



**Universidad
Andrés Bello**

Universidad Nacional Andrés Bello
Facultad de Ingeniería
Geología

**Geología y control hidroquímico del salar Aguas
Calientes Sur, II Región de Antofagasta, Chile: relación
con el desarrollo de sus facies evaporíticas.**

Memoria para optar al título de geólogo

Román Karczewski Landeta

Profesor guía

Luis Pedro Ribba Gajardo

Comisión

Ximena Julia Contardo Berrios
Harry Héctor Esterio Gallardo
Luis Pedro Ribba Gajardo

**Viña del Mar-Chile
2017**

Resumen

El salar Aguas Calientes Sur se caracteriza por la poca cantidad de información respecto a su comportamiento geológico e hidrogeológico debido a que es un área protegida. Sin embargo, de acuerdo con trabajos previos y junto con el uso de metodologías de carácter remoto y nuevos datos obtenidos en terreno, el depósito salino está geológicamente caracterizado por situarse en una cuenca rodeada principalmente por material volcánico y sedimentario de edad Mioceno Superior-Holoceno, presentando una composición mineralógica mixta y cuya distribución se basa en la ocurrencia de dos facies principales, una de mayor distribución superficial y conformada por halita, yeso, nitratos, boratos y material detrítico, seguida por una segunda facies constituida por un alto enriquecimiento en sulfatos (yeso y otros), concentraciones subordinadas de carbonatos, cloruros y material detrítico de origen volcánico. Tal rasgo, así como el comportamiento hidroquímico predominantemente sódico-clorurado del depósito salino, podrían estar relacionados tanto con las variaciones climáticas dentro del sector altoandino como bien al aporte iónico de las sales evaporíticas producto de procesos continuos de disolución y precipitación.

Abstract

The salar of Aguas Calientes Sur is characterized by the limited amount of information regarding their geological and hydrogeological behavior because it's a protected area. However, according to previous work and together with the use of remote methodologies and new field data, the saline deposit is geologically characterized to be in a basin surrounded of Late Miocene-Holocene volcanic and sedimentary material, presenting a mixed mineralogical composition and which it's distribution is based in the occurrence of two main facies, one with a higher superficial distribution and conformed by halite, gypsum, nitrates, borates and detritic material, followed by a second facies constituted by a higher sulfate enrichment (gypsum and others), subordinated carbonate and chloride concentrations and detritic material with volcanic support. Such feature, as well as the dominant sodic-chloride hydrochemical behavior of the deposit, could be related both to climatic variations inside of the High-Andean sector and to the ionic contribution of the evaporitic salts product of continuous processes of dissolution and precipitation.

Abreviaciones

CORFO: Corporación de Fomento de la Producción. Chile.

LCE: Lithium Carbonate Equivalent

SQM: Soquimich. Chile.

MUSD: Millones de dólares estadounidenses.

Mton.: Millones de toneladas.

ORSTOM: Office De La Recherche Scientifique Et Technique Outre-Mer, Francia.

UCN: Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile.

DGA: Dirección General de Aguas.

DRX: Difracción de Rayos X.

USGS: United States Geological Survey.

Sernageomin: Servicio Nacional de Geología y Minería.

ETH: Frío de Tundra por Altura.

ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer.

L7 ETM+: Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper.

SRGIS: Sensores Remotos & GIS.

SAM: Spectral Angle Mapper (Mapeo del Ángulo Espectral).

OLI-TIRS: Operational Land Imager-Thermal Infrared Sensor.

CVZ: Complejo Volcánico de los Andes Centrales.

TDS: Total de Sólidos Disueltos.

Agradecimientos

Dentro de todos estos años, agradezco intensamente el apoyo incondicional de mi familia, mis padres, Eliette y Stefano, mis amados hermanos, monino Enzo y monina Chiara, mis abuelos, Gilda, Valeria, Giorgio y Pedro, tíos, primos y todos aquellos quienes desearon e influyeron en mi progreso durante este largo trayecto que veía imposible de completar. A mis amigos del alma y los cuales fueron confidentes hasta el día de hoy; Yuval y Claudio, gracias totales por su apoyo, momentos y risas eternas. A Pepa y Juan, quienes también dieron de su cariño y motivación para llevar a cabo mis logros personales. Agradezco también y sin lugar a duda a cada uno de mis compañeros que compete a esta generación, en especial a Nicolás y Rudolph, quien, a pesar de las circunstancias, mostraron empatía y apoyo en toda situación. Agradezco también la gentileza de Sernageomin, Corfo y Albemarle por su aporte a la realización de este proyecto. A mi profesores, Luis, Harry, Ximena y Jaime por su apoyo, sobre todo a Luis, por su paciencia, amabilidad, sabiduría; y tal como Carl Sagan lo diría: “si hay algo que explicar, pensar en todas las maneras diferentes en que puedas hacerlo”. Agradezco también a Rodrigo y Maydely por su hospitalidad y motivación a finalizar esta etapa durante la estancia en San Pedro de Atacama.

Sin embargo, este trabajo va dedicado personalmente a tres personajes importantes: mi abuelo; Pedro, quien, a pesar de su partida, su esencia me mantuvo a flote en los peores momentos; mi abuela Gilda, apañadora, mi cómplice y por sobre todo, mi segunda madre, a quien admiro y amaré por siempre su voluntad de impulsarme hacia adelante sin importar las barreras; y a mi padre, Stefano, quien, gracias a su esfuerzo, perseverancia y apañe, estas palabras no habrían podido ser escritas.

Abuelo querido, padre, madre, nonos, hermanos, primos, tíos y amigos míos,
Lo logramos.



En memoria de Pedro "Pelao" Alfredo Landeta Verdi.

“El conocimiento es Nendo Dango”. J.A.

Índice de contenidos

1. Introducción	16
1.1 Consideraciones generales	16
1.2 Planteamiento del problema	19
1.3 Área de estudio	21
1.4 Objetivos	23
1.4.1 Objetivo general	23
1.4.2 Objetivos específicos	23
1.5 Hipótesis de trabajo	23
2. Marco Teórico	24
2.1 Marco Geológico Regional	24
2.2 Marco Tectónico	27
2.3 Marco Geomorfológico	31
2.3.1 Unidades Morfoestructurales de la II región	33
2.4 Marco Climático	36
3. Metodologías de trabajo	37
3.1. Recopilación de material bibliográfico	37
3.2 Caracterización geomorfológica	38
3.3 Tratamiento de imágenes satelitales multiespectrales	38
3.4 Correlación y validación geológica preliminar con el uso de imágenes satelitales multiespectrales e información bibliográfica	39
3.5 Caracterización hidroquímica	39
4. Caracterización Geomorfológica	40
4.1 Generalidades	40
4.2 Unidades fisiográficas de la cuenca Salar Aguas Calientes Sur	40

4.2.1 Relieves Volcánicos	43
4.2.2 Relieves de Acumulación	46
4.3 Características morfométricas de la cuenca	47
5. Tratamiento de imágenes satelitales.....	50
5.1 Generalidades sobre la percepción remota	50
5.2 Aplicación de imágenes satelitales multiespectrales	52
5.3 Recopilación de datos	53
5.4 Pretratamiento de las imágenes multiespectrales	55
5.5 Tratamiento de datos obtenidos en terreno	77
5.6 Análisis de Difracción de Rayos X en muestras de costra salina	83
6. Geología del salar Aguas Calientes Sur.....	85
6.1 Consideraciones generales	85
6.2 Descripción de las unidades geológicas	85
6.3 Antecedentes Petrográficos de las rocas volcánicas y sedimentarias	95
7. Antecedentes hidroquímicos del salar Aguas Calientes Sur	103
7.1 Toma de muestras de agua superficial	103
7.2 Antecedentes de los estudios hidroquímicos	105
7.3 Análisis de muestras de agua superficial obtenidas en terreno	112
8. Discusión	113
8.1 Correlación de la geología en la cuenca de estudio a partir del uso de imágenes satelitales multiespectrales	113
8.2 Distribución de los minerales evaporíticos	122
8.3 Modelos esquemáticos de la signatura deposicional de evaporitas primarias y secundarias	124
8.4 Características morfológicas de la superficie salina	139

8.5 Influencias por parte de la hidroquímica en las vertientes y lagunas del salar	142
9. Conclusiones	150
10. Recomendaciones	152
11. Bibliografía	154
12. Sección de Anexos	159

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación y rutas de acceso al área de estudio (delimitadas en color celeste y en color verde oscuro. Fuente: Google Earth Pro.	22
Figura 2. Mapa geológico regional del sector alto andino de la región de Antofagasta. Modificado de la hoja Toconao (Gardeweg & Ramírez, 1982), escala 1:170.000.	26
Figura 3. Perfil estructural esquemático de la II región de Antofagasta, representando las provincias morfoestructurales y el régimen estructural dominante. Modificado de Frutos, 1973.	28
Figura 4. Perfil esquemático sobre el arreglo de las placas tectónicas de la zona sur de los Andes Centrales durante el Ciclo Pre-Andino. Tomado de Reutter et al. 1900.	28
Figura 5. Evolución tectónica de los Andes Centrales a la latitud de Antofagasta (23 – 24°S) durante el Ciclo Andino. Tomado de Mpodozis y Ramos, 1990.	29
Figura 6. Perfil geológico esquemático de la II región de Antofagasta, representando las unidades lito-estratigráficas dominantes a lo largo del margen chileno. Modificado de Frutos, 1973.	30
Figura 7. Visualización del Lineamiento Calama-Olacapato-El Toro (color verde claro) y lineamientos de centros volcánicos (color amarillo) en la cuenca Salar Aguas Calientes Sur, mediante el uso de una imagen satelital Landsat TM-2, dispuesto entre la provincia de salta, Argentina y la II región de Antofagasta. Área de estudio delimitada en rojo.	31
Figura 8. Localización de los Andes Centrales en relación con Sudamérica y visualización de los elementos tectónicos mayores que rigen hacia el oeste del continente. La imagen a la derecha representa la distribución de las unidades morfoestructurales mayores y rasgos tectónicos principales e influyentes en la Cordillera Andina. (1) Cordillera de la Costa, (2) Depresión Central y (3) Precordillera y Cordillera Occidental. Área de estudio delimitada en color rojo. Modificado de Charrier et al. 2007	32
Figura 9. Perfil Esquemático a la latitud de Mejillones, II región de Antofagasta, mostrando las principales provincias morfoestructurales. Área de estudio delimitada en color rojo. Modificado de Charrier et al. 2007.	33
Figura 10. Visualización de los Andes Centrales a partir de un modelo de elevación digital. Nota a partir de las diferencias de relieve, la identificación de las cuencas del Altiplano y la Puna. Tomado de Allmendinger, 1997.	35
Figura 11. Clasificación climática de Wladimir Köppen aplicada al continente chileno, teniendo para el área de estudio (delimitado en rojo) un sistema climático tipo ETH. Fuente: PUC, Chile.	37
Figura 12. Modelo de elevación digital de la cuenca Salar Aguas Calientes Sur (color azul oscuro), cuyas tonalidades rojizas representan los sectores de mayor altitud. Área de estudio delimitada en color negro. Fuente: Global Mapper 16.	41
Figura 13. Mapa geomorfológico representativo de la cuenca Salar Aguas Calientes Sur.	42
Figura 14. Modelo Conceptual del proceso de deflación. Tomado de Bailey et al. 2007.	45

Figura 15. Representación tridimensional de la cuenca salar Aguas Calientes Sur, junto con datos de los parámetros morfológicos principales de estudio. Las tonalidades rojizas y azules reflejan zonas de alta y baja pendiente, respectivamente. Depósito salino delimitado en bordeado interlineado. Factor de elevación: 3. Fuente: ArcScene.	48
Figura 16. Mapa topográfico con ubicaciones de los principales afluentes del salar Aguas Calientes Sur.....	49
Figura 17. Esquema representativo del sistema de percepción remota con sus respectivos procesos. (A) Emisión de la luz visible por vía aérea, (B) reflexión de una porción de luz visible, (C) emisión propia de radiación, (D) captación de la radiación por un sensor aéreo o espacial (E), (F) generación de una fotografía aérea, (G) tratamiento de la información en una estación receptora, (H) generación de una imagen satelital digital. Tomado de Hernández, 2011.	51
Figura 18. Modelo de la Radiación Electromagnética y sus componentes principales.	52
Figura 19. Visualización del salar Aguas Calientes Sur mediante una imagen Landsat 7 ETM+ pretratada y corregida. Ambos elementos con alta reflectancia corresponden al salar de Capur hacia el W y la laguna Tuyajto hacia el E del salar. Fuente: ArcGis 10.	59
Figura 20. Visualización del salar Aguas Calientes Sur con la imagen ASTER L1T pretratada y corregida. Notar la visualización más detallada de los cuerpos de agua, a diferencia de la imagen Landsat 7 ETM+. Fuente: ArcGis 10.3.	60
Figura 21. Visualización del salar Aguas Calientes Sur con la imagen Landsat 8 OLI-TIRS pretratada y corregida. Fuente: ArcGis 10.3.	61
Figura 22. Identificación de cuerpos enriquecidos en yeso por medio de la combinación RGB 145 en Landsat 7 ETM+. Notar la alta reflectancia en la porción central del salar de Capur ubicado al W del salar Aguas Calientes Sur y los bordes de la laguna Tuyajto. Puntos de estudio A y B marcados en color naranja. Fuente: ArcGis 10.3.	64
Figura 23. Comparación entre las similitudes en reflectancia para los sensores Worldview, ASTER y Landsat. Notar la gran aproximación del espectro de una imagen Worldview -3 respecto al espectro de minerales como alunita, epidota, muscovita y cuarzo. Tomado de Lattus, 2016.	65
Figura 24. Análisis entre la firma espectral del pixel del punto de estudio A y la firma espectral del yeso obtenido de la librería espectral jpl1. Coordenadas: UTM WGS84 (19H) 636135-7369555. Imagen Landsat 7 ETM+. Fuente: ENVI Classic 5.3....	65
Figura 25. Análisis entre la firma espectral de un pixel del punto de estudio B y la firma espectral del yeso obtenido de la librería espectral jpl1. Coordenadas: UTM WGS84 (19H) 637545-7368865. Imagen Landsat 7 ETM+. Fuente: ENVI Classic 5.3.	66
Figura 26. Identificación de cuerpos enriquecidos en yeso por medio de la combinación RGB 751 en Landsat 7 ETM+. El yeso se presenta en tonalidades azul turquesa, principalmente en el miembro norte del salar Aguas Calientes Sur y de manera local, en sus bordes y en el miembro sur. Fuente: ArcGis 10.3.	68
Figura 27. Identificación de cuerpos enriquecidos en yeso por medio de la combinación RGB 345 en Landsat 7 ETM+. El yeso se presenta en tonalidades amarillo-anaranjadas, realizando su presencia en los miembros norte, sur y considerablemente en los bordes del salar. Fuente: ArcGis 10.3.	69
Figura 28. Identificación de coberturas enriquecidos en sulfatos por medio de la combinación RGB 567 en Landsat 8 OLI-TIRS. El yeso se presenta en tonalidades amarillo-anaranjadas, siendo homólogo para los salares de Atacama, Quisquiró y del Laco (Flahaut et al. 2016). Fuente: ArcGis 10.3.	70
Figura 29. Mapa topográfico con la distribución de muestras de sales (triángulos rojos) y aguas (triángulos amarillos). El primer mineral mencionado en la tabla de muestras con realización de análisis DRX representa la sal más abundante para cada muestra estudiada. Modificado de Troncoso y Ercilla. 2016.	71
Figura 30. Comparación entre la firma espectral del punto de muestreo J5L1R3Z1 (Flahaut et al. 2016) y las firmas de aquellos minerales detectados por el análisis DRX. Notar la buena correlación entre la firma de la calcita (verde) y el punto de estudio	72
Figura 31. Comparación entre la firma espectral del punto de muestreo J5L1R3Z2 (Flahaut et al. 2016) y las firmas de aquellos minerales detectados por el análisis DRX. Notar la buena correlación entre la firma de la calcita (verde) y el punto de estudio (rojo) Coordenadas: UTM WGS84 (19H) 633989-7348720. Fuente: ENVI Standard 5.3.	73

Figura 32. Comparación entre la firma espectral del perfil obtenido en el punto de muestreo MS-OEH-79 (Troncoso y Ercilla, 2016) y las firmas de aquellos minerales detectados por el análisis DRX. Coordenadas: UTM WGS84 (19H) 632091-7354216. Fuente: ENVI Standard 5.3.	74
Figura 33. Comparación entre la firma espectral del perfil obtenido en el punto de muestreo MS-OEH-80 (Troncoso y Ercilla, 2016) y las firmas de aquellos minerales detectados por el análisis DRX. Coordenadas: UTM WGS84 (19H) 636299-7353193. Fuente: ENVI Standard 5.3.	74
Figura 34. Comparación entre la firma espectral del perfil obtenido en el punto de muestreo MS-OEH-84 (Troncoso y Ercilla, 2016) y las firmas espectrales del yeso y nitrato. Coordenadas: UTM WGS84 (19H) 632262-7354263. Fuente: ENVI Standard 5.3.	75
Figura 35. Mapa de integración espectral a partir de las muestras de costra salina obtenidas por Troncoso y Ercilla, 2016 y Flahaut et al. 2016. Fuente: ArcGis 10.3.	76
Figura 36. Identificación de cuerpos locales de material polvoriento con tonalidad blanquecina en la falda de la Unidad Geológica II, margen occidental del salar Aguas Calientes Sur.	77
Figura 37. Visualización de la costra salina en el sector centro-sur, margen occidental del Salar Aguas Calientes Sur. En color rojo se identifica la textura globular en las sales, acompañadas del material polvoriento de tonalidad blanquecina. El afloramiento de la Unidad Geológica III cubierta por la costra salina se encuentra delimitado en color amarillo.	78
Figura 38. Vista norte (a) y sur (b) de las geoformas poligonales en el sector centro-sur del Salar Aguas Calientes Sur.	79
Figura 39. (a) Visualización de la actividad orgánica registrada en niveles arenosos a limosos de tonalidad parda y oscura (presencia de tapetes microbianos). Notar la proliferación de biota al avanzar hacia el centro del afluente. Sector centro-sur del Salar Aguas Calientes Sur. (b) Identificación de eflorescencia de sales caracterizadas por presentar una tonalidad amarillenta y de mal olor, siendo posiblemente una acumulación subordinada de azufre. Sector centro-sur del Salar Aguas Calientes Sur.	79
Figura 40. (a) Visualización de la superficie salina con una capa saturada en aguas subterráneas por capilaridad. (b) Identificación de una capa superficial de 2 a 5 cm de sales evaporíticas con tonalidad blanquecina y textura globular, cubriendo una sub-capa de tonalidad parda y aspecto arenoso a limoso en torno a su granulometría.	80
Figura 41. Mapa topográfico con la obtención de muestras de costra salina y muestras de agua superficial.	81
Figura 42. (a) Sector de obtención de la muestra ACS-SC-001 (UTM (19H) 632824-7347489, 3946 msnm). (b) Sector de obtención de la muestra ACS-SC-002 (UTM (19H) 632871-7347454, 3947 msnm). La muestra fue extraída a partir de la calicata realizada en el sector centro-sur del salar.	82
Figura 43. (a) Visualización de la superficie evaporítica con características físicas similares a la superficie salina en que se obtuvo la muestra ACS-SC-002. Notar la actividad orgánica presente en esta capa evaporítica, siendo un lugar próximo a un manantial. Sector centro-sur del Salar Aguas Calientes Sur, margen oriental. (b) Identificación de la capa evaporítica con características similares a la superficie en que se obtuvo la muestra ACS-SC-001. Sector centro-sur del Salar Aguas Calientes Sur, margen oriental.	82
Figura 44. Visualización del punto de obtención de la muestra ACS-SC-003. Sector centro-sur del salar Aguas Calientes. Margen oriental.	83
Figura 45. Discriminación de las unidades geológicas presentes en la cuenca salar de Aguas Calientes Sur por medio de la combinación RGB 742 en Landsat 8 OLI-TIRS. Las ignimbritas reflejan un color naranja-salmón, mientras que los estratovolcanes absorben gran parte de la luz incidente, expresándose en tonalidades pardo-oscuras. Fuente: ArcGis 10.3.	87
Figura 46. (a) Vista panorámica hacia el sureste de la Unidad Geológica I, dispuesta en las proximidades al margen oriental del Salar Aguas Calientes Sur. (b) Interpretación esquemática de la Unidad Geológica I en color morado claro. El cuerpo de tonalidad amarillo-anaranjado corresponde a un afloramiento de la Unidad Geológica III, hacia el este desde el sector norte del salar.	88

Figura 47. (a) Vista panorámica hacia el norte desde el Salar Aguas Calientes Sur. (b) Interpretación esquemática de una colada de lava perteneciente a la Unidad Geológica II, en color rosado. Las flechas oscuras indican la dirección general del flujo, siendo principalmente en dirección suroeste hacia el sector norte del salar.....	90
Figura 48. (a) Vista panorámica hacia el SE del Salar Aguas Calientes Sur desde el sector norte. (b) Interpretación esquemática de la Unidad Geológica III en color amarillo-anaranjado. El área en color amarillo corresponde al relleno aluvial que rodea al flujo ignimbrítico, correspondiendo a la Unidad Geológica VI.....	91
Figura 49. Visualización de la unidad IV dentro del área de estudio. Fuente: Google Earth Pro.	93
Figura 50. (a) Vista panorámica hacia el oeste desde la falda del Cerro Médano. (b) Interpretación esquemática generalizada de las unidades geológicas, teniendo a la Unidad Geológica V en el centro de la cuenca y rodeada en su margen occidental y oriental por las Unidades Geológicas II, III y VI, respectivamente.....	94
Figura 51. (a) Microfotografía con Luz Polarizada Plana (LPP) de la muestra ACS-UI-SC. (b) Microfotografía con Luz Polarizada Cruzada (LPX). Clasificación: Andesita porfídica de piroxeno. Microscopio: Nikon Eclipse LV100POL. Objetivo 5x.	96
Figura 52. (a) Microfotografía con Luz Polarizada Plana (LPP) de la muestra ACS-UII-SC. (b) Microfotografía con Luz Polarizada Cruzada (LPX). Clasificación: Andesita porfídica de biotita. Microscopio: Nikon Eclipse LV100POL. Objetivo 5x.	97
Figura 53. (a) Microfotografía con Luz Polarizada Plana (LPP) de la muestra ACS-UIII-SC. (b) Microfotografía con Luz Polarizada Cruzada (LPX). Clasificación: Toba cristalina de composición andesítica. Microscopio: Nikon Eclipse LV100POL. Objetivo 5x.....	98
Figura 54. Visualización del punto estudiado por medio del análisis de las firmas espectrales entre arcillas paligorskita y sepiolita. Sector norte del salar Aguas Calientes Sur, margen oriental.	99
Figura 55. (a) Mapa geológico de escala 1:60.000 y generado a partir del uso de la hoja Toconao n°54 de escala 1:250.000, el mapa geológico de Chile de escala 1:1.000.000 y de la información obtenida del tratamiento con la combinación RGB 742 para la imagen Landsat 8 OLI-TIRS. (b) Perfil geológico de escala 1:60.000 ubicado en la porción centro-sur del salar Aguas Calientes Sur. Fuente: ArcGis 10.3.	101
Figura 56. Mapa de correlación entre la geología a escala 1:60.000 del salar Aguas Calientes Sur y la imagen Landsat 8 OLI-TIRS tratada con la combinación RGB 742. Notar la fuerte relación entre la unidad III y las anomalías de tonalidad anaranjada clara otorgada por la imagen.....	102
Figura 57. Mapa topográfico con la distribución de las muestras realizadas por Cochilco, 2013 y Risacher et al. 1999. La delimitación segmentada en color rojo indica un afluente no estudiado ni muestreado en las campañas históricas.	106
Figura 58. Diagrama de Piper para las muestras de agua superficiales tomadas en la campaña hecha por Sernageomin durante el año 2016. Tomado de Troncoso y Ercilla, 2016.....	109
Figura 59. Mapa topográfico con los diagramas de Stiff aplicados a las muestras de agua superficiales. Tomado de Troncoso y Ercilla, 2016.	110
Figura 60. (a) Diagrama de Schoeller de iones mayoritarios. (b) Diagrama de Schoeller de iones minoritarios y elementos trazas. Tomado de Troncoso y Ercilla, 2016.	111
Figura 61. Uso de imágenes ASTER L1B y ASTER L1T para el reconocimiento de zonas de alteración por medio del uso de cocientes de bandas. A la derecha se tiene una vista en color real (RGB 321) para el distrito Collahuasi. Notar en la imagen a la izquierda una anomalía de alteración argílica avanzada reconocida en el yacimiento Rosario, el cual sería explotado en los siguientes años hasta la actualidad. Tomado de SRGIS.....	114
Figura 62. Uso de la técnica Decorrelation Stretch para la detección de zonas de alteración hidrotermal y presencia de minerales arcillosos. La zona delimitada por la línea segmentada oscura corresponde a la descripción realizada en la hoja Toconao n°54, mientras que la línea color verde claro representa la anomalía registrada en la imagen satelital producto del uso de la técnica. La zona alterada arroja una tonalidad anaranjada intensa. Los minerales arcillosos presentan una tonalidad lila-claro.	115

Figura 63. Vista panorámica hacia el SE desde el Salar Aguas Calientes, correspondiendo a afloramientos de rocas (delimitados en color negro) litológica y espectralmente similares, ubicados en y a faldas del Cerro Médano. El área en que se desarrolló el muestreo de la unidad I y los afloramientos con ocurrencia de la Unidad III, se encuentra delimitada en color rojo oscuro.....	117
Figura 64. (a) Vista de afloramiento en donde se obtuvo la muestra de roca ACS-UIII-SC (UTM (19H) 631672-7348400, 3944 msnm). (b) Muestra de roca con características litológicas similares a la muestra ACS-UIII-SC (UTM (19H) 636361-7346372, 4118 msnm).....	117
Figura 65. Mapa topográfico con puntos de estudio con la herramienta Spectral Analyst	119
Figura 66. Análisis espectral efectuado en un pixel cercano a la muestra ACT-RT-005 (firma roja) en el lado noreste del salar y próximo a la vertiente principal que alimenta a la laguna norte. Ponderación promedio: (1.3). Coordenadas: UTM WGS84 (19H) 637161-7350947. Fuente: ENVI Standard 5.3.....	120
Figura 67. Análisis espectral en el pixel que incluye a la muestra ACT-RT-001. Ponderación: (1.35). Fuente: ENVI Standard 5.3.	120
Figura 68. Análisis espectral en un pixel ubicado a las cercanías de la muestra ACT-RT-008. Coordenadas: UTM WGS84 (19H) 628617-7343503. Ponderación: (1.45). Fuente: ENVI Standard 5.3.	122
Figura 69. Visualización de las capas principales del sector centro-sur del Salar Aguas Calientes Sur. Delimitado en color amarillo, se reconoce el nivel enriquecido en sulfatos, cloruros y material detrítico, cubierto localmente en ciertas áreas del salar.....	124
Figura 70. Modelo esquemático de la signatura deposicional de evaporitas primarias y secundarias para el yeso (CaSO ₄) y la halita (NaCl). Tomado de Warren, 2005.	125
Figura 71. (a) Aplicación del cociente de banda 5/7 en una imagen Landsat 8 OLI-TIRS para la detección de superficies evaporíticas enriquecidas en sulfatos, cuyos valores más altos se encuentran identificados desde tonalidades verdosas a rojizas. Tomado de Flahaut et al. 2016. (b) Mapa de distribución de minerales evaporíticos sujeto al cociente de banda 5/7, aplicado en una imagen Landsat 8 OLI-TIRS. Utilizando los mismos criterios aplicados por Flahaut et al. 2016, las tonalidades rojizas presentan la facies con alto enriquecimiento en sulfatos, cloruros y material detrítico en la superficie, mientras que las zonas desde tonalidades amarillentas a celestes representan a la facies de mayor distribución superficial, con menor contenido en yeso a diferencia de la primera facies, halita, nitratos, boratos y material detrítico.	128
Figura 72. Mapa espectral integrado con el uso del cociente de banda 5/7 en la imagen Landsat 8 OLI-TIRS y la información de los análisis DRX aplicados en las muestras de costra salina obtenidas en terreno, puntualmente en el sector centro-sur y sur del salar Aguas Calientes Sur. A la derecha, se aprecian los resultados del análisis cuantitativo en el difractor, arrojando los minerales dominantes para cada muestra estudiada.	129
Figura 73. Mapa de integración entre el cociente de banda 5/7 aplicado a la imagen Landsat 8 OLI-TIRS y la imagen original del área de estudio, enfatizando los sectores de lagunas y afluentes, los cuales contendrían sectores locales con alto enriquecimiento en sulfatos.....	130
Figura 74. Modelo piloto de distribución de las facies evaporíticas del salar Aguas Calientes Sur.....	131
Figura 75. Mapa de integración entre la imagen Landsat sujeta al cociente de banda 5/7 y el estudio de las firmas espectrales de cada punto de muestreo.....	132
Figura 76. Análisis de firmas espectrales entre el pixel de estudio en que se obtuvo la muestra ACS-SC-001 y la firma espectral de la halita.	133
Figura 77. Análisis de firmas espectrales entre el pixel de estudio en que se obtuvo la muestra ACS-SC-002 y la firma espectral del yeso.	133
Figura 78. Análisis de firmas espectrales entre el pixel de estudio en donde se obtuvo la muestra ACS-SC-003 y la firma espectral de la eugsterita.	134
Figura 79. Análisis de firmas espectrales entre el pixel de estudio en donde se obtuvo la muestra ACS-SC-003 y la firma espectral de la blöedita.	134

Figura 80. Análisis de firmas espectrales entre el pixel de estudio en donde se obtuvo la muestra ACS-SC-004 y la firma espectral de la tenardita.....	135
Figura 81. Análisis comparativo entre las firmas espectrales de las superficies salinas del salar de Capur (perfil izquierdo), salar Aguas Calientes Sur (perfil central) y laguna Tuyajto (perfil derecho).....	135
Figura 82. Zona de obtención de la muestra de costra salina ACS-SC-003, estando próxima a un manantial. Sector centro-sur del salar, margen oriental.....	136
Figura 83. (a) Identificación de azufre coexistiendo con las capas salinas y material aluvial en el margen del salar Aguas Calientes Sur, sector sur. (b) Identificación de rodados de sílice oquerosa y clastos de rocas impregnadas con azufre en el margen del salar, sector sur.....	137
Figura 84. (a) Identificación de grietas de desecación en el margen occidental del salar Aguas Calientes Sur. (b) Identificación de grietas de desecación en el afluente principal del sector centro-sur del salar.	139
Figura 85. Perfil esquemático geomorfológico de los depósitos salinos del norte de Chile. Área de estudio delimitada en color rojo. Tomado de Gajardo, 2014.	140
Figura 86. Microfotografía con Luz Polarizada Cruzada (LPX) de la muestra ACS-UI-SC, donde se identifica un relleno de zeolita, junto con la presencia de cristales de biotita alterados pervasivamente a óxidos de hierro. Clasificación: Andesita porfídica de biotita. Microscopio: Nikon Eclipse LV100POL. Objetivo 5x.	144
Figura 87. Identificación de costras salinas cubriendo una porción de la plataforma ignimbrítica que delimita uno de los extremos de la laguna norte. Fuente: Google Earth Pro.	145
Figura 88. (a) Identificación de afloramiento de posibles minerales evaporíticos. (b) Estudio de firmas espectrales para la calcita y dolomita respecto al pixel de estudio (UTM WGS84 (19H) 639149-7351663. Fuente: ENVI Standard 5.3.	146
Figura 89. Comparación entre la firma espectral del pixel de estudio (color rojo) con la firma espectral de la andesina (color verde). Coordenadas: UTM WGS 84 (19H) 634828-7346840. Notar también la probabilidad de ocurrencia para las arcillas según el análisis espectral. Fuente: ENVI Standard 5.3.	150

Índice de tablas

Tabla 1. Información espectral y espacial de los sensores Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI-TIRS en base al nombre de banda espectral, ancho y resolución.....	53
Tabla 2. Información espectral y espacial del sensor ASTER L1T en base a sus subsistemas, resolución espacial, banda y ancho espectral.	54
Tabla 3. Metadatos de las imágenes multiespectrales utilizadas para el estudio de la cuenca Salar Aguas Calientes Sur. ...	54
Tabla 4. Catastro de las combinaciones de banda comúnmente aplicadas en diversas ramas de investigación.....	62
Tabla 5. Organización de las composiciones mineralógicas de las muestras de costra salina producto del análisis DRX.	84
Tabla 6. Análisis espectral realizado en dos puntos dentro de la laguna norte del salar Aguas Calientes Sur. Coordenadas: UTM WGS84 (19H) 632457-7354004; 633088-7353556.....	141

1. Introducción

1.1 Consideraciones generales

Chile, considerado el país con uno de los desiertos más extensos y áridos del mundo, ha mostrado desde 1830 una gran riqueza ubicada en zonas del norte chileno, correspondiendo al litio, el cual yace en los depósitos salinos, distribuidos principalmente entre la I y II región. Esto se debe a que los mismos depósitos muestran exclusivamente leyes económicamente aptas para acceder a la explotación de estos, principalmente por la búsqueda de producción de litio, correspondiendo a leyes entre 6,0% y 6,5% de Li_2O (Cochilco, 2013).

Como se conoce, los depósitos salinos se caracterizan por presentar concentraciones variables de múltiples sales, de las cuales se reconocen minerales de haluros, sulfatos, boratos, yodatos, cromatos y nitratos, siendo estos últimos considerados como la mena denominada “caliche”, la cual muestra el mayor valor económico para su aprovechamiento.

A partir de la explotación de salmueras y minerales ricos en sales, junto con el desarrollo de procesos de transformación química y electroquímica, se obtienen productos como carbonato de litio, útil para la fabricación de baterías, vidrio, aluminio, metalurgia y construcción, y sub-productos como hidróxido de litio, para la fabricación de grasas, colorantes; y cloruro de litio, aplicable en la construcción de mallas moleculares y tratamiento de aire. Estos permiten la generación de otros derivados como derivados orgánicos (butil-litio, metil-litio, fenil-litio), derivados inorgánicos (bromuro de litio, fluoruro de litio y nitrato de litio) y litio metálico (útil para el uso de compuestos farmacéuticos).

Este elemento en particular presenta una distribución regular dentro de la corteza terrestre, con una concentración promedio de unos 20 ppm. e identificado principalmente en salmueras continentales (entre 100 y 2700 ppm.) y minerales (entre 2300 y 18000 ppm.), al igual que en rocas ígneas (28-30 ppm.) y rocas sedimentarias (56-60 ppm.) (Gajardo, 2014).

Sin embargo, el Litio no es comúnmente encontrado en forma nativa a diferencia de elementos como el yodo y boro, debido a que muestra un alto índice de reactividad frente a la presencia de oxígeno y nitrógeno y se asocia principalmente a minerales como la espodumena ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$), Lepidolita ($\text{K}(\text{Li},\text{Al})_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$), turmalina ($(\text{Na},\text{Ca})(\text{Al},\text{Fe},\text{Li})$), ambligonita (LiAlPO_4F) y entre otros. Esto explica la intervención antrópica con la finalidad de poder generar un compuesto más estable y enriquecido de este elemento.

Por otro lado, el mercado del litio, a pesar de ocupar un pequeño espacio dentro de la economía chilena a diferencia de otras commodities como es el caso del cobre u otros metales, representa una dinámica eficaz en torno a la demanda mundial, lo cual recae en los continuos aumentos del consumo de productos derivados del litio, viniendo a ser un negocio de mayor peso a nivel internacional, puesto que, entre sus ventajas de mayor renombre, el litio producido en Chile presenta una mayor factibilidad de purificación debido al bajo porcentaje de manganeso, al igual que estos depósitos se extienden hasta 1 km. de profundidad, lo cual reduce en grandes proporciones el impacto medioambiental en que se encuentran, a diferencia de la explotación de los yacimientos metalíferos.

Respecto las ventajas económicas de la explotación de litio en el país, sobresalen datos interesantes como son los bajos costos de explotación en salmueras, altas tasas de evaporación, las altas concentraciones de litio (1,8-2,5 gr/l), reservas nacionales con cantidades de hasta 7,5 Mton. (equivalente al 20% de la reserva mundial) y una producción anual de 63.864 ton. de LCE a partir del año 2016, estando posicionado como el segundo país con mayor productividad mundial (con un 33% de participación), seguido de países como Argentina con un 16% de producción anual, China y otros países como Zimbawe, EE. UU; Portugal y Brasil con un total de 12% (**Cochilco, 2013**).

No obstante, el país con mayor producción mundial corresponde a Australia, liderando con un 44% de participación desde el año 2016. Tales cifras son producto de la explotación de salmueras y yacimientos de minerales ricos en litio como la espodumena, lepidolita y entre otros (**Delbuono, 2016**).

Principalmente, los depósitos salinos consisten en acumulaciones de minerales salinos solubles en agua, ocurriendo en forma de cemento dentro de superficies de material no consolidado, comúnmente en depósitos aluviales de piedemonte, depósitos coluviales, en rocas con alto índice de fracturamiento y porosidad y al igual que en regolitos cerca de la superficie del Desierto de Atacama. Estos depósitos se distribuyen dentro de una franja de 700 km. de largo entre las regiones de Tarapacá y Antofagasta, presentando extensiones laterales que se restringen hacia el sector oriental de la Cordillera de la Costa en el caso de la I región y una amplia extensión en la II región, en donde la distribución abarca hasta la provincia morfoestructural del Altiplano-Puna (**Ericksen, 1981**).

Siguiendo aquellas características más representativas, estos tipos de depósitos guardan evidencias de lixiviación diferencial durante y posteriormente a su acumulación, estando evidenciado por las características químicas que presentan las acumulaciones de agua, a partir de lagunas o vertientes. Tal característica va acompañada de rasgos de estratificación resultante de la disolución y re-depositación de minerales con mayor solubilidad frente a los eventos esporádicos de precipitación en la región. El caso del salar de Aguas Calientes Sur resulta ser interesante en torno a la configuración geológica local y regional que presenta, estando incluido dentro de un sistema de cuencas intra-volcánicas formadas hacia el sector oriental y dentro de la Cordillera Occidental.

Asimismo, este sistema se rige principalmente por lineamientos de complejos volcánicos, los cuales guardan una notable relación con las estructuras regionales más importantes y mapeadas entre la región de Antofagasta y la Provincia de Salta, Argentina, siendo una de ellas, el Lineamiento Calama-Olacapato-El Toro (**Salfity, 1985**), cuyo miembro occidental abarca desde Cerro Acay, Argentina, hasta extenderse en forma alineada por medio de los volcanes Tul, del Medio, Pocitos y Rincón hacia la localidad de Calama, Chile.

Su origen deriva de la reactivación de fallas normales cretácicas con orientación NW-SE (**C.J. Chernicoff, E.O. Zappettini, M.L. Villar, 2005**). Este lineamiento conforma un grupo interpretado como estructuras corticales profundas que han sido

selectivamente reactivadas durante el Mesozoico (**Allmendinger et al. 1983; Alonso et al. 1984; Salfity, 1985**). Junto con el uso de imágenes satelitales y el registro de mapas geológicos como la Carta Geológica de Chile 1:1.000.000, es posible divisar tales lineamientos a escala regional junto con las alineaciones de los principales complejos volcánicos pertenecientes al arco magmático de edad Mioceno-Holoceno (**ver figura 5**).

Según el carácter tipo efusivo de los depósitos volcánicos generados en el norte grande, estos permiten el desarrollo de cuencas endorreicas intermontanas, las cuales muestran acumulaciones de depósitos aluviales, coluviales y/o salinos de edad Pleistoceno-Holoceno (**ver figura 10**).

1.2 Planteamiento del problema

Durante los últimos años, el poder realizar nuevos estudios de carácter científico en estos territorios resultó ser altamente complejo, debido a la continua privatización de los depósitos salinos y también a que las nuevas normas impuestas por el estado les habían concedido a las empresas, la facultad de confidencialidad de la información, lo cual reduce el acceso público a bases de datos.

Sin embargo, en el año presente se ha logrado dictar una nueva ley por parte de Sernageomin, correspondiente al Decreto N°104 y asociado al Artículo 21 del Código de Minería, el cual estipula como reglamento la entrega de información en torno a definiciones como la exploración geológica básica (conjunto de obras y acciones conducentes al descubrimiento, caracterización, delimitación y estimación del potencial de una concentración de sustancias minerales), información de carácter general (conjunto de antecedentes, tales como muestras, mapas, levantamientos, tablas o estudios) y entidad informante (toda persona, natural o jurídica, que realiza o ha realizado actividades de exploración geológica básica, por sí o a través de terceros). Es por esto por lo que varios organismos gubernamentales han iniciado desde hace décadas convenios con empresas privadas para incentivar la expansión del conocimiento sobre este tipo de depósitos, a pesar de las

restricciones previas. Lo último incluye implícitamente el estudio y análisis sobre el ambiente en que estos se desarrollan, considerando componentes geológicas, geomorfológicas, edáficas, topográficas y bióticas; que permiten el desarrollo de los depósitos salinos, al igual que otras variables como las dinámicas hidrológicas e hidrogeológicas, estando influenciadas por fuentes externas intrínsecamente asociadas a las condiciones climáticas de la zona geográfica, tales como las precipitaciones, intensidades de vientos y temperaturas.

El caso del salar de Aguas Calientes Sur (Purisunchi o III), muestra cierta complejidad al momento de referirse a la disponibilidad de información pública, puesto que en el área se tiene la presencia de concesiones mineras, cuya información también es de carácter no público. Asimismo, el depósito salino, y al igual que los salares de Tara y Pujsa, forman parte de la Reserva Nacional Los Flamencos, por lo que está prohibida la explotación o prospección de salmuera para un beneficio económico, lo cual se traduce en la no posibilidad de realizar sondajes para estudios geológicos o hidrogeológicos de la sub-superficie.

Por otro lado, para el trabajo presente, se dispuso como herramientas de estudio, la Carta Geológica de Chile de escala 1:1.000.000, la Hoja Toconao N°54 de escala 1:250.000, algunos mapas de yacimientos metalíferos como el mapa metalogénico de la región de Antofagasta, de escala 1:500.000, trabajos científicos previos y entre otros varios artículos pertenecientes a organismos estatales como Sernageomin, IGM y la DGA. En general, la mayoría apunta al desarrollo de estudios a escala regional y no de manera local dentro del área de interés, exceptuando algunas investigaciones realizadas por **Troncoso y Ercilla, 2016; Risacher et al. 1999; Flahaut et al. 2016**, cuya información fue indispensable para la elaboración de este trabajo. Por ello, la investigación presente tiene como finalidad principal, la búsqueda de una comprensión en detalle de la geología y control hidroquímico para el salar de Aguas Calientes Sur, pudiendo identificar características relevantes y posibles controles mineralógicos o climáticos capaces de influenciar la ocurrencia de las sales que conforman el depósito salino.

1.3 Área de estudio

El Salar de Aguas Calientes se ubica principalmente en la II Región de Antofagasta, la cual se extiende entre las latitudes 20°56' y 26°05' Sur y entre las longitudes 67°00' y 70°35' Oeste, abarcando una superficie de 2.400 km² según lo propuesto por el IGM (Instituto Geográfico Militar).

La zona de estudio representa un área aproximada de 46 km², distribuida sobre los 3.900 m.s.n.m. y se encuentra localizada hacia el SE desde el Salar de Atacama, en el sector alto andino central de la región, correspondiendo a la Puna de Atacama.

Para lograr acceder al área, es posible ingresar desde la Ruta 5 en la ciudad de Antofagasta para luego tomar la Ruta 25. Este camino conduce hacia la comuna de Sierra Gorda y terminando en la ciudad de Calama. Ya desde este punto, se debe continuar en dirección SE por medio de la Ruta 23, pasando por los pueblos de San Pedro de Atacama, Toconao y hasta llegar a Socaire, siendo este último el pueblo chileno más próximo al límite fronterizo entre Chile y Argentina. El trayecto completo abarca unos 462 km de camino y toma unas 6 horas y 14 minutos.

Por otro lado, es posible llegar al área mediante el uso de la Ruta B-385, bien conocida como la Ruta de la Sal, debido al constante uso de Bischofita como un supresor de polvo y estabilizador de caminos, de tal forma de poder evitar el rodado de vehículos y maquinarias pesadas.

La ruta presente también inicia desde la ciudad de Antofagasta y durante el trayecto se debe tomar la ruta B-367 en dirección este para luego interceptar con la ruta B-355. Posteriormente, se continúa viajando en dirección norte hasta llegar al sector de Punta Blanca o conocido como Quebrada el Toro, donde se toma la Ruta B-379 para acceder a la Ruta 23. Esta trayectoria alternativa abarca unos 390 km de carretera y toma unas 5 horas y 45 minutos el ser recorrida (**figura 1**).



Figura 1. Ubicación y rutas de acceso al área de estudio (delimitadas en color celeste y en color verde oscuro. Fuente: Google Earth Pro.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Dilucidar el control geológico e hidroquímico en el desarrollo de las facies evaporíticas del salar Aguas Calientes Sur.

1.4.2 Objetivos específicos

- Identificación y validación preliminar de unidades geológicas en la cuenca Salar Aguas Calientes Sur mediante el uso de imágenes satelitales multiespectrales.
- Determinación de la mineralogía evaporítica y propuestas de zonificación de facies evaporíticas en el salar.
- Determinación de posibles controles hidroquímicos y relaciones con la distribución litológica y mineralógica.

1.5 Hipótesis de trabajo

Dentro del salar Aguas Calientes Sur, es posible identificar facies evaporíticas distribuidas en la totalidad del depósito salino, cuyas evidencias de zonación y concentración en sales dependen de la extensión de las lagunas, afluentes y manantiales que drenan hacia el depósito salino, junto con la configuración litológica que circunda al salar y las condiciones climáticas locales que permiten la disolución y precipitación de cada mineral evaporítico.

2. Marco Teórico

2.1 Marco Geológico Regional

Al situarse dentro del área de estudio y abarcando las unidades yacentes que delimitan al salar Aguas Calientes Sur, los estudios realizados en la Hoja Toconao por **Gardeweg & Ramírez, 1982**, dan a conocer depósitos de edad principalmente Neógeno-Cuaternario (Mioceno Superior-Holoceno), abarcando un rango de 7 Ma. A continuación, se muestra una síntesis sobre las rocas volcánicas y sedimentarias yacentes en el área de estudio (**figura 2**).

Acorde a lo propuesto por las descripciones de la hoja Toconao (**Gardeweg & Ramírez, 1982**), tanto la precordillera como Cordillera de los Andes y gran parte del altiplano-puna, están constituidas principalmente por rocas volcánicas de edad Cenozoico Superior, cubriendo aproximadamente el tercio oriental del sector alto andino del continente chileno.

Morfológica y petrológicamente, se han diferenciado dos unidades geológicas dominantes: ignimbritas y estratovolcanes, mientras que una tercera unidad corresponde a los depósitos evaporíticos del Cuaternario (Holoceno), pero cuya distribución es de carácter local dentro de las cuencas endorreicas alto andinas. Para las ignimbritas, están constituidas por 7 sub-unidades principales (Ignimbrita La Pacana, Toconao, Atana, Tucúcaro, Patao, Cajón y la Ignimbrita Tuyajto), mientras que la unidad de estratovolcanes, se han reconocido cuatro grupos representativos (Estratovolcanes I, II, III y IV).

Para el caso de las ignimbritas, estas constituyen en tobas soldadas, dacíticas y riolíticas, de tonalidades grisáceas, rosadas y pardas, cubriendo el 40% de la Precordillera y Cordillera de los Andes. Estas rocas afloran formando extensos plateau, generalmente con ángulos de inclinación entre 3-5° con vergencia al oeste. El espesor de estos flujos varía entre 40 y 60 mt de espesor, alcanzando en casos locales, potencias de hasta 100 mt. Asimismo, tienden a presentar evidencias de diaclasamiento superficial y se muestran seccionados por series de quebradas profundas, de carácter subparalelas y oblicuas a su máxima pendiente y de posible

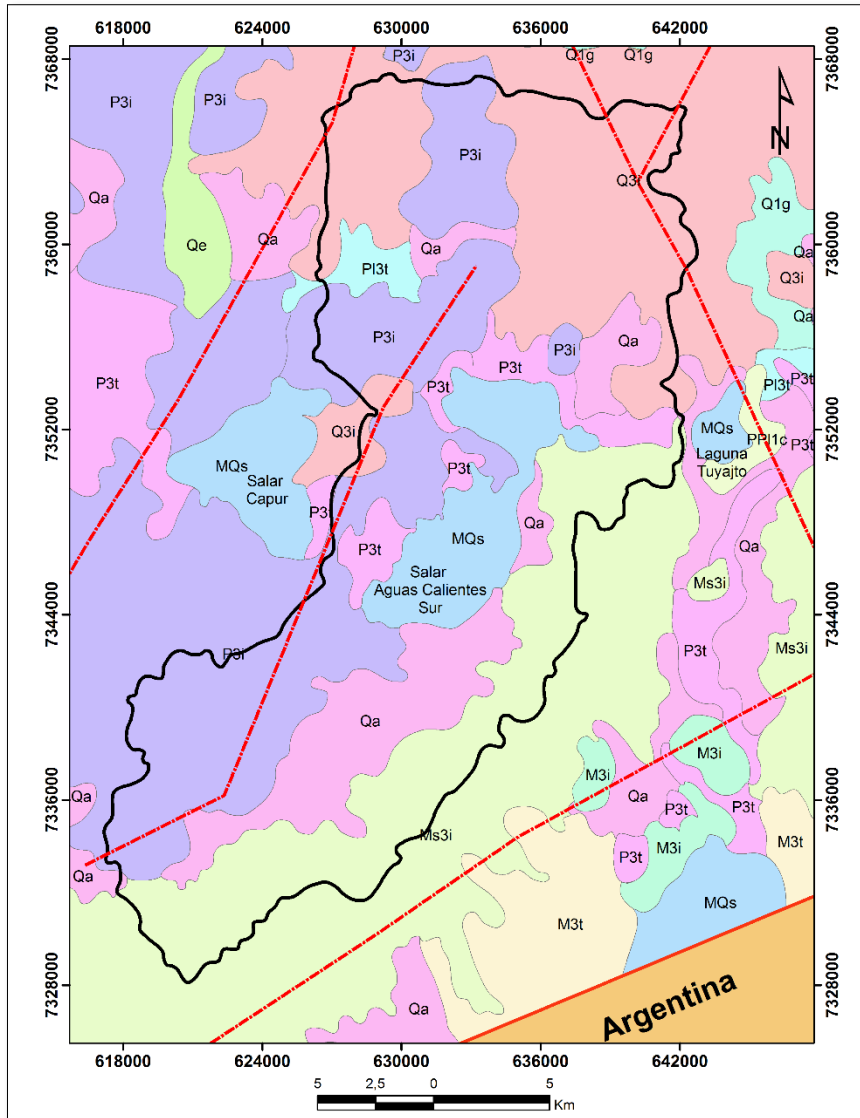
origen tectónico (**Guest, 1969**). Para casos locales, las ignimbritas constituyen el basamento de los principales estratovolcanes dispuestos en el sector alto andino, cuyo origen estaría relacionado a etapas de volcanismo explosivo, de tipo peleano.

Por otro lado, los estratovolcanes se distribuyen en una cadena elongada con orientación preferencial norte-sur, pero respecto al centro de estudio, una orientación noreste, ocupando una superficie aproximada de 1.800 km² y extendiéndose hasta los 25° Latitud S. Aquellos que se disponen de forma aislada respecto a la cadena principal, se han considerado como cordones volcánicos.

En base a la petrografía, se distinguen cuatro tipos litológicos principales, correspondiendo a dacitas, andesitas de hornblenda y/o biotita, andesitas de piroxeno, andesitas basálticas a basaltos. Estas rocas son cubiertas por depósitos no consolidados de origen glacial, aluvial, coluvial, lacustre, piroclástico y lahárico.

Los depósitos salinos forman parte del relleno sedimentario de cuencas endorreicas y constituidos principalmente por salares, estando distribuidos por toda la hoja Toconao y correspondiendo a cubiertas evaporíticas con niveles freáticos someros. La costra salina se muestra subdividida, de acuerdo con su composición química y mineralógica, en unidades litológicas individuales y con límites transicionales entre sí, teniendo espesores desde algunos centímetros hasta aproximadamente 60 mt (**CORFO, 1979**).

Respecto a los depósitos no consolidados, estos se distribuyen generalmente en toda la Hoja Toconao, abarcando un 30% del área y constituidos principalmente de una mezcla heterogénea de gravas, arenas y limos de composición polimíctica, originados en corrientes de barro, avenidas o por un proceso compuesto de transporte, por acción glacial o eólica en la Cordillera de los Andes. Asimismo, su origen también recae tanto en procesos volcánicos como lacustres.



Leyenda

- | | | |
|---|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> MQs (Holoceno) Depósitos evaporíticos: sulfatos, cloruros, carbonatos y niveles detríticos finos. Q3i (Pleistoceno-Holoceno) Estratovolcanes y complejos volcánicos: lavas basálticas a riolíticas, domos y depósitos piroclásticos andesítico-basálticos a dacíticos. Q1g (Pleistoceno-Holoceno) Depósitos morrénicos, fluvio-glaciares y glaciolacustres: diamictitas de bloques con matriz de limo/arcilla. Qa (Pleistoceno-Holoceno) Depósitos aluviales, subordinadamente coluviales o lacustres: gravas, arenas y limos. | <ul style="list-style-type: none"> Qe (Pleistoceno-Holoceno) Depósitos eólicos: arenas finas a medias con intercalaciones bioclásticas. P3t (Pleistoceno) Depósitos piroclásticos riolíticos, asociados a calderas de colapso. PP11c (Plioceno-Pleistoceno) Conglomerados, areniscas, limolitas y arcillolitas, generalmente consolidados y de facies principalmente aluviales. P3t (Plioceno) Depósitos piroclásticos dacíticos a riolíticos parcialmente soldados. P3i (Plioceno) Centros volcánicos: lavas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos a dacíticos. | <ul style="list-style-type: none"> Ms3i (Mioceno Superior) Centros y secuencias volcánicas: lavas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos a dacíticos con intercalaciones aluviales. M3t (Mioceno Inferior-Medio) Secuencias piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso. M3i (Mioceno Inferior-Medio) Complejos volcánicos parcialmente erosionados: lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basálticas a dacíticas. |
|---|--|---|

Simbología

- - - Lineamientos de centros volcánicos
- Cuenca de estudio

Figura 2. Mapa geológico regional del sector alto andino de la región de Antofagasta. Modificado de la hoja Toconao (Gardeweg & Ramirez, 1982), escala 1:170.000.

2.2 Marco Tectónico

A escala regional, la II región de Antofagasta muestra evidencias de eventos tectónicos predominantemente pertenecientes al Ciclo Pre-Andino y a los ciclos tectónicos posteriores a esta, debido a la distribución de afloramientos de edades máximas paleozoicas (Devónico Inferior-Pérmico).

Ciclo Pre-Andino (Pérmico Tardío-Jurásico Temprano)

Este ciclo se atribuye a la consolidación final del megacontinente Pangea, lo cual produjo nuevas condiciones tectónicas a lo largo del margen continental y occidental de Gondwana, siendo entre ellas el cese de la subducción hasta inicios del Jurásico. A lo largo del margen chileno, las características anteriores favorecieron la acumulación de calor en el manto superior, derretimiento de la corteza inferior y la producción de enormes volúmenes de magmas, tanto a lo largo de la costa del margen chileno (**Berg & Breikreutz, 1983**) como en la alta Cordillera de los Andes (**Kay et al. 1989; Mpodozis & Kay, 1990**).

Como consecuencia, eventos de deformación cortical y extensión de la parte frágil de la corteza superior, conllevó al desarrollo de cuencas extensionales con orientación NNW-SSE, influyendo en la paleogeografía de aquella época y en el desarrollo de la actividad magmática.

Asimismo, la generación de grabens o semi-grabens y horsts fue de manera oblicua al margen continental de Gondwana (**figura 3**), produciendo a la vez como control paleo-geográfico, una línea costera conformada por embahiamientos y penínsulas.

