ha observado estratificación bidireccional, en unidades de areniscas en las áreas de Lagunillas, Pichacane e llave, pueden reflejar corrientes de deriva menores interactuando con corrientes dirigidas hacia las riberas cerca de las márgenes del lago (INGEMMET,

1993).

La cuenca de subsidencia permitió una acumulación de más de 1,300 m. de sedimentos y piroclásticos, pero no se han establecido las condiciones de aguas profundas y el vulcanismo contemporáneo parece haber sido exclusivamente subaéreo. No se han encontrado indicaciones de erupción submarina tales como hialoclastitas y lavas almohadilladas lo que sugiere que una gran parte de la cuenca Maure, pudo haber estado seca por mucho tiempo, con sedimentos introducidos al centro de la cuenca sólo ocasionalmente por corrientes torrenciales (INGEMMET, 1993).

La ausencia de depósitos interestratificados sugiere que la masa de agua estuvo cerca de la superficie, y muchos de los sedimentos probablemente se acumularon en una llanura de barro seco con ambientes lacustres efímeros. No se han encontrado evaporitas no carbonatadas, aunque se han ubicado moldes de cristales de halita en dos localidades (Jancuyo y cerca de la Hacienda Sorapa). Presumiéndose que la sal fue depositada y redisuelta moviéndose quizá hacia arriba, en la misma proporción que los sedimentos, los cuales aumentan en la forma descrita por Kendal (1979) Y Hardie (1978).

Litología

El Grupo Maure es una unidad altamente distintiva, consistente de Consiste de una secuencia volcánica-sedimentaria, con volcánicos interestratificados (ignimbritas, tabas aéreas, lavas, andesitas basálticas y escasamente bloques de tobas) y sedimentos lacustres (predominan tobas retrabajadas, limolitas, fangolitas, calizas con algunas areniscas, conglomerados y lutitas negras). Aparte de las lutitas negras los sedimentos y piroclásticos son típicamente de colores pálidos, aunque una coloración verde intensa debido al alto contenido de clorita es una característica distintiva de algunas unidades.

Sectores

El Grupo Maure aflora en las hojas 32v2 y 32v3 del cuadrángulo de Puno. En la primera, los afloramientos corresponden a la proyección

del Grupo Maure de los cuadrángulos de Pichacani (33v) e Ilave (33x) y en la hoja 32v2 aflora en las partes más altas donde sobreyace a la Formación Pichu e infrayace al Grupo Barroso. En los alrededores de San Miguel (hoja 32v2), los afloramientos son aislados y están conformados por areniscas tobáceas con clastos polimícticos subangulosos con intercalaciones de areniscas rojas con clastos de tobas. Hacia la parte superior, se intercala un nivel de toba de color blanco que presenta erosión reniforme. Más al sureste, en el cuadrángulo de Ilave (32 x), se encuentran calizas lacustrinas intercaladas con las areniscas descritas. Al sur de Andamarca y Peruani (hojas 32v3 y 32v2 respectivamente).

En el cuadrángulo de Sicuani, en el límite norte de la cuenca Yauri-Descanso, que abarca gran parte del extremo suroeste del cuadrángulo, sector comprendido entre la hacienda Cayanca y Corapata, se encuentran afloramientos de edad miocénica y lateralmente son correlacionables con el Grupo Maure; se les puede dividir en unidades de acuerdo a su litología:

- Miembro basal: (Nm-ma1) Conglomerados polimícticos y areniscas arcósicas marrón rojizas de amplia exposición en las localidades de Colliri Chico y Tungasuca, a orillas de la laguna Pampamarca.
- Miembro inferior: (Nm-ma2) Areniscas y limoarcillitas marrón rojizas, localizadas en Chilacunca y la hacienda Jarabamba, en el extremo sur del área.

En el cuadrángulo de Yauri en el sector comprendido entre las localidades de Descanso y Yauri, el Grupo Maure (subcuenca Descanso-Yauri) ha sido subdividido en cuatro miembros, que pueden considerarse formaciones en el caso de que cumplan con los requisitos de nomenclatura formal:

- Miembro basal: (Nm-ma1): Conglomerados polimícticos y areniscas arcósicas marrón rojizas, anteriormente considerados como parte del Grupo Puno en el sector de Descanso.
- Miembro inferior: (Nm-ma2): Areniscas y limoarcillitas marrón rojizas anteriormente denominada como Formación

Casablanca, entre las localidades de Descanso y Oquesupa, en el río Huacra Huacho.

- Miembro medio: (Nm-ma3): Limoarcillitas, dolomitas y calizas en estratos delgados. Anteriormente denominada como Formación Yauri. Ampliamente expuesto en el trayecto de Yauri a la localidad de San Miguel en el río Chancarani, con dirección a la localidad de Descanso.
- Miembro superior: (Nm-ma4): Tobas cristalolíticas de composición riolítica a dacítica. Anteriormente registradas como Formación Garza. Esta secuencia piroclástica es correlacionable tentativamente con el vulcanismo Palca, el mismo que se interdigita con la facies lacustre del miembro medio (INGEMMET, 1995).

Cordillera occidental y altiplano al oeste del lago Titicaca

El grupo aflora a lo largo de un trecho principal con orientación NO7SE, hasta de 35 km. de ancho en el área de Pichacane y algo más estrecha hacia el NO (así como en el área Ilave-Juli) Tiene un grosor máximo estimado de 1,300 m. Hacia la base, el Grupo continúa lateralmente dentro de los volcánicos correspondientes a los Grupos Sillapaca y Palca, mientras que en el tope y en algunas localidades el Grupo pasa gradacionalmente a los volcánicos del Grupo Barroso (INGEMMET, 1993).

En el cuadrángulo de Condoroma la secuencia sedimentaria cartografiada anteriormente como parte del Grupo Tacaza en los alrededores de Tisco, así como las sedimentitas miocénicas de la Formación Yauri, del sector noreste del cuadrángulo, son correlacionables con el Grupo Maure, que se expone ampliamente en los cuadrángulos de Callalli y Lagunillas. En los alrededores de la represa de Condoroma, el grupo está bien expuesto, en ambos flancos de un sinclinal asimétrico con orientación NNO y consiste de sedimentos bien estratificados incluyendo lutitas ricas en material orgánico, limolitas con impresiones de plantas, conglomerados, areniscas pobremente clasificadas, fangolitas gris verdosas, limolitas tobáceas blancas bien estratificadas, con tobas pumíticas

bandeadas parcialmente soldadas y algunas tobas finas a gruesas. Las limolitas examinadas en esta localidad contienen escamas y dientes de peces, abundantes ostrácodos y vegetación de algas laminadas (INGEMMET, 1993).

En la parte oriental del Valle del Río Calca en Collpa Capilla, en el valle del Río Negrillos se observa una interdigitación de la parte más baja del Grupo con lavas Sillapaca.

Al este de Casa Blanca, el grupo está bien expuesto en un pequeño sinclinal donde aparece comprimida, una ignimbrita masiva, estratificada de menos de 5 m. de espesor.

En el área de Lagunillas, por lo menos 500 m. del Grupo Maure en una secuencia buzante hacia el SO, ubicándo la misma al sur del Cerro Huaranquincho. La sección más continua en el área puede ser examinada en el Cerro Sayhua, se observa también capas delgadas de caolinita cerca al Cerro Pucará, donde una capa de arcilla verde gris pálido de aproximadamente 2 m. de espesor yace en una secuencia de tobas aéreas.

En la parte noroccidental del cuadrángulo de Pichacane el Grupo Maure sobreyace discordantemente al Grupo Tacaza y cerca de su tope se interdigitan lavas del Grupo Barroso. En el cerro Timillo, al sur de Jesus María se pueden observar sedimentos del Grupo Maure rellenando superficies paleogeográficas desarrolladas en las lavas del tope subyacente Grupo Tacaza.

El Maure aflora sobre una gran área en la parte SO del Cuadrángulo de Pichacane, donde sobreyace discordantemente al Grupo Lagunillas. La secuencia está expuesta a lo largo del curso del río Blanco entre Condorine Y Pampa Cajunane.

En el área de Ilave-Juli el Grupo Maure sobreyace al Grupo Puno y al Grupo Sillapaca, en el Cerro Olla, muestra un contacto superior transicional con la Formación Casamiento del Grupo Barroso. El Grupo está mejor expuesto al norte de la Hacienda Sorapa.

Las facies conglomeráticas del Grupo se encuentran en varios lugares cerca de las márgenes de la Cuenca Maure, siendo comunes en el cuadrángulo de llave donde contienen clastos de

volcánicos, calizas, cuarcitas y areniscas hasta de 1 m. de sección (INGEMMET, 1993).

Edad

A la secuencia total del Grupo Maure se le atribuye una edad de entre ~6 y 12 m.a. en base a los siguientes datos:

- En el cuadrángulo de Lagunillas, la edad del Grupo Maure está bien documentada sobre la base de dataciones radiométricas de niveles tobáceos intercalados en la unidad sedimentaria (Boudesseul, 2000), asignándole una edad miocena.
- En el cuadrángulo de Pichacane, determinaciones de edades K-Ar de 10.2, 8.0 y 8.8 m.a. obtenidas de las lavas del Grupo Maure en Loma Sepa y al oeste de Cerro Japasaira.
- En el cuadrángulo de Condoroma, una determinación de 11.2 m.a. obtenida de la lava andesítica del Grupo Maure en la represa de Condoroma.
- Relaciones estratigráficas observadas en el área de llave que indican, una formación pre-Umayo (c. 5.9 m.a.), post-Grupo Sillapaca para el Grupo Maure.
- Evernden (1977), ha obtenido edades de 4.9, 8.0, 8.2, 10.5 Y 26 m.a. para la Formación Mauri de Bolivia, y para la parte superior post 12 m.a. la cual se considera equivalente del Grupo Maure del Perú. El Grupo Maure es correlacionado con el miembro 6 de la Formación Mauri. Adicionalmente, sedimentos lacustres similares a los del Grupo Maure están intercalados con ignimbritas del Grupo Palca, de 16 m.a. en el valle del río Borracho sugiriendo que el Grupo Maure puede ser más antiguo de lo que se indica anteriormente (INGEMMET, 1993).

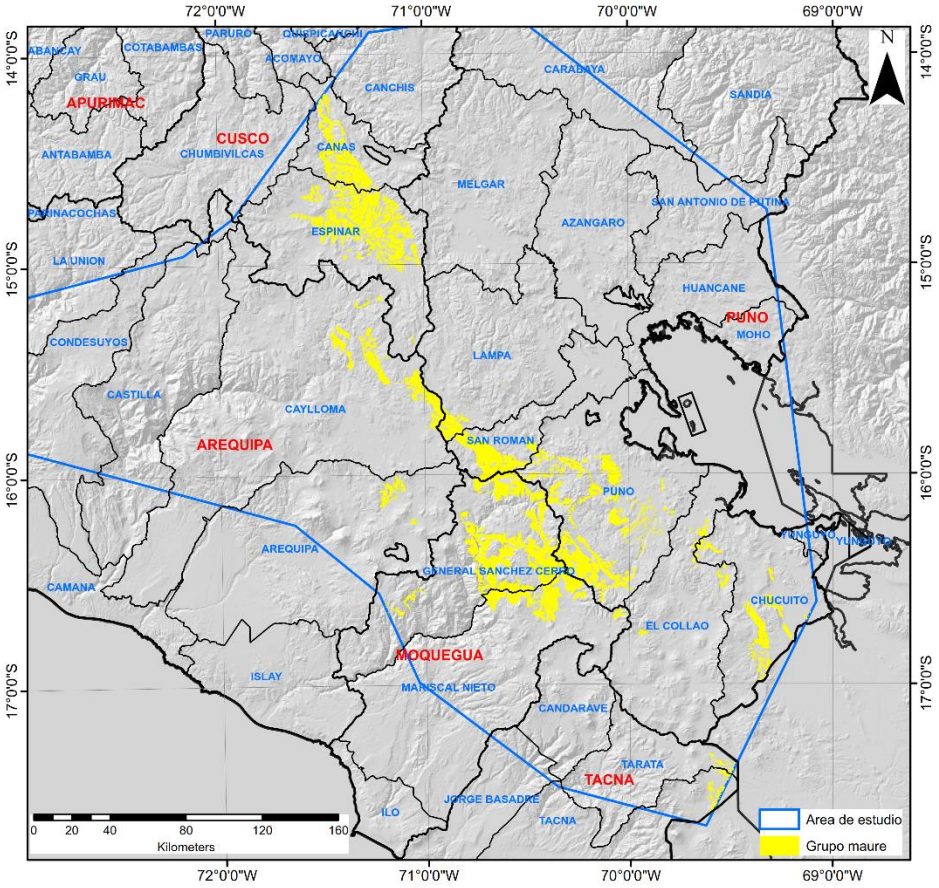


Figura 7. Área de extensión del Grupo Maure

2.2.1.1.5. Formación Aniso (Nm-a).

Es una unidad estratigráfica, de naturaleza sedimentario-volcánica, cuya secuencia más conspicua se encuentra en la parte alta del pueblo de Aniso, donde se observa tanto la base como el techo. (Guevara y Davila, 1983)

Ambiente de depositación

Esta unidad se ha depositado en un ambiente lagunar o subaéreo, evidenciando por la estratificación sesgada, gradada, delgada, laminar plano a algo ondulante, así como por el adelgazamiento de los estratos, y por la naturaleza litológica, cuya variación lateral en granulometría nos evidencia cambios tanto en la dirección de aportes como en la energía de transporte. Todo lo citado es característico de ambientes cerrados lagunares.

Litología

Está constituida por intercalaciones de areniscas tobáceas grises a verdosas, con areniscas conglomeráticas cuyos fragmentos subredondeados a subangulares son de tobas y lavas andesíticas; también se observa estratos de tobas redepositadas blanco-amarillentas. La estratificación es delgada y definida, observándose estratificación gradada y sesgada (INGEMMET, 1991).

Sectores (Fig.8)

Al microscopio se ha estudiado cuatro muestras, habiéndose definido dos grupos; el primero consta de dos muestras evidenciadas alrededor de Marcapata y del cerro Cusama (alrededores de la mina Tumire) se les clasifica como areniscas tobáceas, constituido por fragmentos de cuarzo 30-25%, líticos 20-15%, vitroclástos 10-5%, feldespatos 15-0% y otros 5% englobados en unas pasta 40-30% de microfragmentos de naturaleza vítrea o feldespática (INGEMMET, 1991).

El segundo grupo, tiene dos muestras, procedentes de los alrededores de la mina Tumire, una se le ha clasificado como riolita con textura porfírica, consta de fenos de cuarzo 30%, sanidina 10%, biotita 3% y otros 2%. La otra muestra se le clasifica como traquita hornbléndica, con textura porfírica, microlítica, fluidal (INGEMMET, 1991).

Edad

La edad de esta formación se determinó en base a la edad de las unidades infra y suprayacentes así como por sus relaciones tectónicas comparables con áreas datadas y que sean del mismo nivel estructural, en base a lo cual se le considera del Mioceno medio a superior (INGEMMET, 1991).

Esta unidad se correlaciona con la Formación Ayacucho del centro del Perú y con el Grupo Maure del sur del Perú siendo equivalente con parte del Grupo Pisco de la costa de Ica (INGEMMET, 1991.).

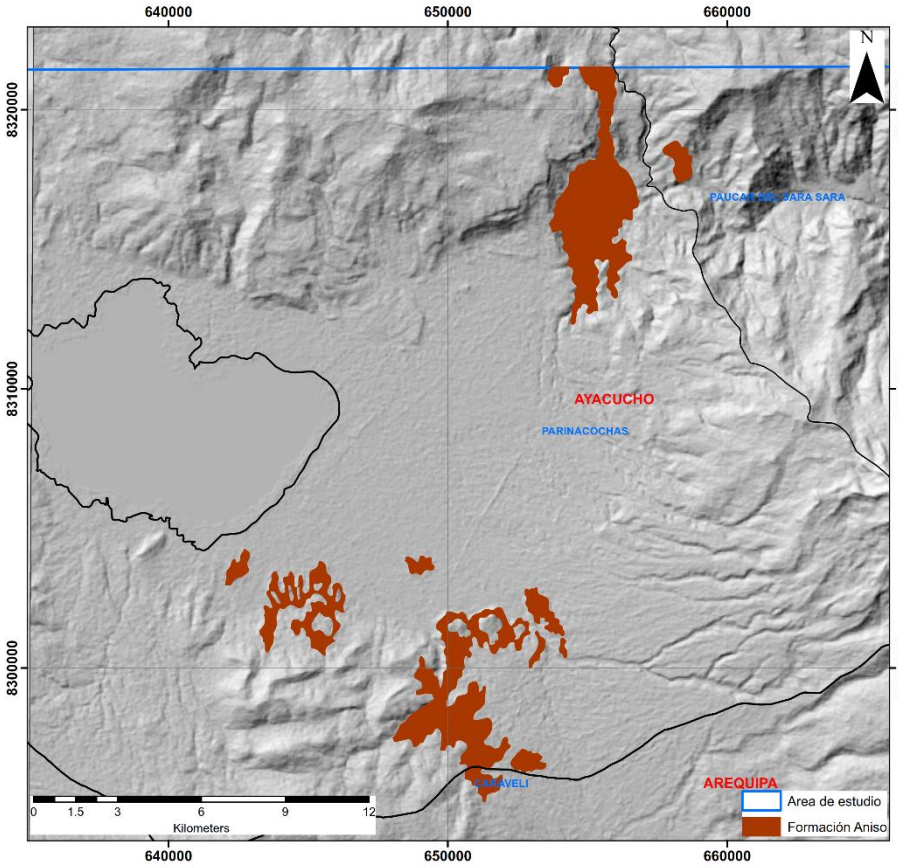


Figura 8. Área de extensión de la Formación Aniso

2.2.1.1.6. Formación Capillune (Np-ca).

El nombre de esta formación fue definida por Mendivil (1965), quien estudió las características litológicas de la sección tipo, ubicada en las vecindades de la localidad de Capillune (Fig.9); en los cuadrángulos de Maure y Antajave (INGEMMET, 1975).

Es una unidad estratigráfica, de naturaleza sedimentaria lacustre, compuesta por conglomerados, areniscas, piroclásticos, limolitas y arcillas con coloraciones grises, blanco-amarillentas y verdosas (INGEMMET, 1975).

Ambiente de depositación

La naturaleza de los sedimentos de la formación Capillune indican depositación en un ambiente continental lacustrino, por medio de fuertes corrientes, probablemente de corto recorrido. La gran extensión que cubren estos depósitos de litología algo variada,

sugiere que se trata de una cubeta amplia o de numerosas cuencas conectadas entre sí.

Litología

La uniformidad litológica y textural de la formación es frecuente en extensos afloramientos. Topográficamente, conforma pequeñas lomadas de cumbres más o menos horizontales, y mamelones esparcidos en la región o conformando tierras bajas que cubren amplias zonas. Se encuentran en posición horizontal a ligeramente inclinadas sin ofrecer mayores deformaciones estructurales (INGEMMET, 1975).

Litológicamente, está constituida por una intercalación de areniscas, arcillas, conglomerados y piroclásticos que se presentan en capas delgadas y con coloraciones grises, blanquecinas y anaranjadas. Las areniscas son friables, de grano fino a medio, en partes manchadas de limonita, con estratificación cruzada e intercalaciones de delgados horizontes tufáceos, capitas delgadas de materia carbonosa, areniscas tufáceas de grano grueso a conglomeráticas y lentes de conglomerado fino (INGEMMET, 1975).

Las arcillas que son de colores blancos y crema, constituyen horizontes delgados con cierto contenido de materiales tufáceos. Los conglomerados con una textura fina y poco compacta, se observan principalmente en la parte inferior de la formación; o también, constituyen pequeños lentes distribuidos en diferentes niveles (INGEMMET, 1975).

Dentro de los elementos mayormente de origen volcánico, se encuentran algunos cuarcíticos, estando todos ellos subredondeados y dentro de una matriz areno-tufácea, de color gris oscuro. Dentro de los depósitos piroclásticos, se tiene unos bancos de tufo brechoide, de composición riodacítica, poco compactos y hasta con 6 m. de grosor, presentando formas cónicas bien características debido al intemperismo (INGEMMET, 1975).

Sectores (Fig.9)

En el cuadrángulo de Characato esta formación aflora en varios puntos del cuadrante noroccidental, y se le encuentra muy bien

expuesta al Sur y Suroeste de Conorane y en los alrededores de Aguada Blanca, al Norte del volcán Misti, cubierto mayormente por material piroclástico suelto. La formación Capillune yace sobre el volcánico Sencca e infrayace al grupo Barroso, en ambos casos discordantemente.

En el cuadrángulo de Callelli, corresponde a una secuencia volcanoclástica cuyos afloramientos han sido cartografiados anteriormente como Formación Confital en el sector de Pampa Negra-Apacheta, pampa Pucapampa, pampa Yurac Mocco, pampa Tolapampa y pampa Exalpalca, en las proximidades de la localidad de Chalhuanca.

En el cuadrángulo de Caylloma se localiza en el sector este de la hoja, en el cerro Chajue, extendiéndose hacia el este, cuadrángulo de Condoroma. Anteriormente estos depósitos fueron reconocidos como Formación Sencca.

En los cuadrángulos de Huaitire, Mazo Cruz y Pizacoma, esta formación aflora extensamente como continuación de exposiciones descritas por Mendivil (1965). Este hecho nos indica el amplio desarrollo de dicha formación que alcanza un grosor de 200 m., en la quebrada Tacalaya (Jaén, 1965).

En el cuadrángulo de Huaitire, aflora en el paraje denominado Patjata, con areniscas inferiores de color plomizo en fractura fresca, el mismo que se torna amarillento por la acción intempérica, su estratificación es en capas delgadas de 20 a 30 cm. Fácilmente disgregables, estas areniscas pasan a areniscas conglomerádicas cuyos elementos están aglutinados en una matriz tufácea. Es importante destacar la ocurrencia de un conglomerado de base que se presenta en la quebrada labrada por el río Viscachas. Esta unidad suprayace en discordancia erosional a los derrames del Volcánico Tacaza y constituyen, en este lugar, la base de la formación.

En el cuadrángulo de Moquegua la formación aflora en el extremo NE, en los alrededores del poblado de Asana, (cabecera del río del mismo nombre). En esta localidad la formación sobreyace con discordancia a los tufos Huaylillas e infrayace con igual relación a los

volcánicos Barroso. En las paredes del amplio valle glaciar que se desarrolla aguas arriba del poblado de Asana, se reconoce una sección de 220 m. de conglomerados con intercalaciones de areniscas.

En el cuadrángulo de Juli la secuencia Capillune, tiene una amplia distribución en el área del Cerro Ccapia, y muy aisladamente en las inmediaciones de la parte inferior del Cerro Pucará. La secuencia del Capillune en un principio se definió como la Formación Huaylillas (Palacios & Klinck, 1984), sin embargo, por las observaciones de campo y descripciones litológicas se trata más bien de un depósito retrabajado siendo su componente principal arenas tobáceas.

Edad

La edad de la formación fue determinada en base a correlación estratigráfica, debido a la falta de pruebas paleontológicas, por ello, al encontrarse suprayaciendo al Volcánico Sencca considerado del Plioceno medio a superior, e infrayaciendo a los volcánicos del grupo Barroso pertenecientes al Plio-Peistoceno. Se le asigna una edad perteneciente al Plioceno superior.

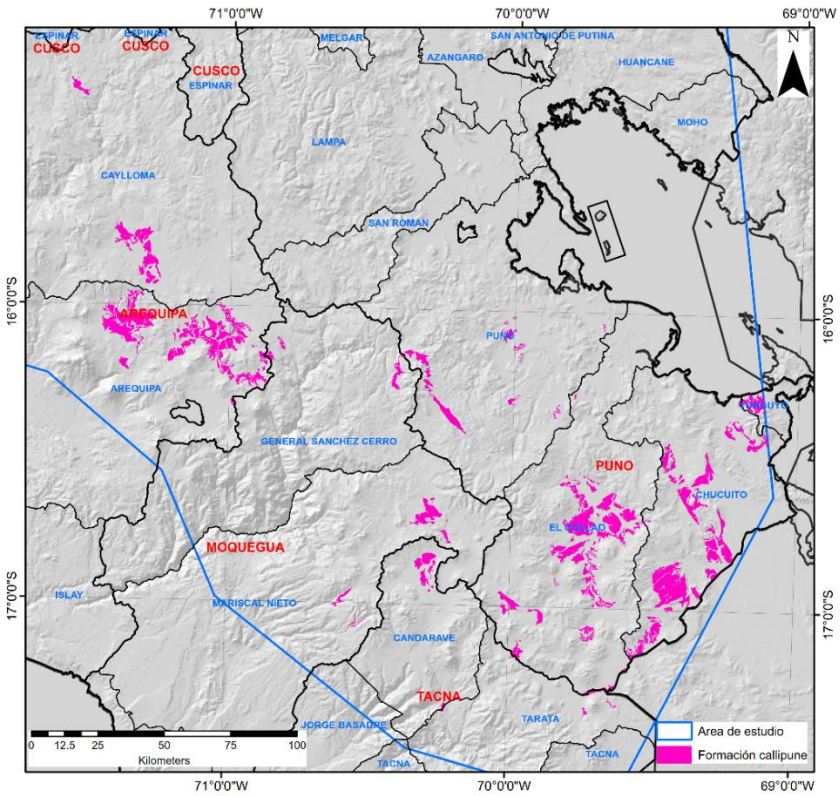


Figura 9. Área de extensión de la Formación Capillune.

2.2.1.1.7. Formación Taraco (NQ-ta).

El nombre de esta formación se deriva de la Península de Taraco, en Bolivia donde Ahlfeld (1946), usó el nombre de Conglomerado Taraco por primera vez, para describir una secuencia de conglomerados arenosos, y gravas. Newell (1949), quien determinó a la unidad bajo la denominación Formación Taraco (Fig.10) (INGEMMET, 1993).

Ambiente de depositación

La Formación Taraco es de ambiente de sedimentación continental de origen de abanico fluvial.

Litología

En la base de la unidad, se notan en todas partes areniscas rojas poco consolidadas y maargas coloradas con intercalaciones conglomerádicas, las que pasan hacia el techo a capas de conglomerados genuinos; contienen cantos bien redondeados, pero poco selecionados, dentro de una matriz arenosa. Los conglomerados son poco consolidados.

Cerca de Samán, a 25 km. noreste de Juliaca a lo largo de la carretera de Juliaca a Huancané, cortes de caminos revelan sedimentos no consolidados y grava más bien fuertemente plegadas y falladas. Los cantos consisten en de caliza redondeadas y subangulares derivada localmente. Los conglomerados de esta formación pasan, sin pausa, por debajo de las margas rojas y arenas, que contienen lechos de caliza lacustre, la cuarta etapa del sistema de Corocoro. Estas margas son a veces muy relevantes, e interrumpidos. (Newell N., 1949))

Edad

De acuerdo a su posición estratigráfica y que es anterior a los depósitos glaciales pliocénicos, por lo que se considera una edad plio-pleistocena.

Ubicación

Se pueden ubicar en la península de Taraco, situada en el Lago Titicaca cerca de Guaqui.

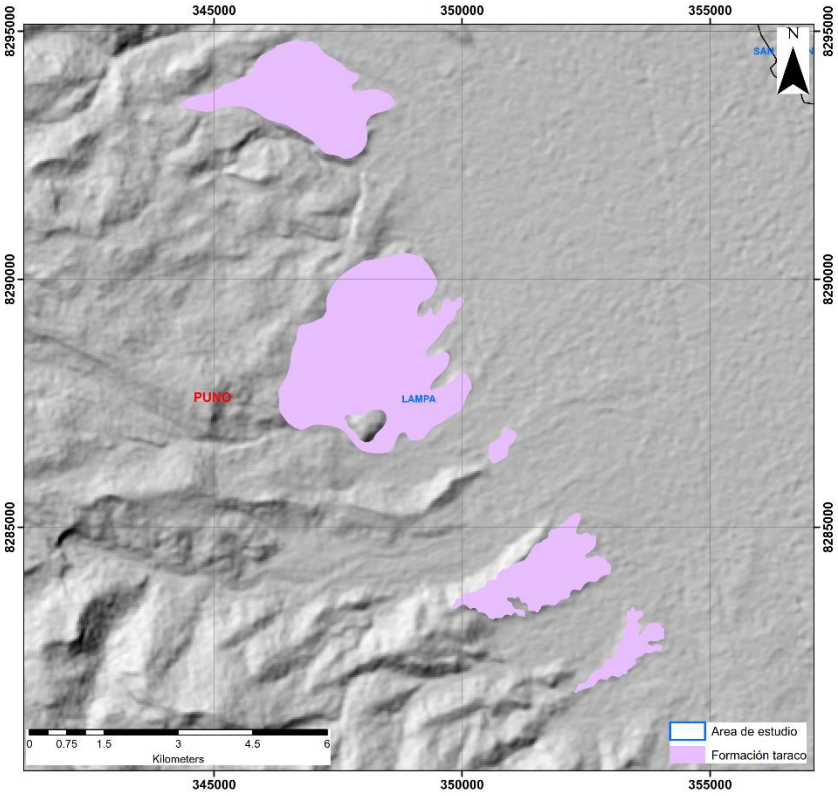


Figura 10. Área de extensión de la Formación Taraco.

2.2.1.1.8. Formación Arco Aja (Np-aa).

Ha sido definida por Fornari et al. (1981) bajo la denominación de Formación Arco Aja, dividiéndola en dos unidades (basal y superior). Bonhomme et al. (1985)

Ambiente de depositación

La Formación Arco Aja (Fig.11) es de ambiente de sedimentación continental ya que comprende un miembro inferior palustre y un miembro superior fluviatil.

Litología

La Formación Arco Aja en la quebrada del mismo nombre, tiene un grosor de 120 m. y ha sido dividida en dos unidades: una inferior de 70 m. compuesta por arcillas gris azuladas con restos de plantas y algunos bancos de gravas. Los grosores de banco varían de 15 cm. a más de 1 m. en este perfil, se presenta hacia la parte superior de esta unidad un estrato de color rosado de grano muy fino, con biotitas alteradas, tratándose de un material de origen volcánico que se alterna con niveles de arcillitas (CHAVEZ, et. al, 1996). La unidad

superior es de unos 50 m. que es la más distinguible en la región, consta de un material más grueso consistente en conglomerados polimícticos con clastos mal clasificados en matriz arcillosa, areniscas y limoarcillitas (INGEMMET, 1996).

Edad

De acuerdo a su posición estratigráfica y las dataciones realizadas, la Formación Arco Aja se le asigna una edad Pliocena-Pleistocena.

Ubicación

Esta formación se ubica por debajo de los depósitos morrénicos recientes; de manera que su distribución se encuentra restringida a la depresión del Río Carabaya.

