

**ESTUDIO DE LA APLICACIÓN DE SENSORES REMOTOS PARA ANÁLISIS E
INTERPRETACION DE LA DISTRIBUCIÓN DE MINERALES EVAPORITICOS Y
DE VARIABLES FISICOQUÍMICAS DE LA SUPERFICIE EN EL SALAR DEL
HUASCO, REGIÓN DE TARAPACA**

Memoria entregada a la Universidad Mayor en cumplimiento de los requisitos para
optar al Título de Geólogo

JAIME MANUEL VILLEGAS DE LA FUENTE

Profesor Guía:

ANALÍA SILVANA DELSOUC

Miembros de la Comisión Evaluadora de Examen

XIMENA PRIETO

AUDREY GALLAUD PARQUET

ANALÍA SILVANA DELSOUC

SANTIAGO, CHILE

NOVIEMBRE, 2020

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo principal analizar como el uso de la teledetección puede ser aplicada al estudio superficial del Salar del Huasco, para definir e interpretar la distribución de minerales evaporíticos y variables fisicoquímicas, correspondientes a humedad, salinidad y temperatura.

El Salar del Huasco (47.5 km²) se ubica en la Región de Tarapacá, Chile y es uno de los 14 sitios RAMSAR declarados en el país, por albergar humedales de importancia internacional para la preservación de la biodiversidad. De ahí nace la necesidad de caracterizar las condiciones superficiales del salar. Para esto se planteó la idea de utilizar métodos de observación remota que faciliten el monitoreo de esta y otras zonas de importancia para el medio ambiente.

En este trabajo se utilizaron imágenes del satélite Landsat 8 sensores OLI/TIRS por la información que captura en sus 11 bandas espectrales. Para el caso de la mineralogía se utilizó la combinación de bandas (567) para la identificación de minerales evaporíticos, lo cual se complementó con análisis de firmas espectrales y se validó con el análisis de muestras de la costra salina superficial. Para el caso de las variables fisicoquímicas se calcularon distintos índices: NDMI y NDWI para humedad, SI y BI para salinidad y LST para la temperatura superficial. Los procesos de imágenes fueron validados a través de un análisis visual y estadístico entre los datos de los índices y datos del análisis de laboratorio de muestras de suelo superficial tomadas en el Salar del Huasco.

Del análisis mineralógico con muestras e imágenes se obtuvo un mapa de distribución superficial, compuesto por una variedad de sulfatos de Ca y Mg con presencia ocasional de arcillas de la misma composición. Por otro lado, el análisis de variables fisicoquímicas (humedad, salinidad y temperatura) entre muestras e imágenes evidenció una baja a regular correlación entre los datos, que se explica por la inestabilidad o variación temporal de los parámetros fisicoquímicos, encontrada al analizar imágenes tomadas de la zona cada 15 días (resolución temporal del satélite). Finalmente se llegó a la conclusión, de que la aplicación de teledetección para el análisis de la distribución de mineralogía superficial debe estar ligada a las características químicas de cada salar, por lo que dependerá de la cantidad de información superficial de terreno (firmas espectrales) que se tenga para comparar. Por otro lado, el análisis de variables fisicoquímicas, requiere una planificación de muestreo que sea concordante con los tiempos de captura de información del satélite a modo de calibración del método, el cual debiese ser realizado en las distintas estaciones del año, por las variaciones en las condiciones climáticas, además de ser posible, contar con una estación meteorológica cerca que provea información de estas condiciones, con el objetivo de mejorar el análisis con datos medidos diariamente.

CONTENIDO

1	Introducción.....	1
1.1	Exposición del Problema.....	1
1.2	Hipótesis	2
1.3	Objetivo.....	2
1.3.1	Objetivo General.....	2
1.3.2	Objetivos Específicos	2
1.4	Ubicación y Vías de Acceso.....	2
1.5	Geomorfología y Clima.....	3
1.6	Flora y Fauna.....	4
1.7	Metodología	5
1.7.1	Etapa Pre-terreno	6
1.7.2	Etapa de Terreno.....	7
1.7.3	Etapa Post-terreno.....	8
2	Marco Geológico	12
2.1	Antecedentes Generales.....	12
2.2	Antecedentes Geológicos	12
2.3	Geología Regional.....	13
2.4	Geología de la cuenca Collacagua-Rinconada	15
2.4.1	Geología del Salar del Huasco	16
3	Marco Teórico	17
3.1	Conceptos Relevantes	17
3.1.1	Salar	17
3.1.2	Evaporitas.....	17
3.2	Antecedentes de Teledetección	18
3.3	Fundamentos de Teledetección	19
3.3.1	Principios Básicos.....	19
3.3.2	Espectro Electromagnético.....	21

3.3.3	Satélite Landsat 8 OLI/TIRS	22
3.3.4	Espectrometría de Minerales	23
3.3.5	Información Superficial con Imágenes Multiespectrales	25
4	Resultados	28
4.1	Resultados Obtenidos	29
4.2	Análisis de imágenes	34
4.2.1	Reflectancia TOA.....	34
4.2.2	Distribución de Mineralogía de Superficie	35
4.2.3	Distribución de Variables Físicoquímicas en el Salar del Huasco	41
5	Discusiones.....	55
5.1	Limitaciones del estudio y Aspectos Metodológicos	55
5.2	Distribución y análisis de Unidades en el Salar del Huasco.....	56
5.3	Análisis de variables físicoquímicas en el Salar del Huasco	60
5.4	Variabilidad de los datos en el Tiempo.....	62
6	Conclusión	66
7	Referencias.....	69
8	Anexo.....	73
8.1	Obtención de Muestras en Terreno.....	73
8.1.1	Muestra de Suelo.....	73
8.1.2	Muestra de Costra Salina	74
8.2	Procedimiento a utilizar para la preparación de muestras de suelo y análisis de laboratorio para determinar contenido de agua, pH y conductividad eléctrica.....	75
8.3	Procedimiento de Laboratorio para medición de parámetros Físico Químicos.....	75
8.3.1	Análisis de pH.....	75
8.3.2	Análisis de Conductividad Eléctrica	76
8.3.3	Análisis de Humedad.....	78
8.4	Gráficos comparativos de Espectros Minerales	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio y principales vías de acceso, área del salar delimitada en cuadrángulo rojo. Modificado de Carta Caminera (MOP, 2016) (WGS84).	3
Figura 2. Ejemplos de flora y fauna en el salar. A; Zameioscirpus atacamensis, B; Deyeuxia curvula, Extraídas de Faúndez (2005). C; Phoenicoparrus chilensis, D; Vicugna vicugna, Extraídas de Calendario 2015 Humedales, CONAF.	5
Figura 3. Diagrama de flujo que resume las metodologías de trabajo. Elaboración propia	6
Figura 4. Mapa mostrando distribución de puntos de muestreo en terreno y sus respectivos códigos. Imagen superior: muestras para variables fisicoquímicas. Imagen inferior: muestras para mineralogía (WGS84). Imagen base LC08_L1TP_001074_20190623_20190704_01_T1, Landsat 8.....	8
Figura 5. Imagen satelital Landsat 8 sin procesar del área del Salar del Huasco, LC08_L1TP_001074_20190607_20190607_01_RT, del 07 de junio de 2019.....	10
Figura 6. Imagen satelital Landsat 8 sin procesar del área del Salar del Huasco, LC08_L1TP_001074_20190623_20190704_01_T1, del 23 de junio de 2019.	10
Figura 7. Diagrama resumen del trabajo con imágenes multiespectrales y sus derivados previos al terreno. Detalles de los derivados en el apartado de Marco Teórico. Elaboración Propia.	11
Figura 8. Perfil esquemático de las principales unidades morfoestructurales presentes entre los 14-26°S. Abreviaturas: CC, Cordillera de la Costa; DC, Depresión; AP, Antearco-Precordillera; COC, Cordillera Occidental; COR, Cordillera Oriental. Modificado de Charrier et al. (2007).....	15
Figura 9. Mapa geológico del Área Collacagua-Rinconada. La Cuenca del Salar del Huasco está delimitada con una línea negra. Las principales estructuras remarcadas con líneas de color. En color azul el Anticlinal Cordón Altos del Huasco, en rojo la Falla Huasco y en amarillo la Falla Carcanal de Napa. Modificado de la Hoja Collacagua-Rinconada escala 1:100.000 (Gardeweg y Selles, 2013)	16
Figura 10. Procesos y componentes básicos de teledetección. Elaboración propia.	20
Figura 11. Transformación de valores de las imágenes en el preprocesamiento. Extraído de Young et al. (2017).....	21
Figura 12. Regiones del espectro electromagnético y el espectro visible. Extraído de Pérez (2007).....	21

Figura 13. Ejemplo de costra lisa asociada a suelo seco, muestreada en el Salar del Huasco.	29
Figura 14. Ejemplo de costra rugosa asociada a suelo húmedo, muestreada en el Salar del Huasco.	30
Figura 15. Comparación de imágenes de Landsat 8 con y sin corrección atmosférica. A: imagen 06/07/2019 sin corregir. B imagen 06/07/2019 con corrección. C: imagen 06/23/2019 sin corregir. D: imagen 06/23/2019 con corrección.	35
Figura 16. Imagen Landsat 8 del 23 de junio de 2019 con combinación de bandas (567). Elaboración propia.	36
Figura 17. Imagen del 23 de junio de 2019 con combinación de bandas (567) RGB, con puntos de muestreo mineral y resultados de los análisis de espectroscopia de reflectancia con equipo TerraSpec. Elaboración Propia.....	40
Figura 18. Mapa de distribución de unidades mineralógicas del Salar del Huasco que integra la información obtenida del muestreo en terreno y los procesos de imágenes.....	41
Figura 19. Mapa comparativo entre los datos de humedad de laboratorio y los procesos de imágenes (NDMI). Elaboración propia.	43
Figura 20. Mapa comparativo entre los datos de humedad de laboratorio y los procesos de imágenes (NDWI). Elaboración propia.....	45
Figura 21. Mapa comparativo entre los datos de salinidad de laboratorio y los procesos de imágenes (BI). Elaboración propia.	48
Figura 22. Mapa comparativo entre los datos de salinidad de laboratorio y los procesos de imágenes (SI). Elaboración propia.	50
Figura 23. Mapa comparativo entre los datos de temperatura de terreno y los procesos de imágenes (LST). Elaboración propia.....	53
Figura 24. Mapa mineral del Salar del Huasco con puntos de muestreo de otros autores. Minerales listados en Tabla 15. Elaboración propia.	58
Figura 25. Comparación entre índices NDMI de la imagen del 07 y 23 de junio. Círculos rojos señalan las zonas del salar con cambios notorios.....	62
Figura 26. Comparación entre imágenes índices de distintas fechas. Secuencia superior: Temperatura (LST). Secuencia central: Humedad (NDMI). Secuencia inferior: Salinidad (SI). Elaboración propia.	63
Figura 27. Ejemplo de toma de muestra de suelo en trabajo de campo. Elaboración propia.	73

Figura 28. Ejemplo de fragmento de costra superficial para muestra mineralógica. Elaboración propia.	74
Figura 29. Muestras para análisis en agitador. Elaboración propia.....	77
Figura 30. Ejemplo de medición de pH en laboratorio. Elaboración propia.	77
Figura 31. Medidor de conductividad eléctrica portátil utilizado en medición en laboratorio. Elaboración propia.....	78

SOLO USO ACADÉMICO

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Firmas espectrales de minerales evaporíticos, (A) natrón, (B) termonatrita, (C) carnalita, (D) bischofita, (E) mirabilita, (F) thenardita. Eje “y” sin unidad. Los números en la figura indican el porcentaje de reflectancia de cada espectro a los 1000 nm. Extraído de Drake (1995).	24
Gráfico 2. Firmas espectrales de principales minerales evaporíticos. Extraído de Howari et al. (2002).	25
Gráfico 3. Ejemplo de correlación buena. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, el espectro del pixel de la imagen y el espectro de referencia de la biblioteca de ENVI.	37
Gráfico 4. Ejemplo de correlación regular. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, el espectro del pixel de la imagen y el espectro de referencia de la biblioteca de ENVI.	38
Gráfico 5. Ejemplo de correlación mala. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, el espectro del pixel de la imagen y el espectro de referencia de la biblioteca de ENVI.	38
Gráfico 6. Correlación entre los datos de humedad de laboratorio y los datos de procesos de imágenes (NDMI).	44
Gráfico 7. Correlación entre los datos de humedad de laboratorio y los datos de procesos de imágenes (NDWI).	46
Gráfico 8. Correlación entre los datos de salinidad de laboratorio y los datos de procesos de imágenes (BI).	49
Gráfico 9. Correlación entre los datos de salinidad de laboratorio y los datos de procesos de imágenes (SI).	51
Gráfico 10. Correlación entre los datos de temperatura de terreno y los datos de procesos de imágenes (LST).	54
Gráfico 11. Firma espectral de halita. Extraída de la biblioteca de espectros de ENVI 5.3.	60
Gráfico 12. Valores promedio de temperatura extraídos de índices de imágenes de distintas fechas. Elaboración propia.	64
Gráfico 13. Valores promedio de humedad extraídos de índices de imágenes de distintas fechas. Elaboración propia.	65
Gráfico 14. Valores promedio de salinidad extraídos de índices de imágenes de distintas fechas. Elaboración propia.	65

Gráfico 15. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI. Espectro TerraSpec con absorción de agua.	79
Gráfico 16. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.	79
Gráfico 17. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI. Espectro TerraSpec con absorción de agua.	80
Gráfico 18. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI. Espectro TerraSpec con absorción de agua.	80
Gráfico 19. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI. Espectro TerraSpec con absorción de agua.	80
Gráfico 20. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.	81
Gráfico 21. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI. Espectro TerraSpec con absorción de agua.	81
Gráfico 22. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI. Espectro TerraSpec con absorción de agua.	81
Gráfico 23. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.	82
Gráfico 24. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.	82
Gráfico 25. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.	82
Gráfico 26. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.	83
Gráfico 27. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.	83
Gráfico 28. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI. Espectro TerraSpec con absorción de agua.	83
Gráfico 29. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.	84
Gráfico 30. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.	84
Gráfico 31. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.	84

Gráfico 32. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.	85
Gráfico 33. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.	85
Gráfico 34. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.	85
Gráfico 35. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.	86
Gráfico 36. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.	86
Gráfico 37. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.	86
Gráfico 38. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.	87
Gráfico 39. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.	87
Gráfico 40. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.	87
Gráfico 41. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales minerales evaporíticos y sus respectivas formulas químicas. Jones y Deocampo (2004).	17
Tabla 2. Características de las bandas OLI y TIRS. Las bandas TIRS son remuestradas a 30 m. Modificado de Ariza (2013).	22
Tabla 3. Índices de vegetación utilizados en la extracción de la temperatura. *: factor extraído de estadísticas de los datos de la imagen a utilizar. **: cantidad de cubierta vegetal verde en base a NDV y WDI.	28
Tabla 4. Resultados de los análisis mineralógicos de las muestras de la costra salina mediante espectrometría de reflectancia. Minerales numerados en orden de abundancia. *: Espectro con absorciones de agua.	30
Tabla 5. Comparación entre datos de parámetros fisicoquímicos y de muestras de costra superficial analizadas con equipo Terraspec en puntos coincidentes de muestreo.	31
Tabla 6. Resultados de análisis de laboratorio de variables fisicoquímicas de las muestras y los valores de temperatura medidos en terreno.	32
Tabla 7. Estadística descriptiva de los valores de las variables fisicoquímicas.	33
Tabla 8. Tabla de clasificación de suelos salinos en base a valores de conductividad eléctrica utilizada en agricultura. Extraído de Ibáñez (2008).	34
Tabla 9. Clasificación de la correlación entre los espectros obtenidos del procesamiento de la imagen Landsat 8 del 23 de junio de 2019 y los obtenidos del análisis de las muestras con equipo TerraSpec, con los resultados de los análisis minerales para cada muestra.	38
Tabla 10. Comparación entre los datos de humedad de laboratorio y los datos de procesos de imágenes (NDMI).	43
Tabla 11. Comparación entre los datos de humedad de laboratorio y los datos de procesos de imágenes (NDWI).	45
Tabla 12. Comparación entre los datos de salinidad de laboratorio y los datos de procesos de imágenes (BI).	48
Tabla 13. Comparación entre los datos de salinidad de laboratorio y los datos de procesos de imágenes (BI).	50
Tabla 14. Comparación entre los datos de temperatura de terreno y los datos de procesos de imágenes (LST).	53
Tabla 15. Puntos de muestreo de otros autores dentro del Salar del Huasco. Elaboración propia.	58

Tabla 16. Ejemplo de rotulado utilizado en la toma de muestras durante el trabajo de campo. Elaboración propia..... 73

SOLO USO ACADÉMICO

1 INTRODUCCIÓN

1.1 EXPOSICIÓN DEL PROBLEMA

La zona del Altiplano-Puna (en los Andes Centrales) se desarrolla a partir de los 14° latitud sur a una altitud promedio de 3.900 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m), en la separación de las cordilleras Occidental y Oriental del Perú. El relieve presente en el altiplano y el desarrollo de un clima árido en la zona dieron lugar a una serie de cuencas endorreicas en las cuales se formaron salares y lagos salados (Argollo, 2006), dentro de los cuales están, los salares de Uyuni, Coposa, Empexa, y Huasco (Stoertz y Ericksen, 1974). Este último corresponde a uno de los 14 sitios designados como Humedal de Importancia Internacional (RAMSAR), para la preservación de la biodiversidad, por la flora y fauna que alberga.

En Chile, el estudio y monitoreo de los salares, incluido el Salar del Huasco, ha sido conducido principalmente por la Dirección General de Aguas (DGA) en colaboración con distintas casas universitarias como la Pontificia Universidad Católica, Universidad de Antofagasta, entre otras. En el Salar del Huasco se han realizado estudios de caracterización de la flora y fauna, así como también de los sistemas hidrogeológicos y químicos de la cuenca, entre estos destacan los de Muñoz *et al.* (2009), López *et al.* (1999), López y Millas (2002) y Acosta y Custodio (2008), que también han contribuido a establecer las relaciones de estos sistemas con las formaciones rocosas y depósitos que los rodean o contienen. Los estudios geológicos de Stoertz y Ericksen (1974), Vila (1975) y Gardeweg y Sellés (2013) han permitido caracterizar en forma general la costra salina de varios salares incluido el Salar del Huasco.

Existen estudios acerca de la aplicación de sensores remotos en el reconocimiento de minerales en los salares (Chapman *et al.*, 1989; Flahaut *et al.*, 2017) y caracterización de suelo en el área de agricultura (Khan *et al.*, 2001; Lhissou *et al.*, 2014). En el Salar del Huasco, en particular, el único antecedente que se tiene en cuanto al trabajo con imágenes satelitales es el trabajo de Véliz (2018) quien utiliza sensores remotos para realizar un análisis espaciotemporal de la distribución de minerales evaporíticos en el salar.

En este contexto se tiene una comprensión general del sistema del Salar del Huasco, sin embargo, aún se desconoce la aplicabilidad de los sensores remotos para la caracterización fisicoquímica de la superficie, y aún queda por desarrollar el área de reconocimiento mineral de la costra salina. Por esto, desarrollar un método que permita entender la distribución espacial de estas variables en la superficie del salar utilizando sensores remotos, constituiría un aporte en cuanto a monitoreo ambiental, de este y otros salares, humedales (sean sitios RAMSAR o no) y para la preservación de la biodiversidad.

Debido a la ausencia de una estación meteorológica activa cercana al Salar del Huasco, el uso de imágenes multiespectrales y sensores remotos serviría de apoyo para obtener información de las condiciones superficiales, lo que sería de utilidad al momento de planificar muestreos. Además, de demostrarse su aplicabilidad, podría extenderse su uso al monitoreo superficial de suelos agrícolas.

1.2 HIPÓTESIS

La mineralogía superficial de la costra de un salar, así como los parámetros fisicoquímicos de la superficie, correspondientes a temperatura (T°), humedad y salinidad, pueden ser determinados a través del procesamiento de imágenes multiespectrales del satélite Landsat 8 OLI/TIRS.

En consecuencia, si estos datos de imágenes son concordantes con datos reales obtenidos de la costra salina, sería posible caracterizar mediante sensores remotos, cuerpos salinos como el Salar del Huasco, definiendo tanto su zonación mineral superficial, como también las características fisicoquímicas de la superficie.

1.3 OBJETIVO

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Definir zonaciones minerales y de características fisicoquímicas en la costra del salar del Huasco, obteniendo información de imágenes satelitales de Landsat 8 OLI/TIRS y comparándola con datos de las mismas variables obtenidos directamente del salar. Para describir el estado superficial del salar.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar, mediante procesos de imágenes satelitales Landsat 8 OLI/TIRS la distribución de minerales y de parámetros fisicoquímicos en la superficie del salar.
- Realizar una caracterización mineralógica y fisicoquímica de la costra mediante obtención de muestras superficiales en terreno.
- Establecer si existe correlación entre los valores de variables fisicoquímicas obtenidas del muestreo de la costra superficial y suelo salino en terreno, con valores obtenidos a través del procesamiento de imágenes satelitales.

1.4 UBICACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

El área de estudio se encuentra en la Región de Tarapacá, 160 kilómetros (km) al este de la ciudad de Iquique, específicamente, 50 km al noreste del poblado de Pica (Figura 1). Dicha zona, está comprendida entre los $20^{\circ}15'00''$ y los $20^{\circ}20'40''$ latitud Sur, y desde los $68^{\circ}54'00''$ hasta los $68^{\circ}47'20''$ longitud Oeste.

El acceso al Salar del Huasco se realiza desde la ciudad de Iquique por la ruta 16 hacia el este, conectando con la ruta Panamericana o 5 Norte hacia el sur, hasta la ciudad de Pozo Almonte, para luego tomar la ruta A-65. Siguiendo por esta ruta se

llega hasta la ruta A-675, la cual conecta con los caminos internos del salar. Otra alternativa de acceso es desde el poblado de Pica, utilizando la ruta A-685, la cual conecta con la ruta A-675 hacia el salar (Figura 1). Los caminos del salar corresponden a la ya nombrada ruta A-675, que conecta por el este, la ruta A-97-B que bordea por el este y la ruta A-967 que bordea el salar por el oeste.

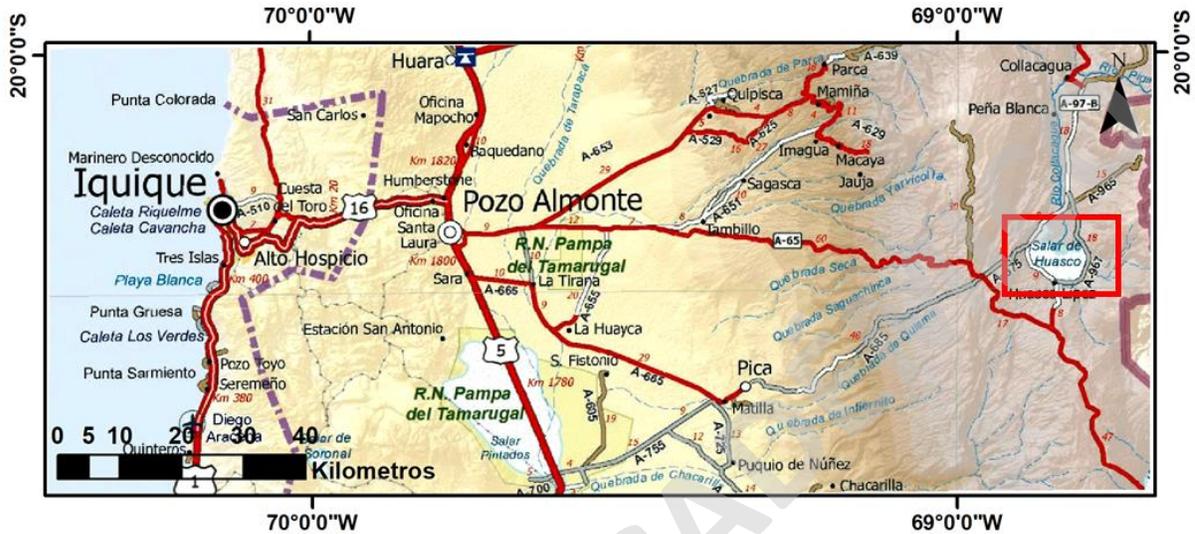


Figura 1. Ubicación del área de estudio y principales vías de acceso, área del salar delimitada en cuadrángulo rojo. Modificado de Carta Caminera (MOP, 2016) (WGS84).

1.5 GEOMORFOLOGÍA Y CLIMA

El Salar del Huasco posee una superficie de 47.5 km² y forma parte de la cuenca homónima con una superficie de 1.500 km², la cual se ubica en una zona de depresión intermontana en el altiplano andino chileno (Gardeweg y Sellés, 2015). Las alturas a lo largo de la cuenca superan los 4.000 m s.n.m., salvo en el salar, el cual tiene una altura promedio de 3.800 m s.n.m. La cuenca está delimitada al oeste por la meseta de los Altos de Pica, con alturas de 5.180 m s.n.m., al este limita con el cordón oriental de la Cordillera de Los Andes, el cual delimita la frontera con Bolivia y está compuesto por edificios volcánicos con alturas de 4.900 m s.n.m. (Acosta y Custodio, 2008).

La cuenca que alberga al salar presenta dos tipos de climas, divididos en la mitad norte y sur de esta. La mitad norte, presenta un clima de tundra por efecto de altura que se desarrolla desde los 3.700 m s.n.m. (Acosta y Custodio, 2008) con precipitaciones estivales desde los 70 hasta los 220 milímetros (mm) aproximadamente, concentradas desde diciembre a marzo y las temperaturas medias no superan los 5 grados Celsius (°C) según datos de la estación Coyacagua de la DGA. Estas lluvias son de origen convectivo con régimen de tormenta, de

masas de aire húmedo provenientes de zonas amazónicas (Invierno Altiplánico). Por otra parte, el clima presente al sur de la cuenca, en el Salar del Huasco, corresponde a desértico frío o marginal de altura, con lluvias concentradas en los meses de diciembre a marzo, menos abundantes que en la zona norte, desde los 20 hasta los 160 mm, y con temperaturas que van desde los -20°C en invierno (junio a septiembre) a más de 20°C en verano (diciembre a febrero) (Vega, 2016).

1.6 FLORA Y FAUNA

El Salar del Huasco, fue incluido en la lista de sitios RAMSAR en 1996, tratado internacional para la protección de humedales, por ser un lugar con importantes reservas de agua, hospedando una gran biodiversidad, siendo necesaria la conservación del ecosistema.

La flora presente en el salar corresponde principalmente a calpaco (*Zameioscirpus atacamensis*), vega suave (*Lobelia oligophylla*), paja brava (*Festuca orthophylla*), paco (*Oxychloea andinus*), pasto vicuña (*Deyeuxia curvula*), sike (*Hypochaeris taraxacoide*) y pupuse de agua (*Warneria wedelli*) (Figura 3) (Espinosa et al., 2013).

La fauna presente corresponde principalmente al flamenco andino (*Phoenicoparrus andinus*), flamenco chileno (*Phoenicoparrus chilensis*), piuquén (*Chloephaga melnoptera*), vicuña (*Vicugna vicugna*), llama (*Lama glama*), pato juarjual (*Lophonetta specularioides*), colegial (*Lessonia rufa*) y suri (*Pterocnema tarapacensis*) (Figura 3) (Carrasco et al., 2015).

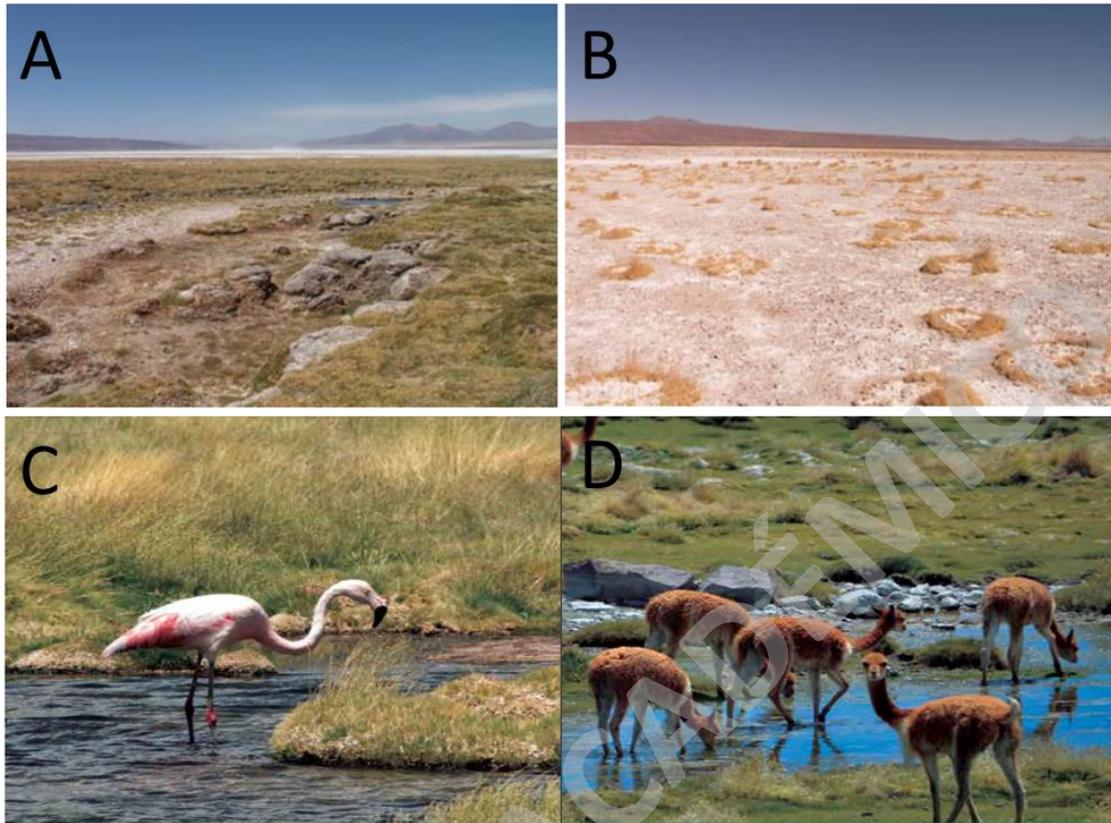


Figura 2. Ejemplos de flora y fauna en el salar. A; *Zameioscirpus atacamensis*, B; *Deyeuxia curvula*, Extraídas de Faúndez (2005). C; *Phoenicoparrus chilensis*, D; *Vicuña vicugna*, Extraídas de Calendario 2015 Humedales, CONAF.

1.7 METODOLOGÍA

La metodología utilizada durante este estudio se divide en tres etapas, en función de las diferentes fases de desarrollo del trabajo, correspondientes a pre-terreno, terreno y post-terreno.

En una primera etapa, el trabajo se enfocó en generar una base de conocimiento geológico y del uso de sensores remotos, tanto en los fundamentos, como en las aplicaciones en salares y suelos. También se realizó un trabajo preliminar con imágenes Landsat 8 OLI/TIRS utilizando los *softwares* ENVI 5.3 y ArcGis 10.3 con el objetivo de planificar las actividades en terreno y diseñar un plan de muestreo (Figura 3).

Conjuntamente se investigó acerca de protocolos de muestreo en costras salinas y procedimientos de determinación de pH, humedad, T° y salinidad, en laboratorio con apoyo del Doctor (Dr.) Mauricio Molina (Profesor de la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor).