Las estructuras de horsts y grabens ubicadas más hacia el NNW, se encuentran rellenas principalmente por depósitos marinos, mientras que, hacia el SSE, los depósitos eran generalmente, de origen continental (**Charrier et al. 2007**). Asimismo, los eventos de rifting se encontraban predominantemente controlados por fallas normales y fallas de rumbo de escala regional, las cuales fueron relacionadas con zonas de debilidad, correspondiendo a las zonas de sutura de los terrenos acrecionados de edad paleozoica (**Ramos, 1994**). Considerando lo anterior, se atribuyen las descripciones realizadas por **Kontak et al. 1985; Clark et al. 1990**,

sugiriendo que, en los Andes Centrales de Perú y del norte chileno existió un mayor enfoque del proceso de extensión tanto en la precordillera como en la cordillera oriental, acompañado del desarrollo de sistemas de graben a la altura del arco magmático de tal periodo. Estas estructuras, paralelo a la cordillera oriental, se asociaron a un pronunciado proceso de volcanismo de rift (**figura 4**).

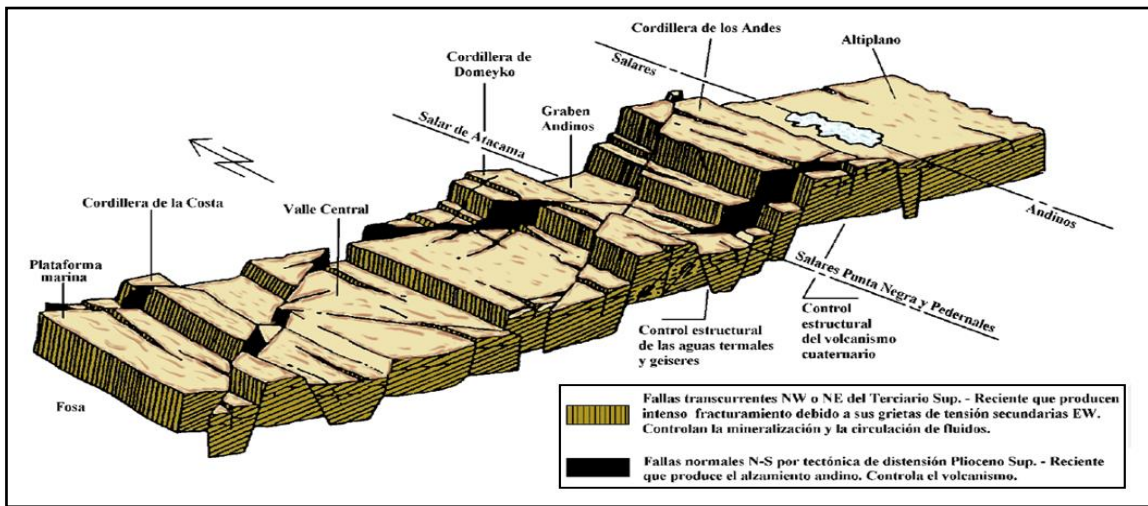


Figura 3. Perfil estructural esquemático de la II región de Antofagasta, representando las provincias morfoestructurales y el régimen estructural dominante. Modificado de Frutos, 1973.

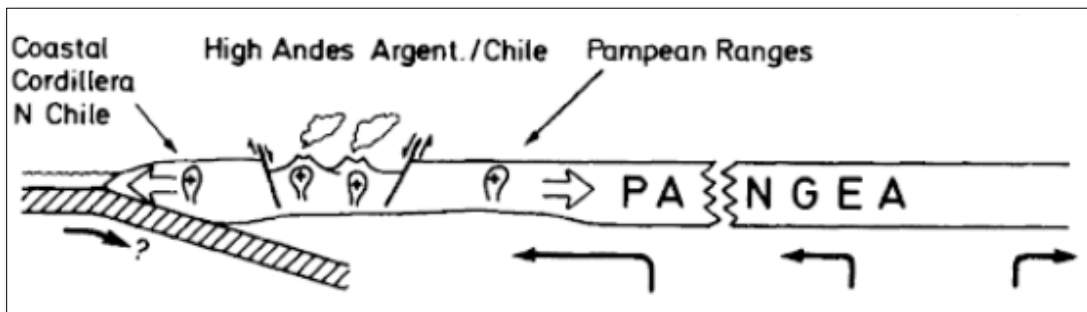


Figura 4. Perfil esquemático sobre el arreglo de las placas tectónicas de la zona sur de los Andes Centrales durante el Ciclo Pre-Andino. Tomado de Reutter et al. 1900.

Ciclo Andino (Jurásico Temprano Tardío-Actualidad)

Este ciclo tectónico refleja la reanudación de la subducción, lo cual conllevó a la generación del arco magmático andino, el cual se ha mantenido ininterrumpido hasta la actualidad (**figura 5**). Como características esenciales, el ciclo en general muestra el desarrollo de zonas de falla de cizalle paralelas y a lo largo de los ejes

mayores de los sucesivos arcos magmáticos, como es el caso de las zonas de falla de Atacama y Domeyko, respectivamente.

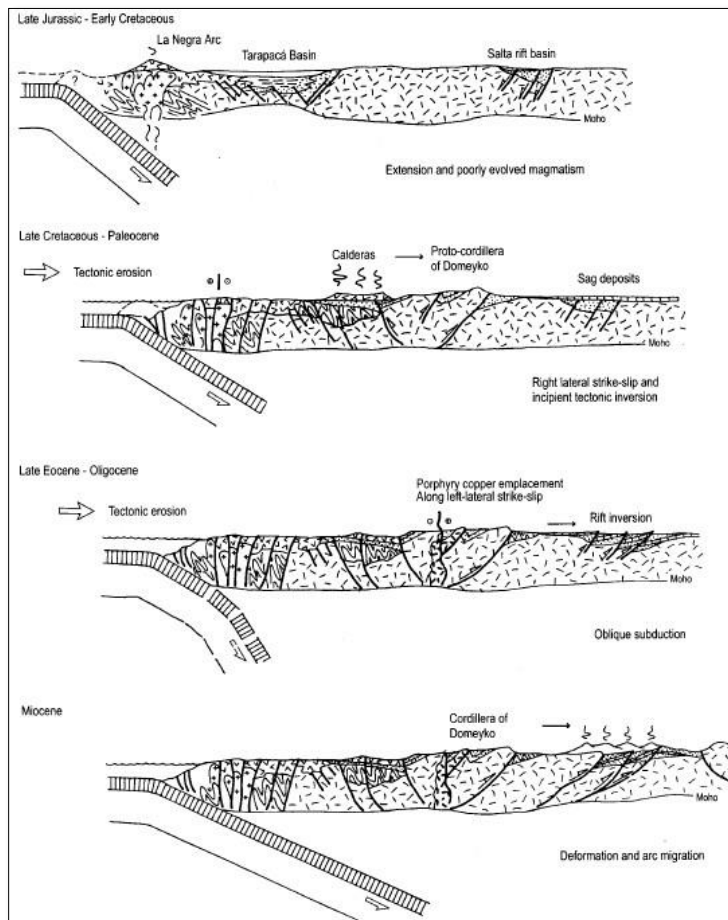


Figura 5. Evolución tectónica de los Andes Centrales a la latitud de Antofagasta (23 – 24°S) durante el Ciclo Andino. Tomado de Mpodozis y Ramos, 1990.

Según lo propuesto por **Charrier et al. 2007**, se sugiere que, durante la primera etapa del Ciclo Andino, el acoplamiento entre una placa oceánica vieja, fría y la porción occidental de Gondwana, fue dentro de un régimen lento. Esta condición pudo haber sido la causa principal del desarrollo continuo de condiciones extensionales durante el crecimiento del arco magmático y de las cuencas de trasarco, manteniéndose durante el Jurásico y el Cretácico. Esto permitió a la vez, el dominio de las condiciones extensionales en el margen continental, una intensa

actividad magmática a lo largo del arco y abundante acumulación de sedimentos marinos y continentales (**figura 6**).

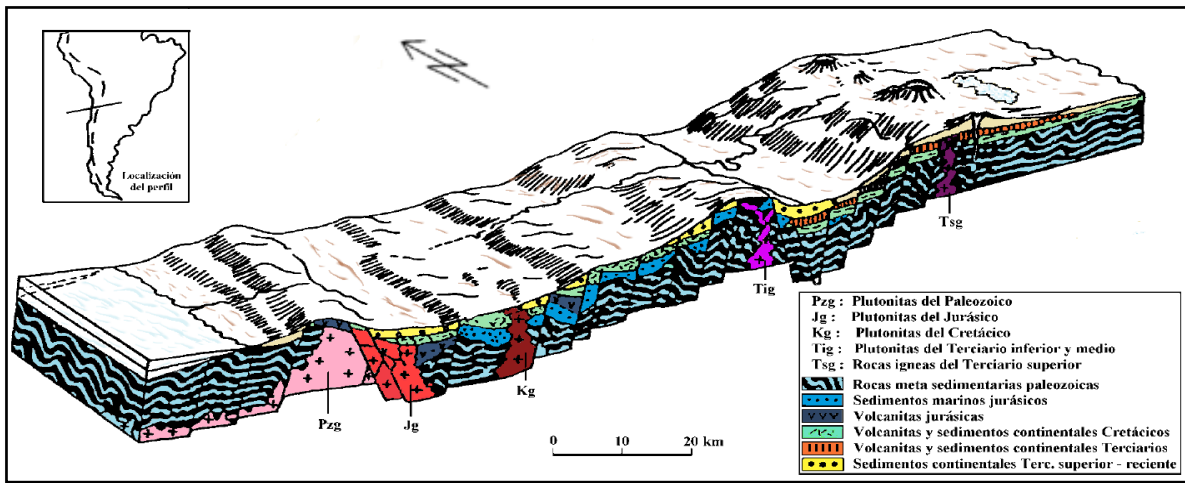


Figura 6. Perfil geológico esquemático de la II región de Antofagasta, representando las unidades litoestratigráficas dominantes a lo largo del margen chileno. Modificado de Frutos, 1973.

Posteriormente, la segunda etapa del Ciclo Andino se caracterizó principalmente por un episodio de deformación basado en una inversión de cuenca, o más bien conocido como la Fase Peruviana (**Charrier & Vicente, 1972**), desarrollada a fines de la primera etapa del Ciclo Andino, la cual conllevó al alzamiento y erosión de los depósitos de edad Jurásico Temprano a Cretácico Temprano Tardío. Este evento se evidencia dentro de la Cordillera Occidental y en la Depresión Central, llegando a tener incluso edades más antiguas (Fm. Estratos El Bordo, Fm. Peine y Fm. Cas).

Sin embargo, la correlación de estas formaciones con la Fase Peruviana no es totalmente clara. Como rasgos esenciales, se tiene la migración del arco magmático hacia el este, junto con la generación de una cuenca de antepaís (Sistema de Rift de Salta, (**Marquillas & Salfity, 1988**)). Por otro lado, prevalece una subducción de tipo oblicua, la cual junto con el movimiento de la placa oceánica Farallon hacia el continente, produjo un desplazamiento dextral a lo largo de las fallas con orientación norte-sur y de carácter transcurrente (**Charrier et al. 2007**).

Tales registros, junto con los estudios realizados en la provincia de Salta, Argentina, permiten delimitar el área de estudio mediante el control tectónico de edad

Mesozoica, lo cual se muestra como evidencia en la actualidad, por el Lineamiento Calama-Olacapato-El Toro (**Salfity, 1985**), cual pasa por territorio chileno entre los volcanes Láscar y Chilikues. (**figura 7**).



Figura 7. Visualización del Lineamiento Calama-Olacapato-El Toro (color verde claro) y lineamientos de centros volcánicos (color amarillo) en la cuenca Salar Aguas Calientes Sur, mediante el uso de una imagen satelital Landsat TM-2, dispuesto entre la provincia de Salta, Argentina y la II región de Antofagasta. Área de estudio delimitada en rojo.

2.3 Marco Geomorfológico

La morfología del norte de Chile se dispone como producto principal de los eventos ocurridos entre el Ciclo Pre-Andino y Ciclo Andino. Particularmente, la Cordillera de los Andes corresponde a una cadena montañosa de Sudamérica, que se extiende de forma casi paralela a la costa del Océano Pacífico, abarcando desde el cabo de Hornos hasta las proximidades de Panamá.

Considerando que la extensión de esta cordillera es de casi 8.000 km a lo largo del margen occidental del continente sudamericano, se subdivide en los siguientes segmentos de norte a sur: Andes Septentrionales (12°N – 5°S), Andes Centrales (5°S – 40°S) y Los Andes Patagónicos o Australes (40°S – 55°S) (**Jordan et al.**

1983). Para el trabajo presente, la zona de estudio se ubica en los Andes Centrales que, en particular, forma la región más grande y montañosa de la Cordillera de los Andes (**figura 8**).

Este segmento de aproximadamente 4.000 km de largo y entre unos 350-400 km de ancho, se subdivide a la vez en tres partes: Andes Centrales del Norte (5° - 13° S, situados en Perú), el Oroclino boliviano (13° - 28° S, desde el sur peruano y boliviano hasta el norte chileno y noroeste argentino), y los Andes Centrales del Sur (28° - 40° S, en Chile central y en el centro de Argentina occidental). Por ende, el área de estudio se encuentra en la parte central de los Andes Centrales, correspondiendo al Oroclino boliviano.

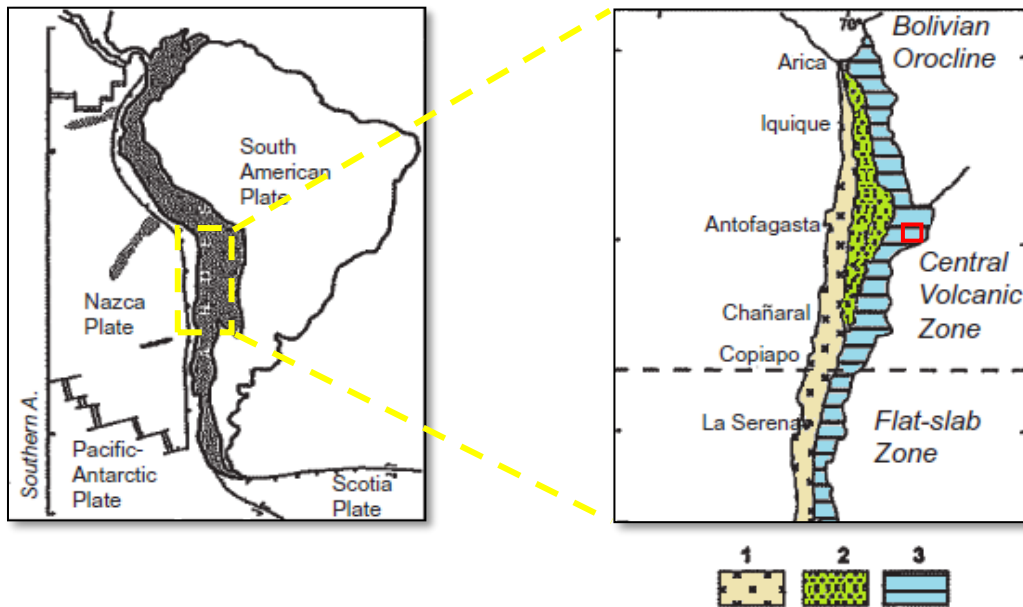


Figura 8. Localización de los Andes Centrales en relación con Sudamérica y visualización de los elementos tectónicos mayores que rigen hacia el oeste del continente. La imagen a la derecha representa la distribución de las unidades morfoestructurales mayores y rasgos tectónicos principales e influyentes en la Cordillera Andina. (1) Cordillera de la Costa, (2) Depresión Central y (3) Precordillera y Cordillera Occidental. Área de estudio delimitada en color rojo. Modificado de Charrier et al. 2007

Por otra parte, el rasgo morfológico más importante que caracteriza a los Andes Centrales es la existencia de un plateau alto andino denominado Altiplano o Puna (**figura 9**), alcanzando cotas de hasta 4.200 m.s.n.m. Asimismo, la zona del Altiplano-Puna es conocida por sus extremas condiciones climáticas, siendo representado por las oscilaciones abruptas de temperatura, bajas tasas de presión,

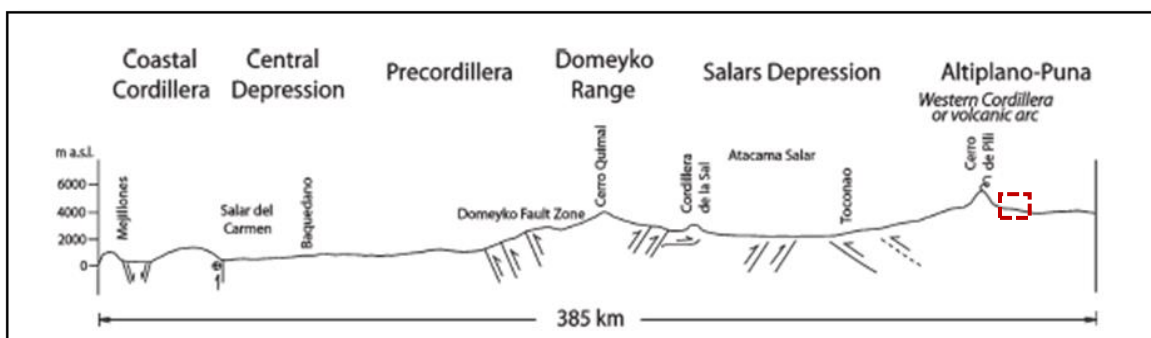


Figura 9. Perfil Esquemático a la latitud de Mejillones, II región de Antofagasta, mostrando las principales provincias morfoestructurales. Área de estudio delimitada en color rojo. Modificado de Charrier et al. 2007.

escasas tasas de precipitación anual, series continuas de fuertes ráfagas de viento y entre otras características. Con ello, el área de estudio se clasifica como una zona influenciada por un sistema de alto grado de erosión. Por consiguiente, los rasgos morfológicos comúnmente identificables corresponden a los conos volcánicos erodados y geoformas originadas por efectos de la erosión eólica, cuya distribución rodea al salar y al igual que en varios sectores dispuestos en la cuenca.

De acuerdo con lo propuesto por **Cervetto, 2012**, la información geomorfológica descrita tanto de la zona de la Puna-Altiplano como del área de estudio, viene a ser uno de los pilares para el estudio hidrológico e hidrogeológico de los depósitos salinos. Para ello, es necesario describir tanto las unidades morfoestructurales principales de la región como sus unidades fisiográficas que guardan relación con el emplazamiento de las cuencas endorreicas del Altiplano-Puna.

2.3.1 Unidades Morfoestructurales de la II región

- **Cordillera de la Costa**

Corresponde a un bloque levantado y dislocado por la zona de falla de Atacama, conformando una franja de 900 km. de extensión. Morfológicamente, se presenta como una serie de cerros y lomajes suaves que encierran numerosas depresiones rellenas de sedimentos marinos y continentales. En el sector occidental, se identifican grandes acantilados como producto del escarpe tectónico y posteriormente, por la abrasión marina (**Paskoff, 1976**).

- **Depresión Central**

Corresponde a una estructura de graben, la cual configura una cuenca con elongación en sentido NS y se encuentra ubicada entre la Cordillera de la Costa y la Precordillera. Constituye el nivel basal para el drenaje y la depositación del material de erosión proveniente del este. Entre los 19°30' y 22°30'S, se extiende en un relieve suave, denominado Pampa del Tamarugal, constituido principalmente por sedimentos continentales y lavas de composición riolítica.

- **Precordillera**

Conformada por la Cordillera de Domeyko y la Cordillera del Medio. Sin embargo, esta última se desarrolla desde el río Loa hacia el norte. Sus límites recaen, tanto en el sector occidental como oriental, en fallas normales y transcurrentes, y se constituyen de rocas principalmente de edad Mesozoico y Cenozoico.

- **Cuencas Preandinas**

Conforman una estructura de graben, extendiéndose entre la Precordillera y la Cordillera Occidental. En sus partes más basales, constituyen principalmente depósitos salinos, como es el caso del Salar de Atacama, Salar Punta Negra y Pajonales.

- **Cordillera Occidental**

Esta unidad morfoestructural se conforma principalmente por cuatro sistemas de arcos magmáticos: Jurásico a Cretácico Temprano; Cretácico Medio; Cretácico Tardío a Paleógeno; y Mioceno al Reciente (**Coira et al. 1982; Reutter et al. 1988; Scheuber y Reutter, 1992**), donde este último evento abarca el volcanismo de arco actual desarrollado desde el Mioceno Superior-Presente, comprendiendo a la vez, el área de estudio. La cordillera se constituye mayoritariamente de conjuntos de edificios volcánicos que forman parte del CVZ en orientación preferencial NNW-SSE y norte-sur, con una progresiva migración de estos hacia el este. El arco magmático que comprende el área de estudio se caracteriza por presentar un frente de estratovolcanes, teniendo ejemplares como Lullailaco (6.379 m.s.n.m), Ollagüe

(5.863 m.s.n.m), Lászar (5.560 m.s.n.m) y Ojos del Salado (6.887 m.s.n.m), considerando este último como el volcán más alto del mundo. Bajo esta provincia morfoestructural, se encuentra ubicado el salar Aguas Calientes Sur, junto con el resto de los salares alto andinos.

- **Puna de Atacama**

Corresponde a una meseta ubicada entre los 3.700 y 4.200 m.s.n.m, en promedio, la cual se extiende desde el territorio chileno hasta el noroeste de Argentina, sureste de Perú y una porción occidental de Bolivia, abarcando unos 1.800 km a lo largo del margen continental y junto con anchos que varían entre los 350 y 400 km (**figura 10**). Tal como se mencionó anteriormente, esta unidad se caracteriza conocida por su condición climática de carácter árido y seco, temperaturas predominantemente bajas y escasas tasas de precipitación anual y desarrolladas principalmente durante el invierno altiplánico o invierno boliviano.

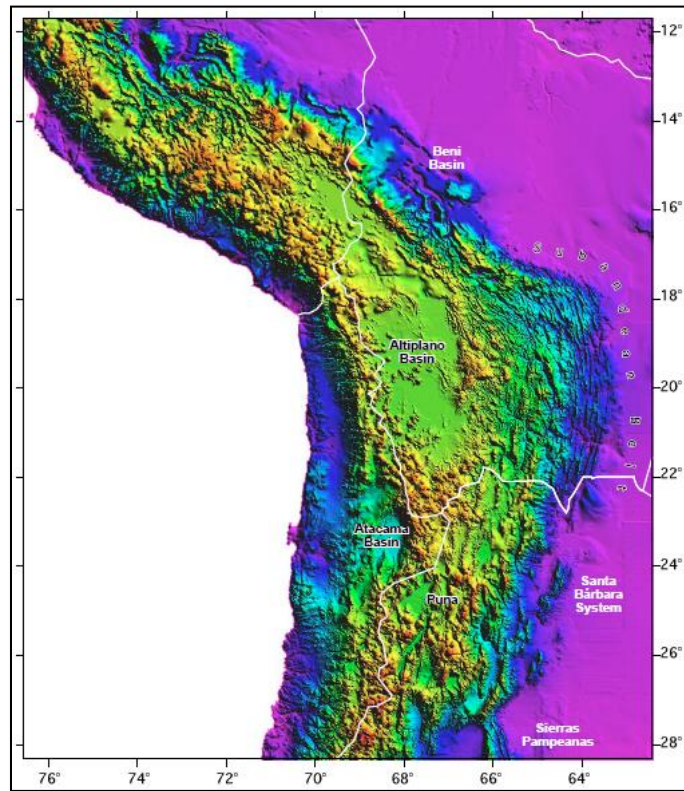


Figura 10. Visualización de los Andes Centrales a partir de un modelo de elevación digital. Nota a partir de las diferencias de relieve, la identificación de las cuencas del Altiplano y la Puna. Tomado de Allmendinger, 1997.

No obstante, frente a la imagen anterior, cabe mencionar que la meseta altoandina de los Andes Centrales se encuentra dividida en dos secciones: una ubicada al norte de los 22°S, denominada Altiplano, y otra ubicada al sur de esta latitud conocida como Puna o bien, para el caso del área de estudio, la Puna de Atacama. Tal diferencia recae en las edades de alzamiento, rasgos morfológicos, estructurales y entre otros.

2.4 Marco Climático

La evolución climática indica que, a pesar de la aridez de norte de Chile, desarrollada desde el Mioceno Medio, se tienen registros de actividad pluvial durante el Plioceno y hasta el Cuaternario, junto con indicios de actividad glacial, refiriéndose a la glaciación pleistocena (**Ochsenius, 1986**).

Utilizando la clasificación climática de Wladimir Köppen (**figura 11**), basada en el uso de un sistema de letras mayúsculas y minúsculas que denotan rasgos específicos de los sistemas climáticos de cada región en torno a valores numéricos y empíricos, se propone para la zona entre la Cordillera Occidental y el Altiplano, un sistema tipo ETH (**Wang & Overland, 2004**), el cual se basa en lo siguiente:

- E: un umbral térmico con temperaturas máximas de 10°C, clima de tundra y ausencia de vegetación por presencia de hielo.
- TH: la temperatura media del mes más cálido se ubica entre los 0° y 10°C.

Mediante una transecta en dirección E-W, las precipitaciones tienden a generarse a partir de los 2.000 m.s.n.m., incrementándose hacia el este. Considerando el factor altitudinal, las precipitaciones están determinadas por un sistema tropical convectivo que produce lluvias estivales en el Altiplano, de corta duración, poca extensión territorial y comúnmente de baja intensidad (inferior a 20 mm/día).

Debido a esto, la escorrentía superficial resulta ser escasa y, por ende, también su régimen erosivo, conllevando al mantenimiento de formas de relieve poco evolucionadas. Las variaciones anuales de precipitaciones son grandes, presentándose series de años muy secos.

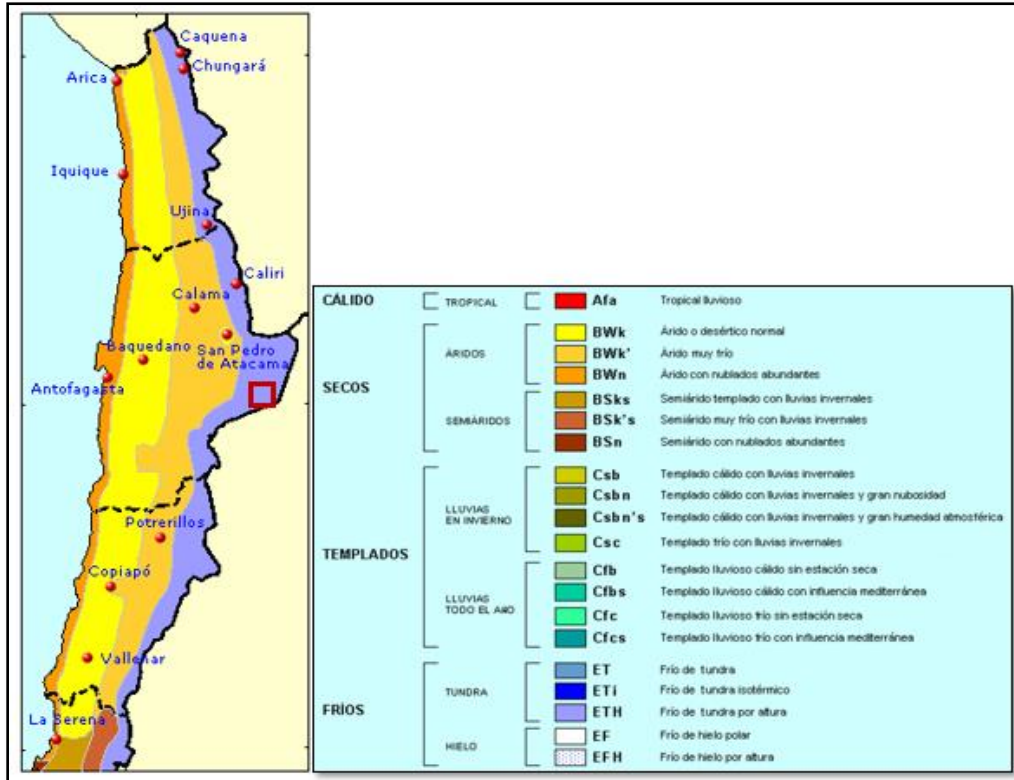


Figura 11. Clasificación climática de Wladimir Köppen aplicada al continente chileno, teniendo para el área de estudio (delimitado en rojo) un sistema climático tipo ETH. Fuente: PUC, Chile.

No obstante, la información meteorológica disponible es insuficiente, particularmente en la alta cordillera andina, teniendo para el área de estudio de manera más próxima las estaciones de San Pedro de Atacama, Toconao y Socaire.

Principalmente, la evaporación desde superficies de agua y desde suelos, es muy alta, con valores entre 1.500 a 2.500 mm/año. La precipitación anual media varía entre los 200 y 300 mm, lo cual, al comparar tal dato con los índices de evaporación del sector, explica el clima de carácter altamente árido (Grilli *et al.* 1986).

3. Metodologías de trabajo

3.1. Recopilación de material bibliográfico

Principalmente dentro de los meses de mayo e inicios de junio, se recurrió a la búsqueda y recopilación de artículos, mapas geológicos, fotogeológicos, metalíferos

e investigaciones científicas de diversa índole asociadas al área de estudio, considerando también aquellas desarrolladas a lo largo de la II región de Antofagasta.

A partir del gran número de trabajos anteriores, se realizó un catastro a partir de la selección criteriosa de los trabajos de investigación, libros de materias específicas (geoquímica, petrología, geomorfología, entre otros), junto con la selección de documentos publicados por entidades gubernamentales, como Sernageomin y la DGA (perteneciente al Ministerio de Obras Públicas).

3.2 Caracterización geomorfológica

Este tipo de caracterización resulta ser una de las primeras etapas de la caracterización geológica de un área definida, puesto que la herramienta principal a utilizar para llevar a cabo la tarea corresponde a la aplicación de imágenes satelitales Landsat -7 y Landsat -8, junto con imágenes previstas por el software Google Earth.

Como complemento adicional, se recurre al uso de programas especializados, correspondiendo a Global Mapper, ArcGis 10.3 y ENVI Standard y Classic 5.3. Con estas herramientas, la caracterización geomorfológica permitió la delimitación de las principales unidades de relieve presentes en la cuenca de estudio a partir de la generación de polígonos.

La figura 11 que se presenta en las páginas siguientes, corresponde a un mapa geomorfológico a escala 1:160.000 desarrollado para representar la morfología de la cuenca y diseñado a partir de un modelo de elevación digital, junto con la ayuda del uso de sensores remotos.

3.3 Tratamiento de imágenes satelitales multiespectrales

Inicialmente, se realizó un catastro de imágenes satelitales del área de estudio a partir de USGS, cuya página web principal alberga una biblioteca con amplia gama de imágenes, de las cuales fueron seleccionadas las de tipo multiespectral y con características aptas para su tratamiento, correspondiendo principalmente a imágenes generadas por los sensores Landsat 7 ETM+, 8 OLI-TIRS y ASTER L1T.

Inicialmente, se hizo uso de los sensores Landsat 7 ETM+ y 8 OLI-TIRS para la detección de los minerales evaporíticos presentes en el salar y junto con las litologías que conforman la cuenca de estudio.

Posteriormente, el uso del sensor ASTER L1T fue para contrastar la información entregada por los sensores Landsat, al igual que las descripciones realizadas en la hoja Toconao (**Gardeweg & Ramírez, 1982**). Con la información presente, se recurrió a técnicas de análisis espectrales para estimar cuantitativamente la ocurrencia de los minerales evaporíticos y materiales detríticos yacientes en superficie salina, de tal forma que se sostenga la información preliminar entregada por los sensores remotos.

3.4 Correlación y validación geológica preliminar con el uso de imágenes satelitales multiespectrales e información bibliográfica

Inicialmente, con la disposición de la información respecto a los sensores remotos utilizados, y junto con el uso de los softwares Global Mapper y ArcGis 10.3, se generó un mapa geológico de escala 1:60.000, utilizando como referencias bibliográficas, la hoja Toconao N°54 de escala 1:250.000 y el mapa geológico de Chile, de escala 1:1.000.000. En la visita a terreno, se realizó la toma de muestras de roca y costra salina para ser posteriormente, descritas y analizadas en laboratorio.

Inicialmente, se aplicaron los resultados obtenidos de las imágenes multiespectrales mediante una superposición de ellas respecto a una imagen en tiempo real del sector de estudio, y junto con datos de la caracterización geomorfológica, se delimitaron las diversas unidades geológicas reconocibles dentro de la cuenca de estudio por medio de la generación de polígonos georreferenciados, los cuales vienen a representar tanto las anomalías observadas en las imágenes satelitales como las descripciones realizadas por la hoja Toconao, principalmente.

3.5 Caracterización hidroquímica

La actividad presente trató principalmente del uso de datos bibliográficos sobre la hidroquímica del salar Aguas Calientes Sur, consistentes en la toma de muestras

de agua superficiales en campañas realizadas y publicadas por **Risacher et al. 1999** y **Troncoso y Ercilla, 2016**, siendo el primero patrocinado por la UCN, DGA y ORSTOM, y el segundo, por Sernageomin. La organización y sintetización de los resultados, con la integración de los resultados de las imágenes satelitales multiespectrales, permitieron establecer correlaciones y posibles interpretaciones respecto a la presencia y distribución de los minerales evaporíticos en el depósito salino.

4. Caracterización Geomorfológica

4.1 Generalidades

Tal como se mencionó anteriormente, el estudio de la cuenca hidrográfica permite entablar las bases del conocimiento sobre el sistema climático e hidrológico del sector de estudio. En el capítulo presente se da a conocer la descripción de las unidades fisiográficas existentes en la cuenca hidrográfica del salar Aguas Calientes Sur, junto con los relieves morfológicos resultantes tanto de la configuración fisiográfica del sector como del control climático que rige en la Puna. La zona muestra una baja tasa de precipitaciones, alto índice de erosión eólica y ausencia de ríos permanentes, siendo esto un factor que impide la actividad fluvial y, por consiguiente, la generación de quebradas en el área (**Cervetto, 2012**).

4.2 Unidades fisiográficas de la cuenca Salar Aguas Calientes Sur

La cuenca presente que comprende al área de estudio muestra una configuración geomorfológica conformada por unidades de relieves volcánicos y relieves de acumulación, los cuales fueron generados a partir de procesos aluviales, fluviales e incluso glaciales, llevándose a cabo sobre la cobertura volcánica dispuesta en el sector altoandino de la región (**figura 12**). De manera condicionante, los factores exógenos de carácter climático, hídrico y biológico han incidido en los procesos de erosión, transporte y acumulación de material volcánico y sedimentario. Como rasgo principal, dentro de su morfología se destaca un estrechamiento en la porción superior causado por la acumulación de depósitos ignimbríticos (Ignimbrita Patao)

y extendiéndose en dirección hacia el oriente desde el cerro Caichinque. Esta característica viene a representar la división del depósito salino en dos sectores; el sector norte conocido como salar de Aguas Calientes y el sector sur como salar de Talar. Básicamente, las unidades geomorfológicas permiten la construcción del relieve actual de la cuenca endorreica que comprende al área de estudio (**figura 13**), sumando el clima como agente regulador, siendo esto una característica semejante al revisar el resto de las cuencas endorreicas de la Puna-Altiplano.

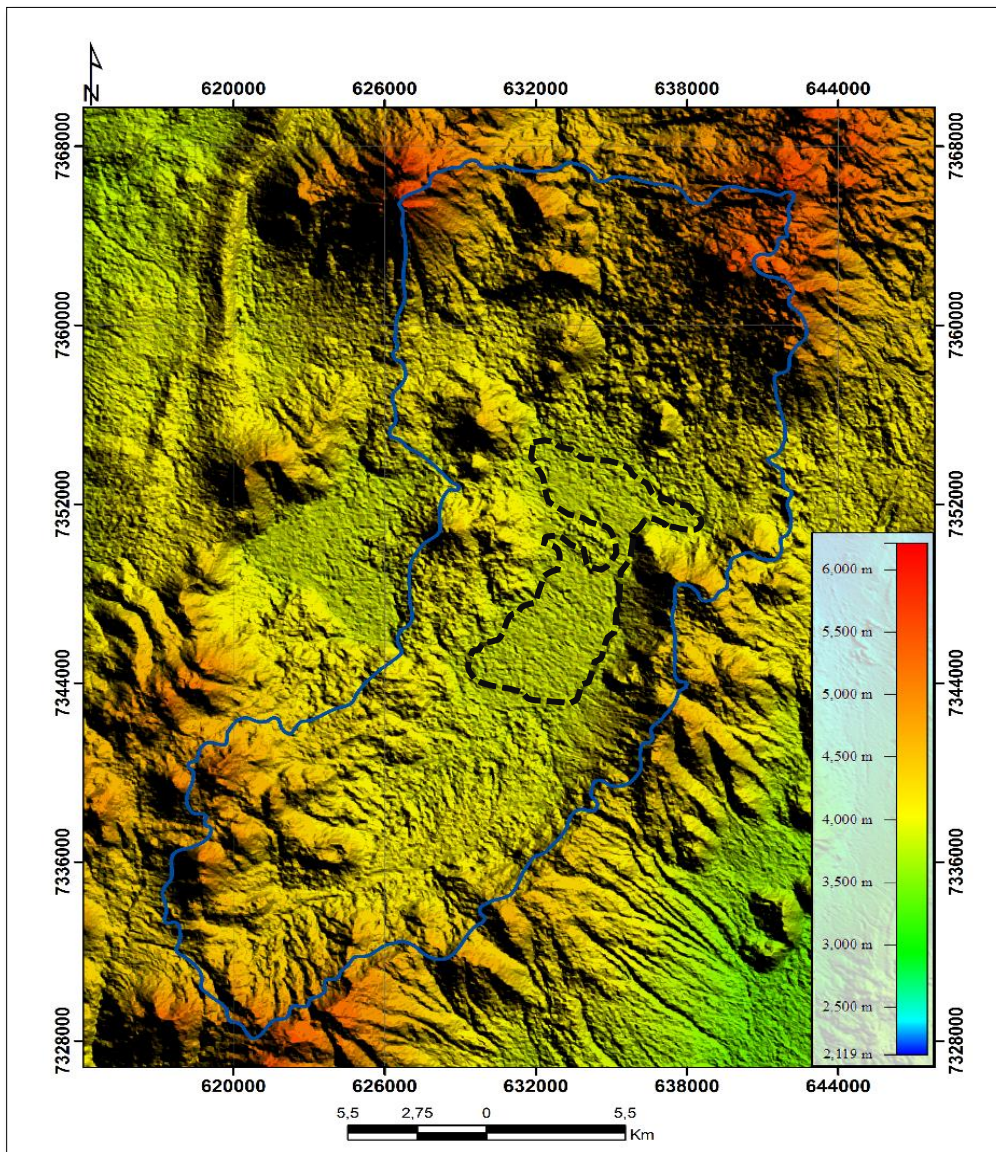


Figura 12. Modelo de elevación digital de la cuenca Salar Aguas Calientes Sur (color azul oscuro), cuyas tonalidades rojizas representan los sectores de mayor altitud. Área de estudio delimitada en color negro.
Fuente: Global Mapper 16.

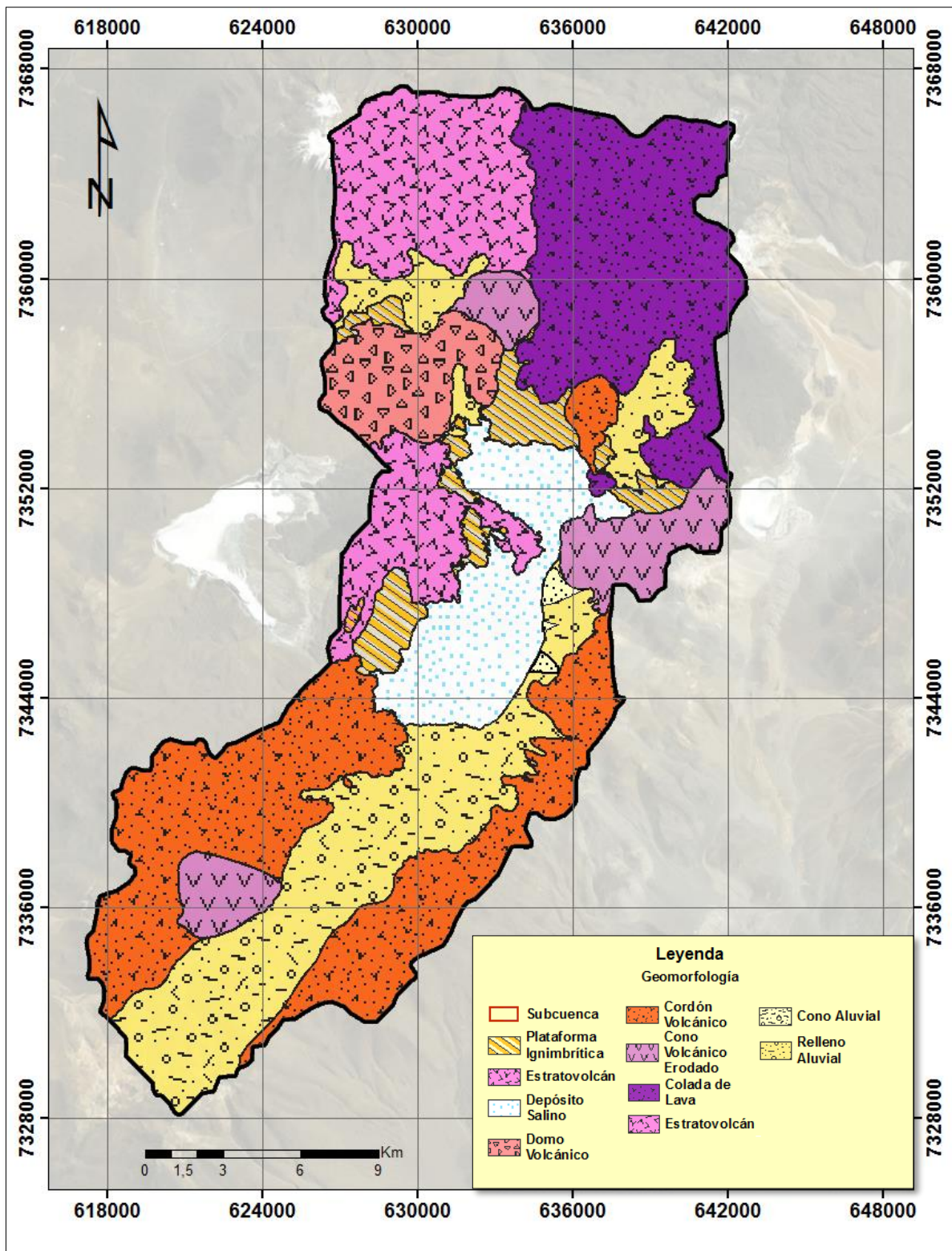


Figura 13. Mapa geomorfológico representativo de la cuenca Salar Aguas Calientes Sur.

4.2.1 Relieves Volcánicos

- **Cordón Volcánico**

Corresponde a una unidad de relieve de acumulación conformada por material volcánico y sub volcánico. A gran escala, comprende a un conjunto de estratovolcanes, conos volcánicos, coladas de lava y domos volcánicos. Dentro de la cuenca Salar Aguas Calientes Sur, se identifican principalmente dos cordones volcánicos, correspondiendo al Cordón de Chalviri, limitando la cuenca presente hacia el norte, y el Cordón de Puruchare, ubicado hacia el sur del salar. Ambos se encuentran mayoritariamente en el sector occidental de la cuenca, dispuestos como una serie de centros eruptivos inactivos, parcialmente erodados y con orientaciones preferenciales WNW y NNE, respectivamente.

- **Cono Volcánico**

Esta unidad apunta a un relieve endogénico producto de la acumulación de fragmentos volcánicos de diversos tamaños (desde dimensiones de tamaño ceniza a bloque), los cuales provienen de la eyección de material volcánico y su posterior acumulación en forma radial respecto al conducto principal de emisión (**Huggett, 2003**). A medida que el material eyectado esté enriquecido en gases, el proceso tendrá un mayor grado de explosividad, en donde al entrar en contacto con la atmósfera, las partículas tienden a solidificarse y precipitan alrededor del cráter. Comúnmente muestran espesores entre 500 y 750 mt, teniendo como referencia el Cerro Tuyajto debido a su cercanía al salar de estudio, junto con múltiples conos volcánicos parcialmente erodados dispuestos mayoritariamente hacia el SSW del área.

- **Estratovolcán**

Clasificado como producto del vulcanismo de borde convergente, este se encuentra conformado por acumulaciones de materiales de sucesivas erupciones a base de estratos alternantes de cenizas y lavas, conllevando a la generación de edificios volcánicos de gran altura. Debido a la morfología, estructura, dimensiones, grado de madurez y/o composición de estos, tienden a sufrir colapsos al nivel de la cima,

pudiendo ser de dos formas: (1) en forma de hundimiento dando lugar a una caldera o (2) de manera de deslizamiento lateral de la cumbre y/o flanco, llegando a generar formas de herradura, bordeadas por un escarpe fuertemente empinado. Como referencia, se tiene hacia el lado occidental del salar, el complejo volcánico Caichinque, con un moderado grado de erosión.

- **Domo Volcánico**

Corresponden a cuerpos sub-redondeados compuestos por acumulaciones de rocas incandescentes de alta densidad y viscosidad, las cuales se acumulan al momento de ser eyectadas. Según los trabajos de **Gardeweg & Ramírez, 1982**, los domos volcánicos distribuidos en la zona de la Puna-Altiplano tienden a resistir por mayor tiempo frente a la intemperie debido a su composición vitrofírica. No obstante, dentro del área de estudio no se identifican estructuras asociadas a domos volcánicos, teniendo evidencias de estos hacia el norte del área (ejemplos como el Cerro Bola, Puripica, Arenoso, Chivato Muerto y Chavaca (**Cervetto, 2012**)).

- **Colada de lava**

Vienen a ser las masas fundidas de magma eyectadas por un volcán y cuyas propiedades físicas se encuentran condicionadas por su amplio rango de composición (desde comportamientos basálticos a riolíticos), contenido en volátiles e historia de enfriamiento. Con esto, se distinguen distintos tipos de coladas de lava, correspondiendo a las lavas cordadas (pahoehoe), coladas aa, coladas en bloques, coladas de lavas almohadilladas y domos.

- **Plataforma ignimbrítica**

Corresponden a rocas que son generadas a partir de flujos piroclásticos densos en un alto contenido de fragmentos magmáticos juveniles y que se emplazan a una temperatura elevada. Particularmente, las ignimbritas se generan por colapsos de las columnas eruptivas. Una de sus características es que este tipo de coladas tienden a rellenar las depresiones morfoestructurales, tendiendo a disponerse como mesetas o plataformas con un leve ángulo de inclinación respecto a la superficie (1°-4°SE), en donde se caracterizan por tener una menor resistencia a la

abrasión eólica. A modo de ejemplo, se tienen ejemplos de plataformas ignimbríticas la Ignimbrita Patao, la cual delimita el flanco occidental del salar, junto con la Ignimbrita Tuyajto delimitando el sector norte.

Particularmente, las plataformas ignimbríticas tienden a presentar evidencias de estructuras lineares, asociados a canales o ridges, cuya ocurrencia se debe a la actividad de la erosión eólica mediante el proceso de deflación (**figura 14**), en donde el viento genera arrastre a partir de las partículas menos consolidadas en la superficie, generando estructuras esculpidas con orientaciones otorgadas por el agente erosivo. Estas estructuras presentan una orientación preferencial NW-SE producto de la erosión (**Cervetto, 2012**), siendo identificable en variadas subcuencas del sector altoandino chileno. Sin embargo, se ha sugerido que los planos de debilidad existentes en ellas pueden influir en la orientación principal de los caracteres derivados por efecto de la actividad eólica (**Bailey et al. 2007**). Asimismo, ciertos estudios previos sobre el clima de la zona de la Puna-Altiplano indican que la dirección del viento proviene predominantemente desde el noroeste (**Das et al. 1998**), el cual, gracias a su alto poder erosivo, permite el desarrollo de estas estructuras lineares e incluso paralelas (**Whitney, 1978**).

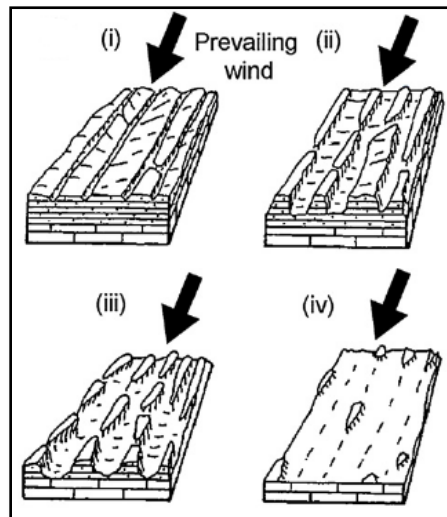


Figura 14. Modelo Conceptual del proceso de deflación. Tomado de Bailey et al. 2007.

4.2.2 Relieves de Acumulación

Este tipo de relieve se clasifica en dos procesos dominantes, correspondiendo a la degradación y agradación. La degradación trata sobre la destrucción del relieve mediante la meteorización de las rocas, erosión de los suelos y movimientos de tierras, cuyos agentes externos influyentes vienen a ser la precipitación, escorrentía, el hielo, el viento y el oleaje hacen posible la degradación. Dichos agentes contribuyen a su vez con el transporte de materiales para gatillar el proceso de agradación, en el cual ocurren acumulaciones de sedimentos que permiten la generación de sub-relieves.

- **Cono Aluvial**

Es un tipo de relieve de acumulación producto de los cauces torrenciales que son originados con los deshielos, los cuales transportan a los sedimentos que provienen desde las altas cumbres del cordón volcánico, descendiendo en dirección hacia la llanura aluvial. Como ejemplo, dentro del área de estudio, se tienen evidencias de conos aluviales en el sector norte del salar, viniendo a ser la falda del cerro Tuyajto y otros registros en el sector oriental del área.

- **Llanura Aluvial**

Corresponde a un tipo de relieve formado por el aporte de la erosión efectuada en las altas cumbres, siendo material volcánico y que mediante los cursos de agua o a través de procesos gravitatorios, ocurre una depositación de material detrítico en las depresiones de la cuenca.

Es común que en esta zona se distingan grandes conos aluviales superpuestos a estas zonas de baja pendiente, y junto con sectores aluviales con cierta acumulación de material para formar zonas de piedemonte. Su composición heterogénea y clástica les confiere un alto potencial hidrogeológico, puesto que la mayor parte de las recargas acuíferas suelen infiltrarse en estas zonas, como ocurre en todas las cuencas que componen al sistema piloto. Es por este motivo, que suelen tener una red de drenaje poco desarrollada o ausente.

- **Depósito salino o salar**

Corresponde a la acumulación de sedimentos enriquecidos en minerales evaporíticos, tanto en forma disuelta como cristalizada, siendo un rasgo geomorfológico comúnmente identificable en la mayoría de las cuencas endorreicas de la Puna-Altiplano.

Viene a ser un producto de la acumulación de aguas presentes en regiones áridas, donde el rango de evaporación supera, para periodos de mayor tiempo, a los aportes de agua que confluyen a la cuenca, constituyéndose principalmente por una fracción líquida que corresponde normalmente a salmueras, una fracción salina representada por la depositación de las diferentes sales transportadas en solución a la cuenca, correspondiendo a cloruros, sulfatos, nitratos, boratos, yodatos, entre otros y, una fracción detrítica constituida por lentes y niveles relativamente potentes de arenas, limos y arcillas interestratificadas en el cuerpo salino principal.

4.3 Características morfométricas de la cuenca

La cuenca se caracteriza por mostrar una elongación NNE-SSW respecto al cordón volcánico altoandino, característica que también comparte el salar Aguas Calientes Sur. Dentro de la cuenca, tanto en la porción norte como porción sur del salar, se identifican lagunas de geometría irregular y de profundidades someras.

Morfológicamente, la superficie de la cuenca se muestra altamente influenciada por sistema volcánico que conforma la Puna, presentando un eje mayor alargado en dirección norte-sur y con sistemas de pendientes decrecientes desde los extremos de la cuenca hacia el centro de ella, lo cual se puede evidenciar por el cercamiento del depósito salino por parte de estructuras tipo domo, y el resto del cordón volcánico conformando las principales cumbres de la cuenca.

Principalmente, la cuenca presenta una superficie total de 504 km², un perímetro de 127 km, altitudes sobre el nivel del mar entre los 3.871 y 5.820 mt, un total de 46 km² para el salar de estudio y cuyas lagunas norte y sur con superficies de 1,4 y 0,8 km², respectivamente (**figura 15**).

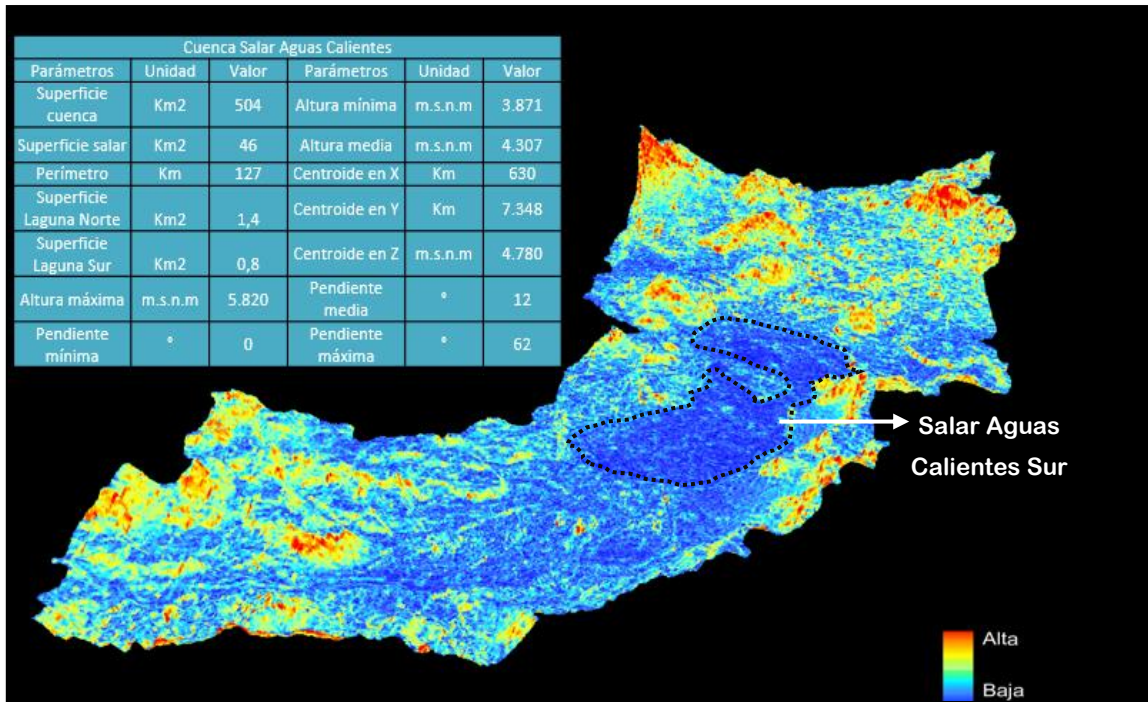


Figura 15. Representación tridimensional de la cuenca salar Aguas Calientes Sur, junto con datos de los parámetros morfométricos principales de estudio. Las tonalidades rojizas y azules reflejan zonas de alta y baja pendiente, respectivamente. Depósito salino delimitado en bordeado interlineado. Factor de elevación: 3. Fuente: ArcScene.

La imagen mostrada anteriormente representa de forma ilustrativa la configuración geomorfológica de la cuenca de estudio, albergando en su porción central el salar Aguas Calientes Sur.

En sus extremos norte y sur, la cuenca se encuentra limitada por los cerros Corchota hacia el noroeste respecto al salar, la falda del cerro Tuyajto hacia el noreste, el cerro Médano hacia el este, el cerro Talar en dirección suroeste y el cerro Purichari hacia el sureste.

Respecto al sistema hídrico, se reconocen afluentes con desembocaduras tanto en las lagunas norte y sur como en la porción central del salar (**figura 16**). Sin embargo, las fuentes de los afluentes son desconocidas, puesto que la coberturas volcánicas y aluviales obliteran sus extensiones.

