

Medidas Vegetacionales Pedernales EST-01 y EST-02

Informe de Gestión Anual 2026

Apéndice 08 – Análisis de imágenes satelitales

Preparado para: Codelco Salvador

DSAEST_Anual26_Apéndice08_Rev0

Santiago, 28 de junio 2026



Control del documento

REV	Fecha aprobación	Elaborado por	Revisado por	Aprobado por
A	25-06-2026	Felipe Labra	Daniela Gamboa	Felipe Labra
B	26-06-2026	Felipe Labra	Mauricio Vera	Daniela Gamboa
C	28-06-2025	Felipe Labra	Mauricio Vera	Mauricio Vera
0	28-06-2025	Daniela Gamboa		

Índice de Contenidos

1. Introducción.....	1
2. Objetivos	2
2.1 Etapa 1.....	2
2.2 Etapa 2.....	2
3. Área de Estudio.....	3
4. Metodología	5
4.1 Etapa 1.....	5
4.2 Etapa 2.....	13
5. Resultados	18
5.1 Etapa 1.....	18
5.2 Etapa 2.....	31
6. Discusiones y conclusiones.....	77
7. Listado de profesionales.....	79
8. Referencias	80
9. Anexos	82
9.1 Anexo 1. Informes de las etapas metodológicas de calibración.....	82
9.2 Anexo 2. Detalle de firmas espectrales <i>in situ</i> y sitios de muestreo.....	83

Índice de tablas

Tabla 1. Características de las bandas espectrales de satélites SPOT 6/7	6
Tabla 2. Datos de entrada para corrección atmosférica 6SV.	9
Tabla 3. Calendarización de muestreos realizada en los 13 sitios bajo estudio	11
Tabla 4. Valores (rangos) para la clasificación común de NDVI en todos los SVAHT	15
Tabla 5. Valores de umbrales mínimos para la clasificación de NDVI específicos por SVAHT.....	17
Tabla 6. Valores (rangos) para la clasificación común de NDWI	18
Tabla 7. Estadísticas zonales de NDVI para cada polígono de SVAHT.	55
Tabla 8. Estadísticas zonales de NDWI para cada polígono de SVAHT.	56
Tabla 9. Superficie (ha) utilizando rangos de clasificación común de NDVI en polígonos de SVAHT. 57	
Tabla 10. Superficie (ha) utilizando rangos de clasificación común de NDVI en zonas Buffer (100m). 57	
Tabla 11. Superficie (ha) utilizando umbrales mínimos de clasificación de NDVI.	62
Tabla 12. Superficie (ha) de cuerpos de agua vinculados a Salar La Laguna utilizando rangos de clasificación común de NDWI.....	71

Tabla 13. Superficie (ha) de los cuerpos de agua vinculados a Salar Piedra Parada (P1) utilizando rangos de clasificación común de NDWI.....	72
Tabla 14. Superficie (ha) de los cuerpos de agua vinculados a Salar Piedra Parada (P2) utilizando rangos de clasificación común de NDWI.....	72
Tabla 15. Superficie (ha) de los cuerpos de agua vinculados a Salar Piedra Parada (P3) utilizando rangos de clasificación común de NDWI.....	73
Tabla 16. Profesionales en terreno y procesamiento en gabinete.....	79

Índice de figuras

Figura 1. Área de Estudio Medidas EST-01 y EST-02	4
Figura 2. Diagrama de flujo representativo del procedimiento metodológico utilizado en la Etapa 1. 5	
Figura 3. Áreas de interés (AI) delimitados para la obtención (adquisición y captura) de imágenes multiespectrales SPOT 6/7	7
Figura 4. Cuadrante de medición en sector Río Negro. Fuente (fotografía): Agrospace (2026b) ..	10
Figura 5. Diagrama de flujo representativo del procedimiento metodológico utilizado en la Etapa 2. 13	
Figura 6. Mosaico final de imágenes satelitales multiespectrales SPOT 6/7, Campaña Primavera 2025.....	19
Figura 7. Composición de bandas espectrales “falso color convencional” elaborado a partir de imágenes satelitales SPOT 6/7 obtenidas para la Campaña Primavera 2025, para el SVAHT activo del Salar de Pedernales.....	20
Figura 8. Contraste entre imagen sin corrección e imagen corregida (Fuente: Agrospace, 2026a)21	
Figura 9. Comparación imagen original e imagen pan-sharpened (Fuente: Agrospace, 2026a)....	21
Figura 10. Ubicación de puntos (grillas) de muestreo de firmas espectrales in situ. Ejemplo nube de puntos de muestreo de firmas espectrales in situ en SVAHT activo del Salar de Pedernales.	22
Figura 11. Reflectancia promedio y su desviación estándar en los sitios (ESU) de medición establecidos en los SVAHT: (a) Pastos Largos, (b) Río Negro, (c) Tinajas, (d) Asiento. Fuente: Elaborado en base a Agrospace (2026b).....	23
Figura 12. Reflectancia promedio y su desviación estándar en los sitios (ESU) de medición establecidos en los SVAHT: (a) Leoncito, (b) La Ola (c) Tordillos, (d) Ciénaga, (e) Vertiente 2, (f) El Colorado. Fuente: Elaborado en base a Agrospace (2026b).....	24
Figura 13. Reflectancia promedio y su desviación estándar en los sitios (ESU) de medición establecidos en los SVAHT: (a) Salar de Pedernales 1, (b) Salar de Pedernales 2, (b) Salar de Pedernales 3, (d) Salar La Laguna, (e) Salar Piedra Parada. Fuente: Elaborado en base a Agrospace (2026b)	25
Figura 14. Detalle de firma espectral y fotografía representativa en sitio de muestreo (ESU) correspondiente a SVAHT de Pedernales 1. Línea naranja continua: Reflectancia Promedio. Puntos	

rojos: Valores promedio de pixeles de imagen satelital SPOT correspondiente a ubicación geográfica de ESU.....	26
Figura 15. Valores de reflectancia hiperespectral promedio para cada sitio y su desviación estándar. Los puntos rojos corresponden al valor promedio de la reflectividad para cada longitud de onda de la imagen SPOT 6/7 del 08 de diciembre del 2025 para cada sitio. Fuente: Agrospace (2026c)...	28
Figura 16. Validación de productos satelitales SPOT vs medidas hiperespectrales in situ para cada banda y sitio medido. Línea negra: relación lineal entre las mediciones in situ e imágenes satelitales. Línea ploma punteada: relación 1:1 teórica entre medición in situ e imagen satelital. Fuente: Agrospace (2026c).....	29
Figura 17. Validación generalizada de productos satelitales SPOT. Línea negra: relación lineal entre las mediciones in situ e imágenes satelitales. Línea ploma punteada: relación 1:1 teórica entre medición in situ e imagen satelital. Fuente: Agrospace (2026c)	30
Figura 18. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Salar de Pedernales	31
Figura 19. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Salar La Laguna	32
Figura 20. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Salar Piedra Parada	32
Figura 21. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Quebrada Asiento.....	33
Figura 22. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Quebrada Ciénaga	33
Figura 23. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Quebrada Colorado	34
Figura 24. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Cabecera sur rio La Ola....	34
Figura 25. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Quebrada Leoncito	35
Figura 26. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Quebrada Pastos Largos..	35
Figura 27. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Quebrada Río Negro	36
Figura 28. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Quebrada Tinajas	36
Figura 29. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Quebrada Tordillos	37
Figura 30. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Quebrada Vertiente 2	37
Figura 31. Índice NDVI, SVAHT Salar de Pedernales	39
Figura 32. Índice NDWI, SVAHT Salar de Pedernales	39
Figura 33. Índice NDVI, SVAHT Salar La Laguna (Polígono SL1).....	40
Figura 34. Índice NDVI, SVAHT Salar La Laguna (Polígono SL2).....	40
Figura 35. Índice NDWI, SVAHT Salar La Laguna (Polígono SL1).....	41
Figura 36. Índice NDWI, SVAHT Salar La Laguna (Polígono SL2).....	41
Figura 37. Índice NDVI, SVAHT Salar Piedra Parada (Polígono P1).....	42
Figura 38. Índice NDVI, SVAHT Salar Piedra Parada (Polígono P2).....	42
Figura 39. Índice NDVI, SVAHT Salar Piedra Parada (Polígono P3).....	43
Figura 40. Índice NDWI, SVAHT Salar Piedra Parada (Polígono P1).....	43
Figura 41. Índice NDWI, SVAHT Salar Piedra Parada (Polígono P2).....	44
Figura 42. Índice NDWI, SVAHT Salar Piedra Parada (Polígono P3).....	44

Figura 43. Índice NDVI, SVAHT Quebrada Asiento.....	45
Figura 44. Índice NDWI, SVAHT Quebrada Asiento.....	45
Figura 45. Índice NDVI, SVAHT Quebrada Ciénaga	46
Figura 46. Índice NDWI, SVAHT Quebrada Ciénaga	46
Figura 47. Índice NDVI, SVAHT Quebrada Colorado	47
Figura 48. Índice NDWI, SVAHT Quebrada Colorado	47
Figura 49. Índice NDVI, SVAHT Cabecera Sur rio La Ola	48
Figura 50. Índice NDWI, SVAHT Cabecera Sur rio La Ola	48
Figura 51. Índice NDVI, SVAHT Quebrada Leoncito	49
Figura 52. Índice NDWI, SVAHT Quebrada Leoncito	49
Figura 53. Índice NDVI, SVAHT Quebrada Pastos Largos.....	50
Figura 54. Índice NDWI, SVAHT Quebrada Pastos Largos.....	50
Figura 55. Índice NDVI, SVAHT Quebrada Río Negro	51
Figura 56. Índice NDWI, SVAHT Quebrada Río Negro	51
Figura 57. Índice NDVI, SVAHT Quebrada Tinajas	52
Figura 58. Índice NDWI, SVAHT Quebrada Tinajas	52
Figura 59. Índice NDVI, SVAHT Quebrada Tordillos	53
Figura 60. Índice NDWI, SVAHT Quebrada Tordillos	53
Figura 61. Índice NDVI, SVAHT Quebrada Vertiente 2	54
Figura 62. Índice NDWI, SVAHT Quebrada Vertiente 2	54
Figura 63. Índice NDVI reclasificado con rangos de clasificación común, para los SVAHT de Salar de Pedernales y Salar La Laguna (polígonos SL1 y SL2)	58
Figura 64. Índice NDVI reclasificado con rangos de clasificación común, para SVAHT Piedra Parada (Polígonos P1, P2 y P3).....	59
Figura 65. Índice NDVI reclasificado con rangos de clasificación común, para los SVAHT Quebradas La Ola, Asiento, Pastos Largos y Leoncito.....	60
Figura 66. Índice NDVI reclasificado con rangos de clasificación común, para los SVAHT Quebradas Ciénaga, Colorado, Tinajas, Tordillos, Río Negro y Vertiente 2.....	61
Figura 67. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Salar de Pedernales	63
Figura 68. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Salar La Laguna (SL1)...	63
Figura 69. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Salar La Laguna (SL2)...	64
Figura 70. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Salar Piedra Parada (P1)	64
Figura 71. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Salar Piedra Parada (P2)	65