La segunda etapa corresponde a la salida de terreno (junio de 2019), donde se realizó la toma de muestras y obtención de datos de temperatura superficial en base a los protocolos establecidos (Anexo 8.1).

En una tercera etapa, se comparó la información derivada de las muestras obtenidas de la superficie del salar y determinada a través de análisis de laboratorio (pH, humedad, salinidad) con los datos obtenidos a través del procesamiento de una imagen Landsat 8 OLI/TIRS de fecha 23 de junio de 2019 (fecha más cercana a la obtención de muestras en terreno) (Figura 3).

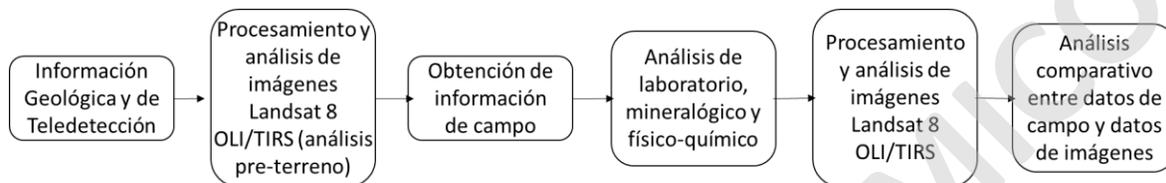


Figura 3. Diagrama de flujo que resume las metodologías de trabajo. Elaboración propia

1.7.1 ETAPA PRE-TERRENO

- **Revisión bibliográfica:** Fue enfocada en diversos estudios realizados en salares del norte de Chile y estudios geológicos del Salar del Huasco. Incluyendo casos de estudio en salares, casos donde se hayan utilizado técnicas de teledetección para obtener información física del suelo a partir de imágenes satelitales, así como también sobre los fundamentos de teledetección. Además, se llevó a cabo una búsqueda y estudio de metodologías y protocolos de muestreo y análisis de laboratorio, apoyado por el Dr. Mauricio Molina (Facultad de Agronomía, Universidad Mayor).
- **Obtención de imágenes:** En este trabajo se utilizaron imágenes del satélite Landsat 8 OLI/TIRS de varias fechas (mayo y agosto de 2018, marzo, abril y junio de 2019) además de imágenes del software Google Earth (CNES/Airbus, 2019) para analizar las condiciones de terreno y de planificación de muestreo. Las imágenes Landsat 8 se obtuvieron de manera gratuita desde la página <https://earthexplorer.usgs.gov/> del Servicio Geológico de los Estados Unidos y corresponden a una serie de imágenes del salar con resolución temporal de 15 días.
- **Análisis de imágenes:** Las imágenes fueron procesadas y trabajadas con el software ENVI 5.3, con el objetivo de obtener información preliminar acerca de la mineralogía superficial del salar y datos de parámetros fisicoquímicos del suelo (humedad, salinidad y T°). Para definir áreas de interés y planificar el muestreo en terreno, enfocándolo en puntos que se consideraran representativos de zonas más grandes, optimizando el tiempo disponible.

1.7.2 ETAPA DE TERRENO

La salida a terreno o viaje de campo se realizó en junio de 2019 desde el jueves 13 hasta el miércoles 19 abarcando 5 días de trabajo y 2 de viaje en total. Cabe destacar, que el trabajo fue realizado en conjunto con Felipe Hernández, Memorista de Geología 2019 de la Universidad Mayor, cuyo trabajo se enfocó en caracterizar la estratigrafía del depósito del salar y su evolución como sistema salino. A pesar de compartir la mayoría de los puntos de muestreo la metodología fue distinta para ambos trabajos.

- **Muestreo de costra superficial y suelo salino:** Con el objetivo de determinar la espectroscopía mineral y las características fisicoquímicas de la superficie del salar (pH, humedad y conductividad eléctrica), se ejecutó el plan de muestreo previamente diseñado en base a la observación de imágenes satelitales del salar. En términos generales este consistió en la extracción de muestras superficiales de suelo (10 cm de profundidad) en al menos 11 puntos del salar (Figura 4), con un peso aproximado entre 0.5 y 1 kg. Las muestras se transportaron en bolsas plásticas rotuladas, dentro de un *cooler*, utilizando bolsas de gel frío para mantener una temperatura de entre 0°C y 4°C, con el objetivo de preservar la humedad original de las muestras. Por otro lado, para las muestras mineralógicas se extrajo parte de la costra superficial del salar, en los mismos puntos de muestreo de suelo. Las muestras fueron envueltas en papel suave y transportadas en bolsas plásticas para evitar que se disgregaran. El total de muestras recolectadas durante la campaña fueron 18 correspondientes para análisis de parámetros fisicoquímico y 29 ejemplares de la costra salina para análisis de espectroscopía mineral (Figura 4).

El muestreo se enfocó principalmente en el sector oeste del salar, debido a la restricción por parte de Carabineros de Chile de acceder a los caminos del sur y este del salar, por el riesgo asociado al tránsito de vehículos dedicados al tráfico de especies, desde y hacia la frontera con Bolivia.

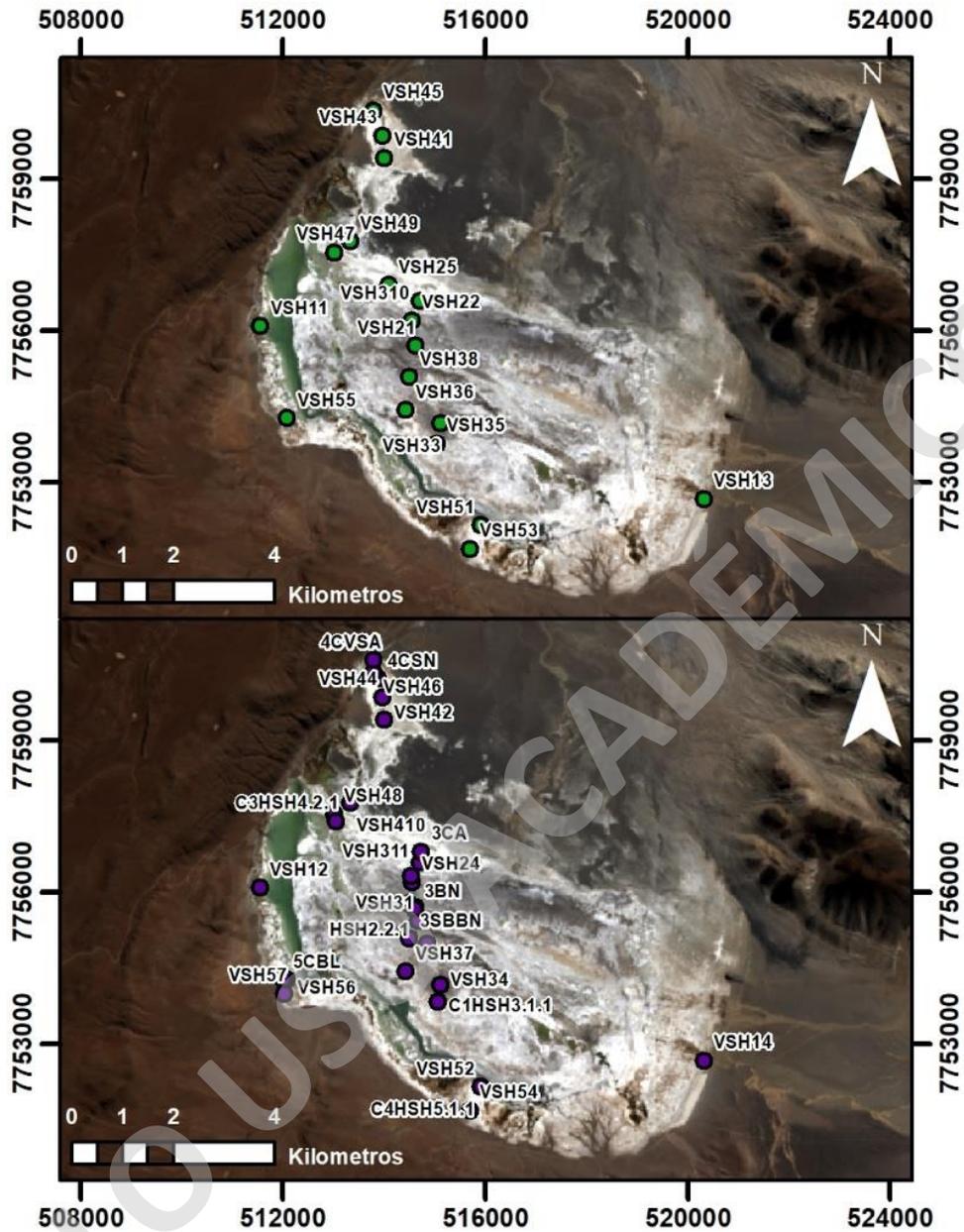


Figura 4. Mapa mostrando distribución de puntos de muestreo en terreno y sus respectivos códigos. Imagen superior: muestras para variables fisicoquímicas. Imagen inferior: muestras para mineralogía (WGS84). Imagen base LC08_L1TP_001074_20190623_20190704_01_T1, Landsat 8.

- **Medición de temperatura en terreno:** En los puntos de muestreo se realizó una perforación superficial en la cual se insertó un termómetro de laboratorio, con el cual se midió la temperatura.

1.7.3 ETAPA POST-TERRENO

- **Análisis de laboratorio:** En las muestras recolectadas en el salar se realizaron los siguientes análisis en los laboratorios de la Universidad Mayor,

bajo la supervisión del Dr. Mauricio Molina, Ingeniero Agrónomo, cuyos procedimientos se encuentran descritos en detalle en el Anexos 8.3

- Humedad Relativa: El contenido de agua se calculó utilizando la diferencia de masa entre el peso inicial de una muestra, entre 10 y 20 gramos (g), pre secado a 105°C y el peso final posterior al secado.
- pH: se determinó en una solución de 10 g de muestra con agua, cloruro de potasio o cloruro de calcio. Esta solución se agitó, se dejó reposar por unas horas y se midió el pH en el sobrenadante.
- Conductividad eléctrica: Se determinó en una solución de 10 g de muestra con agua, cloruro de potasio o cloruro de calcio. Esta solución se agitó, se dejó reposar por unas horas y se midió la conductividad eléctrica en el sobrenadante.

Es necesario mencionar que, durante el proceso de preparación de las muestras, por una confusión se realizó un proceso de secado al aire, previo al secado a horno, lo que supuso una pérdida de humedad y por lo tanto una pérdida de representatividad de las condiciones reales.

- **Análisis Mineralógico:** La mineralogía se determinó utilizando el método de espectroscopia de reflectancia con un equipo TerraSpect, en una muestra de 10 x 10 cm de superficie y de al menos 10 g de masa. Esto fue realizado por la Geóloga Mariana Ordóñez.
- **Obtención de imágenes:** Para este estudio se utilizaron dos imágenes del satélite Landsat 8 OLI/TIRS del 07 de junio de 2019 (Figura 5) y 23 del junio de 2019 (Figura 6), fechas más cercanas al viaje de terreno, con el objetivo de que la obtención de información a partir de las imágenes sea lo más concordante a la obtenida a través del análisis de las muestras de terreno.

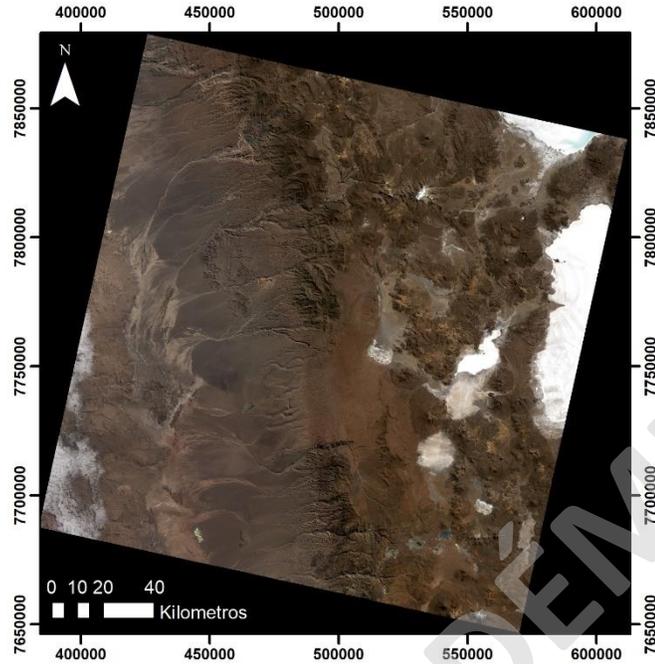


Figura 5. Imagen satelital Landsat 8 sin procesar del área del Salar del Huasco, LC08_L1TP_001074_20190607_20190607_01_RT, del 07 de junio de 2019.

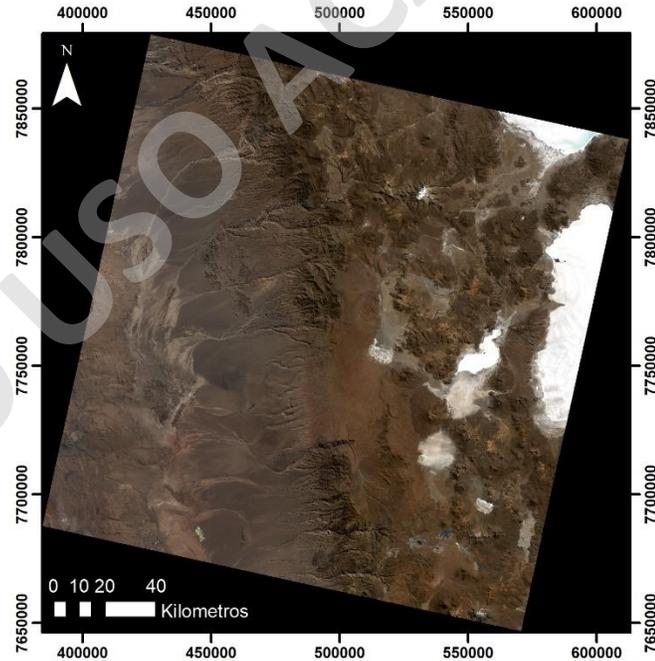


Figura 6. Imagen satelital Landsat 8 sin procesar del área del Salar del Huasco, LC08_L1TP_001074_20190623_20190704_01_T1, del 23 de junio de 2019.

- Corrección y preprocesamiento de imágenes:** Se realizó el recorte de la zona de estudio a trabajar, luego para la corrección de las imágenes de Landsat 8 OLI se utilizó el método de conversión a valores de reflectancia al tope de la Atmosfera o “*Top of Atmosphere*” (TOA), el cual combina la reflectancia superficial y atmosférica al realizar la normalización de la irradiancia del sol. También se aplicó el método de conversión a valores de reflectancia al fondo de la atmosfera o “*Bottom Of Atmosphere*” (BOA), el cual requiere de una corrección previa para tomar en cuenta los efectos atmosféricos (nubosidad) en la radiancia en la imagen. Sin embargo, al final se optó por el primero, ya que mostró mejores resultados. Por otro lado, para las imágenes Landsat 8 TIRS se utilizó el método de conversión a radiancia (Figura 7).
- Análisis de imágenes:** Con las imágenes corregidas y pre-procesadas, se realizaron combinaciones de bandas y operaciones matemáticas entre las bandas que componen las imágenes (detalles en el capítulo Marco Teórico). Esto con el objetivo de obtener información de la distribución espacial de las variables involucradas en este estudio, T°, humedad y salinidad (físicoquímicas), y mineralogía (Figura 7).

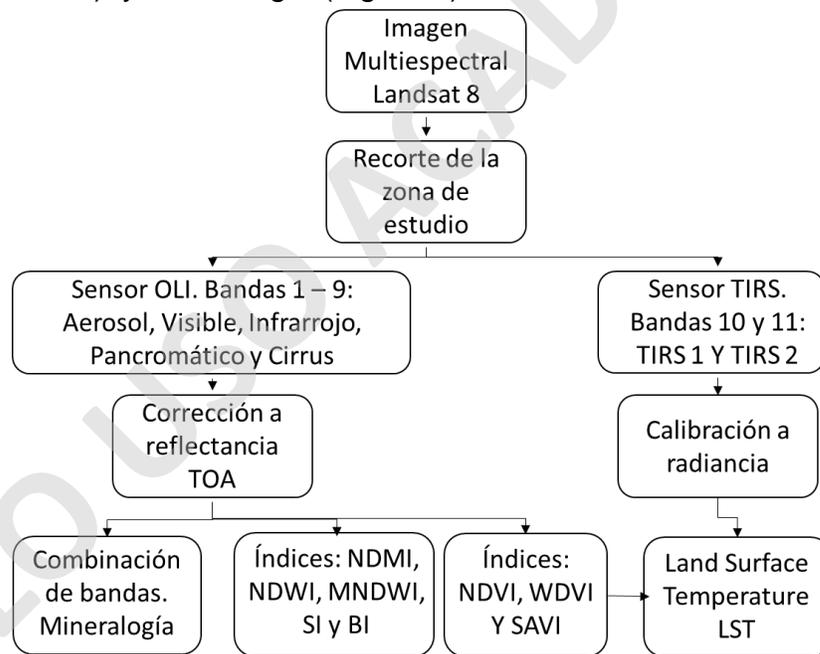


Figura 7. Diagrama resumen del trabajo con imágenes multiespectrales y sus derivados previos al terreno. Detalles de los derivados en el apartado de Marco Teórico. Elaboración Propia.

Comparación de datos de terreno y de imágenes: Para el caso de la mineralogía se realizó una comparación entre los espectros minerales obtenidos a través del análisis de las muestras con equipo TerraSpect, y los obtenidos a partir del trabajo con imágenes satelitales en el software ENVI 5.3. En adición, se compararon los resultados de los análisis de espectros

con la combinación de bandas (567) RGB (Flahaut *et al.*, 2017) para reconocer mineralogía.

En cuanto los parámetros fisicoquímicos, con el objetivo de determinar relaciones entre los parámetros determinados en los puntos de muestreo y las imágenes procesadas, para cada parámetro se extrajo información de los píxeles coincidentes con puntos geográficos de obtención de muestras, se comparó con el valor analítico y se establecieron relaciones estadísticas.

2 MARCO GEOLÓGICO

2.1 ANTECEDENTES GENERALES

En los salares de la precordillera y cordillera ubicados al interior de Iquique se han realizado numerosos estudios, enfocados principalmente en temas hidrológicos. Muñoz *et al.* (2009), en un trabajo colaborativo entre la Dirección General de Aguas (DGA), el Ministerio de Obras Públicas (MOP) y la Pontificia Universidad Católica (PUC); llevaron a cabo un levantamiento de información hidrogeológica en la zona norte del país, incluyendo las regiones de Tarapacá, Antofagasta, Copiapó, Arica y Parinacota, con el objetivo de instalar nuevas estaciones meteorológicas y definir los recursos hídricos del altiplano en las zonas definidas de carácter prioritario. Espinosa *et al.* (2013), publicado por CIREN con apoyo de CORFO, describen la flora y la fauna presente en varios humedales de las zonas de Arica y Parinacota, incluyendo también Huasco Grande Vegas y Chullumpine Vegas, ubicados en el área del Salar del Huasco

En el Salar del Huasco se han realizado algunos estudios, entre estos, destacan los de Acosta y Custodio (2008), quienes llevaron a cabo una investigación acerca de los impactos ambientales que tendría la extracción de agua subterránea con fines mineros en el Salar del Huasco, para lo cual realizan una descripción del sistema hídrico de la cuenca del salar, entrada y salida de agua, abarcando las formaciones geológicas presentes, la textura del suelo (para evaluar la infiltración), el promedio de precipitaciones y las tasas de evaporación.

2.2 ANTECEDENTES GEOLÓGICOS

En términos de geología regional el trabajo de Argollo (2006) entrega información general de las características geológicas y morfoestructurales de la Cordillera de Los Andes indicando sus segmentos de norte a sur y las distintas unidades morfoestructurales de cada una de oeste a este.

El principal trabajo en el ámbito geológico en la zona corresponde a la carta geológica Collacagua-Rinconada, escala 1:100.000, realizada por Gardeweg y Sellés (2013), en la que realizan una reseña geológica, estructural y de geología económica de la zona.

Stoertz y Ericksen (1974), realizan un estudio general de varios salares, incluido el Salar del Huasco, y lagos en las zonas del norte de Chile, noroeste de Argentina y suroeste de Bolivia, haciendo una división de los salares según ubicación geográfica, (Costa y Valles Central, Cuenca de Atacama, zonas Alto-andinas), según el tipo de costra que presenta (dura o suave) y las características de esta, además de definir morfologías y mineralogías principales en cada salar descrito.

Vila (1975) por otro lado, realiza una reseña de 25 salares, dentro de la misma zona del trabajo anterior, entregando características generales de hidro químicas, estratigrafía y geológica estructural del área, además de definir una mineralogía general para los salares andinos (sulfatos, cloruros de sodio, potasio, calcio y magnesio).

López *et al.* (1999), llevan a cabo una caracterización geoquímica del Salar del Huasco, así como de sus aspectos geológicos, posteriormente López y Millas (2002), utilizan los datos del trabajo anterior para definir la evolución geoquímica de las salmueras del salar en condiciones controladas.

2.3 GEOLOGÍA REGIONAL

La geología actual de los Andes Centrales en el norte de Chile se originó durante el último ciclo de deformación que involucra al margen occidental de Sudamérica, el ciclo tectónico Andino, que se desarrolla desde el Jurásico Temprano tardío hasta la época actual y que da forma a toda la cadena montañosa de Los Andes. Este ciclo inicia y se caracteriza por el reinicio de la subducción, la cual había estado ausente durante el ciclo anterior, desarrollando un arco magmático paralelo al margen (norte-sur) en una fase temprana, el cual fue migrando al este en una fase tardía. Debido a la cantidad de información que se tiene de este ciclo, fue dividido en tres etapas para facilitar su entendimiento (Charrier *et al.*, 2007). Las etapas descritas a continuación se enfocan principalmente en cómo se desarrolló este ciclo en la zona norte de Chile entre los 14°S y 26°S, donde se ubica el área de estudio.

La primera etapa de este ciclo se desarrolló desde el Jurásico Temprano tardío al Cretácico Temprano tardío. Este ciclo se caracterizó por el reinicio de la subducción, y la subsecuente formación de un arco magmático de orientación norte-sur (actual Cordillera de la Costa) (Figura 8) y una cueca de tras arco hacia el este. Debido a que la corteza subductada inicialmente era vieja y fría, durante la formación del arco las condiciones de esfuerzo dominante eran de carácter extensivo, por esto, en una primera etapa del ciclo aparte del material volcánico producto del desarrollo del arco, en la cuenca de tras-arco predominaban sedimentos de carácter marino-continental debido a procesos de transgresión y regresión. Finalizando este ciclo, la actividad volcánica en el arco disminuye y los sedimentos de la cuenca son únicamente de carácter continental (Charrier *et al.*, 2007).

La segunda etapa del ciclo va desde el Cretácico Temprano tardío al Paleógeno Temprano. Durante este ciclo se produce un importante cambio en la mecánica del

margen y en consecuencia en la paleogeografía de la región, la disminución del ángulo de subducción (tipo chilena) ocasiono que el arco volcánico migrara hacia el este una distancia considerable, formando una amplia región de antearco al oeste y una cuenca de ante país al este. El cambio también dio origen a un periodo de intensa deformación que elevo y erosiono las unidades jurásicas y cretácicas (Fase Peruana). Este segundo ciclo se caracteriza por una intensa actividad volcánica, representada por grandes plutones y depósitos volcánicos andesíticos y dacítico-riolíticos, ubicados en cuencas controladas por fallas generadas por esfuerzos extensivos producto del emplazamiento de los cuerpos magmáticos. La sucesión de depósitos volcánicos continúa durante toda esta etapa, sin embargo, posterior a los primeros depósitos tuvieron lugar una serie de eventos tectónicos de deformación, que provocaron la inversión de las cuencas y dos inconformidades entre las unidades volcánica. Finalmente, el inicio del último de estos procesos de deformación marca la división entre esta etapa del ciclo y la siguiente, y recibe el nombre de Fase Incaica. En el área de estudio esta etapa está representada por las formaciones Cerro Empexa e Icanche (Charrier *et al.*, 2007).

La tercera y última etapa del Ciclo Andino empieza en el Paleógeno Tardío y se mantiene hasta la actualidad. Durante este periodo los cambios en la configuración morfoestructural están controlados por el movimiento relativo entre las placas Nazca y Sudamericana, los cambios en la tasa de subducción, y en la dirección, la que pasa a ser ortogonal. Debido a esto se genera en una primera instancia la Cordillera Incaica, producto de la deformación asociada al periodo de deformación del mismo nombre. Posteriormente se produce la inversión y alzamiento de la cordillera, evento controlado por sistemas de fallas de orientación nornoreste-sursureste, y debido a la erosión de las zonas alzadas las cuencas de ambos lados recibieron una gran cantidad de sedimentos. Este alzamiento es el que propicia las condiciones para la formación de los sistemas de cuencas endorreicas intermontana que dan origen a los sistemas salinos actuales, como el Salar del Huasco. Lo anterior, sumado a la actividad volcánica de composición andesítico-basáltica a riolítica desarrollada durante esta etapa, da origen a las unidades morfoestructurales actuales, las cuales en la región de estudio (14-26°S) corresponden de oeste a este a la Cordillera de la Costa, Depresión Central, Antearco-Precordillera, Cordillera Occidental, Altiplano y la Cordillera Oriental (Figura 8).

Por otro lado, las unidades geológicas del área de estudio que representan esta última etapa del Ciclo Andino incluyen a la mayoría de las secuencias volcánicas que afloran en el sector de la cuenca del Salar del Huasco, además de los depósitos del Pleistoceno-Holoceno (Figura 9) (Charrier *et al.*, 2007).

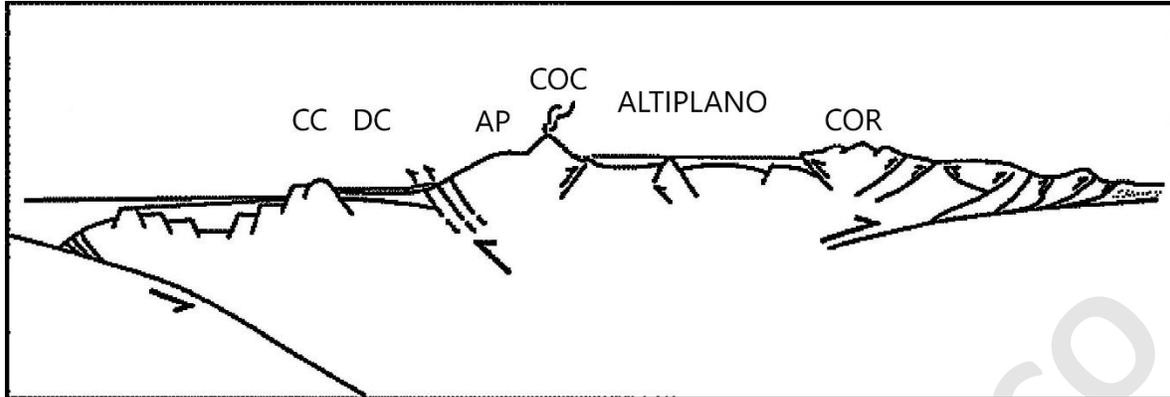


Figura 8. Perfil esquemático de las principales unidades morfoestructurales presentes entre los 14-26°S. Abreviaturas: CC, Cordillera de la Costa; DC, Depresión; AP, Antearco-Precordillera; COC, Cordillera Occidental; COR, Cordillera Oriental. Modificado de Charrier et al. (2007)

2.4 GEOLOGÍA DE LA CUENCA COLLACAGUA-RINCONADA

La cuenca del Salar del Huasco se ubica en el área de Collacagua-Rinconada en la cordillera de la Región de Tarapacá. En esta zona, las unidades más antiguas presentes, corresponden a las secuencias continentales de rocas volcánicas y volcanoclásticas de las formaciones Cerro Empexa e Icanche, sin embargo, sus afloramientos son pequeños en términos de superficie y se encuentran restringidos al extremo noroeste de la cuenca (Figura 9).

En la mayor parte de la superficie de la cuenca, afloran predominantemente rocas volcánicas, correspondientes a tobas de cenizas cristalinas riolíticas de edades miocenas como la Ignimbrita Tambillo e Ignimbrita Huasco las que cubren la zona oeste y sur de la cuenca del salar y sus alrededores (Gardeweg y Sellés, 2015). En la zona este del Salar del Huasco aflora una serie de estratovolcanes y secuencias volcánicas (Mioceno Medio-Plioceno). Estas corresponden a coladas de lavas andesítico-basálticas de olivino y clinopiroxeno, brechas volcánicas de la misma composición y una serie de edificios volcánicos remanentes de edad pliocena de composición dacítica. Las depresiones formadas por estos altos topográficos se encuentran rellenas por una toba de ceniza de composición dacítica perteneciente a la Ignimbrita Collacagua (Pleistoceno Medio), la cual engrana con depósitos aluviales inactivos provenientes de la erosión de la misma ignimbrita y del cordón Sillillica, al este de la cuenca.

En el sector norte del Salar del Huasco la Ignimbrita Collacagua se presenta también en abanicos aluviales, engranando con depósitos lacustres, salinos y al noroeste del salar con la Ignimbrita Huasco. Los depósitos lacustres que se encuentran cubriendo parcialmente la Ignimbrita Huasco en el sur del Salar del Huasco, y bajo la costra salina del mismo, son de carácter calcáreo, con areniscas y limolitas, y engranan con los depósitos aluviales y salinos. Por último, los depósitos deltaicos, se ubican directamente al norte del salar, en donde engranan con depósitos lacustres (Gardeweg y Sellés, 2013) (Figura 9).

Las principales estructuras del área de la Cuenca Collacagua-Rinconada corresponden a la Falla normal Carcanal de Napa emplazada en el lado sur del volcán Huailas, al sureste de la cuenca. Al oeste, por otro lado, se alzan los Altos de Pica producto de múltiples fallas inversas, del mismo nombre. Limitando la cuenca también por el oeste, se encuentra el cordón de Altos de Huasco el cual se asocia a una falla inversa de vergencia hacia el este denominada Falla Huasco, la cual posee un rumbo general nornoreste y un salto estimado de 550 m (Figura 9).