Esta unidad aflora en la Quebrada Arco Aja afluente del Río Tambillo, ubicado en la esquina noreste del cuadrángulo de Putina en el departamento de Puno. Cabe decir que de acuerdo al área de intervención esta unidad estratigráfica se ubica en la Cordillera Occidental.

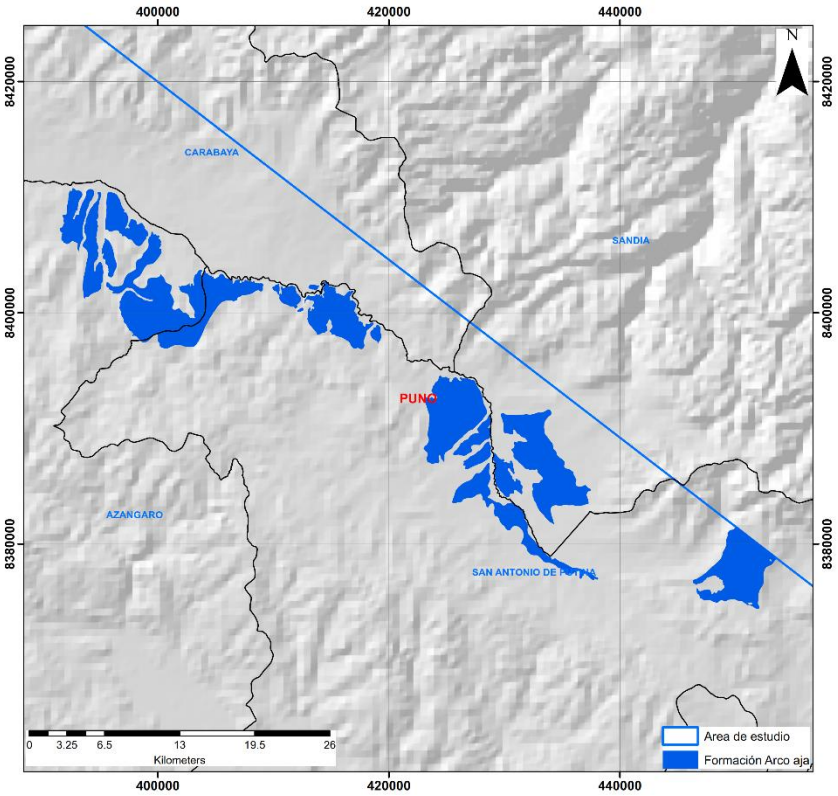


Figura 11. Área de extensión de la Formación Arco Aja

2.2.1.1.9. Formación Yauri (Np-y).

La Formación Yauri ha sido descrita como "Depósitos lacustres de la cubeta de Yauri", (Audebaud, 1967), posteriormente se redefine como “Formación Yauri”, considerándola como la unidad superior de la Cuenca Yauri (Fig.12) (Overseas et al, 1973).

Ambiente de depositación

Los análisis paleontológicos sugieren que se trataría de una cuenca continental de agua dulce, poco profunda a somera pero bien oxigenada y relacionada con eventos de emisiones ácidas.

Litología

La Formación Yauri está constituida mayoritariamente por tobas areniscosas y conglomerados lenticulares fluviátiles. En el área de estudio se presentan limos laminados, capas de arenisca y capas delgadas de caliza crema; las tobas son de color gris blanquecino y se han depositado en capas delgadas que muestran estructuras de slum, sobre estas estructuras la secuencia tobácea continúa normal y cerca al tope de la formación están intercaladas con varios niveles de caliza (INGEMMET, 1995)

Sectores

En la base de la unidad, se notan en todas partes areniscas rojas poco consolidadas y margas coloradas con intercalaciones conglomerádicas, las que pasan hacia el techo a capas de conglomerados genuinos; contienen cantos bien redondeados, pero poco seleccionados, dentro de una matriz arenosa. Los conglomerados son poco consolidados.

Se encuentra suprayaciendo a la Formación Tinajani

Edad

De acuerdo a dataciones radiométricas y contenido paleontológico se le asigna una edad Miocena Superior-Pliocena Superior

Ubicación

Sus afloramientos se observan en el cuadrángulo de Ayaviri en el sector oriental del Rio Santa Rosa del Distrito de Ayaviri, también se observan afloramientos en la carretera el Descanso Checca en la Provincia de Canas, departamento de Cusco.

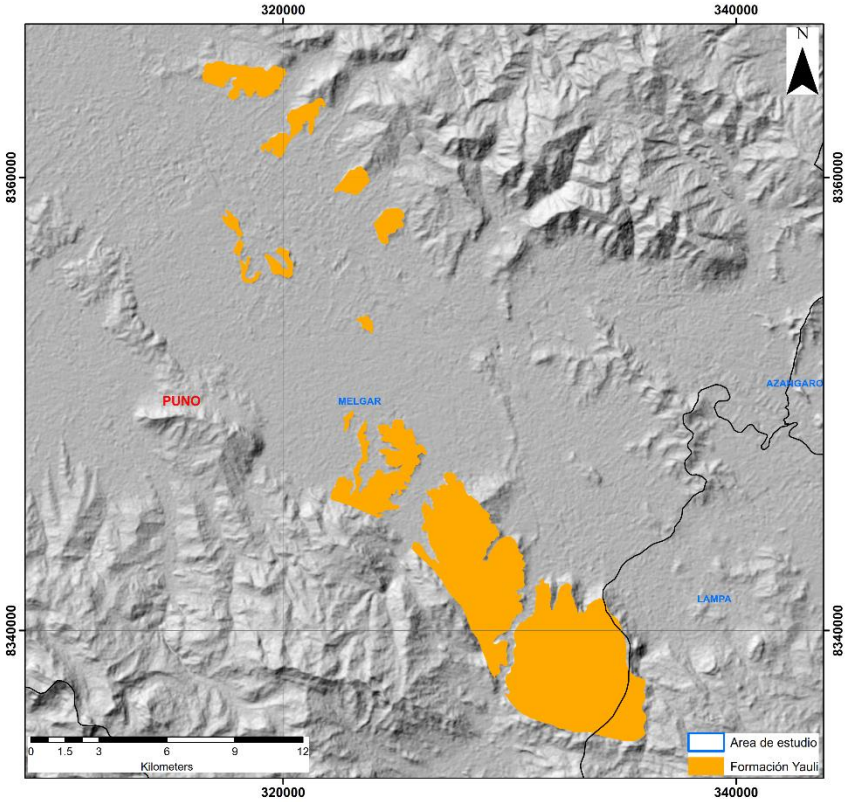


Figura 12. Área de extensión de la Formación Yauri

2.3. Bases Teóricas de Boratos

2.3.1. Génesis de los yacimientos de Boratos.

La ocurrencia de los boratos puede ser endógena o exógena, dependiendo del ambiente y procesos de formación. Los boratos endógenos son formados por metasomatismo en greisens, skarns o turmalinitas, donde se encuentran junto a elementos como Fe, Mn, Sn, Be, entre otros (Alonso, 2016); se cree que son la fase final de la segregación magmática especializada, o se filtran de las rocas intrusivas por los fluidos hidrotermales asociados (Robert B. Kistler y Cahit Helvaci, 1994). Por otra parte, los boratos exógenos se originan en ambientes marinos y continentales asociados a evaporitas. Los depósitos de boratos marinos se forman por el producto de la evaporación del agua de mar en una cuenca restringida una vez que han precipitado los carbonatos, sulfatos y cloruros (ejemplo Zechstein en Alemania).

Los depósitos económicos más importantes están estrechamente

relacionados con la actividad volcánica terciaria en los cinturones orogénicos. Están situados cerca de los márgenes de las placas convergentes (Fig.13); caracterizado por magmas andesítico-riolíticos; climas áridos o semiáridos; y ambientes evaporíticos no marinos. Los depósitos de boratos turcos, estadounidenses, sudamericanos y muchos otros comerciales son evaporitas no marinas asociadas con la actividad volcánica. Los principales depósitos de borato se encuentran en regiones extensionales tectónicamente activas asociadas con límites de placas de colisión (Ozol 1977; Jackson y McKenzie 1984; Floyd et al. 1998; Helvacı 2005, 2015). Se cree que los depósitos comerciales de borato en los EE. UU., América del Sur y Turquía están asociados con los sedimentos continentales neógenos y el vulcanismo (Helvacı, 2019).

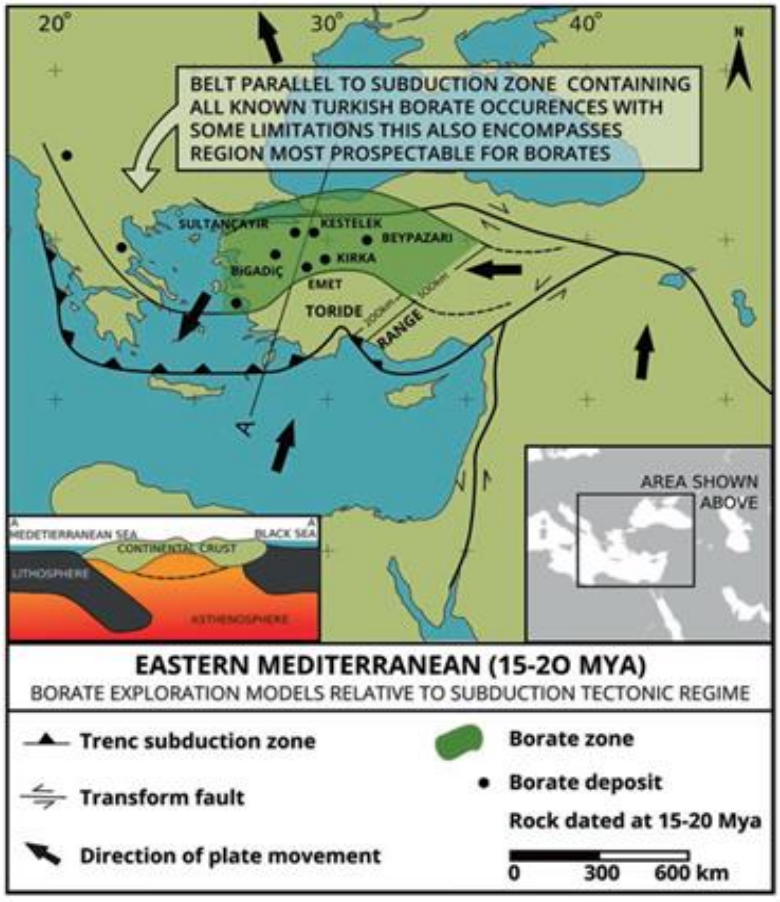


Figura 13. Depósitos conocidos y modelo de exploración de boratos según el modelo tectónico de subducción para el Mediterráneo oriental (15-20 Ma). Tomado de Helvacı (2019).

La formación de depósitos de boratos se puede resumir tentativamente en tres tipos principales como sigue: (1) un tipo skarn asociado con intrusivos y que consiste en silicatos y óxidos de hierro; (2) un tipo de óxido de magnesio alojado en sedimentos evaporíticos marinos; y (3) un tipo de hidratos de borato de sodio y calcio asociado con sedimentos lacustres (lago de playa) (cuencas no marinas) y actividad volcánica explosiva, tal como se esquematiza en la Figura 14.

Los minerales de borato en las cuencas lacustres no marinas se generaron en lagos salinos emplazados en terrenos volcanogénicos (principalmente piroclásticos) con intensa influencia hidrotermal, en condiciones áridas a semiáridas y en algunos casos a bajas temperaturas. Las siguientes condiciones son esenciales para la formación de depósitos de borato económicamente viables en sedimentos volcánicos sedimentarios del lago playa: (a) formación del ambiente del lago playa; (b) concentración de boro en el lago de playa procedente de volcánicos andesíticos a riolíticos, caída directa de cenizas en la cuenca o soluciones hidrotermales a lo largo de las fallas del graben; (c) vulcanismo cercano a las fuentes termales; (d) condiciones climáticas áridas a semiáridas; y (d) ph del agua del lago entre 8,5 y 11 (Helvacı, 2019).

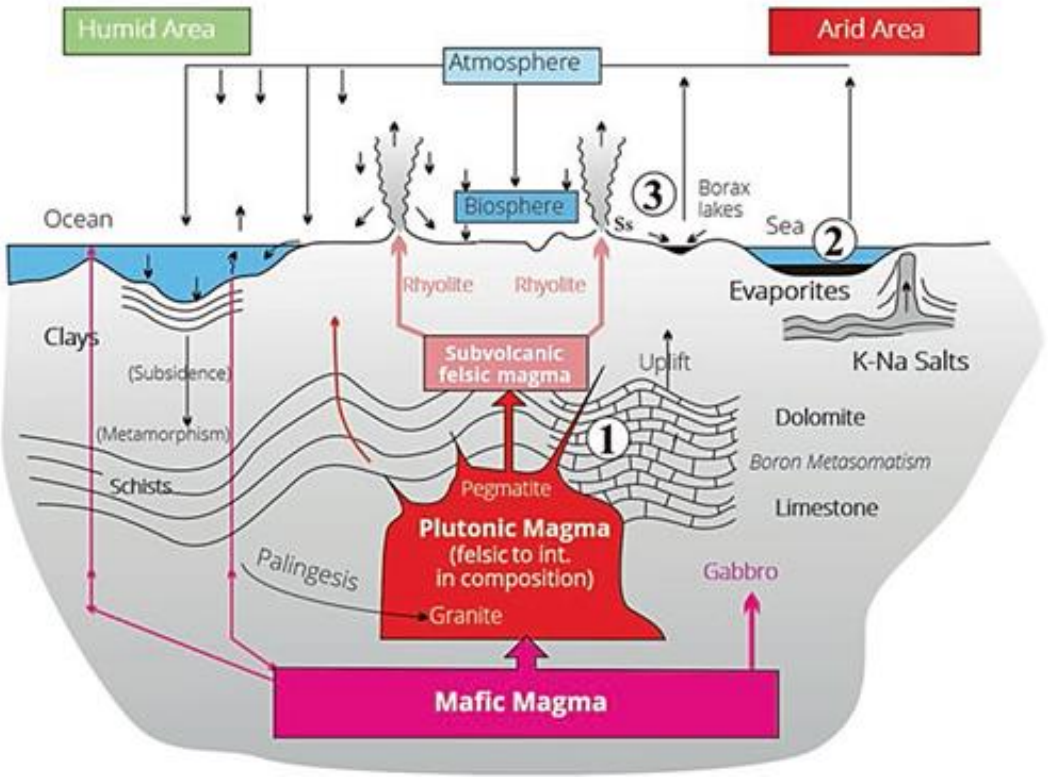


Figura 14. Esquema del ciclo del boro. (1) Depósitos de Skarn; (2) depósitos marinos; (3) Depósitos de playa-lago. Tomado de Helvacı (2019).

La formación de grandes depósitos económicos de boratos requiere de una fuente rica en boro y un medio para transportar y concentrar el boro en un ambiente rehidratado. Un clima árido a semiárido también parece ser esencial durante la deposición y concentración de cantidades económicas de boratos solubles en la cuenca en la que pueden recolectarse (Fig.15). Estos boratos solubles pueden, a la larga, conservarse únicamente mediante entierro; sin embargo, la falta de depósitos de boratos solubles más antiguos que el Terciario medio puede indicar que incluso el entierro no puede proteger a los boratos durante largos períodos de tiempo geológico. Cuando se produce cierto grado de concentración, suele ser el resultado de la actividad volcánica local (como fuente de boro), un cuerpo de agua como un lago (para disolver compuestos de boro), condiciones de evaporación (para concentrar la solución al punto de precipitación) y la deposición de

una capa protectora de sedimento (para preservar los minerales de borato altamente solubles). Estas condiciones están presentes en entornos tectónicos de colisión, para los cuales el oeste de Anatolia es un excelente ejemplo de eventos tectónicos relacionados con colisiones en cinturones móviles antiguos (Helvacı, 2019).

Los depósitos de boratos más grandes que se originaron como precipitados químicos se encuentran intercalados con arcillas, lutitas, tobas, calizas y sedimentos lacustres similares. Existe una fuerte evidencia de que la mayoría de estos depósitos estuvieron estrechamente relacionados en el tiempo con el vulcanismo activo (Fig.15). Las fuentes termales y las soluciones hidrotermales asociadas con la actividad volcánica se consideran la fuente más probable de boro. La cuenca de Konya-Karapınar (Turquía) está rodeada de volcanes que han estado activos desde el Mioceno tardío hasta el reciente. El vulcanismo activo se evidencia por la descarga de aguas termales, minerales y gases magmáticos. El Na, B, Cl, SO4 y CO2 son transportados a la cuenca por aguas termales y minerales relacionadas con este vulcanismo. Actualmente se están formando dentro de la cuenca depósitos potencialmente económicos de sales de borato, clorito, sulfato y carbonato relacionados con esta actividad volcánica (Helvacı y Ercan, 1993).

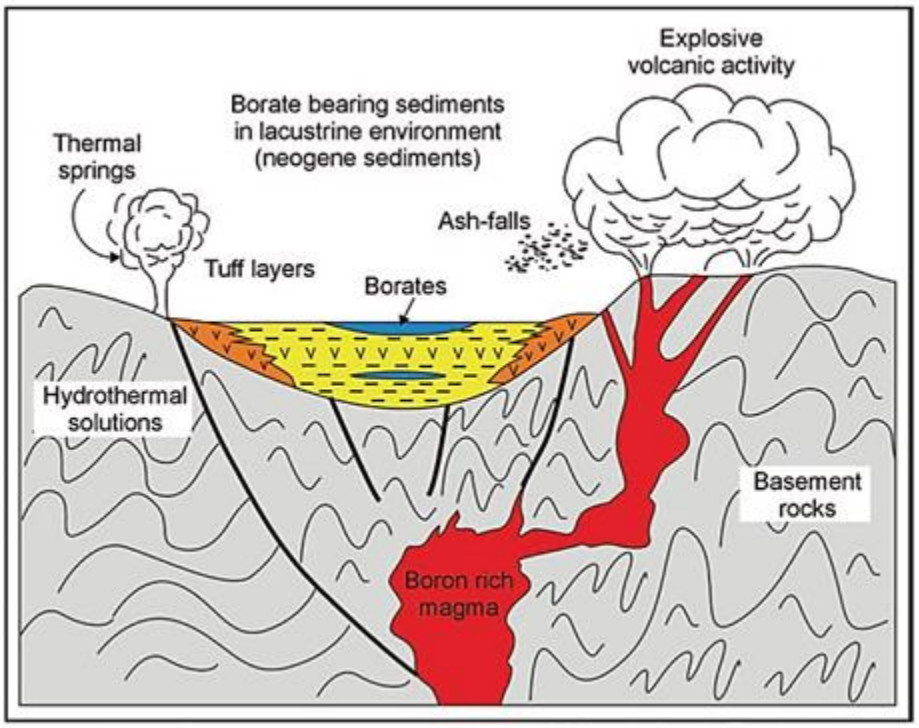


Figura 15. Modelo deposicional de un lago de playa generalizado que muestra la formación de depósitos de borato en las cuencas neógenas del oeste de Anatolia, Turquía. Tomado de Helvacı (2019).

2.3.2. 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 (Fig. 16). 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; Alonso, 2017).

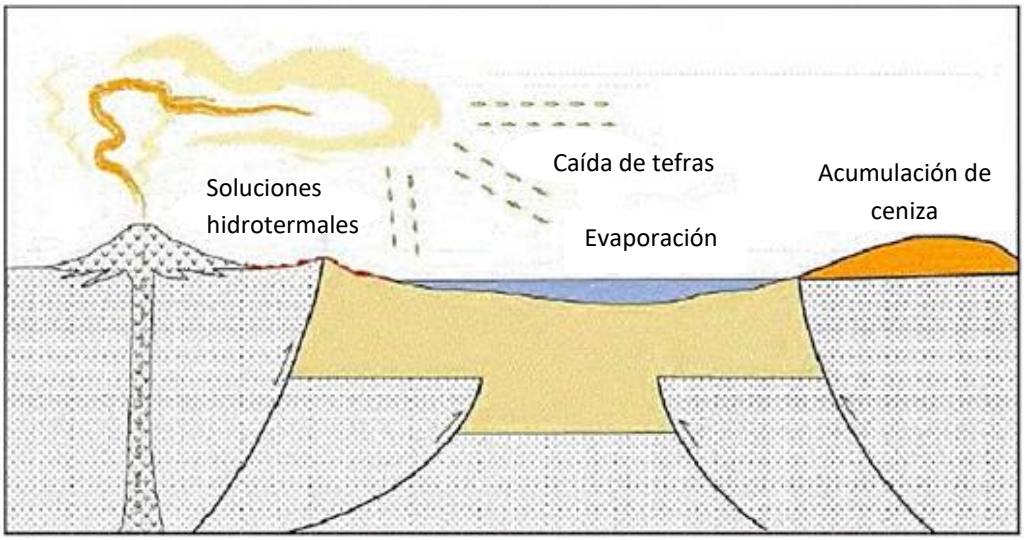


Figura 16. Marco de la generación de evaporitas en las cuencas de intra-arco/intra-plateau andinas, con vulcanismo activo con termalismo asociado, cuencas cerradas con drenaje interior y clima árido. Modificado de Alonso (1986).

2.3.3. 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:

I. Durante el Mioceno superior entre 7 y 5 Ma.
II. 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 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. 5º y 23ºS 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 26ºS. Complejos de calderas y estratovolcánicos de retroarco también entraron en erupción durante ese tiempo (Coira et al 1993). Este pulso da lugar a la tipología de formación de los boratos interestratificados en rocas neógenas.

El segundo pulso boratífero correspondería a la cuarta etapa de volcanismo identificada por Allmendinger et al. (1997). Sostienen estos 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 26º y 27ºS y desde alrededor de 25º a 23ºS. Pequeñas coladas shoshoníticas ocurren próximas al Lineamiento Calama-Olacapato-El Toro a los 24ºS 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 24ºS (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. Este pulso da lugar a los boratos de salares (Alonso, 2017).

2.3.4. Los Yacimientos de Boratos en el Mundo.

Los boratos se definen por la industria como cualquier compuesto que contenga o suministre óxido bórico. Una gran cantidad de minerales contienen óxido bórico, pero los tres más importantes desde el punto de vista comercial mundial son: bórax, ulexita y colemanita. La producción de boratos está dominada por unas pocas naciones, con Turquía como el mayor productor que en 2020 alcanzó una producción de aproximadamente 2,4 millones de toneladas métricas. El setenta y cinco por ciento del mercado está controlado por los dos principales productores, Etimine, con sede en Turquía, y Rio Tinto Borax, con su mina principal en Boron en California. El resto del mercado está formado por media docena de productores menores. Como se evidencia en la Figura 17, existe una diferencia muy significativa entre los dos principales productores. Rio Tinto Borax se encuentra en la última parte del ciclo de vida de la mina de boro, mientras que las minas de Etimine se encuentran en las etapas relativamente tempranas de las suyas. Según el Ministerio de Energía y Recursos Naturales de Turquía, Turquía tiene más de dos tercios de los recursos de boro conocidos en el mundo por un total de más de 950 millones de toneladas, mientras que los recursos estadounidenses restantes conocidos son alrededor de 80 millones de toneladas (J.K. Warren, 2016).

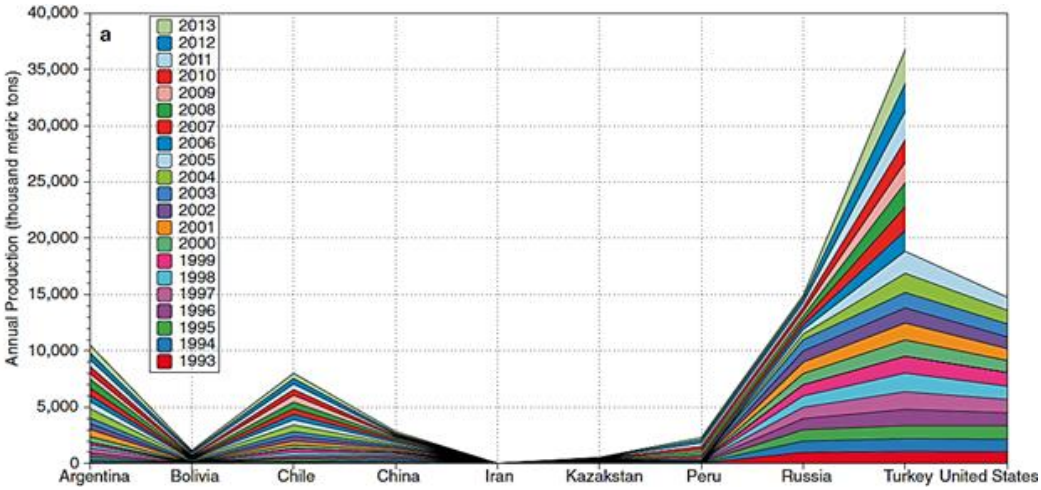


Figura 17. Área acumulada de producción de boratos hasta el año 2013. Tomado de J.K. Warren (2016).

Los depósitos de boratos son escasos y se encuentran restringidos a unas pocas provincias metalogénicas (Fig.18), las cuales son: Provincia Boratífera Turca o de Anatolia, Provincia Boratífera Norteamericana (Californiana o del SW de Estados Unidos), Provincia Boratífera Tibetana y Provincia Boratífera Centroandina. Estas provincias tienen características en común. 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 SWUSA) se encuentran en el hemisferio norte y una (Andes Centrales) en el hemisferio sur. La edad es Cenozoica, 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 (Alonso, 2017).

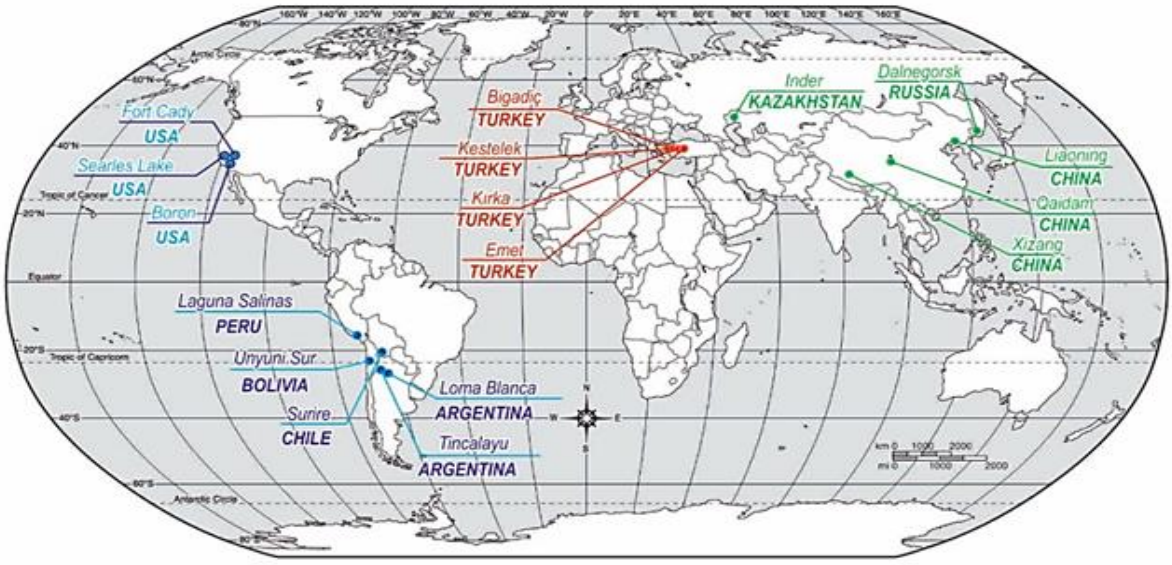


Figura 18. Distribución geográfica de las minas más importantes de boratos en el mundo. Tomado de Helvaci y Martin R. Palmer (2017).

2.3.4.1. Provincia Boratífera de Anatolia (Turquía).

Turquía es actualmente el mayor productor de boratos y tiene las mayores reservas del mundo. La producción se ha más que duplicado desde 1980 a más de un millón de toneladas por año, y es probable que nuevos aumentos conduzcan a que Turquía domine los mercados mundiales. Turquía ya es el principal productor mundial de colemanita, gran parte de la cual proviene del valle de Emet (Cahit Helvaci & Martin R. Palmer, 2017).

Los depósitos de boratos más grandes y mejor estudiados del mundo son los del oeste de Anatolia (Turquía) (Helvacı 1995, 2015; Orti et al. 2016; Helvacı et al. 2017). Los propios depósitos de boratos se encuentran en un área que cubre 300 km de este a oeste por 150 km de norte a sur en el oeste de Anatolia, al sur del mar de Mármara, como se muestra en la Figura 19. Los principales distritos incluyen los depósitos de colemanita y ulexita de Bigadiç (borato de Ca y Na); Depósitos de precios de Sultançayır (tipo Ca); Depósitos de colemanita de Kestelek (tipo Ca); Depósitos de colemanita de Emet (tipo Ca); y depósitos de bórax de Kırka (tipo Na) (Inan et al. 1973; Helvacı et al. 1993, 2017; Helvacı 1995; Helvacı y Orti 1998; 2004; García-Veigas et al. 2011 ; García-Veigas y Helvacı 2013; Orti et al.2016).En Anatolia, la fuente última de boro son las rocas volcánicas calco-alcalinas que se enriquecieron en boro como consecuencia del metásomatismo y la fusión del manto litosférico durante la colisión continental (Ersoy et al. 2010).

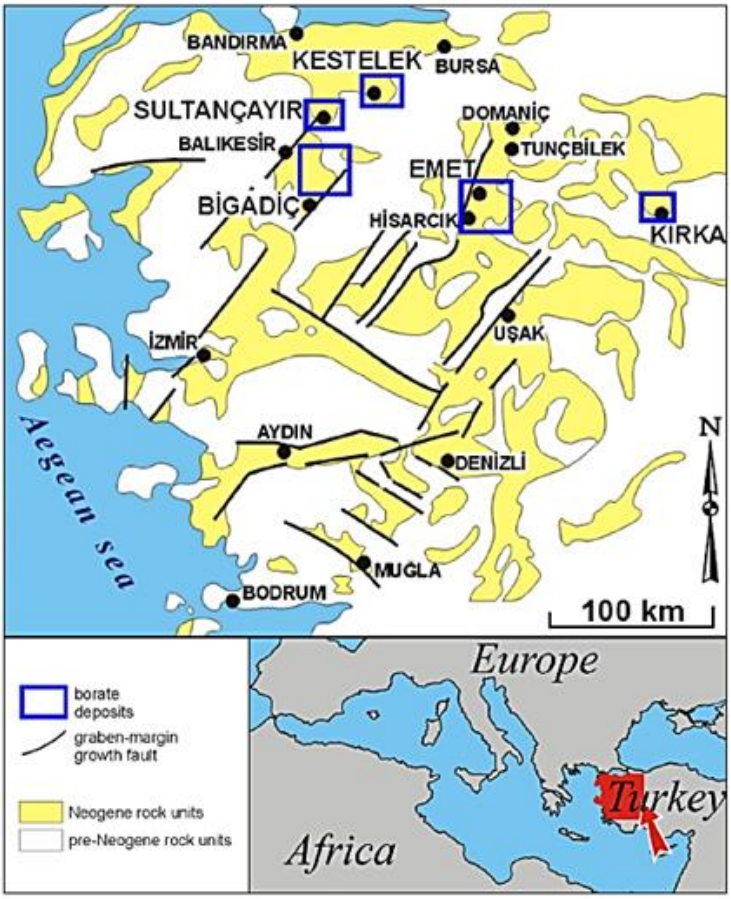


Figura 19. Mapa que muestra los depósitos de borato en el oeste de Anatolia (Turquía). Tomado de Helvacı (2012).