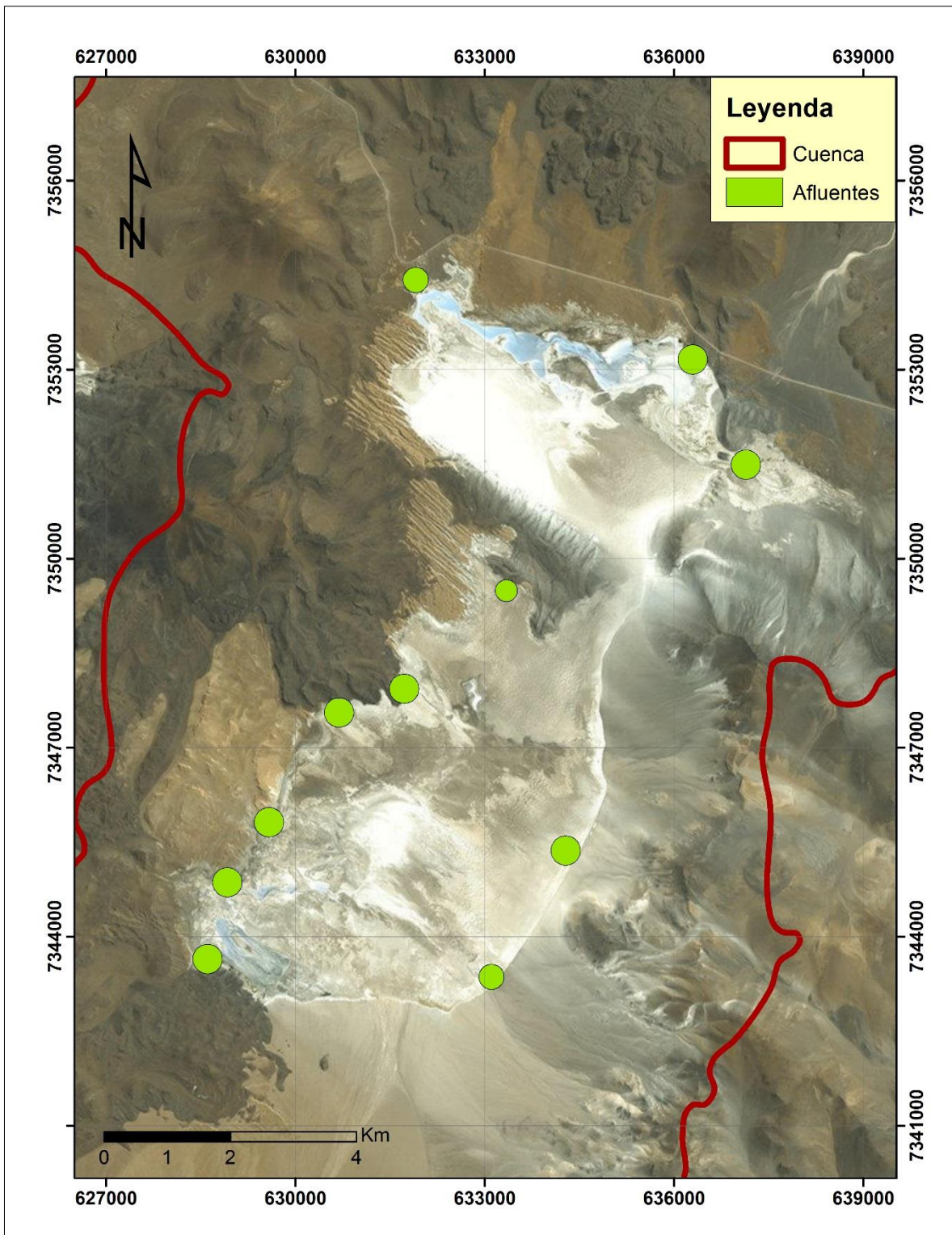


Figura 16. Mapa topográfico con ubicaciones de los principales afluentes del salar Aguas Calientes Sur.

5. Tratamiento de imágenes satelitales

5.1 Generalidades sobre la percepción remota

La teledetección o percepción remota, definida por ciertos autores como la ciencia de la observación a distancia, corresponde a un conjunto de técnicas utilizadas para la determinación también a distancia de las propiedades de los objetos, sean estos de carácter natural y/o artificial, cuya base fundamental es adquirir la mayor cantidad de información descriptiva posible acerca de fenómenos y objetos de la superficie terrestre, sin entrar en contacto directo con ellos (**Hernández, 2011**).

Para el caso de los seres humanos, es posible realizar una visualización directa del entorno gracias a la presencia de sub-órganos, conocidos como conos y bastones. Estos, ubicados en la retina del ojo, presentan un grado de sensibilidad a la luz visible, recayendo en la recepción de los tres colores primarios (rojo, verde y azul) y debido a un efecto aditivo entre ellos, se producen toda gama de colores que el ser humano es capaz de diferenciar. Sin embargo, existe un proceso que permite tal reconocimiento en el entorno presente, correspondiendo a la radiación electromagnética, siendo el medio en que se puede observar un objeto a distancia. No obstante, esta acción puede llevarse a cabo mediante dos casos: ya sea porque la luz visible se refleja en él o bien, porque el objeto emite una radiación propia (**figura 17**).

En el primer caso, la radiación proviene de una fuente externa, viajando por el espacio o la atmósfera y llegando a impactar en un objeto, cuya porción de la luz visible es reflejada. Es esta porción de luz la que el ojo humano percibe de forma natural, o bien, por un instrumento. Particularmente, cada objeto origina un tipo distinto de radiación reflejada, hecho que es utilizado para entablar un patrón para el reconocimiento de un objeto, lo cual se conoce técnicamente como firma espectral. En el segundo caso, para que el objeto emita una radiación propia, se debe tener una temperatura mayor al cero absoluto (Ley de Stefan-Boltzmann). Sin embargo, este tipo de radiación no es visible por el ojo humano, por lo cual se requiere una tecnología basada en diversos sensores diseñados para la percepción

de la radiación térmica. Como característica representativa, aquellos objetos con tal propiedad son capaces de emitir radiación incluso con la ausencia de luz solar.

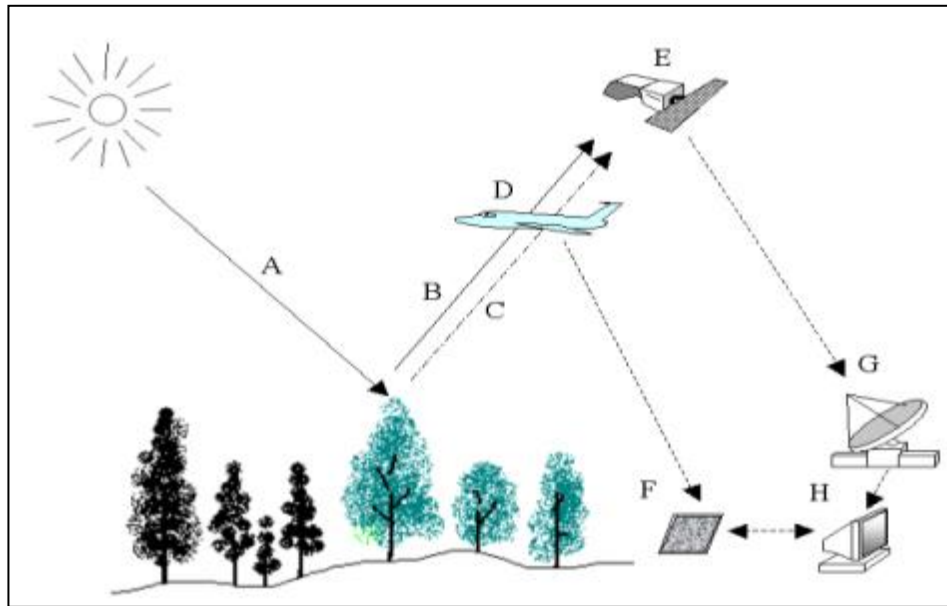


Figura 17. Esquema representativo del sistema de percepción remota con sus respectivos procesos. (A) Emisión de la luz visible por vía aérea, (B) reflexión de una porción de luz visible, (C) emisión propia de radiación, (D) captación de la radiación por un sensor aéreo o espacial (E), (F) generación de una fotografía aérea, (G) tratamiento de la información en una estación receptora, (H) generación de una imagen satelital digital. Tomado de Hernández, 2011.

Como se mencionó anteriormente, en el campo de la percepción remota, se trabaja principalmente con la radiación electromagnética, cuya explicación física recae en dos propiedades: la teoría ondulatoria y la teoría cuántica (Lillesand & Kiefer, 1994).

Según la teoría ondulatoria, se establece que cualquier partícula con una temperatura sobre el cero absoluto es capaz de generar una vibración y que a la vez origina una serie de perturbaciones, conocidas como ondas, las cuales se desplazan a través de un campo electromagnético que rodean a las partículas. Sin embargo, este campo se divide en dos campos vectoriales y dispuestos en forma perpendicular entre ellos (figura 18).

Tales ondas actúan como una fuente de radiación y viajan desde la fuente hacia el infinito a una velocidad constante ($3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$) y constituidas por la emisión de una longitud (λ) de onda a partir de una determinada frecuencia (f). Por otro lado, la

teoría cuántica establece que todo cuerpo radiante es capaz de emitir energía electromagnética de forma discreta y no continua, cuya magnitud es un múltiplo entero de un número específico, denominado *cuanto*.

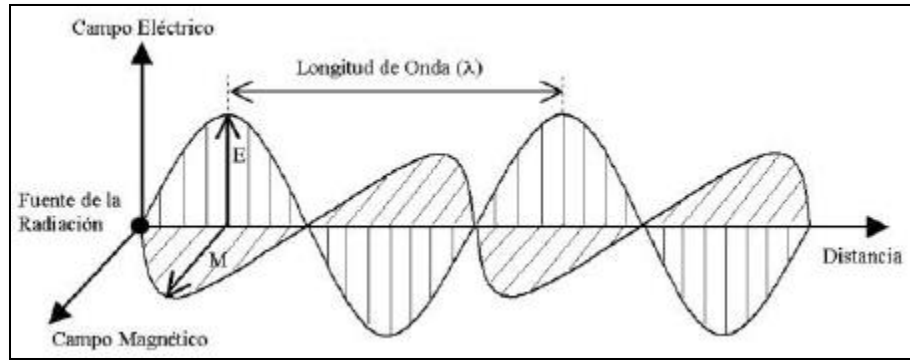


Figura 18. Modelo de la Radiación Electromagnética y sus componentes principales.

5.2 Aplicación de imágenes satelitales multiespectrales

Para el trabajo presente, se recurrió a la búsqueda y recopilación de imágenes satelitales multiespectrales de los sensores Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI-TIRS y ASTER L1T.

A modo de contraste, cada uno de estos sensores se diferencia principalmente por la cantidad de bandas que conforman la imagen, junto con el grado de resolución que cada una de estas pueden entregar.

El sensor Landsat 7 ETM+ se caracteriza por presentar un total de 8 bandas, con resoluciones entre 15-20 mt, respectivamente, y anchos de banda que rondan entre los 0,441-12,36 μm (**tabla 1**), mientras que el sensor Landsat 8 muestra un total de 11 bandas con resoluciones entre los 12-100 mt y anchos de banda respecto al sensor anterior.

Frente a ambos sensores, cada banda según sus propiedades espectrales ofrece ventajas para el reconocimiento de determinados objetos en la superficie, en función al comportamiento espectral de ellos mismos, es decir, que las diferentes coberturas terrestres tienden a responder de manera diferente en términos de reflectividad de la luz solar según la longitud de onda.

LANDSAT 7 ETM+			LANDSAT 8 OLI -TIRS		
Banda	Ancho (μm)	Resolución	Banda	Ancho (μm)	Resolución
			Banda 1 Coastal	0.435 - 0.451	30 m
Banda 1 Blue	0.441 - 0.514	30 m	Banda 2 Blue	0.452 - 0.512	30 m
Banda 2 Green	0.519 - 0.601	30 m	Banda 3 Green	0.533 - 0.590	30 m
Banda 3 Red	0.631 - 0.692	30 m	Banda 4 Red	0.636 - 0.673	30 m
Banda 4 NIR	0.772 - 0.898	30 m	Banda 5 NIR	0.851 - 0.879	30 m
Banda 5 SWIR 1	1.547 - 1.749	30 m	Banda 6 SWIR 1	1.566 - 1.651	30 m
Banda 5 SWIR 1	1.547 - 1.749	30 m	Banda 7 SWIR 2	2.107 - 2.294	30 m
Banda 8 Pan	0.515 - 0.896	15 m	Banda 8 Pan	0.503 - 0.676	15 m
			Banda 9 Cirrus	1.363 - 1.384	30 m
Banda 6 TIR	10.31 - 12.36	60 m	Banda 10 TIRS 1	10.60 - 11.19	100 m
			Banda 11 TIRS 2	11.50 - 12.51	100 m

Tabla 1. Información espectral y espacial de los sensores Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI-TIRS en base al nombre de banda espectral, ancho y resolución.

El caso del sensor ASTER L1T difiere por los resultados de Landsat en torno a la respuesta de reflexión en los materiales, puesto que su estructura se basa en tres subsistemas, correspondiendo al elemento VNIR, compuesto por 3 bandas con una resolución espacial de 15 mt, el elemento SWIR con un total de 6 bandas con 30 mt de resolución y el subsistema TIR con 5 bandas alcanzando un máximo de resolución de 90 mt (**tabla 2**). Cada subsistema opera en distintas regiones espectrales y cada uno con un telescopio establecido, cuyos datos que adquiere el satélite comprenden una amplia cobertura espectral y una resolución relativamente mayor a lo que entrega Landsat 7, permitiendo una mejor discriminación de la serie de materiales que conforma la superficie.

5.3 Recopilación de datos

Inicialmente, se realizó un catastro de las imágenes multiespectrales con mayor nitidez del área de estudio, por lo cual fue necesario recurrir a servicios gubernamentales externos con disponibilidad gratuita de la información remota, siendo USGS la fuente con más información digital en base a material de imágenes satelitales.

En base a los satélites con mayor historial de usos debido su capacidad de resolución, se recurrió a la búsqueda de imágenes producidas por satélites de Landsat 7 y ASTER L1T.

ASTER			
Subsistema	Banda	Ancho (μm)	Resolución
VNIR	1	0.52-0.60	15 m
	2	0.63-0.69	
	3N	0.78-0.86	
	3B	0.78-0.86	
SWIR	4	1.60-1.70	30 m
	5	2.145-2.185	
	6	2.185-2.225	
	7	2.235-2.285	
	8	2.295-2.365	
	9	2.360-2.430	
TIR	10	8.125-8.475	90 m
	11	8.475-8.825	
	12	8.925-9.275	
	13	10.25-10.95	
	14	10.95-11.65	

Tabla 2. Información espectral y espacial del sensor ASTER L1T en base a sus subsistemas, resolución espacial, banda y ancho espectral.

De acuerdo con los objetivos establecidos para el trabajo presente, las imágenes multiespectrales fueron descargadas desde servidores afiliados a USGS como Earth Explorer y Earth Data, junto con el uso de Global Mapper 16 para la descarga de modelos de elevación que serán necesarios para el tratamiento de las imágenes, específicamente para aquella del satélite Landsat 7 ETM+. Particularmente, se tuvo como restricción el uso exclusivo de imágenes con cobertura de nubes menor al 5% y un ángulo de elevación del sol mayor o igual a 40°. Para el caso presente, se obtuvieron tres imágenes multiespectrales, con ángulos de elevación mayores a 55° y predominantemente con ausencia total de nubes (**tabla 3**).

ASTER				
Fecha	Hora	Azimuth	Elevación	Cobertura de nubes
23-02-2004	14:40:12	67.55°	58.83°	2%
Landsat 7 ETM+				
Fecha	Hora	Azimuth	Elevación	Cobertura de nubes
16-01-2002	14:20:03	91.05°	56.7°	0%
Landsat 8 OLI-TIRS				
Fecha	Hora	Azimuth	Elevación	Cobertura de nubes
09-05-2017	14:30:30	38,10°	40,09°	0%

Tabla 3. Metadatos de las imágenes multiespectrales utilizadas para el estudio de la cuenca Salar Aguas Calientes Sur.

5.4 Pretratamiento de las imágenes multiespectrales

Una vez seleccionadas, inicialmente se pretrataron las imágenes Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI-TIRS. Posteriormente, la imagen ASTER L1T fue pretratada al igual que las demás bajo el uso del software ENVI Standard 5.3, recurriendo a diversos subprocesos de corrección que permiten un mejor análisis e interpretación de la imagen resultante, los cuales son descritos a continuación.

- **Calibración radiométrica**

Este proceso permite convertir la información que contiene cada pixel de la imagen original, de Niveles Digitales (ND) a Niveles de Reflectancia, siendo esta captada por el sensor en el tope de la atmósfera, es decir, sin los efectos de esta, lo cual permite disminuir los efectos de dispersión o absorción causados por la presencia de partículas en la atmósfera.

Por consiguiente, el proceso conlleva a la sustracción del efecto de los diferentes ángulos de incidencia de la energía solar y de la distancia entre la Tierra y el Sol, que se producen como consecuencia de las diferencias de tiempo de adquisición de las imágenes.

Técnicamente, lo anterior se traduce en una corrección con el fin de minimizar los errores que influyen en la radiación o en el valor radiométrico de cada material captado en la superficie. En el caso de la imagen Landsat, se limitó de forma exclusiva a la imagen total al área de estudio, con el fin de que las correcciones sean ejercidas en una zona acotada y que no sean influenciadas por ruidos generados en otras porciones de la imagen.

- **Corrección atmosférica (FLAASH)**

Posteriormente, el subproceso presente permite aplicar la corrección de neblina y/o el enmascaramiento de nubes, obteniendo como resultado, una imagen en valores de reflectancia que mejora la separabilidad espectral de los presentes en la imagen corregida respecto a la imagen original, vale decir, que los pixeles son representaciones fidedignas del material en la superficie.

En el trabajo de laboratorio, el subproceso requirió los metadatos de la imagen original, correspondiendo a la fecha y hora del vuelo en que se obtuvo la imagen, tipo de sensor, modelo atmosférico de la zona de estudio, la elevación topográfica que es obtenida a partir del modelo de elevación digital generado previamente y finalmente, la dimensión del pixel que conforma la imagen original, siendo en este caso para todas las imágenes, dimensiones de 30x30 mt.

- **Aplicación del Band Math**

La imagen resultante del subproceso de calibración atmosférica tiende a mostrar valores de reflectancia inferiores al rango óptimo para su tratamiento. Por lo cual, el uso de esta herramienta permite normalizar o bien, reescalar por medio de una ecuación matemática mostrada a continuación, todo dato de reflectancia de cada banda que conforma la imagen en valores entre 0 y 1. La ecuación aplicada en los procesos de tratamiento se muestra a continuación:

$$(b1 \leq 0) * 0 + (b1 \geq 10000) * 1 + (b1 > 0 \text{ and } b1 < 10000) * \text{float}(b1)/10000$$

- **Aplicación del factor de mínimo ruido (MNF)**

Una vez corregida la imagen respecto a la aplicación del subproceso anterior, comúnmente algunas bandas siguen manteniendo valores mayores a 1 o negativos, lo cual es indicio de que aún se tienen materiales que generan ruido durante y después de la corrección atmosférica y matemática. Es por esto por lo que la ejecución del MNF tiene como finalidad la eliminación de todo ruido restante en la imagen mediante el uso de herramientas de enmascaramiento, obteniendo la mayor calidad que se pueda adquirir dentro del proceso de pretratamiento de las imágenes multiespectrales, viniendo a ser un análisis remoto con bandas con valores positivos y entre 0 y 1, respectivamente.

No obstante, la imagen Landsat logró mostrar valores dentro de este rango con la aplicación de la ecuación matemática mostrada anteriormente. Por lo cual, no hubo necesidad de aplicar el subproceso de corrección MNF. Para el caso de la imagen ASTER L1T, esta presenta ventajas considerables tanto a su cercanía de identificar

los materiales de una superficie como sus características previas a su pretratamiento. Esto se debe a que desde su descarga en algún servidor habilitado ya viene corregida radiométricamente y ortorectificada (durante la generación de la imagen, se considera el relieve topográfico para tener una georreferenciación de alta precisión).

Por lo tanto, su pretratamiento es más eficaz que el que se realiza en una imagen Landsat. Como productos finales, las imágenes originales de los tres sensores remotos fueron pretratadas con cada subproceso mencionado anteriormente, teniendo una representación en color real del área de estudio (**ver figuras 19, 20 y 21**) y preparadas para los siguientes análisis descritos a continuación. Notar también que entre ambos productos existe una diferencia en resolución respecto a los elementos presentes, como en la identificación de los cuerpos de agua, por ejemplo.

- **Combinación de Bandas**

Este subproceso resulta ser uno de los pasos más esenciales para la detección y discriminación de las unidades geológicas y características mineralógicas de ellas dentro de un área de estudio.

Considerando una imagen multiespectral con valores de reflectancia normalizados, la combinación de bandas permite localizar de manera local e incluso regional, la distribución de los cuerpos geológicos de interés dentro de un sector específico o bien, en la totalidad de la superficie por medio del uso exclusivo de ciertas bandas que satisfacen la reflexión de cada material.

Una de las ventajas principales del subproceso es el uso de las bandas que conforma a una imagen satelital, acorde al tipo de material que se espera identificar, lo cual se debe a que cada elemento en la superficie terrestre presenta un índice de reflexión dado por una o varias bandas en común.

Para el caso de trabajos como **Neville *et al.* 2000; Flahaut *et al.* 2016**, y entre otros, el uso de combinaciones de bandas para diversos sensores remotos ha sido

demostrado a partir de un reconocimiento en terreno para el material de interés, sean tipos de litología, zonas mineralizadas, etc; dejando en constancia que la aplicación de una o varias bandas que comprenden el rango de reflexión dado por el material permite generar altas probabilidades de ocurrencia para el elemento de estudio.

Considerando la mineralogía previamente estudiada dentro del salar Aguas Calientes Sur, se realizó un catastro de las combinaciones de bandas aplicadas a la identificación de los minerales evaporíticos presentes en el salar de estudio, las cuales fueron recopiladas de trabajos previos asociados al uso de sensores remotos, tanto en prospección geológica como para otros fines (**tabla 4**).

La descripción para cada combinación de bandas se muestra sintetizado acorde a lo que los diversos autores han entablado en sus trabajos, como lo es el caso de la combinación RGB 742, cuyo resultado es el resaltar los límites de las litologías presentes dentro de un área (**Vargas et al. 2009**). Por tanto, esta información se respalda con descripciones hechas en hojas y mapas geológicos, permitiendo un mejor estudio de la zona de estudio.

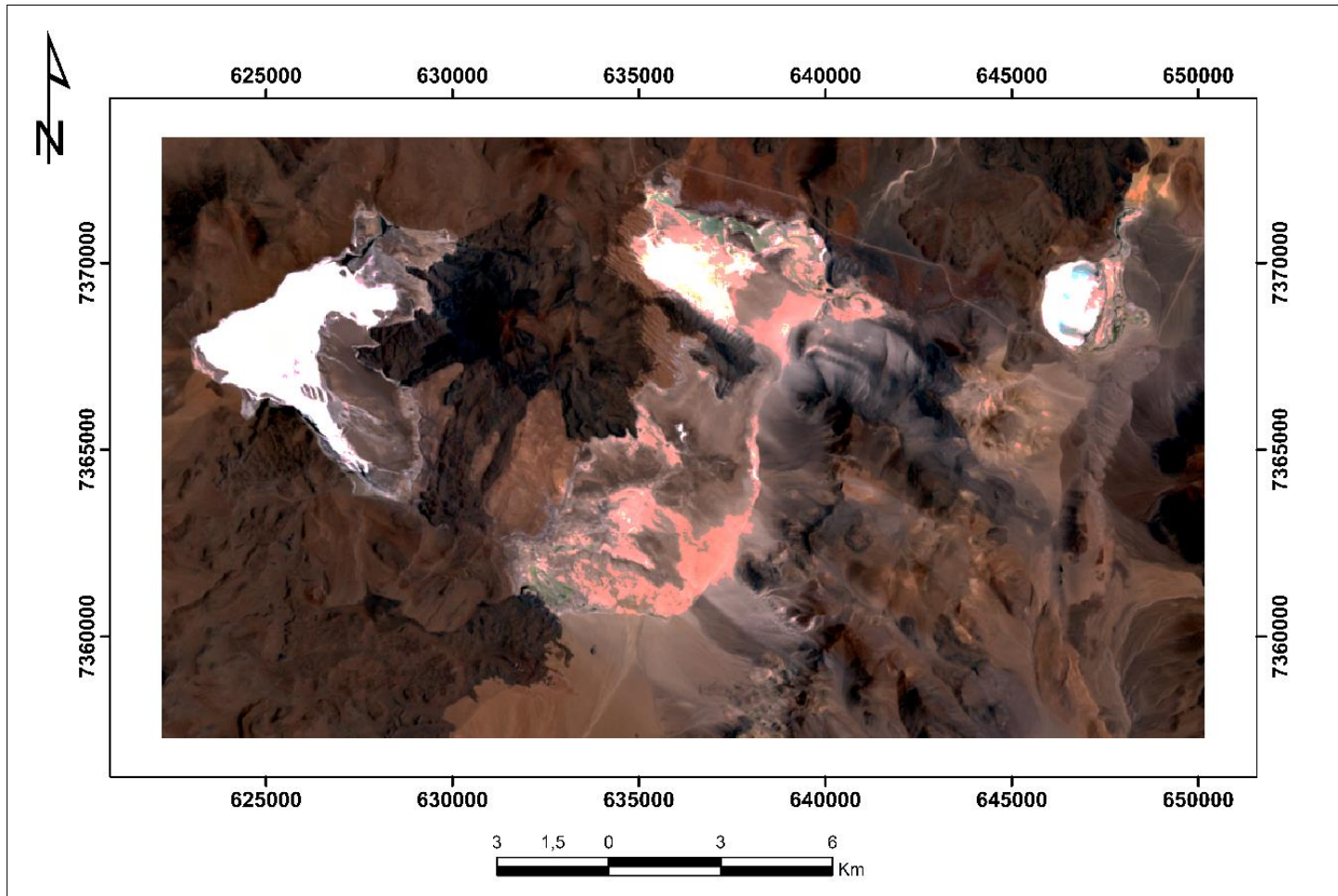


Figura 19. Visualización del salar Aguas Calientes Sur mediante una imagen Landsat 7 ETM+ pretratada y corregida. Ambos elementos con alta reflectancia corresponden al salar de Capur hacia el W y la laguna Tuyajto hacia el E del salar. Fuente: ArcGis 10.

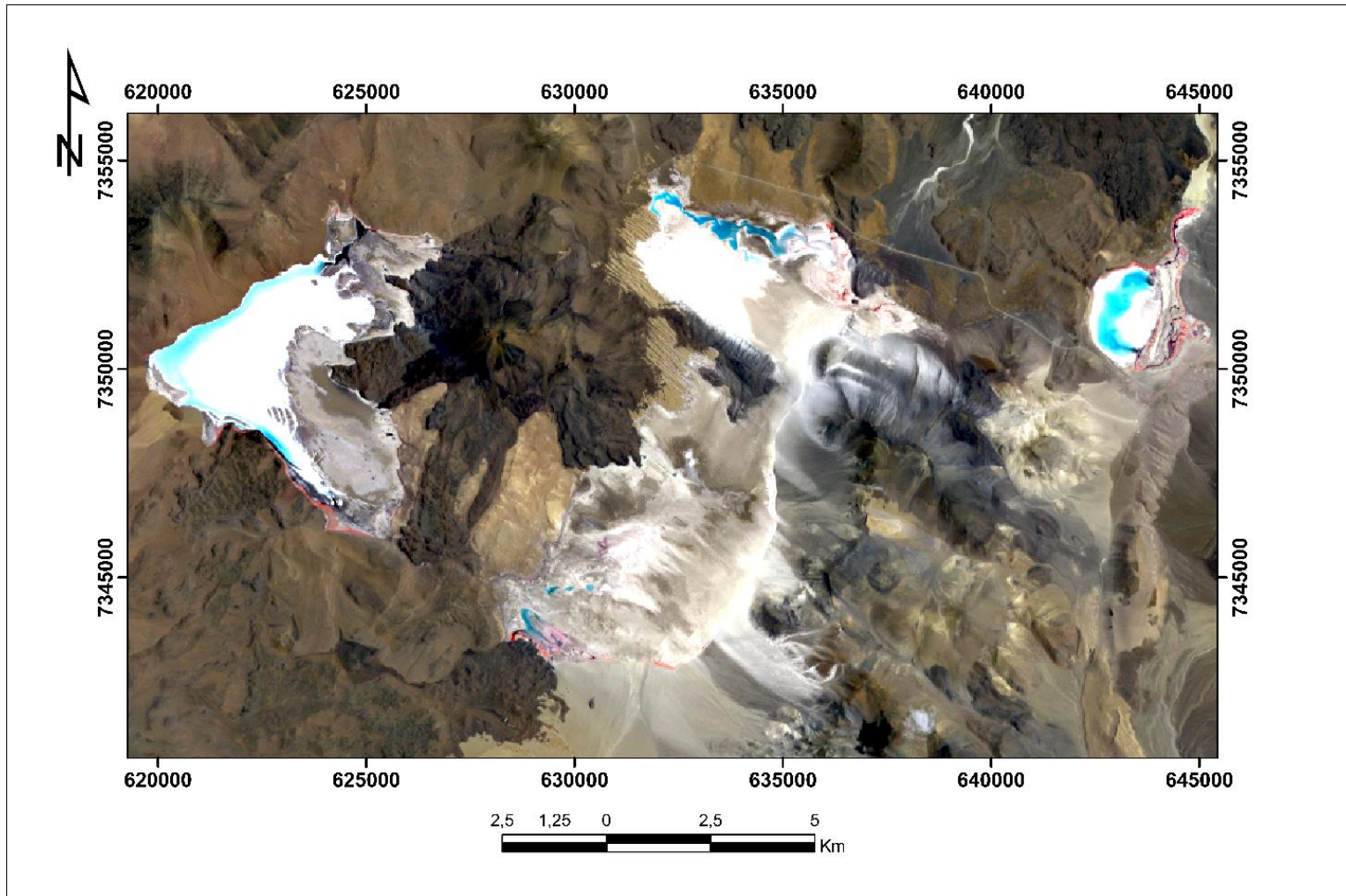


Figura 20. Visualización del salar Aguas Calientes Sur con la imagen ASTER L1T pretratada y corregida. Notar la visualización más detallada de los cuerpos de agua, a diferencia de la imagen Landsat 7 ETM+. Fuente: ArcGis 10.3.

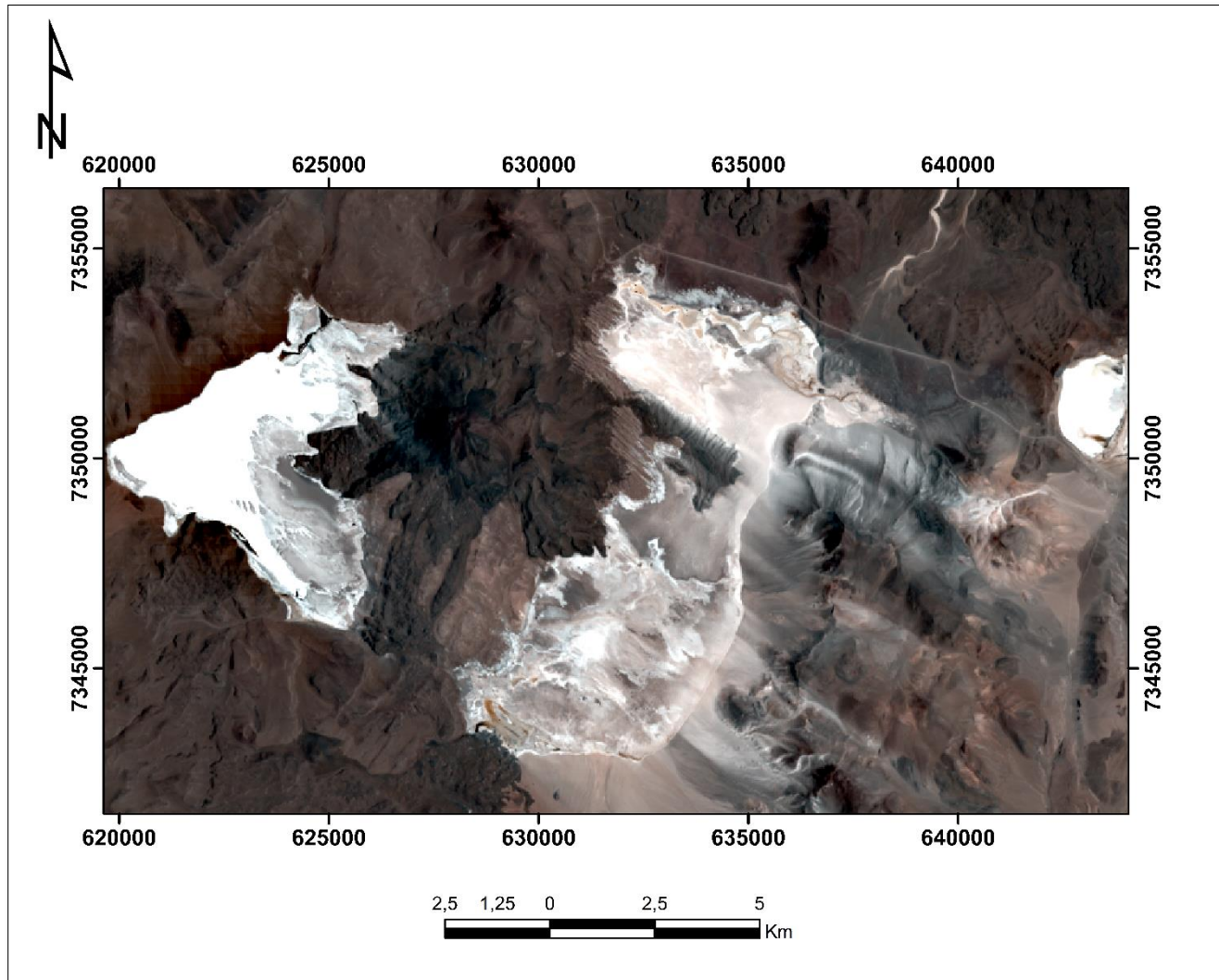


Figura 21. Visualización del salar Aguas Calientes Sur con la imagen Landsat 8 OLI-TIRS pretratada y corregida. Fuente: ArcGis 10.3.

Autor/es	Combinación	Sensor	Aplicaciones
Neville <i>et al.</i> 2000	1, 4, 5	Landsat 5 y 7	Determinación de yeso en cuencas salinas.
Nield <i>et al.</i> 2007	5 y 7	Landsat 7	Identificación de suelos con contenido en yeso.
Martinez-Montoya, 2000	5,7,6	Landsat 7	Identificación de suelos con contenido en yeso.
Crippen, 1989	3/1	Landsat 7	Discriminación de suelos con óxidos de hierro.
Serkan, 2014	5/7	Landsat 7	Minerales con contenido en carbonatos.
Flahaut <i>et al.</i> 2016	5 6 7	Landsat 8	Discriminación de costras salinas enriquecidas de sulfatos.
Flahaut <i>et al.</i> 2016	5/2 y 4/2	Landsat 8	Útil para el rastreo del efecto de la dilución de sal en los suelos.
Delendatti, 2003	5-7, 4-5-7, 1-4-5-7	Landsat 4	Identificación de zonas enriquecidas de minerales de alteración argílica y/o félica y zonas silicificadas.
	3-4, 3-4-5, 1-3-4-5	Landsat 4	Identificación de zonas con asociaciones de óxidos de Fe.
Franco, 2017	4 3 1	Landsat 8	Batimetría. Se destacan objetos en cuerpos de agua.
	4 3 2		Color Natural de la imagen. Color real al ojo humano.
	5 4 3		Color infrarrojo. Útil para estudios de vegetación, patrones de suelos y monitoreo de drenajes. Vegetación sana en rojo brillante.
	5 6 2		Útil para distinguir vegetación saludable en sectores agrícolas.
	5 6 4		Diferenciación de tierra/agua e identificación de áreas forestadas.
	6 5 2		Agricultura y distinción de áreas agrícolas. Identificación de bosques, manglares.
	6 5 4		Análisis de vegetación.
	7 4 2		Discriminación litológica de unidades geológicas. Tonalidades celeste-azuladas para los suelos evaporíticos y tonalidades rojizo-anaranjadas a oscuras para los depósitos volcánicos. Tonalidad pardo-amarillenta para los rellenos sedimentarios.
	7 5 3		Visualización de la imagen natural con remoción atmosférica.
	7 5 4		Combinación de infrarrojos para identificación de anomalías termales en suelos.
	7 6 4		Destaca formaciones rocosas. Útil para la identificación de áreas urbanas.
7 6 5	Penetración Atmosférica. Útil en geología para el análisis de humedad de suelo.		

Tabla 4. Catastro de las combinaciones de banda comúnmente aplicadas en diversas ramas de investigación.

Dentro de este trabajo, se aplicaron para las imágenes Landsat 7 y 8 las combinaciones RGB 145 (Neville *et al.* 2000), 345, 742 (Rodríguez *et al.* 2009; Franco, 2017) y 567 (Flahaut *et al.* 2016), de forma que se identifiquen correlaciones o diferencias respecto a la respuesta de cada imagen, puesto que todas poseen distintos rangos de absorción y reflexión para cada banda. Inicialmente, en el caso de la imagen Landsat, la combinación RGB 145 arrojó cuerpos con presencia de yeso, los cuales poseen altos peaks de reflectancia y de tonalidad blanco amarillento (figura 22), delimitando estos cuerpos tanto en sectores locales en bordes del salar como en zonas pequeñas ubicadas al centro del depósito salino. A diferencia de otras aplicaciones de bandas como la banda 5 y 7 en escala de grises (Nield *et al.* 2007), estas tienden a identificar no solo capas enriquecidas de yeso, sino también superficies con contenidos de arcilla (caolinita, montmorillonita). Asimismo, de acuerdo con trabajos y reportes realizados por la organización SRGIS, se conoce que dentro de los sensores más utilizados como Landsat 7, 8, ASTER y WorldView, estos dos últimos son los sistemas remotos con mayor grado de veracidad para identificar los materiales existentes en un área determinada (figura 23), debido a que su firma espectral imita de manera casi explícita a lo que refleja un mineral u otro elemento. Esta información ha sido respaldada por los trabajos que esta misma empresa ha realizado de forma privada para diversos proyectos de prospección geológica, principalmente. Con ello, la firma espectral conformada por las bandas de las imágenes multiespectrales tiene como finalidad detectar los peaks de reflexión por medio de una tendencia espectral. Para poder esclarecer la información y determinar si realmente la reflexión proviene de un mineral evaporítico como el yeso y no de arcillas presentes en la superficie, se realizó el estudio entre la firma espectral de un pixel que abarca un área específica de la imagen y la firma del mineral de interés (figura 24). Para esto, se importó una biblioteca espectral que contiene el mismo programa ENVI 5.3, denominada jpl1, de la cual se modeló la firma espectral del yeso y junto con la firma obtenida del pixel. El análisis fue realizado en dos puntos ubicados en un sector próximo al borde del salar (punto A) y en un sector próximo a la laguna norte (punto B), teniendo aproximadamente 1,5 km de distancia entre ellos.

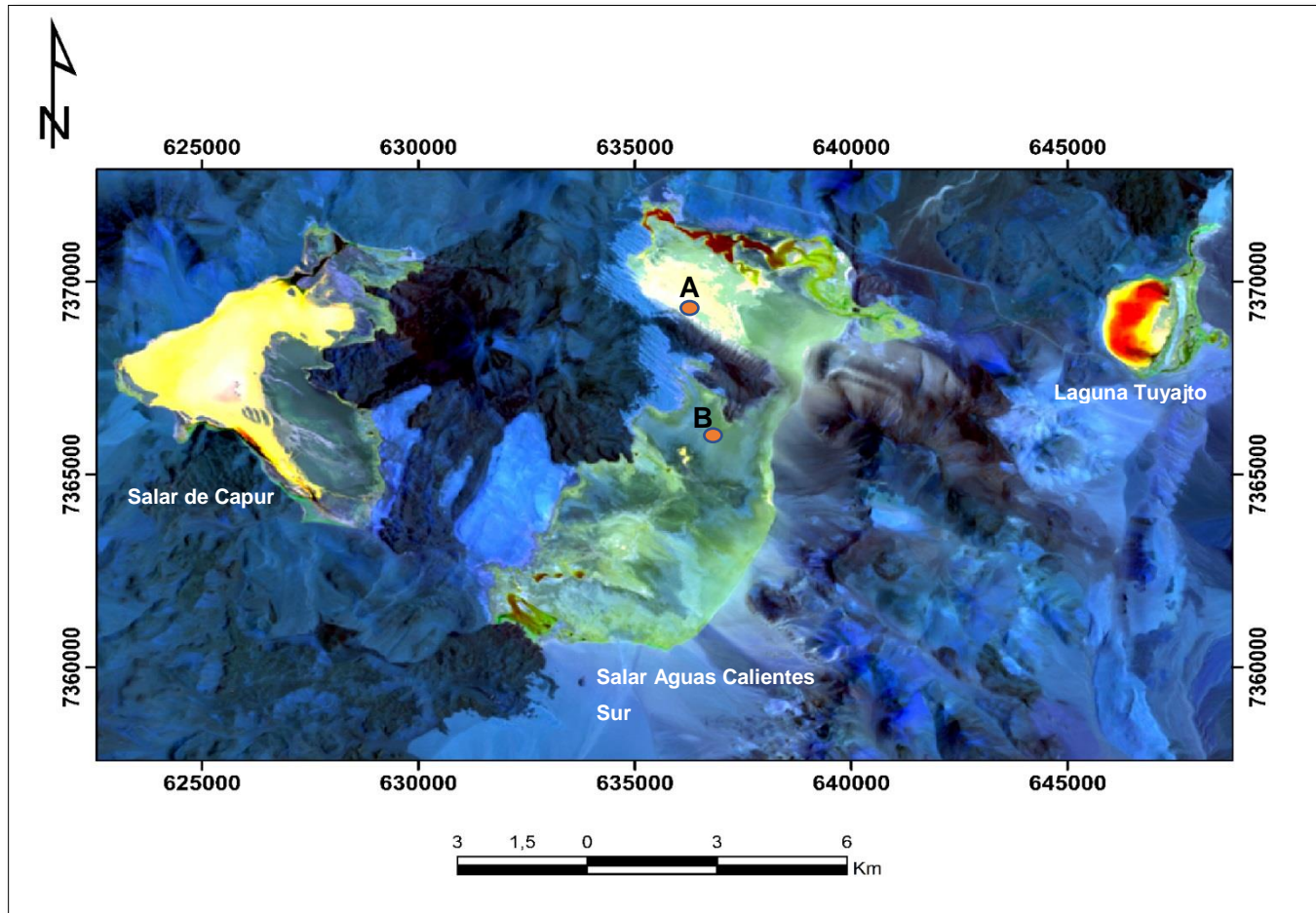


Figura 22. Identificación de cuerpos enriquecidos en yeso por medio de la combinación RGB 145 en Landsat 7 ETM+. Notar la alta reflectancia en la porción central del salar de Capur ubicado al W del salar Aguas Calientes Sur y los bordes de la laguna Tuyajto. Puntos de estudio A y B marcados en color naranja. Fuente: ArcGis 10.3.

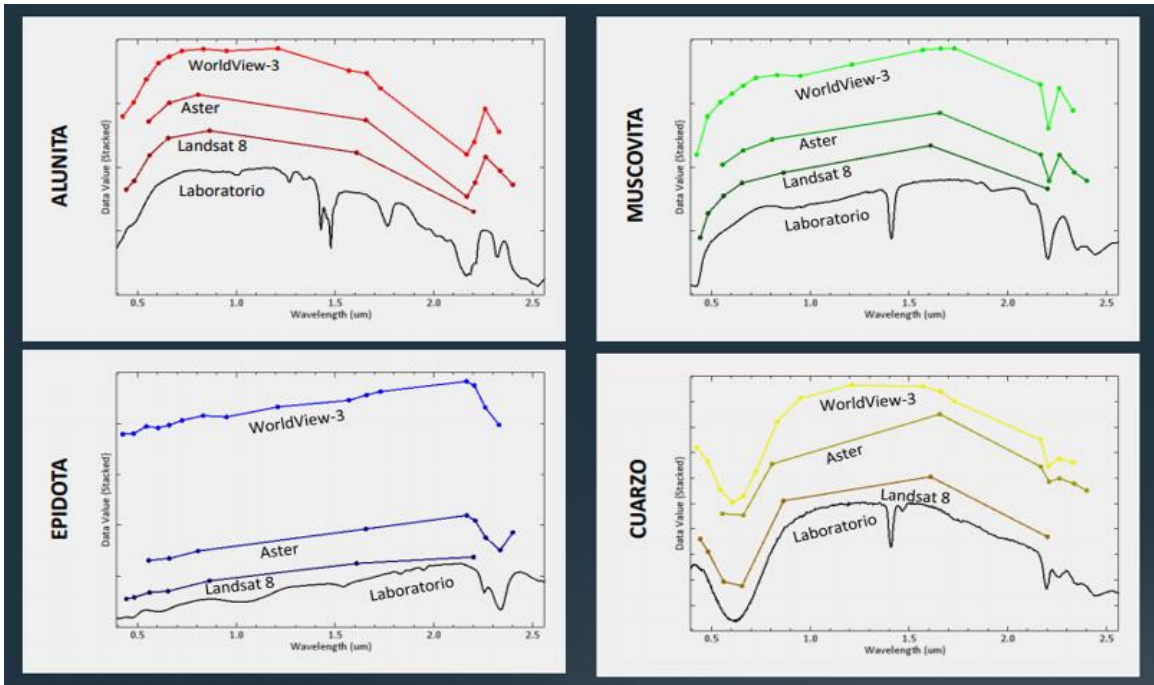


Figura 23. Comparación entre las similitudes en reflectancia para los sensores Worldview, ASTER y Landsat. Notar la gran aproximación del espectro de una imagen Worldview -3 respecto al espectro de minerales como alunita, epidota, muscovita y cuarzo. Tomado de Lattus, 2016.



Figura 24. Análisis entre la firma espectral del pixel del punto de estudio A y la firma espectral del yeso obtenido de la librería espectral jpl1. Coordenadas: UTM WGS84 (19H) 636135-7369555. Imagen Landsat 7 ETM+. Fuente: ENVI Classic 5.3.

Al revisar ambas firmas del punto A, se observaron tanto peaks de reflectancia para las bandas 2 y 4 como la absorción en la reflectancia desde la banda 4 hasta la banda 7, lo cual se interpretó como una aproximación al comportamiento espectral del yeso en tal rango de onda.

Asimismo, debido a la cantidad de bandas involucradas en la imagen Landsat, esta no logra imitar los descensos abruptos del perfil del yeso, pero entre la banda 2 y 4 existe una cantidad constante de reflexión por parte de ambos perfiles espectrales. Esto puede ser respaldado en que el yeso tampoco presenta respuesta por las bandas 5 y 7, correspondiendo a una porción lineal del espectro (Rodríguez *et al.* 2009).

Sin embargo, al analizar el punto B, se obtuvo un resultado mucho más preciso que en el punto A (figura 25), incluso se llegó a interpretar una tonalidad distinta en el pixel de estudio. Utilizando como referencia un punto de muestreo realizado en una campaña previa en el salar (Flahaut *et al.* 2016), del cual se determinó la mineralogía por medio del método DRX, la firma espectral del pixel estudiado marcó una tendencia similar a la firma del yeso, arrojando un valor constante en reflectancia para las bandas 3 y 4 y una absorción notoria en la banda 5.

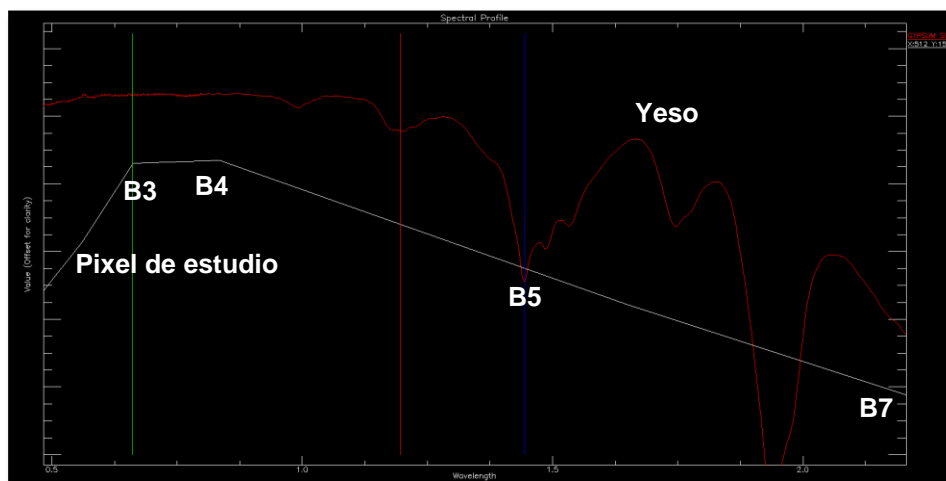


Figura 25. Análisis entre la firma espectral de un pixel del punto de estudio B y la firma espectral del yeso obtenido de la librería espectral jpl1. Coordenadas: UTM WGS84 (19H) 637545-7368865. Imagen Landsat 7 ETM+. Fuente: ENVI Classic 5.3.

Dentro de los demás resultados frente a la identificación de minerales evaporíticos, la imagen Landsat 7 también arrojó buenos resultados respecto a la presencia de yeso al utilizar la combinación RGB 751 (**figura 26**), donde aquellas zonas enriquecidas en yeso tienden a presentarse con tonalidades azul turquesa (**Marquetti et al. 2004**).

Tal característica fue respaldada con la información obtenida del estudio de los perfiles espectrales. Asimismo, la combinación RGB 345 también permitió identificar las anomalías de yeso, delimitando los cuerpos con yeso en tonalidades amarillo-anaranjadas (**figura 27**).

Para la imagen Landsat 8 OLI-TIRS, se utilizó inicialmente la combinación RGB 567 (**figura 28**), cuya capacidad recae en la identificación de superficies enriquecidas en sulfatos (**Flahaut et al. 2016**), comúnmente de color naranja-amarillento intenso.

Particularmente, este sensor fue utilizado para la detección de cubiertas evaporíticas en lugares como el salar de Atacama hacia el noroeste del salar Aguas Calientes y en otros depósitos al norte desde esta posición como el salar de Quisquiro, salar de Laco y la laguna Tuyajto (**Flahaut et al. 2016**).

Para corroborar la efectividad de esta metodología, se interpolaron 5 puntos de muestras de costra salina ubicadas principalmente en los bordes del salar y obtenidas a raíz de una campaña realizada por Sernageomin en el año 2016, en base a sus coordenadas y los resultados obtenidos por un análisis DRX (**figura 29**).

Comparativamente, se modelaron las firmas espectrales del pixel que comprendía los puntos de muestreo con las firmas espectrales de los minerales dominantes en el análisis DRX. Junto con esto, se añadieron dos puntos de muestreo realizados por **Flahaut et al. 2016**, ubicados en el miembro central. La información se trabajó en el software ENVI Standard 5.3.

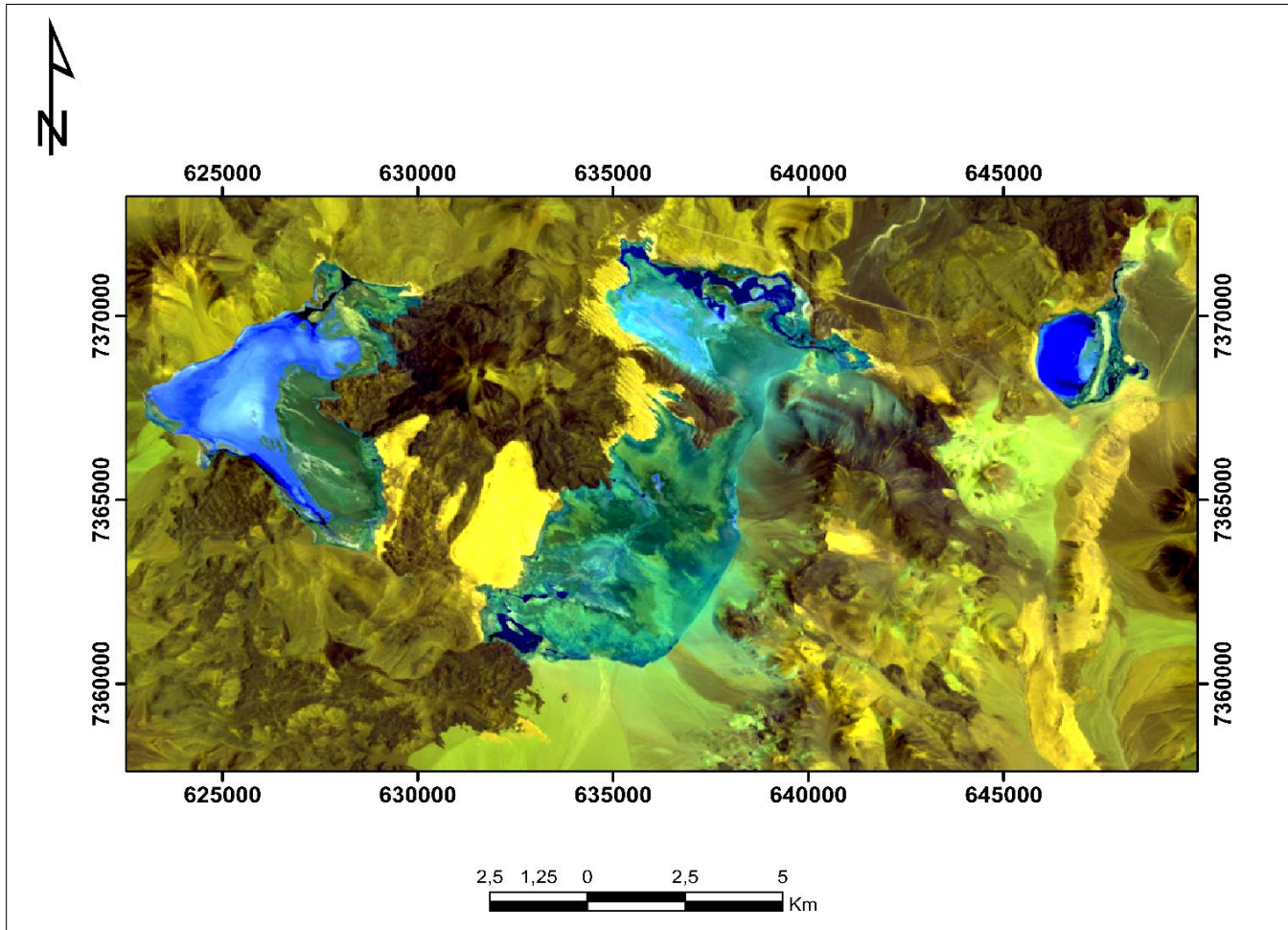


Figura 26. Identificación de cuerpos enriquecidos en yeso por medio de la combinación RGB 751 en Landsat 7 ETM+. El yeso se presenta en tonalidades azul turquesa, principalmente en el miembro norte del salar Aguas Calientes Sur y de manera local, en sus bordes y en el miembro sur.
Fuente: ArcGis 10.3.