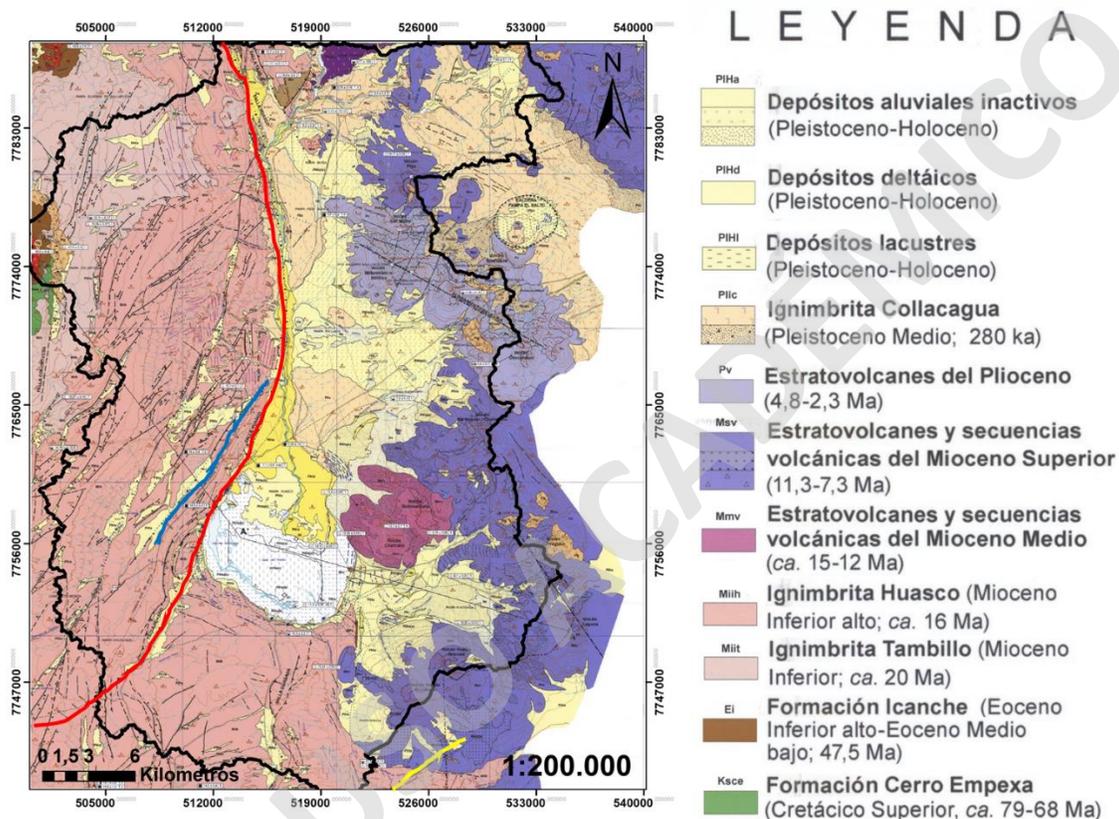


Figura 9. Mapa geológico del Área Collacagua-Rinconada. La Cuenca del Salar del Huasco está delimitada con una línea negra. Las principales estructuras remarcadas con líneas de color. En color azul el Anticlinal Cordón Altos del Huasco, en rojo la Falla Huasco y en amarillo la Falla Carcanal de Napa. Modificado de la Hoja Collacagua-Rinconada escala 1:100.000 (Gardeweg y Selles, 2013)

2.4.1 GEOLOGÍA DEL SALAR DEL HUASCO

Corresponde a un depósito evaporítico continental (salar), con forma asimétrica, asociado a zonas de falla activas durante el Cuaternario (Stoertz y Ericksen, 1974). El salar está compuesto en su parte central por una costra salina maciza, lisa, dura y cristalina de thenardita, mirabilita, yeso, halita y calcita (Gardeweg y Sellés, 2013), además de boratos como hidroboracita como mineral accesorio (López *et al.*, 1999). En los bordes del salar se encuentra una costra salina blanca pulverulenta de superficie irregular compuesta principalmente por halita y thenardita, además de yeso, otras sales y detritos. Ocasionalmente la costra presenta micro relieve o

textura botroidal, pozos de disolución (Gardeweg y Sellés, 2013), y minerales accesorios sulfatados como bloedita, singenita, mirabilita, glaserita y carbonatos como calcita y cloruros (silvita) (López *et al.*, 1999). Stoertz y Ericksen (1974) señalan también que en las zonas marginales del salar es posible encontrar carbonato de sodio.

Véliz (2018), en base a su trabajo con imágenes satelitales, define tres zonas minerales; una de carbonatos, que incluyen calcita, calcita magnésica y dolomita, en el sector noreste y este del salar. La zona de sulfatos, dentro de los cuales están, yeso, thenardita y bloedita, que se encuentra distribuida a lo largo de todo el salar y que abarca cerca de un 80% de su área. Por último, un núcleo halítico fraccionado y que se encuentra en la zona centro-norte del salar.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 CONCEPTOS RELEVANTES

3.1.1 SALAR

Un salar es un cuerpo sedimentario de carácter detrítico y evaporítico que se ubica en la zona más baja de una cuenca endorreica (drenaje interno) en condiciones áridas, en un ambiente desértico o semidesértico. En este tipo de ambiente el bajo nivel de precipitaciones y las altas tasas de evaporación, generan condiciones ideales para la depositación y acumulación de sales (Chong, 1988).

3.1.2 EVAPORITAS

Corresponden a rocas sedimentarias químicas formadas en condiciones superficiales. Precipitan por evaporación a temperaturas entre 50 a 70°C, en subsuperficie o en la superficie de una salmuera la cual ha alcanzado una condición de saturación con respecto a algún mineral o grupo de minerales (salinos) en particular (Warren, 2016).

Dependiendo de la composición de la salmuera que da origen a la evaporita, sumado a las condiciones de precipitación, distintos minerales pueden ser formados. En la Tabla 1 se listan los principales minerales evaporíticos presentes en salares.

Tabla 1. Principales minerales evaporíticos y sus respectivas formulas químicas. Jones y Deocampo (2004).

Grupo Mineral	Nombre	Fórmula Química
Carbonatos	Calcita	CaCO ₃
	Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂
	Magnesita	MgCO ₃
	Natron	Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O
Sulfatos	Yeso	CaSO ₄ ·2H ₂ O

	Anhidrita	CaSO ₄
	Mirabilita	NaSO ₄ ·10H ₂ O
	Tenardita	Na ₂ SO ₄
	Schoenita	K ₂ SO ₄ ·MgSO ₄ ·6H ₂ O
Cloruros	Halita	NaCl
	Silvita	KCl
	Antarcticita	CaCl ₂ ·6H ₂ O
	Bischofita	MgCl ₂ ·6H ₂ O

3.2 ANTECEDENTES DE TELEDETECCIÓN

En el área de teledetección aplicada a salares, en el ámbito internacional está el trabajo de Öztan y Süzen (2009), quienes utilizan imágenes ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) para mapear depósitos de yeso en Ankara Bala en Turquía. Los autores utilizaron radios de bandas, técnicas de *correlation stretch*, análisis de componentes principales y el cálculo de un índice de sulfatos, basado en las propiedades espectrales del yeso. Otros ejemplos son; el trabajo de Kodikara *et al.* (2012), donde utilizan imágenes del satélite *Hyperion* en conjunto con análisis de difracción de rayos X de muestras de suelo y roca del Lago Magadi en Kenia. Los autores aplican las técnicas de Fracción de Ruido Mínima (MNF por sus siglas en inglés) y *Mixture Tuned Matched Filtering* (MTMF) para analizar minerales evaporíticos y sedimentos del lago. Rodríguez *et al.* (2015) utilizan un índice de vegetación para realizar el balance hídrico del Salar de Pipanaco, Argentina. Cáceres *et al.* (2004) hacen uso de imágenes ASTER y el método de desmezcla espectral, en conjunto con información térmica del mismo satélite demostrando ser útil para diferenciar minerales evaporíticos, como halita, en los salares de Sud Lipez en Bolivia.

En Chile están los trabajos de Chapman *et al.* (1989), quienes estudian la zonación mineral en los salares de Atacama y Lulliallaco con imágenes *Landsat Thematic Mapper* (TM), usando la composición de bandas (754) RGB (2 a 2,3 μm, 1,5 a 1,8 μm y 0,7 a 1 μm respectivamente) y el método *decorrelation stretching*. Flahaut *et al.* (2017) realizan una caracterización mediante sensores remotos de la mineralogía superficial de algunos salares chilenos utilizando imágenes Landsat 8 OLI. Además, comparan la mineralogía determinada con difracción de rayos X, observaciones de campo, combinaciones de bandas (567) RGB y cocientes de bandas (4/7 y 5/7) para identificación de minerales. En el Salar del Huasco específicamente, Véliz (2018) realizó un estudio en colaboración con SERNAGEOMIN y CORFO en el cual se involucró el uso de imágenes multiespectrales del satélite Landsat 8 sensor OLI/TIRS en el análisis espaciotemporal de las distribuciones evaporíticas del Salar del Huasco.

Véliz (2018) en su trabajo realiza un análisis de firmas espectrales en el cual compara datos de imágenes con datos de bibliotecas espectrales. En el presente trabajo esto se complementa con el uso de firmas espectrales obtenidas del análisis de muestras de costra superficial, haciéndolo más efectivo, además del análisis de variables fisicoquímicas mediante el uso de imágenes multiespectrales. Por último, Liu *et al.* (2019), con imágenes Landsat 8 y datos de *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), estudian en el Salar de Atacama, la evolución de parámetros ambientales y su relación con la actividad minera de litio que se desarrolla en el salar. El estudio fue realizado mediante el cálculo de índices para los parámetros establecidos utilizando imágenes que abarcan un periodo de 20 años desde 1997 hasta 2017.

3.3 FUNDAMENTOS DE TELEDETECCIÓN

3.3.1 PRINCIPIOS BÁSICOS

La teledetección es una técnica de observación remota de la superficie terrestre (o cualquier astro), a través de sensores que capturan información instalados en plataformas satelitales (Chuvieco, 1995).

Esta técnica se basa en la idea de que existe una interacción energética entre el sensor y la superficie, dicho esto, el proceso básico de captura consta de 4 elementos principales, (1) una fuente de energía, la cual propicia el flujo que debe captar el sensor, esta fuente puede ser externa al sistema (sol) o interna (generada por el sensor), si la fuente es del primer tipo se le llama teledetección pasiva, por el contrario se llama teledetección activa. (2) La superficie terrestre, es la que recibe la energía y la refleja en función de su constitución, además, (3) el sistema sensor, que se encarga de recepcionar la información, codificarla y retransmitirla, e incluye tanto el sensor propiamente tal, así como la plataforma (satélite) que lo contiene. Por último, (4) el sistema de recepción, el cual recibe la información transmitida por el satélite (3) y la decodifica en un lenguaje para su lectura. En el marco de este trabajo, el enfoque estará en la teledetección pasiva, con el sol como la fuente de energía que sustenta el proceso, entonces, la energía emitida por el sol (térmica) es reflejada por la tierra (en función del tipo de cubierta), captada por el sensor y retransmitida a la tierra al sistema receptor (Figura 10). Es sabido que la energía térmica puede ser transmitida por convección, conducción y radiación, siendo este último (radiación electromagnética) el principio en el que se basa la teledetección vista en este trabajo (Chuvieco, 1995).

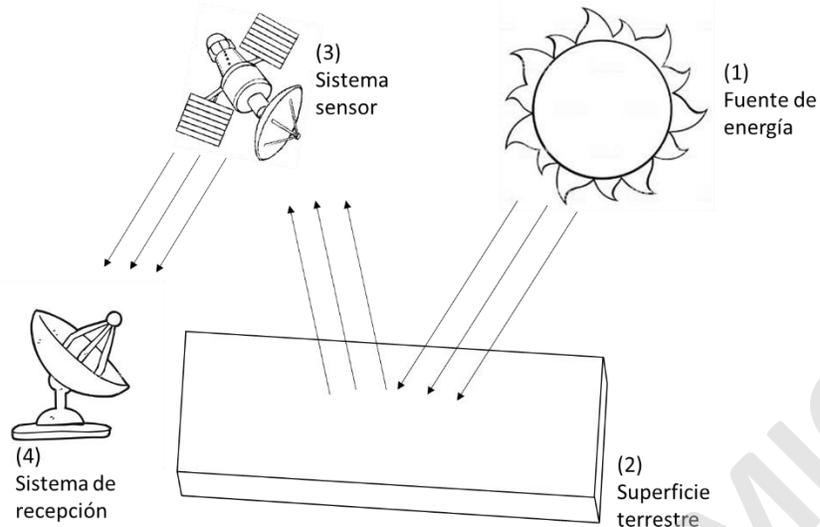


Figura 10. Procesos y componentes básicos de teledetección. Elaboración propia.

También es importante entender cómo se transmite la información entre el sensor y el receptor. Las unidades asociadas a esto son conocidas como números digitales (DN por sus siglas en inglés), que se refiere simplemente a un sistema de codificación en base a números usado en la tecnología digital. Por otro lado, la radiancia, es una medida del flujo de energía registrado por el sensor que abandona un área en particular (radiada) siguiendo un ángulo sólido ($\text{watts} \times \text{esteroradian}^{-1} \times \text{m}^{-2} \times \mu\text{m}^{-1}$). De este concepto se extrae el término radiancia espectral, que se refiere a la energía radiada en una determinada longitud de onda. Por último, la reflectancia es una razón adimensional entre la radiación incidente y la reflejada de un objeto en particular. Para el procesamiento de imágenes los valores en DN de la imagen deben ser transformados a valores de reflectancia. Estos valores pueden ser calculados a diferentes alturas (entre la superficie y el sensor, reflectancia a la superficie), dependiendo de la interferencia atmosférica presente (nubes o gases), a eso se le llama corrección atmosférica. En caso de que no exista esta o que sea muy baja, los valores DN son transformados a valores de reflectancia al tope de la atmósfera (TOA por sus siglas en inglés) (Figura 11).

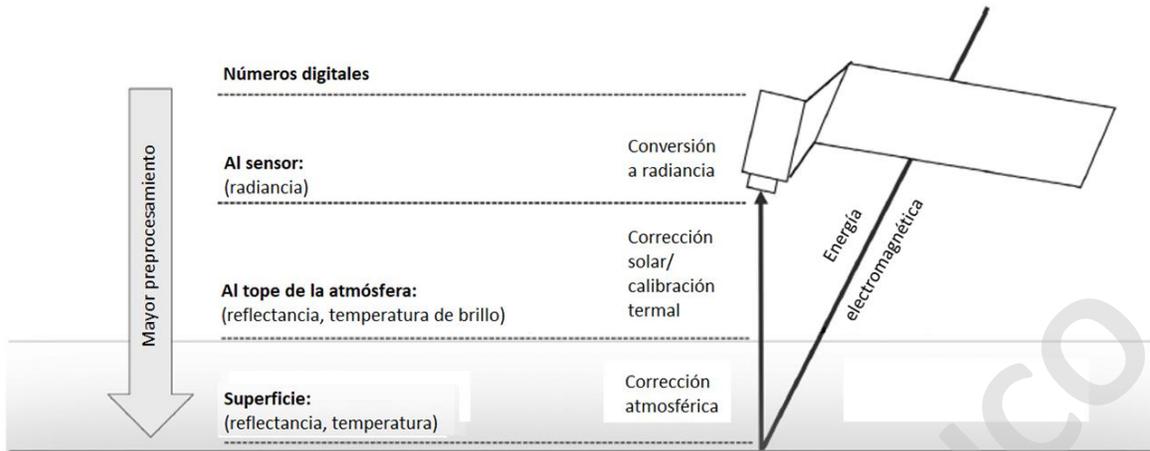


Figura 11. Transformación de valores de las imágenes en el preprocesamiento. Extraído de Young et al. (2017).

3.3.2 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

La energía transmitida a través de la radiación o radiación electromagnética posee dos propiedades fundamentales, longitud de onda y frecuencia. Los valores se encuentran en una escala continua pero dividida en rangos (Figura 12) en función del comportamiento que presentan la energía radiada (espectro electromagnético). Su unidad de medida más utilizada es la longitud de onda, (Chuvieco, 1995; Pérez, 2007).

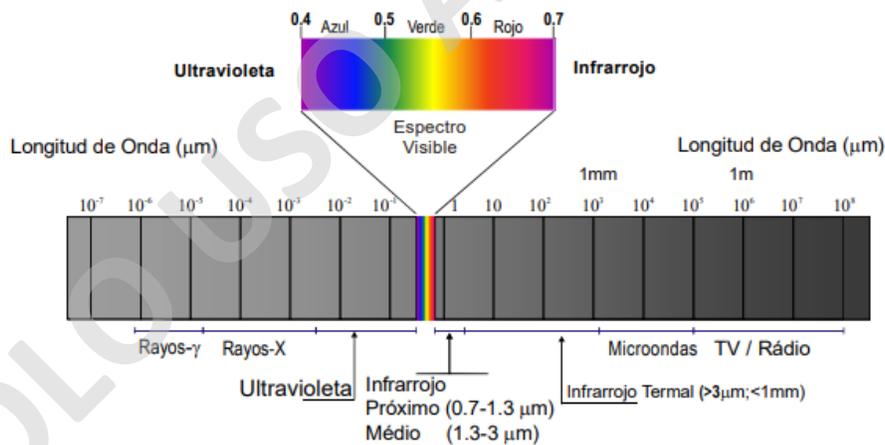


Figura 12. Regiones del espectro electromagnético y el espectro visible. Extraído de Pérez (2007).

En teledetección, a parte del espectro visible, se utiliza también información de las regiones que se encuentran en el rango del infrarrojo. En el infrarrojo próximo de reflexión la radiación reflejada (del sol) domina sobre la radiación emitida (de la tierra). Sus longitudes de onda están entre 1 y 2,5 μm , donde se produce la absorción que caracteriza a la mayoría de los espectros minerales y de rocas. La

región del infrarrojo medio se encuentra entre 3 y 5 μm y, por último, la región del infrarrojo termal, esta entre 4 y 22 μm con el máximo de emisividad en los 10 μm (Chuvieco, 1995; Pérez, 2007).

3.3.3 SATÉLITE LANDSAT 8 OLI/TIRS

La serie Landsat es un programa de observación satelital de la tierra llevado a cabo en conjunto por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés), el cual inició en el año 1972 con el lanzamiento del primer satélite. El programa se ha desarrollado de manera continua hasta la actualidad, mejorando tanto la resolución de las imágenes como la cantidad de información recopilada. El "Landsat Data Continuity Mission" (LDCM) o Landsat 8 es el octavo de la serie, lanzado en febrero de 2013. Los sensores a bordo de la plataforma LDCM capturan información en 11 bandas espectrales (Tabla 2) con una resolución temporal de 16 días. El "Operational Land Imager" (OLI), tiene 9 bandas con una resolución espacial de 30 m, y el "Thermal Infrared Sensor" (TIRS) 2 bandas con una resolución espacial de 100m. El LDCM tiene una resolución radiométrica, de almacenamiento de datos de 12 bits.

Tabla 2. Características de las bandas OLI y TIRS. Las bandas TIRS son remuestreadas a 30 m. Modificado de Ariza (2013).

	Bandas		Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
	Numero	Descripción		
Landsat 8 "Operational Land Imager" (OLI) y "Thermal Infrared Sensor" (TIRS)	1	Aerosol Costero	0,43 - 0,45	30
	2	Azul	0,45 - 0,51	30
	3	Verde	0,53 - 0,59	30
	4	Rojo	0,64 - 0,67	30
	5	NIR	0,85 - 0,88	30
	6	SWIR 1	1,57 - 1,65	30
	7	SWIR 2	2,11 - 2,29	30
	8	Pancromático	0,50 - 0,68	15
	9	Cirrus	1,36 - 1,38	30
	10	TIRS 1	10,60 - 11,19	100
	11	TIRS 2	11,50 - 12,51	100

3.3.4 ESPECTROMETRÍA DE MINERALES

Una de las aplicaciones de los sensores remotos en el estudio de evaporitas, es el reconocimiento mineral a través del análisis de sus propiedades espectrales. Esta aplicación se basa en los conceptos de reflectancia y absorción.

Dicho lo anterior, la espectrometría mineral consiste en el análisis de los patrones de absorción y reflectancia que registra un mineral al verse expuesto a la radiación electromagnética. La absorción que se da en minerales evaporíticos está ligada a un proceso atómico vibracional (absorción vibracional) (Drake, 1995; Howari *et al.*, 2002), y depende de la composición química del mineral. En minerales evaporíticos la absorción vibracional se da principalmente por la presencia de moléculas de agua, pero también puede estar asociada a la presencia de ciertos iones, el carbonato (CO_3), nitrato (NO_3) y amonio (NH_4) (Drake, 1995).

Si bien, cada mineral presenta un patrón diferente de absorción espectral, en el caso de los evaporíticos estos se dan en un determinado rango espectral entre 0,4 a 2,5 μm (Drake, 1995; Howari *et al.*, 2002) abarcando tanto el espectro visible como el infrarrojo cercano y de onda corta o medio (Gráfico 1).

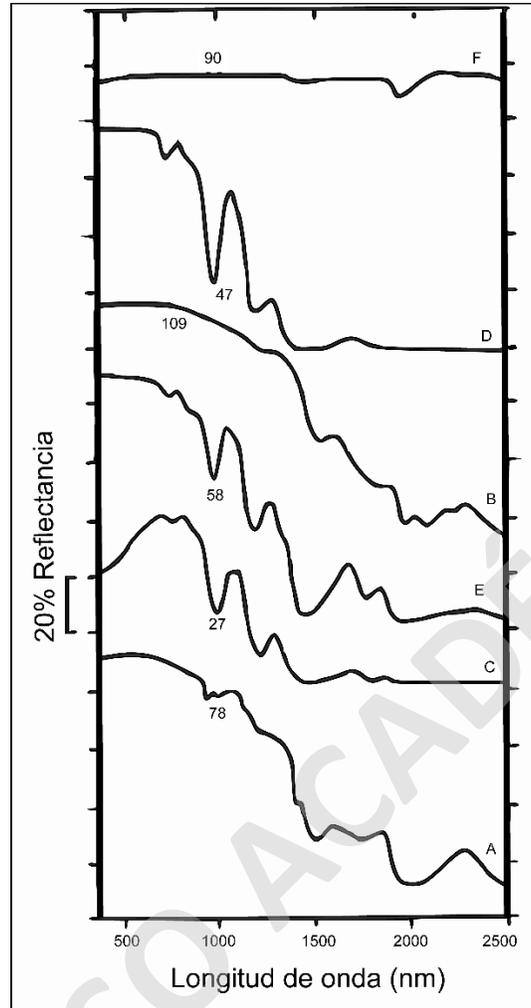


Gráfico 1. Firmas espectrales de minerales evaporíticos, (A) natrón, (B) termonatrita, (C) carnalita, (D) bischofita, (E) mirabilita, (F) thenardita. Eje "y" sin unidad. Los números en la figura indican el porcentaje de reflectancia de cada espectro a los 1000 nm. Extraído de Drake (1995).

Entonces, para reconocer minerales a través del análisis de espectros de imágenes multispectrales, es necesario conocer las características de absorción y patrones que forman estos minerales. A continuación, se presentan firmas espectrales de los principales minerales evaporíticos involucrados en este estudio, correspondientes a; halita, calcita y yeso (Gráfico 2).

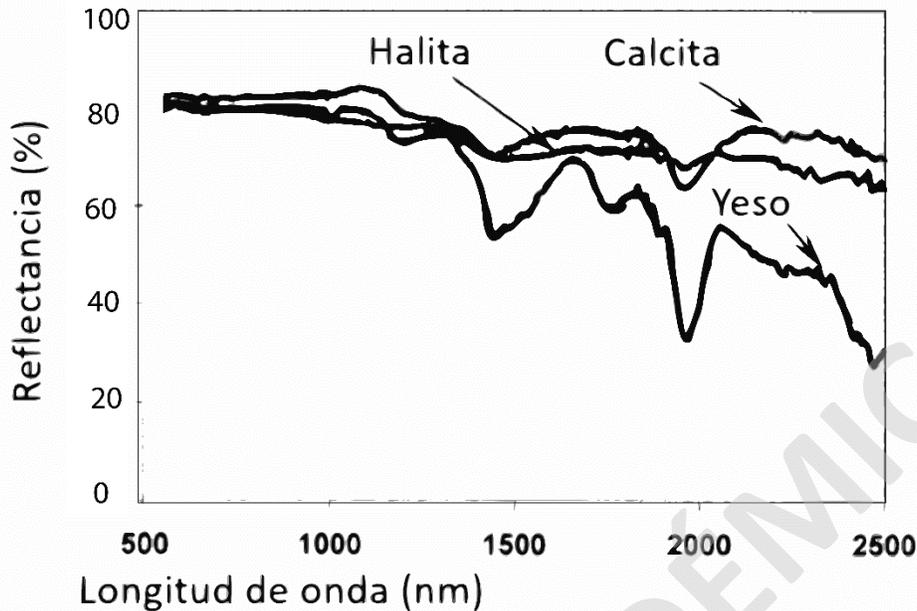


Gráfico 2. Firmas espectrales de principales minerales evaporíticos. Extraído de Howari et al. (2002).

3.3.5 INFORMACIÓN SUPERFICIAL CON IMÁGENES MULTIESPECTRALES

Utilizando imágenes multiespectrales de los sensores OLI y TIRS de Landsat 8 se pueden realizar ciertas combinaciones de bandas o índices de imágenes que permitan visualizar y destacar la información que se busca.

Con el objetivo de determinar la mineralogía y los parámetros fisicoquímicos (T° , salinidad y humedad), a continuación, se presentan las combinaciones de bandas, índices y el método de extracción de temperatura utilizados en el presente trabajo. Estas metodologías están disponibles en la bibliografía y fueron seleccionadas aquellas que mejor representaban la zona de estudio en base a comparación visual.

3.3.5.1 COMBINACIÓN DE BANDAS

Tomando en cuenta que la mayoría de los minerales evaporíticos reflejan y tienen sus patrones de absorción espectral característicos en el rango del infrarrojo cercano y medio, Flahaut *et al.* (2017) proponen el uso de las bandas 5, 6 y 7 (0,85-0,88, 1,57-1,65 y 2,11-2,29 μm respectivamente) de Landsat 8 compuestas en color RGB como una manera de identificar zonas de halita, sulfatos, carbonatos, arcillas y cuerpos de agua y zonas húmedas en la superficie del Salar de Atacama y otros cercanos. Esta metodología, en conjunto con muestreo en terreno, permite realizar una diferenciación mineralógica de los salares y de sus zonas distintivas.

3.3.5.2 INDICES DE IMÁGENES

Los índices son imágenes que se calculan mediante operaciones matemáticas entre los datos que componen las bandas. Las bandas utilizadas dependen del parámetro que se busca identificar en la imagen, y se seleccionan dependiendo de en qué rango del espectro este refleja o absorbe la radiación electromagnética. La operación matemática (suma, resta, multiplicación y división) se realiza con el objetivo de enfatizar el color de un objeto, en vez del brillo o intensidad.

3.3.5.3 INDICES DE HUMEDAD

Los índices presentados a continuación han sido probados en sus estudios correspondientes (Wilson y Sader, 2002; McFeetters, 1996; Acharya *et al.*, 2018). Además, se ajustaron las bandas disponibles en las imágenes de Landsat 8, esto debido a que los autores utilizaron imágenes de versiones anteriores del programa Landsat. Estos índices en conjunto permiten tener tanto una correcta apreciación previa de las condiciones de terreno, como el obtener valores certeros para el trabajo de gabinete.

3.3.5.3.1 NORMALIZED DIFFERENCE MOISTURE INDEX (NDMI)

El índice de humedad de diferencia normalizada o NDMI (por sus siglas en inglés) descrito por Wilson y Sader (2002), utiliza las bandas del infrarrojo cercano y de onda corta para los efectos atmosféricos y de iluminación. Dado que es sensible a los niveles de humedad en plantas lo utilizan en conjunto con índices de vegetación para el monitoreo de bosques de uso forestal en el Estado de Maine en los Estados Unidos.

$$\text{NDMI} = (\text{NIR} - \text{SWIR1}) / (\text{NIR} + \text{SWIR1})$$

Debido a la notoria presencia de vegetación en la mayor parte de la superficie de salar este índice puede ser utilizado para obtener información de la humedad del suelo.

3.3.5.3.2 NORMALIZED DIFFERENCE WATER INDEX (NDWI)

Propuesto por McFeetters (1996), el índice de agua de diferencia normalizada o NDWI (por sus siglas en inglés), utiliza las bandas del verde en el visible y el infrarrojo cercano para maximizar la identificación de los cuerpos de agua. Este índice limita los valores de la banda o el índice a un cierto rango para definir mejor las características del cuerpo, en este caso el límite definido es 0 (Acharya *et al.*, 2018).

$$\text{NDWI} = (\text{VERDE} - \text{NIR}) / (\text{VERDE} + \text{NIR})$$

Este índice es utilizado en este trabajo para delimitar los cuerpos de agua dentro del salar, como una primera aproximación a las condiciones de campo.

3.3.5.4 INDICES DE SALINIDAD

Son varios los autores que proponen operaciones matemáticas diferentes para el desarrollo de índices que muestren la salinidad del suelo. Dado que la teoría base es la misma, así como también las bandas que se ocupan, los índices que se aplicaron en este trabajo se escogieron en base a la comparación y análisis sobre la cantidad de información que entregan, la justificación y efectividad que presentan los autores que los proponen y un estudio comparativo estadístico realizado por Lhissou *et al.* (2014).

Para la salinidad, se seleccionaron dos índices, propuestos por un mismo autor (Khan, 2001), el cual cuenta con citas en la mayoría de los trabajos revisados acerca de esta variable. Estos se basan en la teoría de que los suelos afectados por esta variable tienen un alto coeficiente de reflectancia en las primeras bandas del espectro visible

3.3.5.4.1 SALINITY INDEX (SI)

El índice de salinidad o SI (por sus siglas en inglés) propuesto por Khan *et al.* (2001) para el monitoreo de suelos salinos en Faisalabad, Pakistán, utiliza las bandas del espectro visible azul y roja para resaltar los suelos afectados por la variable salinidad. Lhissou *et al.* (2014) realizan un estudio estadístico (componentes principales) comparativo entre varios índices de salinidad, llegando a la conclusión de que el SI muestra los mayores valores de correlación.

$$SI = \sqrt{(AZUL \times ROJO)}$$

Este índice se utilizó en este trabajo para obtener datos acerca de la salinidad de la superficie del salar. Estos datos dieron una impresión previa de las condiciones de campo, y sirvieron para el análisis posterior al terreno.

3.3.5.4.2 BRIGHTNESS INDEX (BI)

Propuesto por Khan *et al.* (2001), para el monitoreo de suelos salinos en Faisalabad, Pakistán, bajo el mismo principio anterior el índice de brillo o BI (por sus siglas en inglés) utiliza las bandas del espectro visible azul y rojo para resaltar zonas con alto coeficiente de reflectancia asociado a suelos salinos. Lhissou *et al.* (2014) también clasifican este índice con un alto valor de correlación.

$$BI = \sqrt{(AZUL^2 \times ROJO^2)}$$

Este índice se utilizó en este trabajo, en conjunto con el SI, para obtener datos acerca de la salinidad de la superficie del salar, los cuales fueron contrastados con los datos del muestreo que se llevó a cabo, posterior al terreno.

3.3.5.5 LAND SURFACE TEMPERATURE (LST)

La extracción de la temperatura superficial o LST (por sus siglas en inglés) a partir de imágenes multiespectrales, es un campo poco desarrollado, que es de vital importancia para estudios ambientales, debido a los cambios globales y la importancia del monitoreo de la relación suelo-vegetación. Los métodos propuestos para la determinación de la temperatura son variados, sin embargo, en base a la disponibilidad de imágenes e información disponible en las bandas de Landsat 8, se utiliza uno de los métodos discutido por Vlassova (2016) y descrito a continuación.

El LST utiliza las bandas del infrarrojo térmico (3-14 μm), en las cuales se tiene la información de la energía emitida por la superficie terrestre. La estimación de la temperatura requiere conocer la emisividad de la superficie, para separar la influencia de la superficie de la de la atmosfera en el cálculo. Para conocer la emisividad superficial, se utilizan algunos índices de vegetación (Tabla 3), estos se basan en la absorción de la clorofila en la banda visible del rojo y la alta reflectividad del material vegetal en el infrarrojo cercano. El proceso de extracción se resume en la metodología.