Figura 72. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Salar Piedra Parada (P3)	65
Figura 73. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Quebrada Asiento.....	66
Figura 74. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Quebrada Ciénaga	66
Figura 75. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Quebrada Colorado	67
Figura 76. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Cabecera sur rio La Ola.	67
Figura 77. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Quebrada Leoncito	68
Figura 78. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Quebrada Pastos Largos	68
Figura 79. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Quebrada Río Negro	69
Figura 80. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Quebrada Tinajas	69
Figura 81. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Quebrada Tordillos	70
Figura 82. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Quebrada Vertiente 2	70
Figura 83. Índice NDWI reclasificado con rangos de clasificación común, SVAHT Salar de Pedernales y SVAHT Salar La Laguna	73
Figura 84. Índice NDWI reclasificado con rangos de clasificación común, SVAHT Piedra Parada	74
Figura 85. Índice NDWI reclasificado con rangos de clasificación común, para los SVAHT de Quebradas La Ola, Asiento, Pastos Largos y Leoncito	75
Figura 86. Índice NDWI reclasificado con rangos de clasificación común, para los SVAHT de Quebradas Ciénaga, Colorado, La Tinajas, Tordillos, Río Negro y Vertiente 2	76

1. Introducción

A mediados del año 2020, el Consejo del Estado de Defensa del Estado de Chile (en adelante CDE) demandó a Codelco por la extracción sostenida de agua que habría causado impactos significativos en el Salar de Pedernales. A fines del mismo año, se suscribió un Avenimiento y Transacción aprobado por el Primer Tribunal Ambiental, que incluye 12 medidas, entre ellas las “Medidas Vegetacionales Pedernales EST-01 y EST-02”.

Bajo este contexto, el Sustainable Minerals Institute International Centre de Chile (SMI-Chile) de la Universidad de Queensland se adjudicó el año 2025 el servicio de las medidas EST-01 y EST-02 (en adelante, el Proyecto) vía licitación (Ref: DOC1504695002). La medida EST-01 buscará establecer patrones y procesos a nivel de la vegetación y del ecosistema del humedal del Salar de Pedernales, a través de un modelo ecosistémico conceptual (MEC) y modelos de respuesta vegetal (MRV). La medida EST-02 consiste en un seguimiento multiescalado de 8 años que permitirá evaluar los SVAHT y permitirá detectar eventuales cambios, tanto a lo largo del tiempo como en el espacio, en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas.

El presente informe entrega información referida a la Campaña de Terreno N°1 (en adelante denominada Campaña de Primavera 2025) realizada para el Proyecto, en específico, resultados correspondientes a la delimitación de vegetación y cuerpos de agua basado en el análisis de imágenes satelitales multiespectrales con alta resolución espacial del Área de Estudio (en adelante, AE), previamente corregidas, calibradas y validadas a partir de mediciones hiperespectrales levantadas in situ. Esto, a partir del cálculo y análisis del índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés) para la medición del tamaño del área, límites y vigor de la vegetación; y del índice de diferencia normalizada de agua (NDWI, por sus siglas en inglés) para la medición del tamaño de los cuerpos de agua. Todos estos cálculos y/o mediciones, corresponden a métodos contemplados en el segundo nivel de análisis correspondientes al diseño de monitoreo multiescalado del Estudio EST-02, cuyo propósito es detectar tempranamente variaciones significativas en la cobertura vegetal y el funcionamiento de los SVAHT, durante un periodo de 8 años. Los resultados y análisis de las imágenes satelitales contribuirán también (en particular los primeros 3 años) para el desarrollo del modelo dinámico del ecosistema SVAHT del Salar de Pedernales, correspondiente al estudio EST-01, así como también y de manera complementaria al monitoreo de otras variables ambientales contempladas en los estudios EST-01 y EST-02.

2. Objetivos

Establecer un proceso para el monitoreo del tamaño de los parches de la vegetación, sus límites y su vigor, además del tamaño de los cuerpos de agua presentes en el AE, insumo complementario para la definición de modelos ecosistémicos y el monitoreo de las variables ambientales asociadas a los estudios EST-01 y EST-02 respectivamente. Este proceso se estructura en dos etapas, que se detallan a continuación:

2.1 Etapa 1

El objetivo principal de esta primera etapa es la obtención (adquisición y captura) de imágenes satelitales para el AE, así como la aplicación de metodologías para la realización de las correcciones, calibración y validación con datos de terreno obtenidos en el marco de la Campaña de Primavera 2025, necesarios para el post-procesamiento (analítica) de las imágenes satelitales obtenidas.

En específico:

- **Obtención de imágenes satelitales** multiespectrales de alta resolución espacial, en una fecha cercana a la toma de datos de los diversos componentes ambientales bajo estudio (en particular el componente Flora y Vegetación) y la programación de la toma de datos *in situ* de firmas espectrales para la posterior calibración-validación de las imágenes obtenidas.
- **Pre-procesamiento de imágenes satelitales**, correspondiente a la realización de correcciones atmosféricas, radiométricas y geográficas (ortorectificación), y al aumento de la resolución espacial mediante metodología de fusión pancromática (*pan-sharpening*). Implica la elaboración de un mosaico final de todas las imágenes obtenidas, correspondiente a toda el área de estudio.
- **Mediciones hiperespectrales *in situ***, correspondiente al levantamiento de datos (firmas hiperespectrales mediante espectroradiómetro), necesario para los procesos de calibración y validación (cal/val) de las imágenes obtenidas. Implica la caracterización de firmas espectrales obtenidas *in situ* en los 13 sectores que comprenden el AE.
- **Calibración y Validación (cal/val) de las imágenes satelitales**, correspondiente al proceso de validación de la calidad radiométrica de las reflectancias de superficie derivadas de las imágenes satelitales multiespectrales mediante la comparación directa con las mediciones hiperespectrales obtenidas en terreno.

2.2 Etapa 2

El objetivo principal de esta segunda etapa es contribuir a la delimitación y monitoreo del tamaño de los parches de vegetación, sus límites y su vigor, además del tamaño de los cuerpos de agua presentes en el AE, basado en el análisis de imágenes satelitales multiespectrales con alta resolución espacial.

En particular, en este informe se desarrollaron los siguientes objetivos específicos:

- **Estimación del tamaño del área, límites y vigor de la vegetación**, a partir de análisis del índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI)

- **Estimación del tamaño de los cuerpos de agua**, a partir de análisis del índice de diferencia normalizada de agua (NDWI).

3. Área de Estudio

El Área de Estudio de la Medida EST-02 corresponde a todos aquellos SVAHT ubicados en las inmediaciones del Salar de Pedernales que se encuentran relacionados con las acciones de compensación del Avenimiento y Transacción entre Codelco y el Consejo de Defensa del Estado. En específico, los SVAHT a monitorear comprenden en total una superficie de 175,18 ha, las cuales se distribuyen según el siguiente detalle de áreas (Figura 1):

- SVAHT activo del Salar de Pedernales con una superficie de 37,48 ha.
- SVAHT ubicados en cuencas cercanas los Salares La Laguna y Piedra Parada que en total representan 8,91 Ha.
- Las quebradas aledañas de agua dulce denominadas: Ciénaga, Pastos Largos, Río Negro, Tinajas, Tordillo, Vertientes 2, El Colorado y Cabecera sur río La Ola las cuales representan una superficie de 79,77 ha.
- Quebrada Leoncito con una superficie de 46,22 ha.
- Quebrada aledaña de agua dulce denominada “Quebrada Asiento” con 2,8 ha.

De las áreas monitoreadas, los salares de Pedernales, La Laguna y Piedra Parada se emplazan dentro del sitio prioritario para la conservación de la biodiversidad “Salar de Pedernales”, lo que refuerza la relevancia de su conservación debido a su alto valor estratégico por ser prioridad para la protección de la biodiversidad.

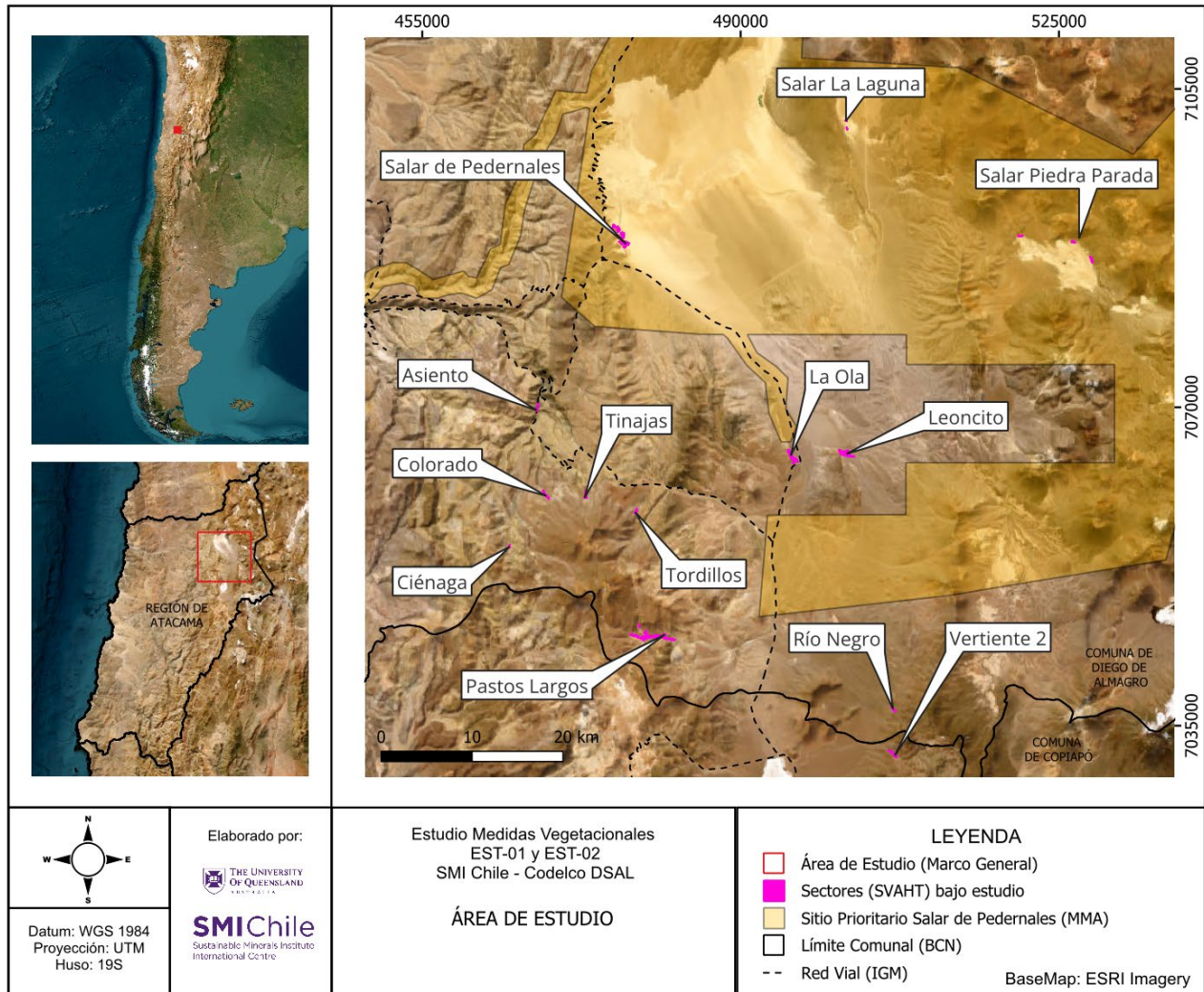


Figura 1. Área de Estudio Medidas EST-01 y EST-02

4. Metodología

4.1 Etapa 1

El procedimiento metodológico utilizado, conformado en cuatro sub-etapas para el logro de los objetivos antes anunciados, se resume en la siguiente Figura 2.