2.3.4.2. 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 morfotectónica del "Basin and Range", un área extensional al nivel del mar (Fig.20). 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 volcaniclástica, 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) (Alonso, 2017).

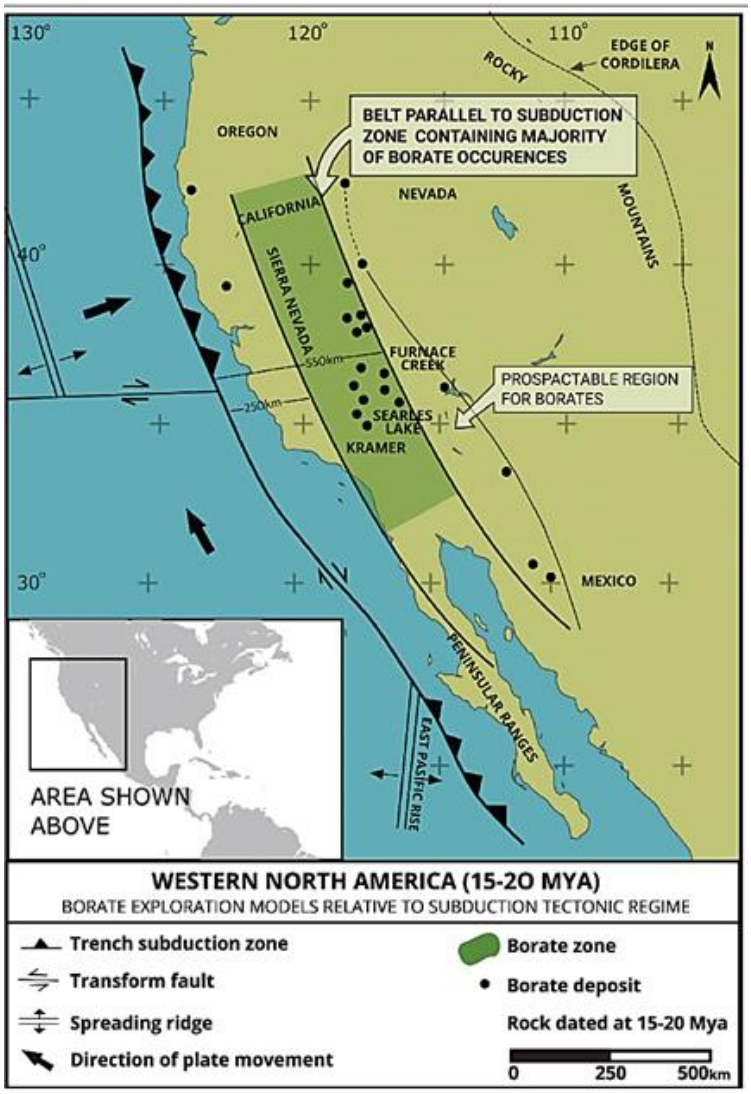


Figura 20. Modelo de exploración de borato relativo al modelo tectónico de subducción para el oeste de América del Norte (15-20 Ma). Tomado de Helvacı (2015).

2.3.4.3. Provincia Boratífera Tibetana.

La provincia boratífera del Tíbet se encuentra 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 (Alonso, 2017).

2.3.4.4. 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 como se observa en la Figura 21. 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) (Alonso, 2017).

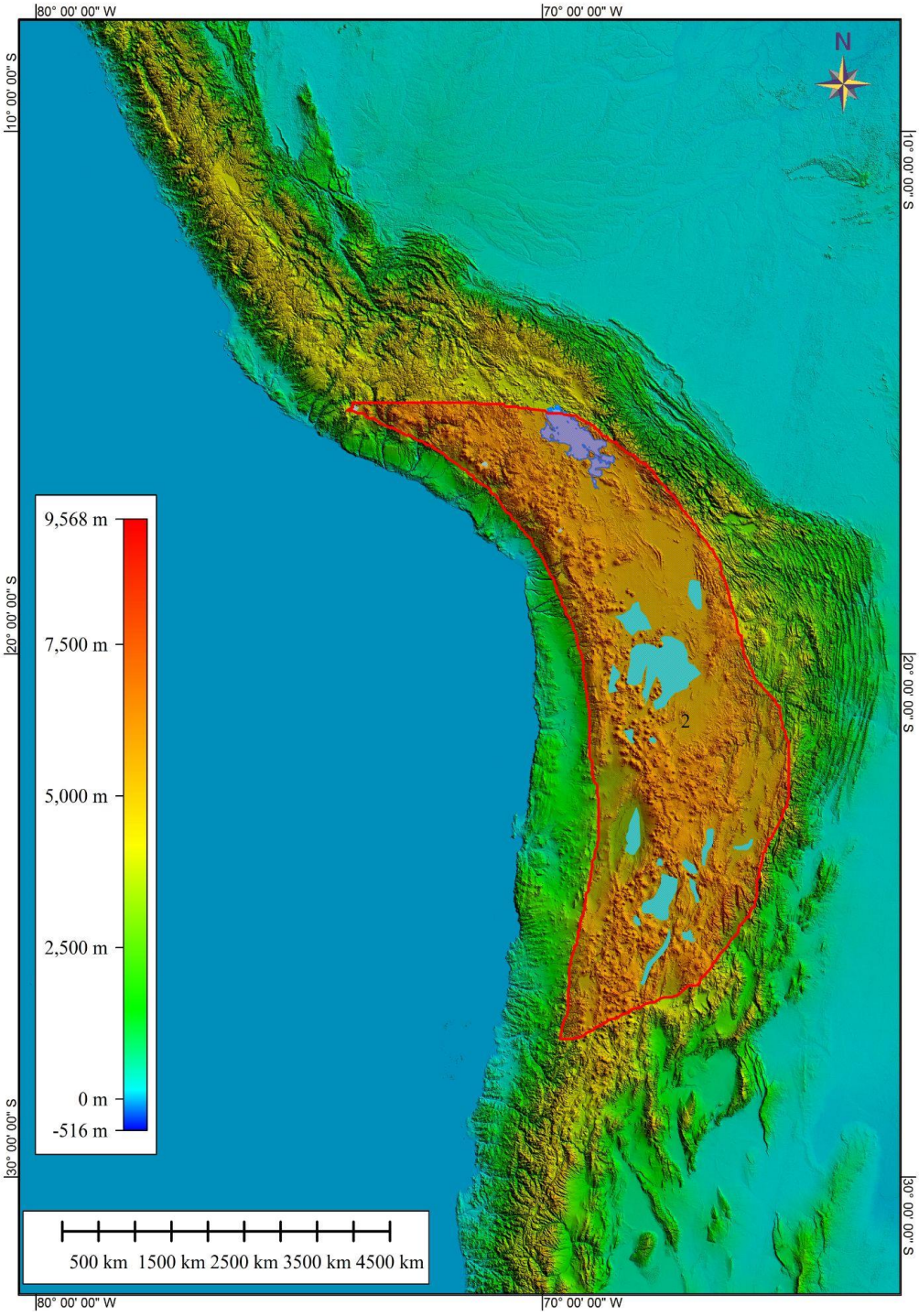


Figura 21. Mapa de elevación de la provincia boratífera centroandina. Adaptado de Helvacı (2015).

2.3.5. Los Yacimientos de Boratos en Sudamérica.

Todas las ocurrencias de boratos descritas en Sudamérica se asignan al Cenozoico con edades que van desde el Mioceno hasta la actualidad, situación que se puede reconocer bien en Argentina, donde hay una mayor cantidad y variedad de estos depósitos. Existen más de 40 depósitos de boratos ubicados a lo largo de una tendencia de 885 km en los Andes altos cerca de las fronteras comunes de Argentina, Bolivia, Chile y Perú, de los cuales más 14 están actualmente en producción. Este es un segmento árido del cinturón tectónico-volcánico andino, caracterizado por tectónica compresional (Fig.22) y muchas cuencas cerradas con playas o salares. La génesis de los yacimientos está estrechamente relacionada a procesos volcánicos que serían los que proporcionan los boratos. Mecanismos de evaporación, en climas áridos a semiáridos, favorecerían los procesos de concentración en cuencas evaporíticas y/o lacustres (Alonso, 2017).

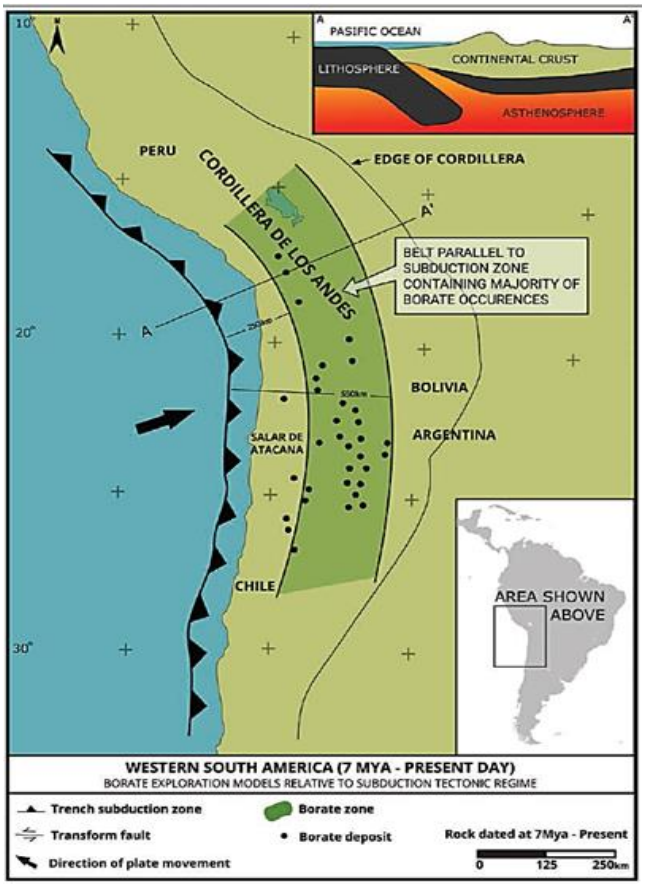


Figura 22. Modelo de exploración de boratos relativo al modelo tectónico de subducción para el oeste de Sudamérica. Tomado de Helvacı (2015).

Las principales regiones con depósitos de borato en los Andes Centrales son de Oeste a Este: Pampa del Thmarugal-Depresión Central (Chile), Cordillera volcánica principal (Perú-Bolivia-Chile-Argentina), Altiplano y Puna (Bolivia-Argentina).Las especies mineralógicas de boratos más importantes en la región son de ulexita, bórax, hidroboracita y colemanita. Los depósitos de hidroboracita son las mayores reservas del mundo, mientras que los otros boratos están subordinados en tamaño a los que se encuentran en Turquía y Estados Unidos, las otras dos principales regiones productoras de boratos (Kistler y Smith 1983; Barker y Lefond 1985; Alonso y Viramonte 1985; Alonso 1986; Sureda et al.1986).

2.3.5.1. Tipos de depósitos de boratos en los Andes.

Los depósitos de boratos están estrechamente asociados con el desarrollo del arco volcánico cenozoico. En los Andes se reconocen tres tipos de depósitos de borato: (1) estratos de boratos intercalados con sedimentos terciarios, (2) boratos depositados dentro de fuentes termales y géiseres, y (3) boratos evaporíticos en salares recientes (playas). En todos los casos, los boratos están intercalados con sedimentos clásticos o químicos. Los tipos 1 y 2 son exclusivos de la Puna y el tipo 3 es la ocurrencia más común en los Andes centrales (Alonso y Viramonte, 1990).

2.3.5.1.1. Estratos de boratos intercalados en rocas terciarias.

Existen tres localidades con depósitos de boratos de valor económico intercalados en rocas del Mioceno Superior: (a) Tincalayu; (b) Sijes y (c) Lorna Blanca. Estos se ubican en el límite oriental de la Puna (Alonso y Viramonte, 1990).

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 Ratones, 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; Alonso, 2017).

b. Sijes: Se ubica en la Puna de Salta, en el interior de la depresión del salar de Pasto 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) (Alonso, 2017).

c. 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). 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 (Alonso, 2017).

2.3.5.1.2. Boratos en fuentes termales y géiseres.

Los estratos de boratos también pueden originarse directamente de fuentes termales y géiseres. Los boratos se pueden encontrar alrededor del respiradero o entrelazados con travertino en la estructura de los depósitos termales. Este tipo de ocurrencia se encuentra solo en la Puna. Los depósitos termales con boratos se

pueden clasificar en dos tipos: géiseres y manantiales (Alonso y Viramonte, 1990).

Los géiseres se caracterizan por una estructura cónica, mientras que los manantiales tienen una estructura tabular. Ambos ocurren a lo largo de pequeños arroyos ubicados en las sierras que rodean los salares. Este tipo de ocurrencia normalmente se conserva bien. Además, también hay depósitos de boratos ubicados en géiseres y manantiales a lo largo de las fallas en el borde de los salares generalmente perturbados por la erosión o sedimentación. Se conocen diecisiete localidades con boratos formados a partir de manantiales termales (Alonso y Viramonte, 1990).

Los depósitos de manantiales de boratos están mejor desarrollados en Sudamérica que en cualquier otro lugar del mundo. La mayoría de los depósitos están asociados con tobas calcáreas, que se presenta como una capa tardía sobre los boratos y, a veces, también con halita y yeso. La actividad volcánica reciente está indicada por flujos basálticos a riolíticos en áreas adyacentes, y se presume una fuente volcánica para los boratos. Los depósitos que se forman actualmente son bastante pequeños, desde unos pocos cientos hasta aproximadamente 9 km de boratos con un promedio de 20% de B_2O_3 (Helvacı, 2015).Casi todas las localidades con manantiales termales se extinguen o muestran solo actividad residual caracterizada por la escasez de aguas salinas, C02 o gas sulfhídrico (Alonso y. Viramonte, 1990).

La ulexita es el principal borato depositado por las fuentes termales, pero comúnmente se encuentra poco bórax. Sólo en una localidad se encontró pinnoita en el géiser de Socacastro (Alonso y Viramonte 1985), el primer descubrimiento de pinnoita primaria en géiseres. Las aguas termales ricas en boro ascienden a la superficie a través de zonas débiles como fallas o límites de discordancia entre rocas Ordovícicas y terciarias. En otros casos, las aguas ascienden directamente a través de rocas del Ordovícico. También hay localidades donde las aguas termales se han desbordado en depósitos aluviales planos. Los lechos de borato están entrelazados

principalmente con travertinos y lodos menores de hierro y manganeso. La región con mayor densidad de géiseres y manantiales de borato es el distrito de Coranzuli en la vertiente oriental del complejo volcánico Coyahuaima. Los géiseres con borato más espectaculares del mundo se encuentran en esta área (Muessig 1966; Alonso y Viramonte, 1990).

2.3.5.1.3. Boratos evaporíticos en salares recientes.

Ésta es la ocurrencia más común de boratos en los Andes. Hay más de 100 salares en Argentina, Chile, Bolivia y Perú, pero solo alrededor de 40 contienen facies de borato en los depósitos químicos y de la cuenca detrítica. Los grabens que contienen salares se formaron por tectónica de bloques durante los tiempos cuaternarios después de la fase diaguita diastrófica (límite Plioceno-Pleistoceno). La concurrencia de la Cordillera con tendencia N-S y cadenas volcánicas ligeramente oblicuas NNW-SSE (Viramonte et al. 1984) causó el sistema cerrado de las cuencas.

Los depósitos de borato en los salares están directamente relacionados con el suministro de aguas termales ricas en boro. En general, los depósitos ocurren in situ alrededor de los respiraderos de las aguas termales. Otros suministros de boro y sal provienen de la meteorización y la lixiviación de rocas volcánicas, así como de elementos absorbidos en ceniza volcánica fresca. Esta fuente de elementos probablemente contribuyó a la sobresaturación de las salmueras en los salares.

Por lo general, los depósitos de travertino indican las ubicaciones anteriores de antiguas fuentes termales. Las aguas calientes ascienden a lo largo de los límites de los graben y luego se evaporan y precipitan, formando minerales. El tamaño y la forma de los depósitos de borato están directamente relacionados con el lago original donde se formaron (Fig.23). Es posible ver en algunos salares una zonificación lateral bruta desde travertinos hasta diferentes tipos de ulexita (Alonso y Gutiérrez 1984). La zonificación de las evapofacies en los salares andinos no está clara. Sin embargo, los

boratos se ubican entre las facies laterales de yeso y sal. Los travertinos se encuentran generalmente a lo largo de los bordes de las cuencas. Una distribución generalizada de facies desde el borde hasta el centro de una cuenca es travertino, yeso, borato y halita.Un tipo especial de depósitos de borato es la Pampa del Tamarugal, donde la ulexita está presente junto con los nitratos.

El mineral dominante en los salares es la ulexita y el bórax en menor proporción. La ulexita se presenta en dos tipos: nódulos, la clásica "bola de algodón" llamada "papas", y macizos llamados "barras" por los mineros de la región. El bórax se encuentra en evapocristales euédricos. Además, la inyoita se ha encontrado sólo en dos lugares, Laguna Salinas en Perú (Muessig 1986) y Lagunita (Argentina) (Alonso y Viramonte, 1990).

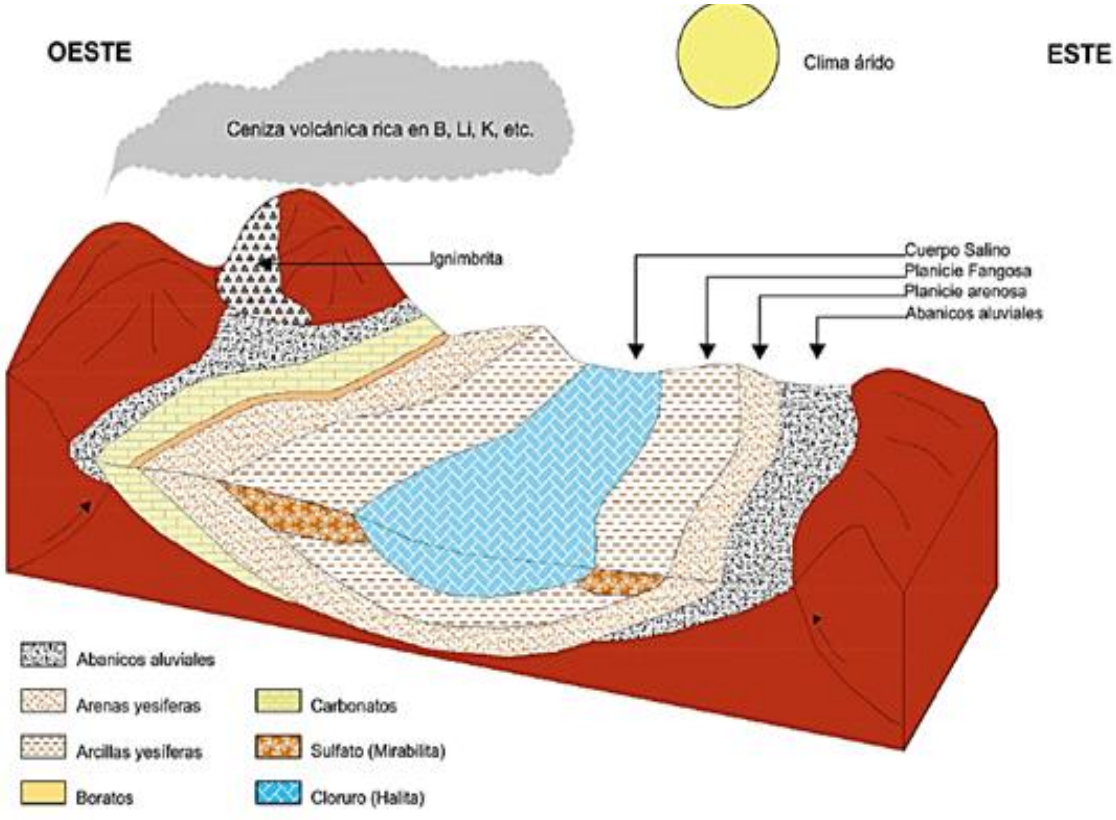


Figura 23. Modelo de una cuenca volcano-tectónica de la Puna y su relleno clástico y evaporítico conformando un depocentro salino. Tomado de Alonso (2017).

2.3.5.2. Subprovincias boratíferas.

En la Provincia Boratífera Centroandina es posible distinguir divisiones en función de la distribución, origen, edades, entorno estructural, mineralogía, etc. Con base en estos criterios, Alonso y Viramonte (1985) han diferenciado y considerado como subprovincias portadoras de borato tres regiones como se puede observar en la Figura 24. Son: Pampa del Th. Marugal, Altoandina y Puna Oriental. Las subprovincias antes mencionadas engloban las siguientes regiones geográficas: Puna Argentina, Altiplano boliviano-peruano, depresión preandina de Atacama-Punta (Alonso y Viramonte, 1990).

2.3.5.2.1. Subprovincia Pampa del Tamarugal Borato.

Esta subprovincia es una cuenca larga y estrecha entre la Cordillera de la Costa en el oeste y la Cordillera de Domeyko en el este. Es aproximadamente coincidente con la famosa provincia salitrera y se extiende desde lquique en el norte hasta Tal-tal en el sur. El principal mineral de borato es la ulexita, que se presenta en pequeños nódulos de 1 mm a 2 cm de largo, así como en lentes pequeños.

2.3.5.2.2. Subprovincia Altoandina de Borato.

Esta es la región más extensa con boratos en los Andes Centrales. Esta subprovincia contiene los salares portadores de boratos ubicados en el Altiplano Peruano-Boliviano, Cuenca de Atacama, Cordillera volcánica principal y Puna, así como los depósitos de boratos relacionados con géiseres y otras fuentes termales. El principal mineral de borato es la ulexita, que se encuentra en la parte superior de los empastes de la cuenca, aparece en nódulos que crecen en el lodo o lentes o lechos masivos.

Los estratos que contienen ulexita tienen menos de 1,5 m de espesor. Otro borato es el bórax o tincal, que se encuentra en los evapocristales en el lodo, como los salares Cauchari, Rincón y Turi Lari en Argentina y el Salar de Carcote en Chile. Todos los depósitos de borato en los salares son el resultado de la actividad de las aguas termales en la cuenca (Alonso y Viramonte, 1990).

2.3.5.2.3. Subprovincia de Borato de la Puna Oriental

Esta subprovincia incluye los depósitos de boratos "fósiles" de la Puna Argentina. En comparación con las otras subprovincias antes mencionadas, es la más pequeña en tamaño, pero la más importante desde el punto de vista económico por su alta concentración de boratos. Está ubicado en el límite oriental de la Puna y está formado por rocas del Terciario que incluyen boratos estratificados. Esta subprovincia tiene 300 km de largo, pero dado que los depósitos de boratos normalmente están enterrados, su límite puede verse modificado por futuros descubrimientos. Todos los depósitos de boratos del Terciario en la Puna son del Mioceno tardío y sus edades radiométricas se agrupan cerca de 6 ± 1 m.a. antes del presente. Los principales depósitos de la subprovincia son Tincalayu (bórax-kernita). Sijes (varios depósitos con hidroboracita, colemanita, inyoita y ulexita) y Loma Blanca (bórax, inyoita y ulexita) (Alonso y Viramonte, 1990).

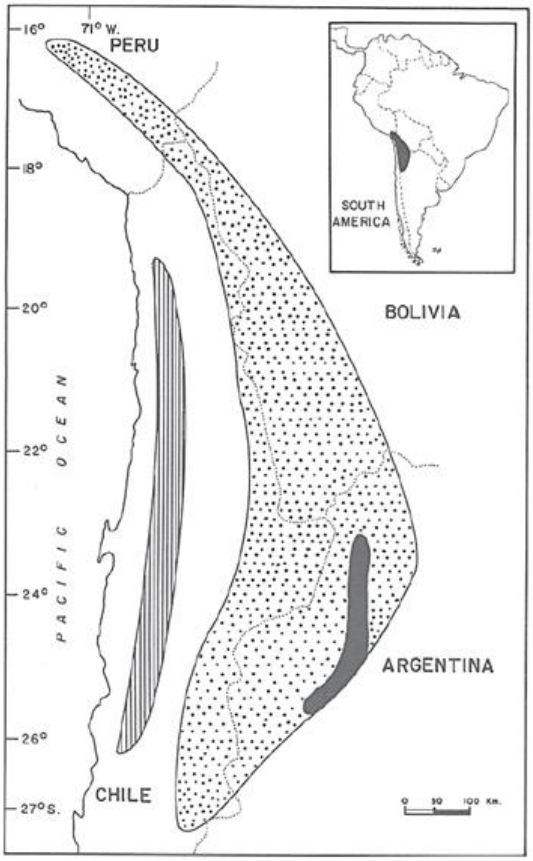


Figura 24. Mapa que muestra la forma y el tamaño de las subprovincias que contienen borato. De oeste a este son: Pampa del Tamarugal (líneas

verticales), Altoandina (puntos), Puna Oriental (zona negra). Tomado de Alonso y Viramonte (1990).

2.3.6. Mineralogía de los boratos más comunes en Sudamérica.

2.3.6.1. Mineralogía de los boratos.

Los minerales de boratos más comunes en Sudamérica son:

2.3.6.1.1. Inyoita.

Figura 25. Mineral Inyoita. Tomado de Terán, J. (Micromineral Virtualis museum).

a) Formula Química: $CaB_3O_3(OH)_5 \cdot 4H_2O$
b) Sistema Cristalino: Monoclínico.
c) Propiedades Fisicas Ópticas:
   - Raya: Blanca.
   - Color: Blanco, Incoloro, Rosado.
   - Transparencia: Transparente A Translúcido.
   - Brillo: Vítreo.

2.3.6.1.2. Ulexita.

Figura 26. Mineral Ulexita. Tomado de (Betts, J. H., 2003.) Mindat.org.

a) Formula Química: $NaCa\,[B_5O_6(OH)_6\,] \bullet 5H_2O$
b) Sistema Cristalino: Triclínico.
c) Propiedades Físicas Ópticas:
   - Lustre: Vítreo, Sedoso.
   - Color: Incoloro, blanco, gris con arcillas incluidas.
   - Dureza: 2½
   - Gravedad Específica: 1.955

2.3.6.1.3. Colemanita.

Figura 27. Mineral Colemanita. Tomado de (Rock Currier, 2009)Mindat.org.

a) Formula Química: $Ca [B_3O_4 (OH)_3] \cdot H_2O$
b) Sistema Cristalino: Monoclínico.
c) Propiedades Físicas Ópticas:
   - Lustre: Adamantino, Vítreo.
   - Color: Incoloro, blanco, amarillento, gris; incoloro a la luz transitada
   - Dureza: 4½
   - Gravedad Específica: 2.423

2.3.6.1.4. Hidroboracita .

Figura 28. Mineral Hidroboracita. Tomado de (Cisneros, E. y Cisneros, S., 2021) Mindat.org.

a) Formula Química: $CaMg\ [\ B_3O_4(OH)_3\ ]_2 \bullet 3H_2O$
b) Sistema Cristalino: Monoclínico.
c) Propiedades Físicas Ópticas:
   - Lustre: Vítreo, Sedoso.
   - Color: Incoloro, blanco
   - Dureza: 2

2.3.6.1.5. Borax.

Figura 29. Mineral Borax. Tomado de (Rock Currier, 2009)Mindat.org.

a) Formula Química: $Na_2(B_4O_5)(OH)_4 \cdot 8H_2O$
b) Sistema Cristalino: Monoclínico.
c) Propiedades Físicas Ópticas:
   - Lustre: Vítreo, Resinoso, Terroso.
   - Color: Incoloro, gris, blanco, amarillento, rara vez azulado o verdoso; incoloro a la luz transmitida.
   - Dureza: 2-2½
   - Gravedad Específica: 1.715

2.4. Depositos de Boratos en el Sur del Perú

En el Perú los depósitos de boratos son de edad cuaternaria y se encuentran ubicados en el sur del país. La ocurrencia o presencia de boratos fueron reportados en varios trabajos de los cuales se menciona cinco zonas: **Laguna Salinas, Geiser boratífero activo de Chilicollpa, Laguna Blanca, Laguna Parinacochas y Laguna Loriscota**, de los cuales solo la Laguna Salinas tiene valor económico.

El yacimiento de la Laguna Salinas se encuentra ubicado en la provincia de Arequipa, entre los distritos de Chiguata y San Juan de Tarucani. Es una cuenca endorreica, tanto las sales como el bórax se depositan por la lixiviación de las rocas circundantes; su origen está relacionado a la actividad volcánica plio-pleistocenica (Iban, 2018). Presenta una capa superficial de color blanco, a manera de costra, de unos pocos centímetros de espesor (1 a 2 cm), compuestos principalmente por sales y boratos.

El segundo depósito más importante es el Geiser boratifero activo de Chilicollpa, el cual se encuentra ubicado entre el límite de Puno y Tacna, tiene una extensión de 3 x 0.50 Km. La interpretación de la génesis de los boratos es por precipitación a partir de aguas calientes de géiseres o fuentes termales.

El tercer depósito es conocido como Laguna Blanca, es un salar ubicado en el límite internacional entre Chile y Perú, dentro del llamado Altiplano andino. Ocupa una superficie de 19,5 km². Se caracteriza por el contenido de boratos, magnesio, potasio y litio, tales minerales se encuentran formando una costra en toda la superficie de la laguna, la cual se seca por completo después de la temporada de lluvias.

La cuarta zona es la Laguna Parinacochas se encuentra ubicado en el departamento de Ayacucho, al pie del volcán Sara Sara; es un lago andino peruano.

El último lugar es Laguna Loriscota se encuentra en el departamento de Puno, provincia del Collao, distrito de Santa Rosa; es una laguna salada, la cual tiene un área de 33 km². Se puede encontrar la presencia de arsénico (As) en el agua, la cual puede ser de origen natural, resultado de la disolución del mineral presente en el suelo por donde fluye el agua.

El As se presenta principalmente en forma de sulfuros. La presencia de Boro (B) se encuentra limitado a localidades y es muy soluble en el agua.

2.5. Aprovechamiento de Boratos

Los boratos son un recurso estratégico, dado su rareza, y su asociación química con elementos como el litio, potasio y magnesio entre otros (Fornillo, Coord., 2015, pág. 184). Además, junto a las tierras raras, los boratos son integrantes de los imanes permanentes utilizados en la industria automotriz eléctrica (García, H., 2021).