Tabla 3. Índices de vegetación utilizados en la extracción de la temperatura. *: factor extraído de estadísticas de los datos de la imagen a utilizar. **: cantidad de cubierta vegetal verde en base a NDV y WDVI.

Índice de vegetación	Ecuación	Referencia
Normalized Difference Vegetation Index	$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{ROJO}) / (\text{NIR} + \text{ROJO})$	Carlson & Ripley, 1997
Weighted Difference Vegetation Index	$\text{WDVI} = \text{NIR} - \text{ROJO}a^*$	Clevers, 1991
Soil Adjusted Vegetation Index	$\text{SAVI} = (\text{NIR} - \text{ROJO}) / (\text{NIR} + \text{ROJO} + L^{**}) \times (1 + L^{**})$	Huete, 1988

En este trabajo, el método LST se utiliza para obtener información de la temperatura de la superficie del salar, a fin de contrastar estos datos con los obtenidos directamente del trabajo de campo.

4 RESULTADOS

Durante el viaje de trabajo al Salar del Huasco, realizado entre el 13 y 19 de junio de 2019, se recogieron 18 muestras de suelo (Figura 4) para análisis fisicoquímicos realizando excavaciones de poca profundidad (10 cm), puntos en los que además

se midió la temperatura superficial utilizando un termómetro de laboratorio. Las 18 muestras de suelo fueron sometidas a análisis de laboratorio con el objetivo de medir humedad, conductividad eléctrica y pH, bajo supervisión del Dr. Mauricio Molina. Los protocolos de muestreo y los procedimientos de laboratorio se encuentran detallados en el Anexos 8.1. También se recogieron 29 muestras de costra (Figura 4) para análisis mineralógico con el método de espectroscopia de reflectancia mediante equipo TerraSpec.

En cuanto al trabajo con imágenes, se utilizó una imagen del 23 de junio de Landsat 8 LC08_L1TP_001074_20190623_20190704_01_T1. Esta imagen fue procesada con el software ENVI 5.3 para realizar correcciones, combinaciones de bandas, índices y metodologías de extracción de temperatura. Luego, a partir de los procesos de imágenes, y del análisis visual comparativo de los resultados, se extrajo la información puntual de cada variable en los lugares muestreados en terreno, y con estos datos se realizó un análisis y una comparación estadística de los datos de imágenes con los datos de muestreo.

4.1 RESULTADOS OBTENIDOS

La costra salina superficial muestreada durante este estudio se pudo diferenciar en dos tipos, una costra seca de textura lisa, dureza media, de aspecto terroso, con grietas de desecación, con espesor de 0,4 milímetros (mm) (Figura 13). El segundo tipo de costra es de textura rugosa, dureza baja, de aspecto botroide-cristalino y con un espesor variable de 1-3 mm (Figura 14), esta costra está asociada a un suelo de humedad variable de baja a alta, donde el espesor y el grado de cristalinidad aumentaban con la humedad.



Figura 13. Ejemplo de costra lisa asociada a suelo seco, muestreada en el Salar del Huasco.



Figura 14. Ejemplo de costra rugosa asociada a suelo húmedo, muestreada en el Salar del Huasco.

Las 29 muestras de la costra salina fueron analizadas e interpretadas por la geóloga Mariana Ordóñez, utilizando espectrometría de reflectancia. Los resultados de este trabajo se presentan en la Tabla 4, en donde los minerales interpretados en las muestras se presentan en orden de abundancia.

Tabla 4. Resultados de los análisis mineralógicos de las muestras de la costra salina mediante espectrometría de reflectancia. Minerales numerados en orden de abundancia. *: Espectro con absorciones de agua.

Muestra mineral	UTM Este	UTM Norte	Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3
VSH12*	511547	7756089	Yeso	Aluminita	
VSH14	520321	7752670	Yeso		
HSH2.1.1*	514476	7755769	Yeso		
HSH2.2.1*	514621	7755700	Yeso		
VSH24*	514541	7756199	Yeso		
C0HSH2.3.1	514529	7756322	Mezcla de Sulfatos		
VSH31*	514671	7755433	Yeso		
VSH32*	514847	7754967	Yeso		
VSH34	515109	7754170	Picromerita		
C1HSH3.1.1	515069	7753831	Epsomita	Bloedita	
VSH37	514423	7754429	Taumasita		
3SBBN	514502	7755080	Epsomita	Mezcla de Sulfatos	
3BN	514600	7755659	Epsomita	Bischofita	Aluminita
VSH311*	514708	7756578	Yeso		
3CA	514734	7756802	Epsomita	Alunógeno	Halotrichita
VSH42	514005	7759412	Saponita	Sepiolita	
VSH44	513974	7759855	Yeso		

4CSN*	513878	7760221	Illita-Esmectita	Dolomita	
VSH46	513787	7760348	Yeso		
4CVSA	513781	7760591	Mirabilita	Polihalita	
VSH48	513005	7757544	Mezcla de Sulfatos		
C3HSH4.2.1	513053	7757399	Yeso	Bloedita	
VSH410	513334	7757769	Sulfato Hidratado		
VSH52	515905	7752151	Melanterita	Mezcla de Sulfatos	
C4HSH5.1.1	515905	7752151	Epsomita	Aluminita	
VSH54	515700	7751678	Melanterita	Mezcla de Sulfatos	
VSH56	512081	7754268	Hidróxido de Aluminio	Mezcla de Sulfatos	
5CBL	512000	7754270	Bloedita	Taumasita	Mirabilita
VSH57	512019	7753994	Yeso		

De las 29 muestras de costra analizadas, el 90% están compuestas de sulfatos o presenta en mayor abundancia este tipo mineral, mientras que, el 10% restante corresponde a arcillas e hidróxido de aluminio. De las muestras compuestas por sulfatos, 46% corresponde a yeso (sulfato de calcio) o tiene este mineral como componente principal y 19% tiene epsomita (sulfato de magnesio hidratado) como mineral principal.

Al comparar los datos de parámetros fisicoquímicos (T°, pH, humedad y salinidad) con las muestras de costra salina presentes en los mismos puntos, no se encontró relación entre alguno de los minerales con algún parámetro específico (Tabla 5).

Tabla 5. Comparación entre datos de parámetros fisicoquímicos y de muestras de costra superficial analizadas con equipo Terraspec en puntos coincidentes de muestreo.

Muestra	T° [°C]	Humedad (%)	pH	Ce [dS/m]	Muestra mineral	Minerales
VSH11	2	6,94	8,76	7,44	VSH12	Yeso, Aluminita
VSH13	8	22,34	8,43	4,03	VSH14	Yeso
VSH21	5	37,48	8,68	42,68	HSH2.2.1	Yeso
VSH22	8	29,50	8,57	37,24	VSH24	Yeso
VSH25	8	20,49	8,44	4,7		
VSH33	4	26,43	8,59	36,28	VSH34	Picromerita
VSH35	7	21,49	8,94	19,67		
VSH36	7	26,37	9,09	15,33	VSH37	Taumasita
VSH38	9	22,43	8,52	36,04	3SBBN	Epsomita, Mezcla de Sulfatos
VSH310	7	28,58	8,82	17,15	VSH311	Yeso
VSH41	8	3,33	8,7	1,731	VSH42	Saponita, Sepiolita
VSH43	1	5,71	8,27	3,14	VSH44	Yeso
VSH45	6	8,87	8,3	4,91	VSH46	Yeso

VSH47	0	25,68	8,48	12,8	VSH48	Mezcla de Sulfatos
VSH49	3	2,62	8,62	2,65	VSH410	Sulfato Hidratado
VSH51	1	25,34	8,82	7,95	VSH52	Melanterita, Epsomita, Mezcla de Sulfatos, Aluminita
VSH53	0	28,06	8,7	10,98	VSH54	Melanterita, Mezcla de Sulfatos
VSH55	3	22,15	8,83	27,39	VSH56	Hidróxido de Aluminio, Mezcla de Sulfatos

Por otro lado, los valores obtenidos para las 18 muestras mediante análisis de laboratorio, enfocados a humedad, pH y conductividad eléctrica se entregan en la Tabla 6. Así también se presentan los datos de temperatura medidos en terreno.

Como se mencionó en el Capítulo de Metodología los valores de humedad obtenidos no fueron adecuadamente determinados según el procedimiento debido a que por error fueron secadas en ambiente controlado con aire acondicionado, previo al secado al horno.

Además, la medición de pH en la muestra se determinó como parte de la rutina de laboratorio, sin embargo, esta variable no será utilizada en este estudio debido a que no se conoce un método para determinar pH de superficie a través de procesos de imágenes.

Tabla 6. Resultados de análisis de laboratorio de variables físicoquímicas de las muestras y los valores de temperatura medidos en terreno.

Muestra	UTM Este	UTM Norte	T° [°C]	Humedad (%)	pH	Ce [dS/m]
VSH11	511547	7756089	2	6,94	8,76	7,44
VSH13	520321	7752670	8	22,34	8,43	4,03
VSH21	514621	7755700	5	37,48	8,68	42,68
VSH22	514541	7756199	8	29,50	8,57	37,24
VSH25	514083	7756896	8	20,49	8,44	4,70
VSH33	515109	7754170	4	26,43	8,59	36,28
VSH35	515045	7753763	7	21,49	8,94	19,67
VSH36	514423	7754429	7	26,37	9,09	15,33
VSH38	514502	7755080	9	22,43	8,52	36,04
VSH310	514708	7756578	7	28,58	8,82	17,15
VSH41	514005	7759412	8	3,33	8,70	1,731
VSH43	513974	7759855	1	5,71	8,27	3,14
VSH45	513787	7760348	6	8,87	8,30	4,91
VSH47	513005	7757544	0	25,68	8,48	12,80
VSH49	513334	7757769	3	2,62	8,62	2,65

VSH51	515905	7752151	1	25,34	8,82	7,95
VSH53	515700	7751678	0	28,06	8,70	10,98
VSH55	512081	7754268	3	22,15	8,83	27,39

La Tabla 7 presenta un resumen estadístico de cada una de las variables mencionadas anteriormente.

Tabla 7. Estadística descriptiva de los valores de las variables fisicoquímicas.

$T^{\circ} [^{\circ}C]$		Humedad (%)		pH		Ce [dS/m]	
Media	4,83	Media	20,21	Media	8,64	Media	16,23
Mediana	5,50	Mediana	22,38	Mediana	8,65	Mediana	11,89
Moda	8,00	Moda	-	Moda	8,82	Moda	-
Mínimo	0,00	Mínimo	2,62	Mínimo	8,27	Mínimo	1,73
Máximo	9,00	Máximo	37,48	Máximo	9,09	Máximo	42,68

Las temperaturas del suelo del salar registradas en terreno son bajas, presentando un valor medio de 4,83°C y máximo de 9°C. En contraste, los suelos del salar presentan un alto porcentaje de humedad, con un nivel medio de 20,21% y un máximo de 37,48%. Si bien, el coeficiente de Pearson calculado es casi 0 (0,09), lo que indica que no hay correlación, en una mirada muy general, se puede decir que estas variables tienen una relación inversa, ya que el suelo del Salar del Huasco presenta una baja temperatura y un alto nivel de humedad.

Por otro lado, los niveles de conductividad eléctrica en el suelo del salar, asociados a la salinidad, poseen un alto rango de variación, tomando en cuenta los valores establecidos para suelos en la Tabla 8, con mínimos de 1,73 dS/m y máximos de 42,68 dS/m. Al realizar un análisis de correlación entre esta variable y la temperatura, el coeficiente de Pearson es muy bajo (0,2), lo que indica una baja correlación entre estas variables, del mismo modo los valores de conductividad y pH presentan una baja correlación (0,2). Por otro lado, al comparar los datos de conductividad con los datos de humedad, el coeficiente de Pearson, calculado en 0,68 indica que hay un alto nivel de correlación positiva entre estas variables en el suelo del salar.

La variable de pH presenta niveles semi-constantes en todas las muestras, con un valor mínimo de 8,27, una media de 8,64 y un valor máximo de 9,09. Al realizar un análisis comparativo entre esta y las demás variables medidas, no se encontró correlación entre ellas.

Por último, para los valores de conductividad eléctrica, se pudo establecer una equivalencia únicamente cualitativa. Con niveles relativos de salinidad en base a conductividad eléctrica para suelos usados en agricultura (Tabla 8). Según esta clasificación, el nivel de salinidad el suelo del Salar del Huasco sería fuerte a muy fuerte.

Tabla 8. Tabla de clasificación de suelos salinos en base a valores de conductividad eléctrica utilizada en agricultura. Extraído de Ibáñez (2008).

Ce [dS/m] a 25°C	Nivel de Salinidad
0 a 2	Muy Ligera
2 a 4	Ligera
4 a 8	Media
8 a 16	Fuerte
>16	Muy Fuerte

4.2 ANÁLISIS DE IMÁGENES

En primera instancia, a la imagen del 23 de junio se le aplicó el método de corrección al tope de la atmosfera (TOA). Con esta imagen como base, se utilizó la combinación de bandas (567) RGB para definir mineralogía superficial a través de los resultados de las muestras, y se calcularon los índices NDVI, NDWI, BI, SI y un método de extracción de temperatura para los parámetros fisicoquímicos.

Imágenes Landsat 8 adicionales capturadas en distintas fechas desde abril a agosto de 2019 fueron utilizadas para analizar la variabilidad de los datos en el tiempo.

4.2.1 REFLECTANCIA TOA

Comparando los resultados de los métodos de conversión a valores de Reflectancia al Tope de la Atmosfera (TOA) y a valores de Reflectancia al Fondo de la Atmosfera (BOA), se encontró que al aplicar la Reflectancia BOA el rango de valores de los datos de la imagen disminuía, esto ocasionaba que, al momento de calcular los índices de humedad, salinidad y T°, los límites máximo y mínimo de los datos se vieran reducidos y la variabilidad entre un pixel y otro disminuía. Por otro lado, las imágenes con Reflectancia TOA presentaban un mayor rango de datos y una mayor variabilidad entre pixeles, dando una mejor descripción del área y entregando más información.

Al realizar la calibración de la imagen a valores de Reflectancia TOA, el resultado es una imagen sin interferencia atmosférica, más nítida y con más brillo (Figura 15).

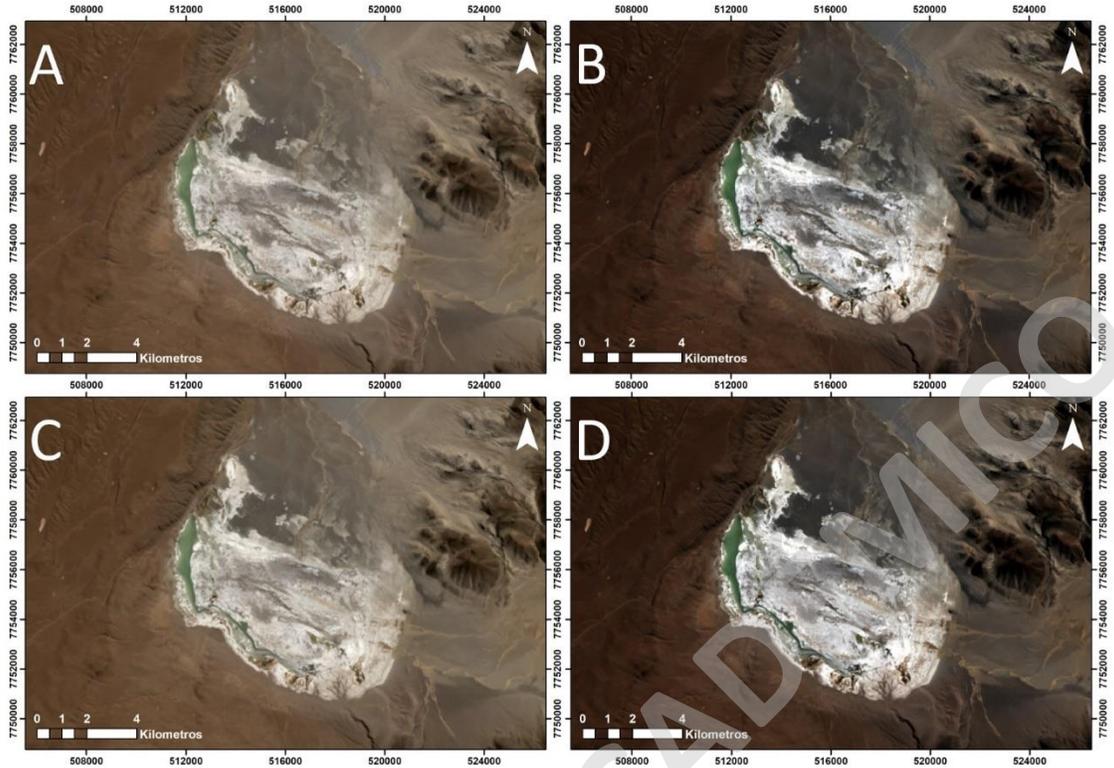


Figura 15. Comparación de imágenes de Landsat 8 con y sin corrección atmosférica. A: imagen 06/07/2019 sin corregir. B imagen 06/07/2019 con corrección. C: imagen 06/23/2019 sin corregir. D: imagen 06/23/2019 con corrección.

4.2.2 DISTRIBUCIÓN DE MINERALOGÍA DE SUPERFICIE

Con el objetivo de determinar mediante procesos de imágenes la distribución de minerales en la superficie del Salar del Huasco, se utilizó como base las imágenes con Reflectancia TOA (Figura 15 B y D). A estas imágenes se les aplicó la composición de bandas (567) RGB, con la cual se obtuvo información general de mineralogía de la superficie del salar.

En base a lo anterior, se utilizó también la información de espectros minerales de las muestras analizadas por la geóloga Mariana Ordóñez, comparando estos espectros con los obtenidos a través del procesamiento de imágenes en los pixeles que coincidían espacialmente con la ubicación de las muestras y en puntos del salar sin información de muestras. Esto con el objetivo de complementar el análisis de la distribución mineralógica, validando la información de espectros obtenida por medio de una comparación visual, lo que permitió extrapolar la información mineralogía a zonas sin datos de terreno.

4.2.2.1 COMBINACION DE BANDAS (567) RGB

Al aplicar la combinación de bandas 567 (RGB) (Flahaut *et al.*, 2017) se obtuvo una imagen con una gama de colores que representan ciertas mineralogías en el área del Salar del Huasco en donde, de acuerdo con Flahaut *et al.* (2017); gris representa a halita, blanco a sulfatos, amarillo a carbonatos y arcillas, y negro y tonalidades rojas corresponden a cuerpos de agua y zonas húmedas (Figura 16).

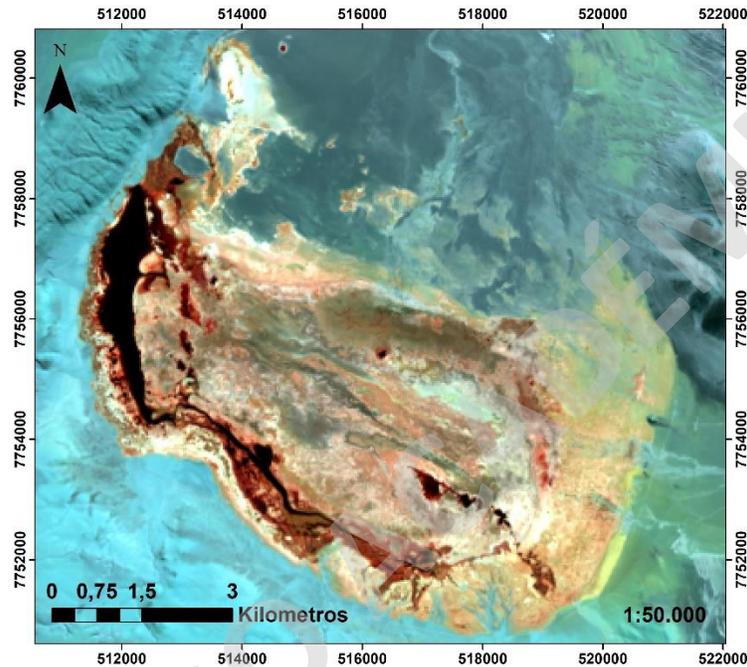


Figura 16. Imagen Landsat 8 del 23 de junio de 2019 con combinación de bandas (567). Elaboración propia.

La imagen de la Figura 16 fue contrastada con los datos obtenidos del análisis de espectroscopia de las muestras, comparando las zonas minerales a las que corresponden los colores de esta, con los minerales presentes en cada muestra (Tabla 4). Esta comparación resulto concordante en las zonas de sulfatos, en la zona de carbonatos y arcillas del extremo noroeste del salar y en las zonas húmedas y cuerpos de agua. Pero no fue concordante en las zonas grises en el centro y oeste del salar, ya que no se encontró halita a través del análisis de muestras de la costra.

4.2.2.2 ANÁLISIS DE FIRMAS ESPECTRALES

Se realizó una comparación entre las firmas espectrales obtenidas de las muestras de terreno, con las obtenidas a partir del procesamiento de una imagen Landsat 8 del 23 de junio, en los mismos puntos en los cuales las muestras fueron tomadas.

Ya que la resolución espacial de la imagen Landsat 8 (*pixel*) es de 30 m (bandas del espectro visible), los valores de reflectancia en los gráficos que se presentan a continuación no reflejan el punto específico de la muestra, sino más bien el área en la que esta se encuentra. Por lo demás, debido a que las bandas en las que registra el satélite cubren rangos discontinuos del espectro, los espectros en el gráfico presentan diferencias según el método por que se obtuvo, siendo más recta y con menos puntos de inflexión las obtenidas a partir del procesamiento de la imagen y más exactas y con más variaciones las de los espectros provenientes del equipo TerraSpec.

Los espectros de los gráficos muestran distintos niveles de correlación visual, evaluada de acuerdo con los siguientes criterios: (1) similitud en la forma general de los espectros, tomando en cuenta los picos y valles de reflectancia; (2) similitud en la posición general del espectro dentro del gráfico, tomando en cuenta los valores promedio de reflectancia de la curva más que los valores específicos de los picos y los valles. Cabe destacar que algunos espectros están alterados por la presencia de agua (incorporada por error en el proceso de selección de muestras) en la muestra, para estos casos el margen de clasificación fue menos específico, además es importante mencionar que los espectros de las muestras representan en algunos casos un conjunto de minerales con distintos niveles de abundancia (Tabla7). Además, en los gráficos se muestran como referencia espectros de los minerales puros, provenientes de la biblioteca de ENVI.

De acuerdo con lo anterior en los siguientes gráficos muestran ejemplos de buena correlación para la muestra 3CA (Gráfico 3); correlación regular para la muestra VSH 14 (Gráfico 4) y mala correlación para la muestra VSH42 (Gráfico 5).

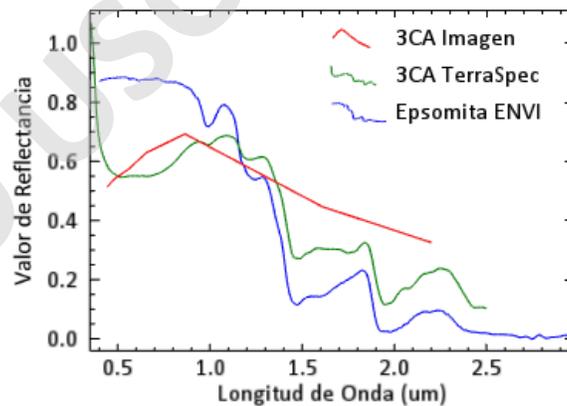


Gráfico 3. Ejemplo de correlación buena. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, el espectro del pixel de la imagen y el espectro de referencia de la biblioteca de ENVI.

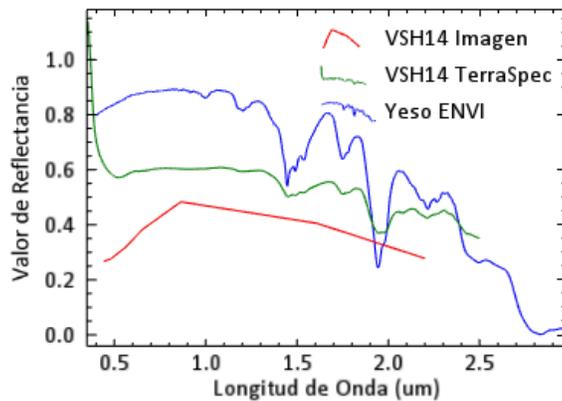


Gráfico 4. Ejemplo de correlación regular. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, el espectro del pixel de la imagen y el espectro de referencia de la biblioteca de ENVI.

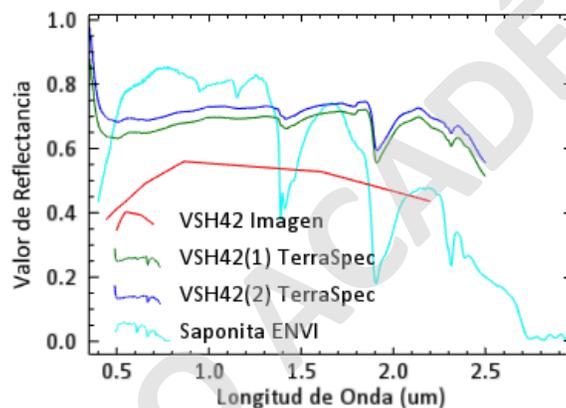


Gráfico 5. Ejemplo de correlación mala. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, el espectro del pixel de la imagen y el espectro de referencia de la biblioteca de ENVI.

En la Tabla 9, se presenta la clasificación de correlación de las 29 muestras minerales. Donde el 52% de las muestras presenta un buen nivel de correlación, el 38% un nivel de correlación regular y solo un 10% presenta un mal nivel de correlación. Los gráficos comparativos de espectros se encuentran en el Anexo 8.4.

Tabla 9. Clasificación de la correlación entre los espectros obtenidos del procesamiento de la imagen Landsat 8 del 23 de junio de 2019 y los obtenidos del análisis de las muestras con equipo TerraSpec, con los resultados de los análisis minerales para cada muestra.

Muestra mineral	Minerales	Correlación Espectros
VSH12	Yeso, Aluminita	Regular
VSH14	Yeso	Regular
HSH2.1.1	Yeso	Buena
HSH2.2.1	Yeso	Buena
VSH24	Yeso	Regular

COHSH2.3.1	Mezcla de Sulfatos	Regular
VSH31	Yeso	Buena
VSH32	Yeso	Buena
VSH34	Picromerita	Regular
C1HSH3.1.1	Epsomita, Bloedita	Regular
VSH37	Taumasita	Buena
3SBBN	Epsomita, Mezcla de Sulfatos	Regular
3BN	Epsomita, Bischofita, Aluminita	Buena
VSH311	Yeso	Buena
3CA	Epsomita, Alunógeno, Halotrichita	Buena
VSH42	Saponita, Sepiolita	Mala
VSH44	Yeso	Buena
4CSN	Illita-Esmectita, Dolomita	Mala
VSH46	Yeso	Mala
4CVSA	Mirabilita, Polihalita	Buena
VSH48	Mezcla de Sulfatos	Buena
C3HSH4.2.1	Yeso, Bloedita	Buena
VSH410	Sulfato Hidratado	Buena
VSH52	Melanterita, Mezcla de Sulfatos	Regular
C4HSH5.1.1	Epsomita, Aluminita	Regular
VSH54	Melanterita, Mezcla de Sulfatos	Buena
VSH56	Hidróxido de Aluminio, Mezcla de Sulfatos	Regular
5CBL	Bloedita, Taumasita, Mirabilita	Regular
VSH57	Yeso	Buena

En base las correlaciones definidas, los espectros de las muestras con buena correlación (Tabla 9) fueron comparados con espectros obtenidos en zonas/puntos de la imagen que no pudieron ser visitadas en terreno y también con aquellas zonas que fueron muestreadas pero que presentaban mala correlación de espectrometría, a modo de extrapolar información a todo el salar.

4.2.2.3 DISTRIBUCIÓN MINERALÓGICA EN LA COSTRA SALINA DEL SALAR DEL HUASCO

En base a lo expuesto anteriormente, para la imagen con combinación de bandas (567) en RGB del Salar del Huasco, en la fecha en la que se realizó el estudio; los colores grises, blancos y amarillos de la imagen corresponden a una variedad de sulfatos predominantemente de Ca y Mg con arcillas ocasionales, los cuerpos de agua y zonas húmedas aparecen en colores rojos y negros (Figura 17).

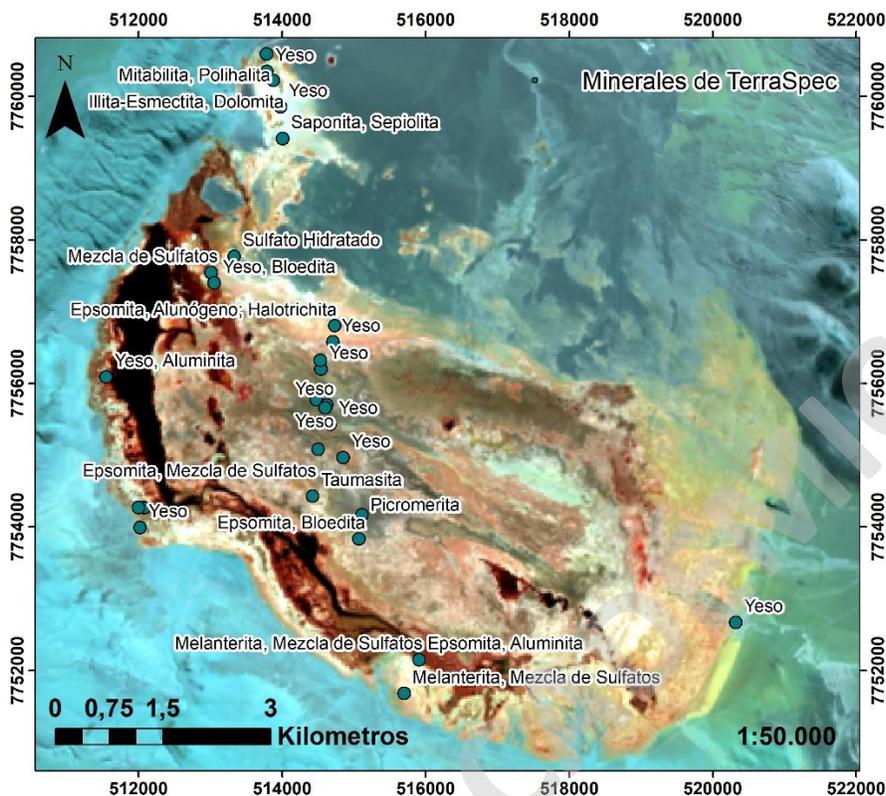


Figura 17. Imagen del 23 de junio de 2019 con combinación de bandas (567) RGB, con puntos de muestreo mineral y resultados de los análisis de espectroscopia de reflectancia con equipo TerraSpec. Elaboración Propia.

Por lo tanto, las unidades mineralógicas definidas en el salar corresponden a:

Zona de Sulfatos de Ca y Mg, definida por la presencia de yeso y epsomita principalmente, la cual se encuentra restringida a la zona central de salar.

Zona de Sulfatos y Arcillas (Ca/Mg), está definida por la presencia de yeso además de una variedad de sulfatos, illita-esmectita y saponita como arcillas ocasionales. Esta se distribuye principalmente en los bordes salar, apareciendo ocasionalmente en zonas más centrales.

El principal cuerpo de agua se encuentra en el sector este del salar. Además, pequeños cuerpos aparecen en el sector centro-sur y suroeste, las zonas húmedas por otro lado se encuentran distribuidas a lo largo de todo el Salar del Huasco (Figura 18).