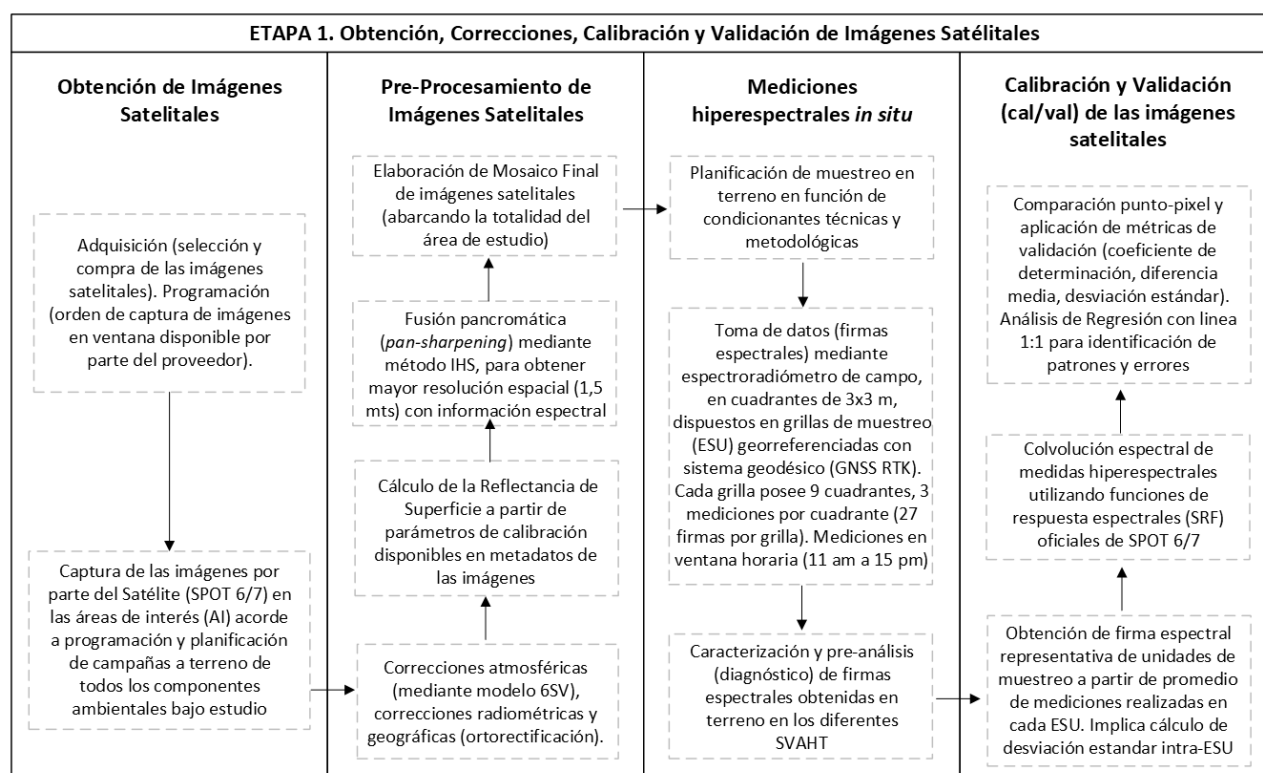


Figura 2. Diagrama de flujo representativo del procedimiento metodológico utilizado en la Etapa 1.

4.1.1 Obtención de las imágenes satelitales

Por obtención de imágenes satelitales, se entiende tanto el proceso de adquisición (selección y compra de las imágenes) y el proceso de captura de las imágenes propiamente tal por parte de la plataforma satelital seleccionada para las diversas zonas o “áreas de interés” (AI), lo cual debe ser rigurosamente planificado de manera que el satélite logre capturar las escenas satelitales necesarias en el momento y fecha requerida. Conforme los requerimientos técnicos correspondientes a la Medida EST 02, para la realización de este estudio es preciso contar con imágenes satelitales que presenten: a) alta resolución espacial equivalente o superior a 2,5 m (tamaño de pixel), y b) resolución multiespectral (disponibilidad de bandas espectrales) suficiente para la obtención de los índices espectrales (p.e. el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, NDVI, por sus siglas en inglés; o el Índice de Agua de Diferencia Normalizada, NDWI, por sus siglas en inglés) y otros subproductos satelitales que permitan una adecuada caracterización y monitoreo de los humedales altoandinos mencionados anteriormente. Dentro del amplio catálogo de imágenes satelitales disponibles actualmente, solo un número limitado de plataformas satelitales presentan alta resolución espacial, suficiente para satisfacer los requerimientos técnicos del estudio. En este caso, fueron seleccionadas imágenes SPOT 6/7, cuyas características se presentan en la Tabla 1.

Las imágenes satelitales SPOT 6/7 se destacan entre otras disponibles, por su alta calidad por defecto, en términos de calibraciones radiométricas y geográficas, lo cual asegura contar con información espacialmente explícita con altísima calidad para efectos del estudio de la Medida EST-02.

Tabla 1. Características de las bandas espectrales de satélites SPOT 6/7

Banda	Denominación	Rango Espectral (μm)	Resolución Espacial (GSD) ⁽¹⁾
Pan	Pancromática	0,450 – 0,745	1,5 m
B0	Azul (Blue)	0,450 – 0,520	6,0 m
B1	Verde (Green)	0,530 – 0,590	6,0 m
B2	Roja (Red)	0,625 – 0,695	6,0 m
B3	Infrarrojo Cercano (NIR)	0,760 – 0,890	6,0 m

(1) La resolución espacial final de las imágenes satelitales, obtenida mediante el procedimiento de fusiónado pancromático, corresponde a 1,5 m (tamaño de pixel), lo cual cumple con el requerimiento establecido según las bases técnicas.

Tal como se observa en la Tabla 1, las imágenes SPOT 6-7 poseen alta resolución espacial y una resolución espectral suficiente para identificar con alto detalle y precisión geográfica a elementos de la superficie terrestre, tales como cuerpos de agua, vegetación y características del terreno. Esto debido a la disponibilidad de bandas espectrales en el rango visible e infrarrojo cercano (NIR), por sus siglas en inglés), que facilitan la discriminación de coberturas terrestres, así como el análisis del estado (vigorosidad) de la vegetación. Con este insumo, se puede generar información cartográfica precisa y complementar el seguimiento de cambios en las dinámicas ecosistémicas y su entorno (Agrospace, 2025a)

Dado el alto nivel de detalle (resolución espacial) y calidad que presentan las imágenes satelitales seleccionadas, resulta necesario acotar el área o zonas de captura mediante la delimitación de áreas de interés (AI) las cuales deben cubrir la totalidad de los sectores o SVAHT específicos de la Medida EST-02. La Figura 3 muestra la delimitación de AI efectuada, correspondiente a la superficie terrestre que es efectivamente capturada por los satélites de la constelación SPOT 6/7 para una fecha previamente programada y acordada con el proveedor satelital. Esta delimitación de AI corresponde al esquema de captura de imágenes que se utilizará luego para todas las campañas de terreno por realizar, de manera de contar con información similar durante todo el periodo de monitoreo para efectos del estudio.

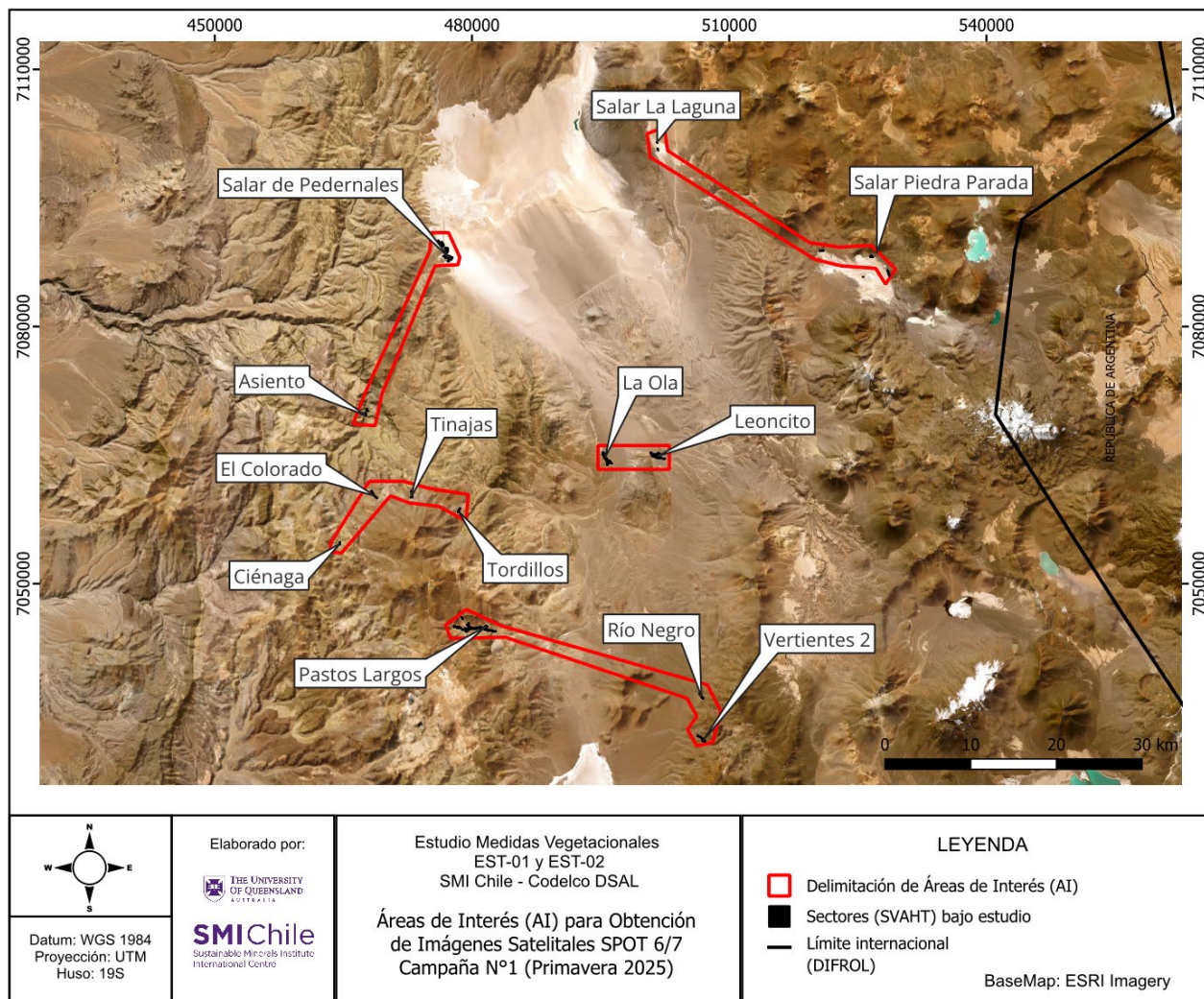


Figura 3. Áreas de interés (AI) delimitados para la obtención (adquisición y captura) de imágenes multiespectrales SPOT 6/7