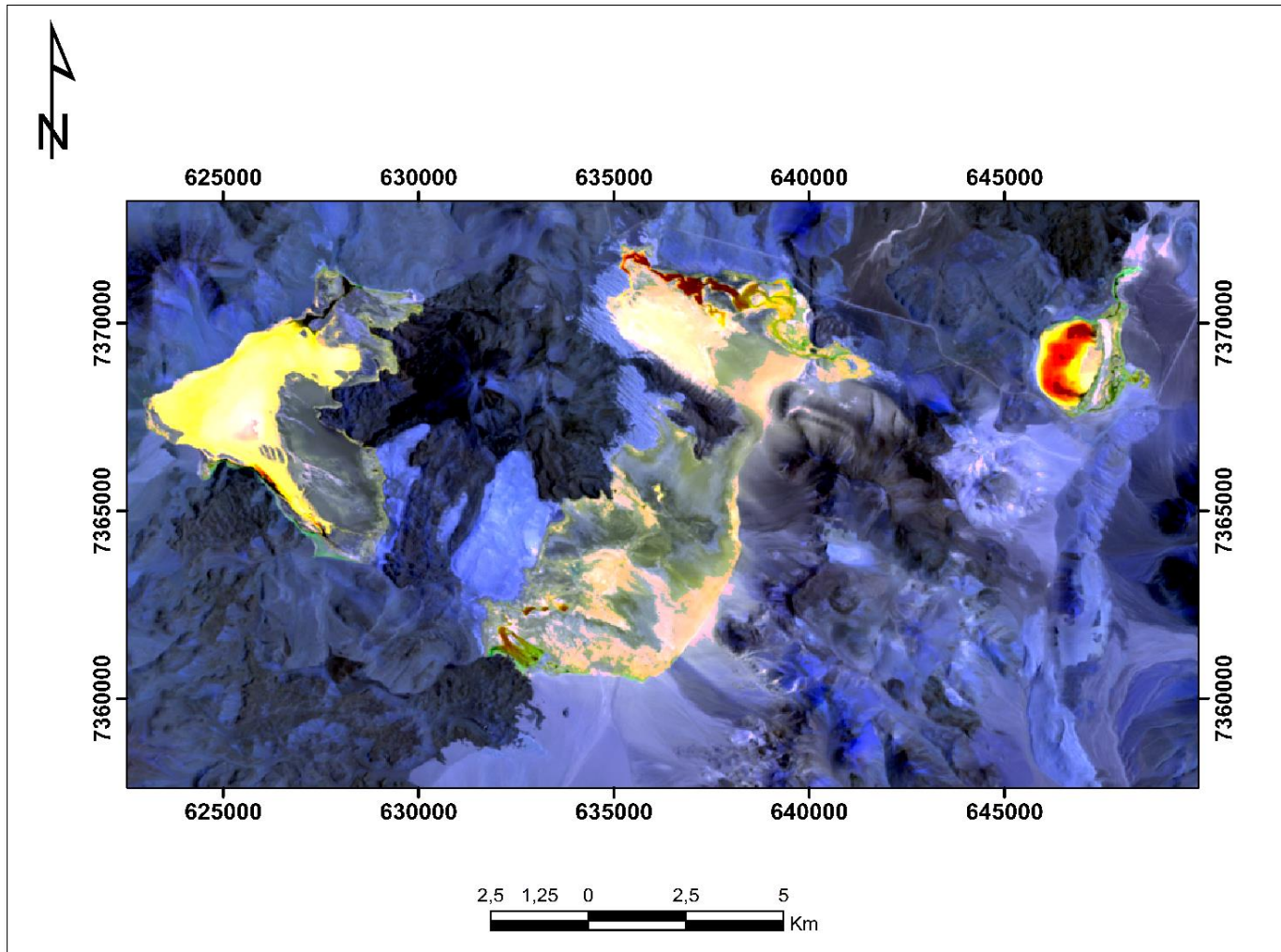


Figura 27. Identificación de cuerpos enriquecidos en yeso por medio de la combinación RGB 345 en Landsat 7 ETM+. El yeso se presenta en tonalidades amarillo-anaranjadas, realzando su presencia en los miembros norte, sur y considerablemente en los bordes del salar. Fuente: ArcGis 10.3.

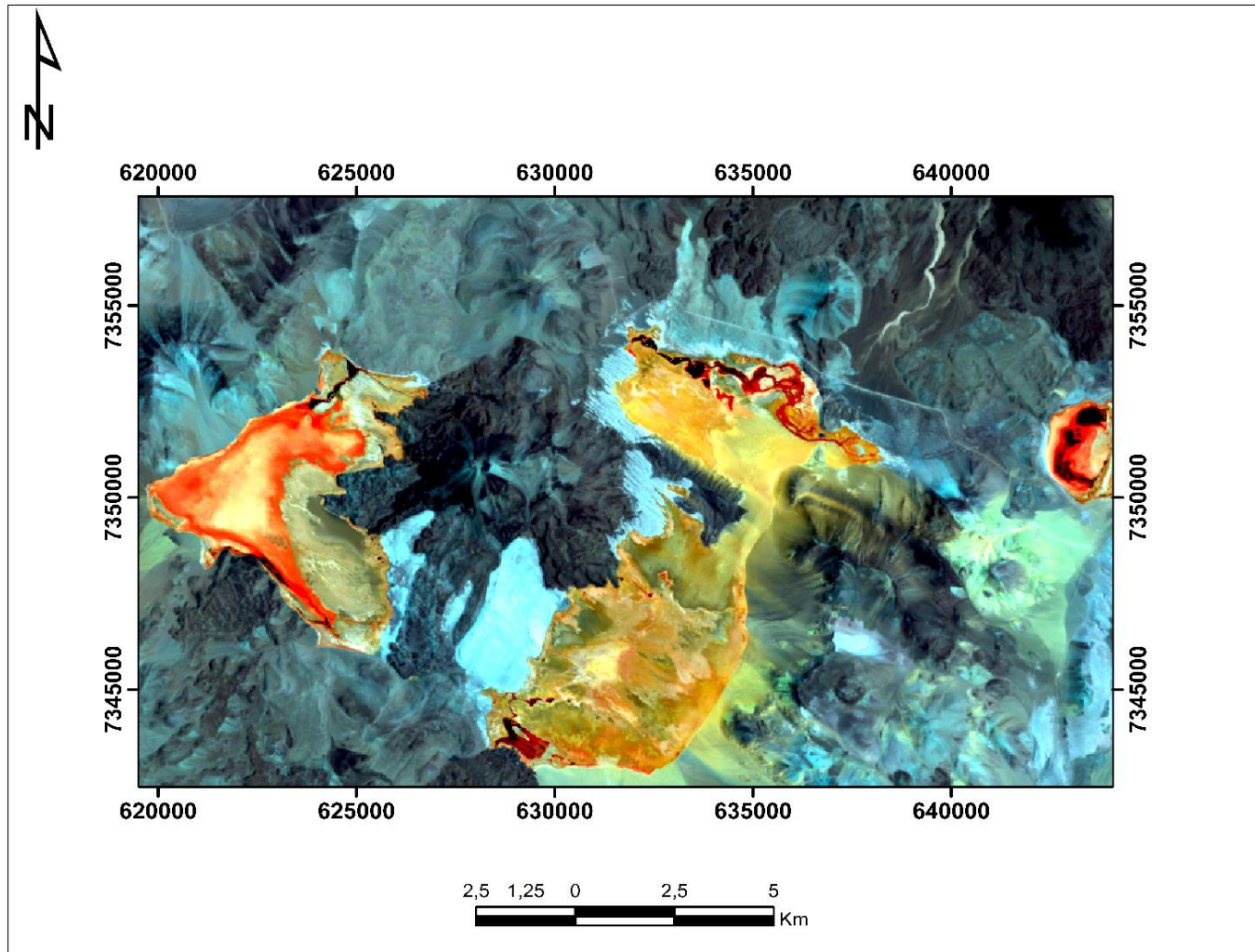
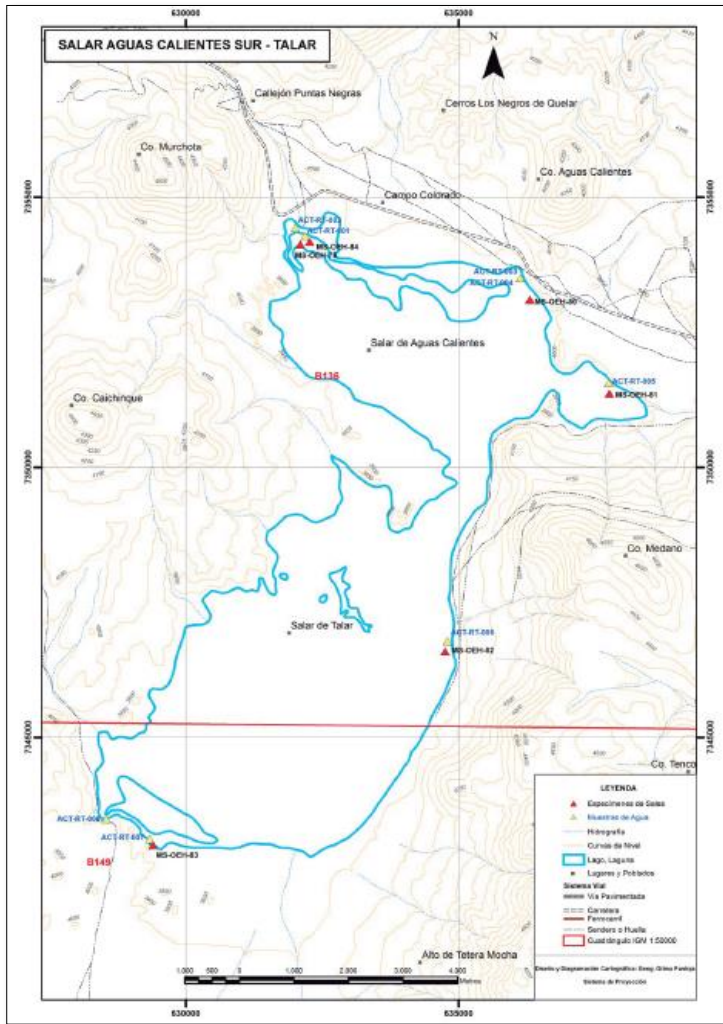


Figura 28. Identificación de coberturas enriquecidas en sulfatos por medio de la combinación RGB 567 en Landsat 8 OLI-TIRS. El yeso se presenta en tonalidades amarillo-anaranjadas, siendo homólogo para los salares de Atacama, Quisquiro y del Laco (Flahaut et al. 2016). Fuente: ArcGis 10.3.



Salar	Este	Norte	Altitud	Código	Mineralogía por DRX
Aguas Calientes-Talar	632091	7354216	3.938	MS-OEH-79	Yeso, nitrato, caolinita
Aguas Calientes-Talar	636299	7353193	3.939	MS-OEH-80	Yeso, halita
Aguas Calientes-Talar	637757	7351457	3.952	MS-OEH-81	Yeso, halita
Aguas Calientes-Talar	629393	7343095	3.937	MS-OEH-83	Yeso, halita
Aguas Calientes-Talar	632262	7354263	3.937	MS-OEH-84	Yeso, halita, nitrato

Figura 29. Mapa topográfico con la distribución de muestras de sales (triángulos rojos) y aguas (triángulos amarillos). El primer mineral mencionado en la tabla de muestras con realización de análisis DRX representa la sal más abundante para cada muestra estudiada. Modificado de Troncoso y Ercilla, 2016.

Inicialmente, al analizar los resultados obtenidos por **Flahaut et al. 2016** en el software ENVI Standard 5.3, las firmas espectrales del pixel que comprendía el punto de muestreo J5L1R3Z1 arrojaron una buena correlación en algunos de los minerales evaporíticos detectados por el análisis DRX, correspondiendo a calcita, yeso y en forma secundaria, halita (**figura 30**).

Debido a la dimensión del pixel que conforma a la imagen Landsat, correspondiendo a 30x30 mt, la baja similitud entre las firmas espectrales de los minerales frente a la firma de estudio puede deberse a una baja concentración respecto a aquellos minerales dentro del área limitada por el pixel, como es el caso de la halita y el yeso. No obstante, cabe destacar que el tipo de sensor utilizado, como lo es Landsat 7 ETM+ y 8 OLI-TIRS, presentan una firma que no es exactamente precisa a las firmas espectrales que identifican a un material, sino más bien una aproximación o tendencia a seguir la firma del mineral.

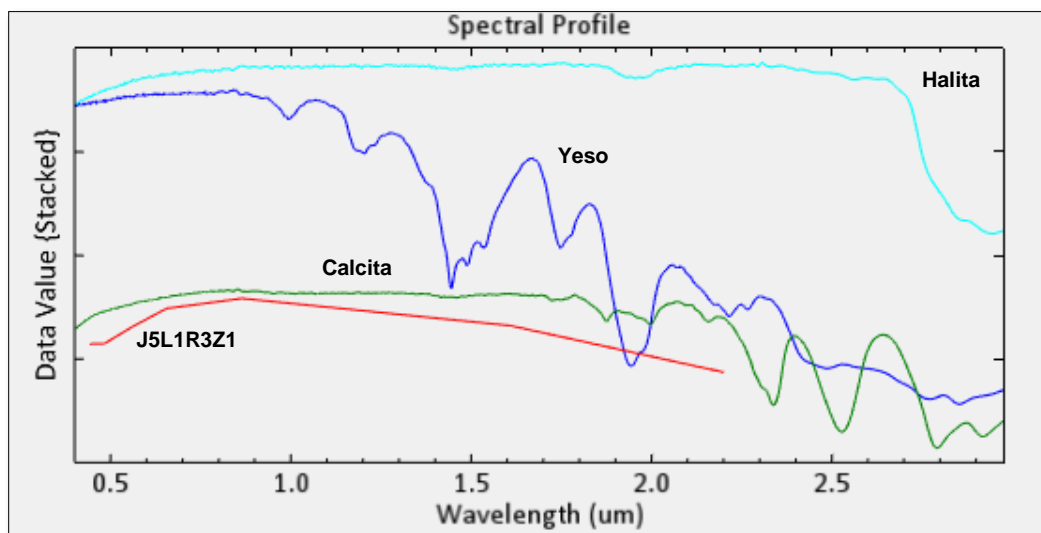


Figura 30. Comparación entre la firma espectral del punto de muestreo J5L1R3Z1 (Flahaut et al. 2016) y las firmas de aquellos minerales detectados por el análisis DRX. Notar la buena correlación entre la firma de la calcita (verde) y el punto de estudio

De manera análoga, el punto J5L1R3Z2 mostró un comportamiento muy similar respecto a la respuesta espectral de los minerales presentes (**figura 31**), lo cual pudo deberse a la cercanía y posición entre ambos puntos de muestreo en una zona local y mineralógicamente homogénea.

Asimismo, bajo el mismo procedimiento se recurrió al estudio de los 5 puntos de muestreo realizados por **Troncoso y Ercilla, 2016**, mostrando entre ellos un comportamiento equivalente entre las firmas espectrales de los minerales detectados por el análisis DRX y el pixel de estudio.

Al observar los resultados, en la muestra MS-OEH-79 (**figura 32**) se observó una buena correlación con el yeso y de forma secundaria, con caolinita y nitrato. Por otro lado, en la muestra MS-OEH-80 (**figura 33**) se detectó una buena respuesta frente al yeso y halita, al igual que en los minerales identificados en las muestras MS-OEH-81, MS-OEH-83 y MS-OEH.84, aunque en esta última el nitrato identificado en el análisis DRX si presentaba un patrón similar a la firma del pixel estudiado (**figura 34**).

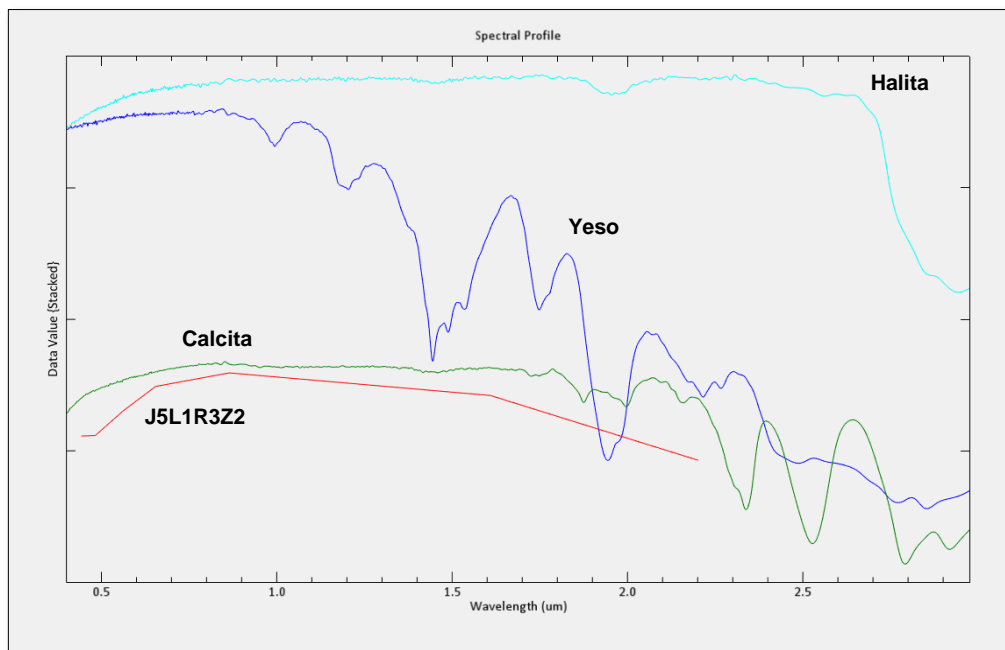


Figura 31. Comparación entre la firma espectral del punto de muestreo J5L1R3Z2 (Flahaut et al. 2016) y las firmas de aquellos minerales detectados por el análisis DRX. Notar la buena correlación entre la firma de la calcita (verde) y el punto de estudio (rojo) Coordenadas: UTM WGS84 (19H) 633989-7348720. Fuente: ENVI Standard 5.3.

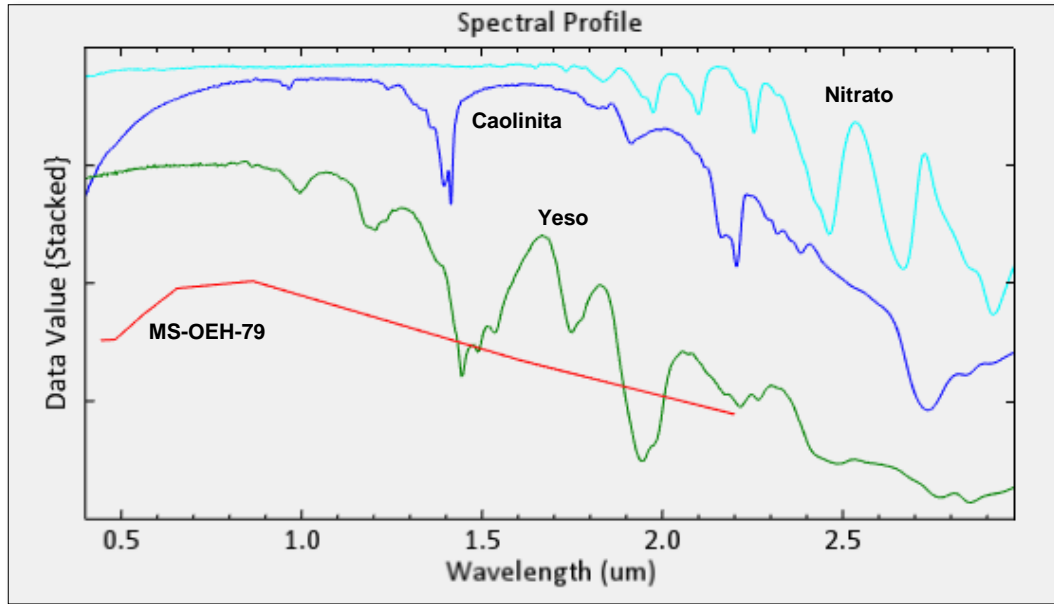


Figura 32. Comparación entre la firma espectral del perfil obtenido en el punto de muestreo MS-OEH-79 (Troncoso y Ercilla, 2016) y las firmas de aquellos minerales detectados por el análisis DRX. Coordenadas: UTM WGS84 (19H) 632091-7354216. Fuente: ENVI Standard 5.3.

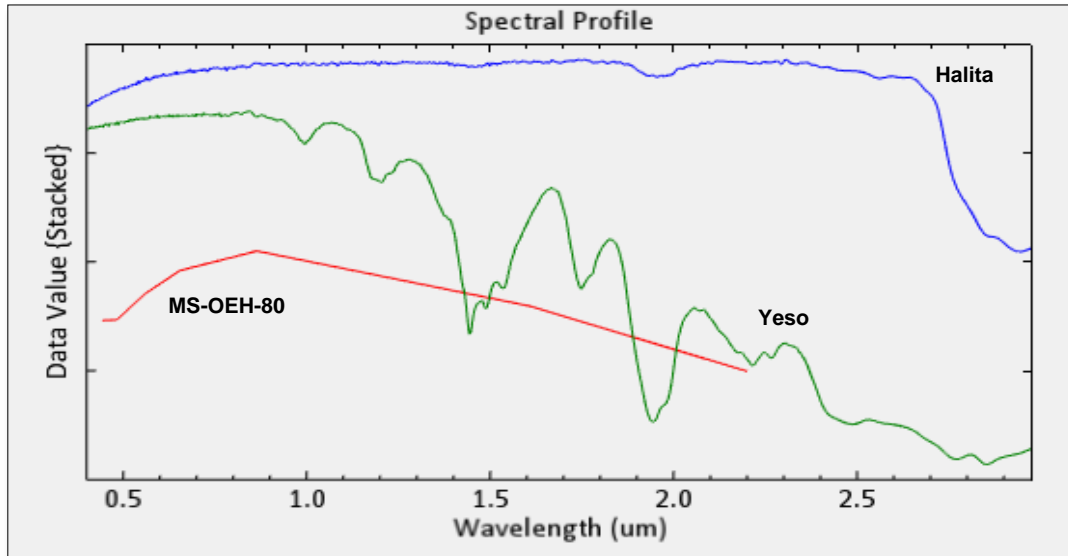


Figura 33. Comparación entre la firma espectral del perfil obtenido en el punto de muestreo MS-OEH-80 (Troncoso y Ercilla, 2016) y las firmas de aquellos minerales detectados por el análisis DRX. Coordenadas: UTM WGS84 (19H) 636299-7353193. Fuente: ENVI Standard 5.3.

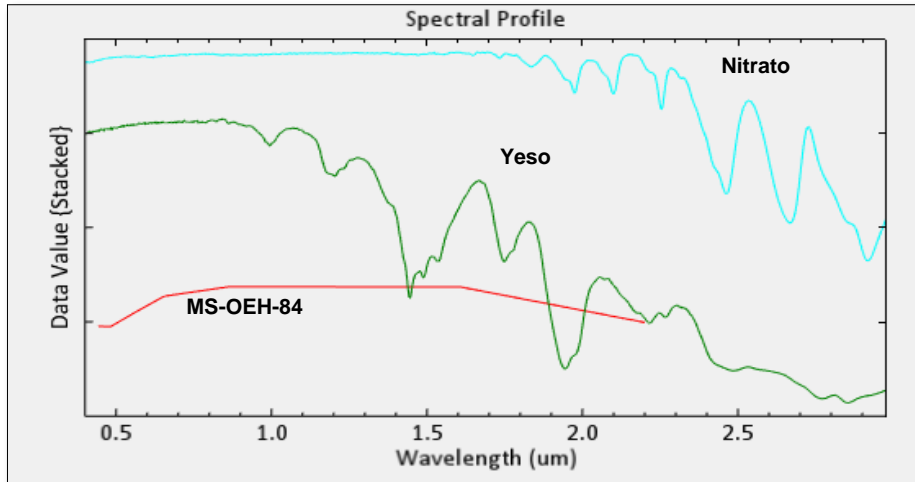


Figura 34. Comparación entre la firma espectral del perfil obtenido en el punto de muestreo MS-OEH-84 (Troncoso y Ercilla, 2016) y las firmas espectrales del yeso y nitrato. Coordenadas: UTM WGS84 (19H) 632262-7354263. Fuente: ENVI Standard 5.3.

A pesar de que las muestras MS-OEH-81 y MS-OEH-83 no fueron mostradas debido a que presentaban la misma respuesta que tuvo el ensayo con la muestra MS-OEH-80, estas y junto con los puntos de muestreo realizados por **Flahaut et al. 2016** fueron integradas en un mapa topográfico a fin de generar una mejor comprensión sobre la distribución de estos minerales dentro del salar (**figura 35**). En general, los análisis de las firmas espectrales conllevaron a interpretar aproximadamente la naturaleza de los materiales reconocidos en un análisis DRX. Sin embargo, el hecho de no haber obtenido una firma espectral idéntica a la de aquellas sales y arcillas identificadas puede deberse a lo siguiente. Inicialmente, que el resultado de la correlación entre firmas espectrales de un pixel y un mineral específico dependerá intrínsecamente del tipo de sensor que se está utilizando (**ver figura 23**). Como en el caso presente se trabajó con el sensor Landsat, es de esperar que su respuesta espectral no será tan exacta a la firma del material de interés, y segundo, que, frente a la similitud entre firmas espectrales, también es necesario tener en cuenta la resolución del pixel de la imagen, siendo para Landsat una dimensión de 30x30 mt. Por tanto, suponiendo hipotéticamente que el punto de muestreo fue en una dimensión de 1 mt², el análisis de firmas espectrales estaría comparando la información de este con respecto a la información espectral que contienen los 899 mt² restantes que conforman el pixel.

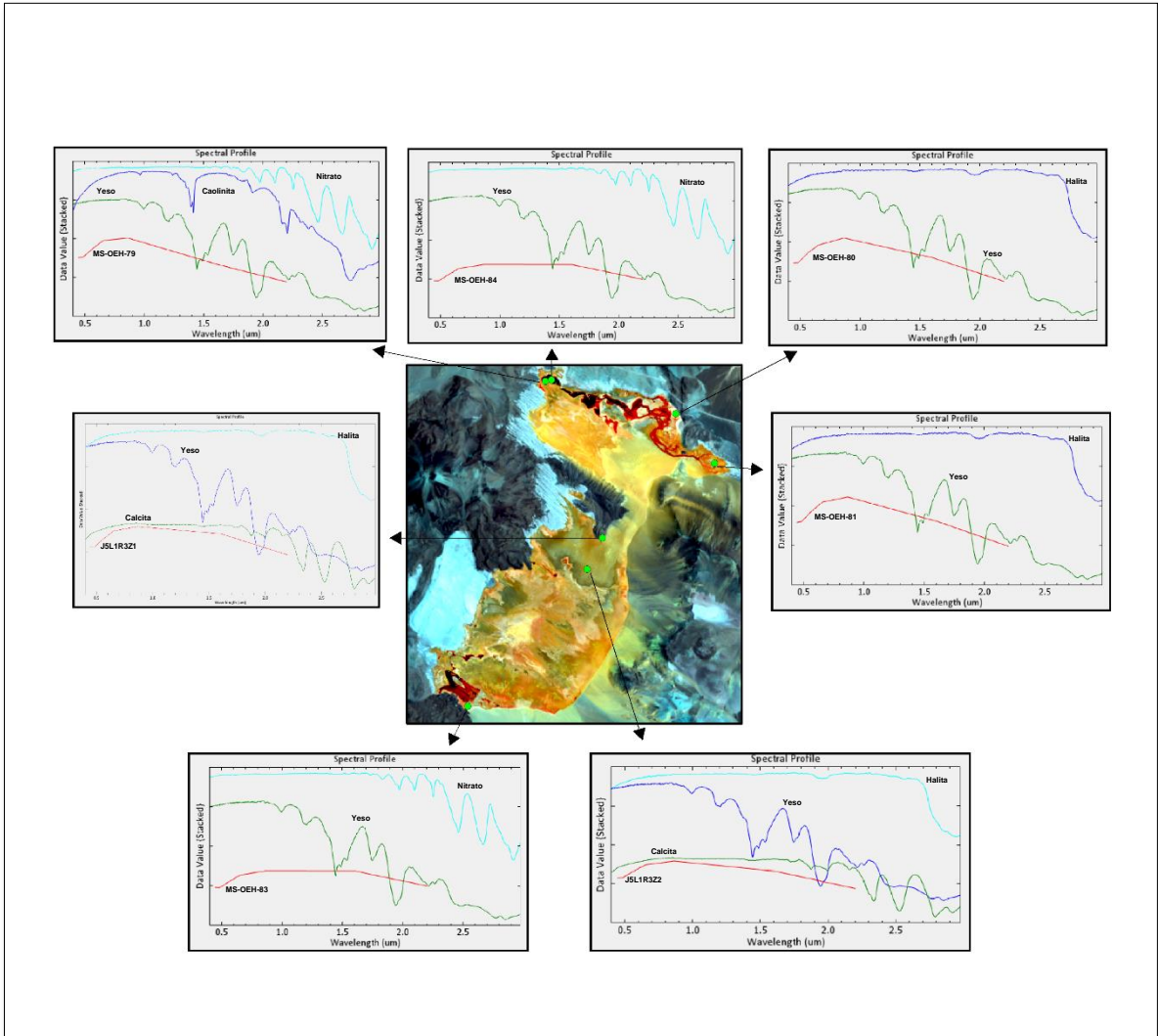


Figura 35. Mapa de integración espectral a partir de las muestras de costra salina obtenidas por Troncoso y Ercilla, 2016 y Flahaut et al. 2016. Fuente: ArcGis 10.3.

5.5 Tratamiento de datos obtenidos en terreno

La información interpretada a partir de las metodologías remotas de tipo espectral fue validada con una visita a terreno al Salar Aguas Calientes Sur durante los días viernes 26 y sábado 27 de enero de este año, en donde se lograron identificar y muestrear las capas evaporíticas principales del área, principalmente en el sector centro-sur del salar.

La mineralogía del sector norte del salar no pudo ser estudiada debido a los últimos incidentes ocurridos entre las comunidades atacameñas residentes en el área y el gobierno, de lo cual también se suma el mal estado de las vías de acceso en el lado occidental del salar.

Posteriormente, la integración entre los resultados entregados por las firmas espectrales y los análisis de laboratorio producto de los muestreos de sales y observaciones realizadas en terreno permitió, la adición de datos relevantes para comprender la distribución de los minerales evaporíticos dentro del salar.

Durante el primer día efectivo, se logró acceder al sector centro-sur del salar a campo travesa con el uso de una camioneta 4x4. En la superficie se lograron identificar a la falda de la Unidad Geológica II (**ver sub-capítulo 6.2**) cuerpos locales de material polvoriento y con tonalidad blanquecina (**figura 36**), siendo probablemente algún tipo de sal o arcilla relictas.



Figura 36. Identificación de cuerpos locales de material polvoriento con tonalidad blanquecina en la falda de la Unidad Geológica II, margen occidental del salar Aguas Calientes Sur.

Al llegar al margen occidental del salar, la superficie se caracterizaba por presentar un aspecto suave y seco, físicamente susceptible a la aplicación de fuerza con los dedos y presenta una capa de tonalidad parda oscura a clara, con texturas masivas, globulares y junto con la presencia del material polvoriento mostrado en la imagen anterior (**figura 37**). Localmente, esta costra sobreyace a algunos afloramientos de la Unidad Geológica III (**ver subcapítulo 6.2**).

Asimismo, de acuerdo con la clasificación de costras salinas realizadas por **Flahaut et al. 2016**, la zona centro-sur mostraba una transición entre una superficie seca y

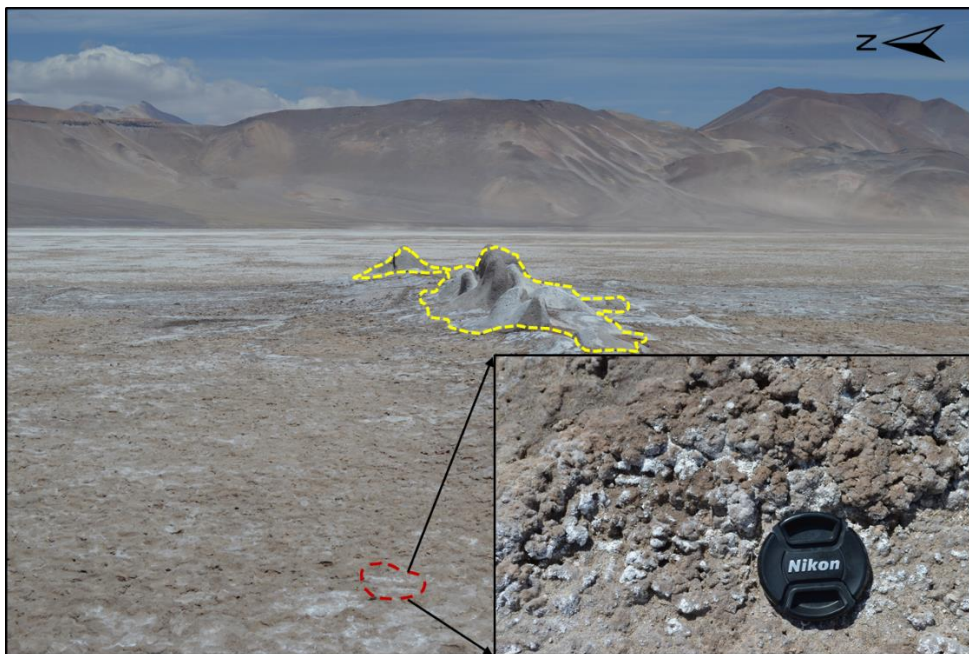


Figura 37. Visualización de la costra salina en el sector centro-sur, margen occidental del Salar Aguas Calientes Sur. En color rojo se identifica la textura globular en las sales, acompañadas del material polvoriento de tonalidad blanquecina. El afloramiento de la Unidad Geológica III cubierta por la costra salina se encuentra delimitado en color amarillo.

mecánicamente susceptible a una superficie más suave, de tonalidades pardogrisáceas a blancas, con geofomas poligonales (**figuras 38a y 38b**), evidencias de zonas con emanación de aguas subterráneas que contienen sobre ellas una capa blanquecina poco competente y junto con material polvoriento de tonalidad semejante. De ello, se sugiere a partir de otros autores que la formación de esta superficie salina es desarrollada por eflorescencia (**Goodall et al. 2000**). En la transición de ambas superficies, se identificó un afluyente en el cual se observó la

capa salina y debajo de ella un nivel de aspecto arenoso a limoso con evidencias de actividad orgánica. Estos niveles sedimentarios también fueron registrados por **Flahaut et al. 2016**, salvo que en las zonas próximas al afluente ubicado en el sector centro-sur del salar se identificaron coloraciones amarillentas en las sales presentes en los márgenes del afluente (**figuras 39a y 39b**), lo cual podría corresponder a una acumulación subordinada de azufre producto de la actividad oxidante en microorganismos presentes en los tapetes microbianos (**Demergasso et al. 2003**).

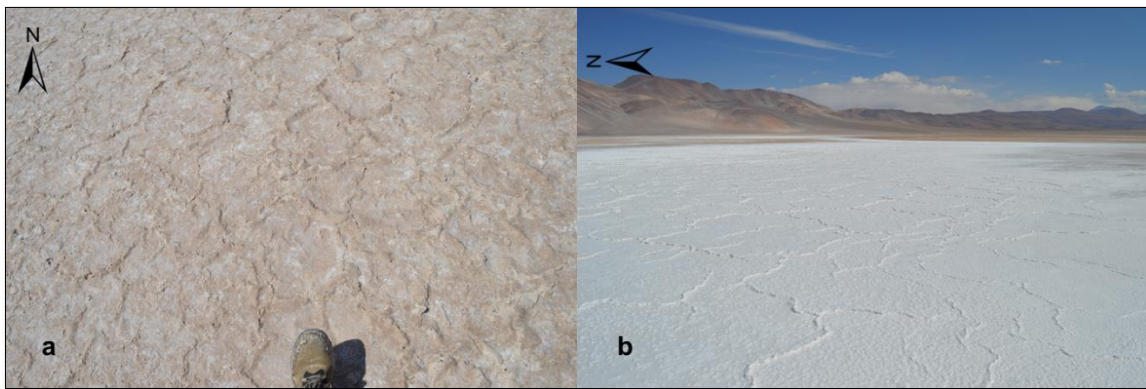


Figura 38. Vista norte (a) y sur (b) de las geofomas poligonales en el sector centro-sur del Salar Aguas Calientes Sur.

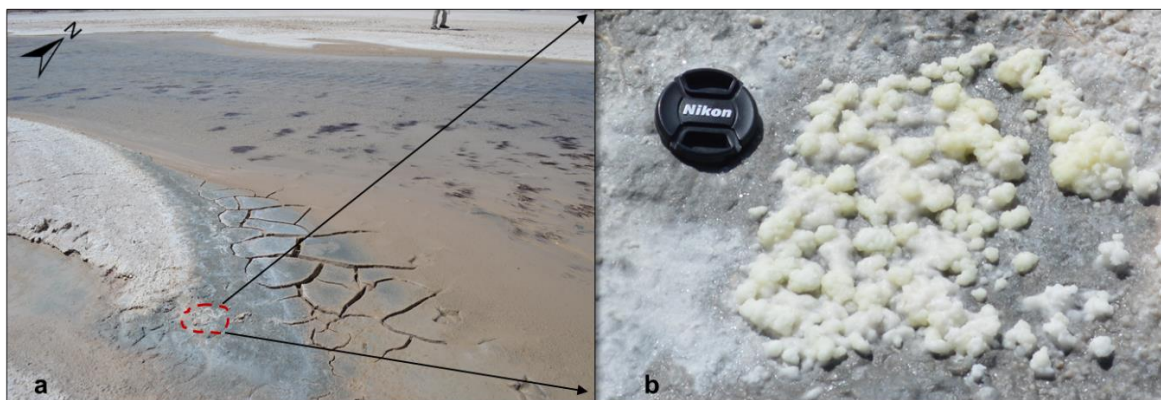


Figura 39. (a) Visualización de la actividad orgánica registrada en niveles arenosos a limosos de tonalidad parda y oscura (presencia de tapetes microbianos). Notar la proliferación de biota al avanzar hacia el centro del afluente. Sector centro-sur del Salar Aguas Calientes Sur. (b) Identificación de eflorescencia de sales caracterizadas por presentar una tonalidad amarillenta y de mal olor, siendo posiblemente una acumulación subordinada de azufre. Sector centro-sur del Salar Aguas Calientes Sur.

Por consiguiente, el lugar donde se realizó el muestreo de costras salinas se caracterizaba por presentar las descripciones mencionadas anteriormente, correspondiendo a zonas saturadas en agua por capilaridad, pudiendo reflejar un

nivel freático somero y variaciones en tonalidad y competencia en las capas superficiales, entre tonalidades blancas a pardas y entre altos y bajos índices de compactación (**figura 40a**). En general, la superficie constaba de un nivel centimétrico (2 a 5 cm) de sales evaporíticas blanquecinas con textura globular, cubriendo a una sub-capa de mayor espesor con tonalidad pardo-clara y de granulometría arenosa a limosa, lo cual se debe a su tamaño de grano fino a muy fino (**figura 40b**).

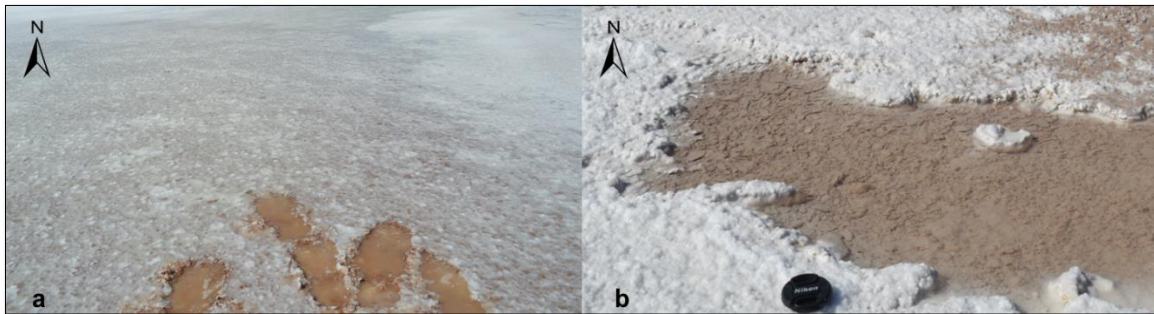


Figura 40. (a) Visualización de la superficie salina con una capa saturada en aguas subterráneas por capilaridad. (b) Identificación de una capa superficial de 2 a 5 cm de sales evaporíticas con tonalidad blanquecina y textura globular, cubriendo una sub-capa de tonalidad parda y aspecto arenoso a limoso en torno a su granulometría.

El muestreo de costra salina se realizó de manera estratégica a partir de la selección de superficies evaporíticas físicamente distintas entre sí, de tal forma que los análisis posteriores permitan generar una mejor comprensión sobre el comportamiento de las sales y su distribución en el salar (**figura 41**). No obstante, hubo lugares en que no se logró obtener información debido al escaso tiempo que se tuvo en terreno, considerando también las grandes distancias entre los puntos de interés. Por lo cual, el trabajo en gabinete a partir del uso de metodologías remotas permitió desarrollar aproximaciones de la mineralogía presente en aquellas áreas. Las muestras de costra salina fueron obtenidas en este sector, correspondiendo a aquellas con la codificación ACS-SC-001 (UTM (19H) 632824-7347489, 3946 msnm) y ACS-SC-002 (UTM (19H) 632871-7347454, 3947 msnm), donde la primera viene a representar la primera capa evaporítica de tonalidad blanca (**figura 42a**) y la segunda muestra fue obtenida a partir de la sub-capa de tonalidad parda, la cual afloraba hacia la superficie y por sobre la costra salina que

representa la muestra ACS-SC-001, hacia el SE desde la posición de ella (figura 42b).

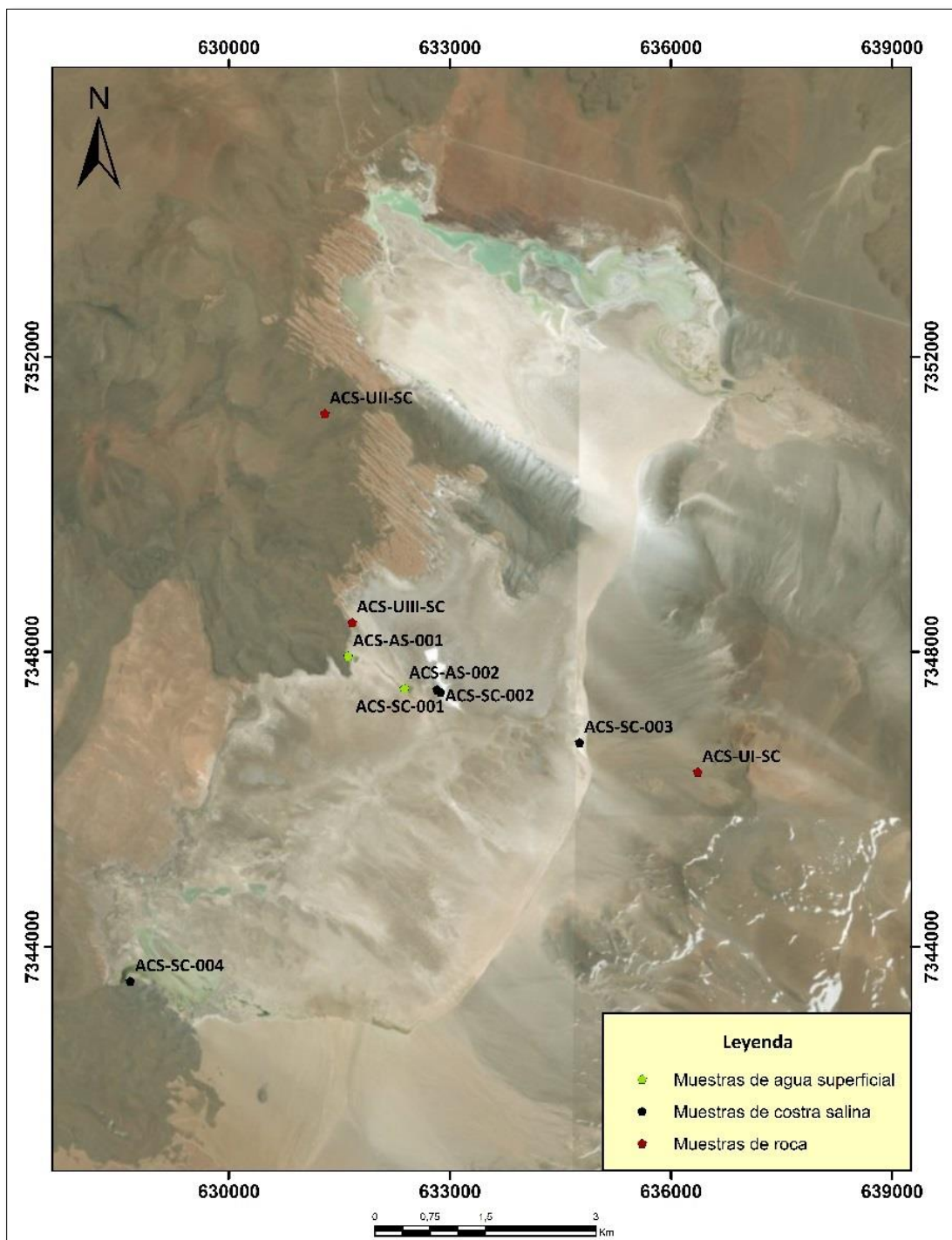


Figura 41. Mapa topográfico con la obtención de muestras de costra salina y muestras de agua superficial.

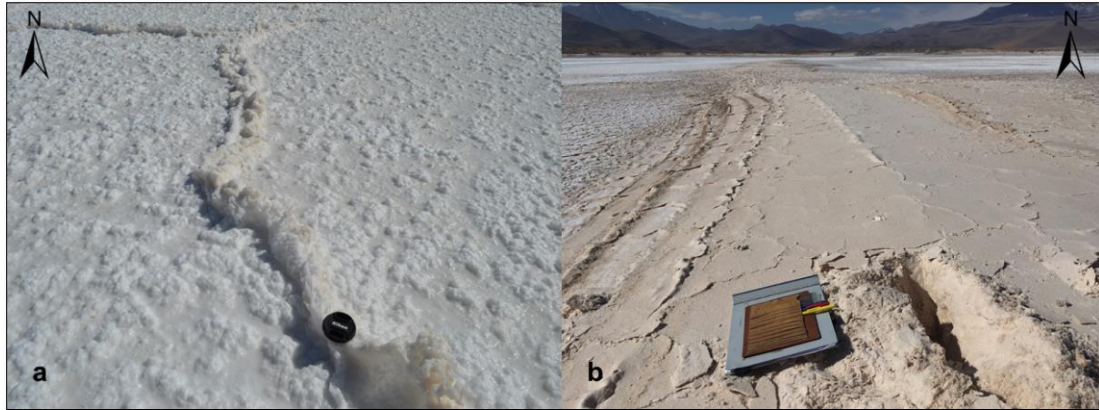


Figura 42. (a) Sector de obtención de la muestra ACS-SC-001 (UTM (19H) 632824-7347489, 3946 msnm). (b) Sector de obtención de la muestra ACS-SC-002 (UTM (19H) 632871-7347454, 3947 msnm). La muestra fue extraída a partir de la calicata realizada en el sector centro-sur del salar.

Durante el segundo día efectivo, se accedió al margen oriental del salar, en el sector centro-sur, donde se identificaron características similares entre las superficies evaporíticas de esta área y lo observado en el margen occidental. Sin embargo, la composición dominante en la superficie correspondía al material que representa la muestra ACS-SC-002 (**figura 43a**), seguido por coberturas evaporíticas locales de tonalidad blanquecina, similares a la muestra ACS-SC-001 (**figura 43b**).



Figura 43. (a) Visualización de la superficie evaporítica con características físicas similares a la superficie salina en que se obtuvo la muestra ACS-SC-002. Notar la actividad orgánica presente en esta capa evaporítica, siendo un lugar próximo a un manantial. Sector centro-sur del Salar Aguas Calientes Sur, margen oriental. (b) Identificación de la capa evaporítica con características similares a la superficie en que se obtuvo la muestra ACS-SC-001. Sector centro-sur del Salar Aguas Calientes Sur, margen oriental.

Por ende, para generar una correlación entre ambos márgenes y sus respectivas litologías evaporíticas, se obtuvo en el margen oriental la muestra ACS-SC-003 (**figura 44**) UTM (19H) 634758-7346771, 3947 msnm), la cual representa ambas

superficies en este margen y de tal forma que pueda permitir una posible distribución homogénea en este sector del salar, o bien, una distribución mixta como bien han discutido otros autores (Flahaut *et al.* 2016).



Figura 44. Visualización del punto de obtención de la muestra ACS-SC-003. Sector centro-sur del salar Aguas Calientes. Margen oriental.

5.6 Análisis de Difracción de Rayos X en muestras de costra salina

Con el fin de esclarecer la composición mineralógica de las distintas superficies evaporíticas registradas en terreno, las muestras de costra salina fueron enviadas a la Unidad de Geología Isotópica, perteneciente al Departamento de Laboratorios de Sernageomin. De acuerdo con la metodología utilizada para el proceso de identificación de minerales, los resultados fueron interpretados e integrados con la información espectral descrita anteriormente.

Experimentalmente, las muestras de costra salina fueron secadas a muy baja temperatura, luego cuarteradas y dirigidas a un proceso de molienda controlada. Sin embargo, solo algunas lograron pasar por esta etapa debido las características higroscópicas de las otras sales (**ver ilustración 2 en anexos**). Por consiguiente, fueron ubicadas en el portamuestras y sin la necesidad de aplicar presión para evitar

la pérdida de cristalinidad. El barrido se llevó a cabo en un difractómetro marca Panalytical modelo X'Pert PRO y junto con el uso del programa de interpretación High Score Plus. La composición mineralógica producto de un análisis cualitativo es mostrada a continuación.

Para el sector centro-sur del Salar Aguas Calientes Sur, en el margen occidental y próximo al núcleo del sector, se obtuvieron las muestras ACS-SC-001 y ACS-SC-002, cuyas composiciones mineralógicas según los resultados del análisis DRX corresponden a halita, cuarzo, silvita (ACS-SC-001), seguido de yeso, halita, eugsterita, cuarzo bajo y singenita (ACS-SC-002).

Para el margen oriental, la muestra ACS-SC-003 obtenida en una zona aledaña a un manantial arrojó una mineralogía conformada por yeso, halita, cuarzo, blöedita, aragonito e inyoita. Para el sector sur del salar, la muestra ACS-SC-004, obtenida en una zona aledaña al bofedal principal del sector, arrojó la presencia de halita, yeso, cristobalita, eugsterita, thenardita, inyoita, metavoltina, azufre e inderborita (**tabla 5**).

Código de muestra	Minerales identificados por análisis DRX
ACS-SC-001	Halita, cuarzo, silvita.
ACS-SC-002	Yeso, halita, eugsterita, cuarzo bajo, singenita.
ACS-SC-003	Yeso, halita, cuarzo, blöedita, aragonito, inyoita.
ACS-SC-004	Halita, yeso, cristobalita, eugsterita, thenardita, inyoita, metavoltina, azufre, inderborita.

Tabla 5. Organización de las composiciones mineralógicas de las muestras de costra salina producto del análisis DRX.

Considerando la ausencia de muestras representativas del sector norte, los resultados mineralógicos descritos anteriormente permitieron validar la información en los mapas con anomalías de distribución (**ver capítulo 9**).

6. Geología del salar Aguas Calientes Sur

6.1 Consideraciones generales

En base a la geología descrita y levantada a partir de las hojas Toconao de escala 1:250.000 (**Gardeweg & Ramírez, 1982**), ubicada entre los 23°-24° S y 67°30´-69° W para el sector norte del salar, y del Mapa Geológico de Chile del Sernageomin a escala 1:1.000.000 para el sector sur, la información recopilada y mostrada a continuación fue respaldada por observaciones realizadas en terreno.

Inicialmente, con el objetivo de obtener un mayor detalle en la identificación y distribución de las unidades geológicas, se hizo uso de la combinación RGB 742 para la imagen Landsat 8 OLI-TIRS, cuya resolución permitió realizar una buena discriminación de las unidades geológicas presentes en el área de estudio (**figura 45**), llevando a cabo un mapa geológico de escala 1:60.000 (**ver figura 55**). Los datos y observaciones de imágenes satelitales multiespectrales fueron tratados con el uso de los softwares ENVI 5.3 y ArcGis 10.3.

Posterior a la generación del mapa geológico, se prosiguió a su integración con la imagen Landsat -8 tratada con la combinación, cuya correlación fue respaldada con observaciones e imágenes obtenidas en terreno, donde se realizó un muestreo de las unidades geológicas propuestas para la realización de cortes transparentes, permitiendo una descripción macroscópica de las rocas que circundan la cuenca de estudio.

6.2 Descripción de las unidades geológicas

Geológicamente, la cuenca de estudio comprende unos 10 Ma respecto a las unidades yacentes en el sector, correspondiendo principalmente a depósitos volcánicos del Neógeno estudiados como depósitos ignimbríticos, coladas de lava y rellenos de origen sedimentario, cuya ocurrencia es producto de los mecanismos de erosión y procesos aluviales presentes en el área. En base a la información bibliográfica recopilada y junto con la escala de trabajo ejercida en el área de estudio, se establecieron 6 unidades representativas, en base a su composición litológica, edad y distribución en la superficie.

De acuerdo con lo propuesto por **Ramírez y Gardeweg, 1982**; los eventos eruptivos asociados a estas unidades que conforman la cuenca ocurren durante el Mioceno Superior, ocurriendo en dos etapas, teniendo una primera etapa que dio inicio con la emisión de lavas dacíticas, estratovolcanes andesíticos a dacíticos y extendiéndose desde el Mioceno Superior hasta edades del Holoceno.

Durante este período, ocurre la segunda etapa eruptiva, caracterizada por la emisión de depósitos ignimbríticos de composición dacítica. Este tipo de volcanismo, comparado al resto de la zona volcánica de los Andes Centrales, se encuentra asociado por su ubicación, al complejo de estratovolcanes andesíticos-dacíticos del arco principal (cordillera occidental) del Mioceno temprano-Pleistoceno y al complejo de depósitos ignimbríticos y domos en el arco principal y la región de tras-arco del Mioceno temprano-Plioceno (**Coira et al. 1982; Cervetto, 2012**).

Localmente, los productos volcánicos se encuentran conformados por flujos ignimbríticos con evidencias de erosión eólica, seguidos por depósitos de estratovolcanes, conos piroclásticos erodados y domos volcánicos. Estos fueron asignados a unidades geológicas propuestas a partir de la delimitación de ellas mediante la imagen Landsat mencionada anteriormente (**figura 45**) y complementadas con las descripciones realizadas en la hoja Toconao n°54 (**Gardeweg y Ramírez, 1982**).

- **Unidad I (Mioceno Superior-Plioceno)**

Esta unidad geológica se identificó y asoció por medio del análisis de las imágenes satelitales y la revisión de información bibliográfica como el conjunto de Estratovolcanes I (**Gardeweg & Ramírez, 1982**), siendo posteriormente identificada en terreno principalmente en zonas próximas al margen oriental del salar (**figura 46**). Se asocia morfológicamente a conos intensamente erosionados con superficies redondeadas y de perfil bajo a irregular, mostrándose disecados por quebradas profundas y con identificación obliterada respecto a sus flujos de lava. Generalmente están cubiertos por importantes depósitos de piedemonte y con pérdida de su forma original debido a la intensidad de la erosión presente.

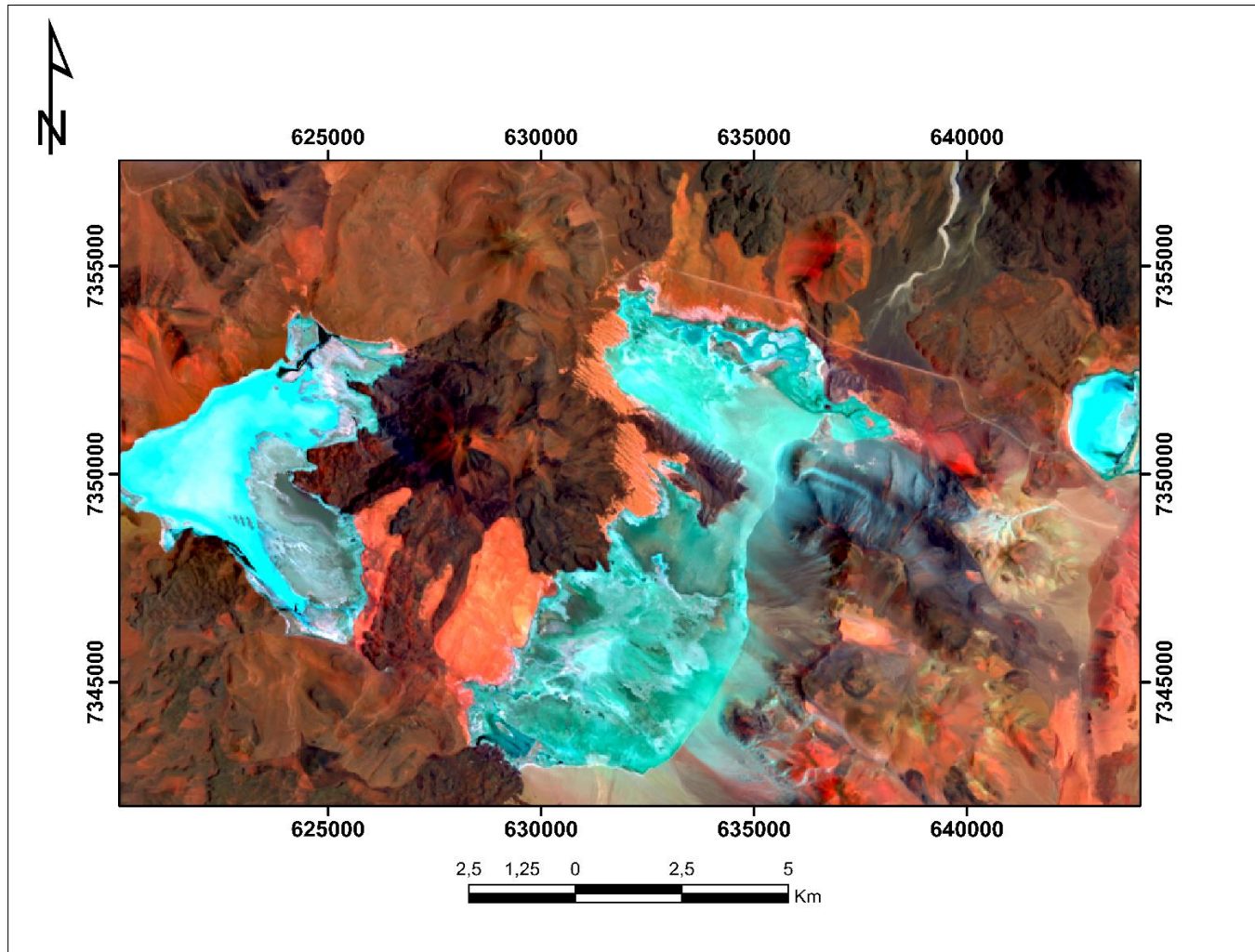


Figura 45. Discriminación de las unidades geológicas presentes en la cuenca salar de Aguas Calientes Sur por medio de la combinación RGB 742 en Landsat 8 OLI-TIRS. Las ignimbritas reflejan un color naranja-salmón, mientras que los estratovolcanes absorben gran parte de la luz incidente, expresándose en tonalidades pardo-oscuro. Fuente: ArcGis 10.3.