2.5.1. Industria del Vidrio.

La utilización del boro en forma de borosilicato, como componente para reducir el coeficiente de dilatación del vidrio, permite la elaboración de vidrios resistentes a altas temperaturas. Por otro lado, la adición de borosilicatos a los vidrios, es su aporte a la dureza, el cual logra mejorar esta característica hasta un 300% más duro que el vidrio común, como Pyrex).

Otra aplicación es el bórax pentahidratado, componente fundamental para la elaboración de fibra de vidrio, material aislante, el cual aporta flexibilidad y resistencia. Añadido a plásticos les brinda resistencia y su uso es extendido desde electrodomésticos hasta elementos de ocio (Rincón, J., 2006).

2.5.2. Industria Metalúrgica.

Los boratos se utilizan en la producción de acero y metales no ferrosos, aleaciones, imanes de tierras raras, metales amorfos, fundentes de soldadura y compuestos de revestimiento metálico.

2.5.3. Industria militar y Energética.

Sus propiedades físicas como la baja densidad, la dureza alta, el elevado punto de fusión y la resistencia a la tensión cuando está en forma de filamentos, que al utilizarse como agregado en materiales como epoxi, resulta un compuesto más fuerte que el acero y un 25% más ligero que el aluminio, por lo que su uso en misiles y tecnología

de cohetes es común, además se emplea en el sistema de contención, protección y de mantenimiento para centrales nucleares (Subsecretaría de Minería de la Nación, Argentina).

2.5.4. Añadido para esmaltes y porcelanas.

Para mejorar el brillo y la dureza de porcelanatos como inodoros, lavatorios, cerámicos, se utiliza ácido bórico (Subsecretaría de Minería de la Nación, Argentina).

2.5.5. En limpieza y perfumería.

Como principal agente de limpieza es el perborato de sodio que se utiliza como lejía, agente de oxígeno activo y blanqueador, comúnmente utilizado en Europa, pero recientemente se utiliza como detergente integral en EEUU en reemplazo al cloro (Subsecretaría de Minería de la Nación, Argentina).

2.5.6. Agricultura.

El boro es un micronutriente esencial para el desarrollo eficiente de las plantas, si bien su uso, debe ser en pequeñas cantidades, su producción siempre es deficiente (Subsecretaría de Minería de la Nación, Argentina).

2.5.7. Anticongelante.

Si bien el agua con el etilenglicol, es un buen refrigerante, el aditivo común es el bórax decahidratado, el cual aporta para evitar la corrosión de las partes metálicas del motor, que contrarresta el ácido que se forma la descomponerse el anticongelante.

CAPITULO III

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1. Diseño y Tipo de Investigación

3.1.1. Enfoque.

La presente investigación es de carácter mixto, ya que se utilizarán datos cualitativos, tales como, las características geológicas en base a información bibliográfica; y a su vez se utilizarán también datos cuantitativos, que dan valores numéricos, tales como, análisis geoquímico basado en la información de valores de litio, arsénico y estroncio en ppm, y dataciones radiométricas.

3.1.2. Alcance.

La presente investigación es de carácter explicativa, porque se analizarán las razones por las cuales se generan yacimientos boratiferos y las áreas en las que se puedan presentar sus ocurrencias.

3.1.3. Diseño.

Es de carácter no experimental, puesto que, no se manipulan las variables, y de diseño transversal, pues, los datos se toman en un punto determinado de tiempo.

3.2. Población del Estudio

Es importante establecer la población de manera específica y basada en los objetivos del estudio.

La población del presente estudio está formada por todas las formaciones ubicadas en la zona de estudio con potencial de prospección por boratos, esto según las siguientes características:

I. Edades del Mioceno-Cuaternario
II. Estratificación propia de un ambiente lacustre
III. Cercanas a fuentes termales
IV. Cercanas a cinturones volcánicos

3.2.1. Tipo de Muestreo.

En el presente estudio se realizará un muestreo de carácter “no probabilístico”, dado que la elección de los elementos no será basada en fórmulas de probabilidad, sino que dependerán del proceso de toma de decisiones del investigador (causas relacionadas con los propósitos y características de la investigación). Este muestreo es propio de estudios que pretenden generar datos e hipótesis que constituyan la materia prima para investigaciones más precisas como es el caso del presente estudio.

3.3. Metodología Propuesta

3.3.1. Etapa I:

3.3.1.1. Investigación y recopilación de información.

La recopilación de información se realizó a través de buscadores académicos tales como; ResearchGate, Google Scholar, Science Direct y Scielo, para obtener información.

La recopilación bibliográfica se realizó primero a nivel regional, es decir en materia de Boratos en Sudamérica, con respecto a ello se encontraron múltiples estudios de Boratos en la región pertenecientes a Argentina en mayor medida y a Chile, dado el desarrollo de la industria Boratífera en esos países. En cuanto a estudios generales

se utilizó el realizado por Alonso (2016) “Guías de prospección de boratos y evaporitas neógenas en los andes centrales”, estudio que fue presentado en el XI Congreso Argentino de Geólogos Economistas. Además al ser un estudio recopilatorio fue una gran fuente de información, pues también se utilizaron algunos estudios allí citados tales como; Watanebe(1964), Aristarain y Hurlbut(1972), Helvaci(2019), Aristarain(1992) y Ersoy et al (2010). Todo ello en materia de boratos a nivel mundial.

Por otra parte, la cantidad información de investigaciones en materia de prospección de boratos en el Perú es escasa, pues se tiene solo un estudio del tema, el cual fue realizado por Alonso (2016) “Prospección de boratos neógenos en el sur de Perú”, dicho estudio fue obtenido de Researchgate, que también fue presentado en el XI Congreso Argentino de Geólogos Economistas.

3.3.1.2. Revisión de los estudios anteriormente efectuados.

Los estudios anteriormente mencionados fueron seleccionados dados sus autores y su procedencia.

En cuanto a los estudios de “Guías de prospección de boratos y evaporitas neógenas en los andes centrales” y “Prospección de boratos neógenos en el sur de Perú” ambos realizadas por Alonso, presentan un grado de confiabilidad alta dado que ambos fueron publicados en el XI Congreso Argentino de Geólogos Economistas, son relativamente actuales, además de la reputación y reconocimiento del autor en materia de Boratos con una amplia trayectoria y una gran cantidad de investigaciones en el tema.

En cuanto a los estudios generales de autores reconocidos tales como Aristarain, Helvaci, Hulburt y Watanebe, J.K. Warren y Viramonte, con alta importancia en materia de boratos, además de que fueron obtenidos de congresos y journals tales como, Springer y/o Science Direct revistas de investigación con alto grado de confiabilidad dada la revisión por pares de sus artículos.

3.3.1.3. Elaboración de un marco teórico se considera la génesis de los yacimientos boratiferos y algunas claves para la prospección geológica.

La elaboración del marco teórico se realizó abordando primero los temas generales tales como la génesis, modelo y edad de los boratos, continuando con los yacimientos de Boratos a nivel mundial, a nivel de Sudamérica y a nivel del Perú, finalizando con el tema a tratar en el presente estudio, la prospección de boratos en el Perú. Se presentan a continuación la distribución del marco teórico y las fuentes de las cuales se utilizó información.

Génesis de los yacimientos de boratos: En el siguiente tema se utilizó información proveniente de: “Guías de prospección de boratos y evaporitas neógenas en los andes centrales” (Alonso, 2016); “Boron and borates” (Kistler y Helvaci, 1994); “Turkish Borate Deposits: Geological Setting, Genesis and Overview of the Deposits”(Helvaci, 2019); “Ocurrencia, posición estratigráfica y génesis de los depósitos de boratos de la Puna Argentina”(Alonso, 1986).

Modelo de formación de boratos: En el presente tema se utilizó información proveniente de “Guías de prospección de boratos y evaporitas neógenas en los andes centrales” realizado por Alonso en 2016.

Edad de los yacimientos de boratos: En el siguiente tema se utilizó información proveniente de “Guías de prospección de boratos y evaporitas neógenas en los andes centrales” realizado por Alonso en 2016.

Yacimientos de Boratos en el mundo: En el presente tema se utilizó información proveniente de; “Guías de prospección de boratos y evaporitas neógenas en los andes centrales” (Alonso, 2016); Non-Potash Salts: Borates, Na-Sulphates, Na-Carbonate, Lithium Salts, Gypsum, Halite and Zolites (J.K. Warren, 2016); “Tectonostratigraphic evolution of the NE-SW trending superimposed Selendi basin: Implications or late Cenozoic crustal extension in Western Anatolia, Turkey” (Ersoy et al, 2010).

Yacimientos de Boratos en Sudamérica: En el siguiente tema se utilizó información proveniente de “Guías de prospección de boratos y evaporitas neógenas en los andes centrales” realizado por Alonso en 2016 y de “Provincia Boratífera Centroadina” y “Borate Deposits in the Andes” realizados por Alonso y Viramonte en 1985 y 1990 respectivamente.

Yacimientos de Boratos en el Perú: En el presente tema se utilizó información principalmente proveniente de “Prospección de boratos neógenos en el sur del Perú” realizado por Alonso en 2016.

Prospección de Boratos en el Perú: En el siguiente tema se utilizó información principalmente proveniente de “Prospección de boratos neógenos en el sur del Perú” realizado por Alonso en 2016.

3.3.1.4. Revisión de la Base de datos del INGEMMET con información relacionada a la Geología, Geocronología y Geoquímica.

El INGEMMET posee una Base de Datos con bastante información geológica del Perú. La base de datos conocida como metadatos está publicada de manera gratuita en la plataforma del Geocatmin.

La base de datos de geocronología preparada para el territorio peruano está constituida por resultados de diversos métodos analíticos, p. ej. Rb-Sr, K-Ar, Ar-Ar, U-Pb, Re-Os y C14, publicados en diferentes trabajos de investigación. La tabla de atributos está conformada por campos específicos en donde están insertados la mayor cantidad de información posible: Edad_Ma, Error_Ma, coordenadas geográficas (XX, YY), Emplazamiento, Método, Material, Tipo_roca, Unidad, Depósito Mineral_Ocurrencia, Muestra (Código de muestra), referencia (el nombre del autor y el año de publicación) (INGEMMET). De esta base de datos se extraerá información del mioceno medio al cuaternario, debido a que en esta época ocurrieron los primeros pulsos formadores de boratos en el sur del Perú.

La base de datos de Carta Geológica Nacional está conformada por 501 mapas a escala 1:100,000 que cubren todo el territorio peruano. Los mapas geológicos que conforman la actualización de la Carta

Geológica Nacional a escala 1:50000 se encuentran en procesos de estandarización digital y revisión. De esta base de datos emplearemos los estudios geológicos, en el que se describe la geomorfología, estratigrafía, tectónica, geología económica, geología histórica de las regiones estudiadas, secciones estratigráficas, resultados de análisis de laboratorio y la bibliografía de referencia, para darle solidez científica y técnica a la investigación.

La base de datos histórica de resultados químicos, correspondiente a muestras de sedimentos, suelos y relaves, se presentan en 32 bases de datos excel verificados y validados, que contiene información histórica de resultados químicos de 28 185 muestras de sedimentos de quebradas, 805 muestras de suelos y 166 muestras de relaves, recolectadas a lo largo del territorio peruano, desde el 2000 al 2019; correspondiente a los proyectos del Programa de Prospección Geoquímica (INGEMMET). En estas bases de datos, se complementaron información relacionado a la hoja geológica, franja metalogenética, código estándar, nombre y año del proyecto, boletín y año de publicación. Esta información comprende las abundancias geoquímicas de los elementos mayores y principales elementos trazas. Según el INGEMMET, para el estudio geoquímico de sedimentos, se basó en un muestreo sistemático con una densidad de 1 muestra por cada 10 km2 de área de influencia; recolectándose sedimentos a malla 30 mesh y priorizándose los drenajes de primer y segundo orden. El estudio geoquímico nacional de suelos, empleó un muestreo geoquímico sistemático en suelos superficiales (0-20 cm) y profundos (100-150 cm); cuya densidad de muestreo es de 1 muestra por cada 6 400 km2 aproximadamente. En tanto que, para el estudio geoquímico multipropósito de suelos se empleó un diseño sistemático; para suelos superficiales el diseño de muestreo fue de 1 muestra por cada 1 km2; y para suelos profundos 1 muestra por cada 4 km2. De esta base de datos, extraeremos información geoquímica de los elementos asociados al Boro.

3.3.2. Etapa II:

3.3.2.1. Procesamiento de la información.

La información recolectada en la etapa 1 es procesada para los fines de esta investigación. Geológicamente, se debe discriminar formaciones del mioceno al cuaternario, estas formaciones deben ser sedimentarias y de ambiente lacustre, posteriormente delimitar dichas formaciones y registrar estos datos en un mapa donde se incorporará registros geocronológicos, registros geoquímicos y registros de fuentes termales sobre estas formaciones. La presencia de elementos como Litio, Estroncio y Arsénico en sedimentos y fuentes termales relacionadas con los datos geocronológicos, indican una relación muy estrecha con la formación de boratos. Esto lo enriquecemos con los datos de centros volcánicos cercanos a estas formaciones debido a que son la fuente que produjo los pulsos necesarios para la precipitación de boro en sedimentos de edad miocena media a cuaternaria. Con estos pasos determinamos puntos importantes para la prospección de boratos a escala regional.

3.3.2.2. Elaboración de mapas finales.

Mediante el uso de imágenes satelitales y teniendo en cuenta la geología regional, se elaborará mapas de ubicación de cuencas sedimentarias lacustres de edad Neógeno - Cuaternario con posibles ocurrencias de boro. mapas de localización de centros volcánicos relacionado a la presencia de arcos volcánicos y su relación con estas cuencas, posteriormente se elaborará un mapa de dataciones radiométricas a fin de ubicar cuencas lacustres de edad cenozoica, también se elaborará mapa geoquímicos de elementos asociados al boro, localizar las fuentes termales mapeadas en estudios anteriores y con toda la información procesada, se generará una base de información que sirva de guía para la prospección de boratos en el sur del Perú. La información empleada es de acceso libre proporcionada por el Instituto Geológico Geofísico y Metalúrgico del Perú en sus

diferentes boletines y metadatos publicados en su plataforma del GEOCATMIN.

3.3.2.3. Análisis e interpretación de los resultados.

Los resultados serán evidenciados en esta investigación mediante la identificación de formaciones terciarias altamente prospectables para la identificación de boratos en los departamentos del sur del Perú como Tacna, Moquegua, Arequipa, Puno, Apurímac y Ayacucho, como la Formación Maure y Formación Callipune. La interpretación será evidenciada mostrando los puntos claves para realizar una prospección de boratos a escala regional, esta información será de base para futuros estudios a escala local.

CAPÍTULO IV

OCURRENCIA DE BORATOS EN EL SUR DEL PERU

4.1. Los yacimientos de Boratos en el Perú

Los depósitos de boratos se encuentran repartidos en el sur del Perú relacionados a la faja volcánica del Terciario Superior- Cuaternario (Plio-Pleistoceno), en alturas comprendidas entre 4000 y 4500 m.s.n.m (Alonso, 2017). El presente trabajo considera que hay dos tipos principales de yacimientos de boratos:

a) boratos en rocas neógenas y b) boratos en salares.

4.1.1. Yacimientos Terciarios (boratos en rocas neógenas).

En el Perú, los yacimientos de borato conocidos son del periodo cuaternario, hasta la fecha, no se han reportado ni descubierto yacimientos terciarios similares a los que hay en Argentina, con capas de boratos intercaladas en rocas miocenas, pero si hay un interés en prospectar las formaciones terciarias del sur del Perú para el descubrimiento de yacimientos de este período.

En el sur del Perú, el Neógeno de intra-arco, especialmente el Grupo Maure, tiene potencialidad.

4.1.2. Yacimientos Cuaternarios.

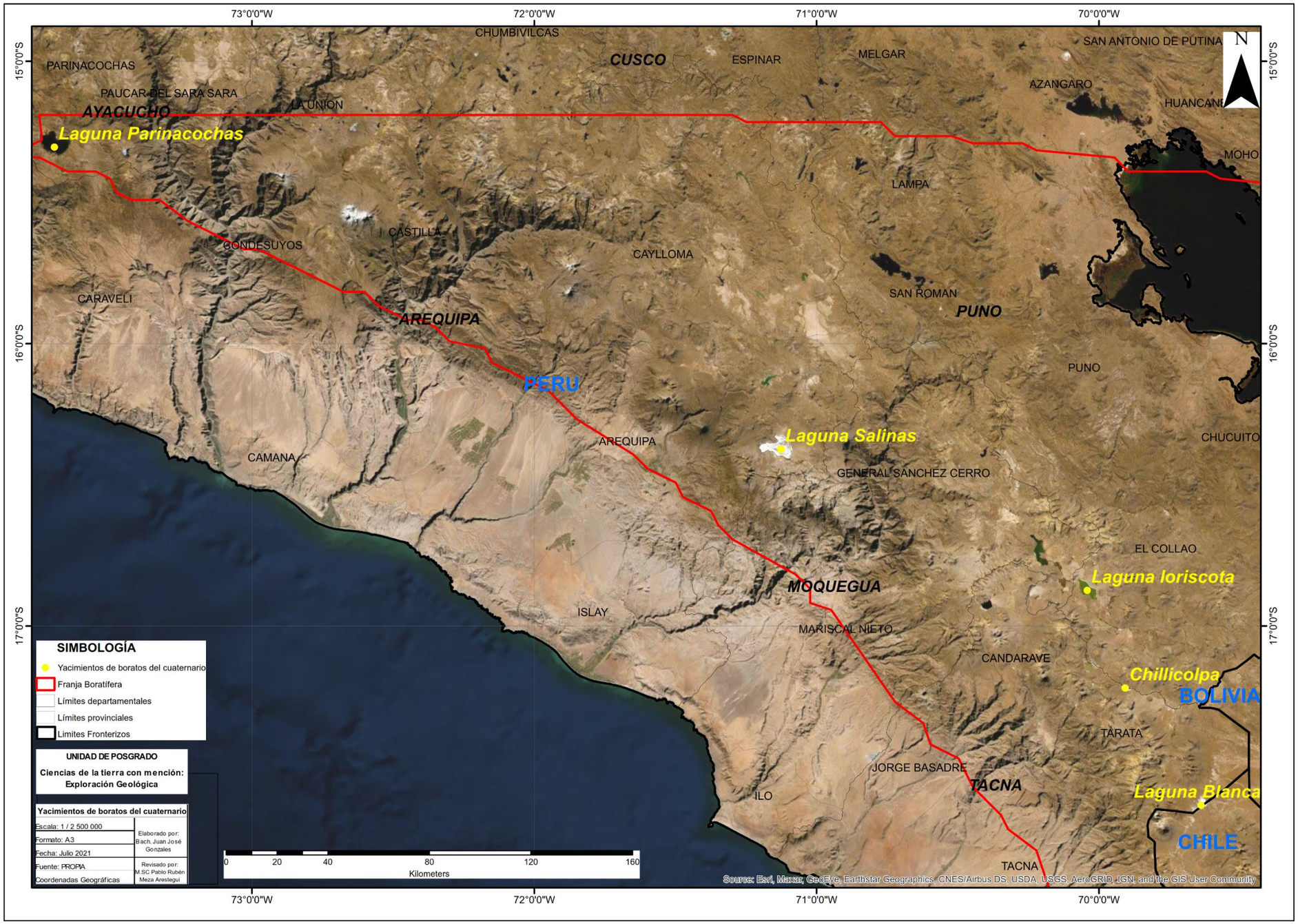


Figura 30. Yacimientos de boratos del cuaternario en el Perú. Con base en imagen satelital de Bing Maps (GEOCATMIN).

4.1.2.1. Laguna Salinas.

La Laguna Salinas se encuentra en la provincia de Arequipa, entre los distritos de Chiguata y San Juan de Tarucani, a 50 km al noreste de la ciudad de Arequipa; como punto de referencia damos las coordenadas UTM WGS 8189461N y 271725E. La principal vía de acceso es la carretera afirmada Arequipa-Puno.

Es una cuenca endorreica, que se formó hace aproximadamente unos 10 000 años mediante evaporación que permitió la acumulación de sales (Díaz y Ramirez, 2009). Se encuentra rodeada por aparatos volcánicos y sus productos; tiene hacia el este, a unos 20 km, el volcán Ubinas, que actualmente se encuentra en actividad. En un ambiente árido, que favorece la rápida evaporación de las aguas, se acumula en la superficie de la laguna abundante cloruro de sodio y boratos (Imagen 1). La ulexita se encuentra formando capas discontinuas (masivo) o lenticulares (nódulos) a 1,5 m de profundidad, tal como se puede apreciar en la Imagen 2, con leyes de B2O3 que varían entre 34% y 36%. Se encuentran separadas por niveles arenosos impregnados con boratos de espesores variables, cubierto por capas de arenas y arcillas. Hacia el lado este y sur de la laguna es donde se encuentra la mayor concentración de boratos.

Imagen 1. Vista del lado oeste de la Laguna Salinas. Obsérvese las sales (Halita, Tenardita) sobre la superficie.

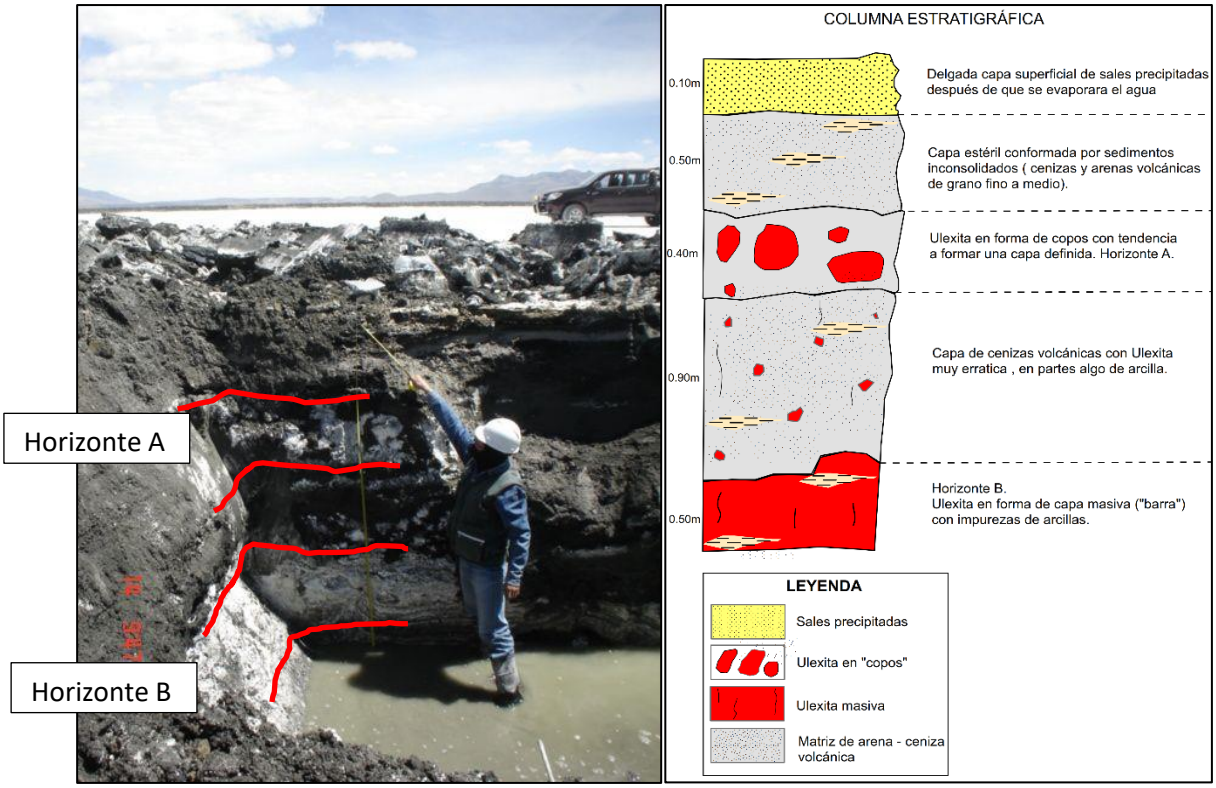


Imagen 2. Mineralización de Ulexita visto en un pozo de exploración. Horizonte A: Ulexita en forma de copos (diseminado). Horizonte B: Ulexita en barra (Mineralización masiva).

4.1.2.2. Géiser boratífero activo de Chillicolpa.

Se ubica entre el límite de Puno y Tacna, Es el segundo depósito más importante de boratos en el Perú, que tiene una extensión de 3 x 0.50 Km (Imagen 3). Es la interpretación de la génesis de los boratos por precipitación a partir de aguas calientes de géiseres o fuentes termales. Según los análisis de laboratorio realizado indican:

Muestra cruda: B2 O3 = 16.20 %

Muestra calcinada: B2 O3 = 54.60 %

La fuente de aguas termales caliente puede llegar hasta 50 mg/ lt de B2 O3, los boratos se han formado como producto de la intensa actividad termal relacionado con el vulcanismo, las soluciones boratados son directamente acezadas a una laguna de precipitación donde se tiene la formación de ulexita, tiene una costra de 0.50 a 1.00 mts de espesor con un contenido promedio de 30% de ulexita (Eugenio, s.f.).

Imagen 3. Deposito superficial de Boratos (Ulexita. Vista tomada del Google Earth.

4.1.2.3. Laguna Blanca.

Laguna Blanca es un salar ubicado en el límite internacional entre Chile y Perú, dentro del llamado Altiplano andino (Imagen 4). Ocupa una superficie de 19,5 km², de los cuales dos terceras partes del salar se encuentran en el lado peruano Departamento de Tacna y un tercio en la chilena Región de Arica y Parinacota. Con una orientación suroeste-noreste y de forma irregular, el salar se eleva a una altura de 4 253 m sobre el nivel del mar.

Litológicamente, el salar Laguna Blanca está rodeada de coladas de lavas andesíticas de los volcanes del Cuaternario. Se caracteriza por el contenido de boratos, magnesio, potasio y litio. Sin embargo, en la visita realizada al salar no se pudo verificar la existencia de boratos (Imagen 5).

Imagen 4. Vista panorámica del salar de Laguna Blanca.

Imagen 5. Realización de una calicata. Macroscópicamente no se identificó boratos.

4.1.2.4. Laguna Parinacochas.

Parinacochas o Parihuanacochas es un lago andino peruano, situado en el departamento de Ayacucho, presenta unas dimensiones de 12,8 kilómetros de largo por 10,1 kilómetros de ancho y una superficie de 75,5 kilómetros cuadrados (km^2), siendo unos de los mayores del país. Se encuentra al pie del volcán Sara Sara (Imagen 6). En esta laguna se ha reportado la presencia de boro, pero aún hay una ausencia de estudios sobre boratos en esta zona.

Imagen 6. Vista de la Laguna Parinacochas al fondo el Volcán Sara Sara y en primer plano las parihuanas que habitan en lagos salados

También se han reportado presencia de boratos en lugares como, Laguna Lascacocha en la provincia de Chuchuito (Puno), en San Hilarión y Santa Marta en la provincia de Mariscal Nieto (Moquegua), pero solo han sido mencionadas, más aún falta estudios específicos de dichos lugares para afirmar la presencia de boratos.

4.2. Dataciones Radiométricas en el Área de Estudio

Referente a la geocronología de la formación de boratos en la provincia boratífera de Sudamérica se pueden decir que se han formado en dos periodos principales (Fig.31) (cronología para los Andes Centrales):

I. Durante el Mioceno superior entre 7 y 5 Ma.
II. Durante el Cuaternario (< 75 ka al presente).

En la actualidad, en los Andes Centrales se han descubierto boratos neógenos únicamente en la Puna Argentina. Teniendo en cuenta estas edades en el presente trabajo se ha elaborado un mapa con información específica que va desde los 22 Ma hasta la actualidad, datos útiles para la prospección.

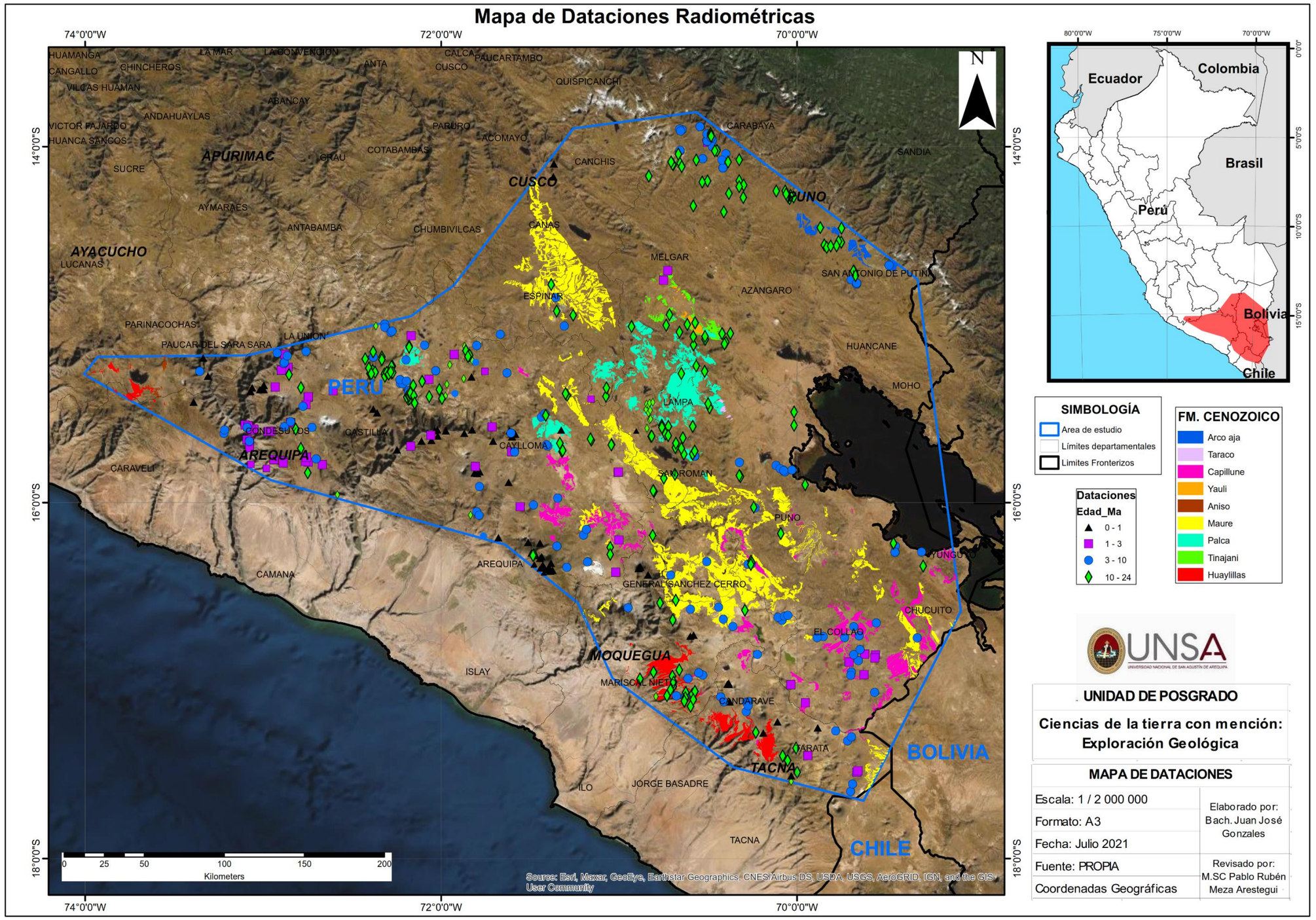


Figura 31. Mapa de dataciones radiométricas. Datos tomados del GEOCATMIN – INGEMMET.