Es importante recalcar que la fecha de captura de las imágenes debe guardar estrecha relación con las fechas de levantamiento de datos de los diversos componentes ambientales (principalmente flora y vegetación) y las fechas de levantamiento de datos para la calibración-validación de las imágenes (mediciones de firmas hiperespectrales). Esta relación o cercanía entre fechas, se debe a la necesidad, para efectos del estudio en proceso, de que las imágenes satelitales correspondan precisamente a las fechas o momentos en que se encuentra caracterizando en terreno los diversos componentes ambientales. En este sentido, la Campaña de Primavera 2025 cumplió con lo estipulado en los Términos de Referencia, al tener una diferencia solamente de días entre estos hitos. En detalle, la Campaña de levantamiento de datos para los diferentes componentes ambientales se realizó previamente entre los días 24 y 30 de noviembre de 2025, las imágenes fueron capturadas el día 08 de diciembre de 2025 (14:03-14:14 hora local) por parte de la plataforma satelital, y la Campaña de mediciones hiperespectrales *in situ* para la calibración-validación de las imágenes se realizó entre el 15 y 19 de diciembre de 2025.

4.1.2 Pre-procesamiento de las imágenes satelitales

La metodología implementada para el pre-procesamiento de imágenes satelitales del sensor SPOT (Satélite para la Observación de la Tierra, por sus siglas en francés), abarca la corrección atmosférica, la fusión pancromática o *pansharpening* (necesario para la obtención de imágenes o bandas espectrales con mayor resolución espacial, similar a la banda pancromática), y finalmente, la elaboración del mosaico final de imágenes que abarca la totalidad del AE en un solo archivo. El flujo de trabajo en gabinete se basa en scripts de Python que utilizan bibliotecas especializadas como Py6S para la corrección atmosférica, y en general, para todo el pre-procesamiento de las imágenes, garantizando la generación de productos de reflectancia superficial con alta resolución espacial. El flujo de trabajo basado o ajustado a las características de las imágenes adquiridas (SPOT 6/7) contempla la realización de calibraciones radiométricas en función del metadato XML, además de un proceso de ortorectificación (Agrospace, 2026a)

4.1.2.1 Corrección Atmosférica

La señal recibida por los sensores de los satélites incluye no sólo la radiancia reflejada en la superficie, sino también la radiancia de la trayectoria procedente de la dispersión atmosférica (Rayleigh y aerosoles) y la absorción gaseosa (por ejemplo, O₃, H₂O, CO₂). Es por ello que la corrección atmosférica es un paso crucial del pre-procesamiento de imágenes satelitales, dado que buscan convertir las mediciones de la parte superior de la atmósfera (TOA, por sus siglas en inglés) en reflectancia de superficie (Vermote et al., 1997; 2006; 2008 citado por Agrospace, 2026a).

La corrección atmosférica se consigue normalmente utilizando modelos de transferencia radiativa (RTM), que simulan la interacción de la radiación solar con la atmósfera y la superficie en determinadas condiciones de observación. En este caso, las imágenes satelitales fueron corregidas atmosféricamente mediante el código de transferencia radiativa 6SV 2.1 (Vermote et al., 1997 citado por Agrospace, 2026a). El modelo de Segunda Simulación de una Señal de Satélite en el Espectro Solar - Vector (6SV) destaca por su equilibrio entre precisión física y eficiencia computacional (Vermote et al., 1997 citado por Agrospace, 2026a). Más detalles acerca del modelo 6SV y su implementación se encuentra en el Anexo 1 “Documentación Módulo de Corrección Atmosférica”.

Los datos de parámetros atmosféricos utilizados para realizar la corrección atmosférica, siguiendo el modelo descrito, fueron derivados de bases de datos satelitales, del producto de Espesor Óptico (AOT por sus siglas en inglés) y vapor de agua del producto MCD19A2 MODIS MAIAC (Lyapustin et al., 2018 citado por Agrospace, 2026a), y el Ozono derivado de Sentinel-5P TROPOMI (Veekfind et al., 2012 citado por Agrospace, 2026a) desde la plataforma Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017 citado por Agrospace, 2026a).

Para el cálculo de la reflectancia de superficie se utilizaron los parámetros de calibración entregados por cada proveedor de las imágenes, tales como los valores de ángulo cenital solar, día del año, elevación solar, entre otros. En la Tabla 2 se presenta un resumen de los datos de entrada utilizados para la corrección atmosférica mediante el modelo 6SV.

Tabla 2. Datos de entrada para corrección atmosférica 6SV.

Parámetro	Fuente	Uso
Geometría Solar y de Visión $\theta_s, \theta_v, \phi_s, \phi_v$	Metadatos DIMAP XML SPOT	Define el ángulo relativo Sol-Objeto-Sensor.
Fecha de Adquisición	Metadatos DIMAP XML SPOT	Necesario para determinar la distancia Tierra-Sol.
Elevación del Terreno	Metadatos DIMAP XML SPOT	Define la altitud del objetivo
AOD (Optical Depth) Vapor de Agua (H_2O)	Google Earth Engine (GEE) - MODIS MCD19A2	Mide la concentración de aerosoles en la atmósfera y absorción de gases atmosféricos.
Ozono (O_3)	Google Earth Engine (GEE) - COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_O3	Mide la absorción de gases atmosféricos
Funciones de Respuesta Espectral	Proveedor de imágenes satelitales	Define la sensibilidad espectral precisa de los sensores SPOT 6/7.

Fuente: Agrospace (2026a).

4.1.2.2 Fusión de imágenes (*PanSharpening*)

El proceso de *pansharpening* fusiona la información espectral de las bandas multiespectrales con la información estructural de la banda pancromática. Esto permite obtener una imagen (mosaico) más detallada (alta resolución espacial) que favorece la interpretación visual y el análisis de patrones y elementos presentes en la superficie terrestre (Agrospace, 2026a). En este caso, se ha empleado la transformación Intensidad Tono Saturación (IHS, por sus siglas en inglés) clásica, la cual separa la información espacial (Intensidad) de la información espectral (Matiz y Saturación). Más detalles acerca del método IHS, en el Anexo 1. Documentación Módulo de Corrección Atmosférica y Fusión Pan-Sharpener para SPOT 6-7.

4.1.3 Mediciones hiperespectrales *in situ*

Las características estructurales y fisiológicas de la vegetación altoandina presentan una respuesta espectral característica, que depende del tipo de vegetación y su estado fisiológico. Una firma espectral corresponde al patrón único de luz reflejada o emitida por un objeto o material a través de distintas longitudes de onda, lo que permite su identificación y caracterización. En el caso de la vegetación, las firmas espectrales están directamente condicionadas por el estado y la estructura de la vegetación, constituyendo una herramienta fundamental para su caracterización y análisis (Agrospace, 2026b).

La medición de firmas espectrales en los distintos ecosistemas presentes en el AE se realiza *in situ* con un espectroradiómetro, instrumento que posibilita registrar la reflectancia propia de cada tipo de cobertura vegetal y/o de la superficie terrestre en diferentes longitudes de onda. En este caso particular se registraron firmas espectrales con un espectroradiómetro Apogee PS-200 previamente calibrado. Para las mediciones *in situ*, se aplicó un diseño de muestreo estandarizado para todos los sitios evaluados. En cada sitio o SVAHT se instaló una grilla de medición compuesta por nueve celdas o cuadrantes de 3 m x 3 m, abarcando un área total de 81 m² (Agrospace, 2026b). Considerando el foco y mayor profundidad del estudio requerida en el caso del SVAHT Salar de

Pedernales para efectos del estudio EST-01, es que en este caso se ha realizado mayor número de grillas de muestreo (tres grillas de muestreo) que permitan incrementar la riqueza de la variabilidad conforme se establece en los protocolos del Comité sobre Satélites de la Tierra (CEOS por sus siglas en inglés) para medidas de albedo y de reflectancia, permitiendo con ello capturar la representatividad *in situ* de la superficie objetivo.

Esta superficie o área total (cubierto para cada grilla) corresponde funcionalmente a una Unidad de Muestra Elemental (ESU, por sus siglas en inglés: *Elementary Sampling Unit*) bajo la definición establecida por CEOS, es decir, una unidad espacial dentro de la cual la reflectancia puede considerarse representativa del píxel satelital comparable. Estos nueve cuadrantes se configuran o conforman en terreno mediante un cuadrante central fijo y un cuadrante móvil, el cual es desplazado sucesivamente a cada una de las posiciones de la grilla (Agrospace, 2026b, 2026c). Un ejemplo de esto se puede observar en la Figura 4.