La base de este conjunto volcánico es actualmente desconocida y se encuentran cubiertos, en forma discordante, por los depósitos ignimbríticos y centros volcánicos más jóvenes.



Figura 46. (a) Vista panorámica hacia el sureste de la Unidad Geológica I, dispuesta en las proximidades al margen oriental del Salar Aguas Calientes Sur. (b) Interpretación esquemática de la Unidad Geológica I en color morado claro. El cuerpo de tonalidad amarillo-anaranjado corresponde a un afloramiento de la Unidad Geológica III, hacia el este desde el sector norte del salar.

Dentro de la cuenca, esta unidad se distribuye principalmente en el cerro Médano, en dirección este desde el salar Aguas Calientes Sur y en pequeños afloramientos aledaños al noreste de la laguna norte del depósito salino.

Litológicamente, la unidad está compuesta principalmente de andesitas de piroxeno. Respecto a las edades, la edad mínima relativa de este conjunto volcánico se encuentra establecida por la cobertura de este por la Ignimbrita Pacana, con una edad radiométrica de $4,2 \pm 0,21$ Ma, sobreyaciendo al cerro Incahuasi Norte.

Por lo cual, se le asigna a la unidad presente una edad Mioceno Superior-Plioceno. Sin embargo, esta evidencia se muestra fuera de la cuenca de estudio, teniendo como dato radiométrico más próximo al área el estudio realizado en el cerro

Incahuasi Sur (10,5 +- 0,9 Ma por K-Ar), hacia el este del salar. Como característica adicional, debido al alto índice de erosión en el área, se han logrado identificar afloramientos de zonas con núcleos de alteración hidrotermal solfatáricos (**ver figura 62**).

▪ **Unidad II (Plioceno-Pleistoceno)**

La unidad presente fue asignada tanto para el conjunto de Estratovolcanes II y III debido a edades radiométricas muy parecidas entre sí, al igual que sus características litológicas. Viene a estar representada por conos volcánicos con formas redondeadas, y con permanencia de su forma original. Los cráteres de estos se muestran abiertos, erosionados por una o más quebradas poco profundas.

Dentro del área de estudio, se identifican coladas de lava con rasgos de su morfología original, denotando estructuras tipo “aa” o en bloques (**figura 47**).

Limitada al área de estudio, la unidad se muestra cubierta por cuerpos volcánicos más jóvenes, los depósitos ignimbríticos que caracterizan la cuenca y por depósitos no consolidados de tipo aluvial, principalmente.

De manera similar a la unidad I, se reconocen lavas principalmente compuestas por andesitas de piroxeno, en predominancia. Asimismo, se han identificado andesitas de hornblenda y/o biotita, junto con cuerpos de composición dacítica, pero en forma subordinada. En base a su edad, el estudio de datación radiométrica más próximo al área de estudio fue realizado en un centro volcánico ubicado entre los cerros Cósor e Hipiras, al noroeste del salar y arrojando una edad de 3,7 +- 0,4 Ma en roca total. Considerando otras edades más jóvenes hacia el norte de la cuenca, se le asignó una edad Plioceno-Pleistoceno.

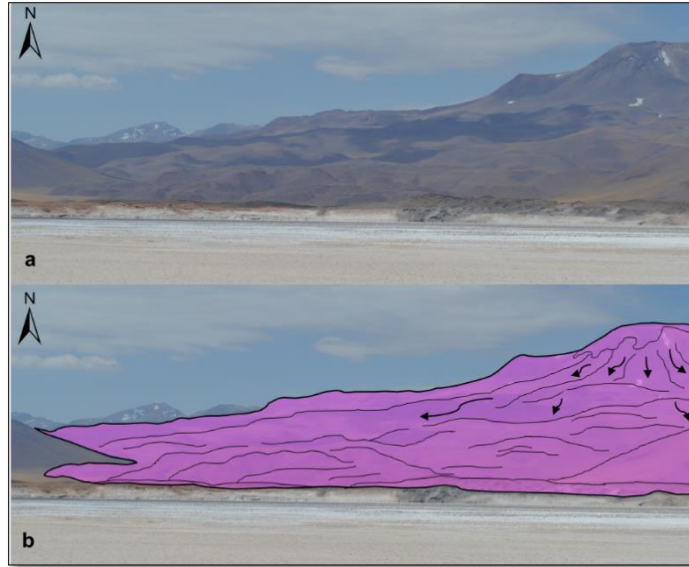


Figura 47. (a) Vista panorámica hacia el norte desde el Salar Aguas Calientes Sur. (b) Interpretación esquemática de una colada de lava perteneciente a la Unidad Geológica II, en color rosado. Las flechas oscuras indican la dirección general del flujo, siendo principalmente en dirección suroeste hacia el sector norte del salar.

▪ **Unidad III (Plioceno-Holoceno)**

Se estableció a modo de englobar los dos eventos de emisión de flujos ignimbríticos más importantes ocurridos dentro de la cuenca de estudio, correspondiendo a los depósitos de la Ignimbrita Patao e Ignimbrita Tuyajto, las cuales se encuentran distribuidas alrededor del salar Aguas Calientes Sur (**figura 48**). Ambos depósitos ignimbríticos se caracterizan por presentar tobas leves a fuertemente soldadas, de tonalidades gris-claro a pardo-rojizas, con variaciones respecto a su contenido en fenocristales y presencia de fragmentos piroclásticos como pómez, líticos y escoria volcánica.

Estratigráficamente, la Ignimbrita Patao se muestra distribuida principalmente en toda la porción oeste y noroeste del salar, sobreyaciendo a la unidad I y la unidad II. Para el caso de la Ignimbrita Tuyajto, sobreyace a todas las demás unidades mencionadas anteriormente, incluyendo a la Ignimbrita Patao. Considerando el estudio de la Ignimbrita Patao (4,0 – 3,2 +/- 0,2 – 0,3 Ma) y las relaciones estratigráficas de la Ignimbrita Tuyajto respecto a las otras unidades, se le asigna a la unidad presente una edad Plioceno Superior-Holoceno.

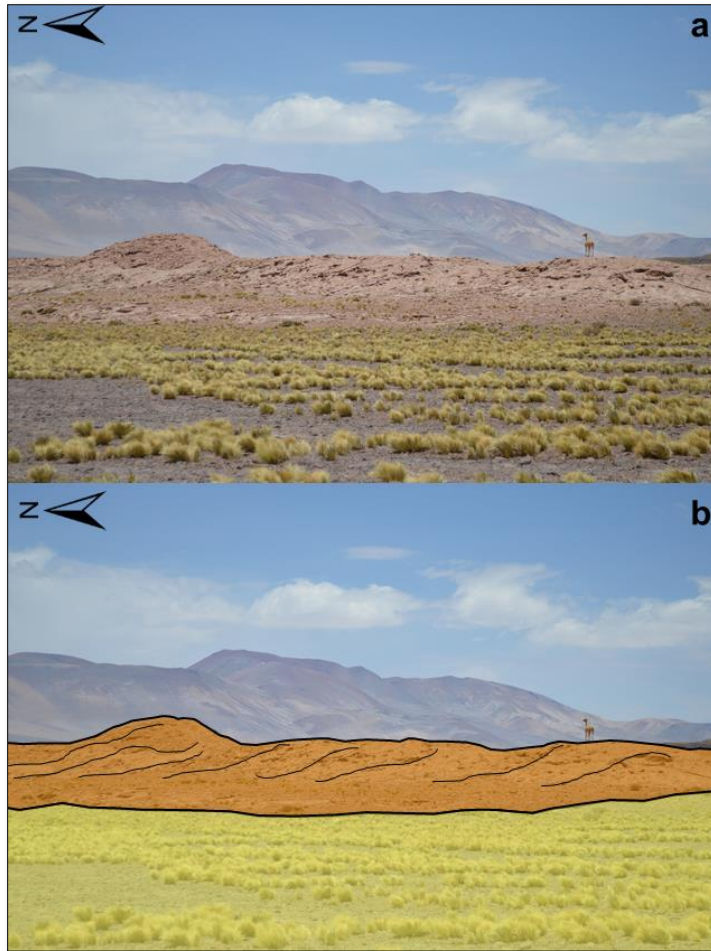


Figura 48. (a) Vista panorámica hacia el SE del Salar Aguas Calientes Sur desde el sector norte. (b) Interpretación esquemática de la Unidad Geológica III en color amarillo-anaranjado. El área en color amarillo corresponde al relleno aluvial que rodea al flujo ignimbrítico, correspondiendo a la Unidad Geológica VI.

Estratigráficamente, la Ignimbrita Patao se muestra distribuida principalmente en toda la porción oeste y noroeste del salar, sobreyaciendo a la unidad I y la unidad II.

Para el caso de la Ignimbrita Tuyajto, sobreyace a todas las demás unidades mencionadas anteriormente, incluyendo a la Ignimbrita Patao. Considerando el estudio de la Ignimbrita Patao (4,0 – 3,2 +- 0,2 – 0,3 Ma) y las relaciones estratigráficas de la Ignimbrita Tuyajto respecto a las otras unidades, se le asigna a la unidad presente una edad Plioceno Superior-Holoceno.

▪ **Unidad IV (Pleistoceno-Holoceno)**

Bibliográficamente, esta unidad corresponde a los depósitos volcánicos más jóvenes registrados en el sector de la Puna de Atacama, incluyendo a la cuenca de estudio. Se distribuyen a lo largo de toda la Cordillera de los Andes y representan para la Puna, las cumbres más altas de la zona, sobrepasando la mayoría los 5.000 m.s.n.m.

Se caracteriza por la presencia de estratovolcanes con bajo grado de erosión y con sus formas cónicas perfectamente inalteradas, evidencia clara hacia el norte de la cuenca, como es el caso de los cerros Acamarachi, Colachi, Chiliques y Miscanti. Sus coladas presentan formas acanaladas y lobulares, con superficies muy rugosas y junto con formas de tipo aa y/o en bloque. Las lavas de esta unidad cubren a todas las otras unidades volcánicas mencionadas con anterioridad, siendo cubiertas exclusivamente por depósitos no consolidados de origen aluvial.

Debido a que la unidad IV tiene una distribución superficial muy pequeña en comparación a los demás depósitos volcánicos y siendo más potente hacia el NE respecto al salar, no se logró identificar en terreno debido a que sus afloramientos yacían en un sector demasiado alto y con pendientes abruptas caracterizadas por presentar filones que pudieron comprometer el vehículo utilizado (**figura 49**), considerando también el tiempo que se tuvo a disposición. Bibliográficamente, su litología consta de lavas de composición dacítica principalmente, seguida por andesitas de piroxeno, y de manera subordinada, por andesitas de hornblenda y/o biotita, andesitas basálticas, basaltos, y depósitos de pómez.

▪ **Unidad V (Cuaternario)**

Esta unidad es atribuida principalmente al salar Aguas Calientes Sur, siendo el único depósito salino y formando parte del relleno sedimentario presente dentro de la cuenca de estudio (**figura 50**). Está constituido por una cubierta evaporítica conformada tanto por sales como por material de tamaño limo, junto con el establecimiento de dos lagunas con niveles freáticos someros y cuya cubierta o costra se constituye de sectores con variabilidad mineralógica, química y con límites transicionales entre ellos.

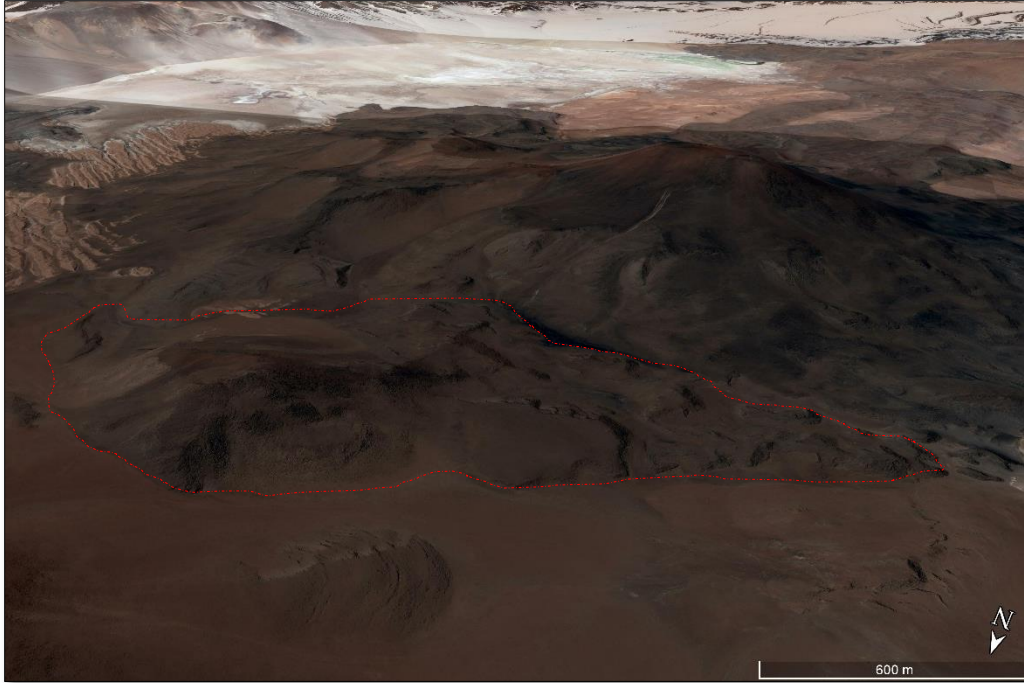


Figura 49. Visualización de la unidad IV dentro del área de estudio. Fuente: Google Earth Pro.

De acuerdo con trabajos previos y junto con las descripciones y observaciones hechas en terreno, el salar consta principalmente de dos costras salinas, teniendo variaciones respecto a tonalidades, grados de competencia, concentración de sales evaporíticas y presencia de material detrítico. De ello, se rescata que entre ellas existen transiciones en la superficie, desde capas con presencia nula de agua hasta capas saturadas en agua ubicadas preferencialmente en el núcleo del salar. En general, presenta una tonalidad pardo-oscura a grisácea y pardo-clara, donde su configuración mineralógica es de carácter mixto, debido a que las sales coexisten con material detrítico que puede estar aflorando en superficie y mezclado con ellas o bien, que subyace a las capas evaporíticas (Flahaut *et al.* 2016).

En base a las relaciones estratigráficas, esta unidad, al igual que la unidad VI, viene a ser uno de los rasgos geológicos de mayor juventud por sobre toda la actividad volcánica dispuesta en la cuenca, siendo esta última un factor altamente condicionante en la configuración hidrológica e hidrogeológica del salar presente, en base a las tasas de infiltración, descarga y recarga de aguas subterráneas, principalmente.

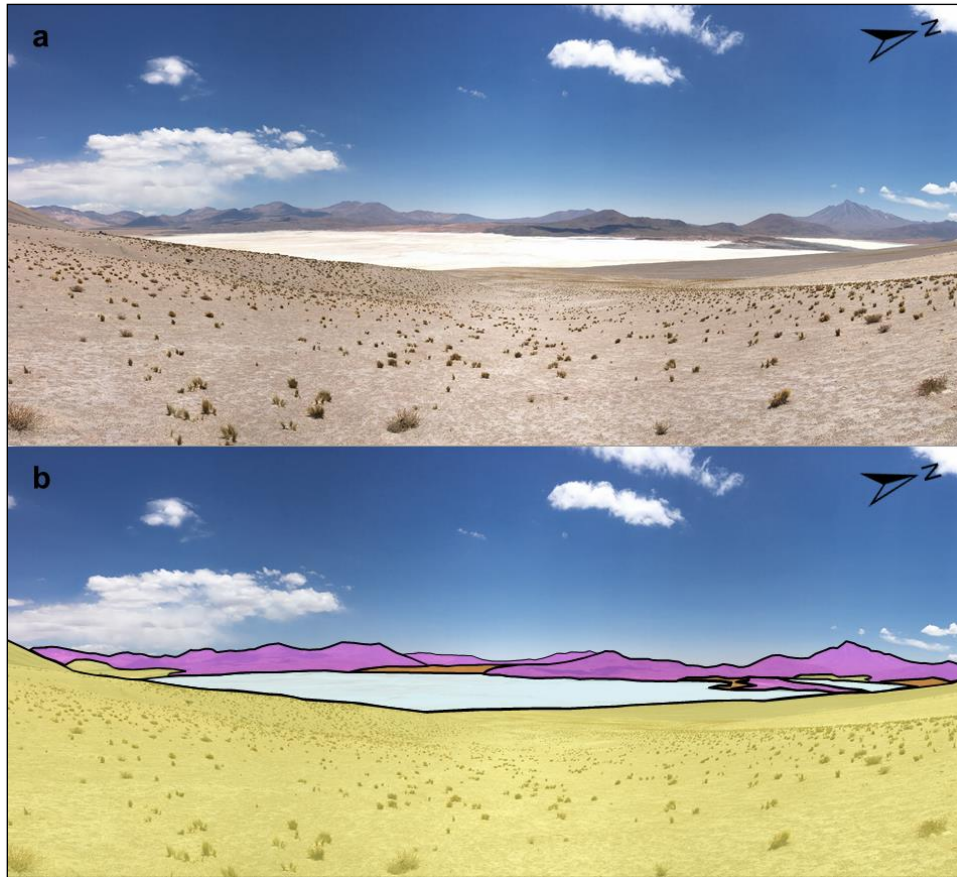


Figura 50. (a) Vista panorámica hacia el oeste desde la falda del Cerro Médano. **(b)** Interpretación esquemática generalizada de las unidades geológicas, teniendo a la Unidad Geológica V en el centro de la cuenca y rodeada en su margen occidental y oriental por las Unidades Geológicas II, III y VI, respectivamente.

Asimismo, de acuerdo con observaciones realizadas por terceros en terreno, en el extremo norte del salar, próximo a la laguna, se tiene registro de una posible paleocostra salina por sobre un afloramiento rocoso, lo cual indicaría eventualmente un posible retroceso del salar respecto a su extensión original (**Troncoso y Ercilla, 2016**). No obstante, para sostener tal información debe ser necesario realizar una validación en múltiples puntos en sectores circundantes al salar.

- **Unidad VI (Cuaternario)**

Representa a los depósitos más recientes por sobre todas las unidades anteriores, estando compuestos principalmente por sedimentos detríticos, principalmente de origen aluvial y volcánico (**ver fotografías 46 y 47**). Su litología consta de una mezcla heterogénea de gravas, arenas, limos, mezclados comúnmente con material

piroclástico, de composición polimíctica y cuya ocurrencia recae en la acción de corrientes de barro o por la acción eólica o glacial.

6.3 Antecedentes Petrográficos de las rocas volcánicas y sedimentarias

La información recopilada y descrita a continuación fue sintetizada en base a las descripciones petrográficas realizadas en la Hoja Toconao de escala 1:250.000 (**Gardeweg & Ramírez, 1982**), las cuales fueron complementadas con descripciones microscópicas de las unidades geológicas descritas anteriormente (**ver sub-capítulo 6.2**). Las descripciones fueron apoyadas con el uso del microscopio Nikon Eclipse LV100POL.

▪ Andesitas de piroxeno

Se caracterizan por tener predominantemente textura porfídica, presentando tonalidades grisáceas oscuras, claras y pardo-rojizas. Las variedades porfídicas tienen abundantes fenocristales menores a 1mm de plagioclasa y piroxeno, y en forma subordinada, de hornblenda, biotita u olivino. Su masa fundamental muestra predominantemente textura hialopílica e intersertal, conformada por microlitos de plagioclasa, piroxeno y con proporciones variables de opacos.

Comparando la información bibliográfica con las descripciones microscópicas realizadas para este trabajo (**ver ilustraciones 11 en anexos**), la muestra ACS-UI-SC (**figuras 51a y 51b**), correspondiente a una andesita porfídica de piroxeno, se caracteriza por tener una textura porfídica seriada, localmente vesicular y poiquilítica, con masa fundamental hialopílica e intersertal. Dentro de su mineralogía, presenta fenocristales de plagioclasa con formas euhedrales a subhedrales, con tamaños entre 0,4-3mm y junto con evidencias de fracturamiento, maclado y zonación concéntrica, localmente con textura poiquilítica. Asimismo, se tienen fenocristales de ortopiroxeno y piroxeno con formas euhedrales a subhedrales, con tamaños entre 0,2-2,7mm y de alto relieve. La biotita se observa en cristales con tamaños pequeños (0,1-0,3mm) y ocasionalmente reemplazados por minerales opacos.

Para la muestra ACS-UI-SC, la hornblenda se mantiene ausente. Como minerales accesorios, se identifican opacos, circones y amígdalas rellenas por zeolitas, al igual que en algunos espacios vacíos.

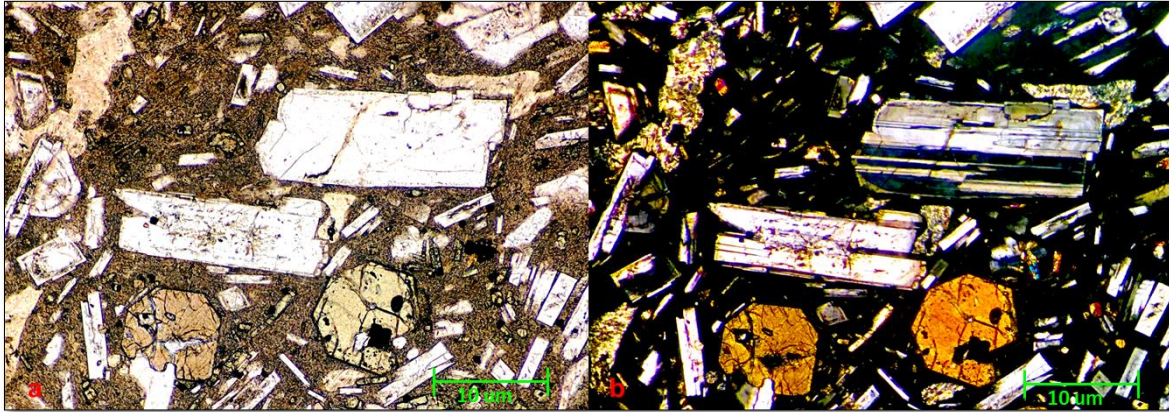


Figura 51. (a) Microfotografía con Luz Polarizada Plana (LPP) de la muestra ACS-UI-SC. (b) Microfotografía con Luz Polarizada Cruzada (LPX). Clasificación: Andesita porfídica de piroxeno. Microscopio: Nikon Eclipse LV100POL. Objetivo 5x.

▪ Andesitas de biotita

Estas rocas presentan una textura porfídica de tonalidades grisáceas a pardo-rojizas, con gran abundancia en fenocristales de hornblenda y/o biotita y en ocasiones, presentando cuarzo y olivino. La masa fundamental presenta texturas hialopilíticas, pilotaxíticas y en proporciones muy inferiores, intersertales, criptofelsítica o vitrofídica. Sin embargo, existe un predominio de la textura hialopilítica, con presencia de vidrio translúcido, microlitos de plagioclasa y con evidencia de minerales opacos diseminados. Ocasionalmente, se identifican amígdalas de montmorillonita o con bordes de tridimita o cristobalita.

De acuerdo con la descripción microscópica de la muestra ACS-UII-SC (ver **ilustración 12 en anexos**), clasificada como una andesita porfídica de biotita (**figuras 52a y 52b**), se caracteriza por tener una textura porfídica con masa fundamental hipocristalina-holohialina y vitrofídica. Mineralógicamente, la plagioclasa presenta fenocristales de 0,4-3mm, con formas euhedrales y comúnmente maclados y/o fracturados. La biotita, por otro lado, se muestra comúnmente en cristales con tamaños entre los 1,8-3 mm, de tonalidades rojizas y fuertemente reemplazados por óxidos de hierro. Como mineral accesorio, se tiene

la presencia notoria de zeolita relleno vesículas, rasgo similar según las observaciones hechas en la muestra ACS-UI-SC.

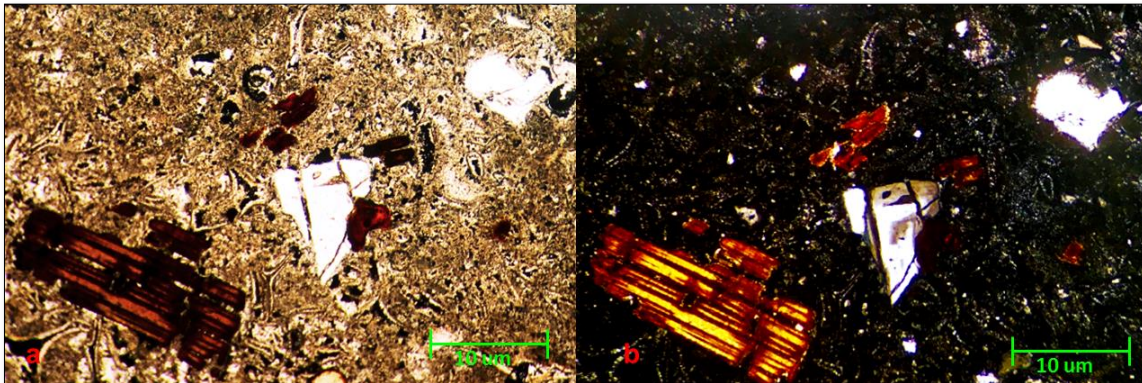


Figura 52. (a) Microfotografía con Luz Polarizada Plana (LPP) de la muestra ACS-UIII-SC. (b) Microfotografía con Luz Polarizada Cruzada (LPX). Clasificación: Andesita porfídica de biotita. Microscopio: Nikon Eclipse LV100POL. Objetivo 5x.

▪ Ignimbrita Patao

La roca corresponde a una toba gris clara o pardo-rosácea clara, fuertemente soldada y con escasa concentración en fenocristales de plagioclasa (0,5-2 mm), biotita cobriza (1 mm) y cuarzo. Presenta fragmentos entre 3-8 mm de pómez con aspecto fibroso, vesicular y de escoria volcánica con dimensiones entre 1-6 mm. La matriz constituye en un agregado microcristalino de cuarzo y subordinadamente, por feldespato, con evidencia de relictos de textura vitroclástica y esquirlas de vidrio con bordes desvitrificados a tridimita. Los fenocristales como la plagioclasa muestran formas euhedrales, presencia de maclado y zonaciones. Frecuentemente, se reconocen amígdalas de tridimita y ocasionalmente, de zeolita, teniendo también como minerales accesorios para esta roca, minerales opacos y circón, principalmente.

De acuerdo con la descripción de la muestra ACS-UIII-SC (**figuras 53a y 53b, ilustración 13 en anexos**), presenta una textura porfídica, localmente glomeroporfídica, con masa fundamental hipocristalina y pilotaxítica, cuya mineralogía consta de fenocristales de plagioclasa, con tamaños entre 0,4-3mm, formas euhedrales, parcialmente fracturados y con evidencias de zonación concéntrica, fenocristales de ortopiroxeno y clinopiroxeno de 0,2-2,7mm, con evidencias locales de hematización en bordes de cristales de ortopiroxeno. Su

masa fundamental consta principalmente de vidrio, microlitos de plagioclasa y, subordinadamente, cuarzo.

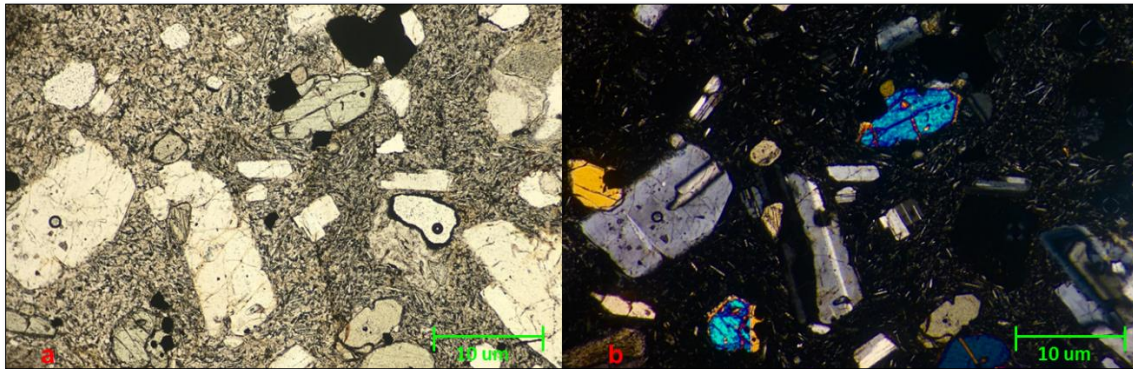


Figura 53. (a) Microfotografía con Luz Polarizada Plana (LPP) de la muestra ACS-U11-SC. (b) Microfotografía con Luz Polarizada Cruzada (LPX). Clasificación: Toba cristalina de composición andesítica. Microscopio: Nikon Eclipse LV100POL. Objetivo 5x.

▪ Costra salina

De acuerdo con las descripciones, a escala macroscópica y microscópica, realizadas por **Troncoso y Ercilla, 2016; Flahaut et al. 2016**, y junto con uso de técnicas de estudio espectral sobre la mineralogía del salar, el depósito salino se encuentra conformado principalmente de una costra de tonalidad pardo-grisácea, predominantemente sulfatada y en forma subordinada, con presencia de carbonatos, nitratos, cloruros, carbonatos e incluso boratos.

A partir de las observaciones hechas en los perfiles espectrales, tanto en la porción norte, central y sur del salar se identificaron tendencias significativas para minerales de nitratos como trona ($\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), cloruros (halita (NaCl)), polihalita ($\text{K}_3\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), sulfatos como anhidrita (CaSO_4), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y localmente, boratos (ulexita ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)). La superficie del salar se mantiene de forma lisa, con minerales de textura polvorienta y granular y junto con la presencia material detrítico de tamaño arcilla y arena fina.

De acuerdo con trabajos previos en el área de estudio y los análisis realizados en laboratorio, dentro del uso de técnicas de estudio espectral, se observó un bajo nivel en reflectancia respecto a minerales evaporíticos, principalmente como yeso y halita, lo cual podría deberse a una mezcla entre las capas salinas y la acumulación de material silíceo detrítico (**Flahaut et al. 2016**). Asimismo, de acuerdo con los

resultados del análisis DRX, y junto con el estudio de firmas espectrales dentro del salar (ver figuras 22, 24 y 25), se identificó cuarzo dentro de la composición mineralógica de una de las capas evaporíticas, siendo aquella con mayor distribución superficial (ver figura 72)

Por otro lado, considerando la presencia de rellenos y llanuras aluviales dentro del área de estudio, en terreno se lograron identificar sectores cubiertos por un material de tonalidad blanquecina y polvoriento, el cual se intentó correlacionar con estudios de firmas espectrales en arcillas que puedan existir dentro y en los márgenes del salar. De ello, se tuvieron buenas probabilidades de ocurrencia para ciertas arcillas dentro del salar, como es el caso de la paligorskita ($(Mg_2Al_2) Si_8O_{20}(OH)_2 \cdot 4H_2O$) y la sepiolita ($Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$). Esto se debió a la alta similitud entre las firmas espectrales de ambas arcillas y la firma del pixel de estudio, estando ubicado en el sector norte del salar, margen oriental (figura 54).

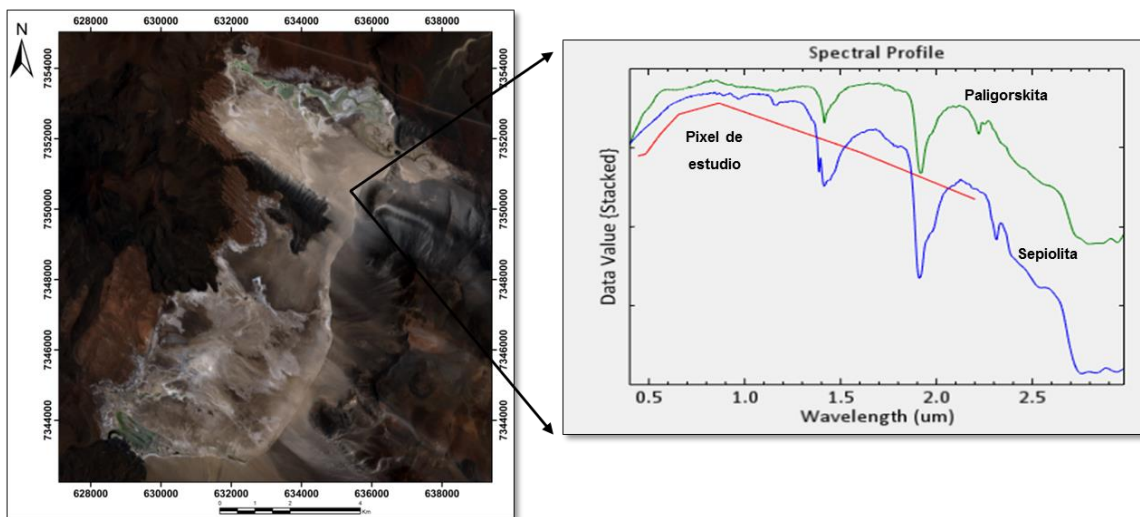
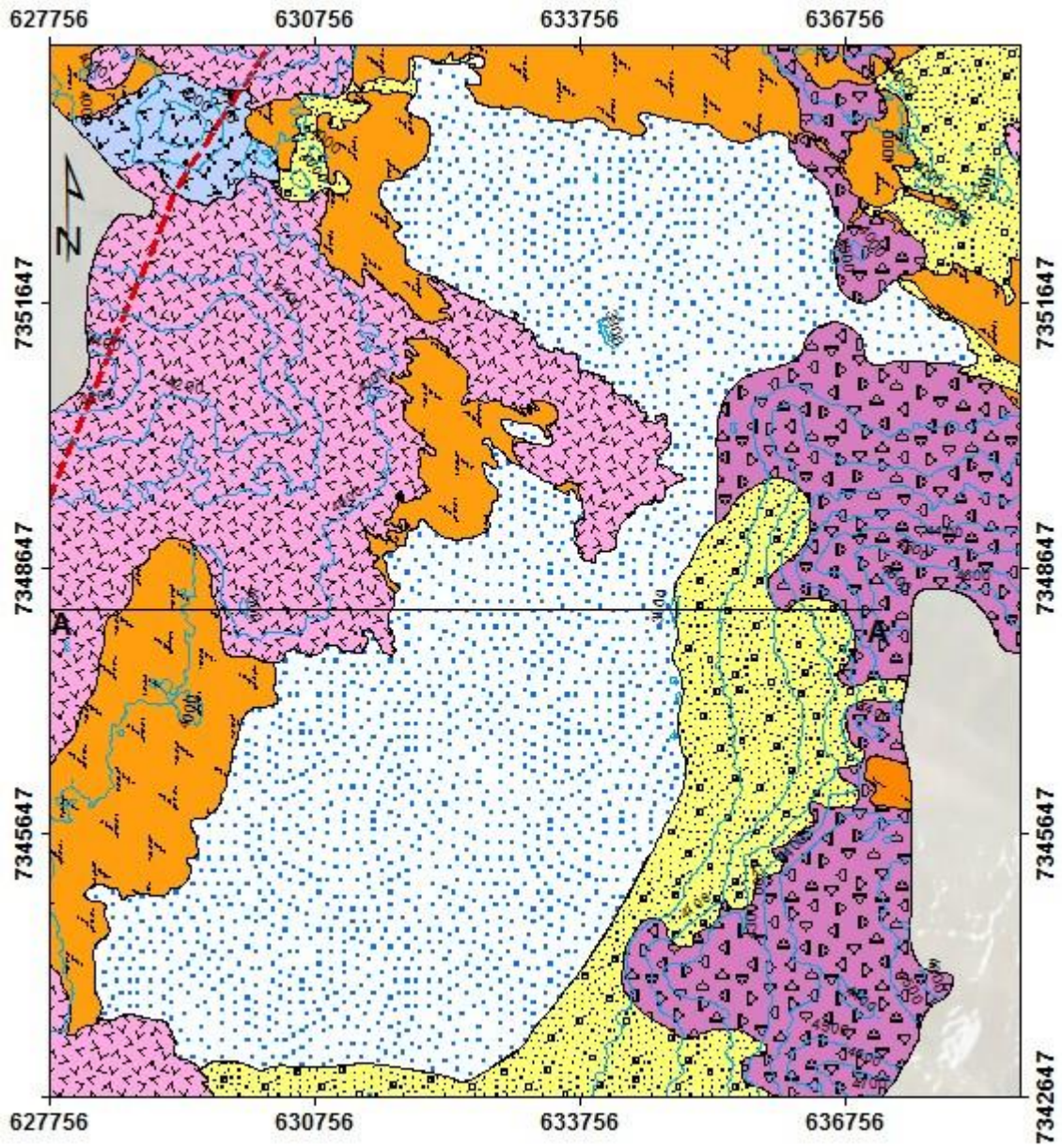


Figura 54. Visualización del punto estudiado por medio del análisis de las firmas espectrales entre arcillas paligorskita y sepiolita. Sector norte del salar Aguas Calientes Sur, margen oriental.

Sin embargo, tales minerales de arcillas no lograron ser identificados en terreno debido a la corta estancia y poco enfoque respecto a su búsqueda, por lo que se recomienda a largo plazo realizar un análisis en detalle sobre la existencia de una o múltiples arcillas en el salar de estudio, lo cual permitiría generar una mejor conceptualización sobre la mineralogía del depósito salino, particularmente sobre el material detrítico que coexiste con las sales evaporíticas.



a)

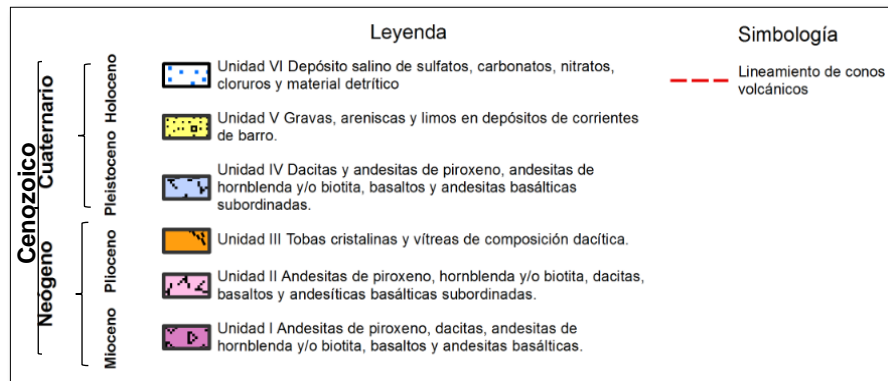
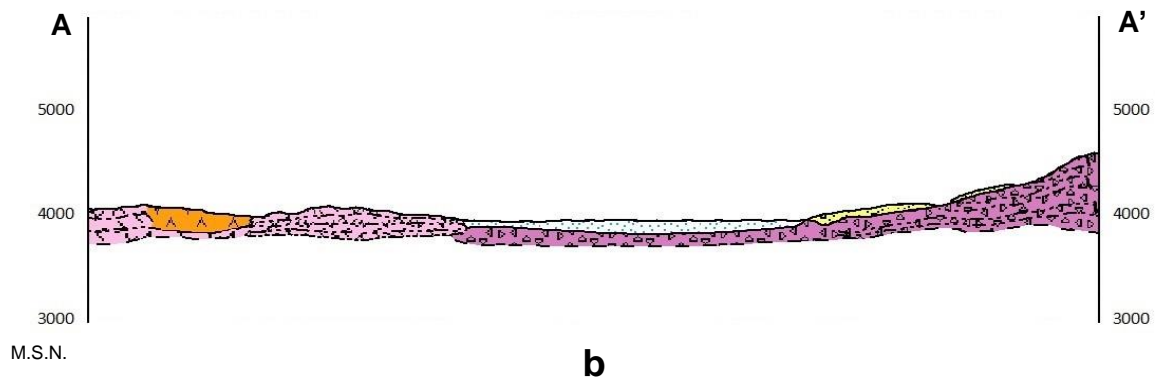


Figura 55. (a) Mapa geológico de escala 1:60.000 y generado a partir del uso de la hoja Toconao n°54 de escala 1:250.000, el mapa geológico de Chile de escala 1:1.000.000 y de la información obtenida del tratamiento con la combinación RGB 742 para la imagen Landsat 8 OLI-TIRS. (b) Perfil geológico de escala 1:60.000 ubicado en la porción centro-sur del salar Aguas Calientes Sur. Fuente: ArcGis 10.3.

A modo de corroborar la efectividad del uso de imágenes satelitales para la delimitación de unidades geológicas, se realizó una superposición entre el mapa geológico generado a escala 1:60.000 con la imagen Landsat 8 OLI-TIRS tratada con la combinación RGB 742 (figura 56), de tal forma que se pueda generar una correlación de mayor precisión entre la geología existente en el área de estudio y la información que el sensor utilizado puede entregar.

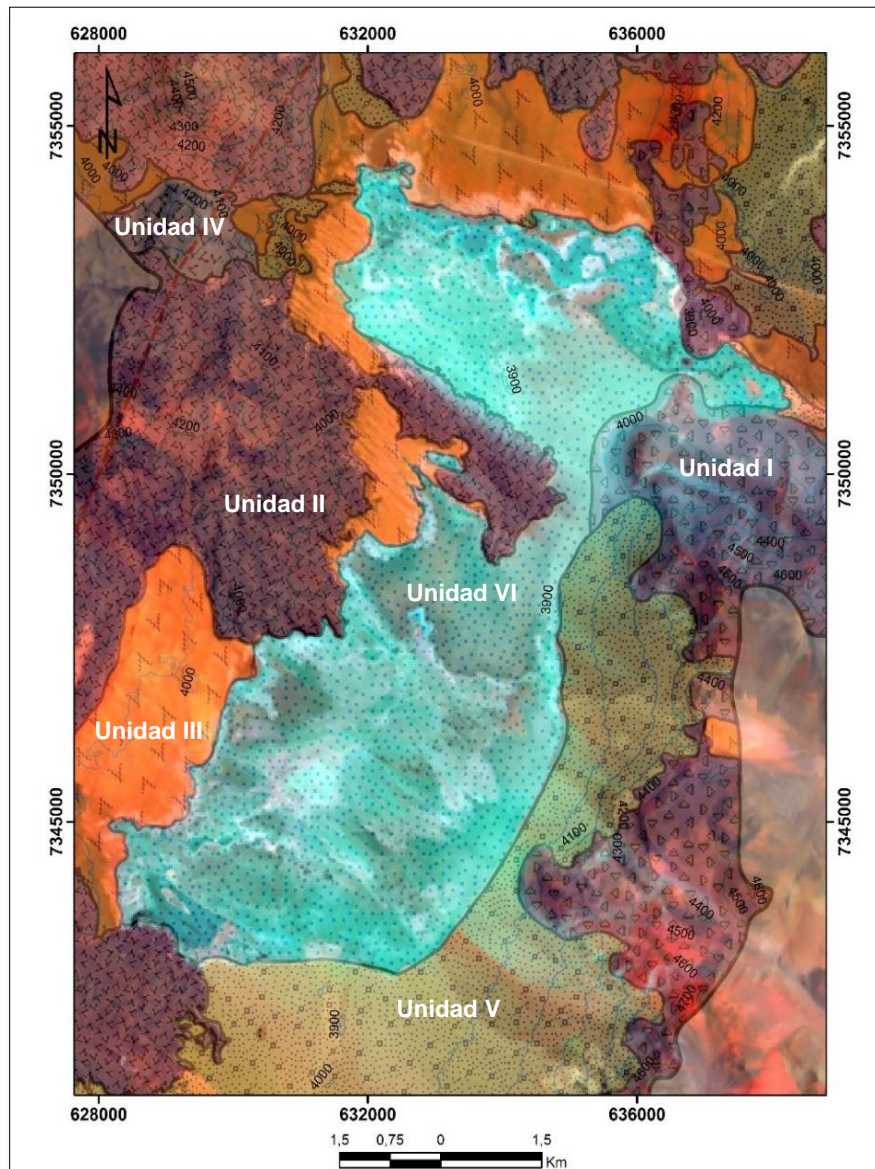


Figura 56. Mapa de correlación entre la geología a escala 1:60.000 del salar Aguas Calientes Sur y la imagen Landsat 8 OLI-TIRS tratada con la combinación RGB 742. Notar la fuerte relación entre la unidad III y las anomalías de tonalidad anaranjada clara otorgada por la imagen.

7. Antecedentes hidroquímicos del salar Aguas Calientes Sur

Dentro de este capítulo se incluyeron de manera sintetizada los estudios realizados por Sernageomin durante el año 2013 y 2016 (**Cochilco, 2013; Troncoso y Ercilla, 2016**) y entre otros trabajos hechos dentro del área (**Risacher *et al.* 1999**), desarrollando desde parámetros físicoquímicos hasta determinar líneas evolutivas de las aguas superficiales para la laguna norte y sur, principalmente.

Asimismo, durante la visita a terreno se realizó la captura de datos físicoquímicos en vertientes sin antecedentes de estudio, acompañado de la toma de muestras de agua superficial para ser analizadas a partir de su concentración en elementos mayores. Esto permitió tener una concepción total del sistema hidroquímico del salar. No obstante, el análisis químico realizado en estas muestras no tuvo el detalle suficiente como para modelar los resultados en Diagramas de Piper, Stiffer u otros, debido a que no se tuvo a disposición la ayuda de laboratorios con equipos de mayor precisión.

El trabajo de Geoquímica de Aguas Cerradas (**Risacher *et al.* 1999**) fue consagrado como uno de los primeros reportes sobre el comportamiento químico de los depósitos salinos y lagunas altoandinas, del cual se mantuvo enfoque en las interpretaciones sobre sus resultados del muestreo de aguas superficiales. Para el caso del trabajo realizado por **Cochilco, 2013; Troncoso y Ercilla, 2016**, se mantuvo énfasis en la toma de muestras de agua superficial, las cuales, a partir de su distribución espacial, comprenden de norte a sur el salar en su totalidad, salvo la porción central en la que fue estudiada para este trabajo (**figura 57**).

7.1 Toma de muestras de agua superficial

En el trabajo de **Risacher *et al.* 1999**, se realizó la toma de 8 muestras de agua superficial, cubriendo la mayoría de los márgenes del salar (**figura 57**). Posteriormente, durante una campaña desarrollada por Sernageomin realizada en el año 2013 (**Cochilco, 2013**), se tomaron un total de 7 muestras de agua

provenientes de afluentes, tanto en la laguna norte como en la laguna sur (**figura 57**).

Asimismo, en el trabajo de **Troncoso y Ercilla, 2016**, la información de las 8 muestras de agua superficial obtenidas en la campaña realizada por **Cochilco, 2013** fueron utilizadas para llevar a cabo los estudios de pH, temperatura, salinidad, conductividad, TDS, concentración de elementos mayores, concentración de iones, entre otros parámetros, los cuales fueron posteriormente modelados en diagramas de Piper, Stiff y Schoeller.

Al noroeste de la laguna norte del salar, se obtuvieron las muestras de código ACT-RT-001 (UTM WGS84(19H) 632186-7354287) y ACT-RT-002 (UTM WGS84(19H) 632009-7354435), donde la primera yace en el borde de la laguna norte del salar, mientras que la segunda muestra fue obtenida desde una vertiente difusa, a 230 mt de la primera muestra, la cual se constituía de un pequeño pajonal con dirección de drenaje hacia la cuenca.

En el lado noreste de la laguna norte, se recolectaron las muestras de código ACT-RT-003 (UTM WGS84(19H) 636138-7353499) y ACT-RT-004 (UTM WGS84(19H) 636138-753499), cuya proveniencia correspondía a vertientes de agua termal, donde las aguas emanaban desde zonas de fractura identificadas en las rocas ignimbríticas. Hacia el sureste desde este punto de muestreo, obtuvieron la muestra ACT-RT-005 (UTM WGS84(19H) 637755-7351561), la cual también proviene de una zona de vertientes termales con abundante vegetación acuática y también divisada desde las fracturas en rocas ignimbríticas.

En el sector central del salar, hacia el este, se muestreó un pequeño manantial, correspondiente a la muestra ACT-RT-006 (UTM WGS84(19H) 634796-7346807). Ya en el sector sur, se muestrearon aguas provenientes de vertientes difusas, las cuales formaban un bofedal. La muestra, correspondiente al código ACT-RT-007 (UTM WGS84(19H) 629342-7343120), fue obtenida en un sector congelado al momento de la visita del equipo de Sernageomin, por lo que realizaron un octavo muestreo hacia el noroeste desde este punto de muestreo, obteniendo así la

muestra ACT-RT-008 (UTM WGS84(19H) 628540-7343487), cuyo punto de extracción se caracterizaba por la presencia de vertientes termales de abundante caudal, sustentando vegetación de tipo pajonal.

Sin embargo, para esta muestra no se lograron obtener sus parámetros físicoquímicos. Por tanto, para sustentar la información faltante en el sector sur, se interpolaron los datos obtenidos por **Risacher et al. 1999**, correspondiendo a las muestras AC3-13 (UTM WGS84(19H) 628875-7343950), AC3-14 (UTM WGS84(19H) 628750-7345950) y AC3-15 (UTM WGS84(19H) 629500-7344250). Particularmente, la AC3-13 vendría a complementar la muestra ACT-RT-008, mientras que las muestras AC3-14 y AC3-15 abarcan una buena proporción superficial del sector sur del salar Aguas Calientes Sur. La información seleccionada y retrabajada a partir de los catastros generados por **Troncoso y Ercilla, 2016** y **Risacher et al. 1999**; permitieron generar una mejor interpretación sobre el control hidroquímico del depósito salino.

7.2 Antecedentes de los estudios hidroquímicos

Iniciando con el sector norte del salar, las muestras ACT-RT-001 y ACT-RT-002 se caracterizaron por presentar un comportamiento de tipo salmuera y salado, respectivamente, debido a sus concentraciones totales en sales disueltas (TSD), correspondiendo a 45.530 y 7.000 [mg/l], individualmente. Ambas en el diagrama de Piper, se asocian intensamente dentro del campo de aguas cloruradas-sódicas.

Sin embargo, al revisar los diagramas de Stiff, ambas muestran características similares, pero divergen respecto a su salinidad, lo cual se observó en el catastro de parámetros físicoquímicos, donde sus razones Na/Cl [meq/l] corresponden a 0,82 y 0,90 [meq/l], mientras que en la relación Ca/SO₄ [mmol/l] poseen valores de 0,94 y 1,03 [meq/l]; respectivamente.

Dentro del diagrama de Schoeller para iones mayoritarios, minoritarios y elementos traza, se identificaron altas concentraciones en Na (13.000 [mg/l]), Mg (1.370 [mg/l]) Cl (24.360 [mg/l]) y SO₄ (4.160 [mg/l]) para la muestra ACT-RT-001, manteniendo un contraste con la muestra ACT-RT-002 proveniente de la vertiente.

No obstante, para el caso del contenido en iones minoritarios y trazas, la muestra ACT-RT-001 se destacaba por sus altos valores en Sr (37 [mg/l]), F (4,58 [mg/l]), Br (6,85 [mg/l]) y Fe 1,86 ([mg/l]).

Ubicándose al noreste de la laguna norte, las muestras ACT-RT-003 y ACT-RT-004 mostraron valores semejantes respecto al TSD, correspondiendo a 2.284 y 2.251 [mg/l], respectivamente. Por lo cual, fueron catalogadas como aguas salobres.

En el diagrama de Piper (**figura 58**), ambas muestras se relacionan respecto a las dos primeras muestras obtenidas al noroeste, cayendo en el campo de aguas cloruradas-sódicas, mientras que en el diagrama de Stiff (**figura 59**) presentan concentraciones muy idénticas respecto al Na y Cl, junto con la alta presencia de Ca y SO₄ y en menor proporción, Mg.

Respecto a los diagramas de Schoeller (**figura 60**), tanto para elementos mayoritarios, minoritarios y elementos trazas, ambas muestras tienen patrones de concentración equivalentes entre sí y concordantes respecto a las concentraciones identificadas en las muestras ACT-RT-001 y ACT-RT-002.

Hacia el noreste, en el extremo oriental del salar y aproximadamente a 2,5 km desde la última posición de muestreo, la muestra ACT-RT-005 arrojó un contenido en TSD de 8.124 [mg/l], siendo catalogada como agua salada. En el diagrama de Piper se clasificó al igual que el resto de las muestras como agua clorurada-sódica. Sin embargo, dentro del diagrama de Stiff mantiene una diferencia frente a ellas respecto a sus bajas concentraciones en Ca y SO₄.

Los diagramas de Schoeller arrojaron un comportamiento equivalente entre las muestras ACT-RT-005 y ACT-RT-002 respecto a sus iones mayoritarios, salvo en sus concentraciones de Ca (425 [mg/l]) y HCO₃ (353,77 [mg/l]), junto con una cantidad idéntica en Li (2,5 [mg/l]). Respecto a sus iones minoritarios y trazas, son similares en concentración, pero con un leve empobrecimiento en la mayoría de sus iones, con excepción del Sr (6.729 [mg/l]) y F (1,16 [mg/l]).

En el sector central del salar, la muestra ACT-RT-006 arrojó el valor más bajo en TSD, correspondiendo a 2.191 [mg/l], siendo catalogado como agua salobre. Dentro del diagrama de Piper, esta muestra se caracterizó por incluirse en el campo de aguas sulfatadas-cálcicas, con menor proporción en Na, K y Cl. En el diagrama de Stiff se identificó de manera notoria el predominio de las concentraciones de Ca y SO₄ por sobre el resto de las muestras estudiadas.

Para el diagrama de Schoeller, en los elementos mayoritarios, la muestra ACT-RT-006 contenía las concentraciones más bajas respecto a todas las muestras, salvo en las concentraciones de Ca (410 [mg/l]) y SO₄ (1.186 [mg/l]). Respecto a los elementos minoritarios y trazas, posee un comportamiento similar a la muestra ACT-RT-005, mostrando contenidos de 4.136 y 1,24 [mg/l] para el Sr y F, individualmente.

En el sector sur del salar, las muestras ACT-RT-007 y ACT-RT-008 arrojaron valores en TSD de 2.480 y 4.225 [mg/l], respectivamente, siendo catalogadas en base a su salinidad como aguas tipo salobres.

En el diagrama de Piper, ambas muestras se encuentran ubicadas de manera superpuesta entre ellas, salvo que en la muestra ACT-RT-007 presenta una cantidad levemente superior en SO₄ a diferencia de la muestra ACT-RT-008. En los diagramas de Stiff, ambas muestras son muy similares en su comportamiento hidroquímico. En el diagrama de Schoeller para iones mayoritarios, ambas son concordantes entre sí, salvo para la muestra ACT-RT-007 por su enriquecimiento relativo a partir de su mayor salinidad respecto a la muestra ACT-RT-008.

Respecto a sus elementos minoritarios y trazas, mantienen patrones concordantes, salvo por un leve enriquecimiento en Cu (3,905 [mg/l]) en la muestra ACT-RT-008. Como dato adicional, ambas muestras arrojaron altas concentraciones relativas en As, teniendo un promedio de 0,71 [mg/l] y tomando en cuenta un promedio entre las muestras de agua obtenidas en el salar correspondiente a 0,3 [mg/l].

Asimismo, en estas muestras se identificaron concentraciones en Li proporcionalmente mayores al resto de los puntos de muestreo, con valores de 5 y

2,5 [mg/l], respectivamente, teniendo también proporciones mayores de Mg respecto al Ca.