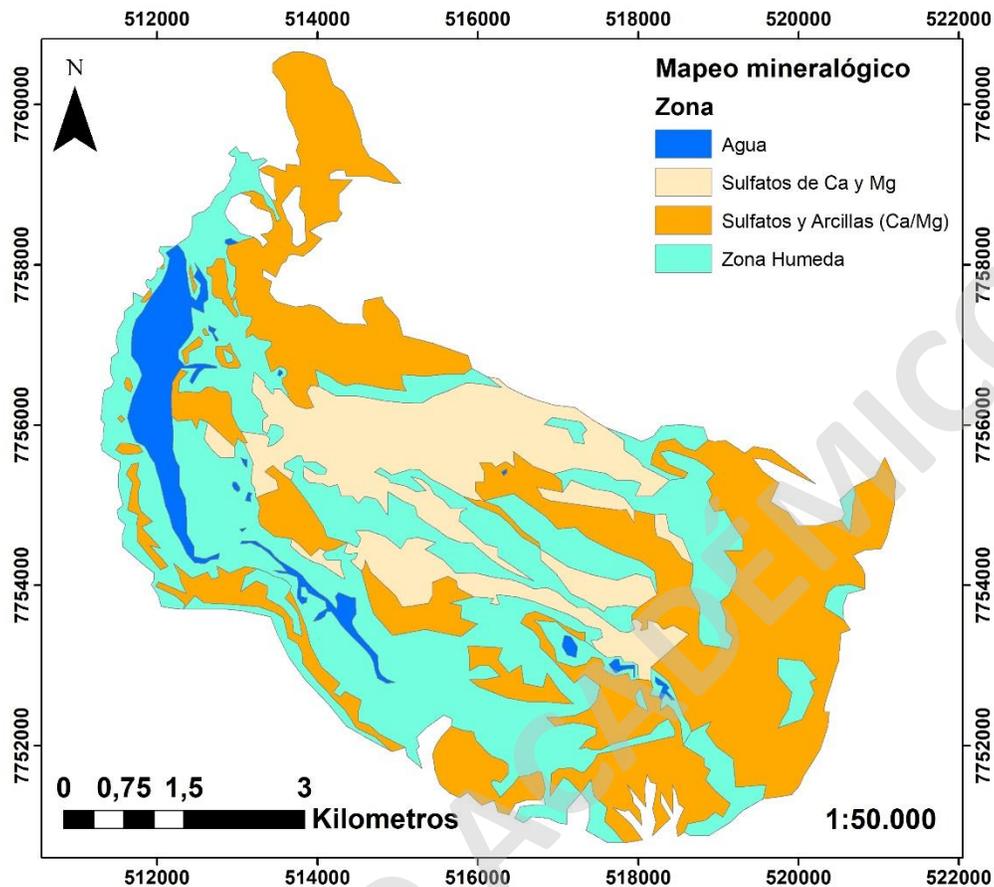


Figura 18. Mapa de distribución de unidades mineralógicas del Salar del Huasco que integra la información obtenida del muestreo en terreno y los procesos de imágenes.

4.2.3 DISTRIBUCIÓN DE VARIABLES FISICOQUÍMICAS EN EL SALAR DEL HUASCO

Para determinar mediante procesos de imágenes la distribución de variables fisicoquímicas en la superficie del Salar del Huasco, se utilizó como base la imagen con Reflectancia TOA del 23 de junio. A esta imagen se le calcularon los índices NDMI y NDWI para humedad, SI y BI para salinidad, y el método de extracción de temperatura LST.

De las imágenes resultantes del cálculo de índices, se extrajeron los valores de cada variable (humedad, salinidad y T°) en los píxeles coincidentes espacialmente con la ubicación de las muestras tomadas en terreno. Posteriormente y con el objetivo de validar los procesos de imágenes, se compararon los datos obtenidos de los píxeles con los análisis de laboratorio de las muestras de terreno.

Antes de comparar, se debe tener en cuenta que los datos de los índices fueron calculados en base a valores de reflectancia, en consecuencia, estos no se

encuentran en las mismas unidades que los datos obtenidos de los análisis de laboratorio. Los índices representan niveles o rangos generales (alto, medio y bajo) de la variable en la superficie, a excepción del método de extracción de temperatura LST que entrega datos en grados Celsius (°C).

En primera instancia se llevó a cabo una comparación visual, para analizar cómo se relacionaban los valores altos y bajos de los índices con valores de las muestras, obtenidos en laboratorio. Posteriormente se realizó un análisis de correlación entre ambos conjuntos de datos, a través del cálculo del coeficiente de correlación de Pearson y gráficos de dispersión que muestran de manera visual la relación entre los datos.

4.2.3.1 HUMEDAD SUPERFICIAL

La humedad superficial fue determinada a partir del cálculo de los índices NDMI y NDWI en la imagen Landsat 8 del 23 de junio de 2019 con Reflectancia TOA. En las imágenes resultantes (Figuras 24 y 26) se observa una gama de colores que representan los distintos niveles de humedad. Las zonas rojas corresponden a cuerpos de agua, las zonas naranjas y amarilla representan las áreas con bajo nivel de agua o planicies de inundación y las zonas amarillo claro y celestes a zonas de suelo húmedo en distintos niveles (de alto a bajo respectivamente).

A pesar de las diferencias entre los tamaños de las muestras, de los píxeles y los rangos de los datos involucrados, se observa en la parte central del salar de la Figura 19, una correlación entre las zonas amarillas de la imagen NDMI y los puntos rojos, amarillos y naranjas de las muestras VSH21 a la VSH310 (suelo húmedo), esto también aplica para las muestras VSH13, VSH47, VSH51, VSH53 y VSH55 en menor medida. Así también, hay una correlación entre la zona celeste al norte del salar con las muestras VSH41, VSH43 y VSH45 (baja humedad). Por otro lado, para esta imagen, las muestras que no muestran relación con los datos de la imagen son las VSH11 y VSH49, que presentan bajos niveles de humedad y sin embargo se encuentran en zonas anaranjada y amarilla respectivamente.

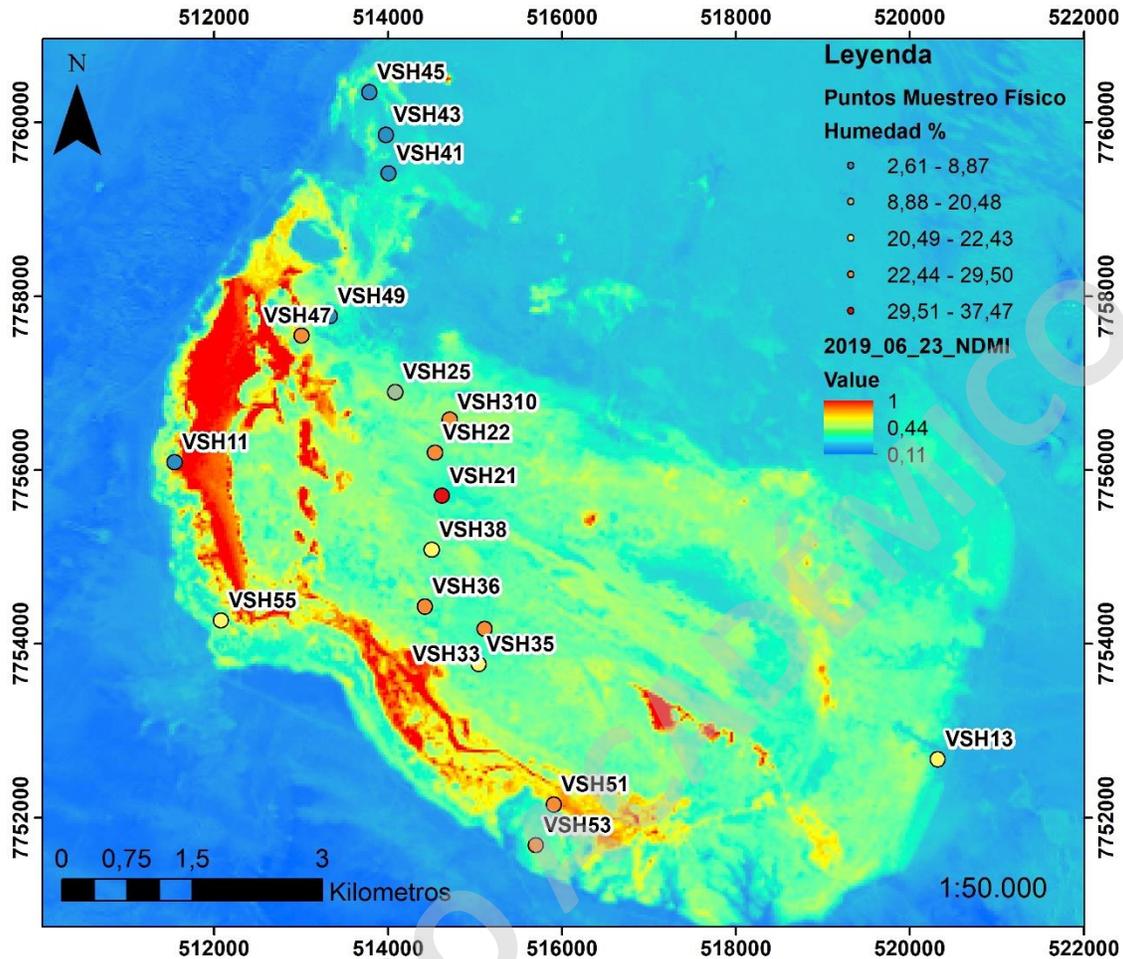


Figura 19. Mapa comparativo entre los datos de humedad de laboratorio y los procesos de imágenes (NDMI).
Elaboración propia.

En términos estadísticos, la correlación entre ambos grupos de datos (Tabla 10) es regular, como se puede apreciar en el Gráfico 6, en donde se observa la dispersión de los puntos a lo largo de la línea de tendencia central. Esto se ve corroborado por el coeficiente de Pearson calculado en 0,42, el cual también señala un nivel de correlación regular.

Tabla 10. Comparación entre los datos de humedad de laboratorio y los datos de procesos de imágenes (NDMI).

Muestra	Humedad (%)	NDMI
VSH11	6,94	0,38
VSH13	22,34	0,09
VSH21	37,48	0,19
VSH22	29,50	0,18
VSH25	20,49	0,23

VSH33	26,43	0,16
VSH35	21,49	0,20
VSH36	26,37	0,15
VSH38	22,43	0,18
VSH310	28,58	0,28
VSH41	3,33	0,03
VSH43	5,71	0,01
VSH45	8,87	-0,001
VSH47	25,68	0,31
VSH49	2,62	0,10
VSH51	25,34	0,47
VSH53	28,06	0,20
VSH55	22,15	0,21

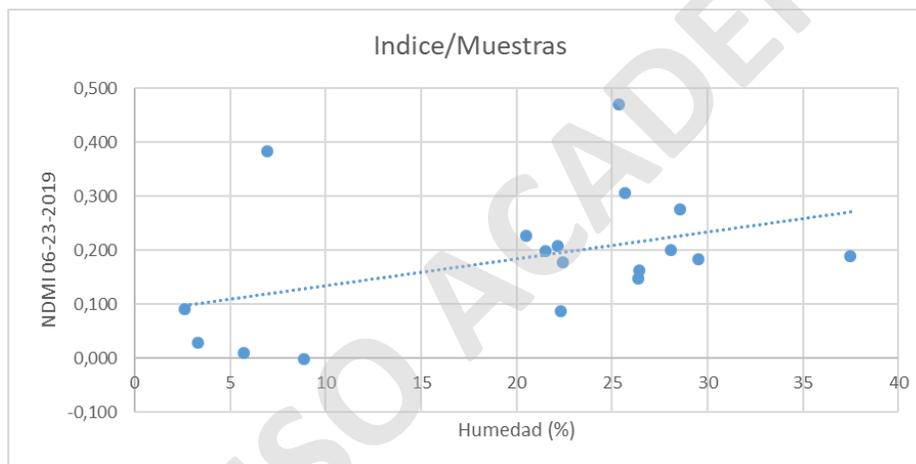


Gráfico 6. Correlación entre los datos de humedad de laboratorio y los datos de procesos de imágenes (NDMI).

En el caso de los valores del índice NDWI (Figura 20), las muestras en la parte central y este del salar (VSH13, VSH21 a VSH310, VSH51 y VSH53) y los datos de la imagen en la misma no muestran correlación ya que, aunque las muestras presentan un alto porcentaje de humedad (puntos rojos, amarillos y naranjas) se encuentran en una zona de baja humedad (celeste). Por otro lado, las muestras al norte del salar (bajo porcentaje de humedad), muestran nuevamente una buena correlación con las zonas celeste de la imagen, al igual que la muestra VSH11 y VSH49. En el caso de las muestras VSH47 y VSH55 estas presentan un moderado contenido de humedad y se encuentran en zonas cercanas a cuerpos de agua, por lo que se considera para estas un nivel de correlación moderado.

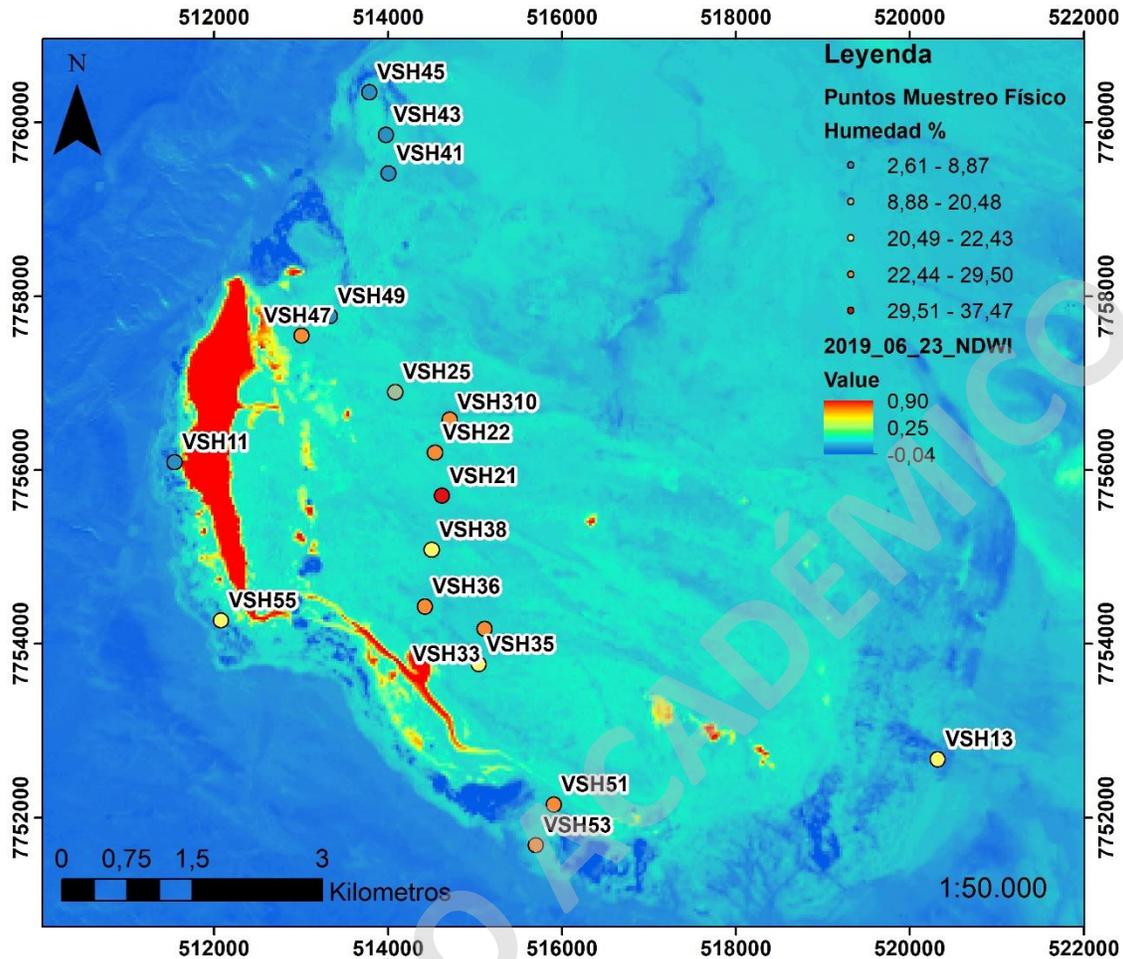


Figura 20. Mapa comparativo entre los datos de humedad de laboratorio y los procesos de imágenes (NDWI).
Elaboración propia.

En términos estadísticos la correlación entre los datos (Tabla 11) es baja, como se puede apreciar en el Gráfico 7, en donde los puntos, si bien, se ven menos dispersos a lo largo de la línea de tendencia, esta es semi-horizontal, lo que evidencia la independencia de ambas variables. Lo anterior es corroborado por el coeficiente de Pearson calculado en 0,14.

Tabla 11. Comparación entre los datos de humedad de laboratorio y los datos de procesos de imágenes (NDWI).

Muestra	Humedad (%)	NDWI
VSH11	6,94	-0,21
VSH13	22,34	-0,21
VSH21	37,48	-0,09
VSH22	29,50	-0,10
VSH25	20,49	-0,09

VSH33	26,43	-0,12
VSH35	21,49	-0,08
VSH36	26,37	-0,10
VSH38	22,43	-0,10
VSH310	28,58	-0,12
VSH41	3,33	-0,12
VSH43	5,71	-0,10
VSH45	8,87	-0,11
VSH47	25,68	-0,11
VSH49	2,62	-0,07
VSH51	25,34	-0,12
VSH53	28,06	-0,11
VSH55	22,15	-0,12

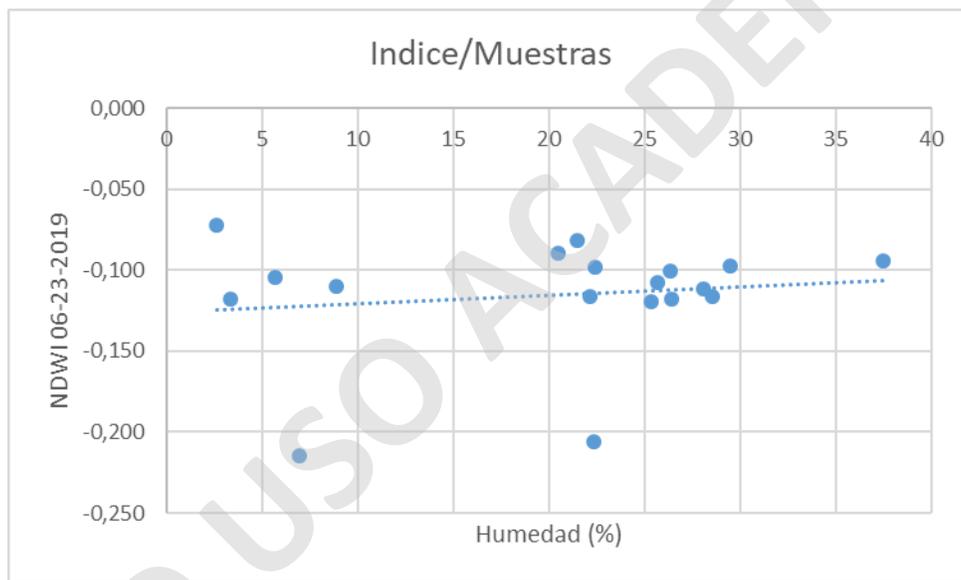


Gráfico 7. Correlación entre los datos de humedad de laboratorio y los datos de procesos de imágenes (NDWI).

4.2.3.2 SALINIDAD SUPERFICIAL

Para determinar la salinidad superficial se calcularon los índices BI y SI en la imagen Landsat 8 del 23 de junio de 2019 con Reflectancia TOA. En las imágenes resultantes (Figuras 21 y 22) se observa una gama de colores que representan los distintos niveles de salinidad. Debido a que los índices no entregan información directa de la salinidad, sino que basan su rango en los niveles de reflectancia que tienen los minerales salinos y suelos afectados por esta variable en ciertos rangos del espectro (0,45-0,67 μm), los colores en la imagen representan niveles de

salinidad desde muy alto (rojo), alto (anaranjado), moderado (amarillo) y bajo (celeste), los cuales no necesariamente son coincidentes con los establecidos en la clasificación de suelos salinos de Ibáñez (2008), la que se basa en niveles numéricos de conductividad eléctrica.

Con respecto a la correlación entre los valores de salinidad obtenidos de las muestras con los datos de la imagen BI, se puede apreciar en la Figura 21 que las muestras VSH41, VSH43 y VSH49 en la parte norte, presentan una baja correlación ya que poseen niveles de salinidad de muy ligero a ligero y sin embargo se encuentran en zonas amarillas e incluso rojas de la imagen. En el mismo caso están las muestras que poseen los mayores niveles de salinidad (VSH21, VSH22 y VSH 33) que se encuentran en zonas celestes en la parte central de la imagen. Por otro lado, las demás muestras presentan una buena correlación ya que sus niveles de salinidad concuerdan con los de la imagen, a excepción de la muestra VSH25 que posee un nivel de salinidad medio, y se sitúa en una zona roja, por lo que se considera para esta un nivel de correlación moderado.

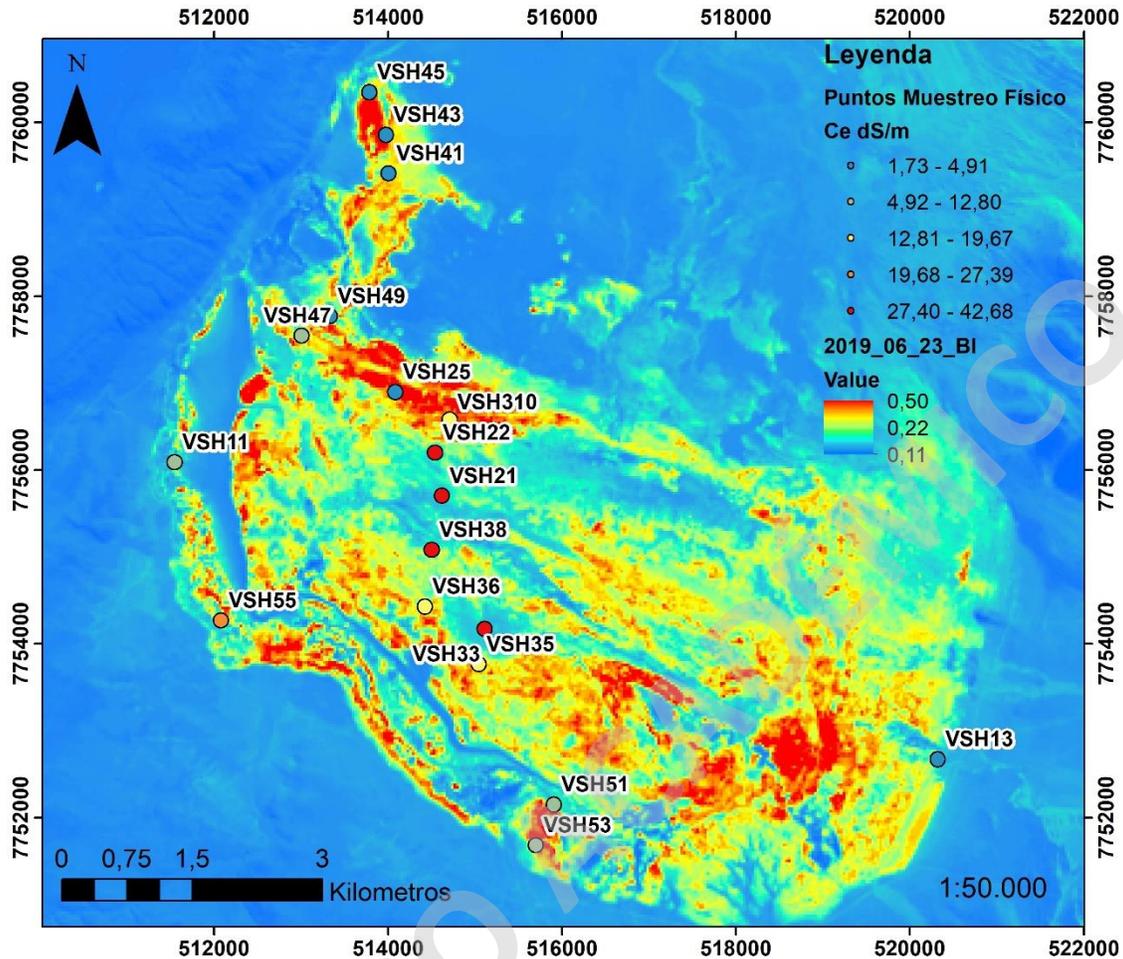


Figura 21. Mapa comparativo entre los datos de salinidad de laboratorio y los procesos de imágenes (BI).
Elaboración propia.

En términos estadísticos la correlación entre los datos (Tabla 12) es regular pero inversa, como se puede apreciar en el Gráfico 8, en donde se ven los puntos dispersos a lo largo de una línea de tendencia negativa. Así también, el coeficiente de Pearson calculado en -0,51 señala un nivel de correlación regular inverso.

Tabla 12. Comparación entre los datos de salinidad de laboratorio y los datos de procesos de imágenes (BI).

Muestra	Ce [dS/m]	BI
VSH11	7,44	0,09
VSH13	4,03	0,11
VSH21	42,68	0,15
VSH22	37,24	0,09
VSH25	4,70	0,35

VSH33	36,28	0,08
VSH35	19,67	0,27
VSH36	15,33	0,22
VSH38	36,04	0,14
VSH310	17,15	0,27
VSH41	1,73	0,20
VSH43	3,14	0,30
VSH45	4,91	0,29
VSH47	12,80	0,19
VSH49	2,65	0,34
VSH51	7,95	0,10
VSH53	10,98	0,24
VSH55	27,39	0,15

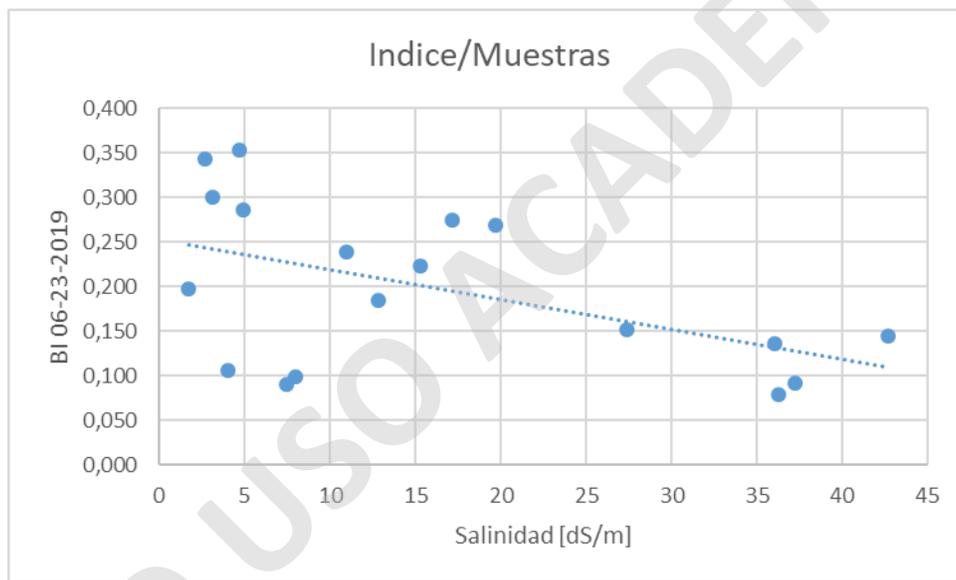


Gráfico 8. Correlación entre los datos de salinidad de laboratorio y los datos de procesos de imágenes (BI).

En el caso de la Figura 22, en la imagen SI hay una diferencia en la influencia de las zonas de moderada a alta salinidad (amarillo y anaranjado respectivamente), abarcando una mayor superficie. Las muestras que evidencian baja correlación se ubican en la zona norte (VSH25, VSH41, VSH43, VSH45 y VSH49), presentando valores de salinidad (conductividad eléctrica) bajos y sin embargo encontrándose en zonas de salinidad de alta a muy alta. En el mismo caso, las muestras VSH21 y VSH33, que son las que posee valores más altos de salinidad, se encuentran en zonas celestas a amarillas de baja a moderada salinidad. Con mejor correlación están las muestras VSH22, VSH36, VSH38, VSH310, VSH47, VSH51, VSH53 y VSH55 que poseen valores de salinidad altos a muy alto y se encuentran en zonas

naranja y roja. Del mismo modo, la muestra VSH13 presenta un bajo valor de salinidad y se encuentra en una zona celeste. Por otro lado, la muestra VSH11 presenta nivel de correlación moderado ya que posee un valor de salinidad moderado y se encuentra en una zona celeste a amarilla (de baja a moderada salinidad).

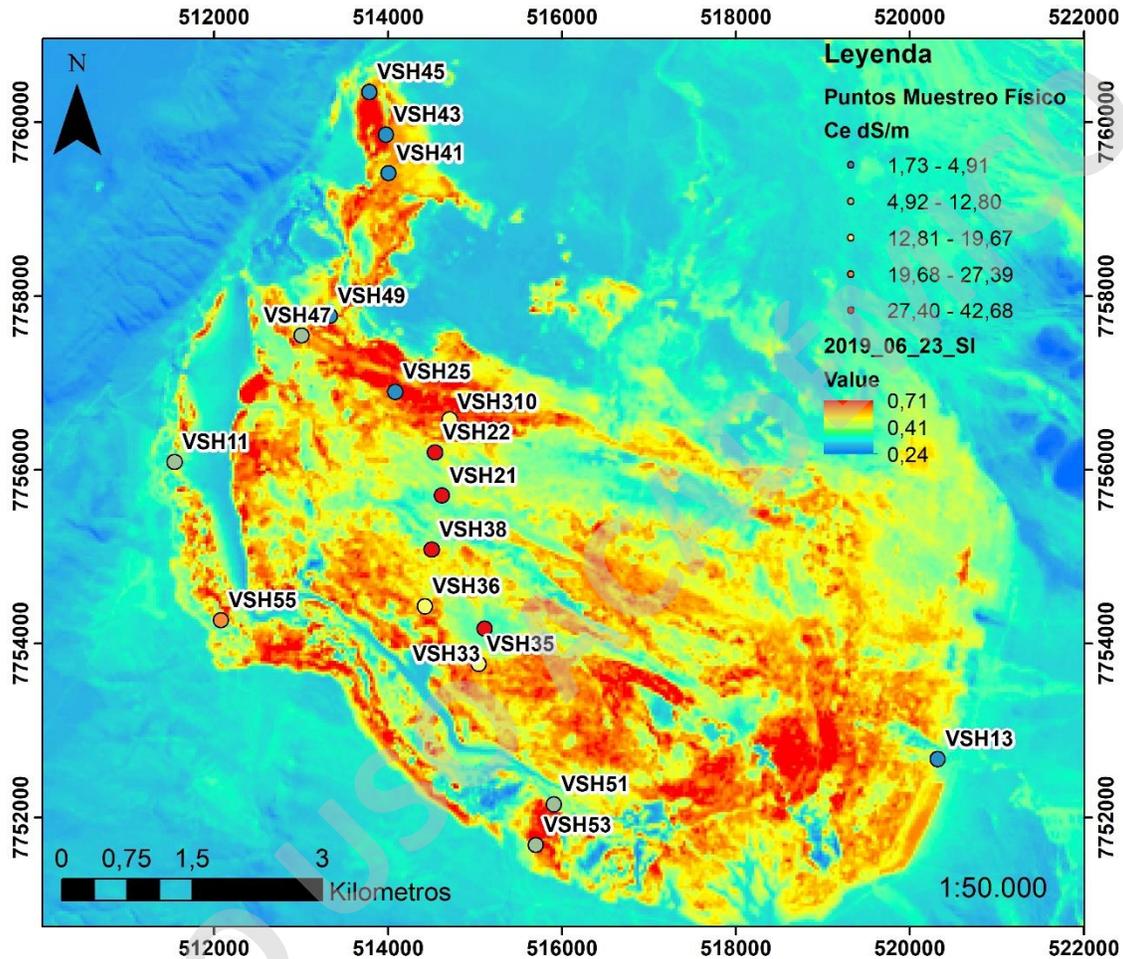


Figura 22. Mapa comparativo entre los datos de salinidad de laboratorio y los procesos de imágenes (SI).
Elaboración propia.