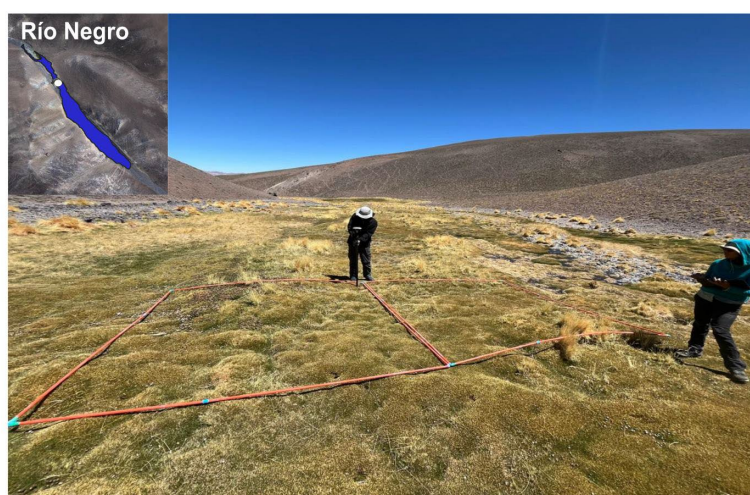


Figura 4. Cuadrante de medición en sector Río Negro. Fuente (fotografía): Agrospace (2026b)

En cada cuadrante de la grilla se obtuvieron tres mediciones hiperespectrales independientes, totalizando 27 mediciones por sitio (a excepción del SVAHT de Salar de Pedernales donde se obtuvieron 3 muestras de coberturas diferentes, denominadas Pedernales 1, 2 y 3 respectivamente, con 27 medidas en cada una, totalizando 81 mediciones). Cada punto de muestreo fue georreferenciado mediante un sistema GPS de alta precisión (GNSS RTK), asegurando precisión submétrica en la ubicación espacial de cada punto, generando una nube de puntos para cada sitio. Las firmas espectrales se registraron mediante el espectroradiómetro entre los 350 y 850 nm de longitud de onda, dentro del intervalo horario de 11:00 a 15:00 h, siguiendo las recomendaciones de medición en condiciones de iluminación estable y minimizando posibles efectos de sombra (Agrospace, 2026b). Las mediciones fueron realizadas entre los días 15 y 19 de diciembre de 2025. A continuación, se puede observar un detalle del orden en los cuales se abordaron los 13 sitios comprometidos en la Tabla 3.

Tabla 3. Calendarización de muestreos realizada en los 13 sitios bajo estudio

Fecha	Lugar y hora estimada de la medición
15 diciembre 2025	- Salar de Pedernales (11:00 am) - Cabecera sur río La Ola (12:30 pm) - Quebrada Leoncito (14:00 pm)
16 diciembre 2025	- Salar de Piedra parada (11:00 am) - Salar La Laguna (14:00 pm)
17 diciembre 2025	- Tordillos (11:00 am) - Tinaja (13:00 am) - Quebrada Asiento (14:30 am)
18 diciembre 2025	- Vertiente 2 (11:00 am) - Río Negro (12:30 pm) - Pastos Largos (14:00 pm)
19 diciembre 2025	- Colorado (11:00 am) - Ciénaga (13:00 pm)

Fuente: Elaboración propia (2026).

4.1.4 Calibración y validación de imágenes obtenidas

Para evaluar la calidad radiométrica de las reflectancias de superficie derivadas de imágenes SPOT obtenidas y corregidas conforme se ha descrito en etapas anteriores, se realizó una comparación directa con las mediciones hiperespectrales obtenidas en terreno. Para ello, se utilizaron las firmas espectrales medidas *in situ*, representativas de distintos tipos de superficie, las cuales fueron convolucionadas a las bandas multiespectrales de SPOT y comparadas con la información satelital adquirida en las mismas ubicaciones (Agrospace, 2026c).

El proceso de calibración-validación (en adelante, cal/val) se realizó siguiendo las recomendaciones del *CEOS Land Product Validation Subgroup* para productos de reflectancia y albedo superficial, particularmente las directrices del *Global Surface Albedo Product Validation Best Practices Protocol* (Wang et al., 2026, citado por Agrospace, 2026c), adaptadas al caso de reflectancias de alta resolución (SPOT 6/7). El procedimiento consiste en un enfoque *point-to-pixel*, donde mediciones hiperespectrales *in situ* se comparan directamente con la reflectancia satelital corregida.

4.1.4.1 Tratamiento de los datos de terreno

En cada ESU o grilla de muestreo antes descrita, considerada representativa del píxel comparable con la imagen satelital correspondiente, se obtuvo una firma espectral representativa de la ESU a partir del promedio de las 27 mediciones realizadas en su interior. En este proceso, se calculó además la desviación estándar intra-ESU. Este valor resume la heterogeneidad superficial presente dentro de la grilla y constituye, de acuerdo con las guías de CEOS, un indicador relevante para interpretar la variabilidad esperable en el proceso de comparación punto-píxel. En conjunto, este procedimiento asegura una correspondencia espacial adecuada entre los datos hiperespectrales de campo y la resolución multiespectral de SPOT *pansharpened* (1,5 m GSD), permitiendo que cada ESU represente de forma consistente el *footprint* efectivo necesario para validaciones de sensores ópticos de alta resolución (Agrospace, 2026c).

4.1.4.2 Convolución espectral de medidas hiperespectrales

Para asegurar la comparabilidad espectral entre las mediciones hiperespectrales de terreno y las reflectancias obtenidas desde SPOT corregidas atmosféricamente, cada firma *in situ* fue convolucionada (Durán-Alarcón et al, 2014 citado por Agrospace, 2026c) utilizando las funciones de respuesta espectral (SRF, por sus siglas en inglés: *Spectral Response Functions*) oficiales de SPOT-6/7. La aplicación de esta convolución es un requisito metodológico en validaciones CEOS, ya que evita sesgos derivados de la distinta resolución espectral entre los instrumentos de campo y los sensores satelitales, y permite comparar ambas mediciones dentro del mismo marco espectral operativo (Agrospace, 2026c). El detalle de los métodos y fórmulas de cálculo utilizadas para realización la convolución espectral se encuentra en el Anexo 1.

4.1.4.3 Comparación punto-píxel y métricas de validación

La comparación entre las mediciones de terreno y los valores correspondientes a los píxeles de las imágenes satelitales se realizó mediante un enfoque *point-to-pixel*. Este proceso se realizó siguiendo las recomendaciones del protocolo CEOS para la validación de productos de reflectancia (capítulos 2.4 y 5.3.3), y las directrices metodológicas descritas por de los Reyes et al., 2026 (citado por Agrospace, 2026) en el marco de los estándares CHIME (*Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment*), una misión de referencia para validación espectral terrestre, que establece la necesidad de cuantificar la representatividad espacial del muestreo de campo y de reportar estadísticas intra-ESU para comparaciones radiométricas con sensores remotos de alta resolución (Agrospace, 2026c)

En cada sitio, la posición geográfica del ESU obtenida mediante GNSS RTK se utilizó para identificar el píxel correspondiente en la imagen SPOT. A partir de dicho píxel se extrajo la reflectancia superficial corregida atmosféricamente, la cual se comparó directamente con las reflectancias *in situ* previamente convolucionadas utilizando las SRF oficiales para imágenes SPOT-6/7. Como se ha mencionado anteriormente, para cada ESU se calculó tanto el valor promedio como la desviación estándar de las mediciones hiperespectrales, siguiendo lo recomendado por CHIME y CEOS para caracterizar la heterogeneidad superficial y garantizar que la comparación punto-píxel sea representativa del área observada por el sensor (Agrospace, 2026c)

La calidad del ajuste entre ambas fuentes de información se evaluó mediante las siguientes métricas propuestas por CEOS: (a) el coeficiente de determinación (R^2) como indicador de consistencia entre terreno y satélite, (b) el sesgo (*bias*) definido como la diferencia media entre SPOT e *in situ* como métrica principal de exactitud radiométrica, y (c) la desviación estándar de las diferencias como descriptor de la dispersión y de la variabilidad interna del ESU y el error cuadrático medio (RMSE). Además, se emplearon gráficos de regresión con línea 1:1, tal como sugiere CEOS, para identificar patrones sistemáticos o errores dependientes de la magnitud de la reflectancia. Estas métricas se calcularon de forma independiente para cada banda multiespectral (Blue, Green, Red y NIR). El detalle de los métodos y ecuaciones para el cálculo de estas métricas se encuentran en Anexo 1.

4.2 Etapa 2

El procedimiento metodológico utilizado en la Etapa 2 se resume en la Figura 5, el cual se compone de cuatro sub-etapas. El detalle metodológico relativo a la Etapa 1 se explicó en el apartado 4.1. La Etapa 2, descrita en este apartado, contempla la aplicación de diversas técnicas para el análisis de imágenes satelitales. Estas van desde la inspección visual (fotointerpretación) de la superficie terrestre en los SVAHT a partir de combinación de bandas espectrales, el cálculo de los índices NDVI y NDWI a partir de fórmulas reconocidas que utilizan las bandas espectrales (*Red*, *Green* y *NIR*), caracterización de los sitios mediante estadísticas zonales de NDVI y NDWI utilizando los polígonos oficiales de los SVAHT¹, para finalizar con estimaciones del tamaño (áreas, límites) y vigor de la vegetación a partir de NDVI, y la estimación del tamaño de los cuerpos de agua a partir de NDWI.

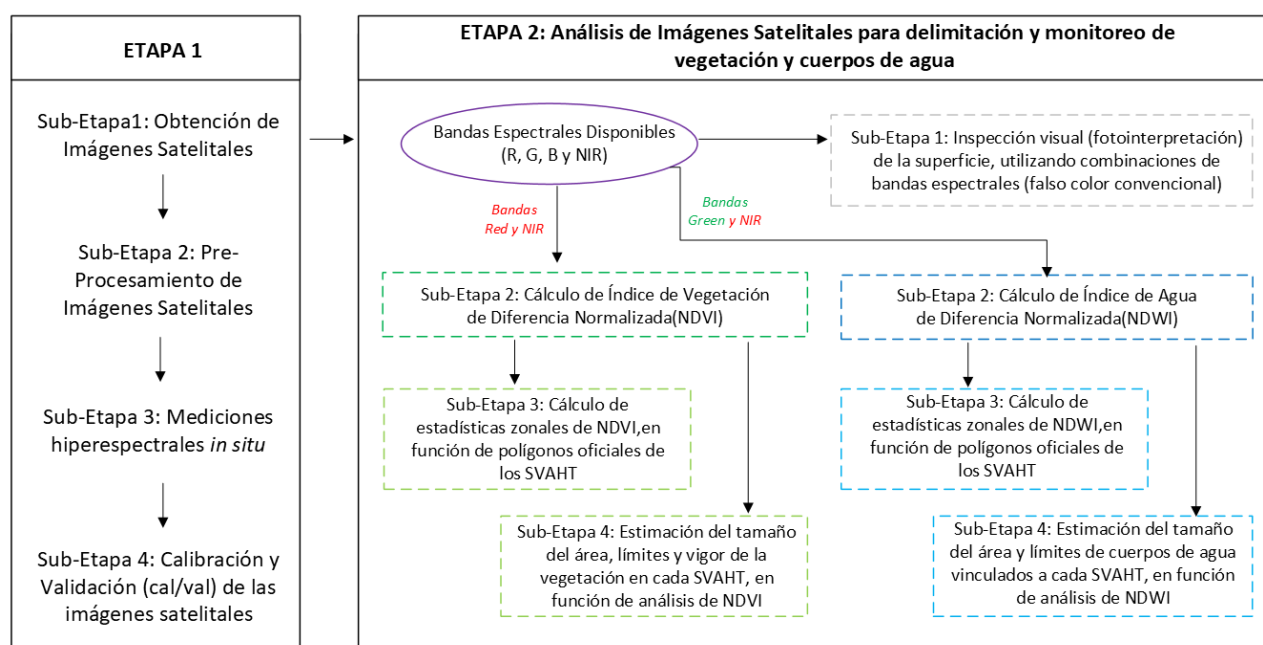


Figura 5. Diagrama de flujo representativo del procedimiento metodológico utilizado en la Etapa 2.