En base a la información sintetizada de las muestras analizadas por **Risacher et al. 1999**, las muestras AC3-13, AC3-14 y AC3-15 abarcan principalmente el miembro suroeste del sector sur del salar, donde la muestra AC3-15 fue obtenida en la laguna sur y catalogada como agua salobre, en base a su contenido en sales (3.800 [mg/l]) y un valor en TSD de 3.792 [mg/l].

A diferencia de la muestra ACT-RT-008, la muestra AC3-13 presentaba una altísima concentración en TSD equivalente a 10.071 [mg/l]. Respecto a la muestra AC3-14, su proveniencia corresponde a una vertiente difusa que al igual que aquella en donde se obtuvo la muestra ACT.RT.008, alimentan a la laguna sur del salar.

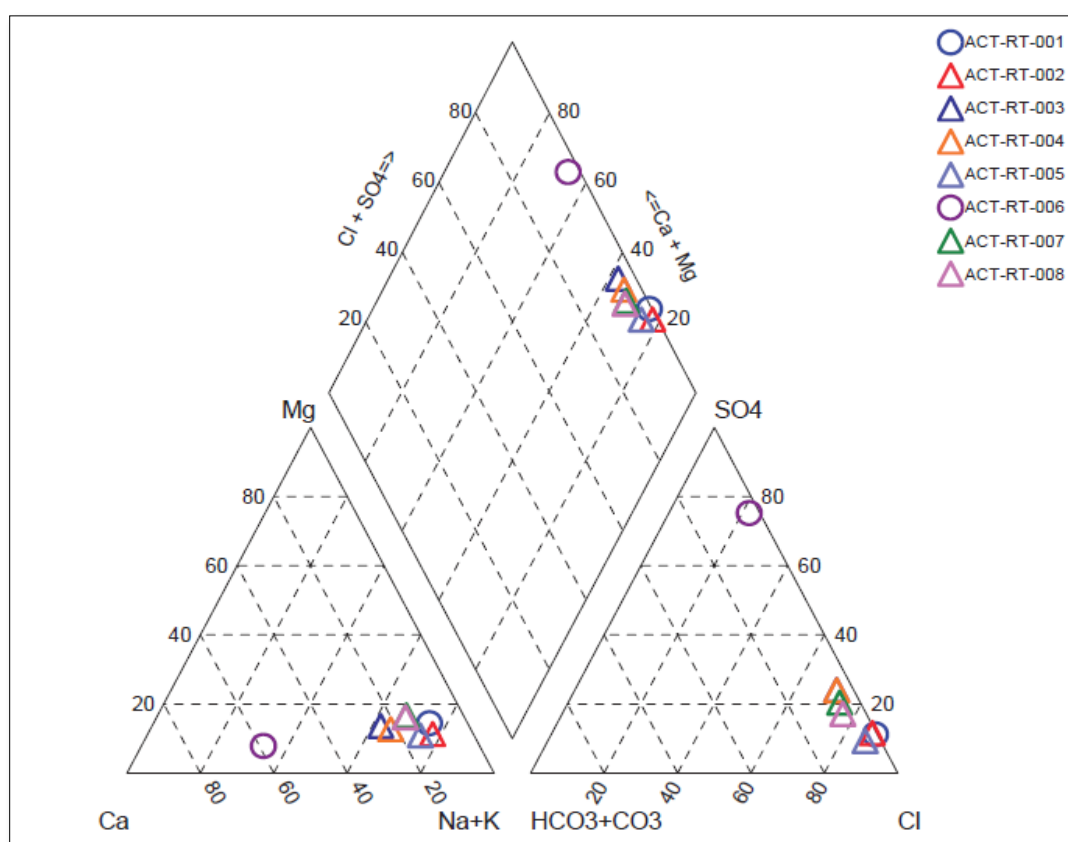


Figura 58. Diagrama de Piper para las muestras de agua superficiales tomadas en la campaña hecha por Sernageomin durante el año 2016. Tomado de Troncoso y Ercilla, 2016.

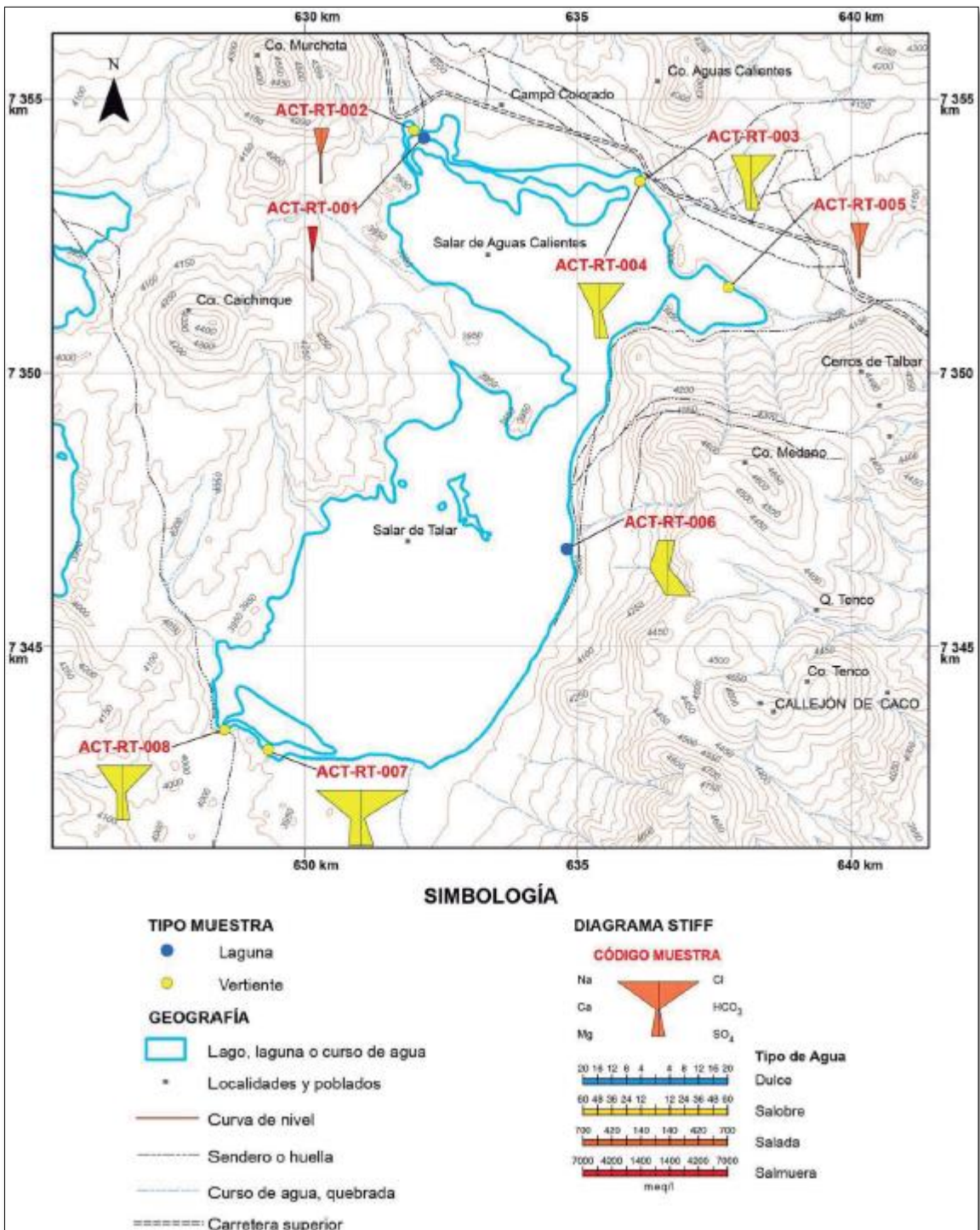


Figura 59. Mapa topográfico con los diagramas de Stiff aplicados a las muestras de agua superficiales. Tomado de Troncoso y Ercilla, 2016.

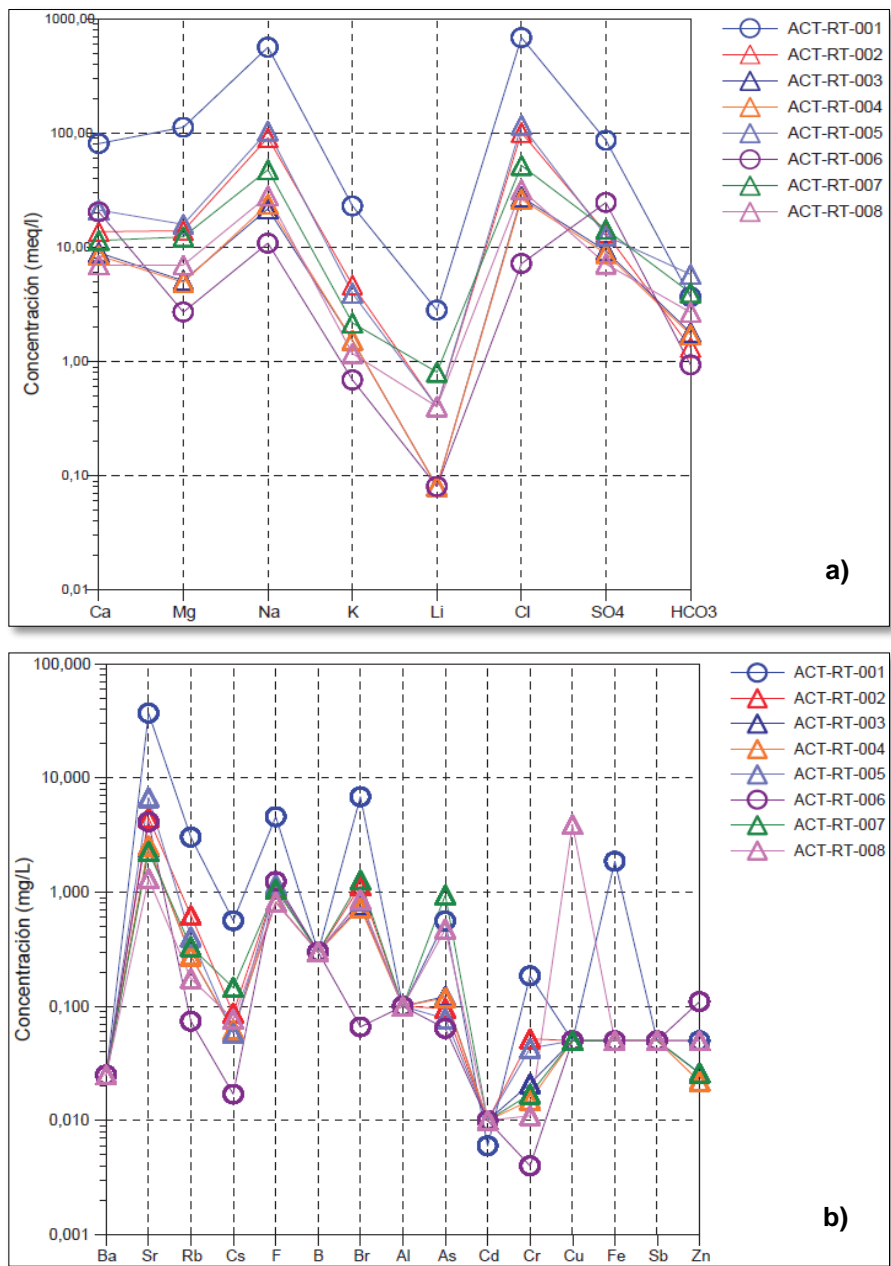


Figura 60. (a) Diagrama de Schoeller de iones mayoritarios. **(b)** Diagrama de Schoeller de iones minoritarios y elementos trazas. Tomado de Troncoso y Ercilla, 2016.

A partir de la información sintetizada, se reconocieron tanto semejanzas como diferencias respecto a los comportamientos hidroquímicos de las muestras obtenidas en campañas temporalmente distantes entre sí, siendo el trabajo realizado por **Risacher *et al.* 1999**, aproximadamente 17 años desde el trabajo realizado por **Troncoso y Ercilla, 2016**.

Sin embargo, las muestras de agua superficiales más recientes fueron tomadas en el año 2013. En el capítulo siguiente se dará a conocer las interpretaciones y análisis de la información tratada, de tal forma de poder entablar conexiones más fidedignas entre el sistema hidroquímico del salar Aguas Calientes Sur y la distribución global de sus minerales evaporíticos.

7.3 Análisis de muestras de agua superficial obtenidas en terreno

Respecto al estudio y muestro en el sector centro-sur del salar, el análisis fisicoquímico de las aguas superficiales de codificación ACS-SC-001 y ACS-SC-002 arrojaron datos significativos, mostrando una tendencia altamente salina debido a sus valores de conductividad eléctrica (Ce) de 20 [uS], junto con datos de temperatura entre 16,2° y 16,7° respectivamente y valores de Ph de 7,62 y 10.

Posteriormente, las muestras de agua superficial fueron analizadas mediante la identificación de los elementos mayoritarios principales, de acuerdo con la concentración de cada uno de ellos. El análisis fue desarrollado en el laboratorio de la planta Salar de Atacama, de la empresa Albemarle, en la cual el análisis químico estándar para todas sus muestras de salmueras contempla la concentración de Li, Mg (ppm), Ca (ppm), Na (ppm), K (ppm), Cl (%) y SO₄ (%), junto con la determinación de sus respectivas densidades y nivel de Ph.

No obstante, se debió considerar que la medición de elementos mayoritarios en las muestras de agua superficial obtenidas por Sernageomin fue a partir de las unidades [mg/l] y [meq/l]. Por lo cual, para el análisis presente, los valores entregados por el análisis de las muestras de agua superficial obtenidas en terreno fueron transformadas de ppm a [meq/l], de tal forma que se logren entablar relaciones o bien, diferencias en la hidroquímica de los sectores de afluentes del margen oriental y del margen occidental.

Respecto a las dos muestras de agua superficial muestreadas en el sector centro-sur del salar, la muestra ACS-AS-001 arrojó valores en concentración de Li, Mg, K, Na y Ca de 6,97; 520,16; 666,61; 5.618,21 y 436,83 [meq/l], respectivamente, arrojando concentraciones de Cl (%) y SO₄ (%) de 672,77 y 33,19 [meq/l]. Para la

muestra ACS-AS-002, las concentraciones de Li, Mg, K, Na y Ca arrojaron valores de 12,97; 987,04; 1.337,35; 10.292,29 y 818,27; seguido de concentraciones de Cl y SO₄ de 1.055,34 y 65,6 [meq/l]. Uno de los rasgos más relevantes y asociados corresponde a los altos valores de concentración en Na para ambas muestras, y junto con un aumento considerable en la proporción de cloruros disueltos en la solución, observado en la muestra ACS-AS-002.

El aumento en cloruro desde el inicio del afluente hasta las proximidades del sector centro-sur puede deberse a la disolución de halita eflorescente, comúnmente en los márgenes del afluente. Esto podría correlacionarse con las altas concentraciones de Na. No obstante, el estudio realizado en estas muestras de agua superficial fue en base al análisis de los elementos mayores dentro de la solución, por lo que tales datos no poseen el peso suficiente para ser correlacionados con la información hidroquímica presente en el resto del salar.

8. Discusión

8.1 Correlación de la geología en el depósito salino a partir del uso de imágenes satelitales multiespectrales

Respecto al uso de sensores remotos, es posible entablar ciertas diferencias respecto a la calidad de información frente a una investigación en particular. Esto se debe a que comúnmente, dentro de las últimas investigaciones realizadas a partir del estudio de depósitos evaporíticos y prospección de ellos, se ha preferido el uso del sensor Landsat 8 OLI-TIRS y secundariamente, Landsat 7 ETM+, en base a su amplia gama de espectros experimentales para las distintas sales (**Kokaly et al. 2017**).

Por otro lado, a pesar de que el sensor ASTER L1T posee una mejor resolución y aproximación espectral al mineral de estudio, se ha utilizado comúnmente en trabajos de mapeo geológico, zonas mineralizadas, y así, en la identificación de zonas con alteración hidrotermal, teniendo el caso de los yacimientos de Collahuasi (**Lattus, 2016**), correspondiendo a Quebrada Blanca y Ujina (**figura 61**).

Asimismo, los trabajos previos realizados en el área de estudio tuvieron como respaldo el uso de imágenes Landsat 8 OLI-TIRS (Flahaut *et al.* 2016), con su respectiva validación en terreno y posterior análisis en laboratorio a escala microscópica. Sin embargo, en el área de estudio, el uso del sensor ASTER L1T fue utilizado de manera exclusiva para la detección de zonas de alteración hidrotermal (figura 62) mediante el uso de la herramienta *Decorrelation Stretch* para la combinación RGB 321 (Marquetti *et al.* 2004).

Según la figura 62, la zona de alteración hidrotermal mapeada por Gardeweg & Ramírez, 1982 resultó ser un área muy similar a diferencia de la anomalía detectada por la técnica utilizada, salvo que esta última arrojó un leve aumento en su distribución superficial. Asimismo, La zona de alteración caracterizada en la hoja Toconao mostraba también un pequeño afloramiento de material volcánico, correspondiendo a la Formación Msv o Estratovolcanes I (Gardeweg & Ramírez, 1982).

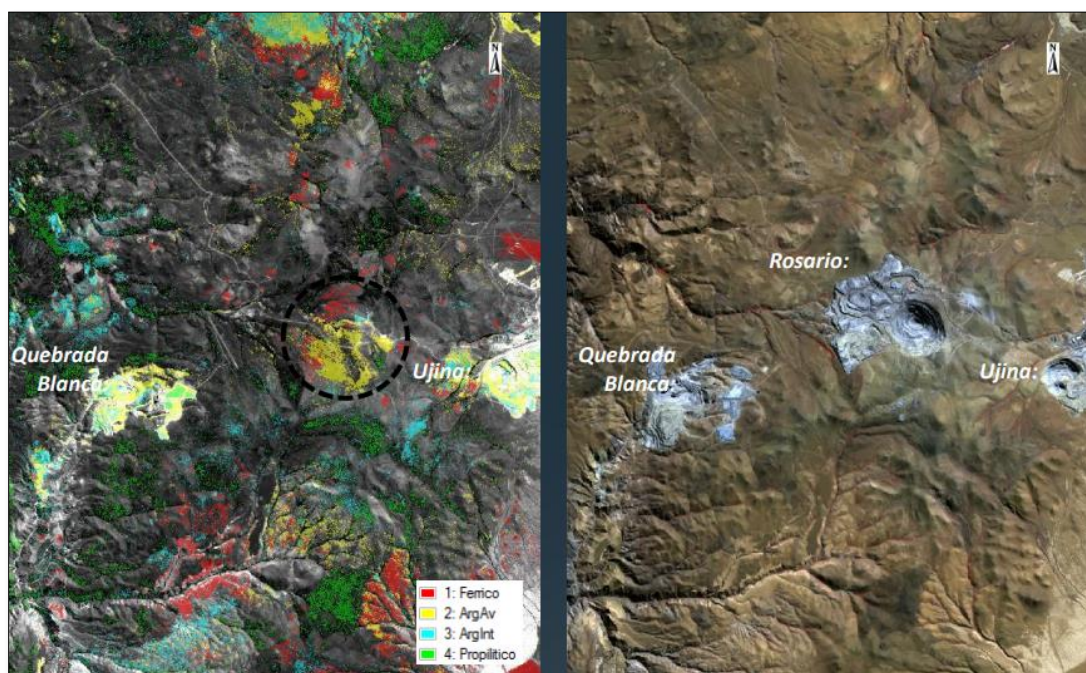


Figura 61. Uso de imágenes ASTER L1B y ASTER L1T para el reconocimiento de zonas de alteración por medio del uso de cocientes de bandas. A la derecha se tiene una vista en color real (RGB 321) para el distrito Collahuasi. Notar en la imagen a la izquierda una anomalía de alteración argílica avanzada reconocida en el yacimiento Rosario, el cual sería explotado en los siguientes años hasta la actualidad. Tomado de SRGIS.

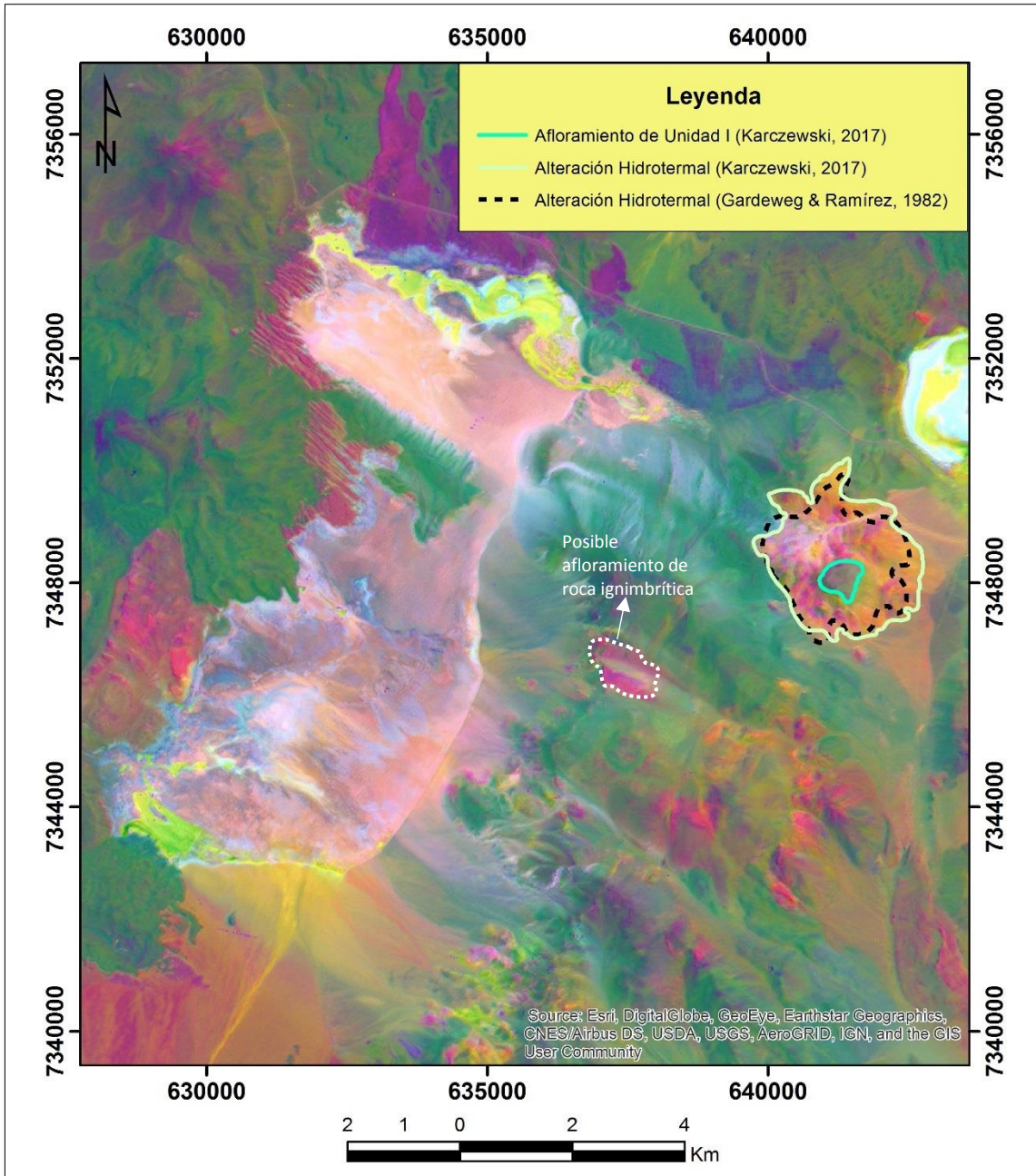


Figura 62. Uso de la técnica *Decorrelation Stretch* para la detección de zonas de alteración hidrotermal y presencia de minerales arcillosos. La zona delimitada por la línea segmentada oscura corresponde a la descripción realizada en la hoja Toconao n°54, mientras que la línea color verde claro representa la anomalía registrada en la imagen satelital producto del uso de la técnica. La zona alterada arroja una tonalidad anaranjada intensa. Los minerales arcillosos presentan una tonalidad lila-claro.

Comparativamente, la imagen resultante arrojó una anomalía que representa casi idénticamente a un afloramiento descrito por los mismos autores e incluso, debido a la escala de la imagen, fue posible observar anomalías de tonalidad fucsia a lo largo del Cerro Médano (al este del salar de estudio), las cuales podrían corresponder a afloramientos de la unidad III.

Al revisar la **figura 62**, es posible reconocer aquellas anomalías con tonalidades anaranjadas claras. No obstante, cabe destacar que el uso de ambos tipos de sensores otorga una aproximación de lo que se puede encontrar en la superficie, lo cual no excluye a aquellas unidades geológicas y zonas de alteración mapeadas por **Gardeweg & Ramírez, 1982** que sí muestran una tonalidad propia entregada a partir de sus respectivos índices de reflexión. Esto último permitió interpolar tal característica espectral en zonas que respondan con una anomalía equivalente o similar.

De acuerdo con las observaciones realizadas en terreno, la anomalía sobre la presencia de algún material con características similares a los afloramientos de la Unidad III (**ver figura 62**) fue validada con la identificación de pequeños afloramientos ubicados en la falda del Cerro Médano (**figura 63**), en los cuales, al obtener la muestra de roca ACS-UI-SC desde un afloramiento con características semejantes a la Formación Msv (**Gardeweg & Ramírez, 1982**), se reconocieron rocas de tonalidades pardo-claras y de composición semejante a las muestra ACS-UIII-SC, en el margen occidental del salar (**figura 64**).

Por tanto, teniendo descripciones similares a escala macroscópica de ambas muestras de roca dispuestas espacialmente a una distancia mayor a 2 km, se ha logrado entablar que la herramienta *Decorrelation Stretch* resultó ser, efectivamente, un elemento útil tanto para el reconocimiento de unidades de roca de baja distribución areal como para la identificación de zonas de alteración hidrotermal, aunque estas últimas no se lograron validar durante la visita a terreno debido a sus ubicaciones en casi todos los márgenes de la cuenca Salar Aguas Calientes Sur, exceptuando los bordes del salar, en el sector sur.



Figura 63. Vista panorámica hacia el SE desde el Salar Aguas Calientes, correspondiendo a afloramientos de rocas (delimitados en color negro) litológica y espectralmente similares, ubicados en y a faldas del Cerro Médano. El área en que se desarrolló el muestreo de la unidad I y los afloramientos con ocurrencia de la Unidad III, se encuentra delimitada en color rojo oscuro.

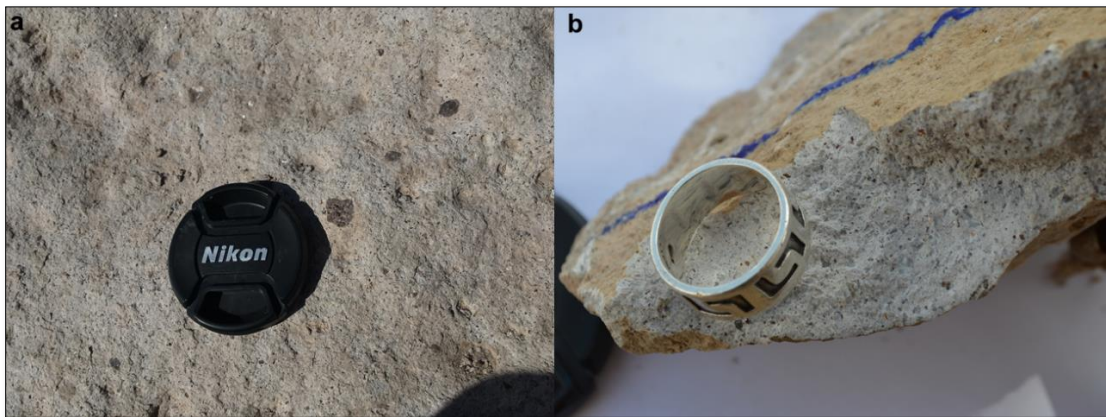


Figura 64. (a) Vista de afloramiento en donde se obtuvo la muestra de roca ACS-UIII-SC (UTM (19H) 631672-7348400, 3944 msnm). (b) Muestra de roca con características litológicas similares a la muestra ACS-UIII-SC (UTM (19H) 636361-7346372, 4118 msnm).

De acuerdo con la descripción microscópica de la muestra ACS-UIII-SC (**ilustración 13 en anexos**), su textura es principalmente porfídica, rica en plagioclasa y con una masa fundamental cristalina. Análogamente, la muestra de roca obtenida en el margen oriental (**figura 64b**) presenta tonalidades pardo-grisáceas a claras, con cristales de biotita de 0,5-1mm alterados pervasivamente a óxidos de hierro,

dejando una tonalidad cobriza, lo cual se respalda con las descripciones de **Gardeweg y Ramírez, 1982**. Considerando que la muestra obtenida en el margen oriental (**ver figura 41**) se encuentra ubicada en la falda del afloramiento detectado por la técnica *Decorrelation Stretch* (**ver figura 62**), resulta efectivo suponer que tal sector presenta afloramientos locales de rocas con características litológicas semejantes a la unidad geológica III. Por otro lado, el uso de técnicas remotas como el estudio de firmas espectrales permitió realizar buenas comparaciones entre lo observado en imágenes satelitales y las descripciones hechas en terreno, conllevando a la propuesta de entablar sectores con alta o baja presencia de ciertas sales evaporíticas, sean sulfatos, cloruros u otros.

Sin embargo, para respaldar esta técnica, se recurrió a la herramienta *Spectral Analyst*, incorporada en el software ENVI Standard 5.3, cuyo uso permitió aportar con información complementaria para el análisis de las firmas espectrales. Por consiguiente, esta nueva técnica se utilizó para analizar los sectores en que se obtuvieron las muestras de agua superficial en campañas anteriores (**figura 65**), de tal forma que se pueda correlacionar preliminarmente las características mineralógicas de los sectores de muestreo con las aguas presentes en afluentes, lagunas o manantiales. Inicialmente, se realizó un estudio de todos los sectores no muestreados del salar y en sectores con registro de muestreo en campañas anteriores, apuntando principalmente a la presencia de minerales descritos petrológicamente en la hoja Toconao n°54, tales como la cristobalita, caolinita, montmorillonita, dickita, entre otros. Posteriormente, se utilizaron bibliotecas con amplia gama de minerales, integradas dentro del software, de las cuales el análisis aplicó a todas las firmas espectrales de los minerales que compone la biblioteca en el pixel de estudio, arrojando resultados en base a probabilidades de ocurrencia entregadas por un parámetro conocido como Mapeo del Ángulo Espectral (SAM), integrado en la herramienta mencionada y correspondiendo a un algoritmo que asocia cada espectro en tiempo real como un vector dentro de un espacio n -dimensional. De manera experimental, solo aquellos minerales con probabilidad de SAM mayores a un 50% y una puntuación sobre 0.9 se consideraron como posibles

elementos existentes en el área del píxel. Debido a la enorme gamma de minerales estudiados, los resultados se organizaron de acuerdo con aquellas firmas con mayor probabilidad de ocurrencia. Generalmente, la presencia dominante de arcillas como dickita, montmorillonita, caolinita y subordinadamente, de nitratos como la trona, se reconoció aproximadamente en casi todos los extremos y porciones centrales del salar (figura 66). Asimismo, para comparar la información disponible, el análisis se realizó en los puntos de muestreo realizados por Sernageomin, entregando resultados similares con patrones de correlación principalmente en las arcillas presentes, como es el caso de la muestra ACT-RT-001 (figura 67).

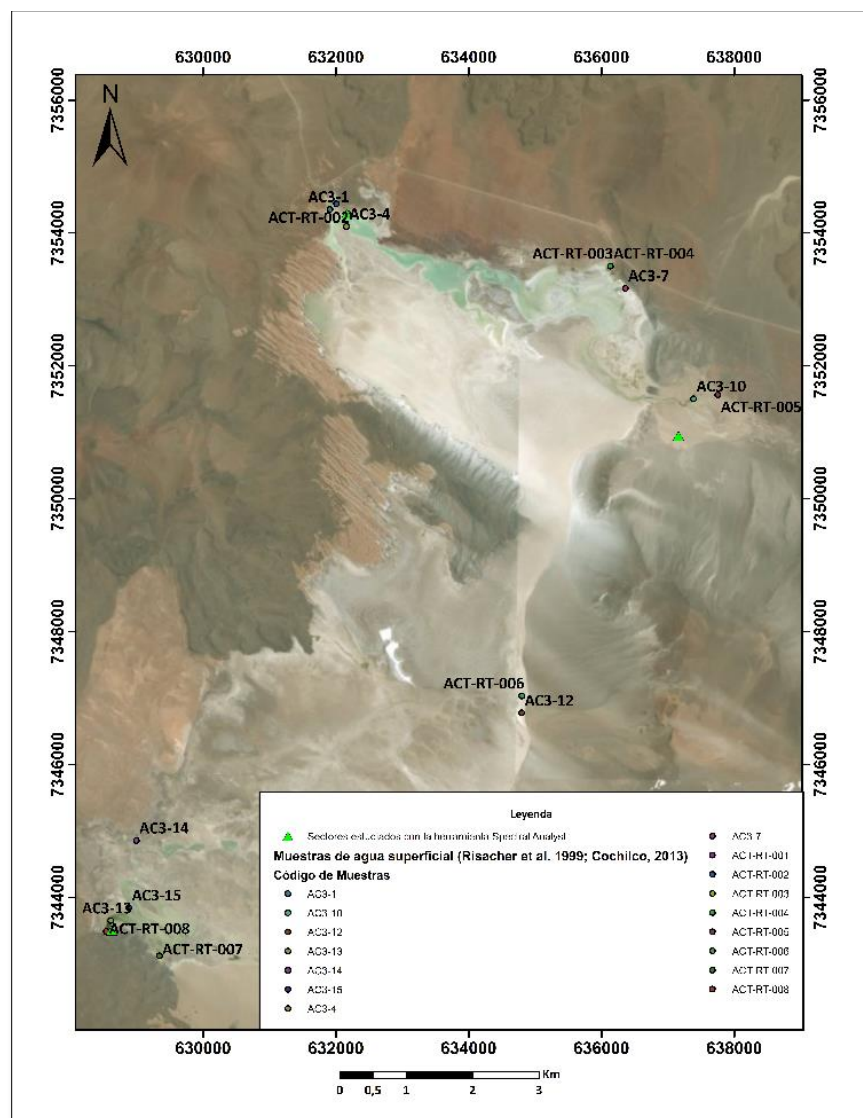
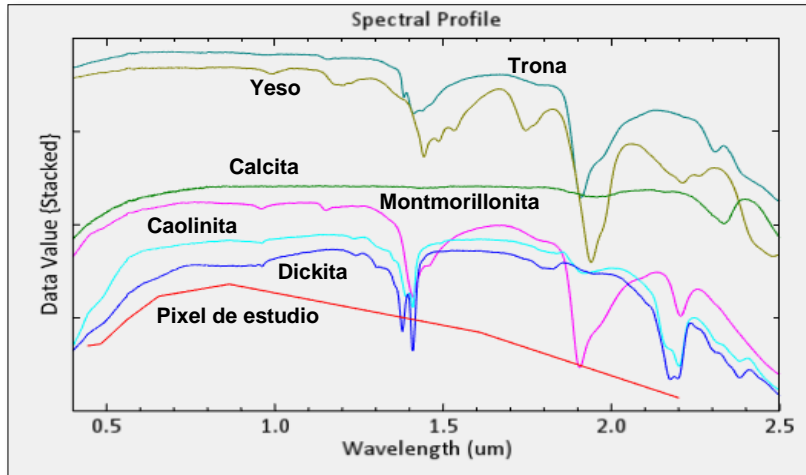
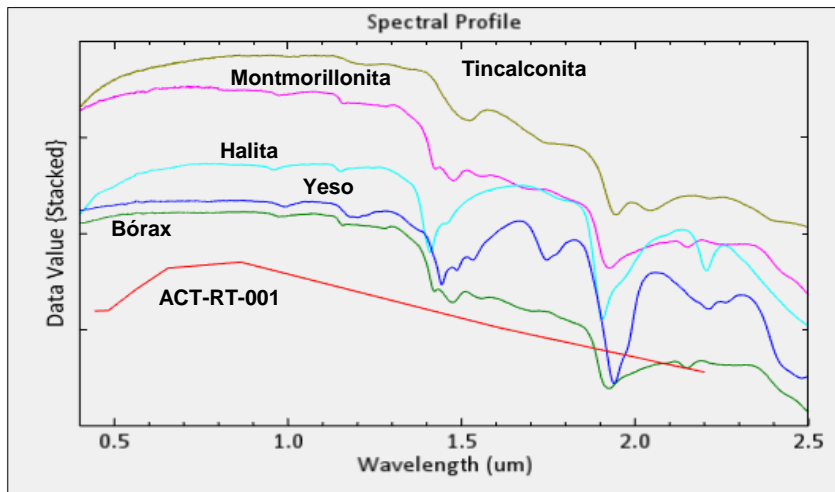


Figura 65. Mapa topográfico con puntos de estudio (color verde) por la herramienta Spectral Analyst.



Análisis Espectral I	
Minerales	SAM (%)
Dickita	0.769
Caolinita	0.795
Yeso	0.742
Montmorillonita	0.769
Trona	0.818

Figura 66. Análisis espectral efectuado en un pixel cercano a la muestra ACT-RT-005 (firma roja) en el lado noreste del salar y próximo a la vertiente principal que alimenta a la laguna norte. Ponderación promedio: (1.3). Coordenadas: UTM WGS84 (19H) 637161-7350947. Fuente: ENVI Standard 5.3.



Análisis Espectral II ACT-RT-001	
Minerales	SAM (%)
Montmorillonita	0.756
Tincalconita	0.815
Bórax	0.811
Yeso	0.747
Halita	0.608

Figura 67. Análisis espectral en el pixel que incluye a la muestra ACT-RT-002. Ponderación: (1.35). Fuente: ENVI Standard 5.3.

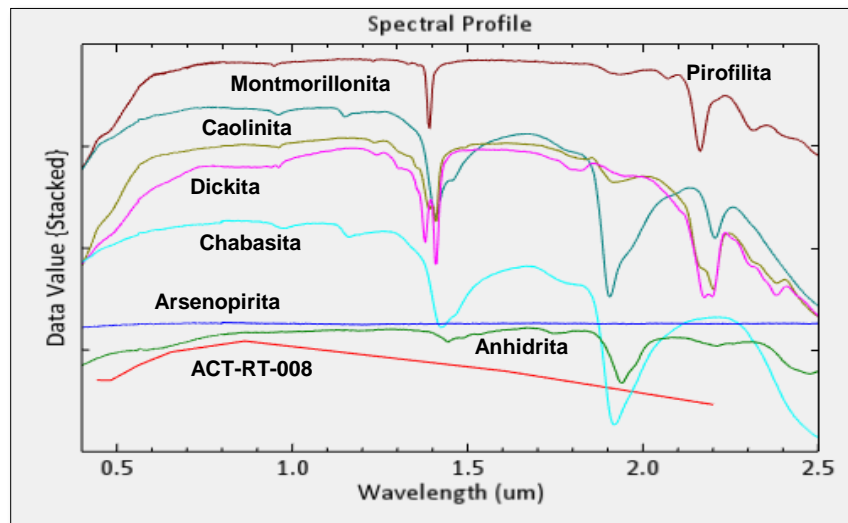
Al revisar ambos análisis espectrales, tanto en un sector próximo a la muestra ACT-RT-005 como en otro punto cercano a la muestra ACT-RT-001, los resultados son similares al revisar los patrones de correlación que recaen en las probabilidades de ocurrencia para las arcillas detectadas con la herramienta SAM. No obstante, como se trata de un modelo algorítmico basado en la estadística de vectores, al igual que la herramienta de combinaciones de bandas, existe un margen de error, correspondiendo a un 9.49% (**García-Allende et al. 2007**).

Notar que la halita presenta una probabilidad en SAM de 0.608, lo cual podría llegar a explicar la alta concentración de sales disueltas identificada en la muestra ACT-RT-001 y no de forma consolidada, debido a que el sensor sólo captura las entidades cristalinas con estructuras capaces de generar reflexión y que puedan ser identificadas a partir del tipo de resolución de la imagen satelital en uso.

Asimismo, las firmas espectrales del pixel próximo a la muestra ACT-RT-005, escogido aleatoriamente para determinar posibles minerales que existan en la superficie, muestran un patrón correlacionable con las firmas espectrales de los minerales dominantes según el análisis, a pesar de que muestren una mayor reflectancia. Esto podría deberse, o bien, por un posible empobrecimiento de aquellos minerales en el área o por el uso de la firma del pixel en toda la biblioteca de minerales y no de forma individual. Sin embargo, su ponderación en promedio arrojó un valor de 1.35. Para corroborar esta información, se hizo un ensayo con la muestra ACT-RT-008, caracterizada por mostrar índices moderados de salinidad y leve enriquecimiento en Cu (**figura 68**).

Particularmente, el sector próximo a la toma de la muestra ACT-RT-008 se caracterizaba por presentar predominantemente minerales de arcilla, a pesar de la diferencia en reflexión con respecto al pixel de estudio. Esto también se debe a su ponderación, la cual arrojó un valor de 1.45, por lo cual su probabilidad de ocurrencia es considerable. En base a las concentraciones de As, se detectó una buena correlación con la firma espectral de la arsenopirita, de lo cual se podría interpretar una continua meteorización y pronta disolución de este mineral,

posiblemente proveniente del material detrítico proveniente de zonas de alteración hidrotermal dispuestas en las altas cumbres de la cuenca.



Análisis Espectral VIII ACT-RT-008	
Minerales	SAM (%)
Caolinita	0.881
Dickita	0.858
Pirofilita	0.772
Arsenopirita	0.726
Chabasita	0.815
Montmorillonita	0.847
Anhidrita	0.729

Figura 68. Análisis espectral en un pixel ubicado a las cercanías de la muestra ACT-RT-008. Coordenadas: UTM WGS84 (19H) 628617-7343503. Ponderación: (1.45). Fuente: ENVI Standard 5.3.

Respecto a la concentración de Cu en esta muestra de agua, no se lograron detectar anomalías o probabilidades de ocurrencia suficientes para algún mineral con contenido de cobre, por lo que se desconoce su origen.

8.2 Distribución de los minerales evaporíticos

A modo global y de acuerdo con lo estudiado por **Warren, 2005**; depósitos salinos como el Salar Aguas Calientes Sur están caracterizados por la presencia dominante de evaporitas primarias como yeso y halita, teniendo preliminarmente un núcleo principalmente formado por yeso como mineral evaporítico primario y halita como el mineral evaporítico secundario, seguido de concentraciones locales de nitratos, boratos y material detrítico (**figura 70**)

Para el trabajo presente, en base a los resultados obtenidos del tratamiento de imágenes satelitales, uso de información bibliográfica (**Troncoso y Ercilla, 2016; Flahaut et al. 2016**), observaciones en terreno y junto con la información entregada por el análisis DRX, el salar presenta una distribución mixta y dominada por dos minerales evaporíticos, correspondiendo a halita y yeso, seguidos por otras sales sulfatadas, nitratos, boratos y junto con material detrítico.

A pesar de la corta estancia en terreno y la gran dimensión del salar, existieron zonas con anomalías de interés que no pudieron ser estudiadas, por lo que se enfocó principalmente en el sector central debido a la presencia de capas evaporíticas con características físicas diferentes entre sí, en base a su color, textura y extensión superficial, y que comparten similitudes frente a sus propiedades espectrales tanto en este sector como en la porción norte y sur del salar. Por otro lado, la ocurrencia de nitratos como la eugsterita y/o boratos como singenita, resultó ser escasa a diferencia de evaporitas como yeso y halita (**figura 72**).

Actualmente, la presencia de nitratos mantiene varias interrogantes respecto a su procedencia. Sin embargo, autores como **Ericksen, 1981**; establecen varias teorías sobre la ocurrencia de este tipo de sal, sugiriendo que, al tener en cuenta la configuración geológica de la cuenca, los nitratos presentes en la superficie del salar pudieron ser originados, como producto de la lixiviación de zonas de alteración hidrotermal, o bien, por desintegración de la flora y fauna bacterial del Cuaternario, de lo cual se podría entablar una relación con la presencia de tapetes microbianos en la subsuperficie de costra salina (**ver figura 39a**). No obstante, en la actualidad aún resulta ser desconocido.

Respecto a la existencia de las sales identificadas por el análisis DRX, y respaldado con las observaciones en terreno sobre las capas salinas, se logró interpretar como un resultado de la sobreimposición de capas evaporíticas con diferencias sus composiciones mineralógicas, teniendo un nivel enriquecido en sulfatos, cloruros, nitratos, boratos, material detrítico y que se mantiene cubierto localmente por capas evaporíticas enriquecidas en cloruros, siendo principalmente halita y entre otros minerales en cantidades subordinadas detectados en el análisis DRX.

Asimismo, la capa rica en cloruros ocurre de manera irregular y local en toda la superficie del salar, típicamente por sobre el nivel sulfatado de tonalidad parda-oscuro (**figura 69**). Sin embargo, estas variaciones mineralógicas estarían conformando un tipo de facies en común, lo cual es descrito en el sub-capítulo siguiente.

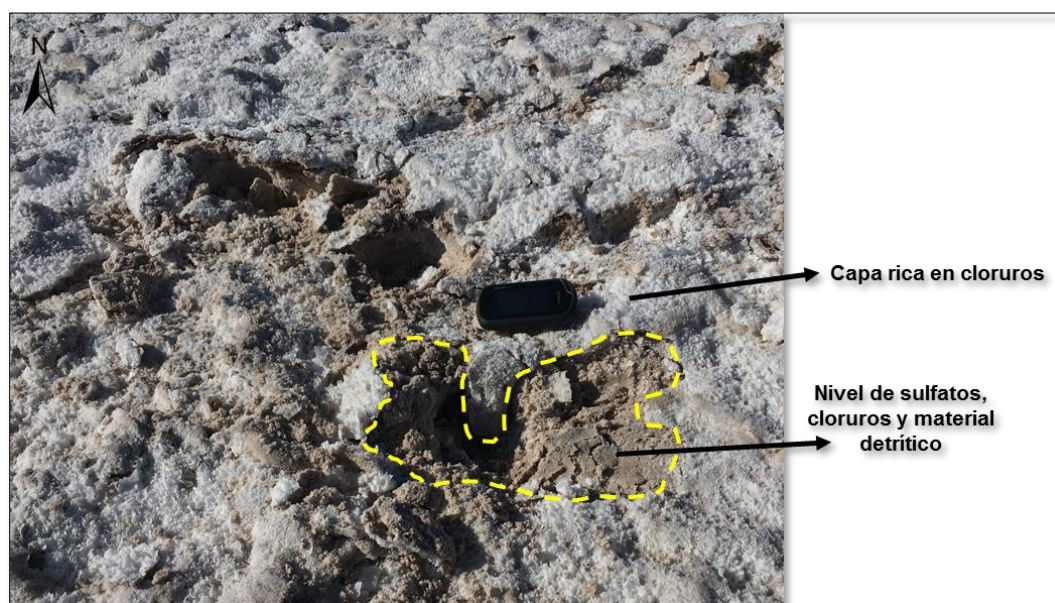


Figura 69. Visualización de las capas principales del sector centro-sur del Salar Aguas Calientes Sur. Delimitado en color amarillo, se reconoce el nivel enriquecido en sulfatos, cloruros y material detrítico, cubierto localmente en ciertas áreas del salar.

8.3 Modelos esquemáticos de la signatura deposicional de evaporitas primarias y secundarias

De acuerdo con el modelo propuesto por **Warren, 2005** y mostrado a continuación (**figura 70**), se ha podido asociar, a partir de las técnicas remotas utilizadas para el reconocimiento preliminar de sales evaporíticas, el uso de información bibliográfica basada en campañas históricas (**Risacher et al. 1999; Cochilco, 2013; Flahaut et al. 2016; Troncoso y Ercilla, 2016**) y junto con los datos de terreno y análisis en laboratorio, que el salar Aguas Calientes Sur muestra una mezcla entre minerales clorurados y sulfatados, principalmente halita y yeso, donde las facies de minerales más sulfatados, como yeso, se concentran preferentemente en el centro del depósito salino y al igual que en sus márgenes, mientras que las facies más

cloruradas se ubican principalmente en las porciones centrales del salar, siendo el caso de la halita. Asimismo, **Ericksen, 1981** y **Warren, 2005** sugieren que la ocurrencia de acumulaciones locales de boratos puede deberse a que correspondan a un producto de la actividad de procesos volcánicos desarrollados en la cuenca. Por consiguiente, y considerando que es el último tipo de sal que precipita (**Pueyo, 1991**) y que posiblemente se haya originado producto de la actividad volcánica, quedaría excluida del modelo propuesto debido a que este no incluye la precipitación de boratos, y que su enfoque recae exclusivamente en la generación de yeso y/o halita primaria y/o secundaria (**Warren, 2005**).

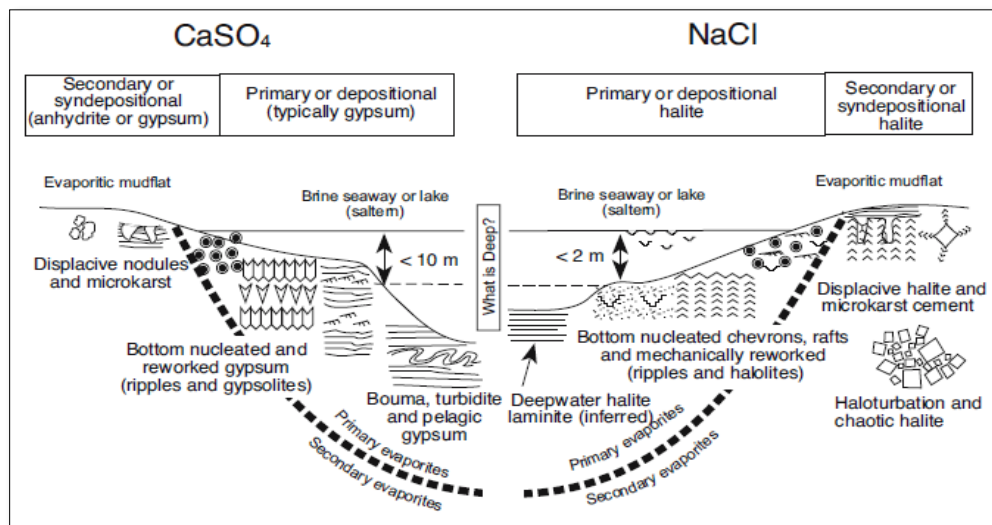


Figura 70. Modelo esquemático de la signatura deposicional de evaporitas primarias y secundarias para el yeso (CaSO_4) y la halita (NaCl). Tomado de Warren, 2005.

Sin embargo, retomando lo descrito en el **sub-capítulo 9.2**, resulta efectivo mencionar que el depósito salino no tiende a presentar una distribución homogénea respecto a las sales dominantes, sino que ambas se muestran mezcladas en casi la totalidad del salar, teniendo dos facies principales. Inicialmente, asignó una facies I de mayor distribución superficial, caracterizada por la ocurrencia de halita, yeso, nitratos, boratos y material detrítico, principalmente yeso y entre otros minerales de alteración, probablemente de origen hidrotermal (**figuras 71 y 72**).

La segunda facies, correspondiente a la facies II con menor extensión dentro del salar, se caracteriza por presentar un alto enriquecimiento en sulfatos (yeso,

blöedita, tenardita), concentraciones subordinadas de carbonatos, cloruros y material detrítico, comúnmente de origen volcánico y de alteración hidrotermal, cuya distribución ha resultado ser observada principalmente en los márgenes del salar y en zonas próximas a afluentes. Tales interpretaciones vienen a ser el resultado de observaciones realizadas por **Flahaut et al. 2016** e integradas con los datos obtenidos en terreno y muestras estudiadas por el análisis DRX. Como respaldo, se hizo uso del método de cocientes de bandas aplicado a la identificación de capas ricas en sulfatos.

Como bien se describió tanto en el **sub-capítulo 5.4**, la combinación RGB 567 para imágenes Landsat 8 OLI-TIRS y 7 ETM+ permite el reconocimiento de las superficies enriquecidas en cuerpos sulfatados (**Flahaut et al. 2016**), al igual que el uso del cociente de banda 5/7 para el mismo propósito, salvo que aplica para zonas ricas en sulfatos puros (**Amos and Greenbaum 1987; Mougnot et al. 1990; Mougnot, 1993; Flahaut et al. 2016**). Al aplicar el cociente de banda mencionado recientemente, y realizando una comparación con la imagen Landsat 8 OLI-TIRS sujeta a la combinación RGB 567 (**ver figura 28**), se observaron buenas correlaciones para la identificación de zonas enriquecidas en sulfatos y no mezclados con otro tipo de material, o, mejor dicho, en estado puro. No obstante, tales zonas responden a tonalidades anaranjadas rojizas, tanto para la combinación RGB 567 como para el cociente de banda 5/7 (**figura 71**), incluyendo también a los afluentes, emanaciones de aguas subterráneas y, por ende, las lagunas norte y sur del salar, influyendo en la determinación de las zonas de interés con abundancia en sulfatos (**figura 73**).

Por ello, para distinguir cada anomalía, al revisar todos los muestreos de costra salina en el salar, se asignó para la halita la tonalidad celeste para sectores enriquecidos con halita, junto con tonos verdosos que representan la mezcla entre yeso, halita, material detrítico y subordinadamente, nitratos y boratos, mientras que los sulfatos, carbonatos, nitratos, boratos y material detrítico responden a los colores verdosos. Por otro lado, los sectores enriquecidos en sulfatos, junto con concentraciones en carbonatos, cloruros y material detrítico, representan las

anomalías de tonalidad amarillenta a rojiza. Con estas interpretaciones, y de acuerdo con la clasificación de tipos de costras salinas realizada por **Flahaut et al. 2016**, la superficie del salar está compuesta de al menos 3 distintos tipos de costras, correspondiendo a las de tipo 3 y 4, principalmente.

La costra tipo 3 se caracteriza por ser mecánicamente susceptible a la erosión, seca, llegando incluso a ser polvorienta en algunos sectores, cuya composición mineralógica es heterogénea y conformada por diversos compuestos minerales. En esta costra, se observa la convivencia entre capas salinas y niveles subyacentes con material tipo arenoso a limoso, típicamente desde profundidades de 20-30 cm, de lo cual ciertos autores han sugerido que la superficie en esta costra se ha mantenido en una condición hinchada (“puffy”) debido a procesos de cristalización de sales en la franja capilar de la columna de agua y por eflorescencia (**Stoertz and Ericksen, 1974; Goodall et al. 2000**). Relacionando la clasificación de costras, junto con la ubicación de las muestras analizadas por DRX y la información dispuesta a continuación en las **figuras 71 y 72**, la costra tipo 3 vendría a asociarse con las áreas de tonalidades celeste-azuladas y verdosas, cuyas características físicas estudiadas tanto en terreno como con el uso de herramientas remotas, vienen a representar las propiedades descritas por **Flahaut et al. 2016**. Por tanto, al tener en cuenta los minerales dominantes detectados por el difractómetro, la costra tipo 3 representa a la facies I de halita, yeso, nitratos, boratos y material detrítico, cuya distribución recae en tonalidades celestes para la halita y colores verdosos para el resto de los minerales que conforman la facies.