4.3. Geoquímica

4.3.1. Introducción

Con la finalidad de contar con información geoquímica del área de estudio se recurrió a la información de la base de datos del INGEMMET, específicamente del “Geocatmin”, es preciso indicar que del elemento boro, no hay mucha información, posiblemente debido a que sus valores son muy bajos e incluso pueden encontrarse bajo el límite de detección.

El INGEMMET realizo un muestreo geoquímico en 1) Fuentes Termales y 2) Roca-Sedimentos.

En los yacimientos de boratos el elemento boro, está asociado principalmente con el litio, además de otros elementos como el arsénico y el estroncio. Por ello, en el presente trabajo se procedió a filtrar información de la base de datos de estos elementos, concluyendo en la elaboración de los mapas de distribución en el área de estudio.

La idea de elaborar mapas de la geoquímica del litio, estroncio y arsénico y relacionarlo con las unidades sedimentarias lacustres del neógeno, constituye una fuente de información valiosa para la prospección.

4.3.2. Geoquímica de fuentes termales.

4.3.2.1. Caracterización Geoquímica de Fuentes Termales.

Del trabajo elaborado por Vicentina Cruz y Koji Matsuda, denominado: **“CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LA ZONA GEOTERMAL DE CALACOA, MOQUEGUA”** extraemos la Tabla 1 donde se puede ver los resultados de campo y la composición química de las fuentes termales de dicha zona. Asimismo, de los estudios; “**CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LAS FUENTES TERMALES EN LA ZONA GEOTERMAL DE BORATERAS, TACNA”** realizado por Vicentina Cruz, Víctor Vargas y Koji Matsuday y “**CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LAS FUENTES TERMALES Y FRÍAS ASOCIADAS AL VOLCÁN UBINAS EN EL SUR DEL PERÚ GEOCHEMICAL”** realizado por

Cruz, V. et al., 2009; también se extraen las tablas 2 y 3 respectivamente.

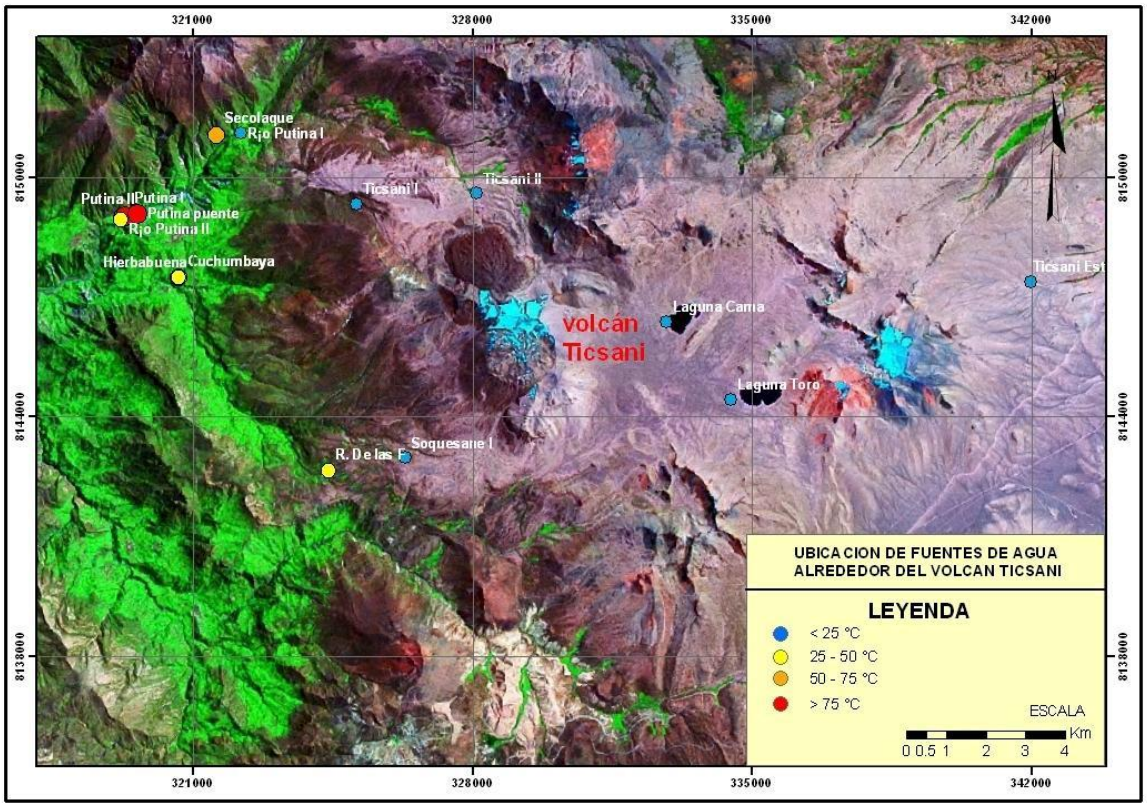


Figura 32. Mapa de localización de las fuentes termales y frías en la ZGC - Moquegua. Tomado de Cruz, V. y Matsuda, K. (2012)

Tabla 1. Composición química (mg/L) de las fuentes termales de la zona geotermal de Calacoa, Moquegua. Tomado de Cruz, V. y Matsuda, K., (2012).

Fuente	Temp °C	pH	CE µS/cm	Li mg/L	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Cl mg/L	F mg/L	SO_4 mg/L	HCO_3 mg/L	B mg/L	As mg/L	SiO_2 mg/L
Putina I	88.0	6.71	2700	3	552	51	71	7	635	2	366	197	18	3	179
Putina II	91.8	7.86	3320	3	658	55	64	5	730	2	423	181	21	3	178
Putina-1	90.2	8	3320	4	617	54	60	5	746	-	379	158	21	-	187
Putina-2	89.3	8	2970	-	536	49	72	12	649	-	328	198	18	-	182
Secolaque	67.4	7	-	-	304	36	50	5	439	-	130	93	-	-	-
Cuchumbaya	51.6	7	-	-	640	54	140	24	746	-	482	219	-	-	-

Las aguas de Calacoa tienen un origen común con predominio de la especie cloruro seguido de B y relativamente bajo en Li. La concentración de B en las aguas geotermales oscila entre 18 a 21mg/L. Siendo de tipo clorurada-sulfatada alcalina.

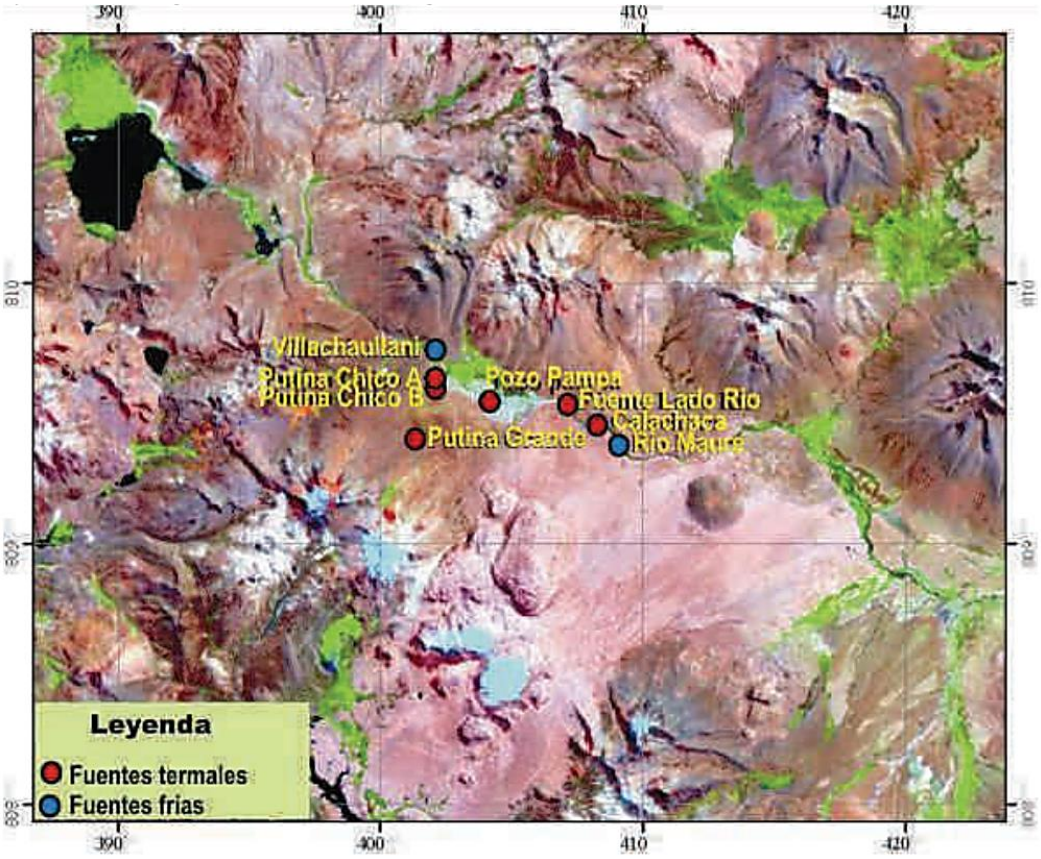


Figura 33. Mapa de localización de las fuentes termales y frías en la zona de Borateras. Tomado de Vicentina Cruz, Víctor Vargas, Koji Matsuda (2010).

Tabla 2. Composición química (mg/L) de las fuentes termales de Borateras, Tacna. Tomado de Cruz, V., Vargas, V. y Matsuda, K. (2010).

Código de muestras	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Cl mg/L	SO4 mg/L	HCO3 mg/L	B mg/L
54111-035	-	-	-	-	0.38	47.6	21	-
54111-001	1310	91.0	68.0	0.48	2150	71.9	86	95.4
54111-009	1020	96.3	44.4	2.84	1630	70.3	93	72.7
54111-017	253	29.5	36.8	17.0	350	37.1	224	16.5
54111-015	643	77.2	40.1	9.17	981	73.3	128	43.4
54111-016	592	68.1	45.2	13.0	874	66.3	184	39.6
54113-001	-	-	-	-	0.88	-	-	-
54114-001	-	-	-	-	510	-	-	-

Las aguas geotermales en la ZGB se caracterizan por presentar elevada concentración de boro (16.5 a 95.5 mg/L).

La caracterización geoquímica de las aguas termales en Borateras es de tipo clorurada –alcalina (Na-Cl).

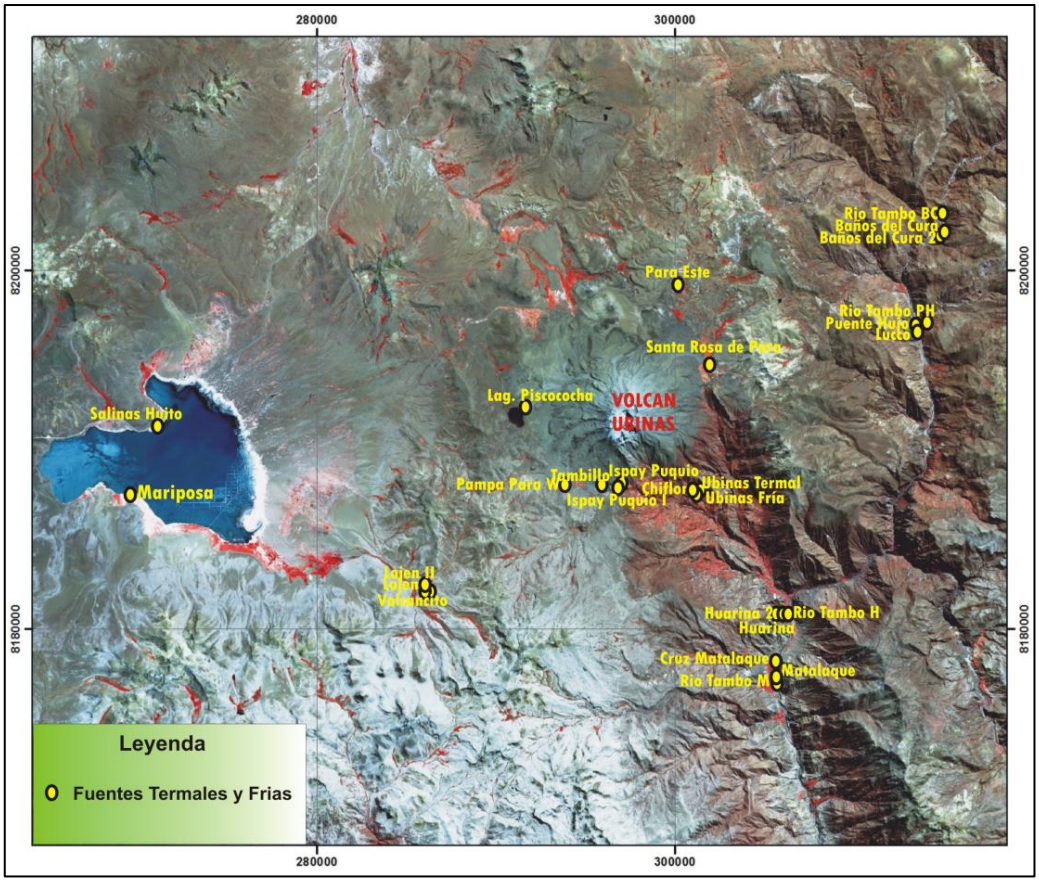


Figura 34. Localización de fuentes termales y frías asociadas al volcán Ubinas Tomado de Cruz, V. et al. (2009).

Tabla 3. Resultados de la composición química de las aguas termales y frías asociados al volcán Ubinas. Tomado de Cruz, V. et al. (2009).

N°	Fuentes	Li meq/L	Na meq/L	K meq/L	Mg meq/L	Ca meq/L	Cl meq/L	NO_3 meq/L	SO_4 meq/L	HCO_3 meq/L
1	Ubina Termal	0.048	14.49	0.87	7.17	13.48	8.3	0.17	21.65	4.72
2	Ubinas Fría	0.097	4.87	0.3	2.93	4.64	2.79	0.17	7.79	2.32
3	Ispay Puquio- 1		1.29	0.084	1.62	2.22	1.24	0.069	3.13	1.07
4	Tambillo		0.85	0.083	0.95	2.13	0.8	0.033	1.95	1.5
5	Pampa de Para W		0.8	0.12	1.31	2.1	0.64	0.096	2.46	1.18
6	Laguna Piscococha		0.43	0.12	0.46	1.63	0.49	0.11	1.4	0.8
7	Ispay Puquio- 2		1.21	0.068	1.38	1.91	0.83	0.071	2.37	0.98
8	Matalaque	0.1	5.11	0.24	0.57	3.96	3.27	0.49	3.85	3
9	Río Tambo- M	0.21	20.89	0.45	1.82	5.57	17.18	0.4	5.84	3.6
10	Cruz Matalaque		0.28	0.06	0.22	0.7	0.065	0.03	0.58	0.6
11	Huarina	0.16	12.86	0.33	2.7	15.41	11.3	0.043	14.44	3.6
12	Huarina 2°	0.15	13.17	0.36	2.79	15.88	10.64	0.24	14.85	4.2
13	Río Tambo- H	0.16	23.55	0.64	2.92	5.96	18.38	0.36	5.48	4.3
14	Baño de Cura	0.48	123	3.96	2.08	8.69	114.89	0.25	4.85	10.3

15	Baño de Cura 2°	0.73	97.1	3.91	2.51	7.62	97.5	0.25	5.96	15.28
16	Río Tambo- BC	0.026	12.36	0.21	0.75	2.55	25.34	0.36	5.61	4.98
17	Puente Hujo	1.03	162.87	5.05	4.58	19.93	176.04	0.72	23.83	10.4
18	Río Tambo- PH	0.06	28.86	0.46	1.74	6.36	24.41	0.34	5.66	6.04
19	Para Este		0.22	0.038	0.031	2.00E-01	0.053	0.021	0.22	0.28
20	Lonjen	0.01	2.914	0.307	0.699	11.478	0.155	0.002	14.164	0.02
21	Lonjen II	0.003	2.784	0.307	0.667	10.979	0.079	0.002	15.339	0.000
22	Volcancito	0.003	0.609	0.118	0.675	2.246	0.056	0.002	5.484	0.000
23	Mariposa	0.061	10.439	0.537	0.14	0.18	7.844	0.002	2.253	0.818
24	Chiflon	0.045	13.049	0.818	6.501	12.476	7.492	0.002	20.924	1.752
25	Salinas Huito	0.032	7.395	0.512	0.123	0.1	5.385	0.002	1.405	0.583
26	Santa Rosa de Para	0.007	2.914	0.333	2.962	3.244	2.242	0.002	7.095	0.234
27	Lucco	1.408	152.241	3.069	4.773	26.947	132.684	0.002	24.276	5.512

Las aguas mostraron concentraciones de sodio y potasio que varían de 0.22 meq/L a 152.24 meq/L, y 0.038 meq/L a 3.96 meq/L, respectivamente. Las concentraciones de calcio y magnesio están en rangos de 0.002meq/L a 26.95 meq/L y 0.031 meq/L a 7.17meq/L respectivamente. También se observó elevada concentración de los iones cloruro y sulfato cuyos rangos fueron de 0.22 meq/L a 176.04 meq/L y 0.22 meq/L a 24.3 meq/L, respectivamente. Algunos componentes no están presentes en el listado de la tabla, debido que sus concentraciones son muy bajas, tal es el caso de los iones yoduros. Durante la toma de muestras se observó que algunas fuentes presentan burbujas lo que podría indicar que hay presencia de gas de CO2, que se han disuelto formando iones HCO3, y estas posiblemente se estén mezclando con aguas superficiales, por lo cual las concentraciones son bajas y oscilan desde 0.23 meq/L a 15.28 meq/L.

La caracterización geoquímica de las fuentes termales y frías localizadas alrededor del volcán Ubinas, mostró que se clasifican como aguas cloruradas alcalinas y agua sulfatada clorurada alcalina terreas.

De la misma forma con respecto a Chile se extrae la tabla 4 del estudio "**CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS Y PAUTAS DE EVOLUCIÓN DE LAS SALMUERAS SUPERFICIALES DEL SALAR DE LLAMARA, CHILE**" realizado por López, P. et al. (1999).

Tabla 4. Datos composicionales de las salmueras superficiales del Salar Llamara. Tomado de López, P. et al. (1999).

Muestra	T (Cº)	Densidad	pH	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Cl^{-}	HCO^{3-}	$SO42^{-}$	B	Li^{+}
VL1-1	29,2	1,160	7,70	14,60	55,50	3.916,00	65,40	3.110,00	3,99	539,40	6,80	3,27
VL1-2	29,4	1,164	7,30	10,40	58,60	4.332,00	75,40	3.343,00	4,06	553,00	-	3,87
VL1-5	28,1	1,168	7,60	17,90	62,50	4.193,00	71,50	3.353,00	4,70	572,50	6,07	3,62
VL1-6	28,5	1,169	7,71	16,30	62,90	4.291,00	70,60	3.402,00	4,60	592,40	6,70	3,55
VL1-8	27,8	1,170	7,68	10,30	63,50	4.519,00	78,00	3.513,00	4,65	596,00	-	~0,98
VL1-9	26,9	1,066	7,98	16,10	21,20	1.362,00	25,50	1.109,00	3,10	199,10	-	1,17
VL1-10	27,1	1,042	8,09	22,70	16,40	843,10	15,80	687,40	2,60	131,90	1,72	0,78
VL1-11	26,9	1,032	8,05	16,60	9,68	613,20	10,40	478,30	2,54	90,20	-	0,53
VL1-12	26,7	1,026	8,30	18,80	10,00	594,90	10,60	465,40	2,54	102,70	1,41	0,52
VL1-13	26,6	1,058	8,04	14,50	20,50	1.272,00	22,00	998,20	3,00	193,00	2,37	1,06
VL1-14	27,1	1,162	7,33	20,90	61,00	4.312,00	104,10	3.417,00	4,60	595,40	-	3,56
VL1-16	25,9	1,166	7,38	11,60	61,30	4.165,00	69,80	3.303,00	3,93	577,10	6,27	3,62
VL1-17	26,9	1,162	7,33	10,90	60,60	4.120,00	69,00	3.294,00	3,78	585,90	6,28	3,55
VL2-1	26,0	1,054	7,86	15,70	18,50	1.191,30	18,70	947,48	3,17	176,50	3,22	1,80
VL2-2	26,0	1,104	7,80	17,20	35,40	2.570,70	43,80	2.106,60	3,97	318,67	6,75	2,44
VL2-3	26,0	1,102	7,87	16,90	41,80	3.087,30	47,50	2.337,90	4,33	378,88	6,62	2,65
VL2-4	27,0	1,130	7,86	15,00	47,30	3.215,90	52,30	2.593,60	4,59	401,18	7,72	3,08
VL2-5	27,0	1,130	7,86	14,80	47,60	3.297,30	52,30	2.636,70	4,73	444,08	8,76	3,10
VL2-6	28,0	1,034	7,95	18,40	12,10	775,00	13,40	623,64	2,50	116,04	2,17	0,88
VL2-7	28,0	1,060	7,91	19,20	22,00	1.574,90	25,00	1.252,38	3,17	216,88	4,43	1,50
VL2-8	28,0	1,036	8,22	21,90	12,60	816,10	13,00	644,40	3,06	124,85	2,92	0,88
VL2-9	29,0	1,020	8,24	20,50	7,29	469,70	7,28	364,60	2,37	82,93	1,59	0,44
IL1-2	21,5	1,183	7,17	8,30	70,85	4.654,0	79,32	3.795,0	3,65	586,0	9,38	4,76
IL1-3	20,0	1,186	7,06	8,26	73,23	4.746,0	82,32	3.955,0	3,54	558,1	8,68	4,93
IL1-4	21,5	1,182	7,12	8,44	74,40	4.922,0	81,82	4.021,0	3,36	560,7	9,47	4,97
IL1-5	23,0	1,182	7,11	8,58	69,13	4.936,1	76,10	3.735,0	3,32	603,4	9,38	4,60
IL1-6	19,5	1,068	7,39	11,03	31,64	1.348,4	23,44	1.055,0	2,16	200,0	4,32	1,48
IL1-7	20,0	1,136	7,24	10,50	52,20	3.244,0	55,70	2.620,0	2,55	428,0	7,31	3,54
IL1-8	24,0	1,126	7,52	11,17	48,20	3.046,0	50,89	2.436,0	5,24	413,0	7,49	~2
IL1-9	28,0	1,030	7,77	13,86	9,84	650,6	10,58	500,0	2,94	102,5	2,72	0,44
IL2-1	27,0	1,023	7,84	20,10	7,73	466,6	8,44	373,5	3,31	77,0	1,82	0,41
IL2-2	25,5	1,058	7,78	20,50	12,10	799,3	14,40	642,7	3,27	116,0	2,13	0,69
IL2-3	25,5	1,058	7,80	21,90	13,30	910,4	16,90	737,2	3,29	125,0	2,71	0,77
IL2-4	25,0	1,052	7,75	21,50	14,20	986,7	18,40	795,7	3,32	138,0	3,00	0,83

IL2-5	24,0	1,068	7,80	20,90	14,70	1.022,3	18,90	825,4	3,28	142,0	3,24	0,87
IL2-6	29,0	1,028	7,86	18,90	8,80	534,8	9,86	423,9	3,31	89,7	1,74	0,51
IL2-7	26,0	1,030	7,88	19,60	10,30	626,9	11,10	496,5	3,32	104,0	1,87	0,57
IL2-9	25,5	1,023	7,79	19,40	6,01	333,0	6,04	265,3	3,28	60,7	1,46	0,33
VL3-1	21,0	1,062	7,74	19,91	19,91	1.414,3	24,28	1.122,3	3,02	194,5	3,14	1,05
VL3-2	20,0	1,112	7,47	16,15	37,49	2.658,0	45,59	2.088,0	3,61	368,3	6,15	1,73
VL3-3	20,0	1,125	7,67	15,77	40,86	2.480,5	45,74	2.242,0	3,36	209,0	6,29	1,81
VL3-4	21,0	1,125	7,67	15,82	41,49	2.514,2	46,72	2.227,9	3,46	241,1	6,12	1,89
VL3-5	21,0	1,125	7,66	14,46	38,45	2.446,0	43,30	2.162,2	3,25	232,2	5,42	1,72
VL3-6	21,0	1,090	7,51	16,48	29,31	1.952,0	31,55	1.555,7	2,81	270,2	3,45	1,40
VL3-7	25,0	1,118	7,52	15,13	40,14	2.729,5	45,48	2.178,1	3,20	369,2	5,17	1,76
VL3-8	23,5	1,090	7,68	18,16	31,01	2.028,3	31,91	1.593,2	2,6	281,9	3,84	1,45
VL3-9	26,0	1,020	7,70	17,91	6,46	381,6	6,44	303,7	2,03	67,3	0,9	0,3
IL3-1	19,8	1,021	8,16	17,60	9,77	658,7	10,10	511,7	3,37	105,0	1,80	0,59
IL3-2	20,3	1,045	8,34	18,40	12,80	942,3	14,00	742,7	3,35	140,0	1,79	0,73
IL3-3	20,4	1,042	8,24	17,20	22,00	1.626,5	22,80	1.275,7	3,40	237,0	3,84	1,23
IL3-4	19,6	1,031	8,19	18,80	20,70	1.607,5	21,60	1.218,7	3,43	256,0	3,87	1,08
IL3-5	20,1	1,033	8,06	21,20	12,80	960,4	13,80	752,2	3,29	142,0	2,86	0,74
IL3-6	25,2	1,020	8,21	17,00	7,23	426,3	7,08	328,2	1,82	75,3	1,21	0,44
IL3-7	22,4	1,044	8,23	17,60	14,00	1.108,3	14,10	832,6	3,71	169,0	3,52	~0,74
IL3-8	23,1	1,023	8,23	17,00	8,06	478,8	7,39	373,8	2,83	83,1	2,06	0,44
IL3-9	20,5	1,015	8,27	18,20	5,81	325,3	5,67	262,1	2,02	61,4	1,77	0,29

Las aguas termales estudiadas corresponden al tipo Sódico-cloruradas, con una componente no menor sulfatada.

Y en cuanto a los salares argentinos se extrae la tabla 5 donde se presentan la composición química de las fuentes termales de las Salmueras y aguas de la Puna realizado por Nicolli, H. et al. (1982). Data en meq/L.

La principal diferencia encontrada con los sistemas geotermales de la Puna es que allí existen reservorios con diferentes grados de influencia magmática (Peralta, Y. ,2018).

Tabla 5. Salmueras y aguas de la Puna (Ion composition). Nicolli, H. et al. (1982).

Sample N°	Sampling point	Li^{+}	Na^{+}	K^{+}	Mg^{+2}	Ca^{+2}	HCO^{-}_{3}	$B^{4}O^{2}_{7}{}^{-}$	$SO^{2}_{4}{}^{-}$	Cl^{-}
2	Salinas Grandes	51	5154	143	106	121	n.d.	7	67	5506
7	Salinas Grandes	242	4623	517	368	103	n.d.	28	73	5765
19	Salinas Grandes	49	5154	151	105	121	n.d.	8	58	5520
22	Salar Olaroz	20	5345	35	33	67	n.d.	12	108	5386
33	Salar de Cauchari	486	4836	588	335	17	n.d.	144	954	5179
44	Salar del Rincón	40	5280	152	170	29	n.d.	127	231	5402
48	Salar del Rincón	31	3418	103	145	21	1	12	208	3506
49	Salar del Rincón	51	5315	168	174	14	n.d.	23	333	5373
37	Salar Pocitos	14	5364	87	106	30	n.d.	10	210	5376
56	Salar Pocitos	2	866	10	20	59	0	2	155	801
58	Salar Pocitos	11	3405	39	14	71	n.d.	4	123	3419
61	Salar de Pastos Grandes	46	5263	91	174	40	n.d.	24	162	5433
66	Salar de Pastos Grandes	62	5289	116	239	37	n.d.	32	205	5517
67	Salar de Pastos Grandes	63	5141	121	245	37	n.d.	32	543	5040
70	Salar Centenario	35	5215	74	216	64	n.d.	15	115	5483
88	Salar Centenario	147	4884	209	621	16	n.d.	54	416	5433
90	Salar Centenario	93	5084	141	425	31	n.d.	41	204	5548
86	Salar Ratones	61	4021	95	214	40	n.d.	24	221	4200
79	Salar del Hombre Muerto	269	5050	384	294	14	n.d.	54	137	5520
82	Salar del Hombre Muerto	107	5298	155	123	29	n.d.	24	225	5466
96	Salar del Río Grande	60	5150	190	508	17	n.d.	9	174	5760
100	Salar del Río Grande	80	4997	258	574	16	n.d.	25	400	5526
104	Salar del Río Grande	20	5371	72	161	17	n.d.	2	381	5266
106	Salar de Arizaro	23	5197	4	151	38	n.d.	2	172	5379
108	Salar de Arizaro	8	5245	57	86	62	n.d.	1	98	5348
113	Salar de Arizaro	2	5432	24	11	50	0	0	113	5407
16	Guayatayoc lagoon	0	86	4	2	19	1	1	21	89
74	Lagoon, near Tocomar	0.19	5.2	3.1	9.1	6.6	1.3	0.97	16	5.8
74B	Lagoon, near Tocomar	0.04	25.5	6.9	5.1	9.4	1.6	1.6	26.2	17.5
76	Antuco Spring	22	273	16	11	20	n.d.	24	27	291
65	River, east of salar de Pastos Grandes	2	212	5	13	25	0	4	30	224
75	Tocomar River	0.7	12.5	0.7	0.33	1.7	5.8	1	3.2	5.9
93	Sijes River	0	32	1	2	5	3	1	4	31
94	Tolava River	0.01	1.6	1.1	0.33	0.4	0.74	0.31	1.4	0.06
92	Quebrada de Singel stream	0	130	3	30	38	4	0	70	129
96	Groundwater, near Salar de Río Grande	4	434	12	47	37	2	1	73	463
Chemical analysis: H. B. Nicolli and A. J. Barros								n.d: non determined		

4.3.2.2. Comparación de datos geoquimicos de las fuentes termales.

La comparación geoquímica se realizó mediante perfiles de concentración de elementos, utilizando los datos de las tablas 1, 2 y 3 de Perú; tabla 4 de Chile y tabla 5 de Argentina. Con la finalidad de contrastar las tendencias de los elementos en los salares de los países.