En términos estadísticos la correlación entre los datos (Tabla 13) es regular pero inversa, como se puede apreciar en el Gráfico 9, en donde se ven los puntos dispersos a lo largo de una línea de tendencia negativa. El coeficiente de Pearson calculado en -0,5 señala un nivel de correlación regular inverso.

Tabla 13. Comparación entre los datos de salinidad de laboratorio y los datos de procesos de imágenes (BI).

Muestra	Ce [dS/m]	SI
---------	-----------	----

VSH11	7,44	0,300
VSH13	4,03	0,326
VSH21	42,68	0,380
VSH22	37,24	0,304
VSH25	4,70	0,595
VSH33	36,28	0,281
VSH35	19,67	0,518
VSH36	15,33	0,472
VSH38	36,04	0,368
VSH310	17,15	0,524
VSH41	1,73	0,445
VSH43	3,14	0,548
VSH45	4,91	0,535
VSH47	12,80	0,430
VSH49	2,65	0,586
VSH51	7,95	0,315
VSH53	10,98	0,489
VSH55	27,39	0,389

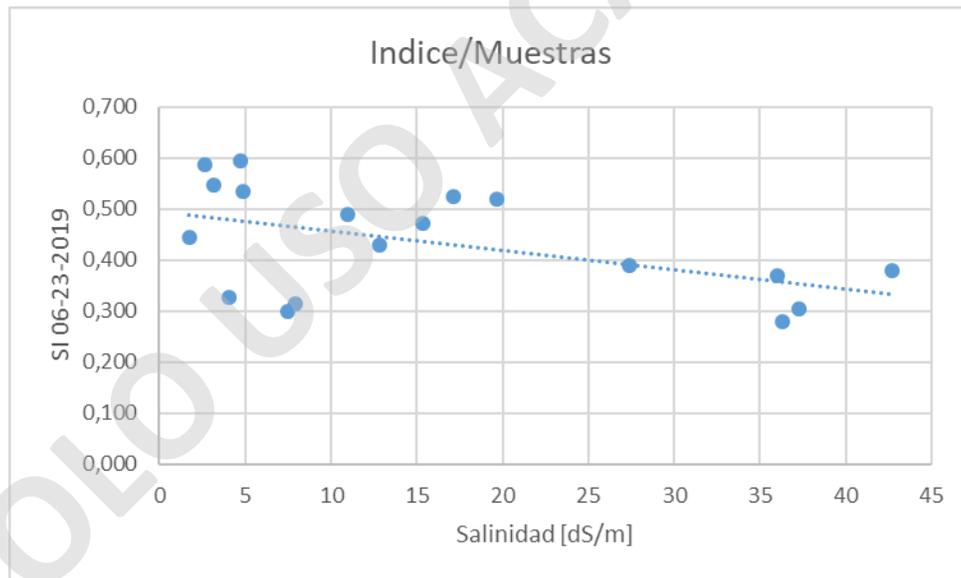


Gráfico 9. Correlación entre los datos de salinidad de laboratorio y los datos de procesos de imágenes (SI).

4.2.3.3 TEMPERATURA SUPERFICIAL

Para determinar la temperatura superficial, se utilizó el método de extracción LST en la imagen Landsat 8 del 23 de junio de 2019 con Reflectancia TOA. En la imagen

resultante (Figura 23) se observa una gama de colores que representan los distintos niveles de temperatura expresados en grados Celsius. En este caso la correlación es más directa, debido a que los valores de las muestras y de las imágenes se encuentran en la misma unidad, sin embargo, es necesario considerar que, si bien, la escala de la imagen llega hasta los 32°C, estas temperaturas están asociadas a unidades de rocas ubicadas fuera del salar, como son Estratovolcanes y secuencias volcánicas del Mioceno Medio, depósitos aluviales del Mioceno Superior-Plioceno y del Pleistoceno-Holoceno. Dentro del área del salar, sin embargo, la temperatura máxima es de 18°C, asociada a la Zonas de Sulfatos de Ca y Mg. Debido a esta diferencia de temperatura, los colores de ambas escalas no son coincidentes.

En la imagen LST (Figura 23) las zonas de más baja temperatura son coincidentes con cuerpos de agua, zonas húmedas y zonas de sulfatos y arcillas del mapa de Salar del Huasco presentado en este trabajo (Figura 18), esto asociado a la baja emitancia (emisión de energía de la superficie) que tienen estas superficies en la sección del infrarrojo termal del espectro electromagnético.

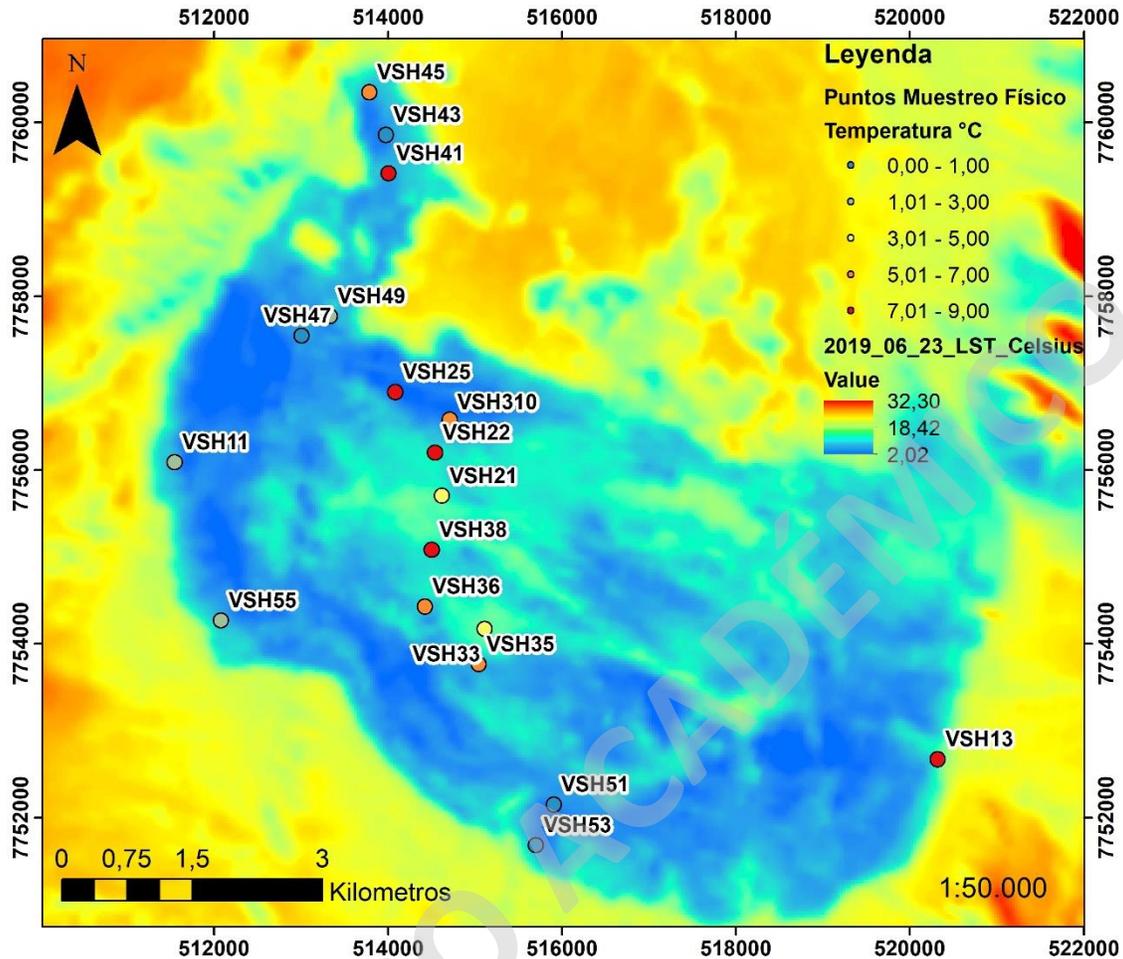


Figura 23. Mapa comparativo entre los datos de temperatura de terreno y los procesos de imágenes (LST).
Elaboración propia.

Para analizar la correlación entre los datos en este caso, es más efectivo comparar los valores directamente. Como se puede apreciar en la Tabla 14, son 8 las muestras que presentan una buena correlación (VSH13, VSH22, VSH35, VSH36, VSH38, VSH41, VSH45, VSH49), con una diferencia máxima valor muestra/imagen de 2°C. El resto de las muestras se considera que tienen una baja correlación con diferencias entre los valores desde 3°C hasta 7°C, siendo menor la temperatura medida en terreno en el 80% de los casos.

Tabla 14. Comparación entre los datos de temperatura de terreno y los datos de procesos de imágenes (LST).

Muestra	T° [°C]	LST °C
VSH11	2	5,448
VSH13	8	10,192
VSH21	5	10,255

VSH22	8	9,890
VSH25	8	2,285
VSH33	4	11,865
VSH35	7	5,744
VSH36	7	7,320
VSH38	9	8,692
VSH310	7	3,164
VSH41	8	6,317
VSH43	1	3,426
VSH45	6	5,724
VSH47	0	5,516
VSH49	3	4,316
VSH51	1	3,706
VSH53	0	4,919
VSH55	3	6,535

En términos estadísticos la correlación entre los datos es baja, como se puede apreciar en el Gráfico 10, en donde los puntos se ven bastante dispersos a lo largo de la línea de tendencia. Lo anterior se ve corroborado con el coeficiente de Pearson calculado en 0,33.

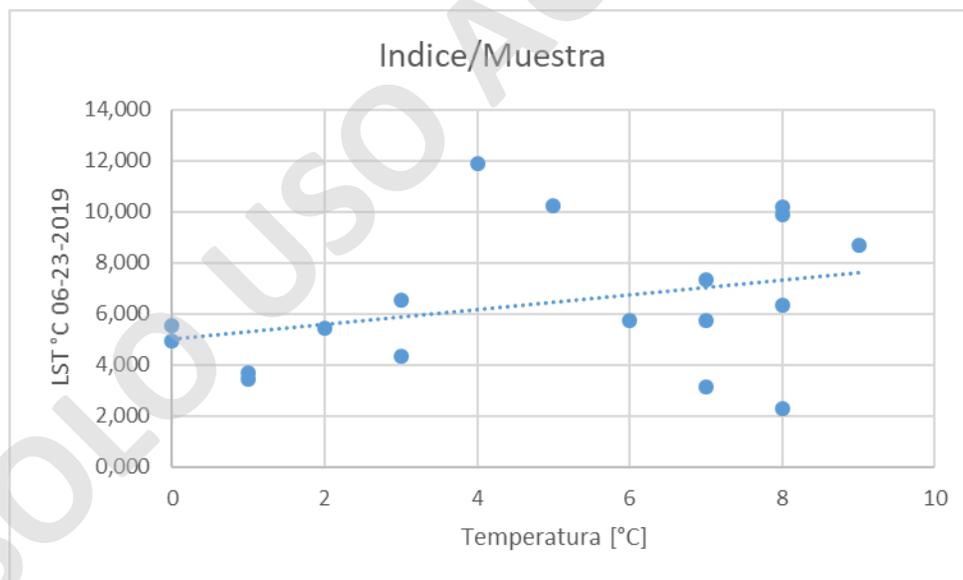


Gráfico 10. Correlación entre los datos de temperatura de terreno y los datos de procesos de imágenes (LST).

5 DISCUSIONES

5.1 LIMITACIONES DEL ESTUDIO Y ASPECTOS METODOLÓGICOS

Las principales limitaciones de este trabajo surgieron durante la etapa de terreno. Primero que todo, las condiciones climáticas al momento de planificar el viaje complicaron la elección de una fecha que coincidiera con el paso del satélite Landsat 8 lo que terminó siendo una de las causas, sino la principal, de las bajas correlaciones entre los datos de muestra e imágenes. Otro limitante fueron los días disponibles de trabajo, lo cual, en conjunto con el lento acceso a algunas áreas del salar por la falta de caminos interiores para vehículos, redujo el alcance del muestreo y el tiempo de trabajo efectivo por día.

Además, debido a ciertas circunstancias, a excepción del primer día de trabajo, durante el resto del viaje fue imposible acceder a la zona este del Salar del Huasco, por lo que el muestreo se concentró principalmente en la zona oeste. Lo anterior significó que cerca del 40% del mapa de distribución mineralógica del salar (Figura 18) fuese realizado en base a extrapolación de datos del sector oeste e información satelital del sector este.

Debido a que no se contó con un protocolo establecido para muestreo en salares, hubo ciertas deficiencias en la metodología aplicada en este trabajo, que abarcan los siguientes tres puntos. (1) En cuanto al número de muestras, se optó por tomar el mayor número de muestras posibles en las áreas definidas como de interés en pre-terreno. Para análisis mineralógico (29 muestras) se considera que el número de muestras es bajo tomando en cuenta la alta variabilidad horizontal de un sistema salino como el Salar del Huasco, sin embargo, el número es alto al comparar con las muestras tomadas por otros autores que han estudiado el salar (Tabla 15), por este motivo, y sin un protocolo establecido como referencia, se considera como aceptable la representatividad de las muestras para el mapeo mineralógico, ya que, además, se encuentran distribuidas formando un perfil transversal de norte a sur, abarcando las zonas minerales planteadas en la etapa previa al terreno en base a la combinación de bandas (567) (Flahaut *et al.*, 2017) (Figura 16).

En el caso de las muestras fisicoquímicas (18 muestras), se considera que poseen una baja representatividad, debido a que en el presente estudio se utilizó como referencia una metodología de muestreo agrícola para suelos con baja variabilidad. En esos casos y para parámetros similares se toman de 20 a 25 sub-muestras que componen una muestra, por cada 10 hectáreas (ha) (Bernier, 1998). Sin embargo y debido a las limitaciones de este estudio, en este trabajo se tomó una muestra por cada 70 ha.

(2) Hubo algunas deficiencias en el proceso de toma de muestras para análisis de parámetros fisicoquímicos que supusieron una fuente de error al momento de realizar la correlación entre datos de imágenes y de muestras. Ya que la metodología de muestreo utilizada es del área de agricultura, las muestras se

tomaron a 10 cm, por el contrario, la información captada por los sensores satelitales es estrictamente de la superficie del suelo, por lo que, tomando en cuenta que el salar es un sistema dinámico con variaciones tanto horizontales como verticales, es de esperar que los datos de parámetros fisicoquímicos de muestras e imágenes reflejen esta variación.

(3) Por último, asociado a la metodología de tratamiento de muestras una fuente importante de error se dio en el caso del proceso del análisis de humedad. Debido a una confusión entre las metodologías encontradas en la literatura (Sadzawka *et al.*, 2006) con las conversadas con el Profesor Mauricio Molina, a las muestras se les aplicó un proceso de secado al aire previo a su análisis, lo que implicó una pérdida de humedad y, por lo tanto, una pérdida de representatividad de las condiciones reales de terreno. En consecuencia, los datos de humedad utilizados en este trabajo son solo de referencia.

Si bien los últimos dos puntos supusieron una fuente de error al momento de la correlación de los datos, es probable que la profundidad a la que se tomó la muestra tuviera menos peso en la pérdida de representatividad. El secado de las muestras significó una pérdida mayor de representatividad de las condiciones reales. Sin embargo, se considera que la fuente de error más relevante fue la diferencia entre las fechas de muestreo con la del paso del satélite por la zona, ya que, sin importar las deficiencias en el muestreo y tratamiento de muestras, los datos igualmente no habrían representado las condiciones del suelo del salar en la fecha de la imagen Landsat 8 utilizada, debido a la influencia de la variable clima en los parámetros fisicoquímicos del suelo del Salar del Huasco.

Entonces, lo que se recomienda para trabajos posteriores, primero que todo, es buscar que el muestreo se realice en una fecha concordante con el paso del satélite Landsat 8 por la zona. Segundo, el protocolo de muestreo tiene que ser planteado considerando las características únicas del suelo salar, el cual no entra en ninguna de las clasificaciones utilizadas en agricultura. Se plantea que este protocolo sea lo más sistemático posible con tal de aumentar la representatividad del muestreo, lo que, si bien conllevaría mayores dificultades en el tema logístico y de transporte de las muestras, aumentaría la precisión del estudio y probablemente mejoraría los niveles de correlación entre los datos de imágenes y análisis de laboratorio. Para el caso de las muestras físicas, se propone además que sean tomadas lo más superficial posible (1-2 cm) en circunferencias de radio 5 cm, recogiendo una muestra compuesta de al menos 5 submuestras en un área de 1 m, tomando como base el protocolo de muestreo usado en este trabajo.

5.2 DISTRIBUCIÓN Y ANÁLISIS DE UNIDADES EN EL SALAR DEL HUASCO

Las unidades definidas en este trabajo en términos mineralógicos consisten en; una de Sulfatos de Ca y Mg (yeso y epsomita) en el centro del salar, y una de Sulfatos y Arcillas de Ca y Mg (yeso, illita-esmectita y saponita) en el borde del salar y ocasionalmente en el centro. Esta mineralogía y distribución fue definida a través

del muestreo en terreno e información de imágenes satelitales. Al comparar estos resultados con los trabajos de otros autores utilizados como referencia en este estudio, se encontraron ciertas diferencias destacables, las cuales se explican a continuación.

Primero, en cuanto al trabajo con imágenes satelitales, en este trabajo se aplicó la combinación de bandas (567) RGB sobre una imagen Landsat 8. Esta combinación fue utilizada por Flahaut *et al.* en su trabajo del 2017 para distinguir distintas zonas mineralógicas en el Salar de Atacama, logrando distinguir las siguientes tonalidades (niveles de reflectancia) y sus respectivas mineralogías; tonalidades blancas para sulfatos, amarillas para carbonatos y arcillas, grises para halita y rojizas para zonas de suelo húmedo.

Al aplicar la combinación de bandas en este trabajo, se asumió en primera instancia, que las tonalidades y sus respectivas mineralogías serían las mismas para el Salar del Huasco. Sin embargo, con los resultados del muestreo mineralógico y el análisis de la imagen Landsat 8 del salar, se visualizó que las tonalidades blancas y amarillas representan una variedad de sulfatos y arcillas de Ca y Mg, las tonalidades grises a sulfatos de Ca/Mg principalmente y las tonalidades rojizas y negras a zonas de suelo húmedo y cuerpos de agua.

La diferencia entre este trabajo y el de Flahaut *et al.* (2017) podría deberse a que se realizan en salares distintos (Huasco y Atacama respectivamente). Otras diferencias son las climáticas, por las distintas latitudes (22°59'32" hasta los 23°28'40" latitud Sur) y alturas (2.300 m s.n.m.) en las que se ubican, lo que influye en las tasas de precipitación, evaporación y la misma química de la cuenca. Del mismo modo, las fechas de las imágenes utilizadas en cada estudio fueron distintas (junio de 2019 y diciembre de 2014 respectivamente), lo que conlleva diferencias climáticas estacionales. Por todo lo anterior, es poco probable que la mineralogía y la química sean exactamente iguales (aunque probablemente similares), por lo mismo, es esperable que los valores de reflectancia (colores en la imagen compuesta), que dependen explícitamente de los minerales presentes en la superficie y la composición de estos, reflejen esta diferencia.

Durante este trabajo, se recopiló también información de análisis mineralógicos realizados por otros autores en el Salar de Huasco (Gardeweg y Selles, 2013; López *et al.*, 1999 y Véliz, 2018). Estos datos sirvieron a modo de comparación con los resultados del análisis mineralógico realizado a las muestras recolectadas durante el trabajo de terreno (Figura 24 y Tabla 15). Al comparar estos datos, se puede apreciar que en las zonas minerales definidas en este trabajo donde predominan sulfatos, los autores anteriores documentan la presencia de minerales del mismo tipo, junto con halita como principal componente, sin embargo, no se encontró este mineral en las muestras analizadas en el presente trabajo (Tabla 4).

En cuanto a la distribución de facies minerales, los autores mencionados coinciden en que el salar presenta un núcleo salino masivo compuesto principalmente por

halita y mirabilita, bordeado por una zona de sulfatos, entre los cuales destacan yeso y thenardita. Véliz (2018) también señala la presencia de carbonatos como calcita y dolomita en las zonas más periféricas del sureste del salar. Entonces, las diferencias destacables entre las mineralogías descritas para el Salar del Huasco en este trabajo con las descritas por Gardeweg y Selles (2013) López *et al.* (1999) y Véliz (2018), consiste en el hallazgo, por parte de estos últimos, de minerales como la halita, thenardita y carbonatos.

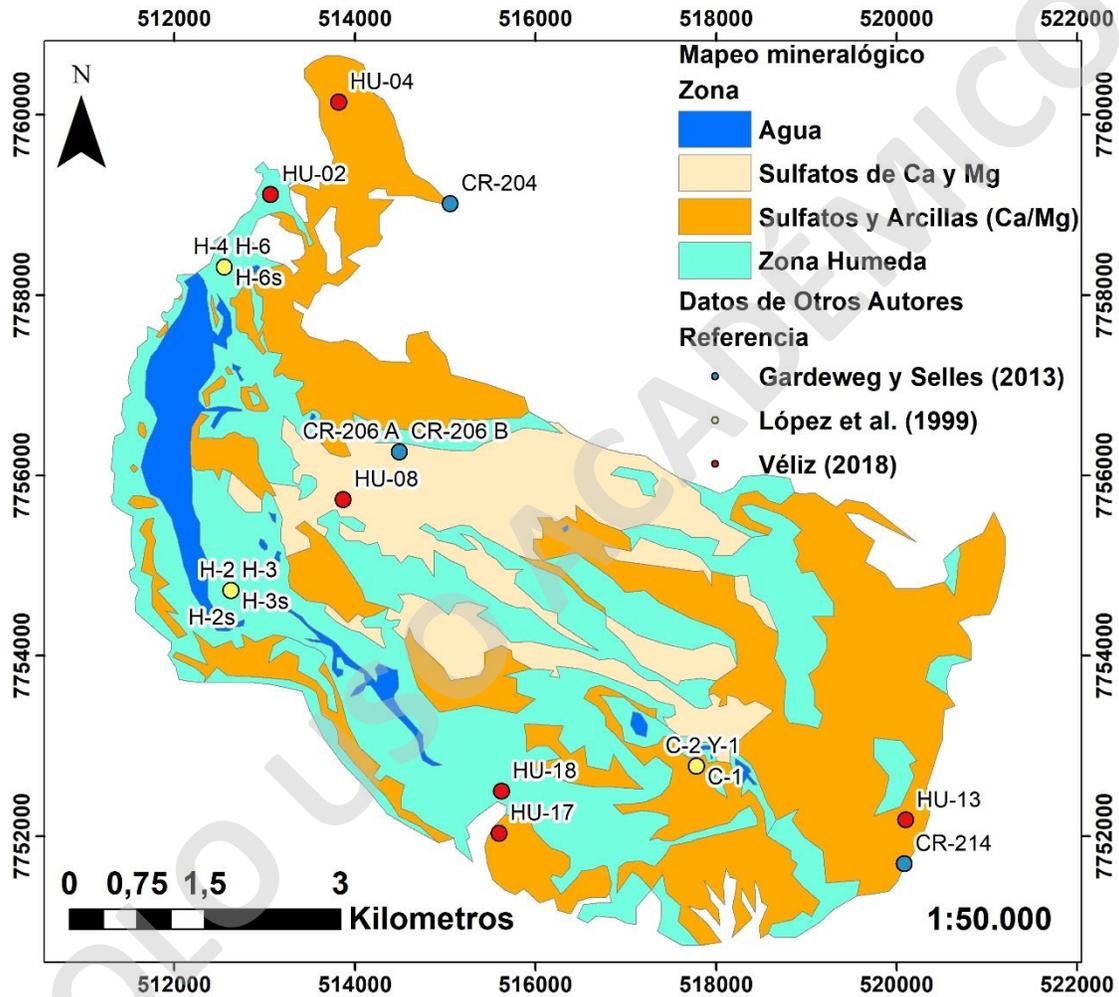


Figura 24. Mapa mineral del Salar del Huasco con puntos de muestreo de otros autores. Minerales listados en Tabla 15. Elaboración propia.

Tabla 15. Puntos de muestreo de otros autores dentro del Salar del Huasco. Elaboración propia.

Muestra	UTM Este	UTM Norte	Minerales mayoritarios	Minerales minoritarios	Referencia
CR-204	515058	7759015	Halita, Thenardita	Cuarzo, Cristobalita, Halita potásica, Albita cálcica	Gardeweg y Selles (2013)
CR-206 B	514494	7756263	Halita, Bassanita	Cuarzo, posible Cristobalita	Gardeweg y Selles (2013)
CR-206 A	514494	7756263	Mirabilita, Yeso	Cuarzo, trazas de Pirofilita	Gardeweg y Selles (2013)
CR-214	520087	7751693	Yeso		Gardeweg y Selles (2013)
H-4	512554	7758312	Yeso, Halita	Eugsterita, Calcita, Cuarzo	López <i>et al.</i> (1999)
H-6	512554	7758312	Halita, Thenardita, Calcita	Bloedita, Picromerita, Bassanita, Kutnohorita-Mg	López <i>et al.</i> (1999)
H-6s	512554	7758312	Calcita, Anortita, Moscovita	Cuarzo	López <i>et al.</i> (1999)
H-2	512625	7754724	Halita, Yeso	Mirabilita, Singenita, Silvita, Thenardita, Loweita, Calcita	López <i>et al.</i> (1999)
H-2s	512625	7754724	Calcita, Moscovita, Anortita	Cuarzo, Hornblenda	López <i>et al.</i> (1999)
H-3	512625	7754724	Yeso, Singenita	Loweita, Thenardita, Calcita, Natrolita	López <i>et al.</i> (1999)
H-3s	512625	7754724	Yeso, Cuarzo	Calcita, Halita, Eugsterita	López <i>et al.</i> (1999)
C-1	517784	7752777	Halita, Thenardita	Glaserita, Calcita, Singenita	López <i>et al.</i> (1999)
C-2	517784	7752777	Halita, Thenardita	Singenita, Yeso, Calcita, Glaserita, Carnalita, Polohalita, Epsomita	López <i>et al.</i> (1999)
Y-1	517784	7752777	Halita, Calcita	Yeso, Singenita, Glaserita, Dolomita	López <i>et al.</i> (1999)
HU-02	513066	7759118	Thenardita, Calcita, Halita	Cuarzo Bajo, Albita, Burkeita, Trazas de Azufre	Véliz (2018)
HU-04	513821	7760140	Calcita magnésica, Thenardita	Halita, Nitratina, Eugsterita, Bloedita	Véliz (2018)
HU-08	513870	7755733	Halita, Singenita, Yeso	Thenardita, Aragonito, Hilgardita, Aphthitalita	Véliz (2018)
HU-13	520103	7752178	Yeso, Halita, Eugsterita	Cuarzo Bajo, Singenita	Véliz (2018)
HU-17	515598	7752032	Halita, Yeso, Eugsterita	Dolomita, Singenita, Ameghinita	Véliz (2018)
HU-18	515623	7752496	Halita, Thenardita	Calcita Magnésica, Silvita, Georgeyita, Nitratina, Cristobalita, Hanksita	Véliz (2018)

Esta diferencia en las mineralogías encontradas puede estar dada por tres factores, (1) la fecha en la cual fueron tomadas las muestras. Es posible que la evolución natural del salar junto con las variaciones climáticas que han tenido lugar durante los últimos años haya mermado la presencia de halita en comparación con los demás minerales, debido a diferencias en las tasas de disolución y precipitación. (2) Las muestras en este trabajo fueron analizadas con un equipo TerraSpec y se definió la mineralogía en base a análisis de espectros. Por otro lado, los autores citados anteriormente realizaron sus análisis utilizando equipos de difracción de rayos x (DRX). Es posible que, el uso de técnicas de análisis distintas diera origen a las diferencias entre las mineralogías registradas en este trabajo y los trabajos de Gardeweg y Selles (2013), López *et al.* (1999) y Véliz (2018).

(3) También puede ser que la halita se encuentre en las muestras en una proporción muy baja y mezclada con otros minerales. En adición a esto, la halita pura refleja en todas las longitudes de onda, teniendo una pequeña absorción por presencia de moléculas de agua como inclusiones fluidas (Gráfico 11). Por lo que su patrón de absorción puede ser fácilmente enmascarado por otros minerales, si es que se encuentra en una baja proporción en la muestra.

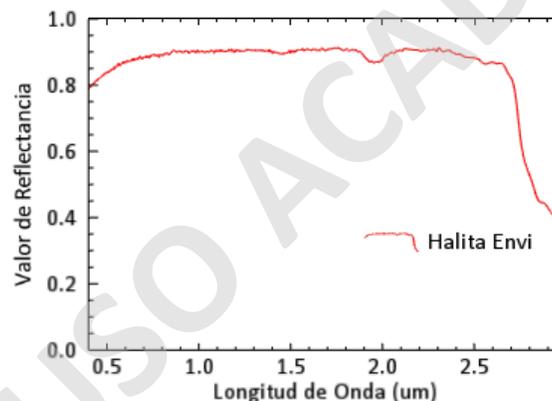


Gráfico 11. Firma espectral de halita. Extraída de la biblioteca de espectros de ENVI 5.3.

5.3 ANÁLISIS DE VARIABLES FISICOQUÍMICAS EN EL SALAR DEL HUASCO

El análisis de variables fisicoquímicas en este trabajo se llevó a cabo integrando los datos obtenidos del muestreo e imágenes satelitales. Sin embargo, como se vio en el capítulo de Resultados, al comparar ambos grupos de datos, los niveles de correlación fueron regulares a bajos, por lo que, a diferencia de la mineralogía, no fue posible realizar un análisis de distribución de estas variables.

Al comparar los datos de humedad de muestras e imágenes, estos presentan un nivel de correlación regular a bajo y entre los datos de muestras para las distintas variables la humedad presentó un nivel de correlación bueno para conductividad eléctrica y nulo para temperatura. La temperatura también presenta bajos niveles de correlación entre datos de muestras e imágenes y a diferencia de la variable

humedad, los datos de temperatura de terreno muestran una baja correlación con los datos de conductividad eléctrica.

La relación entre humedad y conductividad puede estar asociado a procesos de disolución y acumulación de sales vinculado a movimientos de aguas superficiales en el suelo del salar. En cuanto a la temperatura, al mirar los datos de manera general se puede interpretar que las bajas temperaturas del salar están relacionadas a los altos niveles de humedad, dándole a estas dos variables una relación inversa.