En el caso de la costra tipo 4, viene a ser representada por una superficie suave, desde tonalidades grisáceas a blancas y que ocurren habitualmente en los márgenes de los afluentes y lagunas, registradas tanto en este salar como en la Laguna Tuyajto y el salar de Quisquiro. Se caracterizan por la presencia de aguas subterráneas con nivel freático somero, llegando a emanar hacia la superficie (**Stoertz and Ericksen, 1974**), junto con el desarrollo de capas ricas en yeso que culminan el desarrollo de este tipo de costra en los márgenes de los afluentes y

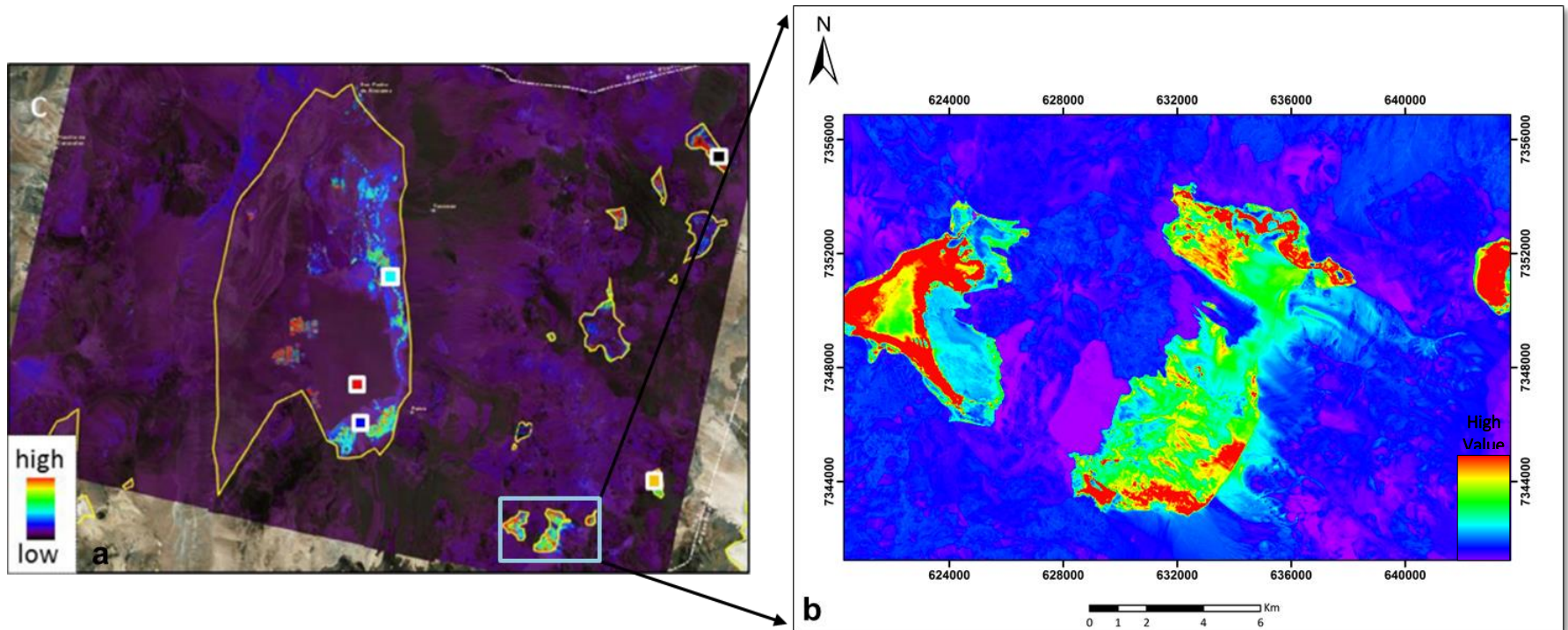


Figura 71. (a) Aplicación del cociente de banda 5/7 en una imagen Landsat 8 OLI-TIRS para la detección de superficies evaporíticas enriquecidas en sulfatos, cuyos valores más altos se encuentran identificados desde tonalidades verdosas a rojizas. Tomado de Flahaut et al. 2016. (b) Mapa de distribución de minerales evaporíticos sujeto al cociente de banda 5/7, aplicado en una imagen Landsat 8 OLI-TIRS. Utilizando los mismos criterios aplicados por Flahaut et al. 2016, las tonalidades rojizas presentan la facies con alto enriquecimiento en sulfatos, cloruros y material detrítico en la superficie, mientras que las zonas desde tonalidades amarillentas a celestes representan a la facies de mayor distribución superficial, con menor contenido en yeso a diferencia de la primera facies, halita, nitratos, boratos y material detrítico.

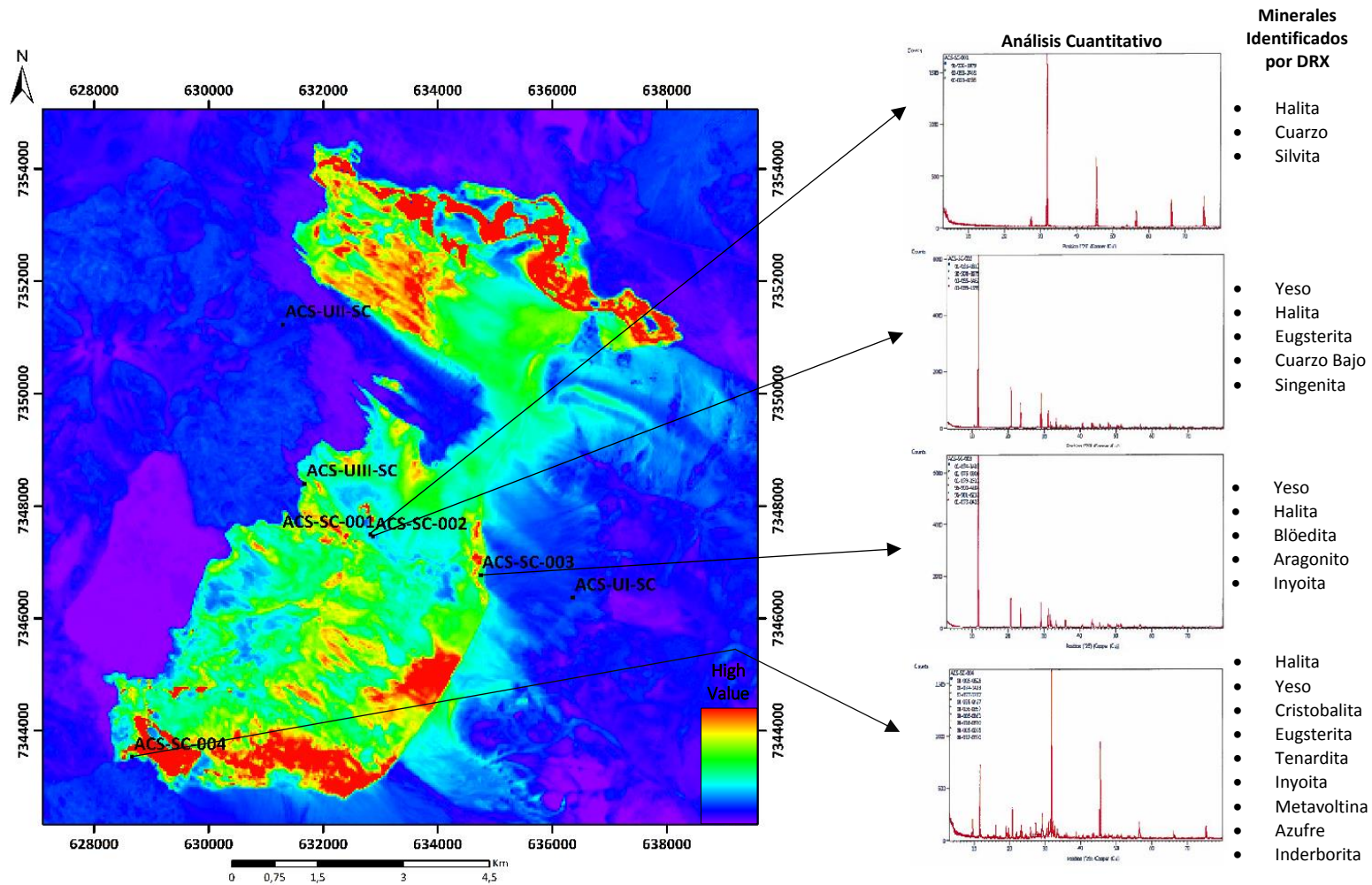


Figura 72. Mapa espectral integrado con el uso del cociente de banda 5/7 en la imagen Landsat 8 OLI-TIRS y la información de los análisis DRX aplicados en las muestras de costra salina obtenidas en terreno, puntualmente en el sector centro-sur y sur del salar Aguas Calientes Sur. A la derecha, se aprecian los resultados del análisis cuantitativo en el difractómetro, arrojando los minerales dominantes para cada muestra estudiada.

lagunas. Según las **figuras 71 y 72**, Las anomalías que comparten tales características vienen a ser aquellas con tonalidades amarillentas a rojizas, considerando que tanto los afluentes como lagunas presentan un valor tan alto como lo que entregan las zonas enriquecidas en sulfatos (**figura 73**). Por tanto, la costra tipo 4 vendría a representar la facies II, conformada por el predominio de sulfatos, carbonatos, cloruros y material detrítico, comprendiendo sectores con menor extensión a diferencia de la primera facies y su tipo de costra.

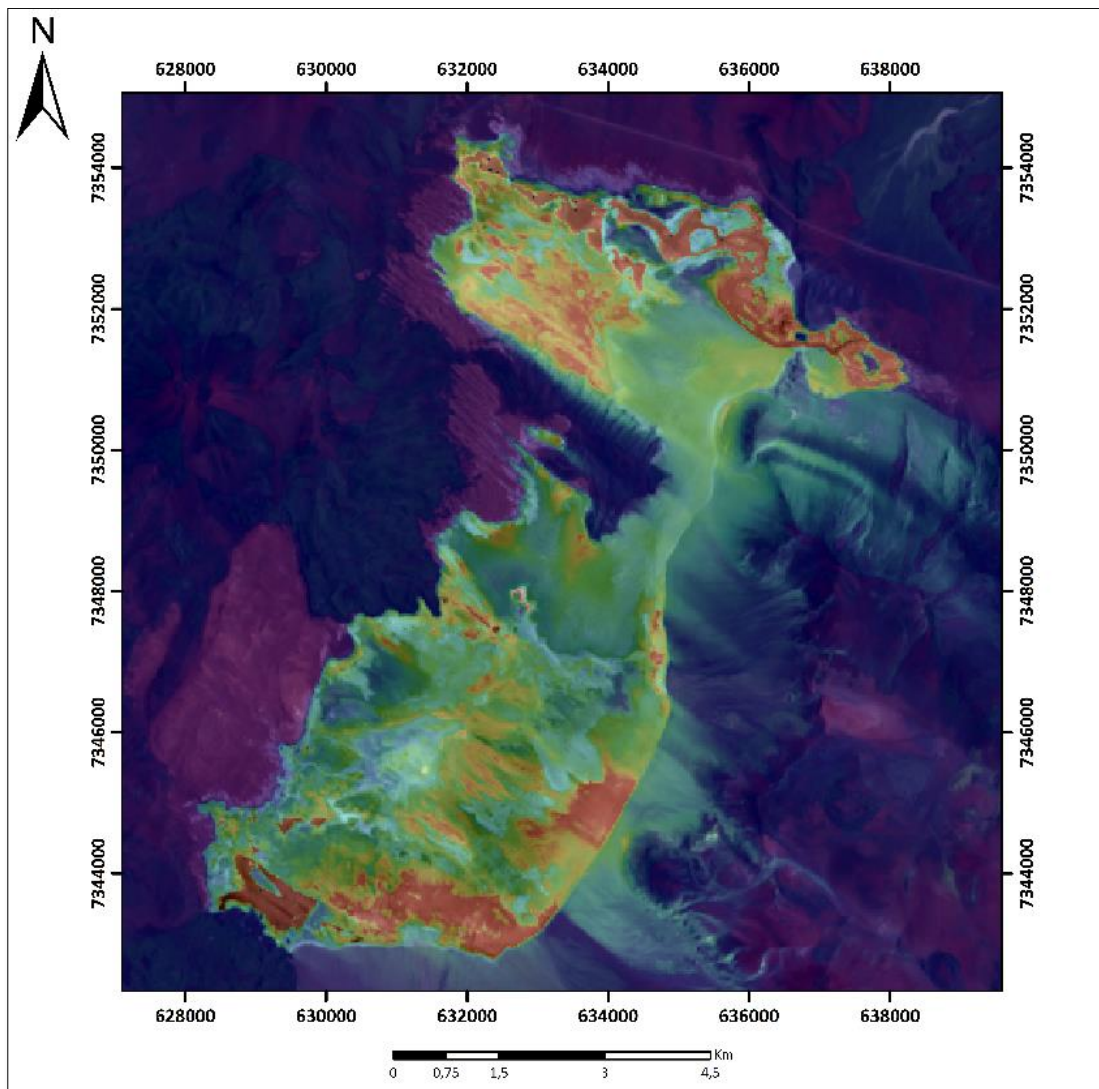


Figura 73. Mapa de integración entre el cociente de banda 5/7 aplicado a la imagen Landsat 8 OLI-TIRS y la imagen original del área de estudio, enfatizando los sectores de lagunas y afluentes, los cuales contendrían sectores locales con alto enriquecimiento en sulfatos.

Por consiguiente, de acuerdo con los mapas mostrados anteriormente, se ha propuesto el siguiente modelo piloto de distribución de las facies evaporíticas (figura 74).

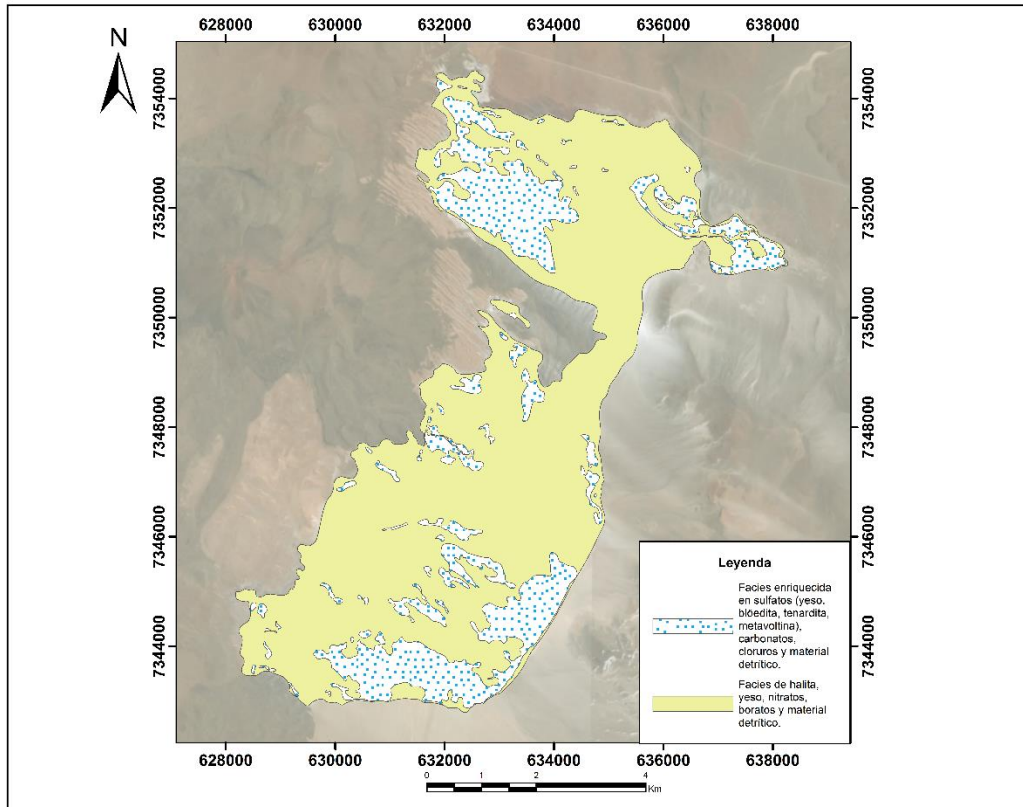


Figura 74. Modelo piloto de distribución de las facies evaporíticas del salar Aguas Calientes Sur.

Asimismo, al tener en cuenta los datos cuantitativos del análisis DRX (ver figura 72), las muestras ACS-SC-001 y ACS-SC-002 arrojan principalmente halita y yeso, respectivamente, cuya ubicación vienen a ser zonas con anomalías de tonalidad celeste, considerando también la presencia de nitratos como eugsterita y singenita (boratos) en estas superficies.

A pesar de las propuestas de facies asociadas a la existencia de diversas costras salinas y su mineralogía correspondiente, estas fueron llevadas a cabo a partir de una baja densidad de muestreo dentro del salar y en sus márgenes, lo cual se debió a la corta estancia en terreno y dificultad de acceso hacia algunas áreas, específicamente en aquellas donde los niveles freáticos eran lo suficientemente someros. Debido a esto, se recurrió al estudio de las firmas espectrales en los

pixeles que contienen a los puntos de muestreo realizados para esta investigación (**figura 75**), de tal forma que se pudiese observar un grado de homogeneidad en los alrededores del punto de muestreo, siguiendo la mineralogía registrada por el análisis DRX. Esto también permitió la correlación de algunos sectores con la superficie de otras lagunas y depósitos salinos, como es el caso del salar de Capur, ubicado hacia el oeste del salar de estudio y la laguna Tuyajto, ubicada hacia el noreste y ambos próximos al salar Aguas Calientes Sur.

Inicialmente, se analizaron las firmas espectrales en la imagen sujeta al cociente de banda 5/7 y superpuesta a la imagen Landsat original, de tal forma que la firma espectral que se esté observando corresponda, en otras palabras, a la firma verdadera del área analizada. En la zona que contiene a las muestras ACS-SC-001 y ACS-SC-002, se tuvo una muy buena correlación entre la firma espectral del pixel de estudio y la halita y yeso (**figuras 76 y 77**), cuya distancia entre ellas no superaba los 100 mt.

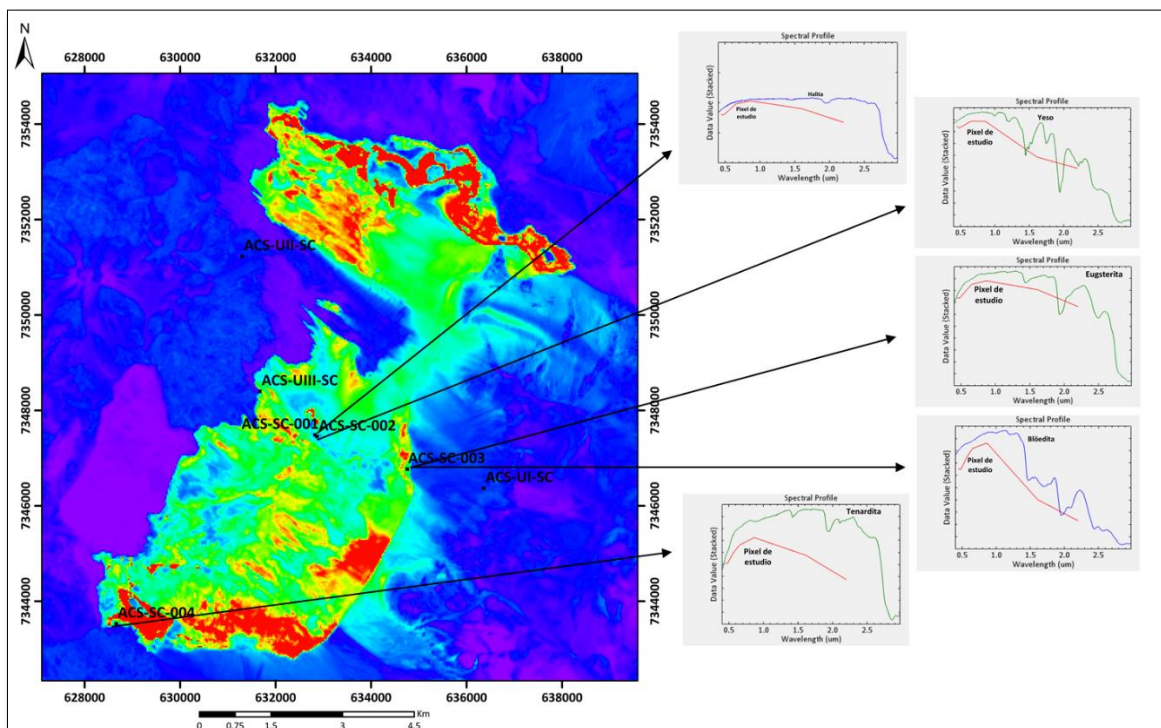


Figura 75. Mapa de integración entre la imagen Landsat sujeta al cociente de banda 5/7 y el estudio de las firmas espectrales de cada punto de muestreo.

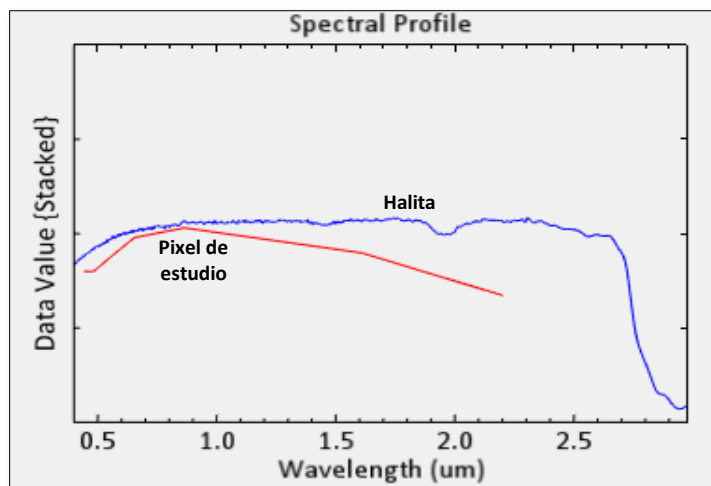


Figura 76. Análisis de firmas espectrales entre el pixel de estudio en que se obtuvo la muestra ACS-SC-001 y la firma espectral de la halita.

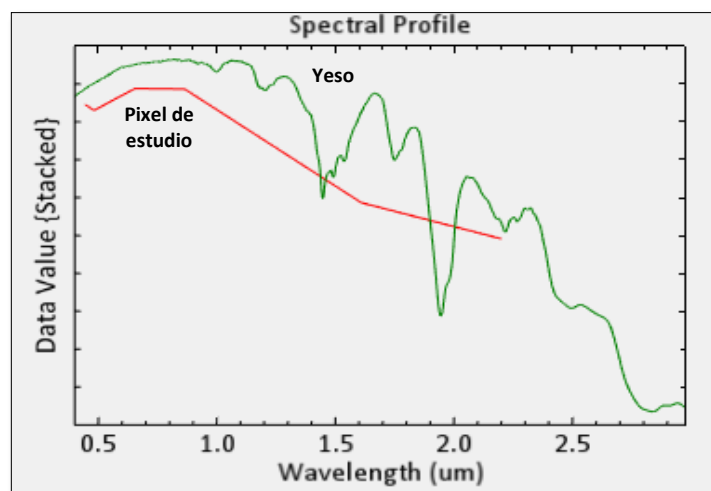


Figura 77. Análisis de firmas espectrales entre el pixel de estudio en que se obtuvo la muestra ACS-SC-002 y la firma espectral del yeso.

Asimismo, la característica de la firma espectral también arrojó una buena tendencia con la firma de la eugsterita (**figura 78**), salvo que minerales como la singenita, metavoltina, inderborita e Inyoita (**ver figura 72**) no lograron ser incluidos en esta corroboración debido a que sus firmas espectrales se mantienen excluidas de las bibliotecas espectrales utilizadas dentro de la metodología de investigación.

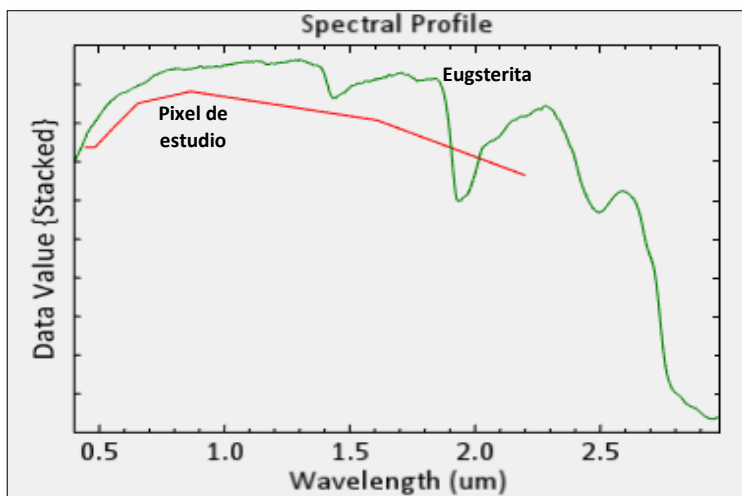


Figura 78. Análisis de firmas espectrales entre el pixel de estudio en donde se obtuvo la muestra ACS-SC-003 y la firma espectral de la eugsterita.

Siguiendo hacia el margen oriental del salar, en la zona donde se obtuvo la muestra ACS-SC-003, la firma espectral del pixel se correlaciona fuertemente con yeso y/o anhidrita, mientras que para la blöedita se observó un muy buen comportamiento entre ambas signaturas (**figura 79**).

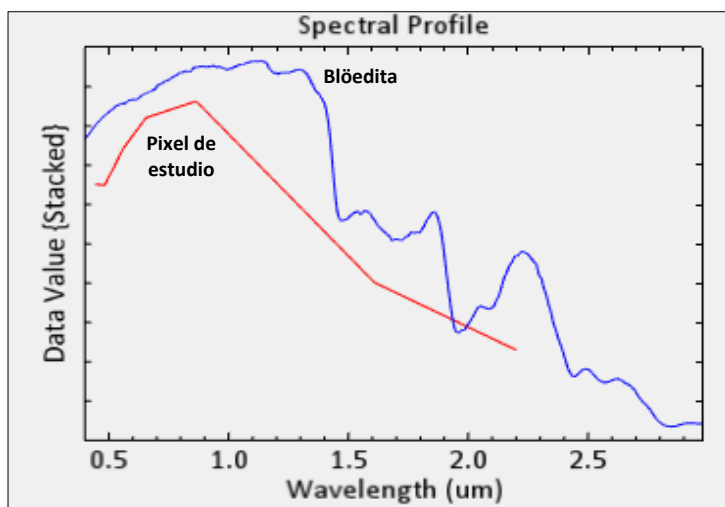


Figura 79. Análisis de firmas espectrales entre el pixel de estudio en donde se obtuvo la muestra ACS-SC-003 y la firma espectral de la blöedita.

Finalmente, la muestra ACS-SC-004 mostró una buena relación para la thenardita (**figura 80**), considerando también la buena ocurrencia de minerales como azufre con el uso de la probabilidad SAM.

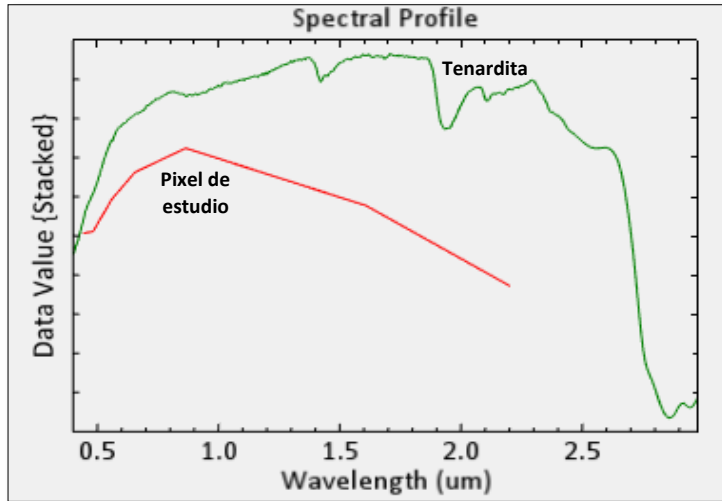


Figura 80. Análisis de firmas espectrales entre el pixel de estudio en donde se obtuvo la muestra ACS-SC-004 y la firma espectral de la tenardita.

Comparando la respuesta espectral entre el salar de estudio y las formaciones evaporíticas ubicadas de manera próxima a este, se estudió la firma espectral de la superficie salina del salar de Capur y los márgenes de la laguna Tuyajto, entregando una excelente correlación tanto a los pixeles de estudio como frente al mineral analizado, correspondiente al yeso (**figura 81**).

Con ello, queda demostrado bajo las técnicas remotas que ambos depósitos evaporíticos, incluyendo al salar Aguas Calientes Sur, tienden a presentar una superficie similar en ciertos sectores, lo que aumentaría la probabilidad de encontrar en terreno tal tipo de minerales.

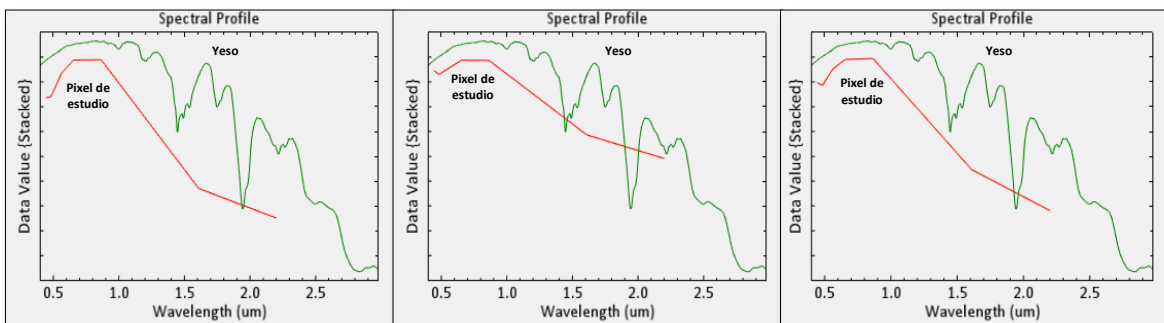


Figura 81. Análisis comparativo entre las firmas espectrales de las superficies salinas del salar de Capur (perfil izquierdo), salar Aguas Calientes Sur (perfil central) y laguna Tuyajto (perfil derecho).

Como rasgo relevante, la muestra ACS-SC-003 (**figura 82**), a diferencia de las muestras ACS-SC-001 y ACS-SC-002, se encuentra ubicada en un sector con anomalías entre tonalidades amarillentas y rojizas, siendo próximo a un manantial estudiado tanto en este trabajo como en campañas anteriores (**Troncoso y Ercilla, 2016**).

Para el caso de la muestra ACS-SC-004, esta fue obtenida en los márgenes del salar, dentro del sector sur y cuya anomalía comprendía tonalidades celestes, principalmente. En terreno, la configuración geológica del sector constaba en una cobertura de material aluvial, de composición principalmente volcánica y con evidencias de material producto de actividad hidrotermal, como es el caso del azufre coexistiendo con las sales del margen sur del salar (**ver figura 72**).

A pesar de que las cantidades de azufre vistas en terreno lograban ser apreciadas como trazas y detectadas por el análisis DRX, su tonalidad y convivencia con las sales presentes permitió relacionar estos sectores con el afluente principal del sector centro-sur del salar, en el cual se habían observado tonalidades amarillentas tanto en el sedimento que contenía a las sales eflorescentes como en ellas mismas (**ver figura 39**), salvo que, a diferencia del sector sur, el sector centro-sur presentaría acumulaciones más bajas y probablemente, por actividad orgánica.



Figura 82. Zona de obtención de la muestra de costra salina ACS-SC-003, estando próxima a un manantial. Sector centro-sur del salar, margen oriental.

En el sector sur, se observaron varios afloramientos de sales con la presencia de azufre y de material producto de alteraciones hidrotermales como sílice oquerosa (**figura 83**). Para correlacionar la información anterior, se realizaron análisis espectrales en la zona de extracción de la muestra ACS-SC-003 para verificar la ocurrencia de azufre, arrojando valores de SAM entre 67 y 79% y ponderaciones entre 0,97 y 1,172, respectivamente.



Figura 83. (a) Identificación de azufre coexistiendo con las capas salinas y material aluvial en el margen del salar Aguas Calientes Sur, sector sur. (b) Identificación de rodados de sílice oquerosa y clastos de rocas impregnadas con azufre en el margen del salar, sector sur.

Considerando que hubo detección de azufre en la muestra ACS-SC-004 por el análisis DRX, es posible que tanto las ponderaciones como las probabilidades de ocurrencia del azufre se deban a su concentración en volumen en la superficie.

Asimismo, de acuerdo con los minerales evaporíticos descritos a partir de los trabajos hechos en terreno y análisis en laboratorio, la distribución evaporítica dentro de la superficie podría deberse a un proceso de precipitación tipo Primavera-Verano (**Pueyo, 1991**), basado en una precipitación secuencial de carbonatos-sulfatos-cloruros, de la cual, asociando las características mineralógicas del salar Aguas Calientes Sur, la precipitación del yeso ocupa una extensión mayor a diferencia de la halita, cuya ocurrencia, sin que exista mezcla entre ella y otras sales, se lleva a cabo en sectores muy acotados.

Comparando la información descrita en las páginas anteriores y el modelo propuesto por **Pueyo, 1991**; la precipitación es similar, pero no exacta, debido a que en las muestras de costra salina se han encontrado concentraciones de halita dentro

de una zona más rica en sulfatos, seguido de la presencia de nitratos y boratos dentro del salar, cuya ocurrencia según **Pueyo, 1991** debería ser posterior a la precipitación de los minerales evaporíticos principales.

Nuevamente en el margen oriental, la muestra ACS-SC-003 presentó un enriquecimiento mayor en yeso que en otras sales, presentando también una leve concentración de aragonito (**ver tabla 5 y figura 72**), lo cual se corrobora con los resultados de análisis DRX realizados por **Flahaut et al. 2016**, cuya información arroja la presencia de carbonatos como calcita y sulfatos con cantidades menores en cloruros, y que de acuerdo con las observaciones vistas en terreno, existen capas altamente cloruradas por sobre los niveles más sulfatados, siendo los cloruros, como la halita, aquellas sales que culminan la superficie en algunos sectores, principalmente en la porción centro-sur del salar.

Por lo cual, siguiendo la secuencia de precipitación propuesta por **Pueyo, 1991**; se sugiere que la facies II, enriquecida en sulfatos, podría presentar concentraciones relictas de carbonatos, marcando un nivel más antiguo de precipitación comparado con los minerales evaporíticos presentes en la facies I. No obstante, para validar esta hipótesis, debe ser necesario la realización de muestreos de costra salina que abarquen la mayoría de las anomalías que vienen a representar la facies II.

Por otro lado, la muestra ACS-SC-002 presentaba leves concentraciones de nitratos (eugsterita) y boratos (singenita) en comparación a un enriquecimiento mayor en sulfatos (yeso). A esto, se le suma la observación de una capa altamente enriquecida en halita (**figura 42**) que cubre localmente a la capa rica en yeso, material detrítico, nitratos y boratos. Con ello, también es sugerible que, posiblemente hacia el núcleo del salar exista más de un evento de precipitación de sales, posiblemente controlado por los eventos de precipitación principales durante el año desde el momento de la génesis del salar.

Sin embargo, estas últimas interpretaciones requieren de un estudio hidrogeológico de mayor detalle y si es posible, realizar estudios de los primeros metros de costra salina.

8.4 Características morfológicas de la superficie salina

Entre otras características, algunas de las morfologías que presenta el salar Aguas Calientes Sur resultan estar incluidas dentro del modelo propuesto por **Jones & Deocampo, 2003** (ver figura 63), como es el caso de las grietas de desecación o *evaporite mudflats*, las cuales han sido registradas principalmente en los márgenes del salar (figura 84).



Figura 84. (a) Identificación de grietas de desecación en el margen occidental del salar Aguas Calientes Sur. (b) Identificación de grietas de desecación en el afluente principal del sector centro-sur del salar.

Asimismo, de acuerdo con lo propuesto por **Gajardo, 2014** y según la mineralogía registrada por análisis DRX desarrollado en campañas anteriores (**Troncoso y Ercilla, 2016; Flahaut et al. 2016**), se tiene una composición predominantemente sulfatada, siendo un rasgo distintivo respecto a los depósitos salinos enriquecidos principalmente por boratos (**figura 85**). Esto se debe a que, a la altura de la Cordillera Andina, existen solamente algunos salares con altas concentraciones de boratos producto de la actividad volcánica de edad Oligoceno-Reciente y/o geotermal del depósito salino, como es el caso del salar de Surire y salar Ascotán (**Chong et al. 2000**). Para el caso del salar de estudio, las proporciones de boratos son mínimas, pero cuya ocurrencia es de origen predominantemente volcánico.

Por otro lado, se tiene la alta probabilidad de encontrar minerales arcillosos que comprenden casi toda la superficie salina, correspondiendo principalmente a aluminosilicatos enriquecidos en Mg, K, Si, Al y SO_4 , cuya proveniencia puede deberse a la alteración de minerales como plagioclasa, biotita, hornblenda y vidrio

volcánico. Este último se mantiene en énfasis por su alta concentración en las rocas de composición andesítica, dacítica y rocas ignimbríticas, donde la cristobalita viene a ser un producto típico de la alteración hidrotermal de vidrio volcánico (Maksaev, 2001), cuya ocurrencia fue detectada por el análisis DRX a partir de la muestra ACS-SC-004 (ver figura 72).

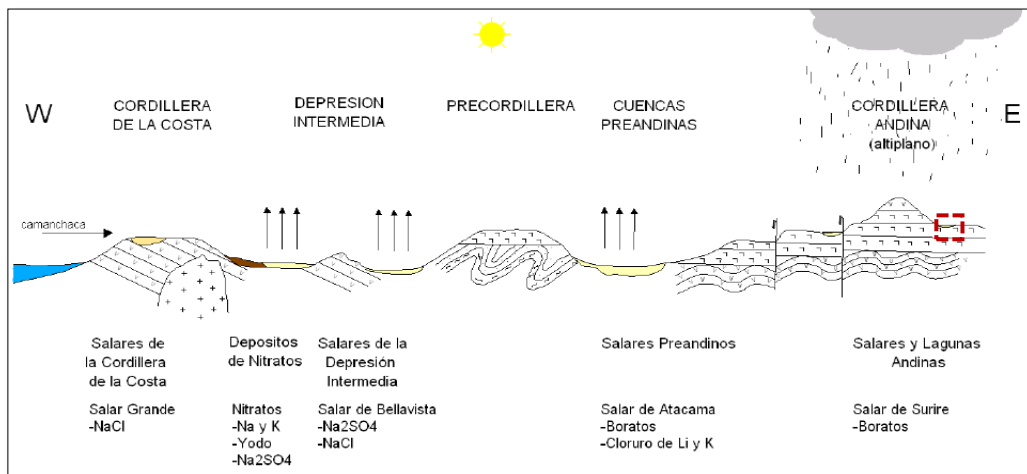


Figura 85. Perfil esquemático geomorfológico de los depósitos salinos del norte de Chile. Área de estudio delimitada en color rojo. Tomado de Gajardo, 2014.

Sin embargo, la distribución espacial de estos productos de alteración es tal que sería imposible aseverar que el agente eólico corresponde al único factor influyente, por lo cual se propuso que el aporte de material detrítico (ver subcapítulos 8.2 y 8.3), podría haber sido generado principalmente por acción gravitatoria desde las cumbres más altas de la cuenca (Cerro Médano, Cerro Morchota, Cerro Tuyajto y Cerro Purichari), en las cuales se habrían acumulado altos volúmenes de material tanto volcánico como la alteración de carácter hidrotermal de estos, mientras que para las sales evaporíticas presentes en la facies I, de acuerdo a la figuras 71 y 72, estas se muestran distribuidas en forma de lenguas que rodean y abarcan parte de las unidades geológicas I y VI, por lo que se interpretó como un posible transporte de las sales gracias a la acción eólica con dirección preferencial noroeste (Das et al. 1998).

A pesar de las limitaciones del trabajo presente, se logró validar esta información con el uso de la técnica *Decorrelation Stretch* y de manera preliminar realizando un

análisis espectral en el sector sur del salar con extensas superficies de origen aluvial, detectando predominantemente la presencia de caolinita, dickita, montmorillonita, chabasita, pirofilita, arsenopirita y anhidrita. Todas ellas se encontraban con probabilidades en SAM entre 0.729 y 0.881 (ver figura 68).

Como observación, el método de análisis espectral puede tener un margen de error no menor, pero en torno a la identificación de minerales, este fue efectivo al momento de realizar ensayos tanto en zonas acuosas como en zonas rocosas, donde el agua no mostró ningún índice de ocurrencia para minerales (tabla 6).

Análisis Espectral Laguna Norte		
Minerales	Ponderación	SAM (%)
Zircón	0.214	0.000
Zincita	0.214	0.000
Wollastonita	0.214	0.000
Witerita	0.214	0.000
Vesuvianita	0.214	0.000

Tabla 6. Análisis espectral realizado en dos puntos dentro de la laguna norte del salar Aguas Calientes Sur. Coordenadas: UTM WGS84 (19H) 632457-7354004; 633088-7353556.

Al revisar los resultados vistos en dos pixeles aleatorios dentro de la laguna norte del salar, se registró la primera evidencia de que el método discrimina entre los elementos sólidos y acuosos, lo cual permitió la conservación de las interpretaciones sugeridas anteriormente.

Sin embargo, el tipo de imagen satelital utilizada tuvo una respuesta espectral que podría acentuarse con el uso de sensores que muestren una mejor resolución en tiempo real, siendo para el caso de la imagen Landsat 8 una toma realizada en el año presente durante el mes de mayo.

En otras palabras, para obtener un patrón más fidedigno en firmas espectrales, se debería realizar un análisis individual de cada mineral y de manera ideal, con un sensor remoto con resolución mayor a la de Landsat 8 OLI-TIRS, como es el caso de las imágenes hiperespectrales Hyperion, Sentinel o mejor aún, WorldView -3, siendo el sensor con mayor precisión a escala mundial y caracterizado por presentar una resolución de 31 cm. Sin embargo, estas imágenes tienen un alto costo y resulta ser altamente complejo poder acceder a ellas de manera pública.

8.5 Influencias por parte de la hidroquímica en las vertientes y lagunas del salar

A partir de la información recopilada y sintetizada de los datos físicoquímicos e hidroquímicos obtenidos por **Troncoso y Ercilla, 2016** y **Risacher et al. 1999**, y junto con algunos parámetros físicoquímicos tomados en terreno, se realizó un enfoque principalmente en las líneas evolutivas de cada sector muestreado y junto con la información espectral y mineralógica de aquellos sectores y de las unidades geológicas presentes, se interpretaron posibles conexiones sobre la hidroquímica de las aguas que conforman el salar.

A modo de introducción, dentro de los muestreos históricos en el área, las aguas obtenidas tanto en vertientes como en las lagunas norte y sur del salar se han clasificado predominantemente como cloruradas-sódicas, cuyas vías evolutivas son principalmente sulfatadas-neutras (**Risacher et al. 1999; Troncoso y Ercilla, 2016**), junto con vías evolutivas locales de carácter cálcico. Por otro lado, las vertientes como sub-fuentes alimentadoras provienen de las emanaciones desde fracturas ignimbríticas, principalmente, de las cuales, en el sector norte del salar, se han registrado temperaturas de 28,3 (ACT-RT-003) hasta incluso 33°C hacia el este del salar, siendo descritas como vertientes termales.

A pesar de que sus temperaturas no marquen indicios suficientes de una posible actividad geotermal en la zona, se tiene el registro de centros volcánicos activos actualmente, hacia el sur y norte desde la posición del salar (ejemplos como el volcán Láscar, próximo al salar Aguas Calientes Centro), pudiendo tener una posible isoterma de baja temperatura que abarque el centro de la cuenca de estudio. Sin embargo, se requiere un estudio aplicado a la búsqueda y evaluación de posibles fuentes geotermales en profundidad.

Asimismo, existe otra evidencia que podría avalar esta información, retomando nuevamente las descripciones petrográficas de las unidades geológicas yacientes en la cuenca. Para las rocas andesíticas y dacíticas, se han identificado,

ocasionalmente, rellenos de montmorillonita y/o cristobalita en vesículas, y comúnmente, alteraciones de olivino a iddingsita (**Gardeweg & Ramírez, 1982**).

Estos minerales de alteración se caracterizan por ser más susceptibles a ser lixiviados por el curso de aguas subterráneas, por lo cual cabría de esperar que el aporte de elementos mayoritarios provienen de una alteración en profundidad en las rocas volcánicas que circundan el salar, y de acuerdo con lo propuesto por (**Warren, 2005**), la meteorización de este tipo de litología aporta comúnmente con 0.1 a 0.6 [g/l] en componentes iónicos a las aguas de entrada, las cuales son eventualmente infiltradas por el terreno.

Petrográficamente, las unidades geológicas descritas a escala microscópica como andesitas de piroxeno y andesitas de biotita se caracterizaban por presentar fenocristales de plagioclasa con alteraciones locales a sericita y piroxenos moderadamente fracturados, junto con fenocristales de biotita alterados pervasivamente a óxidos de hierro.

Para ambas rocas, la masa fundamental presenta altas concentraciones de zeolita reemplazando vidrio volcánico y relleno vesículas (**figura 86**), por lo que se interpretó como una primera evidencia de alteración, posiblemente producto de procesos de alteración hidrotermal en las últimas etapas de actividad volcánica dentro de la cuenca Salar Aguas Calientes Sur. Por consiguiente, es de esperar que las rocas volcánicas que subyacen al salar puedan presentar alteraciones más notorias y con mayor diversidad de minerales producto de reemplazos hidrotermales. Retomando las características hidroquímicas del salar, es posible que, dentro de ciertos períodos de tiempo, las lagunas norte y sur pudieron haber variado en su hidroquímica respecto a las variaciones estacionales en la zona altoandina, particularmente por los eventos de precipitación generados en el invierno boliviano durante los meses de Diciembre y Marzo, lo cual influiría a largo plazo en las columnas de agua actuales y por ende, en la distribución de material evaporítico y en la hidroquímica de las aguas que emanan desde las vertientes (se evidencia en el sector suroeste y noreste del salar) y en terrenos pantanosos o

sectores ricos en tapetes microbianos que coexisten con las lagunas dentro del depósito salino (Demergasso *et al.* 2003).

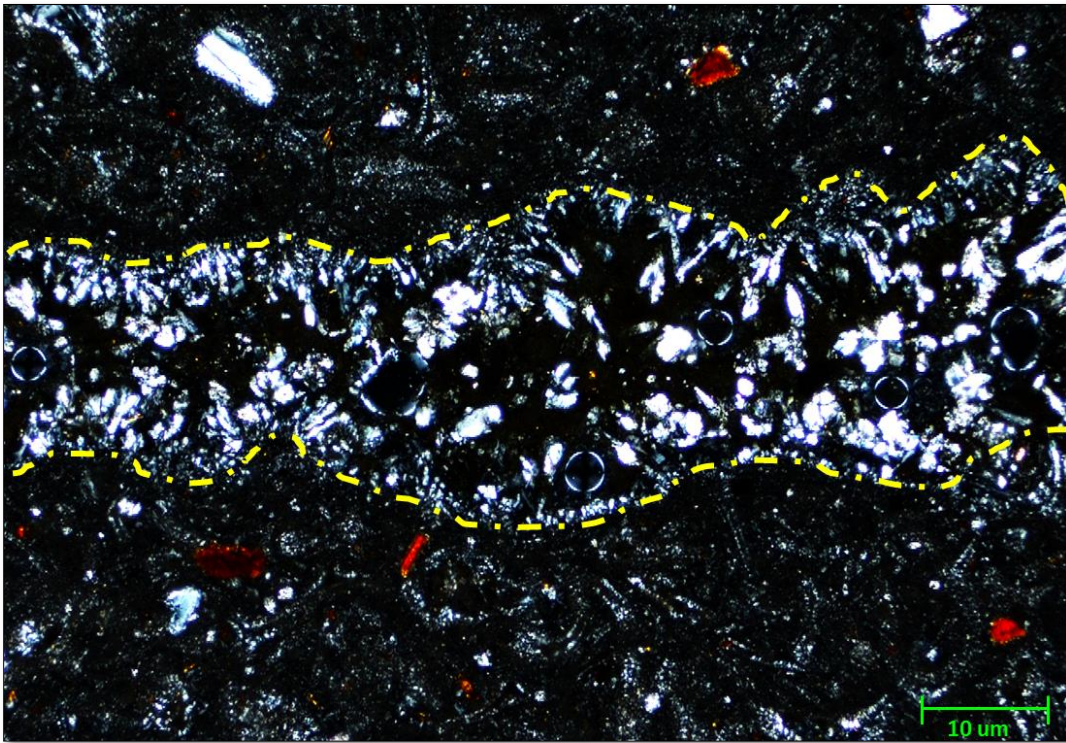


Figura 86. Microfotografía con Luz Polarizada Cruzada (LPX) de la muestra ACS-UI-SC, donde se identifica un relleno de zeolita, junto con la presencia de cristales de biotita alterados pervasivamente a óxidos de hierro. Clasificación: Andesita porfídica de biotita. Microscopio: Nikon Eclipse LV100POL. Objetivo 5x.

Como registro, se conoce que el salar recibe un aporte en precipitaciones anuales de 150 [mm/año] (Risacher *et al.* 1999), y, aun así, en depósitos salinos tipo playa como Aguas Calientes Sur, las tasas de evaporación deberían mantenerse equilibradas con la entrada de precipitación (Rosen, 1994). Pero, si se mantuvieran, uno esperaría encontrar un nivel constante en los sectores con eflorescencia de sales.

Respecto a esto, se tiene evidencia por parte de las observaciones realizadas por Troncoso y Ercilla, 2016 en los márgenes del salar, ubicándose en afloramientos de rocas ignimbríticas, donde se identificó una capa de costra salina con sales eflorescentes a simple vista.

Sin embargo, en la imagen que representaba tal información no traía consigo sus coordenadas como para revisar por vía remota la evidencia entregada por los autores, pero bastó con revisar una imagen satelital por vía Google Earth para identificar evidencias de capas de costra salina cubriendo los afloramientos ignimbríticos que delimitan el salar en el extremo norte (**figura 87**).



Figura 87. Identificación de costras salinas cubriendo una porción de la plataforma ignimbrítica que delimita uno de los extremos de la laguna norte. Fuente: Google Earth Pro.

De manera hipotética, se podrían interpretar como paleoniveles de la superficie de costra salina del salar (**Troncoso y Ercilla, 2016**), que, con el tiempo, las posibles variaciones en los niveles freáticos de la cuenca, variaciones climáticas y por ende cambios en la tasa de evaporación, conllevaron a la reducción superficial del depósito. Asimismo, hacia el noreste desde la identificación de costras salinas, se observó un pequeño afloramiento de dimensiones de 2,5 m², en el cual se realizó un análisis espectral para identificar los minerales dominantes (**figura 88**). Los resultados fueron interesantes, puesto que se tuvo minerales con buena probabilidad de ocurrencia como la anhidrita (SAM: 0.744, Ponderación: 0.977), calcita (SAM: 0.796, Ponderación: 1.078), dickita (SAM: 0.752, Ponderación: 1.232), alunita (SAM: 0.740, Ponderación: 1.232), halita (SAM: 0.728, Ponderación: 1.015) y yeso, pero con baja probabilidad de ocurrencia (SAM: 0.636, Ponderación: 0.962).

En las firmas espectrales, se identificó un buen patrón para la calcita y anhidrita, principalmente, salvo que la firma del pixel de estudio ubicado en la porción central del afloramiento tenía más correlación con la calcita a pesar de que esta se haya mostrado con baja probabilidad de ocurrencia.

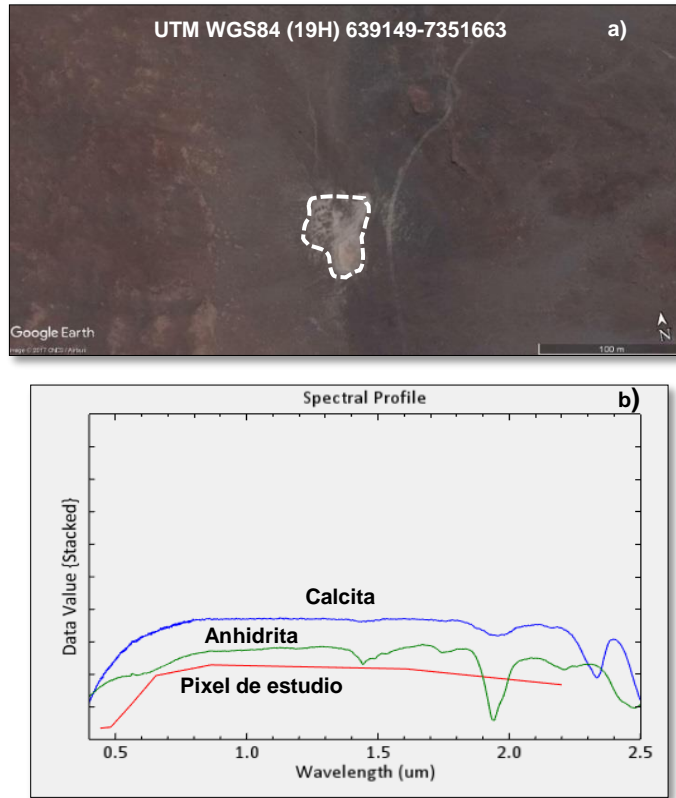


Figura 88. (a) Identificación de afloramiento de posibles minerales evaporíticos. (b) Estudio de firmas espectrales para la calcita y dolomita respecto al pixel de estudio (UTM WGS84 (19H) 639149-7351663). Fuente: ENVI Standard 5.3.

En base a estas evidencias, se podría sostener lo que **Troncoso y Ercilla, 2016** intentaron relacionar como un posible retroceso del salar. Sin embargo, tanto este punto como los sectores con evidencias de posibles paleoniveles no lograron ser chequeados durante la visita a terreno debido a la limitación en tiempo a disposición.

Según **Wood & Sandford, 1990**; la razón entre los flujos subsuperficiales y los flujos de entrada, correspondiendo en este caso a los eventos de precipitación, bien conocida como “Relación de Fuga”, puede generar un efecto sustancial en la precipitación de minerales evaporíticos y, por ende, en el fraccionamiento de solutos, retrasando el desarrollo de la salinidad (**Wood & Sandford, 1990**) y

complementando esta afirmación, dentro de un sistema con fugas, asociadas a emanaciones de vertientes, la razón de pérdida de solutos puede ser más rápida que la contribución de estos debido a la meteorización, por lo que la química de las aguas se encontraría dominada por la tasa de precipitación en la cuenca (**Bowler, 1986**).

Por otro lado, según lo propuesto por **Grilli et al. 1986**, se indica que la humedad relativa dentro de un sistema varía en torno a la temperatura ambiente, teniendo condiciones de humedad relativa más altas frente a un descenso de temperatura, y viceversa; debido a que si se tiene un aumento de la temperatura ambiente, teniendo en cuenta un valor constante en la concentración de humedad, se tendrá un aumento en la capacidad máxima de agua que puede soportar la masa de aire, conllevando a una saturación. De ello, **Grilli et al. 1986** asocian tales características a la permanencia en solución de las sales producto de altas condiciones de humedad relativa, mientras que, al tener un menor índice de humedad relativa, se produce la precipitación de las sales evaporíticas.

Con ello, la disolución y permanencia en estado cristalino de las sales distribuidas en el salar podrían deberse a cambios en las condiciones climáticas del sector frente a las fluctuaciones de temperatura y eventos de lluvias intensas producto del Invierno Boliviano y Altiplánico. Sin embargo, para reafirmar estas nuevas teorías, se requiere de un estudio hidrogeológico basado en la toma de muestras de agua con un período de tiempo previamente definido, una cantidad limitada de material a analizar y, por último, que se tenga un punto de muestreo en común para su posterior análisis.

A modo de ejemplo, durante la campaña realizada por **Risacher et al. 1999**, la muestra AC3-4 (UTM WGS84 (19H) 632875-7354250) detectó un valor en TSD de 25.032 [mg/l], mientras que una toma más reciente realizada por **Troncoso y Ercilla, 2016**, correspondiente a la muestra ACT-RT-001 (UTM WGS84(19H) 632186-7354287), demostró tener una mayor cantidad en TSD (45.530 [mg/l]). No obstante, ambas muestras fueron tomadas en sectores distantes entre sí, siendo aproximadamente a 150 mt. Por tanto, la diferencia entre las concentraciones en

TDS podría deberse a que al menos la muestra AC3-4 fue obtenida en un sector más próximo a la vertiente y no en la misma laguna, apuntando así a una menor proporción en sales.

Asimismo, para determinar las características en torno a la humedad relativa del salar, es también posible recurrir a la toma de datos isotópicos en aguas meteóricas dentro de la cuenca para evaluar cambios en la humedad relativa y así, poder comprender la evolución respecto a la precipitación y disolución de sales en un periodo de tiempo determinado. Esto se debe a que la toma de datos de isótopos estables como el ^{18}O y ^2H , permite determinar el exceso de Deuterio [‰] (**Mook, 2001**), correspondiendo a una relación matemática que guarda relación con la humedad relativa, estableciendo un bajo índice de ella si se tiene un exceso de Deuterio mayor a 10 [‰], y una mayor humedad relativa si el exceso es inferior a 10 [‰] (**Jiménez-Martínez & Custodio, 2008**).