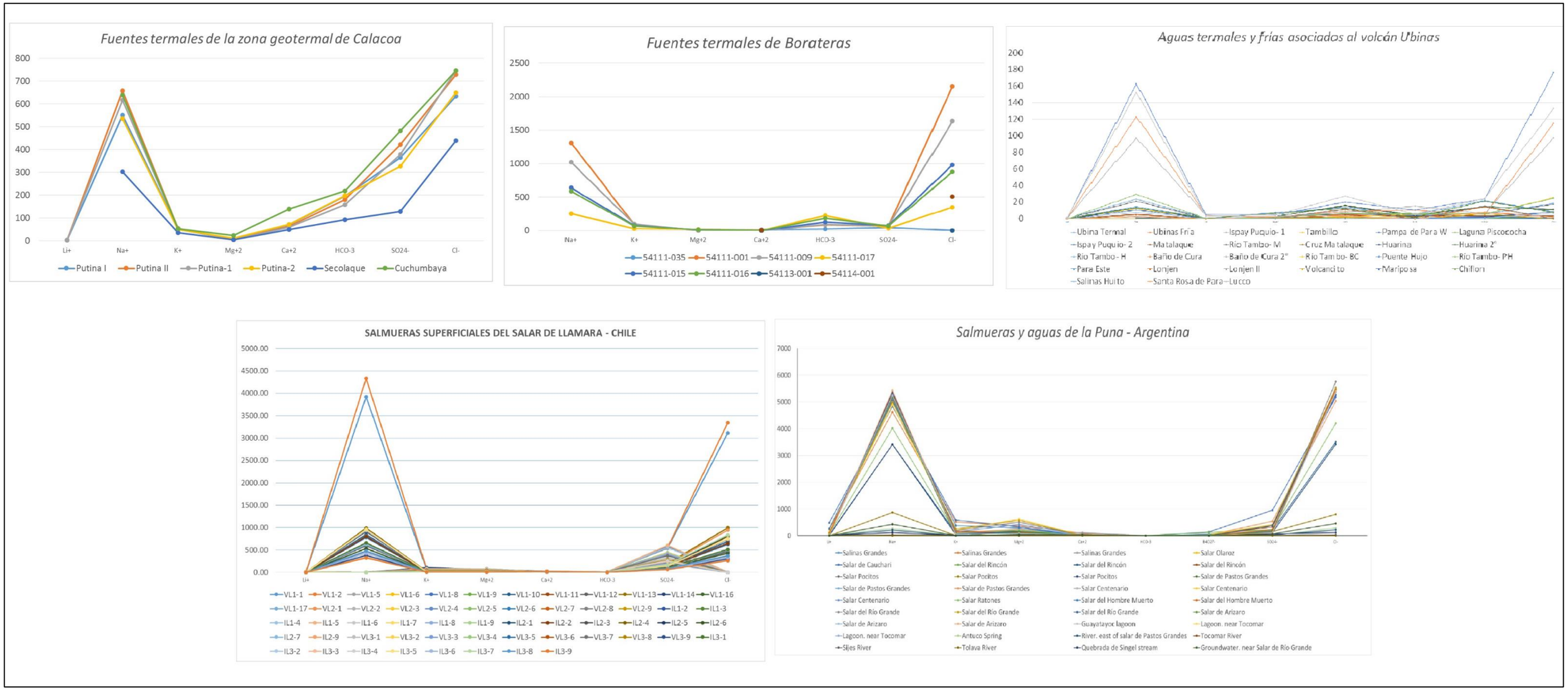


Figura 35. Perfiles de elementos para las fuentes termales y salares.

En la figura 35 se observa que se tienen concentraciones altas en Na, Li y Cl, lo que sugiere un comportamiento geoquímico similar para estos iones. La principal diferencia encontrada con los sistemas geotermales, es que los reservorios existentes presentan diferentes grados de influencia magmática. La mayoría de sistemas termales asociados a salares muestran una clara evolución química, ya que indican una composición predominantemente clorurada y/o sulfatada sódica. La presencia elevada de concentración de sulfato es debido a la presencia de capas de yeso en niveles terciarios. y el cloruro se asocia comúnmente a los sulfatos como integrante de las capas de yeso.

4.3.2.3. Geoquímica del Litio.

El litio pertenece al grupo de los elementos litófilos (aquellos que tienen preferencia por asociarse con oxígeno y silicio). En las aguas termales y minerales se encuentran cantidades notables de Li (6-50 ppm; Garret, 2004) en forma de LiCl (soluble) proveniente de la disolución de las rocas presentes en el área atravesada por el fluido. El mapa de distribución de litio en fuentes termales (Fig.36), indica que los valores están irregularmente distribuidos con predominancia del rango 0 – 7.18 ppm que se encuentran en la parte periférica del área de estudio, aumentando las concentraciones hacia la parte central; destacando la fuente termal del área de Cutimbo, donde se pueden apreciar las sales de boro y sodio precipitadas en la superficie (Imagen 7), rangos de 14.36 y 21.54 ppm en el distrito de Collao sobre la formación Capillune que es una serie sedimentaria lacustre de conglomerados, areniscas, piroclásticos, limolitas y arcillas con coloraciones grises, blanco-amarillentas y verdosas, y en el distrito de Pichacani llegando a alcanzar los 35.9 ppm sobre el grupo Maure en las fuentes termales conocidas como Collpapampa.

Imagen 7. Vista panorámica de la fuente termal de Cutimbo. Se puede ver en la superficie sales de boro y sodio precipitadas a partir de la fuente termal.

Imagen 8. Muestra de agua dio 300 ppm de litio y 1100 ppm de boro.

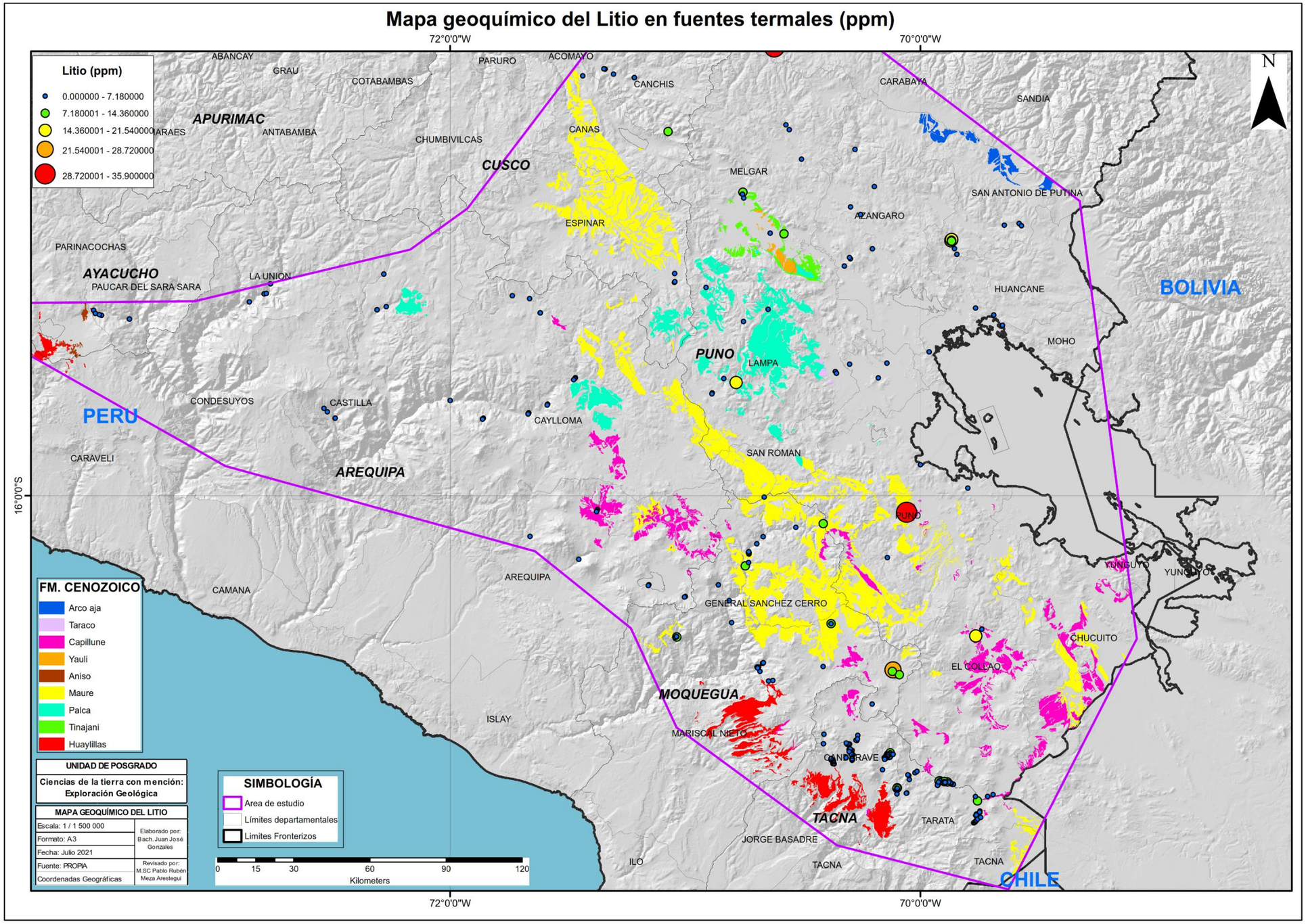


Figura 36. Mapa que muestra las concentraciones de Litio en fuentes termales. Datos tomados del GEOCATMIN – INGEMMET.

4.3.2.4. Geoquímica del Estroncio.

El estroncio es un elemento que no se encuentra en estado nativo y al igual que el litio se le encuentra disuelto en las aguas termales. El mapa de distribución espacial del estroncio en fuentes termales (Fig.37), el rango 0 – 10.8 ppm es el que predomina y se presenta muy irregular casi en toda el área de estudio sobre todo en el lado sur y entre las localidades de Candarave y Tarata. Se destaca un valor en el rango de 43.2 a 54 ppm ubicados en la localidad del Collao sobre la formación Capillune en las aguas termales Poqpoccollo y rangos entre 21.6 y 32.4 ppm sobre la formación Palca en el distrito de Lampa**.**

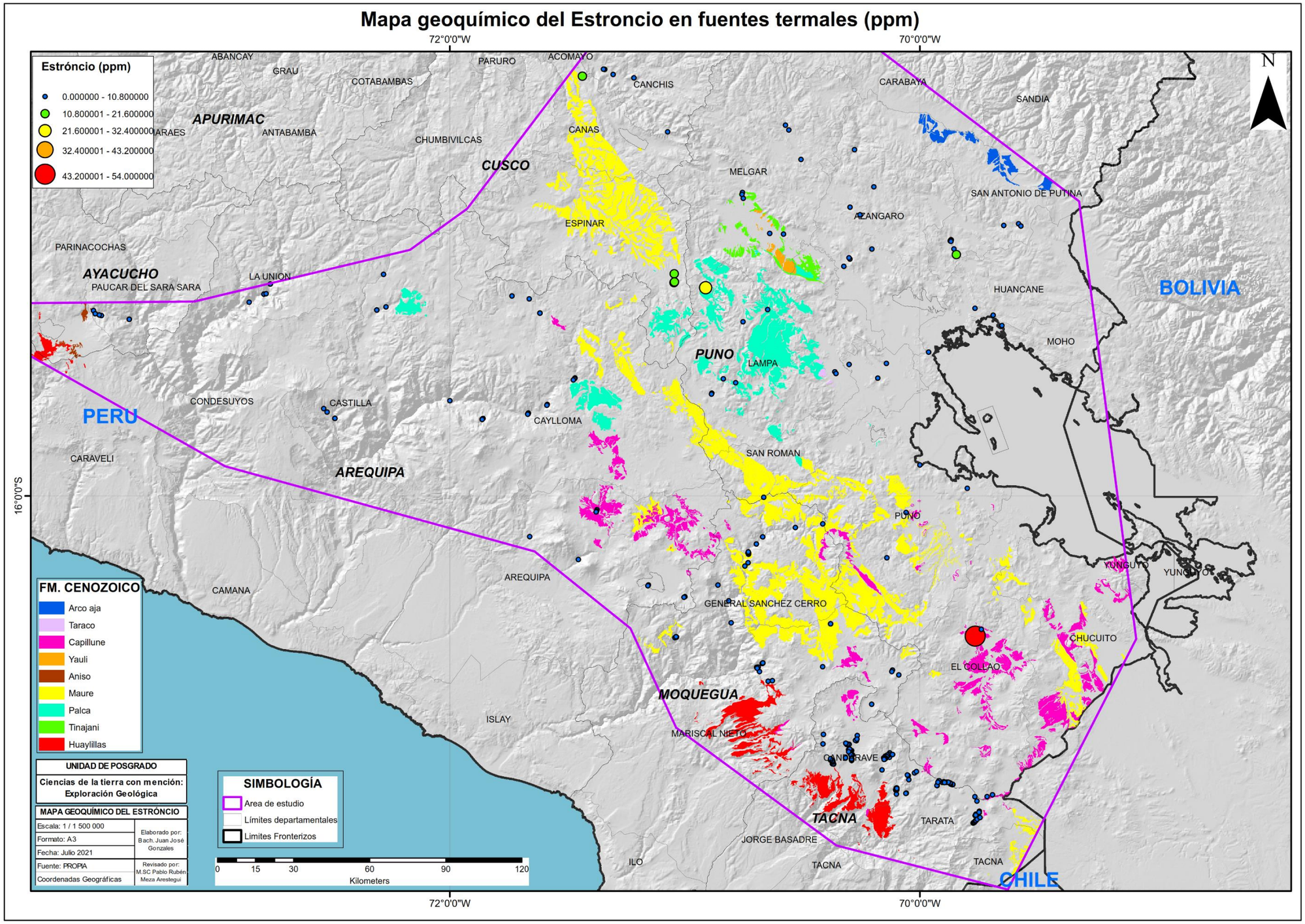


Figura 37. Mapa que muestra las concentraciones del Estroncio en fuentes termales. Datos tomados del GEOCATMIN – INGEMMET.

4.3.2.5. Geoquímica del Arsénico.

El arsénico se encuentra en estado reducido de As (III) en el fluido del yacimiento, y también está presente de la misma forma en las aguas termales.

El arsénico al igual que el litio y estroncio son elementos indicadores de un depósito cercano.

En el mapa del arsénico en fuentes termales (Fig.38) el rango de 0 - 12.88 ppm, se distribuye principalmente hacia los bordes del área de estudio, estos valores del rango más bajo guardan relación con los valores de litio y estroncio. Se destacan dos valores del rango 51.52 a 64.4 ppm ubicadas al norte de Moquegua en el distrito de Mariscal Nieto cerca a la formación Huaylillas y en la localidad de General Sánchez Cerro próximas al Grupo Maure**.**

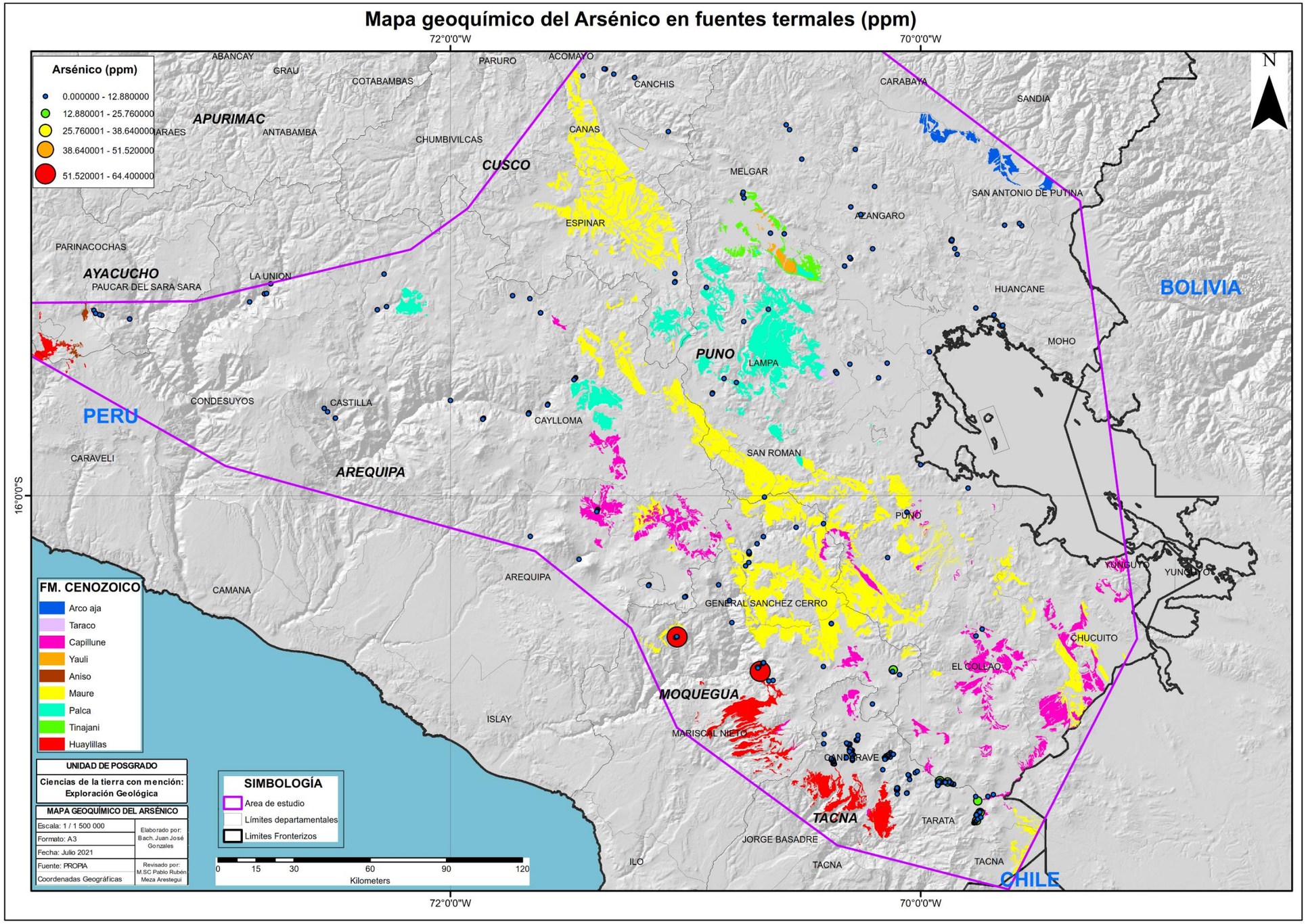


Figura 38. Mapa que muestra las concentraciones de Arsénico en fuentes termales. Datos tomados del GEOCATMIN – INGEMMET.

4.3.3. Geoquímica en Roca-Sedimentos

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 evapofacies boratíferas.

En la figura 39 se observa la distribución geoquímica de los tres elementos guía; Li, Sr y As. Los datos de cada elemento químico fueron clasificados según intervalos equitativos divididos en 5 rangos. Mostrando la mayor concentración sobre la formación palca y el grupo Maure, entre los departamentos de Puno y Cusco, específicamente en las provincias de Lampa y Espinar.

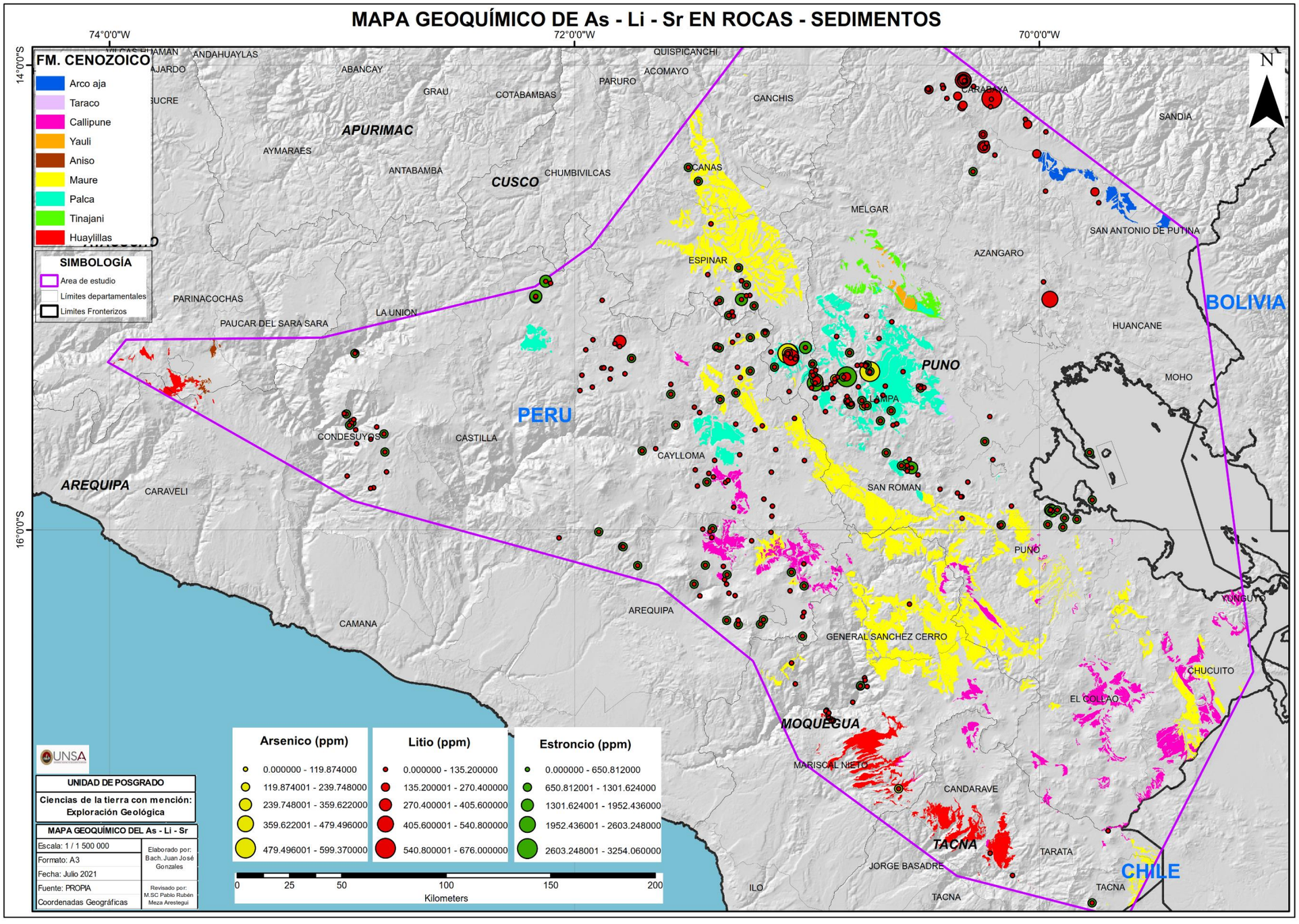


Figura 39. Mapa geoquímico de elementos en Roca - Sedimentos. Datos tomados del GEOCATMIN – INGEMMET

4.3.3.1. Geoquímica del Litio.

El litio es elemento guía muy importante en la prospección de yacimientos de boratos, junto al boro forman un par geoquímico (donde hay litio hay boro), también para los depósitos de litio en roca (ej., arcillas hectoríticas o ignimbritas ricas en el elemento).

Según el mapa de Litio en Roca-Sedimentos (Fig.40), en mayor cantidad las concentraciones de litio se hallan en un rango de 0-135.2 ppm, indicados con puntos azules, también destacan un punto que está en el rango de 540.8 a 676 ppm en el distrito de Macusani, y otro punto ubicado en la provincia de Espinar sobre la formación Palca con rangos de 405.6 a 540.8 ppm, esto es información muy importante a verificar con nuevos muestreos**.** Tambien es importante destacar valores de litio en el rango de 135 a 270 ppm en la formación Arco Aja entre las localidades de San Antonio de Putina y Carabaya.

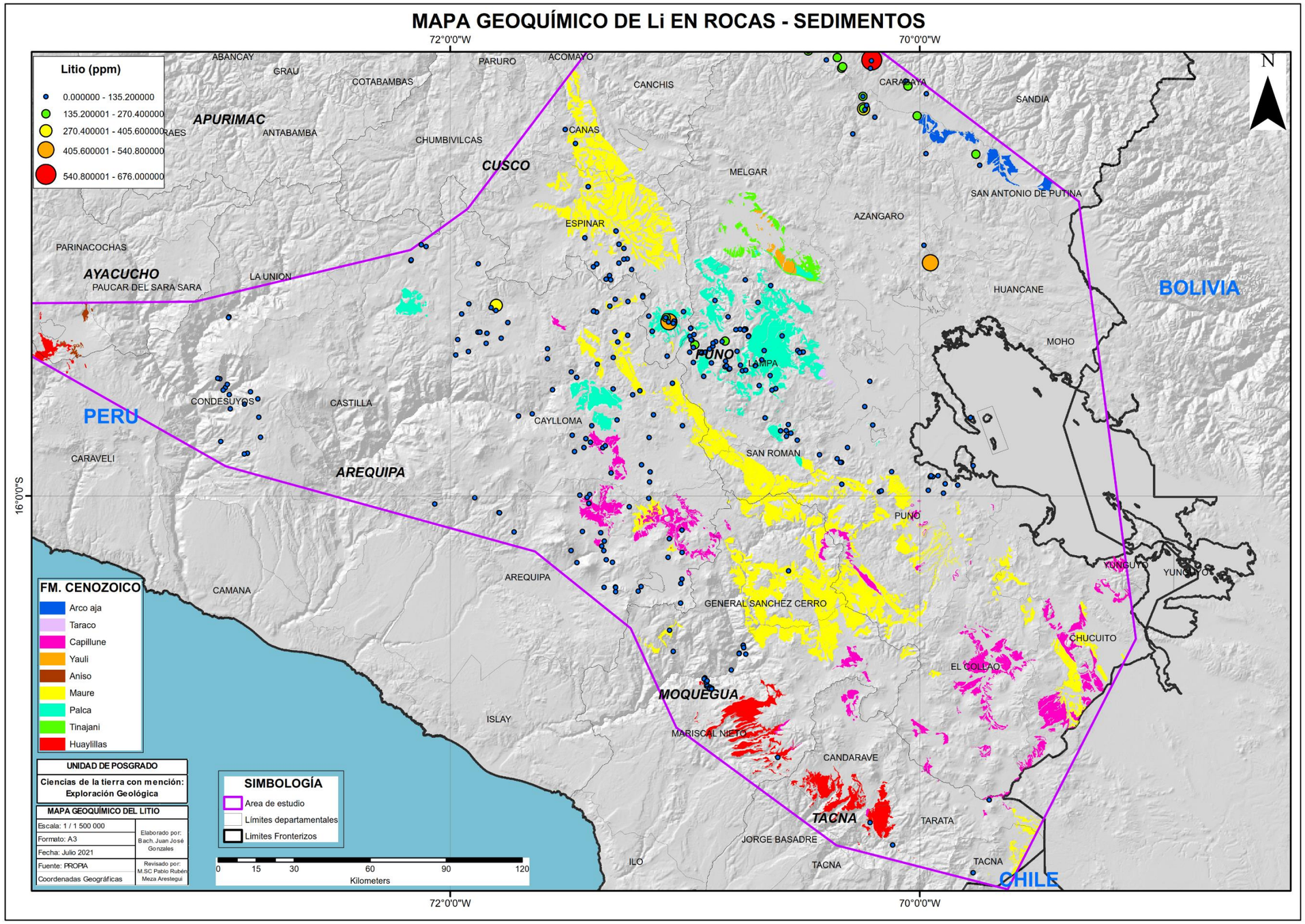


Figura 40. Mapa geoquímico del Litio en Roca - Sedimentos. Datos tomados del GEOCATMIN – INGEMMET.

4.3.3.2. Geoquímica del Estroncio.

Analizando el mapa de distribución de estroncio en Roca-sedimentos (Fig.41) y teniendo en consideración que la abundancia del estroncio en la corteza terrestre es de 370 ppm, se identifican predominantemente valores altos que están en el rango de 650.81 a 1301.62 ppm y también en menor proporción valores entre 1301.62 y 3254 ppm que se encuentran sobre la formación Palca en la provincia de Lampa en Puno; valores anómalos que serán de mucha utilidad para la prospección.

El estroncio se le encuentra asociado a minerales de boro (Imagen 9) en forma de sulfato de estroncio (Celestina). Tal como se puede observar en la imagen 9, la presencia de Celestina junto a la Hydroboracita mineral rico en Boro.