El bajo nivel de correlación entre los datos de variables fisicoquímicas de muestras e imágenes es atribuible a varios factores, que ya han sido mencionados y afectan a todos los parámetros por igual (diferencia de tiempo y errores metodológicos). Por otro lado, el caso de los datos de salinidad es destacable y se explica a continuación.

Anteriormente, se vio que entre los datos de salinidad obtenidos a partir del análisis de las muestras y los obtenidos del análisis de imágenes existe una correlación inversa o negativa. Los índices de salinidad utilizados (SI y BI) fueron desarrollados originalmente para medir esta variable en suelos agrícolas afectados por el uso de fertilizantes, estos suelos salinos presentan altos niveles de reflectancia en las bandas del espectro visible rojo y azul (se utilizan en el cálculo del índice) por lo que en imágenes satelitales se ven de un color blanco brillante (igual en composición 567 en RGB). En el caso del Salar del Huasco las zonas que se ven de esta tonalidad, corresponden a los bordes y parte del centro, y que según el muestreo corresponden a zonas sulfatos y arcillas (Figura 18) con bajos niveles de salinidad según el muestreo y altos según los índices (Figura 21 y Figura 22). Por otro lado, las zonas que según el muestreo poseen altos niveles de salinidad y bajos según las imágenes (Figura 21 y Figura 22) corresponden a las zonas centrales del salar, y se ven de un color grisáceo tanto en imagen natural, como en composición (567) RGB. Estas zonas corresponden, según el muestreo a zonas de sulfatos de calcio y magnesio (Figura 18). Esta diferencia entre los datos de muestras e imágenes es esperable si consideramos el caso del suelo salino del salar como distinto a los suelos salinos afectados por labores agrícolas. En este caso las zonas de mayor salinidad no corresponden a las zonas que tienen una mayor reflectancia en las bandas del espectro visible (sulfatos y arcillas) si no a las que tienen una menor reflectancia, obviando las zonas de cuerpos de agua.

Por lo tanto, una propuesta que surge de esta diferencia entre datos de imágenes y muestras sería adaptar el índice de salinidad para salares. Esto para que los datos de mayor valor numérico correspondan a las zonas de menor reflectancia, que, según lo planteado anteriormente, presentan los mayores valores de salinidad (en este trabajo), y que corresponden según el mapa mineralógico (Figura 18) a zonas de Sulfatos de Ca y Mg (principalmente yeso y epsomita). Esto previo la aplicación de una máscara en la imagen que elimine las zonas consideradas como cuerpos de agua, que también presentan bajos niveles de reflectancia, utilizando el NDWI para

delimitar estos cuerpos y el NDMI para considerar las zonas de suelo húmedo (baja reflectancia) que podrían enmascararse como zonas de alta salinidad.

5.4 VARIABILIDAD DE LOS DATOS EN EL TIEMPO

Como se vio anteriormente la correlación entre los datos de parámetros fisicoquímicos (humedad, salinidad y T°) obtenidos del análisis de muestras y los datos obtenidos de los procesos de imágenes fue en general regular a baja. Siendo el principal motivo, la diferencia de tiempo en el que se tomaron las muestras y en el que se tomaron las imágenes por parte del sensor (resolución temporal de 15 días) el cual pasa por la zona del Salar del Huasco a las 14:36 hrs, hora local.

Esta variación a baja escala de tiempo, 15 días por la resolución temporal del sensor, es observable en la Figura 25 (NDMI), en donde se resaltan en círculos rojos las zonas que presentan variaciones locales, en este caso en la humedad.

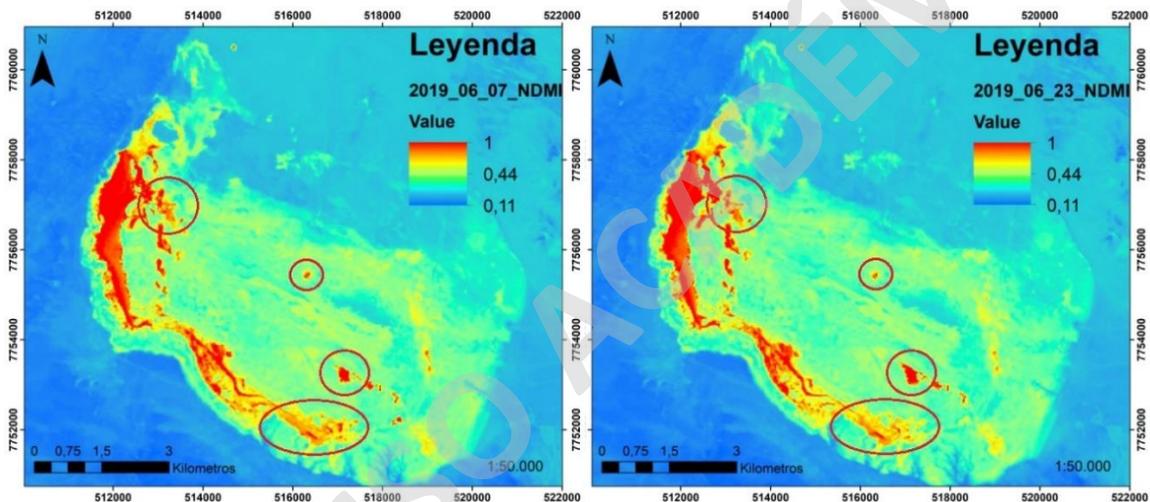


Figura 25. Comparación entre índices NDMI de la imagen del 07 y 23 de junio. Círculos rojos señalan las zonas del salar con cambios notorios.

Esta variación, afecta principalmente a las mediciones de temperatura, las cuales fueron realizadas en terreno a distintas horas del día. También, debido al dinamismo del sistema del salar y las condiciones climáticas, es evidente que tanto la temperatura, como también los niveles de agua y salinidad de la superficie, no son variables que se mantienen constantes en el tiempo. Lo anterior es apreciable visualmente en la Figura 26, que muestra una sucesión de imágenes índices de humedad (NDMI), salinidad (SI) y temperatura (LST) de distintas fechas, desde el mes de abril a agosto de 2019.

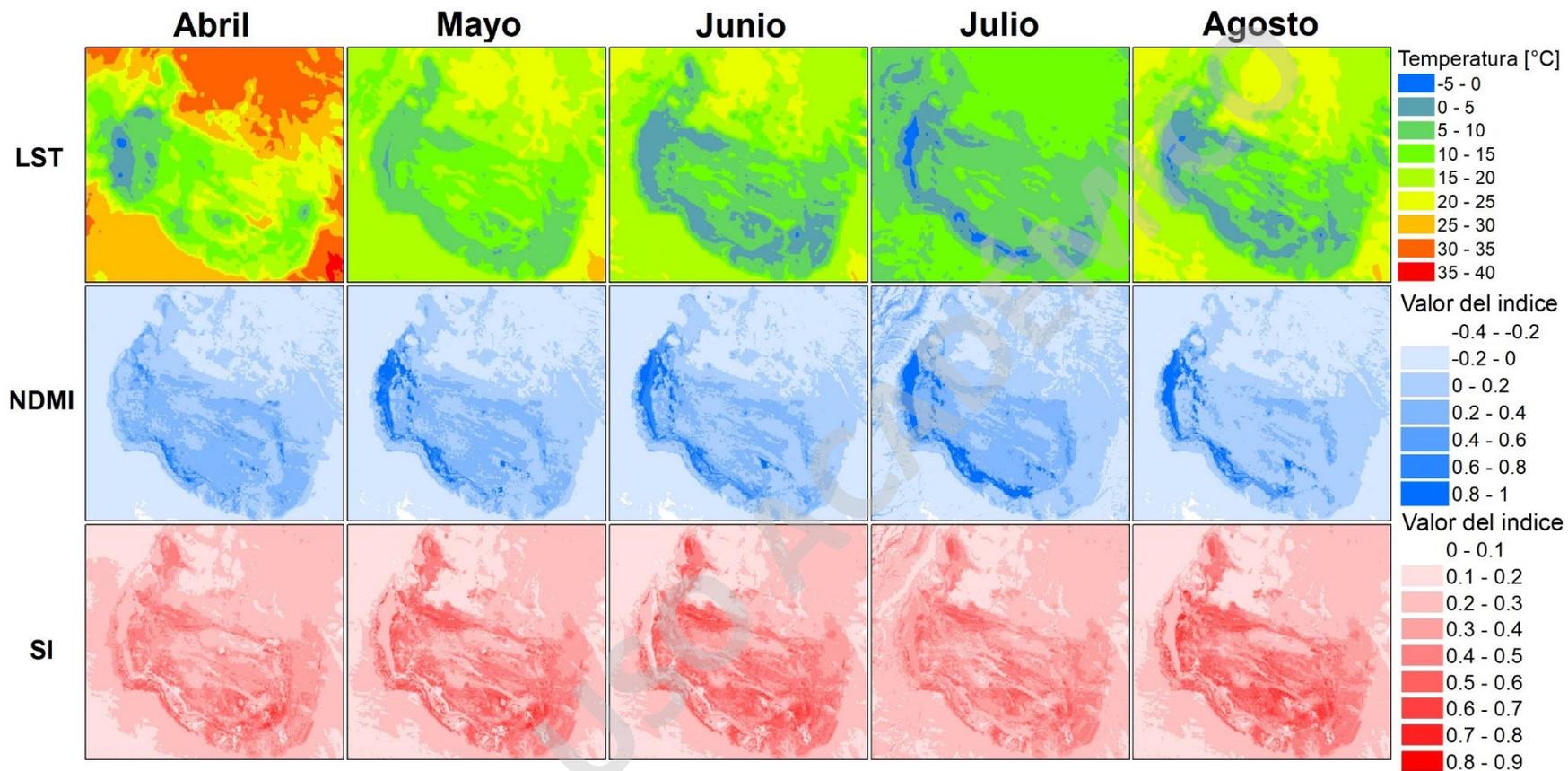


Figura 26. Comparación entre imágenes índices de distintas fechas. Secuencia superior: Temperatura (LST). Secuencia central: Humedad (NDMI). Secuencia inferior: Salinidad (SI). Elaboración propia.

En la sección superior de la Figura 26 se puede apreciar como la temperatura (LST) presenta una tendencia a disminuir a medida que pasan los meses, salvo por una leve alza en el mes de agosto. Esta baja de las temperaturas a nivel general es esperable siguiendo la transición de otoño a invierno. Lo anterior se ve corroborado al extraer los datos puntuales de temperatura en los puntos de muestreo, cuyos valores promedio siguen la misma línea, a excepción de la imagen del 09 de julio, el cual muestra un alza de temperatura (aproximadamente 2°C), anómalo a la tendencia (Gráfico 12).

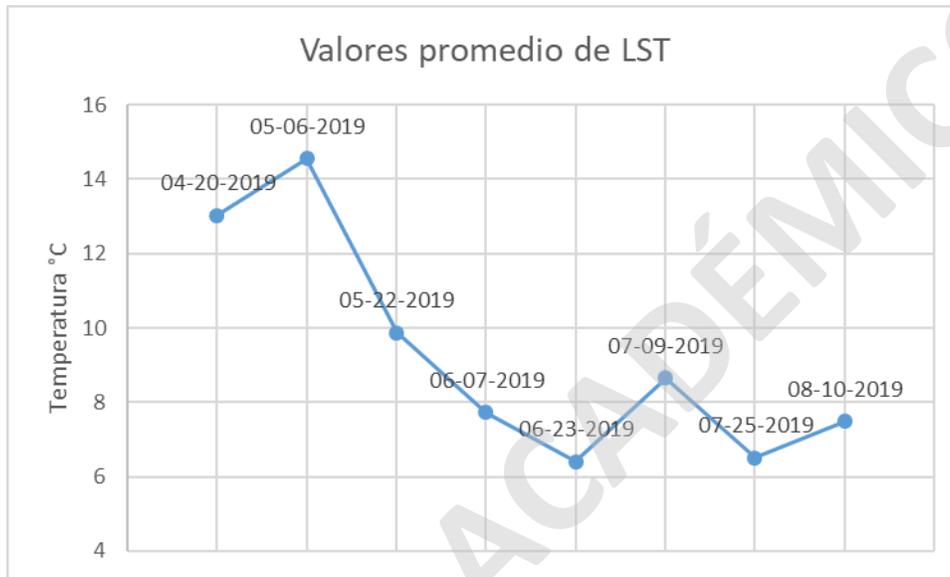


Gráfico 12. Valores promedio de temperatura extraídos de índices de imágenes de distintas fechas.
Elaboración propia.

Las imágenes índices de humedad NDMI (centro Figura 26), no presentan mayores cambios, salvo el mes de julio que parece tener los valores más altos de humedad, al menos en términos de área. Por otro lado, al revisar los datos extraídos de las imágenes (Gráfico 13) se ven valores promedio constantes hasta el mes de agosto donde bajan de manera abrupta en el gráfico. Sin embargo, la variación en términos numéricos es baja.

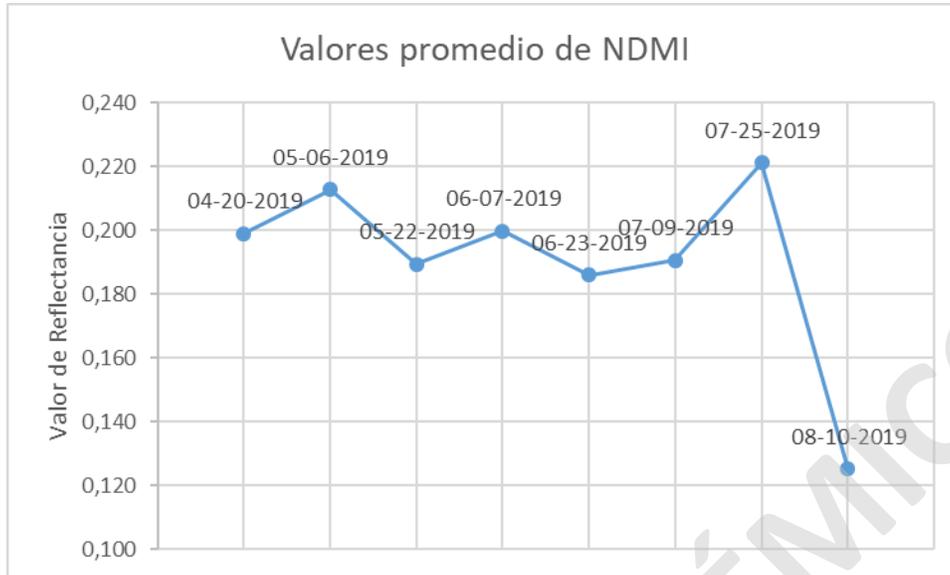


Gráfico 13. Valores promedio de humedad extraídos de índices de imágenes de distintas fechas. Elaboración propia.

Por último, las imágenes de salinidad SI (inferior Figura 26), muestran una tendencia a aumentar en términos generales, salvo por el mes de julio donde las zonas rojas disminuyen en volumen. Lo anterior se ve corroborado al analizar los valores promedios de los datos extraídos de las imágenes, los cuales, como se ve en el Gráfico 14, siguen la misma tendencia.

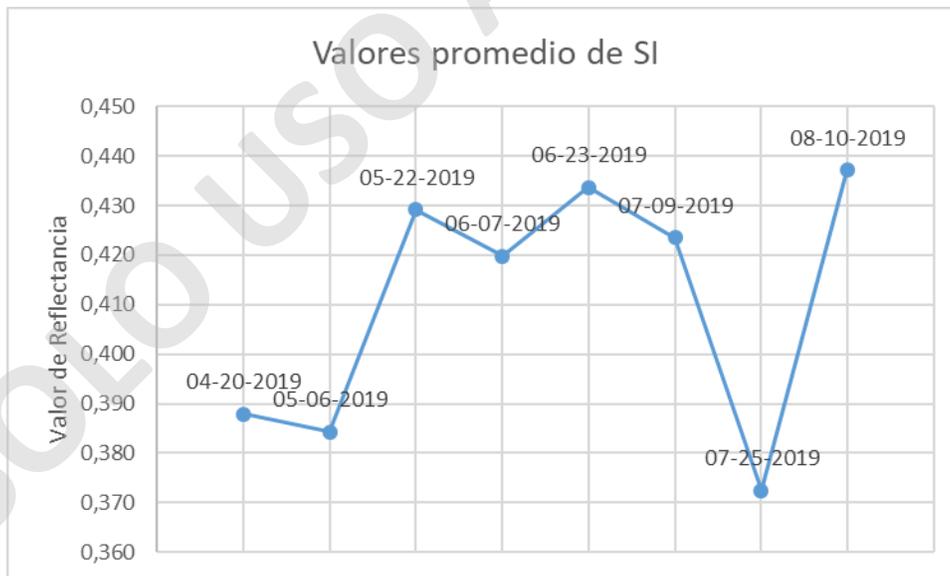


Gráfico 14. Valores promedio de salinidad extraídos de índices de imágenes de distintas fechas. Elaboración propia.

Al realizar un análisis visual de a las imágenes y los gráficos anteriores que muestran las variaciones de los parámetros a través del tiempo, se puede observar una leve correlación negativa entre la disminución de la temperatura con la salinidad superficial, la cual muestra una tendencia al alza en los meses de abril a agosto de 2019. Los valores semi constantes de humedad desde abril a mediados de junio no permiten establecer una correlación con las otras dos variables, sin embargo, al observar los últimos dos puntos de los Gráficos 13 y 14, se puede observar una correlación negativa entre humedad y la salinidad superficial.

Si bien, es posible observar la variación de los parámetros fisicoquímicos en la superficie del salar a través del tiempo (a escala de 15 días), sería ideal contar con una estación meteorológica activa en el área del Salar del Huasco, a fin de obtener información de las condiciones de temperatura y humedad (precipitaciones) en tiempo real. Información que ayudaría a entender y definir correctamente la medida de las variaciones de estas condiciones, durante los intervalos de tiempo en los que el satélite pasa por la zona.

6 CONCLUSIÓN

El Salar del Huasco se ubica en la Región Tarapacá al este de la ciudad de Iquique, en las cercanías de la localidad de Pica. Este salar ha sido abordado tanto en trabajos geológicos regionales, de manera superficial, como en estudios específicos que se han enfocado en su evolución como sistema salino. La relevancia del estudio del Salar del Huasco radica principalmente en su condición como sitio RAMSAR por contener humedales de importancia para la preservación de la biodiversidad.

Debido a lo anterior, se planteó en este trabajo el uso de teledetección con imágenes satelitales multiespectrales como herramienta para el monitoreo del estado superficial del Salar del Huasco y en un futuro de otros sitios de importancia ambiental. Sin embargo, a pesar de que las aplicaciones de teledetección en el monitoreo de superficie se han estado desarrollando desde hace más de una década, en lo que respecta al estudio de salares, los trabajos han sido pocos y limitados únicamente al tema mineralógico de superficie. Por eso, en este trabajo se buscó involucrar el uso de esta herramienta para el estudio de variables fisicoquímicas como la T°, humedad y salinidad superficial, en conjunto a la identificación de la mineralogía superficial de la costra,

Para lograr este objetivo, se utilizaron imágenes multiespectrales del satélite Landsat 8 sensores OLI/TIRS, el cual captura información de la radiación reflejada por la superficie en 11 bandas espectrales. Tomando en cuenta, que cada una de las variables a estudiar refleja en ciertos rangos del espectro, se utilizaron distintos métodos, ya establecidos, para obtener la información requerida de las imágenes, la cual fue posteriormente contrastada con información obtenida en terreno en el Salar del Huasco a través de un muestreo superficial de suelo y de costra salina efectuado en junio de 2019.

La mineralogía superficial se obtuvo al aplicar la combinación de bandas (567) RGB, ya que estas bandas abarcan el rango del espectro electromagnético donde reflejan los minerales típicos de salares. Al contrastar esta imagen con los resultados del muestreo en terreno, fue posible realizar un mapeo no solo del área muestreada, sino también de áreas no cubiertas durante el estudio en terreno, al comparar la información de teledetección disponible en estas zonas con la de las zonas muestreadas. El resultado de la aplicación de esta metodología fue un mapa con una variedad de sulfatos y arcillas de Ca/Mg y zonas identificadas como cuerpos de agua y de suelo húmedo. Por lo tanto, se concluye que la aplicación de combinación de bandas para obtener información de mineralogía superficial de salares, es válida, siempre y cuando se realice el muestreo en terreno que permita establecer la mineralogía específica que representa cada nivel de reflectancia que se ve en la imagen compuesta a color RGB.

Para el estudio de las variables fisicoquímicas, se aplicó una serie de índices. Para el caso de la humedad superficial se utilizó, el Índice de Diferencia de Humedad Normalizado (NDMI) y el Índice de Diferencia de Agua Normalizado (NDWI), los cuales permitieron definir zonas de cuerpos de agua, zonas inundadas y zonas de suelo con alta, media y baja humedad. Al comparar esta información con la obtenida del análisis de las muestras se encontró que los datos tenían un nivel de correlación regular. La salinidad se obtuvo a partir del Índice de Salinidad (SI) y el Índice de Brillo (BI), y al comparar los datos de imágenes y muestras se encontró que existe una correlación inversa entre estos. Por último, la información de temperatura se obtuvo a partir del método de Extracción de Temperatura Superficial (LST), y al compararla con las mediciones realizadas en terreno se obtuvo una correlación baja.

Al analizar los datos, se llegó a la conclusión de que, en el caso de la humedad y la temperatura, la diferencia del tiempo en el cual se tomaron las muestras y en el que el sensor pasó por el área del salar, fue la causa principal de los bajos niveles de correlación, además de la profundidad a la que se tomaron las muestras. Por lo tanto, se sugiere primero que todo planificar el muestreo para que sea concordante con los tiempos de captura de imagen por parte del sensor, realizarlo lo más sistemático posible, considerando las características únicas del salar y tomando las muestras estrictamente en la superficie del suelo. Se espera que esto permita aumentar la correlación entre los datos, demostrando la utilidad de la herramienta de teledetección para el monitoreo de estas variables en el salar.

En el caso de la variable salinidad, se llegó a la conclusión de que la correlación inversa entre los datos de imágenes y de muestras, se debe a una diferencia entre las características del suelo en donde se desarrollaron los índices con las del salar. Más específicamente, los índices de salinidad y brillos (SI y BI), se aplican en suelos donde los niveles de salinidad altos están representados por altos niveles de reflectancia en las bandas del espectro visible. Sin embargo, la conclusión a la que se llegó a través del muestreo es que en el caso del Salar del Huasco, las zonas de

suelo con los mayores niveles de salinidad presentan bajos niveles de reflectancia en las bandas del espectro visible, con la excepción de la zonas de cuerpos de agua, por lo tanto se plantea realizar una modificación al índice de salinidad que realce las zonas con menores niveles de reflectancia en las bandas el espectro visible y que se calcule posterior a la aplicación de una máscara en las zonas de cuerpos de agua, utilizando los índices de humedad.

Finalmente, es necesario destacar que la clasificación de suelos salinos utilizada en el campo de la agricultura no es recomendable aplicarla para el caso de salares o costras salinas, primero por la gran diferencia en los niveles de conductividad eléctrica (salinidad) que ambos presentan. Segundo, porque las metodologías para el muestreo de suelos salinos utilizadas en este trabajo han mostrado no ser efectivas en la caracterización del Salar del Huasco, y por extensión a otros salares, debido a que si bien, son sistemas similares cada uno tiene sus características particulares que impiden homologar criterios de muestreo.

En resumen, el trabajo con imágenes demostró ser efectivo en la determinación de la mineralogía superficial del Salar del Huasco, con el soporte del muestreo en terreno. Por otro lado, para la determinación de parámetros físicos, se llegó a la conclusión de que la aplicación de teledetección puede ser efectiva para determinar humedad, salinidad y T° siempre y cuando se realice un muestreo sistemático, adaptado a las características únicas del suelo del salar y que sea lo más concordante posible con el tiempo de captura de la imagen por parte del sensor. Esto se realizaría con el objetivo de calibrar el método para el salar en particular y debería hacerse para cada estación del año por las variaciones climáticas.

7 REFERENCIAS

- Acharya, T., Subedi, A., Lee, D., 2018. Evaluation of Water Indices for Surface Water Extraction in a Landsat 8 Scene of Nepal. *Sensors*.
- Acosta, O. y Custodio, E., 2008. Impactos Ambientales de la extracción de agua subterránea en el Salar del Huasco (norte de Chile). *Boletín Geológico y Minero*, 119 (1): pp. 33-50
- Aguilar, J., Dorronsoro, C., Gómez, J., Galán, E., 1999. Los criterios y estándares para declarar un suelo contaminado en Andalucía y la metodología y técnicas de toma de muestra y análisis para su investigación. *Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía*. Capítulo 4, pp. 175-190.
- Alonso, R., 2006. Ambientes Evaporíticos Continentales de Argentina. *INSUGEO, Serie de Correlación Geológica*, pp.155-170.
- Argollo, J., 2006. Aspectos geológicos. En: Moraes, M., Øllgaard, B., Kvist, L., Borchsenius, F., Balslev, H. (Eds.), *Botánica Económica de los Andes Centrales*. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, pp. 1–10.
- Ariza, A., 2013. Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM. Grupo Interno de Trabajo en Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá. Colombia.
- Baby, P., Rochat, Ph., Herail, G. & G. Mascle. 1997. Neogene shortening contribution to crystal thickening in the back arc of the Central Andes. En Argollo (2006).
- Bernier, R., 1998. Curso de Capacitación para operadores de Programa de Recuperación de Suelos Degradados INDAP, Décima Región. Centro de Investigación Remehue. Osorno, Chile.
- Cáceres, F., Ali-Ammar, H., Pirard, E., 2004. Cartografía Preliminar de los minerales evaporíticos de los Salares de Sud Lipez (Bolivia) utilizando imágenes satelitales.
- Carlson, T., Ripley, D., 1997. On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index. Department of Meteorology, The Pennsylvania State University, University Park.
- Carrasco-Lagos, P., Moreno, R., Figueroa, A., Espoz, C., Luz de la Maza, C., 2015. Sitios Ramsar de Chile. Seremi del Medio Ambiente Región Metropolitana de Santiago, Universidad Santo Tomás, Universidad de Chile y CONAF. 56 pp.

- Chapman, J., Rothery, D., Francis, P., Pontual, A., 1989. Remote sensing of evaporite mineral zonation in salt flats (salars). *International Journal of Remote Sensing*, 10:1, 245-255.
- Charrier, R., Pinto, L., & Rodriguez, M. (2007). Tectono-stratigraphic evolution of the Andean orogen in Chile. (W. a. Gibbons, Ed.) *Special Publication*, p. 21-116.
- Chong, G., 1988. The Cenozoic saline deposits of the Chilean Andes between 18 00' and 27 00' south latitude. *The Southern Central Andes*. En Véliz (2018).
- Chuvieco, E., 1995. *Fundamentos de Teledetección*. Segunda Edición. Ediciones Rialp S.A. Madrid.
- Clevers, J., 1991. Application of the WdVI in estimating LAI at the generative stage of barley. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Volumen 46, Issue 1, pp. 37-47.
- Drake, N., 1995. Reflectance spectra of evaporite minerals (400-2500 nm): applications for remote sensing, *International Journal of Remote Sensing*, 16:14, pp. 2555-2571.
- Espinosa, M., Orellana, L., Bustamante, A.M., 2013. *Recorriendo Humedales Altoandinos de Arica a Atacama: Vida y Refugio de la Biodiversidad*. CIREN n° 175.
- Faúndez, L., Escobar, M., 2005. *Descripción vegetacional Salar del Huasco I Región de Tarapacá*. Gobierno de Chile. Ministerio de Agricultura. Servicio Agrícola y Ganadero. División de protección de recursos naturales renovables. Región Metropolitana.
- Flahaut, J., Marinot, M., Bishop, J.L., Davies, G.R., Potts, N.J., 2017. Remote sensing and in situ mineralogic survey of the Chilean salars: An analog to Mars evaporate deposits? *Icarus* Pub. 282, pp. 152-173.
- Gardeweg, M y Sellés, D., 2013. *Geología del Área Collacagua-Rinconada*. Región de Tarapacá. Carta Geológica de Chile. Serie Geológica Básica N° 148. Escala 1:100.000.
- Gardeweg, M. y Sellés, D., 2015. *Estratigrafía y evolución estructural del área Collacagua-Rinconada, alta cordillera de Iquique, 20°00'-20°30'S – Región de Tarapacá*. XIV Congreso Geológico Chileno. La Serena, pp. 718-721.
- Howari, F., Goodell, P., Miyamoto, S., 2002. Spectral Properties of Salt Crusts Formed on Saline Soils. *J. Environ. Qual.* 31: pp. 1453–1461.
- Huete, A., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. Volumen 25, Issue 3, pp. 295-309.

Ibáñez, J., 2008. Tipos de Suelo Salino. Un universo invisible bajo nuestros pies. Fundación para el conocimiento, Madrid Blogs.

Khan, N., Rastoskuev, V., Shalina, E., Sato, Y., 2001. Mapping Salt-affected Soils Using Remote Sensing Indicators – A Simple Approach with the Use of GIS IDRISI. 22nd Asian Conference on Remote Sensing, 5(9).

Kodikara, G., Woldai, T., van Ruitenbeek, F., Kuria, Z., van der Meer, F., Shepherd, K., van Hummel, G., 2012. Hyperspectral remote sensing of evaporate minerals and associated sediments in Lake Magadi area, Kenya. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*.

Lhissou, R., El Harti, A., Chokmani, K., 2014. Mapping soil salinity in irrigated land using optical remote sensing data. *Eurasia Journal of Soil Science* 3, pp. 82-88.

Liu, W., Agusdinata, D., Myint, S., 2019. Spatiotemporal patterns of lithium mining and environmental degradation in the Atacama Salt Flat, Chile. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation* 80 (2019) 145-156.

López, P., Garcés, I., Auqué, L., Gómez, J., Gimeno, M., Lapuente, M., 1999. Características geoquímicas y aspectos geológicos del Salar del Huasco (Chile). *Boletín geológico minero*. Vol. 110-3, pp. 297-316.

López, P. y Millas, I., 2002. Evolución química de las salmueras del Salar de Huasco (Chile) en condiciones experimentales controladas. *Real Academia de Ciencias. Zaragoza*. 57: pp. 201–209.

McFeeters, S., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Remote Sens.*, 17, pp. 1425–1432.

Muñoz, J., Rengifo, P., Yáñez, J., 2009. Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona Norte de Chile, Regiones XV, I, II y III. Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería. Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnologías de la Universidad Católica.

Öztaş, N., Süzen, M., 2009. Mapping evaporate minerals by ASTER. *International Journal of Remote Sensing*.

Pérez, D., 2007. Introducción a los Sensores Remotos – Aplicaciones en Geología. Curso teórico – práctico. Universidad de Buenos Aires. Laboratorio de Tectónica Andina.

Polanco, A., 2012. Manual de Prácticas de Laboratorio de Mecánica de Suelos I. Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ingeniería.

Rodríguez, M., Jobbány, E., Tálamo, E., Balance Hídrico basado en la teledetección del Salar de Pipanaco, noroeste de Argentina.

Sadzawka, A., Carrasco, M., Grez, R., De La Luz, M., Flores, H., Neaman, A., 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos revisión 2006. Instituto de investigaciones agropecuarias. Gobierno de Chile. Ministerio de agricultura.

Sebrier, M. & P. Soler. 1991. Tectonics and magmatism in the Peruvian Andes from late Oligocene time to the present. En: Harmon R.S. & C.W. Rapela (eds) Andean Magmatism and its Tectonic Setting. Geol. Soc. America Sp. Paper 265: 259-278.