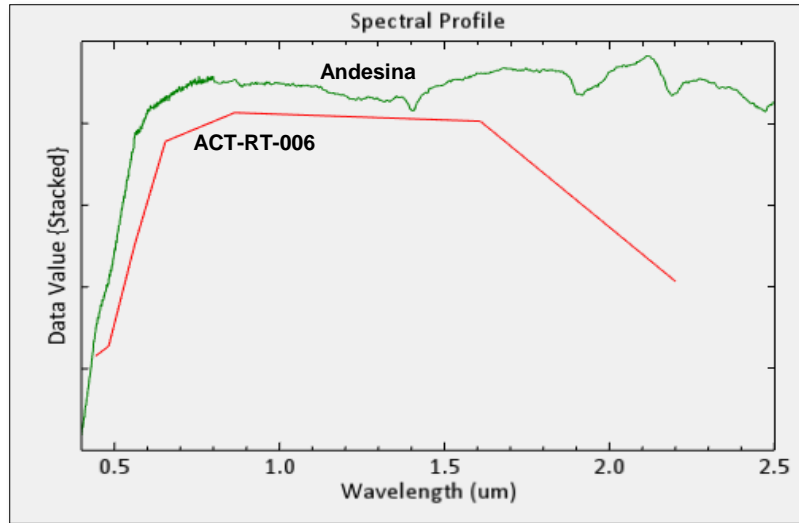
Por ello, se recomienda tomar muestras más recientes, debido a que la metodología del estudio estos isótopos estables, como lo son el ^{18}O y ^2H , son comúnmente utilizados como trazadores para detectar el origen de las aguas, puesto que sus contenidos en isótopos se consideran conservativos una vez que el agua ha logrado ingresar al acuífero, donde sus contenidos no se ven afectados por las interacciones del agua con la matriz de este. Tales características conservadoras permiten una reconstrucción de la historia química de las aguas (**Cervetto, 2012**).

Volviendo a las vías evolutivas, la muestra ACT-RT-006 se caracterizó por presentar un comportamiento más cálcico que sulfatado-neutro, a pesar de presentar concentraciones normales en SO_4 (1.186 [mg/l]), pero bajas concentraciones en Li (0.5 [mg/l]), Na (250 [mg/l]), K (27 [mg/l]) y Ca (410 [mg/l]). La anomalía presente podría ser explicada no solo por la disolución de yeso, caso que compromete a todas las muestras tomadas en el salar, sino que la presencia de arcillas en el sector central, interpretada en el subcapítulo 9.1, podría influir también frente a la disolución de ellas, lo cual lleva a la detección de minerales tanto en las zonas de abanicos y conos aluviales en donde se albergan la mayoría de los fragmentos rocosos y de minerales que desembocan en el salar.

Particularmente, gracias al uso del análisis espectral, el manantial en que se tomó la muestra ACT-RT-006 presentaba a su alrededor una serie de arcillas como alunita, montmorillonita, caolinita, y de forma local, se registró una probabilidad en SAM de 0.721 y una ponderación de 1.449 para la andesina (**figura 89**), una plagioclasa rica en anortita ($An_{30}-An_{50}$), la cual cuya alteración por hidrólisis tiende a transformarse en caolinita y liberando sílice en forma residual y cationes de $2Na^+$ y Ca^{2+} (**Maksaev, 2001**). Cabe destacar que, dentro de la información bibliográfica, se identificaron minerales de andesina por medio de una descripción petrográfica en rocas volcánicas ricas en este tipo de plagioclasas como las andesitas de hornblenda ricas en olivino y andesitas de piroxeno (**Gardeweg & Ramírez, 1982**).

Por otro lado, durante la visita a terreno, en el sector centro-sur, se identificaron zonas enriquecidas en sedimentos de tonalidad oscura, evidencias de tapetes microbianos expuestos y junto con acumulaciones locales de un material de tonalidad amarillenta que recubría las sales eflorescentes (**ver figura 38**) y de mal olor. Siguiendo los estudios realizados por **Demergasso et al. 2003**; y retomando las descripciones en el **subcapítulo 5.5**, tales rasgos en la superficie se caracterizan por generar residuos conformados por sulfuro de hidrógeno y/o dióxido de azufre, producto de los procesos oxidantes que generan los microorganismos presentes en los tapetes.

Considerando la cercanía entre el afluente que inicia desde el margen occidental hacia las proximidades del núcleo del salar y el manantial ubicado paralelamente y en el margen oriental, se podría interpretar que el sector centro-sur se mantendría sujeto a la concentración tanto de minerales sulfatados como de compuestos ricos en azufre, cuya generación puede provenir de la reducción de sulfatos disueltos en el ambiente y, por ende, probablemente de la redisolución de yeso en el sector centro-sur (**Troncoso y Ercilla, 2016**), cuya acción contribuiría al sistema hidroquímico del sector.



Análisis Espectral VI ACT-RT-006	
Minerales	SAM (%)
Alunita	0.884
Montmorillonita	0.873
Caolinita	0.866
Bórax	0.726
Andesina	0.721

Figura 89. Comparación entre la firma espectral del pixel de estudio (color rojo) con la firma espectral de la andesina (color verde). Coordenadas: UTM WGS 84 (19H) 634828-7346840. Notar también la probabilidad de ocurrencia para las arcillas según el análisis espectral. Fuente: ENVI Standard 5.3.

9. Conclusiones

A partir de los objetivos, hipótesis y resultados obtenidos para el trabajo presente, se ha logrado entablar que el salar Aguas Calientes Sur muestra efectivamente, al menos dos facies evaporíticas principales dentro del depósito salino, las cuales, a partir del uso de información bibliográfica relacionada con el área de estudio, la aplicación de técnicas de percepción remota, trabajo en terreno y análisis posteriores en laboratorio, presentan evidencias locales de zonación alrededor de las lagunas, afluentes y manantiales, acompañado de composiciones mineralógicas que diferencian a ambas facies. Estas, a la vez, se ven también afectadas por las condiciones climáticas dentro del área de estudio, las cuales durante el tiempo se han regido por la configuración geomorfológica producto del régimen tectónico que

controla el sector altoandino. Asimismo, el sistema climático que caracteriza tanto a la cuenca como al sector altoandino influye directamente en el sistema hidroquímico debido a las tasas de recarga de aguas meteóricas producto de los eventos pluviométricos, principalmente durante el Invierno Boliviano y Altiplánico. Tales características también trascienden para aquellos salares dispuestos hacia el occidente desde el salar de estudio, como lo es el salar de Atacama, por ejemplo.

Dentro de la geología de la cuenca que comprende al salar, a partir de las descripciones litológicas en campañas históricas (**Gardeweg & Ramírez, 1982; Troncoso y Ercilla, 2016**) y junto con el uso de la percepción remota y observaciones en terreno, se han propuesto al menos 6 unidades principales, correspondiendo a rocas volcánicas de composición andesítica, principalmente, junto con rocas sedimentarias que conforman las llanuras, rellenos aluviales presentes en el área y junto con el depósito salino ubicado en el centro de la cuenca. Todas ellas tienden a mantener la geomorfología y posiblemente, la hidroquímica del salar Aguas Calientes Sur. Por lo cual, no se logró entablar un control evidente entre la geología que circunda al salar y su distribución mineralógica.

En base a la mineralogía del salar Aguas Calientes Sur, se ha propuesto un dominio principal de al menos, dos facies evaporíticas, teniendo la primera facies como aquella con mayor distribución en la superficie salina, caracterizada por presentar costras salinas tipo 3 y cuya mineralogía consta de halita, yeso, nitratos, boratos y minerales de origen detrítico, junto con la segunda facies con una menor distribución superficial, comprendiendo costras salinas tipo 4 y cuya mineralogía indica un alto enriquecimiento de sulfatos (yeso, blöedita, tenardita), cloruros, carbonatos y material detrítico. Debido a la mezcla entre las facies evaporíticas, se propusieron evidencias de zonación para los sectores de lagunas, afluentes y manantiales, donde se observaron variaciones notorias con el uso del cociente de banda 5/7 sujeto a la imagen Landsat 8 OLI-TIRS (**ver figuras 71, 72, 73 y 74**).

De acuerdo con **Risacher et al. 1999; Troncoso y Ercilla, 2016**; efectivamente las líneas evolutivas de las aguas se deben a la disolución de las sales evaporíticas, principalmente sulfatos y cloruros como halita y yeso. Asimismo, el comportamiento

sódico-clorurado de las aguas podría deberse a cambios climáticos en torno a los eventos pluviométricos y cambios de temperatura, influyendo en la precipitación y/o disolución de las sales coexistentes entre sí (**Grilli et al. 1986**). Por otro lado, existe la posibilidad de tener alteración hidrotermal en profundidad en las rocas volcánicas que conforma la cuenca, lo cual se sostiene en base las descripciones microscópicas hechas en este trabajo y según lo propuesto por **Ericksen, 1981; Warren, 2005**. Sin embargo, ambas interpretaciones requieren un estudio hidrogeológico de mayor detalle que involucre un análisis sobre el sistema climático del salar Aguas Calientes Sur.

10. Recomendaciones

Considerando las limitaciones dentro de este trabajo, y para poder llevar a cabo un mejor estudio e incluyendo la metodología aplicada en esta investigación, se sugiere realizar estudios en terreno de al menos 1 semana de duración, de tal forma que se comprenda toda la extensión del salar y así, poder muestrear aquellos sectores de interés con alta probabilidad de ocurrencia de sulfatos, específicamente hacia el sureste del margen oriental y lado sur del salar.

A esto, se le suma la realización del estudio del material detrítico y volcánico existente en los márgenes del salar, lo cual vendría a complementarse con la toma de muestra de sedimentos desde la superficie salina, extendiéndose al menos, 1 a 2 metros de profundidad, en caso de tener la autorización por parte de las autoridades debido a que el salar es considerado como un área protegida. No obstante, esta actividad entregaría información relevante sobre la evolución estratigráfica, mineralógica e incluso, hidrogeológica del salar.

Frente al uso de sensores remotos, se recomienda el uso de sensores hiperespectrales de alta resolución como Sentinel o Worldview 3 para corroborar y comparar la delimitación y detección de unidades geológicas y zonas mineralógicas.

Debido a la ausencia de pozos de agua para la realización de estudios hidrogeológicos en profundidad, se recomienda establecer estaciones precisas de muestreo en diferentes épocas estacionales y bajo condiciones climáticas similares, de tal forma que sea posible la toma de datos de isótopos estables de ^{18}O y ^2H . Esto permitiría un mejor estudio de las variaciones en humedad relativa dentro del depósito salino.

Tanto en este trabajo como lo propuesto por autores como **Ericksen, 1981; Warren, 2005**; se ha sugerido que entre el sistema mineralógico e hidráulico del salar se tiene un aporte de elementos mayoritarios entre las formaciones volcánicas y los flujos de aguas subterráneas comúnmente entre 0.1 a 0.6 [g/l] en componentes iónicos. Sin embargo, para validar este antecedente, es necesario realizar un estudio geológico e hidrogeológico a nivel subsuperficial del salar.

Por otro lado, se recomienda tomar muestras de agua más recientes, debido a que el estudio de isótopos estables, como el ^{18}O y ^2H , es de alta utilidad debido a que son considerados como trazadores para detectar el origen de las aguas, lo que permite esclarecer la evolución y comportamiento químico de las aguas.

11. Bibliografía

- A. Grilli, F. Vidal, C. Garin. (1986). *Balance Hidrológico Nacional, I Región*.
- A. Marchetti, C. Piccini, R. Francaviglia, L. Mabit. (2012). Spatial distribution of soil organic matter using geostatistics: a key indicator to assess soil degradation status in central Italy. *Pedosphere*, 22(2): pp 230-242.
- B. Coira, J. Davidson, C. Mpodozis, V. Ramos. (1982). Tectonic and magmatic evolution of the Andes of northern Argentina and Chile. *Earth Science Review*, 169-182.
- B. F. Jones, D. M. Deocampo. (2003). *Geochemistry of Saline Lakes*. US Geological Survey, Reston, VA, USA.
- Bowler, J. M. (1986). Spatial variability and hydrological evolution of Australian lake basins: an analogue for Pleistocene hydrologic change and evaporite formation. *Palaeogeogr. Palaeoclim*, 54, 21-24.
- C. Marquetti, R. Becchio, R. Seggiaro, K. Nakashima. (2004). Aplicación de datos ASTER para el mapeo de la hoja geológica Andalgalá, Catamarca, Argentina. *I° Simposio ASTER-GEOSAT*, (pág. 12). Buenos Aires.
- C. Mpodozis. S. M. Kay. (1990). Provincias magmáticas ácidas y evolución tectónica de Gondwana: andes chilenos (28-31°S). *Revista Geológica de Chile*, 153-180.
- C. Vargas, C. Villon, J. Pasapera. (2009). Comparación de técnicas para el mapeo de cobertura glaciar con imágenes Landsat y ASTER en la Cordillera Blanca, Ancash, Perú. *XIV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, (págs. 6911-6817). Natal, Brasil.
- C.J. Chericoff, E.O. Zappettini, M.L. Villar. (2005). La faja de metagabros del sector centro-norte de la provincia de la Pampa, Argentina: nuevas evidencias geofísicas. *16° Congreso Chileno*, (págs. 3: 39-44). Buenos Aires.
- Cervetto, M. (2012). *Caracterización geológica e hidrogeológica de las cuencas piloto: alar de Aguas calientes 2, Puntas negras, Laguna Tuyajto, Pampa Colorada, Pampa Las Tecas y Salar el Laco, II región de Chile*.
- Cochilco. (2013). *El potencial del litio en salares del norte de Chile*. Santiago.
- CORFO. (1979). *Descripción geológica de testigos de diversos sondajes realizados en el Salar de Atacama*. Santiago.

- D. K. Das, D. Jarratt, D. McDonald, D. Heberlein. (1998). *Environmental baseline data collection at Diablillos property, Salta, Argentina*. Rescan Environmental Services and Barrick Exploraciones Argentina S.A., 15 pp.
- Delbuono, V. (2016). *Situación Actual y Perspectivas. Mercado del Litio*.
- Demergasso, C. (2003). Tapetes microbianos del Salar de Llamará, norte de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 485-499.
- E. Scheuber, K.J. Reutter. (1992). Magmatic arc tectonics in the Central Andes between 21° and 25°S. *Elsevier*, 127-140.
- Ericksen, G. E. (1981). *Geology and Origin of the Chilean Nitrate Deposits*. Washington: United States Government Printing Office.
- F. Risacher, H. Alonso, C. Salazar. (1999). *Geoquímica en aguas cerradas: I, II y III regiones - Chile*. Santiago.
- G. Chong, J. P. (2000). Los yacimientos de boratos de Chile. *Revista Geológica de Chile*.
- Gajardo, A. (2014). *Potencial de litio en salares del norte de Chile*. Santiago.
- Guest, J. E. (1969). *Upper tertiary ignimbrites in the Andean Cordillera of Part of the Antofagasta Province, Northern Chile*. Geological Society of America.
- Hernández, H. J. (2007). Procesamiento digital de imágenes. En H. J. Hernández, *Biodiversidad: Manejo y Conservación de Recursos Forestales* (pág. 804 pp.).
- Huggett, R. J. (2003). *Environmental Change*. Londres: New Fetter Lane.
- J. E. Bailey, S. Self, L. K. Wooler, P. J. Mougins-Mark. (2007). Discrimination of fluvial and eolian features on large ignimbrite sheets around La Pacana Caldera, Chile, using Landsat and SRTM-derived DEM. *Elsevier*, 24-41.
- J. Flahaut, M. Martinot, J. L. Bishop, G. R. Davies, N. J. Potts. (2016). Remote sensing and in situ mineralogic survey of the Chilean salars: An analog to Mars evaporate deposits? *Elsevier*, 1-22.
- J. Jiménez-Martínez, E. Custodio. (2008). El exceso de deuterio en la lluvia y en la recarga a los acuíferos en el área cirum-mediterránea y en la costa mediterránea española. *Boletín Geológico y Minero*, 119 (1): 21-32.
- J. Rodríguez, F. Vos, R. Below, D. Guha-Sapir. (2009). *Annual Disaster Statistical Review*. Bruselas.

- K. Berg, C. Bretkreutz. (1983). Plutonic and sedimentary rocks from the Coastal Range of northern Chile: Rb-Sr and U-Pb isotopic systematics. *IX Congreso Geológico Chileno*, (págs. 101-115).
- K. D. Collerson, J. F. Lewry, R. W. Van Schmus, M. E. Bickford. (1989). Sm-Nd isotopic constraints on the age of the buried basement in central and southern Saskatchewan: Implications for diamond exploration. *Summary of Investigations. Saskatchewan Geological Survey*.
- K. J. Reutter, P. Giesc, H. J. Gotze, E. Scheuber, K. Schwab, G. Schwarz, P. Wigger. (1988). Structures and crustal development of the central Andes between 21° and 25°S. En P. G. H. Bahlburg, *The Southern Andes* (págs. 231-261). New York.
- K. Neumann, S. Dreiss. (1985). Strontium 87/strontium 86 ratios as tracers in groundwater and surface waters in Mono Basin, California. *Water Resources Research*, 31(12) 3183-3193.
- Lattus, J. M. (2016). *Worldview -3: Mejorando la escala de Trabajo y el Mapeo Espectral*. Santiago: SRGIS.
- M. Gardeweg, C. Ramírez. (1981). *Geología de la Hoja Toconao. Región de Antofagasta*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- M. Wang, J. E. Overland. (2004). Detecting arctic climate change using Köppen climate classification. *Climate Change*, 1: 43-62.
- Maksaev, V. (2001). Reseña metalogénica de Chile y de los procesos que determinan la metalogénesis andina. En V. Maksaev, *Metalogénesis de Chile* (págs. pp 1-44). Universidad de Chile. Santiago.
- Mpodozis, C. &. (1990). Geology of the Andes and its relation to Hydrocarbon and Mineral Resources. En G. C. Ericksen, *The Andes of Chile and Argentina* (págs. 59-90). Houston.
- Ochsenius, C. (1986). Late pleistocene Puna glaciation, deglaciation and high lake-levels during the transition Wisconsin-Holocene, and postglacial megafauna refuges in the Atacama Desert and Puna regions. *Revista de Geografía Norte Grande*, 13: 29-58.
- P. B. García-Allende, O. M. Conde, J. Mirapeix, Ana M. Cubillas, J. M. Lopez. (2007). Clasificación en tiempo real de materias primas mediante un sensor electroscópico de imagen y técnicas lineales de procesamiento de datos. *5° Reunión Española de Optoelectrónica*.
- P. Neville, R. I. Coward, R. P. Watson, M. Inglis, S. Morain. (2000). The application of TM imagery and GIS data in the assesment of arid lands water and land resources in west Texas. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1373-1379.

- Paskoff, P. (1976). Sur l'origine du grand escarpement cotier du desert chilien. *XXIV International Geographical Congress*, (págs. 11-207).
- Pueyo, J. J. (1991). *Génesis de formaciones evaporíticas: modelos andinos e ibéricos*. Barcelona: Universitat de Barcelona.
- R. A. Marquillas, J. A. Salfity. (1988). *Tectonic framework and correlations of the Cretaceous-Eocene Salta Group, Argentina*.
- R. Allmendinger, V. Ramos, T. Jordan, M. Palma, B. Isacks. (1983). Paleogeography and Andean structural geometry. En V. R. R. Allmendinger, *Tectonics and Climate of the Southern Central Andes* (págs. 1-16). Potsdam: Institut fur Geowissenschaften, Universitat Potsdam, 14415 Potsdam, Germany.
- R. Charrier & J.C. Vicente. (1972). *Liminary and geosyncline Andes: major orogenic phases and synchronical evolution of the central and austral sectors of the Southern Andes*. Buenos Aires.
- R. Charrier, M. P. Rodríguez, L. Pinto. (2007). Tectono-stratigraphic evolution of the Andean orogen in Chile. En T. M. W. Gibbons, *Geology of Chile* (págs. 21-216). Londres.
- R. F. Kokaly, R. N. Clark, G. A. Swayze, E. Livo, T. M. Hoefen, N. C. Pearson, R. A. Wise, W. M. Benzel, H. A. Lowers, R. L. Driscoll, A. J. Klein. (2017). *USGS Spectral Library Version 7*. U.S. Geological Survey Data Series 1035, 61 p.
- R. N. Alonso, J. G. Viramonte. (1987). Geología y Metalogenia de la Puna. *Estudios Geológicos*, 393-407.
- R. Troncoso, O. Ercilla. (2016). *Caracterización geoquímica superficial de aguas y sales de los principales salares andinos (22°50'-26°05'S), Regiones de Antofagasta y Atacama*. Santiago.
- Reutter, K. (1990). *Tectonics of the Southern Central Andes. Structure and Evolution of an Active Continental Margin*. Berlin: Springer-Verlag.
- Rosen, R. M. (1994). The importance of groundwater in playas: A review of playa classifications and the sedimentology and hydrology of playas. *Geological Society of America Special Paper No. 289*, pp 1-18.
- S. J. Nield, J. L. Boettinger, R. D. Ramsey. (2007). Digitally mapping gypsic and natric soil areas using Landsat ETM data. *Soil Science Society of America Journal*, 71(1): 245-252.
- S. M. Kay, V. A. Ramos, C. Mpodozis, P. Sruoga. (1989). *Late Paleozoic to Jurassic silicic magmatism at the Gondwana margin: Analogy to the Middle Proterozoic in North America?*

- Salfity, J. A. (1985). Lineamientos transversales al rumbo andino en el noroeste argentino. *IV Congreso Geológico Chileno* (pág. 118). Antofagasta: Universidad Católica del Norte.
- T. E. Jordan, B. Isacks, R. Allmendinger, J. Brewer, V. Ramos, C. Ando. (1983). Tectonic framework and correlations of the Cretaceous-Eocene Salta Group, Argentina. *Geological Society of America Bulletin*, 341-361.
- T. Lillesand, R. Kiefer. (1994). *Remote Sensing and Image Interpretation. 3rd Edition*. Wiley & Sons.
- V. A. Ramos, M. Cegarra, E. Cristallini. (1994). Cenozoic tectonics of the High Andes of west-central Argentina (30–36°S latitude). *Elsevier*.
- W. G. Mook. (2001). Introduction-Theory, Methods, Review. En *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle: Principles and Applications. Vol. 1* (págs. pp 1-145).
- W. W. Wood, W. E. Sanford. (1990). Ground-water control of evaporite deposition. *Economic Geology*, 85 (6): 1226-1235.
- Warren, J. K. (2005). *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Springer.
- Whitney, M. I. (1978). The role of vorticity in developing lineation by wind erosion. *Geological Society of America Bulletin*, 89, 1-18.

12. Sección de Anexos

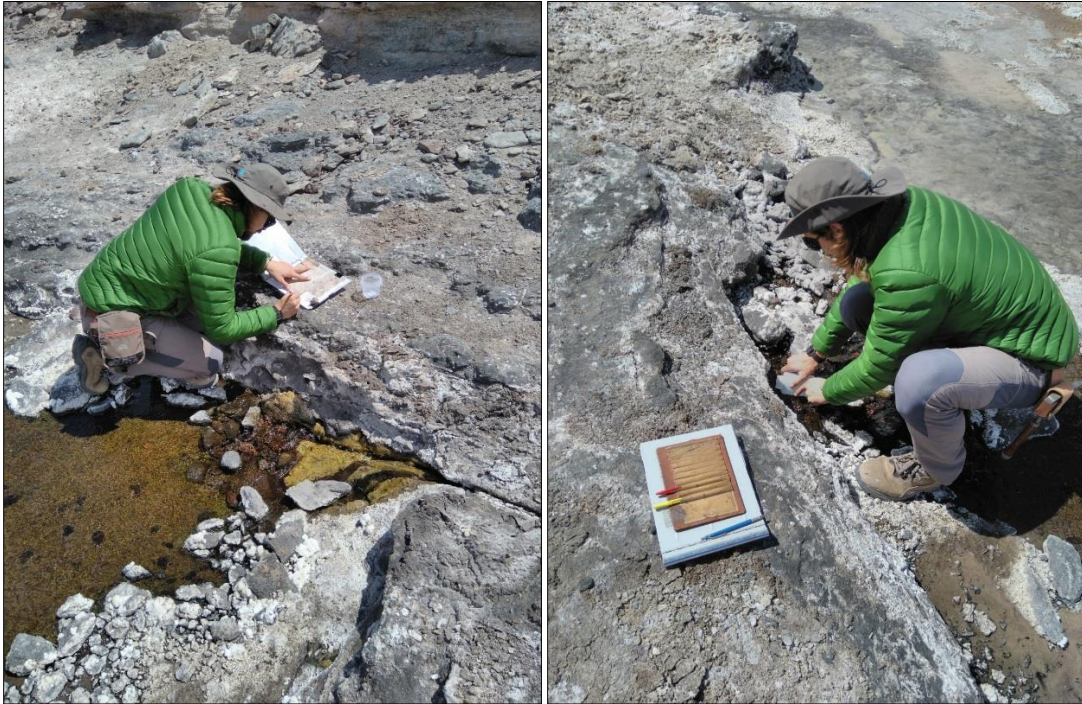


Ilustración 1. Validación del punto de interés en estudio. Sector centro-sur del salar Aguas Calientes Sur, margen occidental (**izquierda**). Toma de muestra de agua superficial en los inicios del afluente principal del sector (**derecha**).

Informe de Difracción de Rayos X N°11/18

Solicitado por: Sra. Arlene Ebensperger Jessen
Razón Social/Proyecto: Comité de Minería No metálica, CORFO
Cantidad de muestras: 12
Fecha de entrega: 22 de febrero de 2018
Correlativo interno: C180101

Las muestras se secaron a muy baja T°. Fueron cuarteradas y algunas pasaron por molienda controlada, otras no fue posible por las características higroscópicas de las sales presentes. Ponerlas en el portamuestras se realizó de manera especial sin presionar para evitar perder cristalinidad. El barrido se realizó en un difractómetro marca Panalytical, modelo X'Pert PRO y el programa de interpretación es el High Score Plus. La composición mineralógica cualitativa es la siguiente:

- 1) HU-02
Thenardita, calcita, halita, cuarzo bajo, albita, burkeita, trazas de azufre.
- 2) HU-04
Calcita magnésica, thenardita, halita, nitratina, eugsterita, blöedita.
- 3) HU-06
Halita, yeso, eugsterita, dolomita, singenita, cuarzo, nitratina, stilbita, inyoita, thenardita.
- 4) HU-08
Halita, singenita, yeso, thenardita, aragonito, hilgardita, apthitalita, rejalgar.
- 5) HU-13
Yeso, halita, eugsterita, cuarzo bajo, singenita.
- 6) HU-15
Yeso, cuarzo, albita alta, hexahidrobrita.
- 7) HU-17
Halita, yeso, eugsterita, dolomita, singenita, potassium alum, ameghinita.

- 8) HU-18
Halita, thenardita, calcita magnésica, silvita, goergeyita, nitratina, cristobalita, hanksita.
- 9) ACS-SC-001
Halita, cuarzo, silvita.
- 10) ACS-SC-002
Yeso, halita, eugsterita, cuarzo bajo, singenita.
- 11) ACS-SC-003
Yeso, halita, cuarzo, blöedita, aragonito, inyoita.
- 12) ACS-SC-004
Halita, yeso, cristobalita, eugsterita, thenardita, inyoita, metavoltina, azufre, inderborita.

Se anexan los difractogramas correspondientes.


Eugenia Fonseca P.
Geóloga
Unidad de Mineralogía

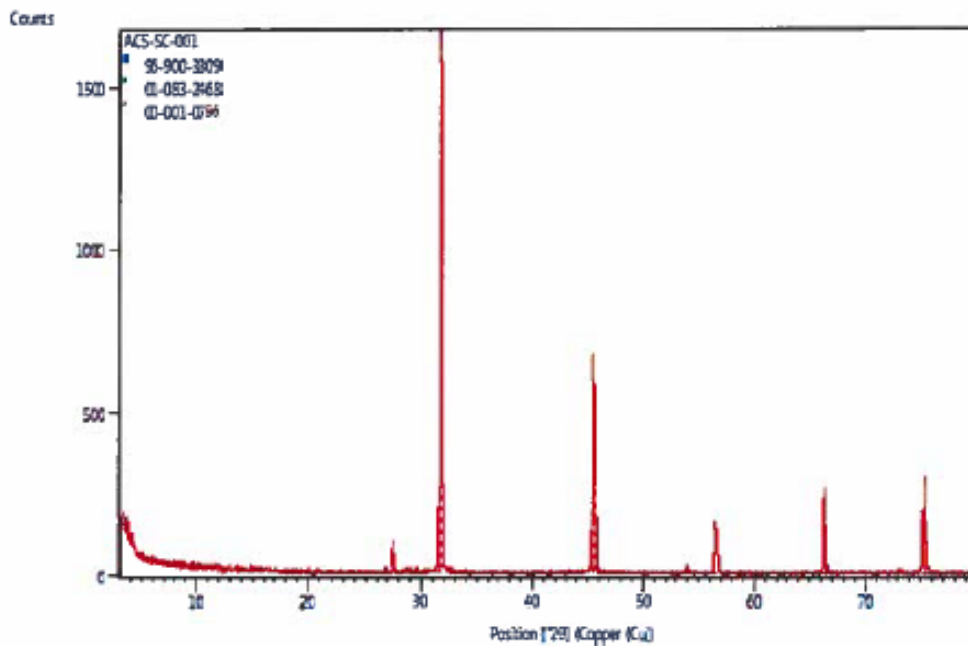
Ilustración 2. Informe técnico del análisis DRX realizado para las muestras de costra salina. Las muestras de interés corresponden a aquellas con codificación ACS-SC.

Anchor Scan Parameters

Dataset Name ACS-SC-001
File name C:\XRD Data\Arcillas\ACS-SC-001.xrdml
Sample Identification ACS-SC-001
Comment Configuration=SNGM_RT_SPINNER, Owner=User-1, Creation date=20-10-2016 12:17:22
Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001
Sample stage=Reflection-Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1
Diffractometer system=XPERT-PRO
Measurement program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\ARCILLAS_RT_SPINNER.xrdmp, Identifier={61B1E4A8-6DD4-4B32-83A9-F61426796818}
Batch program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\BATCH_SC.xrdmp, Identifier={A42BA58F-27A9-442B-8B14-462549C86E8E}
PHD Lower Level = 5.63 (keV), PHD Upper Level = 11.43 (keV)
Measurement Start Date/Time 22-02-2018 11:28:13
Operator DRX
Raw Data Origin XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis Gonio
Start Position [°2 θ] 3.0042
End Position [°2 θ] 79.9882
Step Size [°2 θ] 0.0080
Scan Step Time [s] 24.8050
Scan Type Continuous
PSD Mode Scanning
PSD Length [°2 θ] 2.02
Offset [°2 θ] 0.0000
Divergence Slit Type Fixed
Divergence Slit Size [°] 0.2177
Specimen Length [mm] 10.00
Measurement Temperature [°C] 25.00
Anode Material Cu
K-Alpha1 [Å] 1.54060
K-Alpha2 [Å] 1.54443
K-Beta [Å] 1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio 0.50000
Generator Settings 40 mA, 45 kV
Diffractometer Type 000000000030722
Diffractometer Number 0
Goniometer Radius [mm] 240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm] 100.00
Incident Beam Monochromator No
Spinning Yes

Graphics

*Ilustración 3. Parámetros utilizados en la muestra ACS-SC-001, para el proceso de Difracción de Rayos X.
Fuente: Sernageomin.*



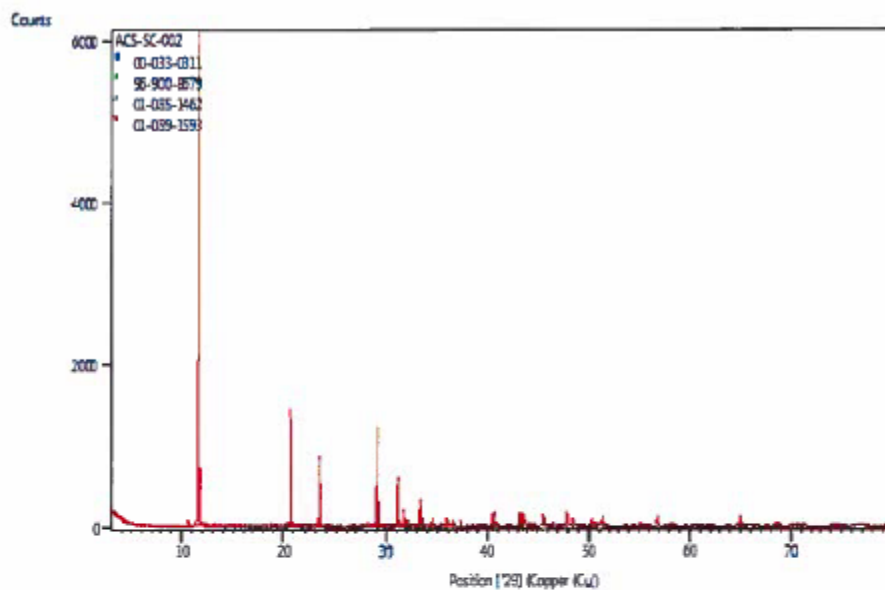
Pattern List						
Visible	Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[°2θ]	Scale Fac.	Chem. Formula
*	96-900-3309	70	Halite	0.000	0.720	Na4.00 Cl4.00
*	01-083-2468	15	Silicon Oxide	0.000	0.015	Si O2
*	00-001-0786	10	Potassium Chloride	0.000	0.002	K Cl

Ilustración 4. Resultados del estudio en la muestra ACS-SC-001, entregados por el difractómetro marca Panalytical modelo X'Pert PRO, junto con el uso del programa de interpretación High Score Plus. La columna inferior arroja los minerales principales por conteo, dentro de la muestra de estudio.

Anchor Scan Parameters

Dataset Name ACS-SC-002
File name C:\XRD Data\Arcillas\ACS-SC-002.xrdml
Sample Identification ACS-SC-002
Comment Configuration=SNGM_RT_SPINNER, Owner=User-1, Creation date=20-10-2016 12:17:22
Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001
Sample stage=Reflection-Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1
Diffractometer system=XPERT-PRO
Measurement program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\ARCILLAS_RT_SPINNER.xrdmp, Identifier={61B1E4A8-6DD4-4B32-83A9-F61426796818}
Batch program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\BATCH_SC.xrdmp, Identifier={63A56457-EE1F-498E-9D0F-6D1CF1DD4530}
PHD Lower Level = 5.63 (keV), PHD Upper Level = 11.43 (keV)
Measurement Start Date/Time 21-02-2018 15:07:17
Operator DRX
Raw Data Origin XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis Gonio
Start Position [°2 θ] 3.0042
End Position [°2 θ] 79.9882
Step Size [°2 θ] 0.0080
Scan Step Time [s] 24.8050
Scan Type Continuous
PSD Mode Scanning
PSD Length [°2 θ] 2.02
Offset [°2 θ] 0.0000
Divergence Slit Type Fixed
Divergence Slit Size [°] 0.2177
Specimen Length [mm] 10.00
Measurement Temperature [°C] 25.00
Anode Material Cu
K-Alpha1 [Å] 1.54060
K-Alpha2 [Å] 1.54443
K-Beta [Å] 1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio 0.50000
Generator Settings 40 mA, 45 kV
Diffractometer Type 000000000030722
Diffractometer Number 0
Goniometer Radius [mm] 240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm] 100.00
Incident Beam Monochromator No
Spinning Yes

Ilustración 5. Parámetros utilizados en la muestra ACS-SC-002, para el proceso de Difracción de Rayos X. Fuente: Sernageomin.



Pattern List						
Visible	Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[°2θ]	Scale Fac.	Chem. Formula
*	00-033-0311	65	Calcium Sulfate Hydrate	0.000	0.298	Ca ₅ O ₄ I ₂ H ₂ O
*	96-900-8679	41	Halite	0.000	0.039	Na _{4.00} Cl _{4.00}
*	01-085-1462	20	Sodium Nitrate	0.000	0.191	Na (N O ₃)
*	01-089-1593	11	Calcium Borate Hydroxide Hydrate	0.000	0.341	(Ca (H ₂ O) ₃) (B ₃ O ₃ (O H) ₅) (H ₂ O)

Ilustración 6. Resultados del estudio en la muestra ACS-SC-002, entregados por el difractómetro marca Panalytical modelo X'Pert PRO, junto con el uso del programa de interpretación High Score Plus. La columna inferior arroja los minerales principales por conteo, dentro de la muestra de estudio.

Anchor Scan Parameters

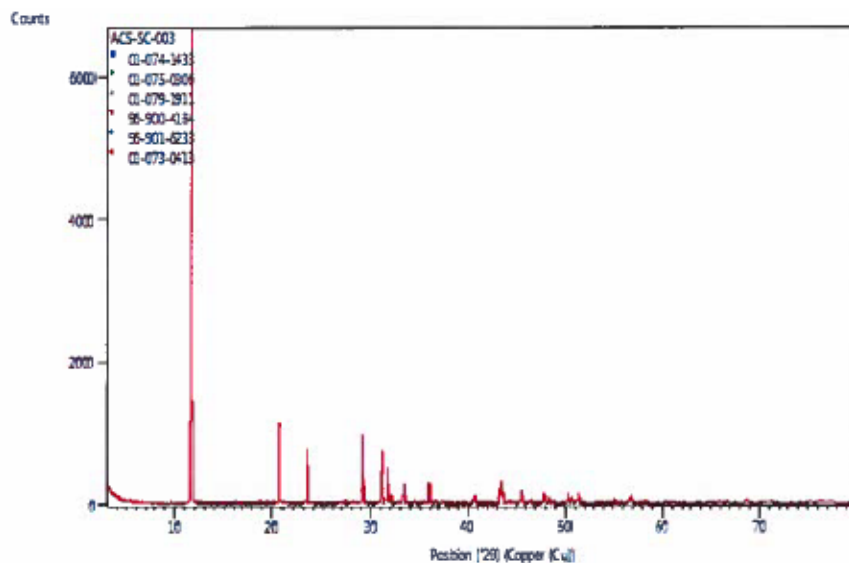
Dataset Name ACS-SC-003
File name C:\XRD Data\Arcillas\ACS-SC-003.xrdml
Sample Identification ACS-SC-003
Comment Configuration=SNGM_RT_SPINNER, Owner=User-1, Creation date=20-10-2016 12:17:22

Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001
Sample stage=Reflection-Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1
Diffractometer system=XPERT-PRO
Measurement program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\ARCILLAS_RT_SPINNER.xrdmp, Identifier={61B1E4AB-6DD4-4B32-83A9-F61426796818}
Batch program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\BATCH_SC.xrdmp, Identifier={63A56457-EE1F-498E-9D0F-6D1CF1DD4530}

PHD Lower Level = 5.63 (keV), PHD Upper Level = 11.43 (keV)
Measurement Start Date/Time 21-02-2018 12:54:20
Operator DRX
Raw Data Origin XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis Gonio
Start Position [°2 θ] 3.0042
End Position [°2 θ] 79.9882
Step Size [°2 θ] 0.0080
Scan Step Time [s] 24.8050
Scan Type Continuous
PSD Mode Scanning
PSD Length [°2 θ] 2.02
Offset [°2 θ] 0.0000
Divergence Slit Type Fixed
Divergence Slit Size [°] 0.2177
Specimen Length [mm] 10.00
Measurement Temperature [°C] 25.00
Anode Material Cu
K-Alpha1 [Å] 1.54060
K-Alpha2 [Å] 1.54443
K-Beta [Å] 1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio 0.50000
Generator Settings 40 mA, 45 kV
Diffractometer Type 0000000000030722
Diffractometer Number 0
Goniometer Radius [mm] 240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm] 100.00
Incident Beam Monochromator No
Spinning Yes

Graphics

*Ilustración 7. Parámetros utilizados en la muestra ACS-SC-003, para el proceso de Difracción de Rayos X.
Fuente: Sernageomin.*



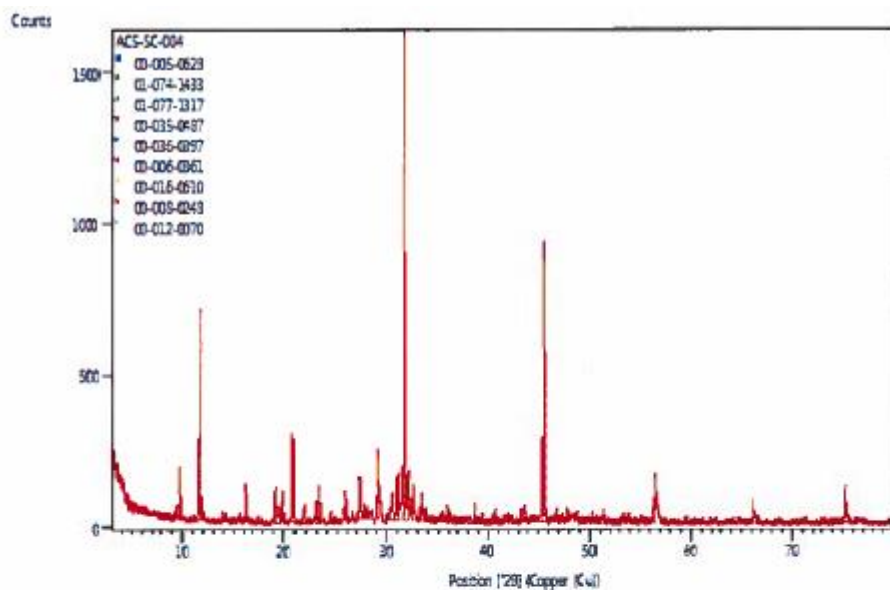
Pattern List						
Visible	Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[°2θ]	Scale Fac.	Chem. Formula
*	01-074-1433	69	Calcium Sulfate Hydrate	0.000	0.362	Ca (S O4) (H2 O)2
*	01-075-0306	41	Sodium Chloride	0.000	0.076	Na Cl
*	01-079-1911	9	Silicon Oxide	0.000	0.007	Si O2
*	96-900-4184	14	Blodite	0.000	0.042	Na4.00 Mg2.00 S4.00 O24.00 H16.00
*	96-901-6233	6	Aragonite	0.000	0.009	Ca4.00 C4.00 O12.00
*	01-073-0413	11	Calcium Borate Hydrate	0.000	0.213	Ca B3 O3 (O H)5 (H2 O)4

Ilustración 8. Resultados del estudio en la muestra ACS-SC-003, entregados por el difractor marca Panalytical modelo X'Pert PRO, junto con el uso del programa de interpretación High Score Plus. La columna inferior arroja los minerales principales por conteo, dentro de la muestra de estudio.

Anchor Scan Parameters

Dataset Name ACS-SC-004
File name C:\XRD Data\Arcillas\ACS-SC-004.xrdml
Sample Identification ACS-SC-004
Comment Configuration=SNMG_RT_SPINNER, Owner=User-1, Creation date=20-10-2016 12:17:22
Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001
Sample stage=Reflection-Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1
Diffractometer system=XPERT-PRO
Measurement program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\ARCILLAS_RT_SPINNER.xrdmp, Identifier={61B1E4A8-6DD4-4B32-83A9-F61426796818}
Batch program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\BATCH_SC.xrdmp, Identifier={63A56457-EE1F-498E-9D0F-6D1CF1DD4530}
PHD Lower Level = 5.63 (keV), PHD Upper Level = 11.43 (keV)
Measurement Start Date/Time 21-02-2018 12:21:06
Operator DRX
Raw Data Origin XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis Gonio
Start Position [°2 θ] 3.0042
End Position [°2 θ] 79.9882
Step Size [°2 θ] 0.0080
Scan Step Time [s] 24.8050
Scan Type Continuous
PSD Mode Scanning
PSD Length [°2 θ] 2.02
Offset [°2 θ] 0.0000
Divergence Slit Type Fixed
Divergence Slit Size [°] 0.2177
Specimen Length [mm] 10.00
Measurement Temperature [°C] 25.00
Anode Material Cu
K-Alpha1 [Å] 1.54060
K-Alpha2 [Å] 1.54443
K-Beta [Å] 1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio 0.50000
Generator Settings 40 mA, 45 kV
Diffractometer Type 000000000030722
Diffractometer Number 0
Goniometer Radius [mm] 240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm] 100.00
Incident Beam Monochromator No
Spinning Yes

Ilustración 9. Parámetros utilizados en la muestra ACS-SC-003, para el proceso de Difracción de Rayos X. Fuente: Sernageomin.



Pattern List						
Visible	Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[°2θ]	Scale Fac.	Chem. Formula
*	00-005-0628	54	Sodium Chloride	0.000	0.897	Na Cl
*	01-074-1433	46	Calcium Sulfate Hydrate	0.000	0.251	Ca (S O4) (H2 O)2
*	01-077-1317	14	Silicon Oxide	0.000	0.021	Si O2
*	00-035-0487	22	Sodium Calcium Sulfate Hydrate	0.000	0.076	Na4 Ca (S O4)3 12 H2 O
*	00-036-0397	28	Sodium Sulfate	0.000	0.074	Na2 S O4
*	00-006-0361	15	Calcium Borate Hydroxide Hydrate	0.000	0.148	Ca B3 O3 (O H)5 14 H2 O
*	00-016-0610	5	Potassium Sodium Iron Sulfate Hydroxide	0.000	0.296	K - Na - Fe - S - O - O H - H2 O
*	00-008-0248	13	Sulfur	0.000	0.039	S
*	00-012-0070	9	Calcium Magnesium Borate Hydrate	0.000	0.037	Ca Mg B6 O11 11 H2 O

Ilustración 10. Resultados del estudio en la muestra ACS-SC-004, entregados por el difractor marca Panalytical modelo X'Pert PRO, junto con el uso del programa de interpretación High Score Plus. La columna inferior arroja los minerales principales por conteo, dentro de la muestra de estudio.

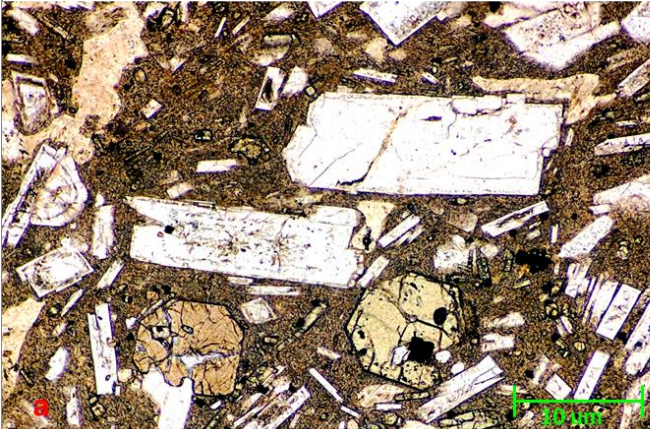
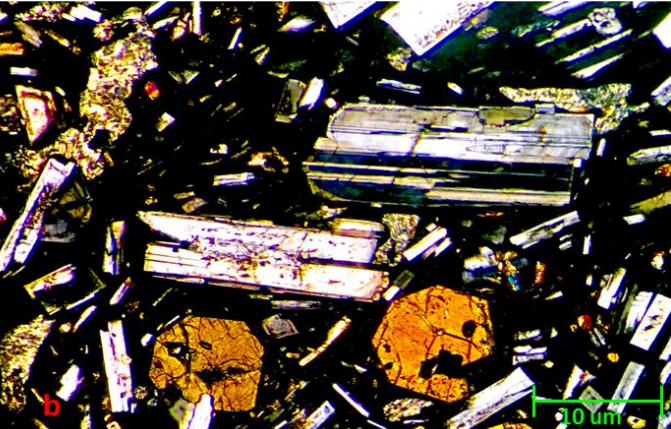
Código de muestra				ACS-UI-SC	
Coordenadas (UTM WGS84 (19H))				Observaciones de terreno	Textura
Coordenada Este	Coordenada Norte	Altitud	Fecha	Muestra de roca obtenida en el margen oriental del salar, en la falda occidental del Co. Médano.	Porfídica seriada, localmente vesicular y poiquilítica, con masa fundamental hialopilitica e intersertal.
636361	7346372	4118	27-01-2018		
Microfotografía con Luz Polarizada Plana (LPP)				Microfotografía con Luz Polarizada Cruzada (LPX)	
					
Mineralogía	%	Forma de cristales	Tamaño (mm)	Evidencias y grado de alteración	Observaciones
Plagioclasa	70	Euhedral	0.4 - 3	Alteración leve a sericita.	Algunos cristales muestran evidencias de zonación concéntrica y con textura poiquilítica.
Ortopiroxeno	5	Subhedral a euhedral	0,3–0,9	-	Fenocristales levemente fracturados y presentan inclusiones de minerales opacos (¿óxidos de Fe?).
Clinopiroxeno	5	Subhedral	0,2–2,7	-	Los fenocristales se muestran fracturados.
Biotita	2	Anhedral a subhedral	0,2	Hematización leve.	-
Masa Fundamental	%	Forma de cristales	Tamaño (mm)	Evidencias y grado de alteración	Observaciones
Vidrio	10	-	< 0,1	-	-
Piroxeno	2	-	< 0,2	-	-
Plagioclasa	6	-	< 0,2	-	-
Observaciones				Entre algunas vesículas y espacios vacíos, se observan rellenos de zeolita con hábito tabular y hojoso.	
Clasificación					
Andesita porfídica de piroxeno con textura porfídica seriada					

Ilustración 11. Descripción microscópica de la muestra de roca ACS-UI-SC, representada por su microfotografía en Luz Polarizada Plana (izquierda) y en Luz Polarizada Cruzada (derecha). Microscopio utilizado: Nikon Eclipse Lv1000. Objetivo 5x.

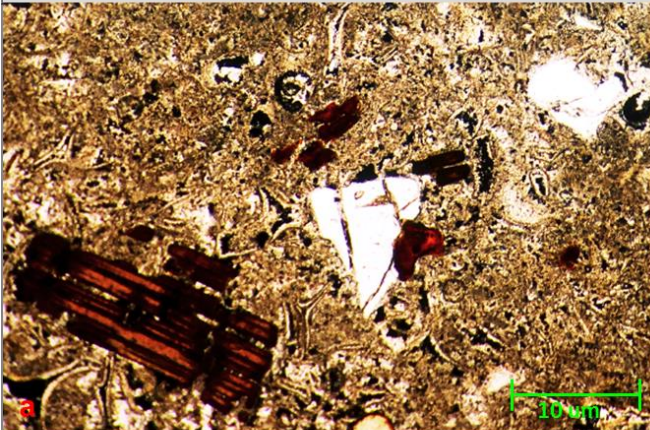
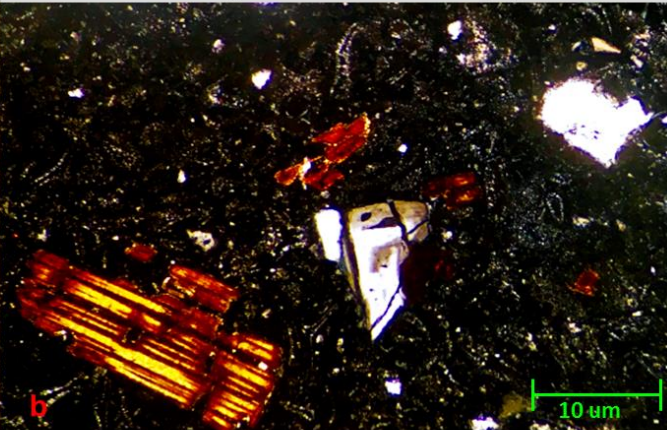
Código de muestra				ACS-UII-SC	
Coordenadas (UTM WGS84 (19H))				Observaciones de terreno	Textura
Coordenada Este	Coordenada Norte	Altitud	Fecha	Muestra de roca obtenida en el margen occidental del salar. Falda oriental del Co. Caichinque.	Porfídica con masa fundamental hipocristalina-hialohialina y vitrofídica.
631303	7351232	4010	26-01-2018		
Microfotografía con Luz Polarizada Plana (LPP)				Microfotografía con Luz Polarizada Cruzada (LPX)	
					
Mineralogía	%	Forma de cristales	Tamaño (mm)	Evidencias y grado de alteración	Observaciones
Plagioclasa	60	Euhedral	0,4 - 3	Alteración leve a moderada a sericita.	Los fenocristales se muestran fracturados y con evidencias de zonación.
Ortopiroxeno	3	Subhedral a euhedral	0,3 - 0,9	-	-
Biotita	5	Subhedral	0,2 - 2,7	Alteración hematítica pervasiva.	La alteración se identifica con una tonalidad cobriza, de acuerdo a las descripciones de Gardeweg & Ramírez, 1982.
Opacos	2	Anhedral	0,2	-	-
Masa Fundamental	%	Forma de cristales	Tamaño (mm)	Evidencias y grado de alteración	Observaciones
Vidrio	15	-	< 0,1	-	-
Plagioclasa	10	-	< 0,2	-	-
Cuarzo	5	-	< 0,2	-	-
Observaciones				En la masa fundamental, se identifican vesículas con relleno parcial de zeolitas con hábito tabular.	
Clasificación					
Andesita porfídica de biotita					

Ilustración 12. Descripción microscópica de la muestra de roca ACS-UII-SC, representada por su microfotografía en Luz Polarizada Plana (izquierda) y en Luz Polarizada Cruzada (derecha). Microscopio utilizado: Nikon Eclipse Lv1000. Objetivo 5x.

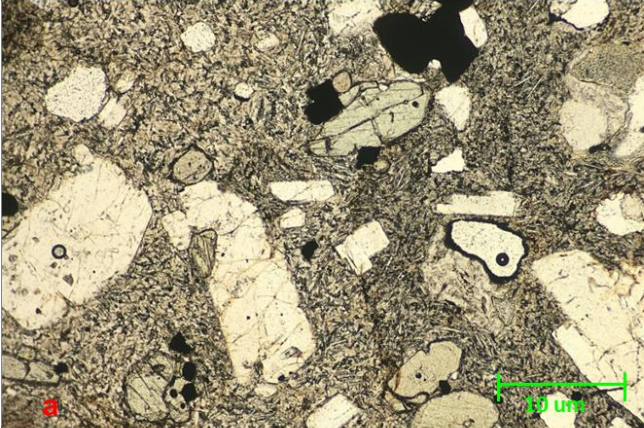
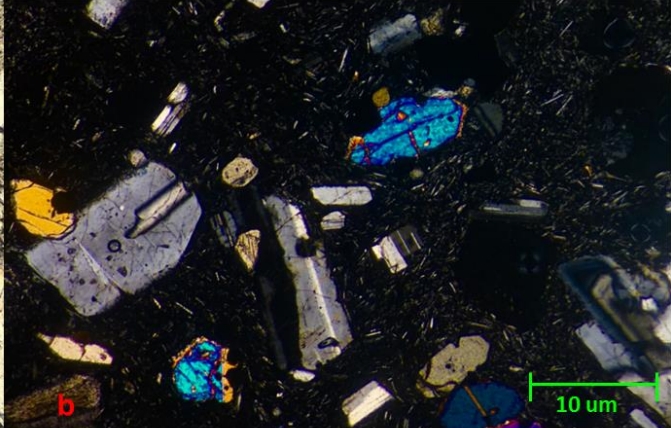
Código de muestra				ACS-UIII-SC	
Coordenadas (UTM WGS84 (19H))				Observaciones de terreno	Textura
Coordenada Este	Coordenada Norte	Altitud	Fecha	Muestra de roca obtenida en el margen oriental del salar, próximo a los bordes del sector centro-sur.	Porfídica, localmente glomeroporfídica, con masa fundamental hipocrystalina y pilotaxítica.
631672	7348400	3944	26-01-2018		
Microfotografía con Luz Polarizada Plana (LPP)				Microfotografía con Luz Polarizada Cruzada (LPX)	
					
Mineralogía	%	Forma de cristales	Tamaño (mm)	Evidencias y grado de alteración	Observaciones
Plagioclasa	70	Euhedral	0,4 - 3	-	Los fenocristales se muestran fragmentados y con evidencias de zonación concéntrica.
Ortopiroxeno	5	Subhedral a euhedral	0,3 - 0,9	Alteración hematítica leve en sus bordes.	Fenocristales fragmentados.
Clinopiroxeno	5	Subhedral	0,2 - 2,7	-	-
Opacos	2	Anhedral a subhedral	0,2	-	-
Masa Fundamental	%	Forma de cristales	Tamaño (mm)	Evidencias y grado de alteración	Observaciones
Vidrio	5	-	< 0,1	-	-
Plagioclasa	10	-	< 0,2	-	-
Cuarzo	3	-	< 0,1	-	-
Observaciones				Localmente, se identifican en algunas vesículas, algunos rellenos parciales de zeolitas con hábito radial y hojoso.	
Clasificación					
Toba cristalina de composición andesítica					

Ilustración 13. Descripción microscópica de la muestra de roca ACS-UIII-SC, representada por su microfotografía en Luz Polarizada Plana (izquierda) y en Luz Polarizada Cruzada (derecha). Microscopio utilizado: Nikon Eclipse Lv1000. Objetivo 5x.