Imagen 9. Hydroboracita (Borato de Calcio y Magnesio Hidratado) en cristales aciculares con celestina (sulfato de estroncio) en cristales incoloros y transparentes y calcita en agregados esferoidales. Tomado de Callén, J. (*Fabre minerals).*

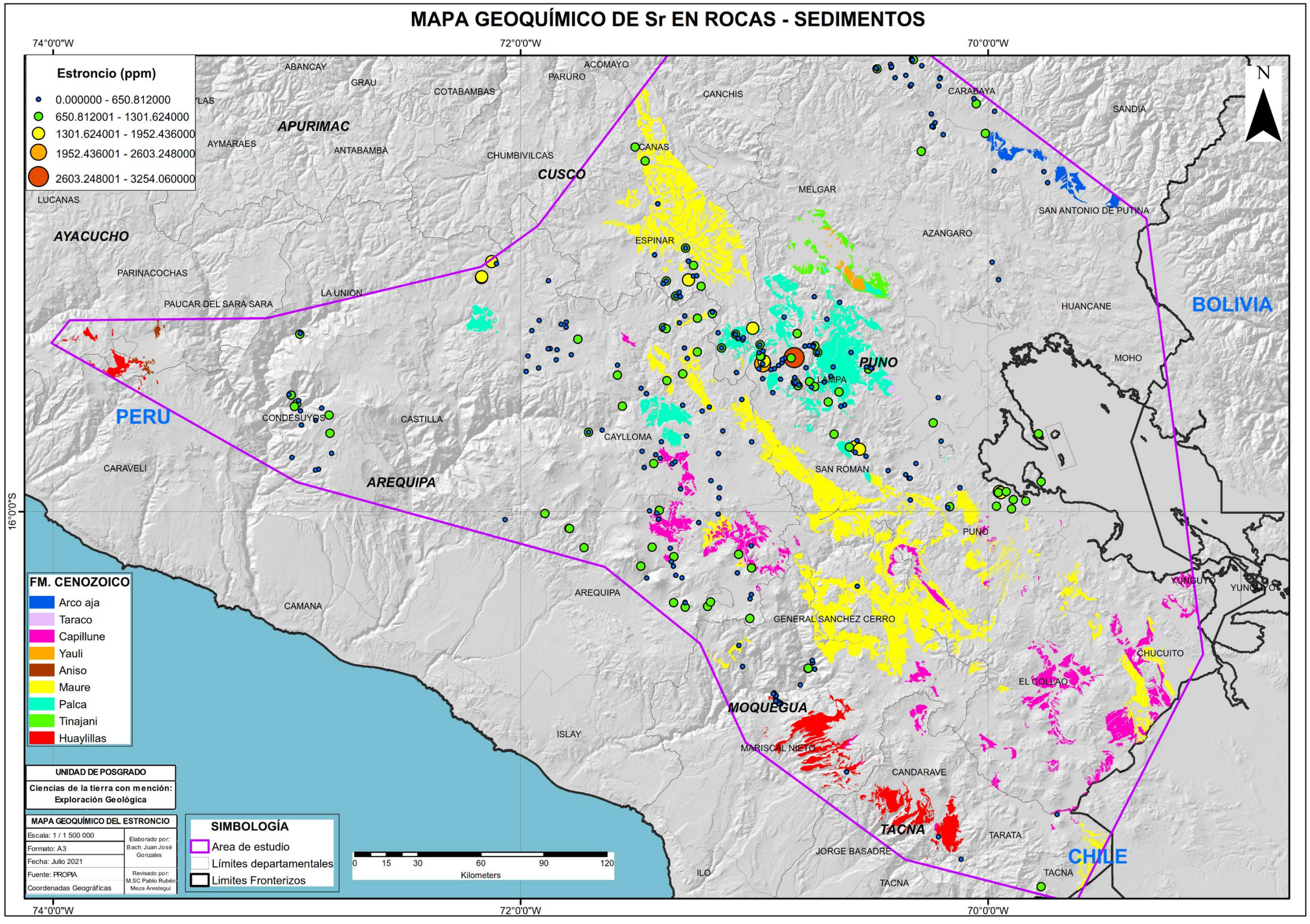


Figura 41. Mapa geoquímico del Estroncio en Roca - Sedimentos. Datos tomados del GEOCATMIN – INGEMMET.

4.3.3.3. Geoquímica del Arsénico.

El arsénico en los sedimentos se halla fundamentalmente retenido en óxidos de hierro (goethita), y se interpreta que llegó de dos formas a los niveles donde se encuentra: una, transportado como especie iónica en solución acuosa procedente del lavado de afloramientos de rocas mineralizadas o afectadas por alteración hidrotermal; y otra forma, transportado en partículas de óxidos de Fe donde ya estaba retenido, por arrastre de la escorrentía superficial de la ladera.

En el mapa de distribución de arsénico en Roca-sedimentos (Fig.42) los rangos 0 y 119.87 ppm son los que más predominan, no obstante, se debe destacar el área comprendida entre Lampa y Espinar donde se registran valores notables desde 359.62 ppm hasta 599.37 ppm sobre la formación Palca.

El arsénico en los yacimientos de boro se encuentra en forma de oropimente (Imagen 10) y rejalgar, ambos sulfuros de arsénico.

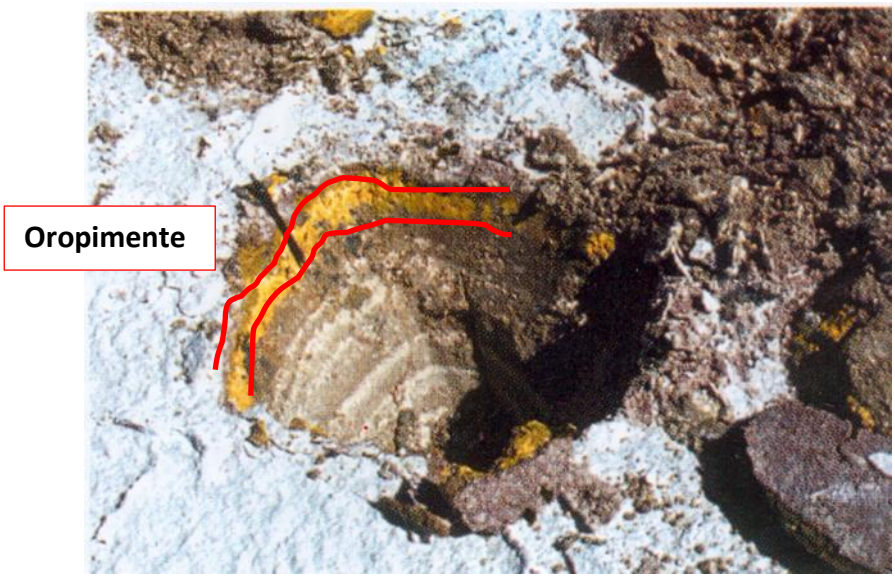


Imagen 10. Oropimente intercalado con capas de ulexita, yeso y halita. Tomado de Chong, 2000.

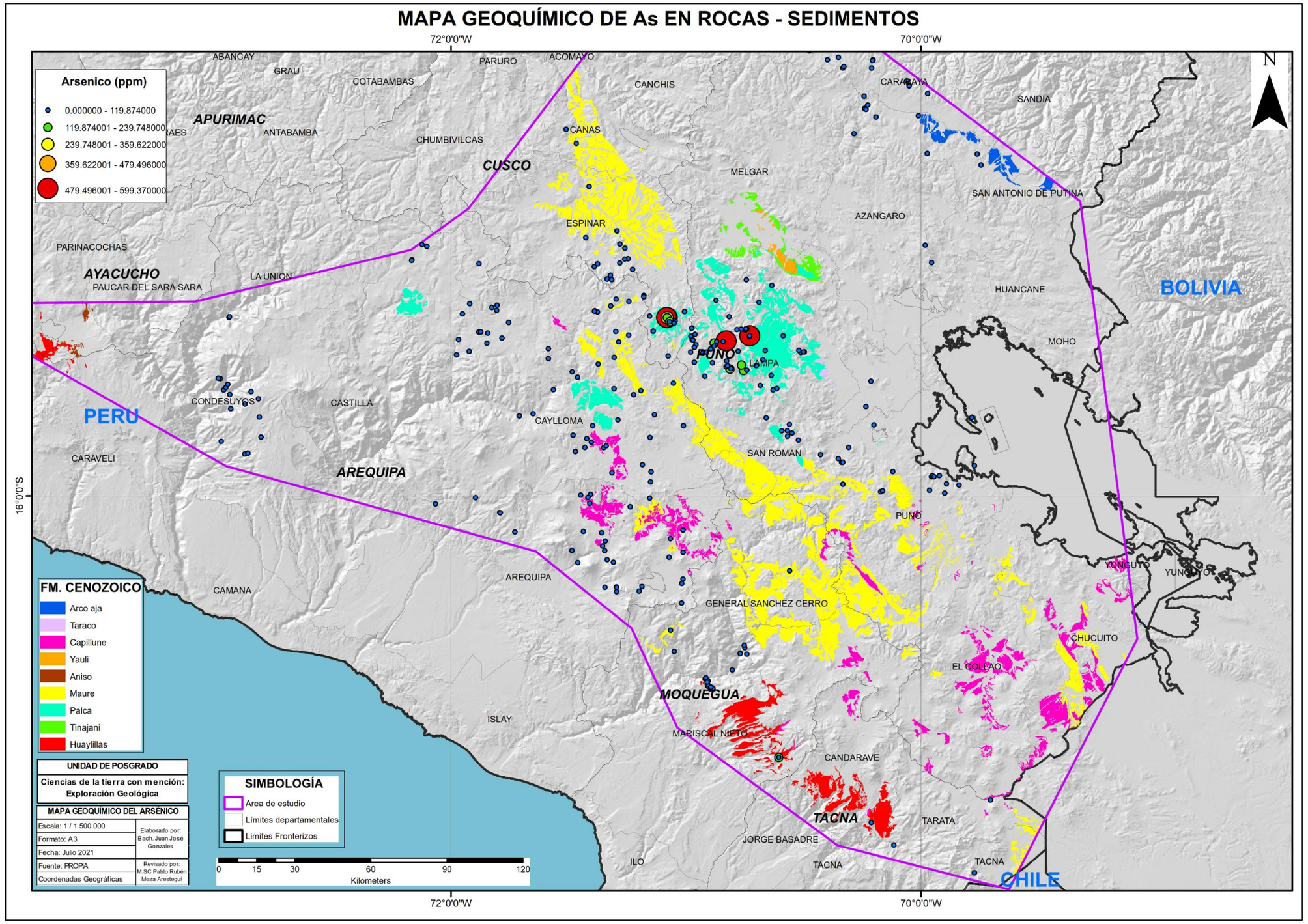


Figura 42. Mapa geoquímico del Arsénico en sedimentos. Datos tomados del GEOCATMIN – INGEMMET.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Introduccion

El análisis de la información, nos permite concluir que el sur del Perú es un área potencialmente prospectable para la identificación de boratos de edad cuaternaria y sobre todo de edad terciaria, que por cierto es una tarea compleja que implica aspectos geológicos, técnicos económicos entre otros.

A continuación se propone tres áreas prospectables, no sin antes dar a conocer algunas guías para la prospección de boratos del neógeno.

5.2. Guías para la prospección de boratos terciarios.

En el presente trabajo se aportan algunas claves o guías principales que deben tenerse en cuenta en la prospección de boratos neógenos (información obtenida de R. Alonso en su conferencia de incorporación a la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires en 2017).

Hay varios puntos de vista para enfocar este tema siendo las condiciones principales relacionadas a espacio, tiempo, facies adecuadas, pero antes se debe indicar que los boratos son sales solubles por tanto fácilmente meteorizables, por tanto, en superficie pueden desaparecer o transformarse en otros minerales. Un ejemplo lo constituye Loma Blanca (Jujuy) donde los boratos se transformaron en calcita en superficie. El otro aspecto es que las formaciones sedimentarias lacustres que son portadoras potenciales de boratos y evaporitas fósiles asociadas, se encuentran en gran parte cubiertas por materiales recientes aluviales o flujos volcánicos (ignimbritas, andesitas, 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 sintetizada por Jordan y Alonso (1987).

b) **Edad**. Los boratos terciarios de la Puna argentina se encuentran estrechamente 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).

c) **Facies sedimentarias**. Deben considerarse varios elementos tales como:
   - Presencia de evaporitas, tales como yeso y halita
   - Episodios lacustres. Los boratos son sales formadas en ambientes ácueos y cerrados del tipo salares o playa-lakes. La presencia de capas verdes, arcillosas, volcaniclásticas, es otro de los indicios favorables, más aún cuando aparecen asociadas con evaporitas.
   - 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 volcaniclástica tobácea o tufítica.

- 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.
- Diatomitas. La presencia de capas de diatomitas asociadas a boratos es otra guía indirecta,
- Zonación. Los boratos tienden a formar sistemas evaporíticos tipo “bulleye”, con una zonación química y mineralógica que grada desde los bordes hacia el centro de la cuenca en el siguiente orden químico: Ca/CaNa/Na; y mineralógico: colemanita o inyoita/ulexita o probertita/tincalkernita.

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.

5.3. Área prospectiva de Boratos del neógeno

Los estudios geológicos indican que solo en Argentina se han descubierto boratos en formaciones neógenas; sin embargo, no significa que no existan posibilidades de encontrar más depósitos a lo largo del cinturón boratífero que va desde Argentina pasando por Chile, Bolivia y llegando hasta el Sur del Perú. La información de 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). Por ello, en el presente trabajo basado en la información geológica y mapas geoquímicos de elementos guías, se proponen tres áreas con fines prospección.

5.3.1. Área Tincopalca – Tolapalca.

Se encuentra ubicada en el departamento de Puno. En esta área (Fig. 43) se reportan algunas facies de yeso - anhidrita, además de la presencia de actuales manifestaciones termales caracterizadas por sus domos de travertinos (Imagen 11). También se encontraron capas de calizas con niveles de arcillas ricas en magnesio conocidas como "chaco" (arcilla medicinal comestible del altiplano peruano y sus propiedades en la patología digestiva, trabajadas artesanalmente por los lugareños).

Imagen 11. Foto de Fuentes termales en Tolapalca. Obsérvese el domo de travertino, con capas de carbonato de calcio y capas de yeso.

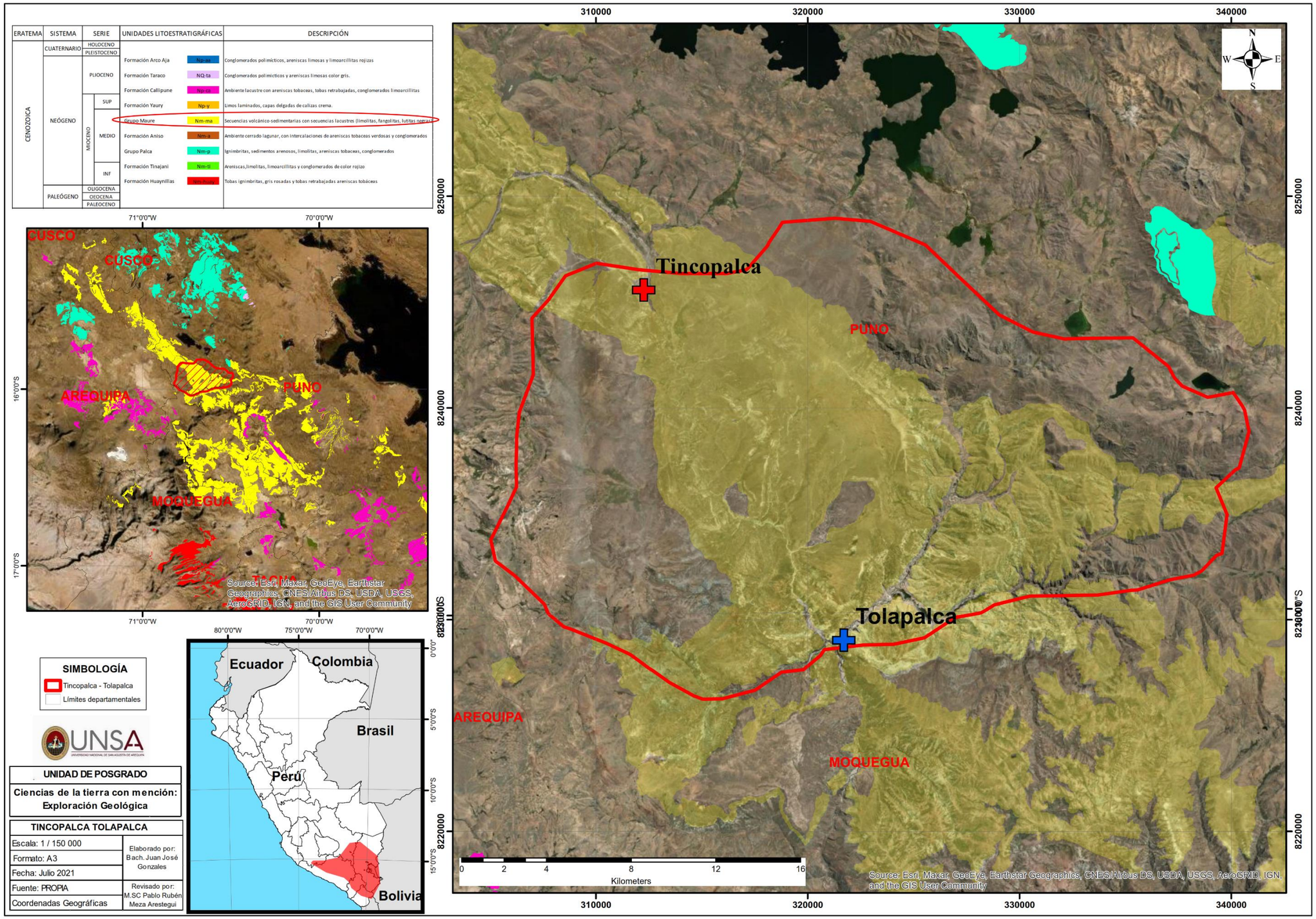


Figura 43. Mapa de ubicación de zonas prospectables: Tincopalca –Tolapalca. Con base en imagen satelital de Bing Maps (GEOCATMIN).

5.3.2. Área de Chojata.

Se encuentra ubicada en el departamento de Moquegua. En esta área (Fig.44) se han encontrado facies de yeso-anhidrita con espesores que superan los 300 m (Imagen 12). Lo que se recomienda en esta área es delimitar el afloramiento para tener una visión sobre su forma y dimensionamiento, a fin de desarrollar un trabajo a detalle buscando la parte depocentral de la cuenca.

Imagen 12. Foto de potentes capas de yeso.

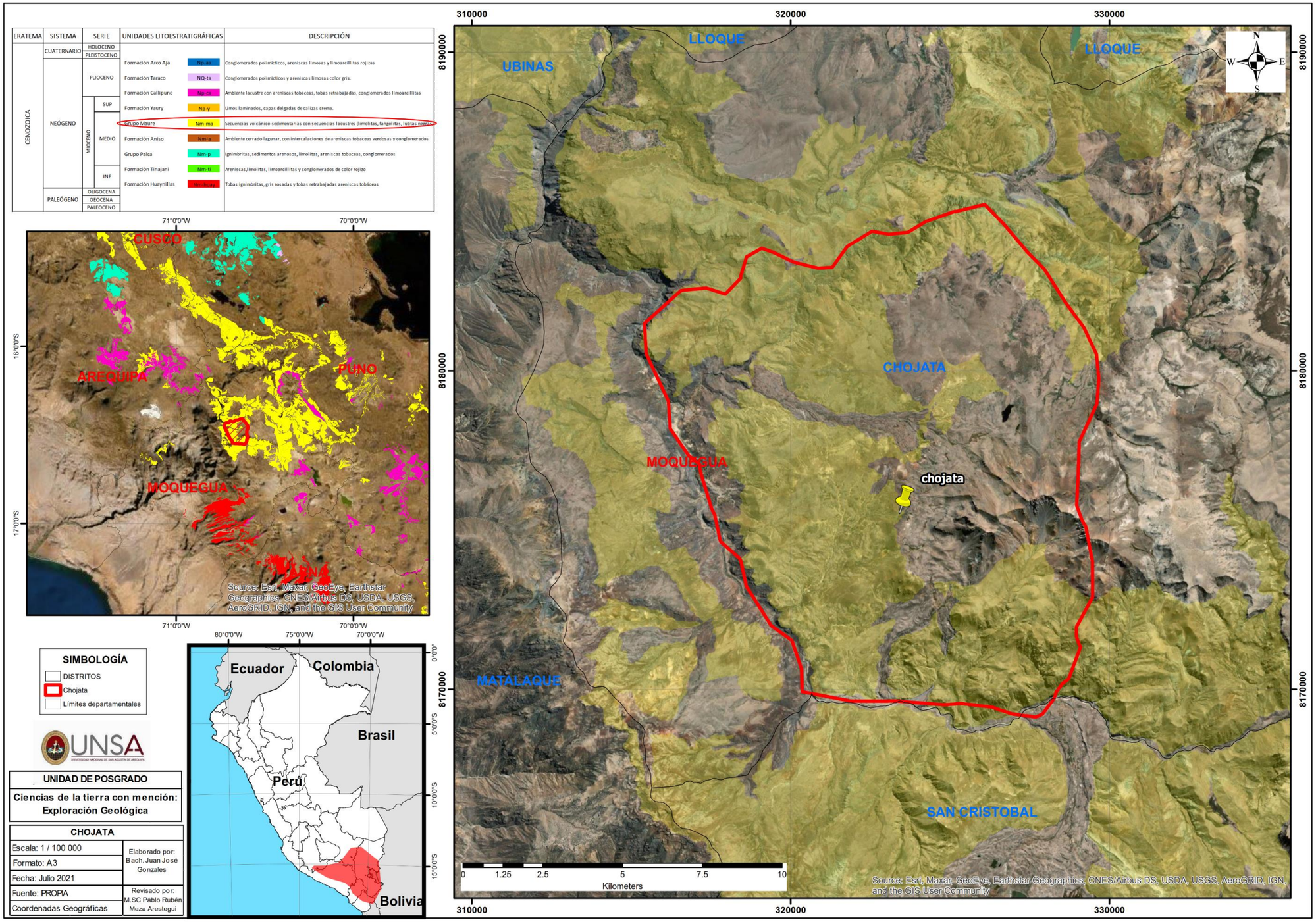


Figura 44. Mapa de ubicación de zonas prospectables: Chojata. Con base en imagen satelital de Bing Maps (GEOCATMIN).

5.3.3. Área Lagunillas – Canas.

Se encuentra ubicada en el departamento de Puno. Es un área elongada en dirección NW – SE (Fig.45), dados los altos valores de litio (540.8 - 676 ppm), estroncio (2603.24 – 3252.06 ppm) y arsénico (479.49 – 599.37 ppm) existentes en esta área; además de que dichas concentraciones se encuentran presente en su mayoría en las unidades sedimentarias del Grupo Maure y de la Formación Palca, a las cual se les considera como las unidades de mejores posibilidades para la ocurrencia de boratos neógenos, lo que hace de esta área una de las mejores para prospectar por boratos.

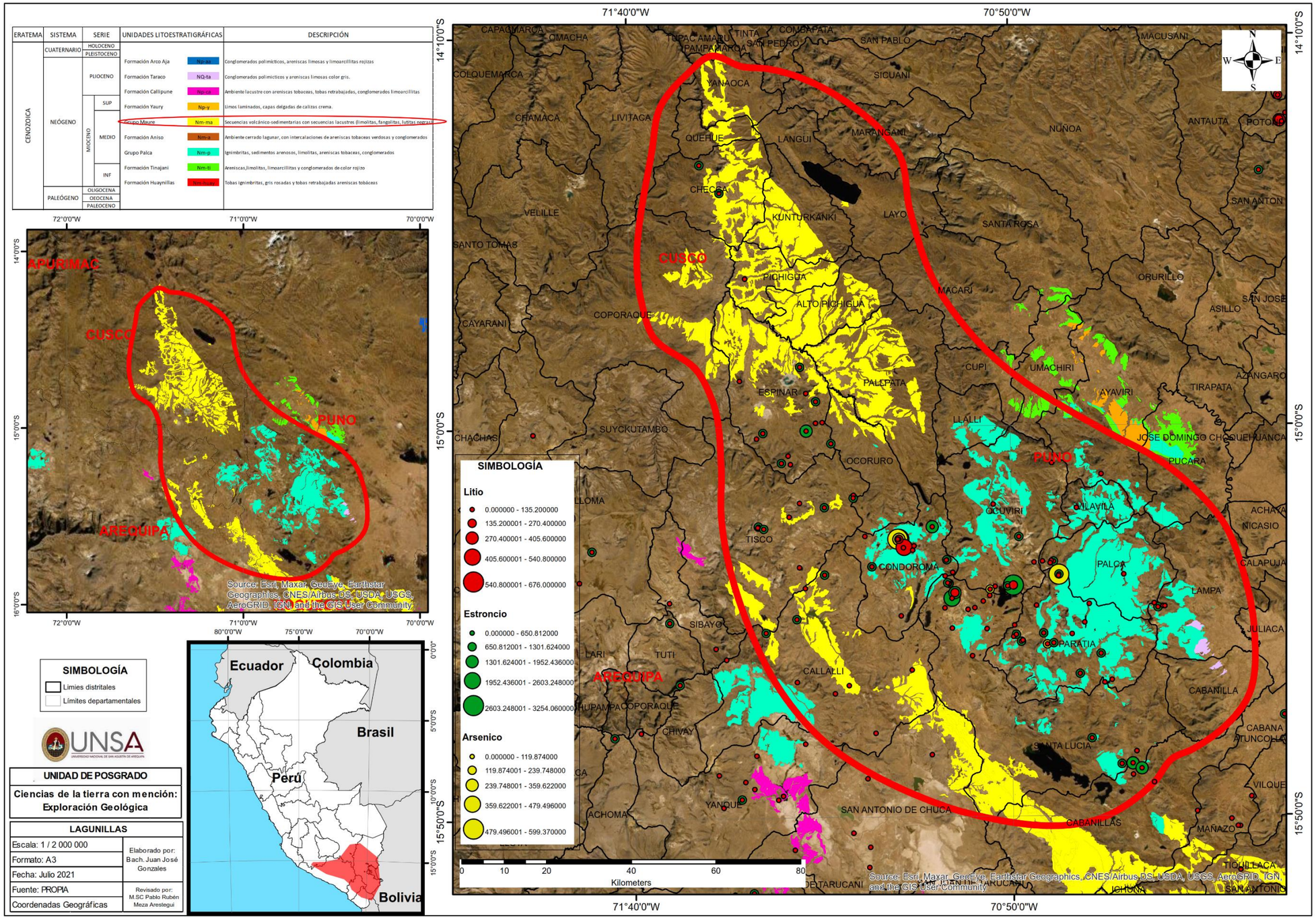


Figura 45. Mapa de ubicación de zonas prospectables: Lagunillas. Con base en imagen satelital de Bing Maps (GEOCATMIN).

CONCLUSIONES

1. El análisis de la información generada en el presente estudio ha permitido identificar 3 áreas prospectivas: Área Tincopalca -Tolapalca, Área Chojata y Lagunillas-Canas, destacando esta última por presentar las mejores posibilidades para la ocurrencia de boratos neógenos. Esto permitirá que en futuros estudios se determinen zonas específicas para el aprovechamiento de este recurso estratégico.
2. Se localizó, mediante el uso de información georreferenciada, bibliográfica e interpretación de las mismas formaciones sedimentarias lacustres del Neógeno – Cuaternario con posible ocurrencia de boro. Destacando el Grupo Maure con la mayor probabilidad de ocurrencia de Boratos.
3. La génesis de los boratos está relacionada con la concurrencia de varios factores asociados como son: 1) Vulcanismo activo; 2) Cuencas cerradas; 3) Clima árido; 4) Fuentes termales, por lo que está asociado a erupciones volcánicas ocurridas en el cuaternario y se ubicó en los diversos mapas presentados.
4. Se relacionó las dataciones radiométricas y se concluye que la edad de formación de los boratos en Sudamérica ubicándolas en dos periodos principales:
    i. Durante el Mioceno superior entre 7 y 5 Ma.
    ii. Durante el Cuaternario (< 75 ka al presente).

    En consideración a esta cronología las posibilidades de encontrar depósitos o yacimientos de boratos se da en rocas terciarias y/o en salares cuaternarios.
5. Se determinó que el área potencial para ocurrencia de boratos en el sur del Perú va desde la Laguna Parinacochas (Ayacucho) hasta Laguna Blanca en la frontera con Chile y asociado al arco volcánico, unidades sedimentarias lacustres desde el terciario al cuaternario, destacando las formaciones Maure, Palca y Capillune (formaciones terciarias).
6. Se generó una base de información como un aporte, para estudios a futuro que puedan conducir a descubrimientos de ocurrencias de boratos, para lo

cual, se han elaborado mapas de unidades litológicas favorables, edades radiométricas, geoquímica del litio, estroncio y arsénico.

RECOMENDACIONES

1. Continuar buscando y elaborando mayor información en torno a este tipo de recurso natural, tales como estudios geológicos en cuencas lacustres del terciario, actualizaciones de información sobre muestreos geoquímicos del INGEMMET.
2. Teniendo en cuenta que los Boratos son la principal fuente del elemento boro, es además considerado como un recurso estratégico, porque no es un elemento abundante. La producción de boratos en el mundo está limitada escasamente a una decena de países, siendo Turquía el principal productor, seguido de Estados Unidos y Rusia. En Sudamérica la mayor producción la tienen Argentina, Chile y Bolivia que suman más 40 depósitos. En el Perú se tiene un solo yacimiento que es la “Laguna Salinas”, por lo que realizar estudios específicos permitirá identificar nuevas áreas de este recurso.
3. Elaborar trabajos de geoestadística-geoquímica de boro y elementos guías, basados en información del INGEMMET, a fin de contribuir a la prospección de boratos en el Sur del país.
4. Realizar trabajos de campo en unidades sedimentarias lacustres favorables, ejecutando perfiles típicos y muestreos en una primera etapa para elevar el valor prospectivo de dichas formaciones.

BIBLIOGRAFÍA

1. Acosta, H., Mamani, M., Alván, A., Rodríguez J. y Cutipa, M. (2012). Geología de los cuadrángulos de la Yarada (37-u), Tacna (37-v) y Huaylillas (37-x). INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 145-112p.
2. Alonso, R.N. (2016). Prospección de boratos neógenos en el sur del Perú. XI Congreso Argentino de Geología Económica, 7-9/9/2016. Asociación Argentina de Geólogos Economistas. Actas, CD, 8 p. Salta.
3. Alonso, R.N. (2017). Guías de prospección de boratos y evaporitas neógenos en los Andes Centrales. Relatorio del XI Congreso Argentino de Geólogos Economistas, Asociación Argentina de Geólogos Economistas, CD, 20 pp, Salta.
4. Alonso, R.N. y Viramonte, J.G. (1985). Provincia Boratífera Centroandina. IV Congreso Geológico Chileno, Actas 2: 45-63, Antofagasta.
5. Araucano, E. (2008). Importancia de la concentración de los depósitos de boratos para el desarrollo económico de la región Puno. Congreso Nacional de Minería, 7, Trujillo, Perú, 26-29.
6. Bellido, E. (1979). Geología del cuadrángulo de Moquegua (35-u). INGEMMET, Boletín. Serie A: Carta Geológica Nacional, 15, 78p.
7. Betts, J. H. (2003). Ulexite [Fotografía]. Mindat.org: https://www.mindat.org/photo-9827.html
8. Boulangger, E., Chong, L. y Sipión C. (2019). Estudio de recursos de rocas y minerales industriales para la inclusión económica social y desarrollo en la región Cusco: sector meridional. INGEMMET, Boletín, Serie B: Geología Económica, 62, 157p., 1 mapa.
9. Cabana E. (2016). Optimización de la explotación de Ulexita complementando su extracción de corte y relleno por transferencia con Miniexcavadoras para la recuperación de potencias angostas de boratos presentes en los horizontes A y B en la Unidad Salinas INKABOR 2014. [tesis de grado, Universidad Nacional de Moquegua]. Repositorio institucional: http://repositorio.unam.edu.pe/

10. Callén, J. (2020). Hydroboracita con Celestina y Calcita [Fotografía]. Fabreminerals https://www.fabreminerals.com/specimens/ASI-asia-minerales.php?HideSold=1#TC89AM9
11. Celis, R. (2012). Caracterización geoquímica del sistema geotermal Termas de Puyehue-Aguas alientes, Región de los Lagos, Chile.
12. Cerpa, L., Cereceda, C., Torres, D., Muñoz, L., Aguilar, R., y Rodríguez, F. (2011). Geología del cuadrángulo de Condoroma 31-t. INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 143, 83p., 4 mapas.
13. Chong, G., Pueyo, J. J., & Demergasso, C. (2000). Los yacimientos de boratos de Chile. Revista geológica de Chile, 27(1), 99-119.
14. Cisneros, E. y Cisneros, S. (2021). Hydroboracite [Fotografía]. Mindat.org: https://www.mindat.org/photo-1157694.html
15. Cruz V., Víctor Vargas y Koji Matsuda (2010). Caracterización geoquímica de las fuentes termales en la zona geotermal de Borateras, Tacna. En: Congreso Peruano de Geología, 16, Lima, 2012. Resúmenes extendidos. Lima: Sociedad Geológica del Perú, 5 p.
16. Cruz, V. y Matsuda, K. (2012). Caracterización geoquímica de la zona geotermal de Calacoa, Moquegua. En: XVI Congreso Peruano de Geología, Lima, 23-26 setiembre. Resúmenes extendidos.
17. Cruz, V., Gonzales, K., Macedo, O., y Fournier, N. (2009). Caracterización geoquímica de las fuentes termales y frías asociadas al volcán Ubinas en el sur del Perú. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, 103, 265-281.
18. Dávila, D. (1991). Geología del cuadrángulo de Pacapausa (30-p). INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 41, 75p.
19. De la Cruz Bustamante, N. (1995). Geología de los cuadrángulos de Velille, Yauri, Ayaviri y Azángaro (30-s, 30-t, 30-u y 30-v). INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 58, 144p.
20. Díaz, A. y Ramírez, J. (2010). Estudio geológico-económico de rocas y minerales industriales de Arequipa y alrededores. INGEMMET, Boletín, Serie B: Geología Económica, 22, 158 p., 3 mapas.
21. Falcón, C., Moreno, G., y Combina, A. (2015). Evaluación de la Aguas Termales en el área de Santa Teresita, Provincia de La Rioja, Argentina. Serie correlación geológica, 31(1), 21-40.