A continuación, se describe con mayor detalle cada actividad metodológica:

4.2.1 Inspección visual (fotointerpretación) de la superficie terrestre

Como primera aproximación para el análisis de las imágenes satelitales con fines de delimitación y monitoreo de vegetación y cuerpos de agua, se elaboró una imagen falso color convencional mediante combinación de las bandas espectrales *NIR*, *Red* y *Green*, dispuestas en los canales R-G-B, respectivamente. Esto posibilita obtener una imagen en donde se logra distinguir la vegetación (mediante fotointerpretación) claramente de otros tipos de cobertura de suelo (*land cover*) existentes en la superficie terrestre, debido a que adquiere tonos rojos o rojizos (en particular aquella

¹ Material entregado por la contraparte del estudio, en Mayo de 2025, como base de datos oficial relativa a los sitios bajo estudio (polígonos de los 13 SVAHT), de acuerdo al proceso de implementación del acuerdo de Avenimiento y Transacción entre Codelco y el Consejo de Defensa del Estado, y que constituye el marco o contexto en el que se desarrollan de los estudios EST-01 y EST-02.

vegetación que presenta alta vigorosidad al momento de la captura de la imagen por parte del sensor satelital). La imagen o composición falso color convencional se utilizará luego y de manera complementaria para observar e identificar elementos, formas o características destacables existentes en el terreno correspondiente a los SVAHT, así como también, como referencia para comparar e interpretar otros productos satelitales a obtener tales como los índices espectrales NDVI y NDWI considerados como productos principales en este estudio.

4.2.2 Cálculo de índices espectrales NDVI y NDWI

Para el monitoreo del tamaño y vigor de la vegetación en cada SVAHT se utiliza el Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), utilizado para discriminar las superficies cubiertas por vegetación fotosintéticamente activa (mayor vigorosidad) (Chuvieco, 2002; Qi et al, 1994; Huete, 2012; Xue y Su, 2017), lo cual se define mediante la siguiente relación:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Donde:

Red = Reflectancia en el espectro del rojo

NIR = Reflectancia en el espectro del infrarrojo cercano

Para el monitoreo del tamaño de los cuerpos de agua asociados a los SVAHT, en particular el tamaño o superficie del espejo de agua, se utiliza el Índice de Diferencia Normalizada de Agua o NDWI (*Normalized Difference Water Index*) propuesto por McFeeters (1996), índice que maximiza la reflectancia del agua (reduce la reflectancia del suelo y de la vegetación de manera considerable). Este índice se define mediante la siguiente relación:

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$

Donde:

Green = Reflectancia en el espectro del verde

NIR = Reflectancia en el espectro del infrarrojo cercano

4.2.3 Cálculo de estadísticas zonales de NDVI y NDWI, para cada SVAHT

En consideración de los polígonos oficiales de delimitación de los SVAHT, se obtuvieron estadísticas zonales descriptivas correspondientes a los índices NDVI y NDWI, tales como el valor promedio, mediana, desviación estándar, máximos y mínimos relativos a los índices NDVI y NDWI. Este cálculo posibilita caracterizar y monitorear en el tiempo las dinámicas de la vegetación y los cuerpos de agua vinculados a cada SVAHT, de modo que variaciones en los valores de estos estadísticos descriptivos entendidos como indicadores, sirven de apoyo para el monitoreo periódico de la vegetación y de los cuerpos de agua.

4.2.4 Estimación del tamaño del tamaño y vigor de la vegetación en cada SVAHT a partir de NDVI, y del tamaño de los cuerpos de agua a partir de NDWI

Mediante técnicas de reclasificación, filtrado y vectorización de los índices NDVI y NDWI obtenidos originalmente en formato raster, se obtienen nuevas coberturas y delimitaciones cartográficas que permiten calcular la superficie ocupada por la vegetación y cuerpos de agua, vinculados a cada SVAHT. En el caso del tamaño y vigor de la vegetación a partir de NDVI, la estimación de áreas o superficies (en hectáreas) correspondientes a esta variable se ha realizado utilizando dos aproximaciones, mientras que en el caso de los cálculos relacionados al tamaño de los cuerpos (espejo) de agua a partir de NDWI la estimación de superficies (en hectáreas) se ha realizado a partir de una sola aproximación general. Estas se describen a continuación.

4.2.4.1 Análisis y clasificación de NDVI para la estimación de superficies de vegetación

Primera aproximación

La primera aproximación para la estimación de superficies correspondientes a vegetación se basó en la utilización de rangos de valores comunes de NDVI para la clasificación por defecto de toda el área de estudio, es decir para todos los SVAHT. Los valores o rangos comunes de NDVI utilizados para realizar esta clasificación se ha basado tanto en lo reportado en literatura científica (p.e. artículos científicos) como en información técnica pre-existente (p.e. reportes e informes de estudios y consultorías) para este tipo de ecosistemas altoandinos. Esta primera aproximación posibilita una comprensión general de la distribución y características de la vegetación obtenible a partir de la interpretación de los valores de NDVI, permitiendo comparar entre los diferentes SVAHT en términos de superficies (áreas en ha) que presenten iguales valores o rangos (categorías de valores comunes y comparables) de NDVI. La Tabla 4 contiene los valores (rangos) para la clasificación común de NDVI para todos los SVAHT, utilizada en este informe.

Tabla 4. Valores (rangos) para la clasificación común de NDVI en todos los SVAHT

Código	Rango NDVI		Interpretación
1	-1	0	Sin vegetación, suelo desnudo o rocas, u otras coberturas (p.e. cuerpos de agua)
2	0	0,02	Sin vegetación, suelo desnudo y/o con muy escasa presencia de vegetación vinculadas a cauces de río o riberas de cuerpos de agua (señal muy débil)
3	0,02	0,1	Escasa presencia de vegetación, con muy baja densidad o cobertura, y/o con muy baja vigorosidad
4	0,1	0,2	Presencia de vegetación, con baja densidad o cobertura, y/o con baja vigorosidad
5	0,2	0,3	Presencia de vegetación, con densidad, cobertura y/o vigorosidad intermedia
6	0,3	1	Alta presencia de vegetación, con alta densidad, alta cobertura y/o alta vigorosidad

Fuente: Elaboración Propia, a partir de revisión bibliográfica (Chuvieco, 2002; Qi et al, 1994; Huete, 2012; Castillo, 2019; Chavez et al, 2019; De la Fuente et al, 2021; Puertas et al, 2023; Econativa Consultores, 2024)

Segunda aproximación

La segunda aproximación para la estimación de superficies correspondientes a vegetación se basó en la utilización de valores de NDVI considerados umbrales mínimos con presencia de vegetación según lo observado y levantado en terreno mediante la primera campaña realizada en diciembre de 2025. Esta clasificación se establece identificando los valores mínimos observados en los píxeles de las imágenes raster de NDVI, coincidentes con los transectos utilizados en cada SVAHT para la caracterización en terreno de la componente flora y vegetación de los estudios EST-01 y EST-02. Estos valores o umbrales mínimos de NDVI son identificados para cada SVAHT a partir del conjunto de transectos realizados en cada sector, razón por la que se consideran valores umbrales específicos o particulares para el análisis y clasificación del NDVI en cada SVAHT.

El procedimiento para la determinación de los valores umbrales mínimos, implica en primera instancia la extracción del conjunto de valores NDVI que se encuentra en toda la longitud de cada uno de los transectos de medición realizados en cada SVAHT. Del conjunto total de valores de NDVI identificados para cada SVAHT, se han identificado dos parámetros relevantes para realizar esta segunda aproximación y/o clasificación de NDVI:

- Primer parámetro: Valor mínimo absoluto de NDVI identificado en el conjunto de valores extraídos correspondiente a todos los transectos realizados en un SVAHT; y
- Segundo parámetro: Valor de la mediana de los valores mínimos de NDVI identificados en cada uno de los transectos realizados en un SVAHT. Se utiliza este estadístico ya que representa mejor la serie de datos dado que no se encuentra influido por valores extremos, que en este caso pueden corresponder a píxeles con menor vigorosidad, menor presencia o densidad vegetal.

En síntesis, se obtienen estos dos parámetros considerados umbrales mínimos de NDVI, de modo que todos aquellos sectores que presenten valores mayores a estos umbrales se considera que presentan vegetación activa, en particular aquellos sectores que se encuentren por sobre el valor umbral de NDVI correspondiente a la mediana de los valores mínimos de NDVI. Esta metodología de umbrales mínimos para el análisis de NDVI, corresponde a un procedimiento analítico similar al utilizado anteriormente para el estudio de los SVAHT en esta misma área de estudio, realizado por Econativa Consultores (2023), en donde se identificó también un valor umbral mínimo de NDVI para cada SVAHT como parámetro de corte para delimitar las áreas (y su consecuente estimación de superficies en hectáreas) que presentaban vegetación activa. En este sentido, la utilización de un método similar en el presente estudio, surge de la necesidad de realizar y posibilitar comparaciones de resultados con lo obtenido en estos estudios previos, en función de los objetivos existentes.

La Tabla 5 contiene los valores (rangos) para clasificación común de NDVI para todos los SVAHT. Conforme se observa en esta tabla, es preciso recalcar que para el caso de los SVAHT de Salar La Laguna y Salar Piedra Parada, debido a la ubicación espacial y la distancia existente entre los polígonos que conforman cada SVAHT (dos polígonos para el caso de Salar La Laguna y tres polígonos para el caso de Salar Piedra Parada) así como las diferencia en términos de valores de NDVI observables en cada sector, es que se identifican parámetros específicos para cada polígono con la finalidad de realizar posteriormente un análisis en forma separada de cada sector para efectos de obtener una mejor representación y posterior estimación de superficies de vegetación en cada uno de estos SVAHT.