Stoertz, G., Ericksen, G., 1974. Geology of Salars in Northern Chile. United States Department of the Interior. Geological Survey.

Vega, A., 2016. Balance Hídrico de la Cuenca del Salar del Huasco mediante el modelo hidrológico de simulación TopModel usando información del reanálisis atmosférico. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil.

Véliz, D., 2018. Distribución de asociaciones evaporíticas en el Salar del Huasco Región de Tarapacá, Chile: Análisis espacio temporal a través de sensores remotos. Universidad Andrés Bello. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ciencias de la Tierra.

Vila, T., 1975. Geología de los depósitos salinos andinos, Provincia de Antofagasta, Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas. Revista Geológica de Chile, n. 2, pp. 41-55.

Vlasssova, L., 2016. Land Surface Temperature (LST) estimated from Landsat images: application in burns areas and tree-grass woodlands (dehesas). Tesis doctoral de la Universidad de Zaragoza. Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio.

Warren, J., 2016. Evaporites. A Geological Compendium. Second Edition. Department of Geology. Chulalongkorn University. Bangkok. Thailand.

Wilson, E., Sader, S., 2002. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery." Remote Sensing of Environment, 80, pp. 385-396.

Young, N., Anderson, R., Chignell, S., Vorster, A., Lawrence, R., Evangelista, P., 2017. A Survival guide to Landsat preprocessing. Ecology, 98(4), pp. 920–932.

Zagal, E., Sadzawka, A., 2007. Protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos. Universidad de Concepción Facultad de Agronomía.

8 ANEXO

8.1 OBTENCIÓN DE MUESTRAS EN TERRENO

8.1.1 MUESTRA DE SUELO

El protocolo utilizado para la toma de muestras durante el trabajo de campo consistió en un muestreo compuesto, donde se eligió un punto central, a partir del cual se definieron cuatro puntos dispuestos en forma de cruz, ubicados cada uno a un metro de distancia del centro (Recomendación del Dr. Mauricio Molina, Docente de la carrera de Agronomía de la Universidad Mayor). En cada uno de los 5 puntos se realizó una excavación de pequeño diámetro y de hasta 10 cm de profundidad. De los 5 puntos se extrajo un total de 0,5 a 1 kg, recomendado para medición de parámetros en praderas (Aguilar *et al.*, 1999), como se ve en la Figura 27. Las 5 submuestras fueron almacenadas en bolsas de plástico por separado, las cuales a su vez se almacenaron en una bolsa de plástico sellada y rotulada bajo un mismo código (Tabla 16).



Figura 27. Ejemplo de toma de muestra de suelo en trabajo de campo. Elaboración propia.

Tabla 16. Ejemplo de rotulado utilizado en la toma de muestras durante el trabajo de campo. Elaboración propia.

VSHXY	Ejemplo de rotulado
-------	---------------------

V	Villegas
SH	Salar del Huasco
X	Número correlativo del día de trabajo (1 a 5)
Y	Número correlativo de la muestra tomada durante el día de trabajo (variable)

8.1.2 MUESTRA DE COSTRA SALINA

Para caracterizar la mineralogía superficial del salar, el protocolo utilizado para la toma de muestras durante el trabajo de campo consistió en la extracción de muestras representativas de la primera capa superficial de la costra del salar (peso y cantidad variable) (Figura 28). La muestra fue envuelta en papel suave (pañuelos) para evitar la fragmentación. Luego fue almacenada en una bolsa de plástico sellada y rotulada (Tabla 16), dejando aire en el interior para evitar daños mecánicos al ser transportada.



Figura 28. Ejemplo de fragmento de costra superficial para muestra mineralógica. Elaboración propia.

8.2 PROCEDIMIENTO A UTILIZAR PARA LA PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE SUELO Y ANÁLISIS DE LABORATORIO PARA DETERMINAR CONTENIDO DE AGUA, PH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Herramientas:

- Martillo de madera o tapón de goma.
- Bandejas (plástico o algún material inerte)
- Láminas de plástico.
- Tamiz de acero inoxidable, de orificios de 2 mm (disponible en la escuela).
- Mortero y pistilo de porcelana.
- Riffler o divisor rotatorio (opcional).
- Bolsas o frascos plásticos con tapa,

Procedimiento:

- Disgregación, tiene por objetivo preparar la muestra para el proceso de secado, disgregando los terrones, ya sea manualmente o con un martillo de madera o goma, hasta obtener partículas no disgregables (Universidad Politécnica de Cartagena). También se eliminan los restos vegetales grandes como raíces además de los fragmentos más grandes de rocas.
- Tamizado, la muestra seca al aire se hace pasar por un tamiz de 2 mm, disgregando con un mortero los terrones que no pasen y tamizando nuevamente hasta que el material pase casi totalmente. Grava y fragmentos orgánicos son separados de la muestra (Sadzawka *et al.*, 2006).
- Homogenizado y cuarteo, la fracción de muestra <2 mm se homogeniza mediante mezcla repetitiva y se cuarteo separando 600 o 500 gr de muestra en bolsas o frascos de plástico con tapa, para su posterior análisis (Zagal y Sadzawka, 2007; Polanco, 2012).

8.3 PROCEDIMIENTO DE LABORATORIO PARA MEDICIÓN DE PARAMETROS FÍSICO QUÍMICOS

8.3.1 ANÁLISIS DE PH

Herramientas:

- Balanza de precisión de laboratorio
- Tapones de polietileno para tubos
- Tubos de plástico con tapa rosca y fondo cónico
- Jeringa de 20 ml
- Agitador de laboratorio
- Medidor de pH de mesa

Procedimiento a partir de muestra seca al aire, fracción <2mm (recomendado por el Dr. Mauricio Molina):

- Separar dos muestras (muestra y contramuestra) de 10 gr cada uno en tubos con tapa de 50 ml.
- Utilizar una jeringa de 20 ml e introducir en cada tubo 25 ml de agua destilada (relación agua muestra, 1:2,5).
- Agitar manualmente de manera brusca un par de segundos, luego, dejar en el agitador por 10 minutos (Figura 29).
- Dejar las muestras reposando por al menos 2 horas, luego agitar manualmente de manera brusca un par de segundo y dejar reposando por 1 minuto.
- En el sobrenadante de la muestra se introduce la sonda del medidor de pH (previamente calibrado), asegurándose que el bulbo este sumergido completamente (Figura 30), se espera 1 minuto a que se equilibre el sensor (agitando suavemente) para luego registrar la medida en la libreta.

8.3.2 ANÁLISIS DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Herramientas:

- Balanza de precisión de laboratorio
- Tapones de polietileno para tubos
- Tubos de plástico con tapa rosca y fondo cónico
- Jeringa de 20 ml
- Agitador de laboratorio
- Medidor de conductividad eléctrica portátil EXTECH.

Procedimiento a partir de muestra seca al aire, fracción <2mm (recomendado por el profesor Mauricio Molina):

- Separar dos muestras (muestra y contramuestra) de 8 gr en tubos con tapa de 50 ml.
- Utilizar una jeringa de 20 ml e introducir en cada tubo 40 ml de agua destilada (relación agua muestra, 1:5).
- Agitar manualmente de manera brusca un par de segundos, luego, dejar en el agitador por 10 minutos (Figura 29).
- Dejar las muestras reposando por al menos 2 horas, luego agitar manualmente de manera brusca un par de segundo y dejar reposando por 1 minuto.

- En el sobrenadante de la muestra se introduce la sonda del medidor de conductividad eléctrica (previamente calibrado) (Figura 31), asegurándose que los electrodos estén sumergidos completamente, se espera 1 minuto a que se equilibre el sensor (agitando suavemente) para luego registrar la medida en la libreta.



Figura 29. Muestras para análisis en agitador. Elaboración propia.



Figura 30. Ejemplo de medición de pH en laboratorio. Elaboración propia.



Figura 31. Medidor de conductividad eléctrica portátil utilizado en medición en laboratorio. Elaboración propia.

8.3.3 ANÁLISIS DE HUMEDAD

Procedimiento a partir de muestra seca al aire, fracción <2mm:

Herramientas:

- Estufa para secado, capaz de mantener una temperatura de 105°C.
- Recipientes de metal o vidrio con tapa hermética, de 25 a 100 ml de capacidad.
- Desecador.
- Balanza de precisión de laboratorio.

Procedimiento:

- Pesar de 10 a 20 gr de muestra en un recipiente con tapa, seco y pre-pesado.
- Colocar en la estufa y secar destapado a 105°C hasta masa constante.
- Retirar de la estufa, tapar y enfriar en desecador por al menos 45 minutos.
- Sacar del desecador, pesar y registrar peso de la muestra en la libreta.
- Calcular el contenido de agua con la diferencia de peso y un factor de corrección por humedad, usando las fórmulas establecidas en el trabajo de Sadzawka *et al.* (2006), que se listan a continuación.

- $$\text{Agua (\%)} = \frac{a-b}{b-c} \times 100$$

a: masa en gr del suelo seco al aire + recipiente

b: masa en gr del suelo seco a 105°C + recipiente

c: masa en gr del recipiente

- Factor de corrección por humedad (Fh)

$$Fh = \frac{100 + \text{Agua (\%)}}{100}$$

- Masa de suelo seco al aire = (masa de suelo seco a 105°C) x Fh

8.4 GRÁFICOS COMPARATIVOS DE ESPECTROS MINERALES

A continuación, se presentan los Gráficos 15 a 41, donde se comparan los espectros de las muestras minerales, con los espectros obtenidos desde la imagen Landsat 8 del 23 de junio. Los espectros de la imagen se obtuvieron de los pixeles específicos (30 m) en los que se ubicaban las muestras. Además, los gráficos incluyen los espectros de los minerales principales que componen cada muestra según el análisis realizado con equipo TerraSpec (Tabla 4) y que se encontraban disponibles en la biblioteca de espectros del programa ENVI 5.3.

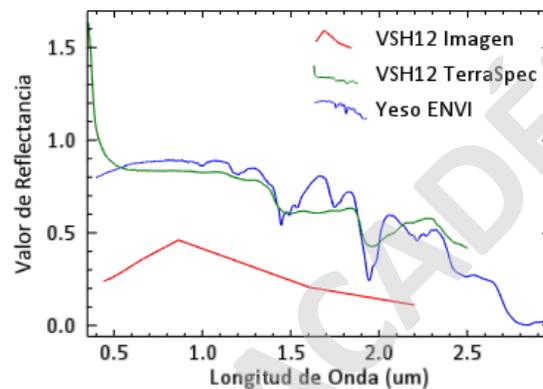


Gráfico 15. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI. Espectro TerraSpec con absorción de agua.

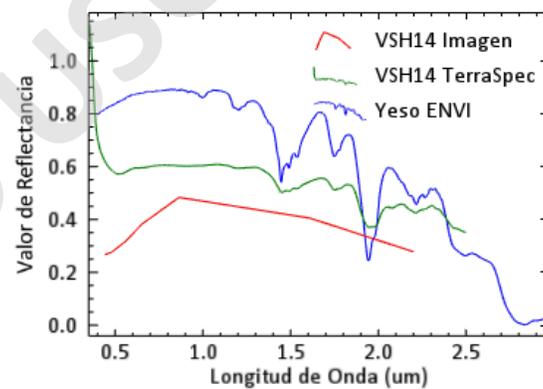


Gráfico 16. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.

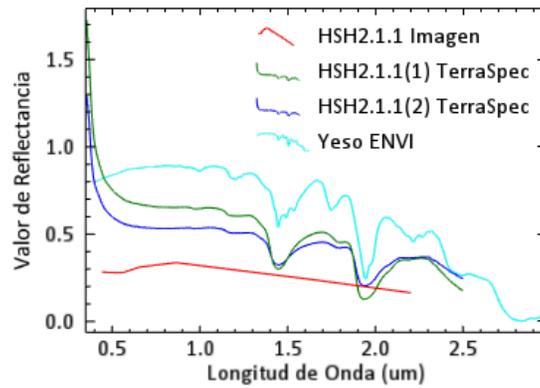


Gráfico 17. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI. Espectro TerraSpec con absorción de agua.

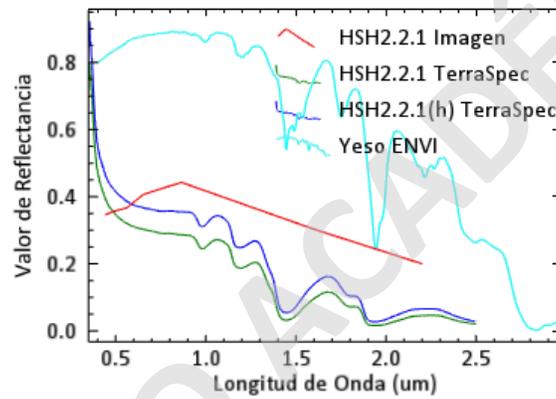


Gráfico 18. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI. Espectro TerraSpec con absorción de agua.

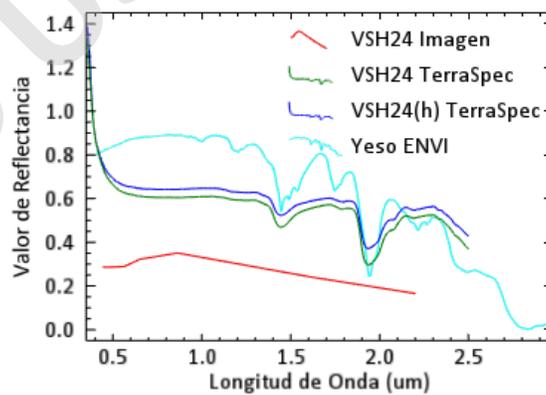


Gráfico 19. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI. Espectro TerraSpec con absorción de agua.

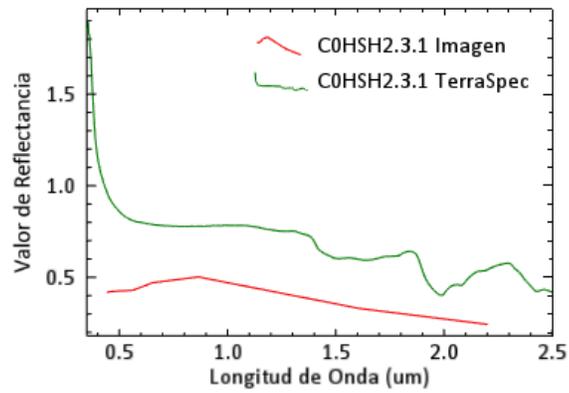


Gráfico 20. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.

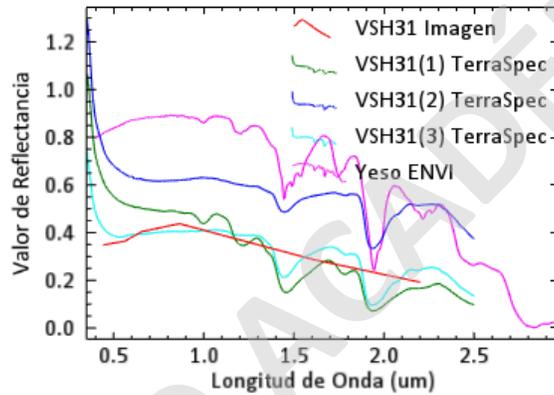


Gráfico 21. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI. Espectro TerraSpec con absorción de agua.

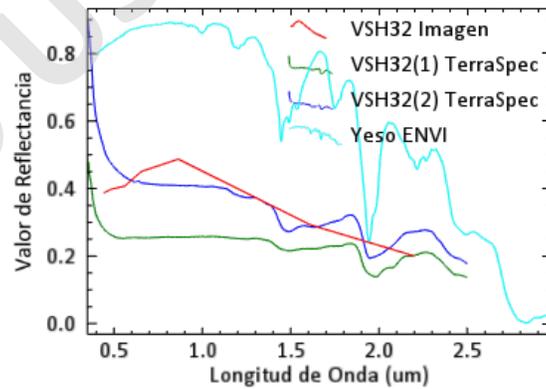


Gráfico 22. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI. Espectro TerraSpec con absorción de agua.

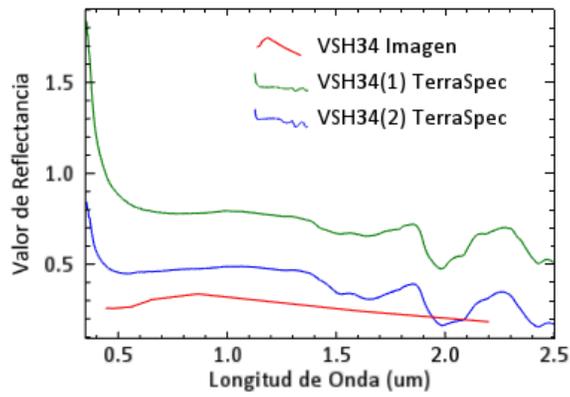


Gráfico 23. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.

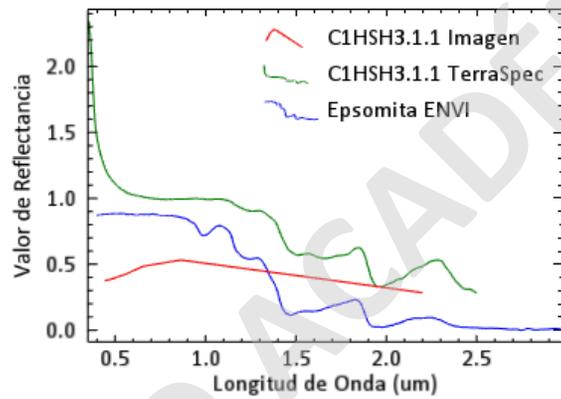


Gráfico 24. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.

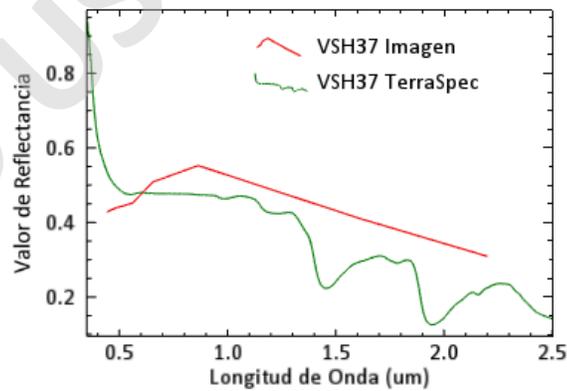


Gráfico 25. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.

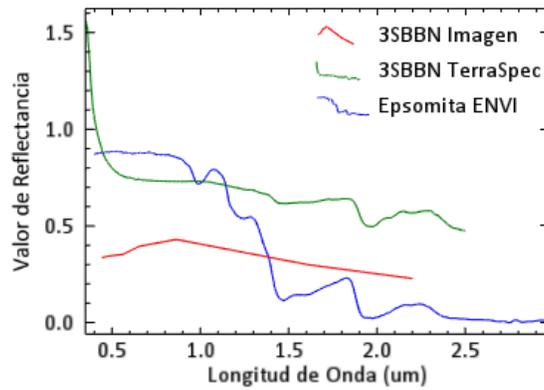


Gráfico 26. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.

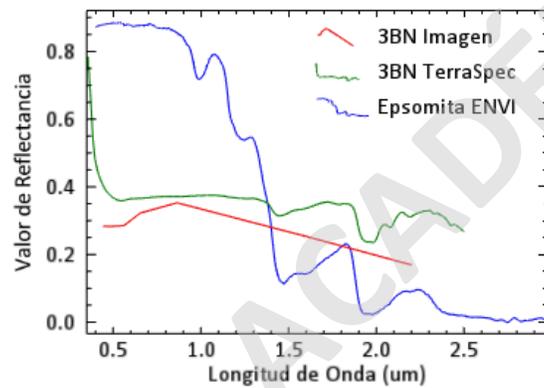


Gráfico 27. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.

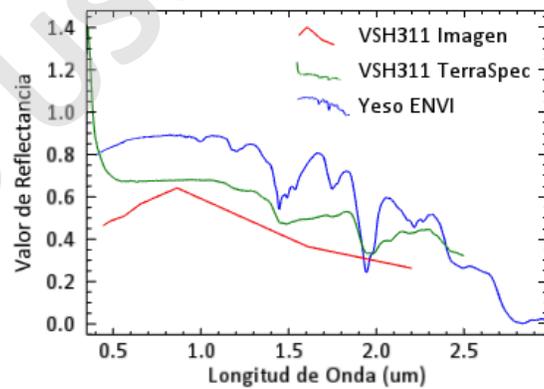


Gráfico 28. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI. Espectro TerraSpec con absorción de agua.

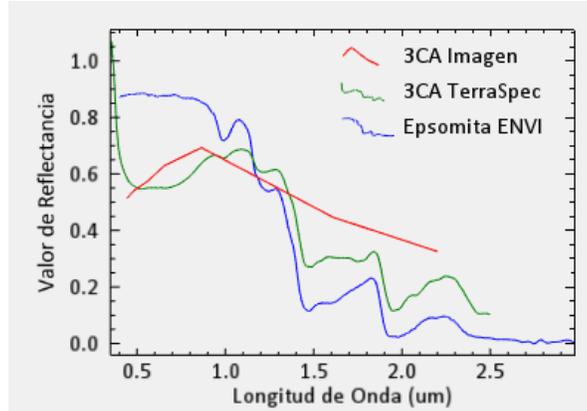


Gráfico 29. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.

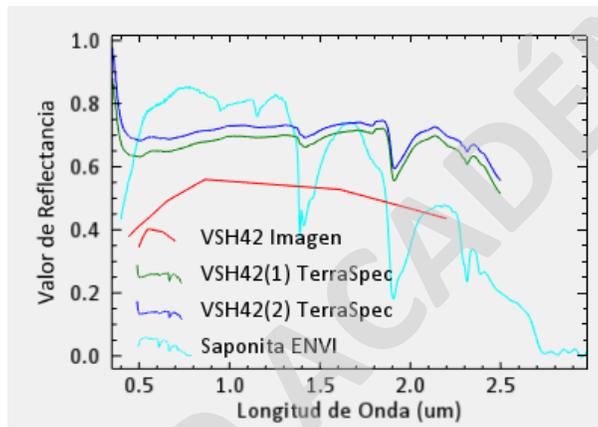


Gráfico 30. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.

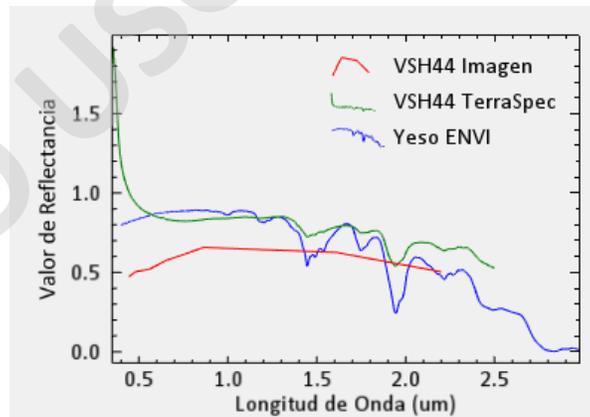


Gráfico 31. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.

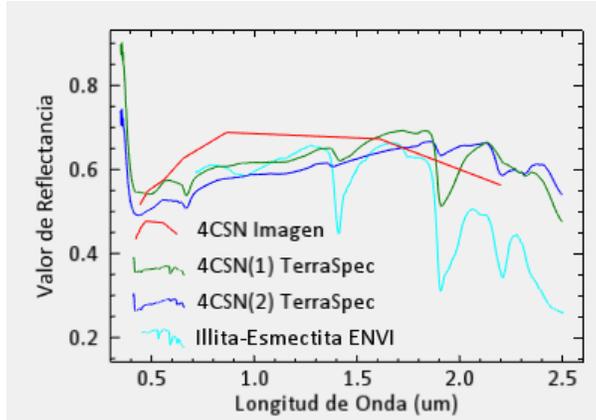


Gráfico 32. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.

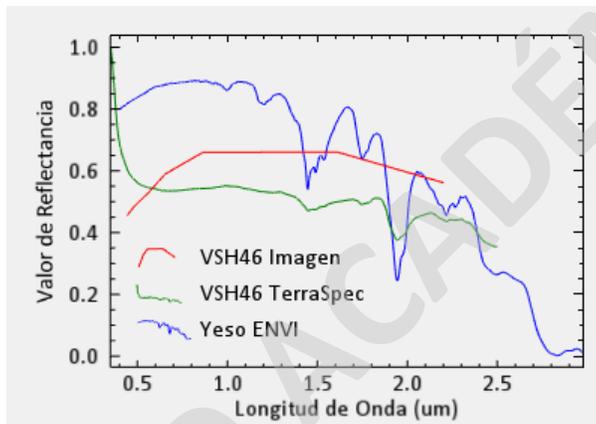


Gráfico 33. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.

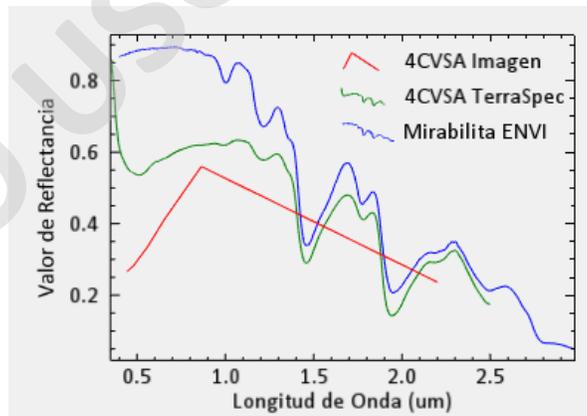


Gráfico 34. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.

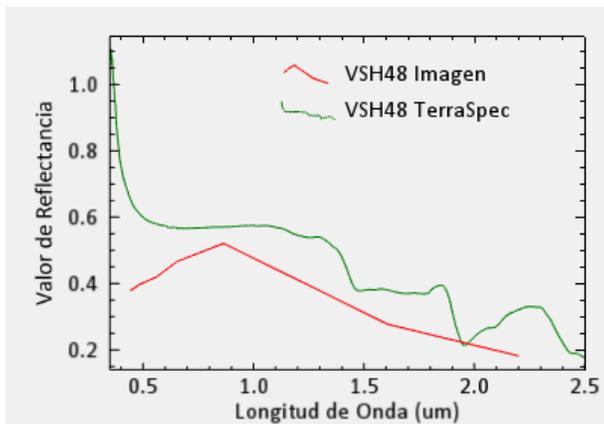


Gráfico 35. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.

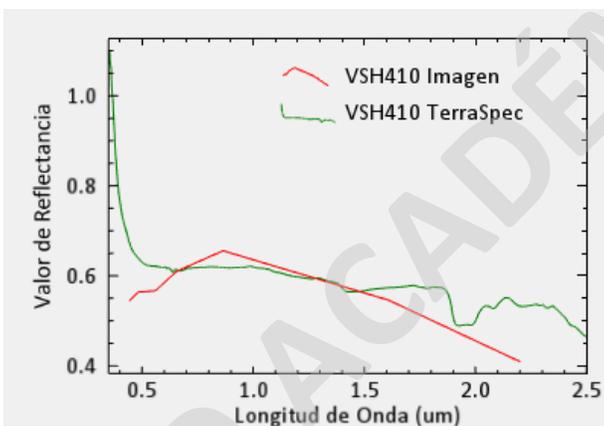


Gráfico 36. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.

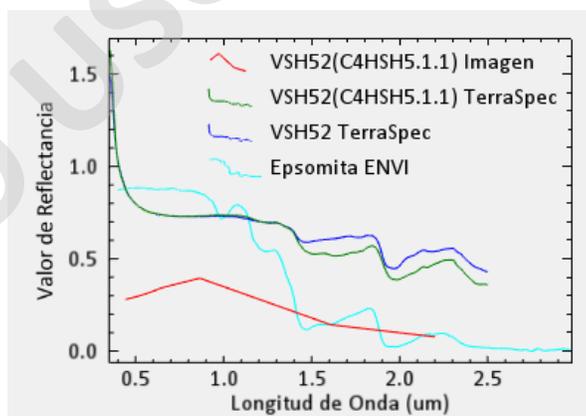


Gráfico 37. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.

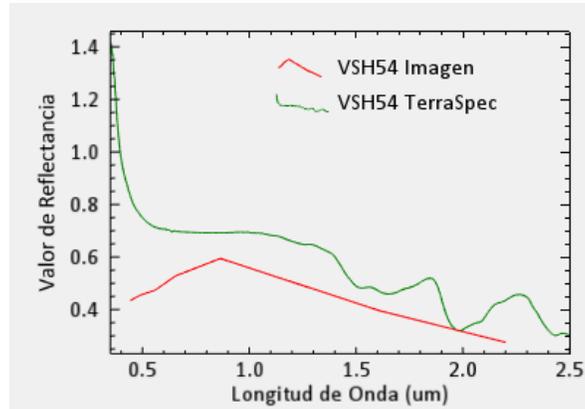


Gráfico 38. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.

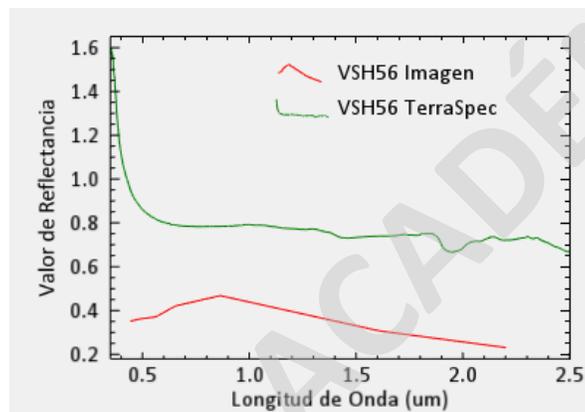


Gráfico 39. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.

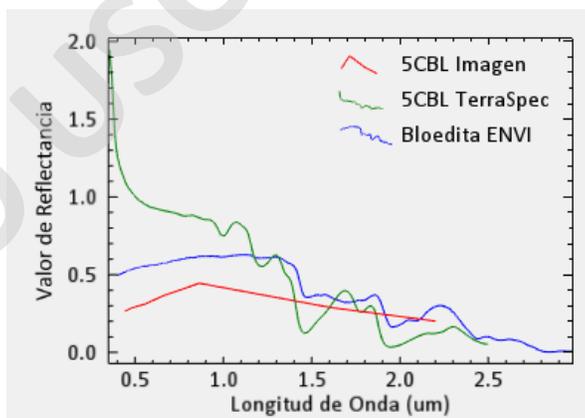


Gráfico 40. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.

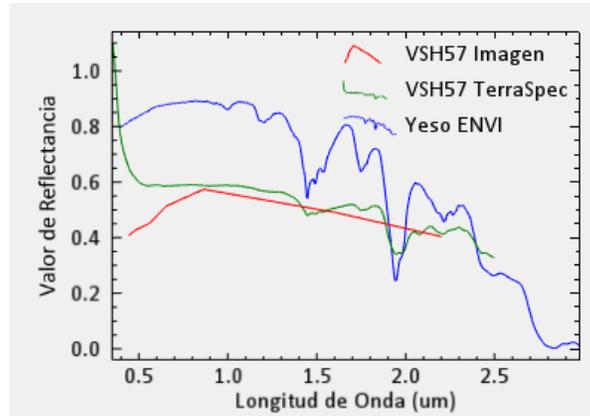


Gráfico 41. Comparación entre el espectro mineral de la muestra, de la imagen y de la biblioteca de ENVI.

SOLO USO ACADÉMICO