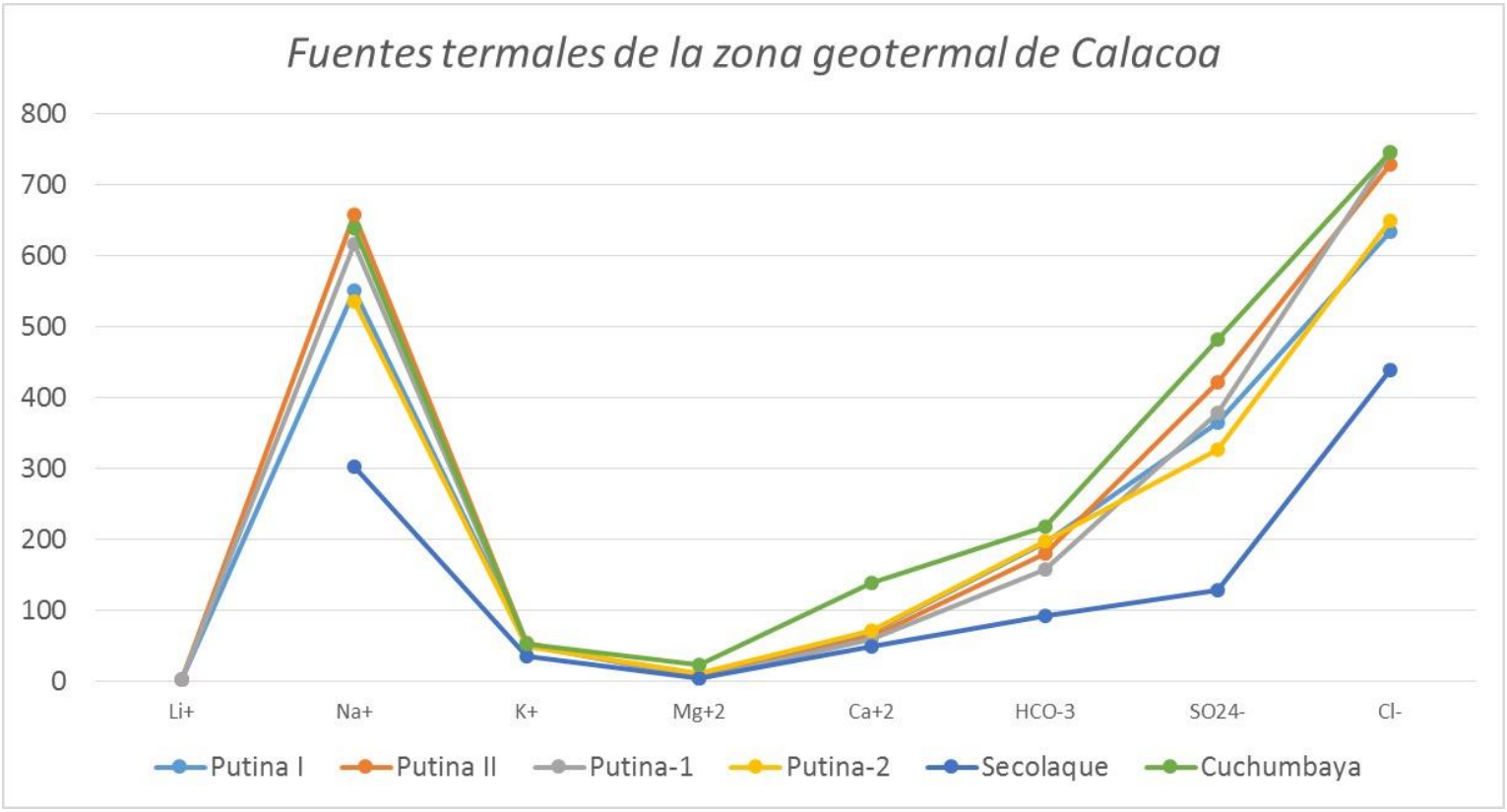
22. Fídel, L., Wolfgang, M. y Núñez, S. (1997). INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 15, 79 p., 2 mapas
23. García, H. (2021) Los minerales estratégicos: el ser o no ser de la descarbonización y transformación digital de la UE. Documento de Análisis IEEE.
24. García, W. (1978). Geología del cuadrángulo de Puquina, Omate, Huaitire, Mazo Cruz, Pizacoma (34-t, 34-u, 34-v, 34-x, 34-y). INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 29, 66p.
25. Garrett, D. E. (2004). Handbook of lithium and natural calcium chloride. Elsevier.
26. Gazulla, M., Gómez, M., Orduña, M. y Silva, G. (2011). Caracterización química, mineralógica y térmica de boratos naturales y sintéticos. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, ISSN 0366-3175, Vol. 44(1), 2005, 21-31.
27. Gómez, A. El vidrio borosilicato. http://www.caviplan.org.ar
28. Helvacı C (2012) Trip to Kışladağ (Uşak) Gold Mine, Kırka, and Emet Borate Deposits field guide. Post-Colloquium Field Trip Guide Book, International Earth Sciences Colloquium on the Aegean Region, IESCA 2012, Ízmir,Turkey, 41 pp.
29. Helvaci, C. (2015). Geological features of Neogene basins hosting borate deposits: an overview of deposits and future forecast, Turkey. Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 151(151), 169-215.
30. Helvacı, C. (2019). Turkish borate deposits: Geological setting, genesis and overview of the deposits. In Mineral Resources of Turkey (pp. 535-597). Springer, Cham.
31. Helvacı, C., & Palmer, M. R. (2017). Origin and distribution of evaporite borates: the primary economic sources of boron. Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology, 13(4), 249-254.
32. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET. (1995). Geología del Perú. Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 55, 177 p.
33. Kistler, R. B. y Helvaci, 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.

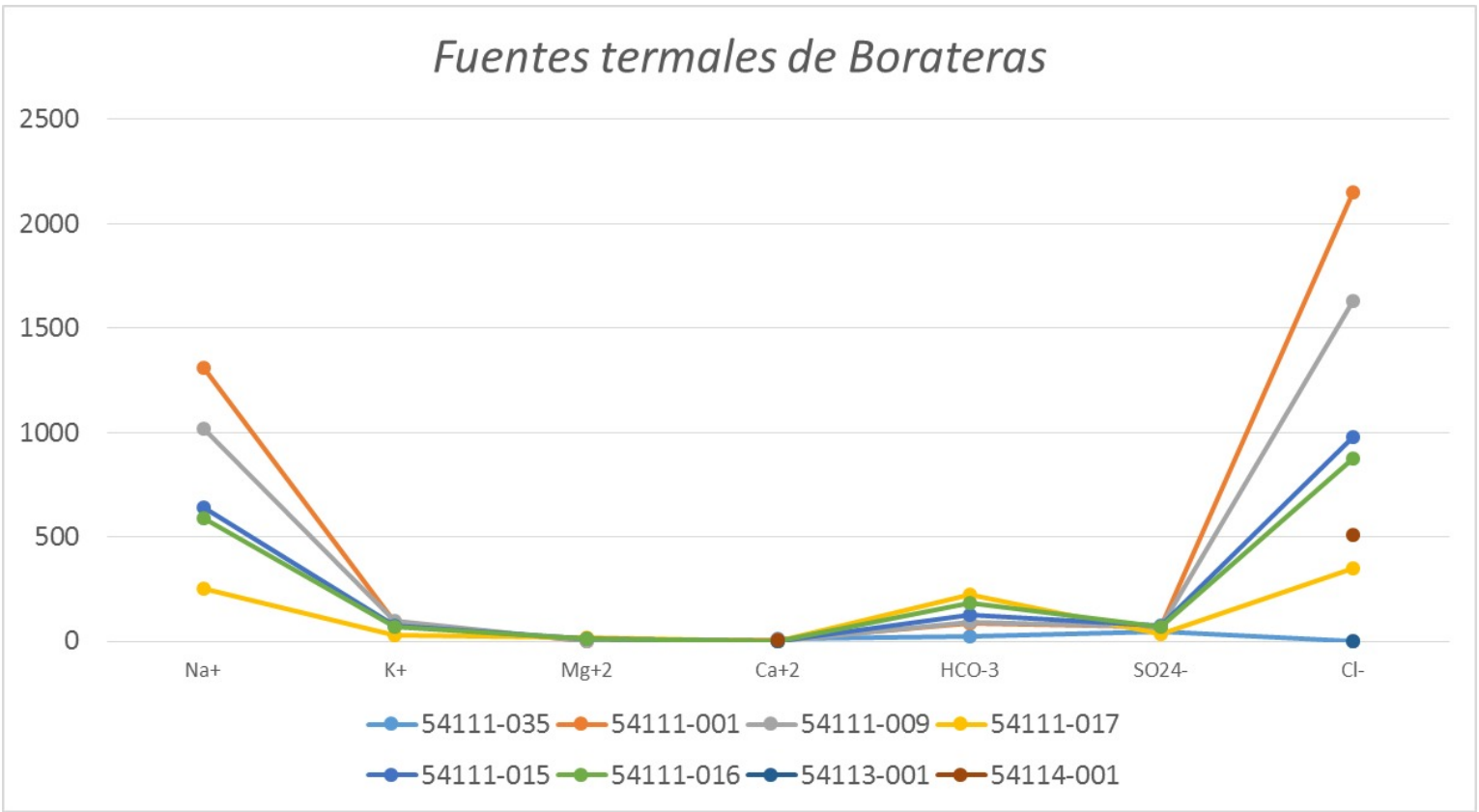
34. Lillo, J. (2003). Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas. Grupo de Estudios de Minería y Medio Ambiente.
35. López, P. L., Auqué, L. F., Garcés, I., y Chong, G. (1999). Características geoquímicas y pautas de evolución de las salmueras superficiales del Salar de Llamará, Chile. Revista geológica de Chile, 26(1), 89-108.
36. López, R et al. (2020. Lithium and brine geochemistry in the salars of the Southern Puna, Andean plateau of Argentina. Economic Geology, 115(5), 1079-1096.
37. Mollo R. (2014). Optimización de la explotación del mineral ulexita complementando su extracción de corte y relleno por transferencia con la recuperación selectiva de Boratos presentes en el Horizonte A. [tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio institucional: http://repositorio.unsa.edu.pe/
38. Mule Team Borax Rio Tinto. (2021) Los boratos en aplicaciones metalúrgicas, 2021.
39. Nicolli, H. et al. (1980). Geochemical characteristics of brines in evaporitic basins, Argentine Puna. Congreso geológico internacional. 26/1980/Paris; Fra; Orleans: B.R.G.M.; DA. 1980; vol. 2; pp. 786
40. Ortí, F. (1998). Boratos cálcico-sódicos de ambientes evaporíticos lacustres; aspectos sedimentológicos y diagenéticos generales. GEOGACETA, 20(21), 270-273.
41. Palacios, O., De la Cruz, J., De la Cruz, N., Klinck, B., Ellison, R. y Hawkins, M. (1993). Geología de la cordillera occidental y altiplano al oeste del lago Titicaca - sur del Perú (Proyecto Integrado del Sur) (31-t, 31-u, 31-v, 31-x, 31-y 32-s, 32-t, 32-u, 32-v, 32-x 32-y, 33-v, 33-x, 33-y, 33-z). INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 42, 257 p.
42. Peralta, Y. (2018). Caracterización geoquímica y geológica de sistemas geotermales de la Puna Norte.
43. Quispesivana, L., Navarro, P. y los miembros del INGEMMET. (2003). Memoria descriptiva de la revisión y actualización de los cuadrángulos de Caravelí (32-p), Chuquibamba (32-q), Chivay (32-s), Cailloma (31-s), Velille (30-s), Livitaca (29-s) y Pacapausa (30-p). INGEMMET, Memorias descriptivas, 48p., 6 mapas.

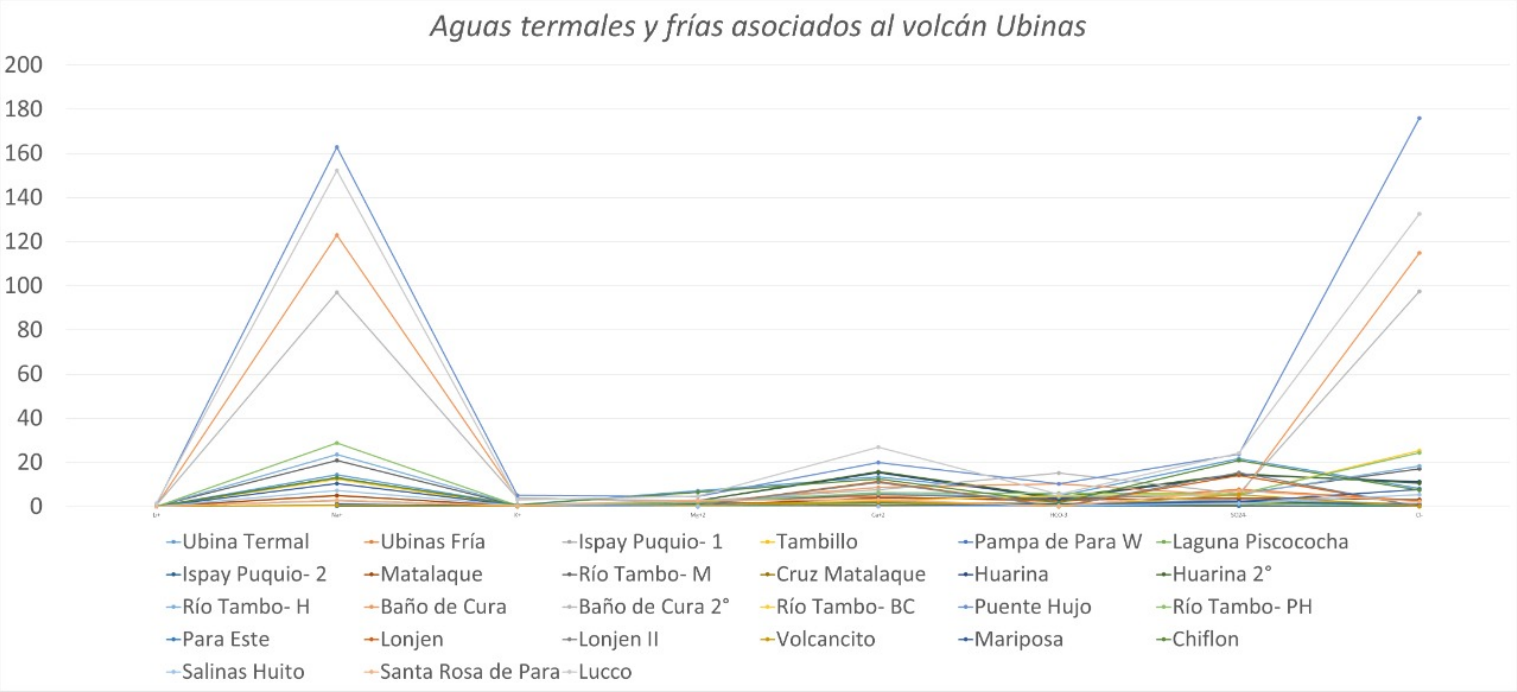
44. Rincón, J. (2006). Materias primas para la industria del vidrio. In Utilización de rocas y minerales industriales: [Alicante 4 de julio de 2005] (pp. 49-74). Universidad de Alicante.
45. Rock Currier. (2009). Borax [Fotografía]. Mindat.org: https://www.mindat.org/photo-237295.html
46. Rock Currier. (2009). Colemanite [Fotografía]. Mindat.org: https://www.mindat.org/photo-236284.html
47. Rodríguez, R., Sánchez, E., Choquehuanca, S., Fabián, C. y Del Castillo, B. (2020). Geología de los cuadrángulos de Puno (hojas 32v1, 32v2, 32v3, 32v4) y Ácora (hojas 32x1, 32x2, 32x3 y 32x4). INGEMMET, Boletín, Serie L: Actualización Carta Geológica Nacional (Escala 1: 50 000), 2, 109 p., 8 mapas.
48. Sanalea, J. (2016). Aplicación del método de explotación strip mining selectivo para optimizar rocas minerales industriales - unidad extractiva INKABOR SAC [tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio institucional: http://repositorio.unsa.edu.pe/
49. Sanchéz, A., Rosell, W., Raymundo, T. y los miembros del INGEMMET. (2000). Memoria explicativa de la revisión geológica en los cuadrángulos de Punta de Bombón (35-s), Clemesí (35-t), Ilo (36-t), Locumba (36-u), La Yarada (37-u), Tacna (37-v), Huaylillas (37-x), Juli (33-y), Pizacoma(34-y) e Isla Anápia (33-z). INGEMMET, Memorias descriptivas, 40p., 10 mapas.
50. Sanchéz, A., Zapata, A. y los miembros del INGEMMET (2003). Memoria descriptiva de la revisión y actualización de los cuadrángulos de sicuani (29-t), nuñoa (29-u), macusani (29-v), limbani (29-x), sandia (29-y), san ignacio (29-z), yauri (30-t), azángaro (30-v), putina (30-x), la rinconada (30-y), condoroma (31-t), ocuviri (31-u), juliaca (31-v), callalli (32-t), y ácora (32-x). INGEMMET, Memorias descriptivas, 55p., 15 mapas.
51. Science 19. Borax y anticongelante. https://es.science19.com/borax-antifreeze-1179
52. SEGEMAR y UNSAM. (2002). Boratos. Seminario de estudios sobre el ciclo minerales – materiales, 8.
53. Subsecretaría de Minería de la Nación. Diez razones para invertir en minería. http://www.minerÌa.gov.ar

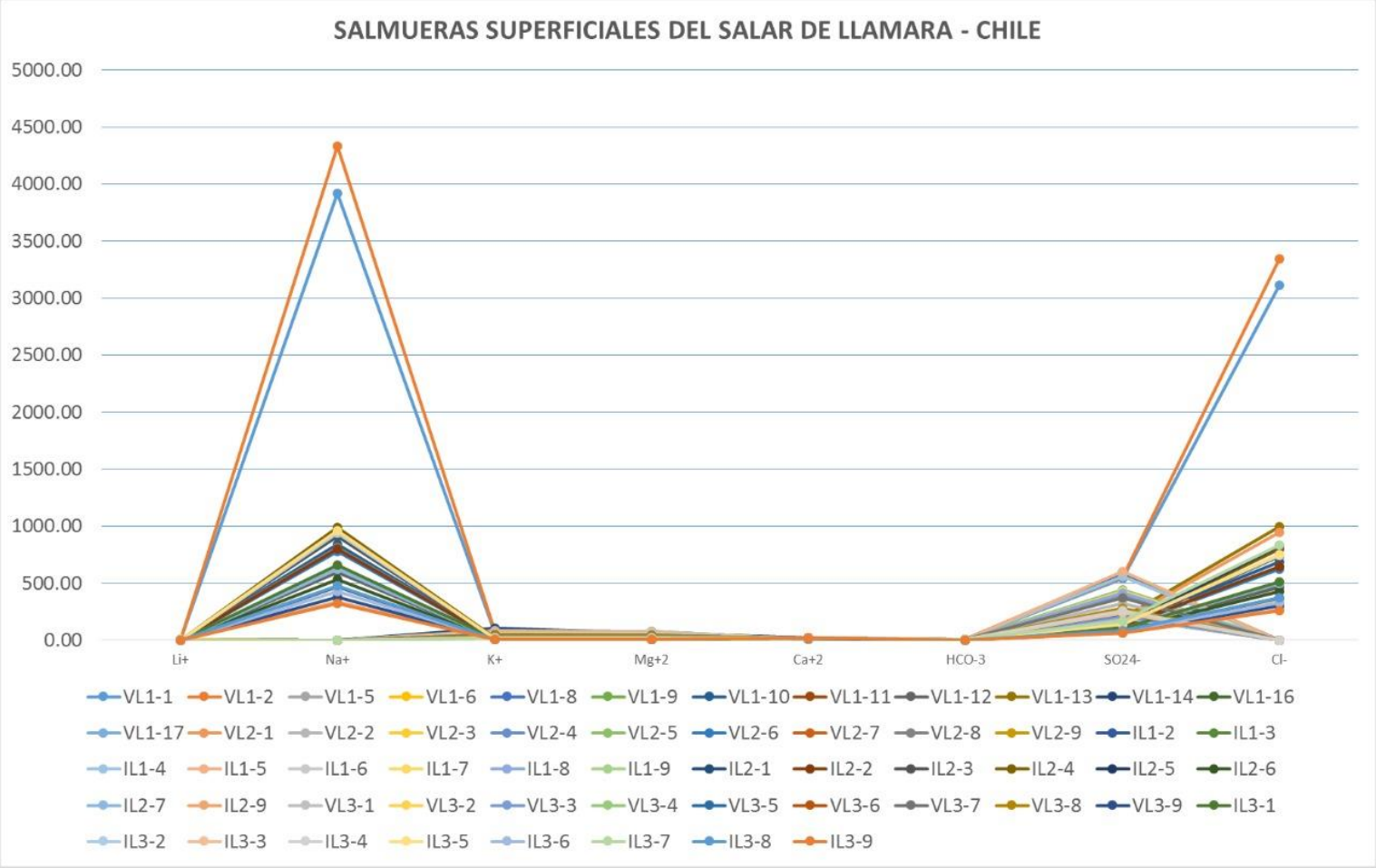
54. Terán, J. Inyoite [Fotografía]. MVM: http://micromineralmuseum.org/museum/index.php?id_product=162&controller=product&id_lang=3
55. Vargas, L. (1970). Geología del cuadrángulo de Arequipa 33-s. INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 24, 64p.
56. Viteri, E.; Sánchez, M. (1972). Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN), ed. El Salar de Laguna Blanca, informe geológico preliminar, Arica. Informe inédito. Arica. p. 11.
57. Warren, J. K. (2016). Non-potash salts: Borates, Na-sulphates, Na-carbonate, lithium salts, gypsum, halite and zolites. In Evaporites (pp. 1187-1302). Springer, Cham.
58. Wilson, John J. y García, W. (1962). Geología de los cuadrángulos de Pachía y Palca (Hojas 36-v y 36-x). Comisión Carta Geológica Nacional, Boletín, 4, 82p.

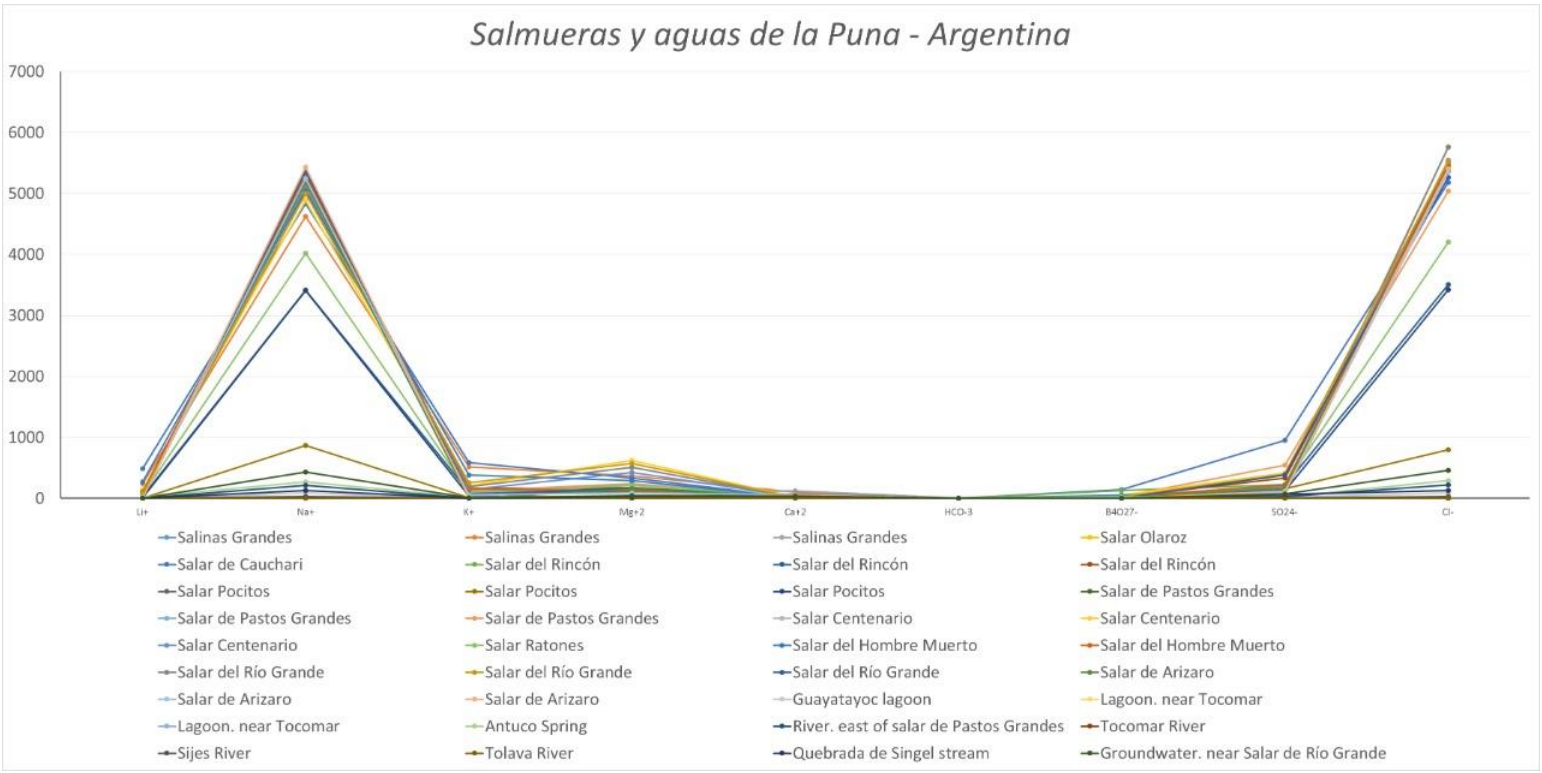
ANEXOS


Fuentes termales de la zona geotermal de Calacoa
800
700
600
500
400
300
200
100
0
Li+
Na+
K+
Mg+2
Ca+2
HCO-3
SO24-
Cl-
Putina I
Putina II
Putina-1
Putina-2
Secolaque
Cuchumbaya


Fuentes termales de Borateras
2500
2000
1500
1000
500
0
Na+
K+
Mg+2
Ca+2
HCO-3
SO24-
Cl-
54111-035
54111-001
54111-009
54111-017
54111-015
54111-016
54113-001
54114-001


Aguas termales y frías asociados al volcán Ubinas
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
Ubina Termal
Ubinas Fría
Ispay Puquio- 1
Tambillo
Pampa de Para W
Laguna Piscococha
Ispay Puquio- 2
Matalaque
Río Tambo- M
Cruz Matalaque
Huarina
Huarina 2°
Río Tambo- H
Baño de Cura
Baño de Cura 2°
Río Tambo- BC
Puente Hujo
Río Tambo- PH
Para Este
Lonjen
Lonjen II
Volcancito
Mariposa
Chiflon
Salinas Huito
Santa Rosa de Para
Lucco


SALMUERAS SUPERFICIALES DEL SALAR DE LLAMARA - CHILE
5000.00
4500.00
4000.00
3500.00
3000.00
2500.00
2000.00
1500.00
1000.00
500.00
0.00
Li+
Na+
K+
Mg+2
Ca+2
HCO-3
SO24-
Cl-
VL1-1
VL1-2
VL1-5
VL1-6
VL1-8
VL1-9
VL1-10
VL1-11
VL1-12
VL1-13
VL1-14
VL1-16
VL1-17
VL2-1
VL2-2
VL2-3
VL2-4
VL2-5
VL2-6
VL2-7
VL2-8
VL2-9
IL1-2
IL1-3
IL1-4
IL1-5
IL1-6
IL1-7
IL1-8
IL1-9
IL2-1
IL2-2
IL2-3
IL2-4
IL2-5
IL2-6
IL2-7
IL2-9
VL3-1
VL3-2
VL3-3
VL3-4
VL3-5
VL3-6
VL3-7
VL3-8
VL3-9
IL3-1
IL3-2
IL3-3
IL3-4
IL3-5
IL3-6
IL3-7
IL3-8
IL3-9


Salmueras y aguas de la Puna - Argentina
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
Li+
Na+
K+
Mg+2
Ca+2
HCO-3
B4O27-
SO24-
Cl-
Salinas Grandes
Salinas Grandes
Salinas Grandes
Salar Olaroz
Salar de Cauchari
Salar del Rincón
Salar del Rincón
Salar del Rincón
Salar Pocitos
Salar Pocitos
Salar Pocitos
Salar de Pastos Grandes
Salar de Pastos Grandes
Salar de Pastos Grandes
Salar Centenario
Salar Centenario
Salar Centenario
Salar Ratones
Salar del Hombre Muerto
Salar del Hombre Muerto
Salar del Río Grande
Salar del Río Grande
Salar del Río Grande
Salar de Arizaro
Salar de Arizaro
Salar de Arizaro
Guayatayoc lagoon
Lagoon. near Tocomar
Lagoon. near Tocomar
Antuco Spring
River. east of salar de Pastos Grandes
Tocomar River
Sijes River
Tolava River
Quebrada de Singel stream
Groundwater. near Salar de Río Grande