Tabla 5. Valores de umbrales mínimos para la clasificación de NDVI específicos por SVAHT

Sector (SVAHT)	Valor NDVI (Mínimo Absoluto) en Transectos SMI	Valor NDVI (Mediana de los Mínimos) en Transectos SMI
SVAHT de Salares		
Pedernales (SP)	0,0769	0,1044
Laguna 1 (SL1)	0,0259	0,06 (*)
Laguna 2 (SL2)	0,0986	0,1023
Piedra Parada 1 (P1)	0,1116	0,1435
Piedra Parada 2 (P2)	0,0777	0,0983
Piedra Parada 3 (P3)	0,0433	0,0528
SVAHT de Quebradas		
Asiento	0,1162	0,1417
Ciénaga	0,0877	0,1198
Colorado	0,0836	0,1847
La Ola	0,0858	0,2038
Leoncito	0,15 (**)	0,3085
Pastos Largos	0,1096	0,1698
Río Negro	0,0652	0,1145
Tinajas 1	0,1131	0,1717
Tordillos	0,1530	0,1884
Vertiente 2	0,0590	0,1179

(*) Se ha utilizado un valor de umbral correspondiente a la mediana de los valores mínimos observados, a partir del conjunto de valores de NDVI identificados en los transectos realizados en SL1 y SL2 en su conjunto. Esto debido a que el valor de la mediana obtenida solamente con valores de NDVI correspondientes a transectos de SL1 es muy similar al valor correspondiente al umbral mínimo absoluto para este SVAHT, lo cual no permite distinguir claramente sectores con vegetación entre estos umbrales.

(**) Se ha utilizado un valor umbral mínimo absoluto igual a 0,15, correspondiente al valor de la mediana de los mínimos dividido en 2. Esto debido a que el valor de umbral mínimo absoluto de NDVI obtenido para este SVAHT es muy similar al valor de la mediana de los valores mínimos de NDVI, lo cual no permite distinguir claramente sectores con vegetación entre estos umbrales.

4.2.4.2 Análisis y clasificación de NDWI para la estimación de superficies de cuerpos de agua

Para el cálculo del tamaño de los cuerpos de agua a partir de NDWI vinculados a los SVAHT, la estimación de superficies se ha realizado a partir de la utilización de rangos de valores comunes o generales para la clasificación de NDWI en toda el área de estudio. Esta clasificación se ha basado principalmente en lo reportado en literatura científica y técnica, así como en lo recomendado en sitios web especializados (p.e. EOS Data Analytics). La Tabla 6 contiene los valores (rangos) para clasificación común de NDWI utilizados en este reporte.

Tabla 6. Valores (rangos) para la clasificación común de NDWI

Código	Rango NDWI		Interpretación
1	-1	-0,3	Superficies sin agua superficial, suelos áridos o desnudos, con rocas, o sectores con alto estrés hídrico
2	-0,3	-0,15	Superficies sin agua superficial, suelo desnudo, o con vegetación seca
3	-0,15	0	Superficies sin agua superficial, con escasa presencia de humedad, vinculados a laderas de cerro, fondos de quebrada o cauces de río, salares o costras salinas
4	0	0,2	Suelos con alta humedad o saturación hídrica, zonas de inundación, o con vegetación con alto contenido de humedad
5	0,2	1	Cuerpos o espejos de agua superficial claramente identificables, tales como lagos, ríos, océanos, embalses, etc

Fuente: Elaboración Propia, a partir de revisión bibliográfica (McFeeters, 1996; EOS Data Analytics, 2026)

5. Resultados

5.1 Etapa 1

5.1.1 Obtención de imágenes satelitales

La Figura 6 presenta el mosaico final generado a partir de las imágenes satelitales multiespectrales SPOT 6/7, resultado de la integración, procesamiento, corrección y ensamble para obtener la cobertura esperada del AE. Este resultado constituye una base de información fundamental para los análisis posteriores (tales como el cálculo de los índices NDWI y NDVI, para el monitoreo de humedad y vegetación respectivamente), y para su interpretación conjunta con los datos levantados para los diversos componentes ambientales obtenidos durante la Campaña de Primavera 2025. La Figura 7 presenta, a modo de ejemplo, una visualización de una composición de bandas espectrales “falso color convencional” (Bandas B3, B2 y B1 en canales RGB), para el SVAHT activo del Salar de Pedernales.

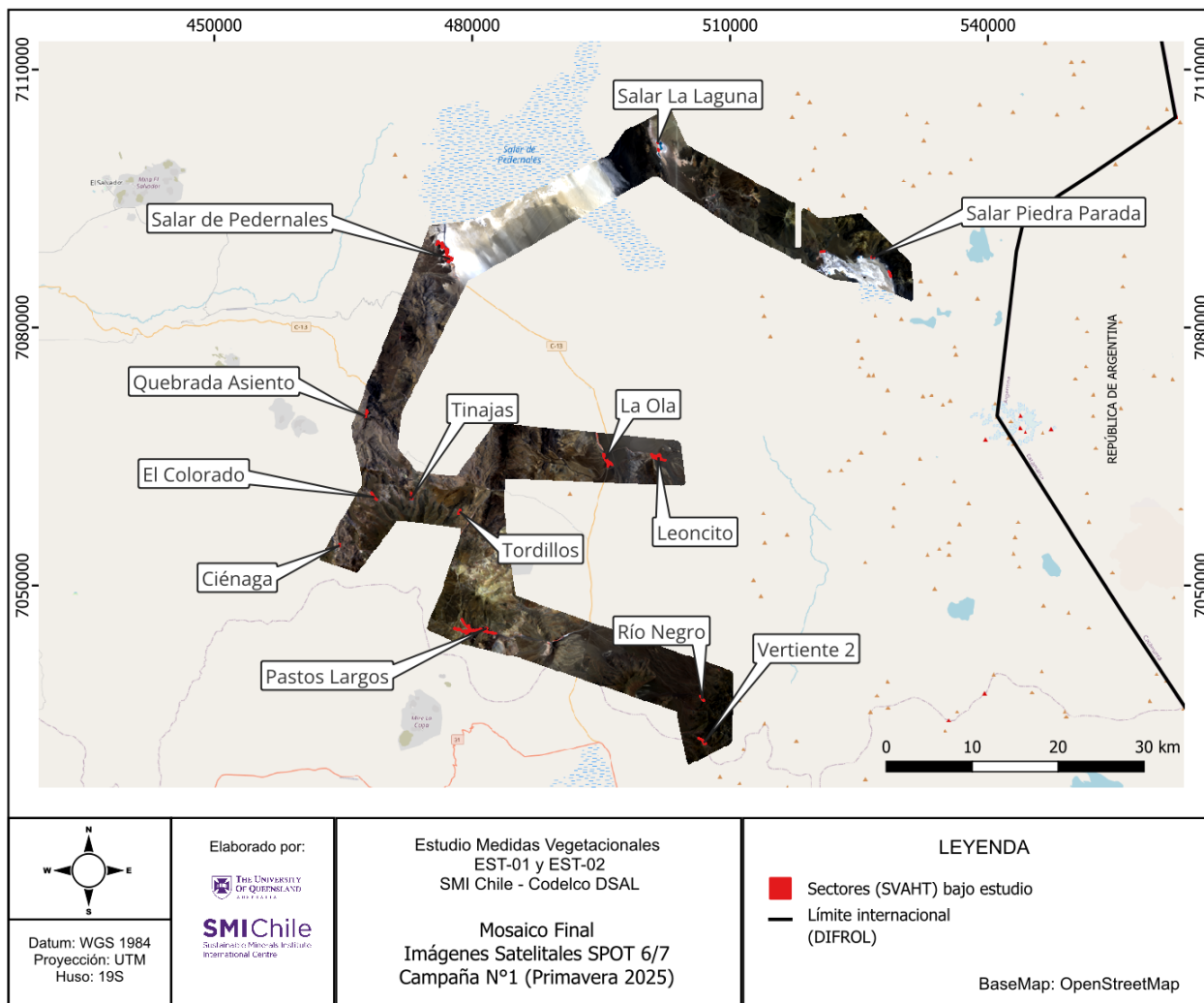


Figura 6. Mosaico final de imágenes satelitales multiespectrales SPOT 6/7, Campaña Primavera 2025.

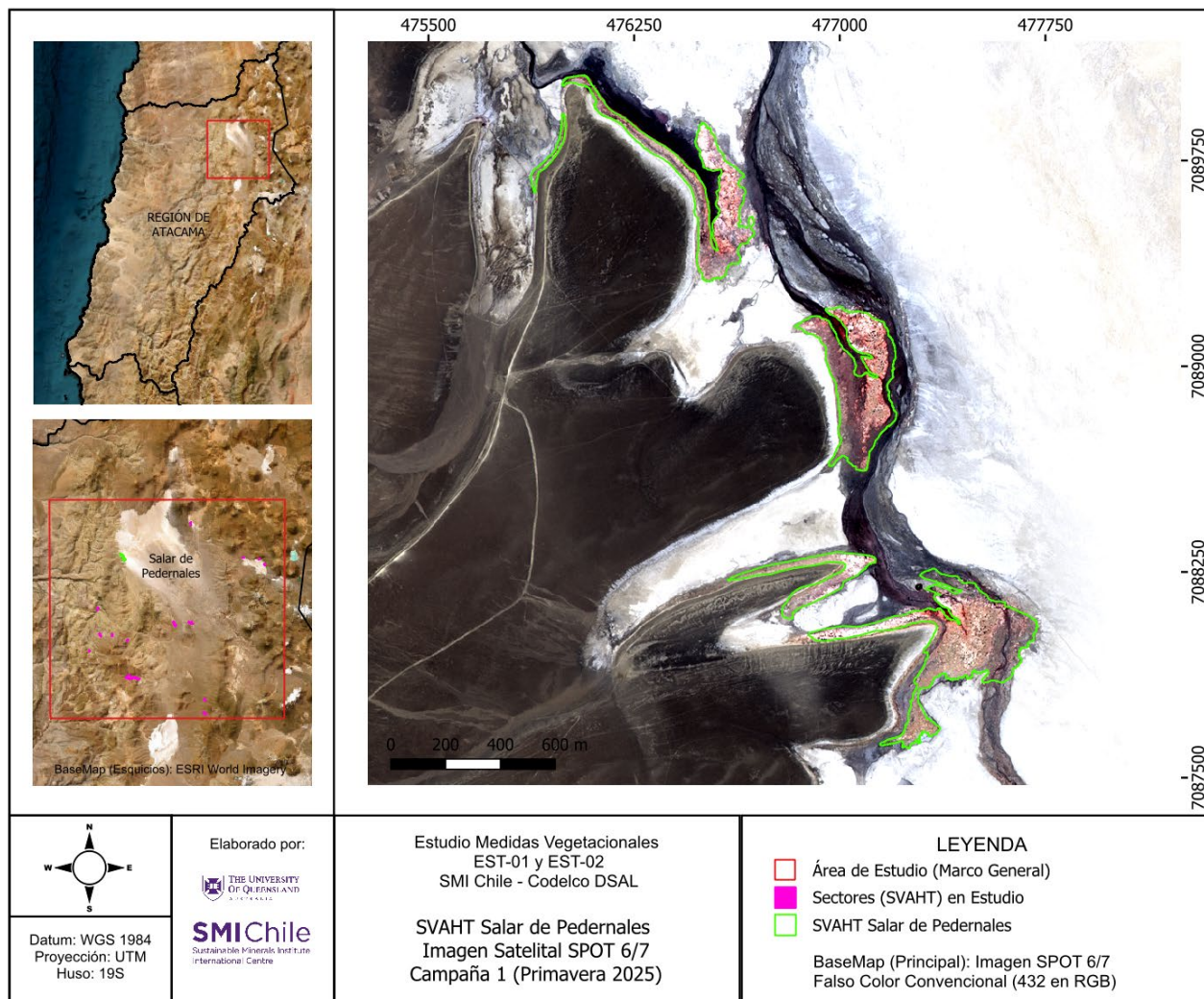


Figura 7. Composición de bandas espectrales “falso color convencional” elaborado a partir de imágenes satelitales SPOT 6/7 obtenidas para la Campaña Primavera 2025, para el SVAHT activo del Salar de Pedernales

5.1.2 Pre-procesamiento de las imágenes satelitales obtenidas

La Figura 8 muestra a modo de ejemplo los resultados de la corrección atmosférica efectuada para las imágenes SPOT 6/7 capturadas el día 08 de diciembre de 2025. Con este proceso se buscó reducir los efectos de la atmósfera que pueden alterar los valores registrados por el sensor, obteniendo una representación más precisa de la reflectancia de la superficie terrestre. De esta forma, se mejora la calidad y comparabilidad de la información espectral, siendo un paso fundamental dentro del flujo de trabajo con imágenes satelitales multispectrales.

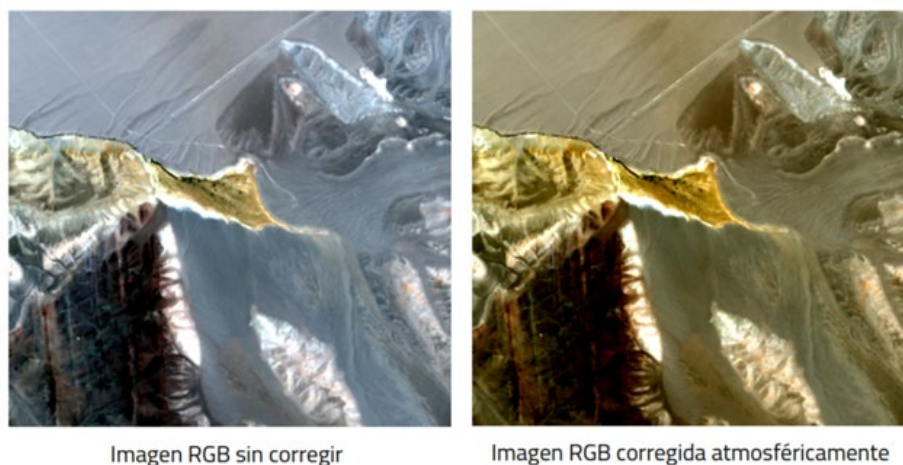


Figura 8. Contraste entre imagen sin corrección e imagen corregida (Fuente: Agrospace, 2026a)

Como resultado del proceso de *pansharpening*, empleado mediante el método IHS, se ha obtenido un mosaico final de imágenes satelitales multiespectrales con alta resolución espacial (1,5 m). La Figura 9 presenta, a modo de ejemplo, el efecto visual (calidad de la imagen en términos de resolución), resultante de la fusión pancromática para las imágenes SPOT 6/7 obtenidas.

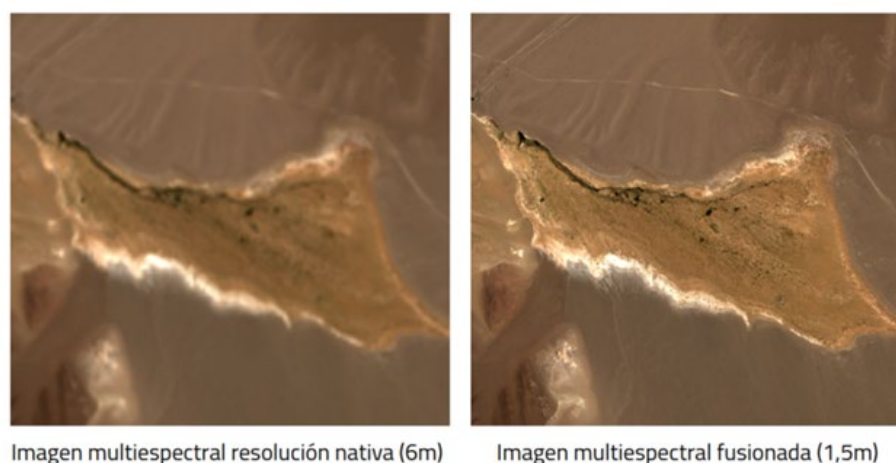


Figura 9. Comparación imagen original e imagen pan-sharpened (Fuente: Agrospace, 2026a)

5.1.3 Mediciones hiperespectrales *in situ*

La Figura 10 muestra la ubicación de las grillas de muestreo (ESU) de firmas espectrales realizadas en el marco de la campaña de primavera 2025. En cada ESU, se tomaron mediciones hiperespectrales las cuales fueron georreferenciadas mediante GNSS RTK, generándose una nube de puntos de muestreo. También en esta Figura 10, se presenta a modo de ejemplo, un acercamiento a la nube de puntos de muestreo en una de las ESU correspondientes al SVAHT activo del Salar de Pedernales. El detalle de las coordenadas de las nubes de puntos para cada ESU se encuentra en Anexo 1.

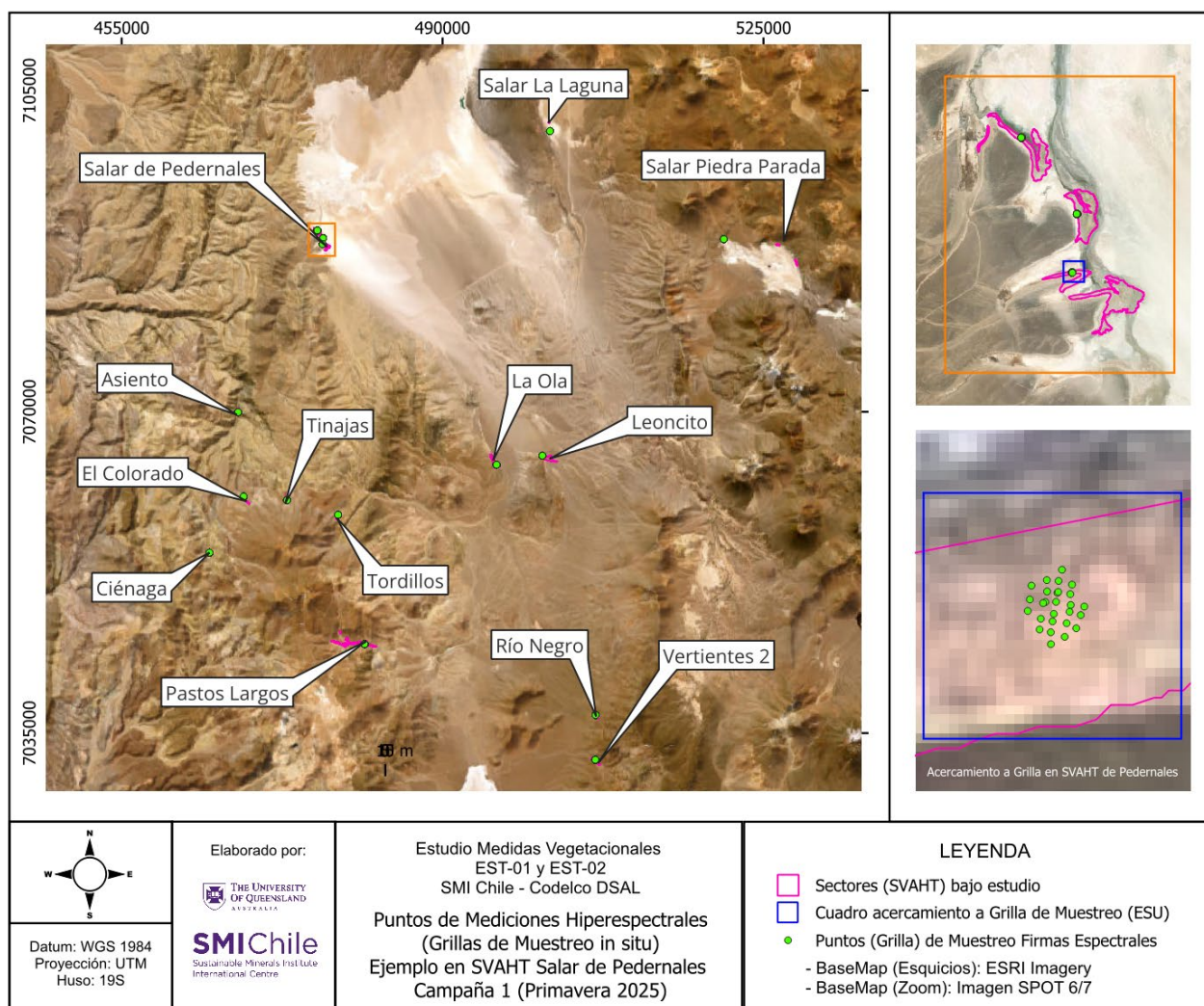


Figura 10. Ubicación de puntos (grillas) de muestreo de firmas espectrales in situ. Ejemplo nube de puntos de muestreo de firmas espectrales in situ en SVAHT activo del Salar de Pedernales.

Las mediciones hiperespectrales en los distintos sitios presentan respuestas espectrales similares a lo largo del espectro visible–infrarrojo cercano (350–850 nm), caracterizado por un aumento progresivo de la reflectancia hacia el infrarrojo cercano (NIR). Las superficies con presencia continua de vegetación, como Pastos Largos, Río Negro y Asiento, muestran los valores más bajos de reflectancia en el rango del espectro visible (350–700 nm) y un aumento pronunciado en el NIR (700–850 nm) (Figura 11), donde se alcanzan los valores más altos del conjunto de mediciones. Este comportamiento espectral es consistente con la presencia de una cobertura vegetal verde y relativamente homogénea (Agrospac, 2026b). En contraste, sitios con condiciones superficiales mixtas tales como Leoncito, La Ola y Tordillos, presentan una respuesta espectral que refleja el efecto del promedio de distintas coberturas dentro de cada ESU, incluyendo parches de vegetación, áreas de suelo desnudo y/o presencia de sales (Figura 12). Esta heterogeneidad genera firmas espectrales suavizadas en comparación con aquellas asociadas a sitios con coberturas más homogéneas, y se manifiesta además en una mayor variabilidad espectral dentro de las ESU

(Agrospace, 2026b). Finalmente, sitios dominados por suelo desnudo o costras salinas, como el Salar de Pedernales y Salar La Laguna (Figura 13), muestran firmas espectrales homogéneas, con reflectancias bajas a moderadas sin un incremento significativo en el NIR, en contraste con los sitios dominados por vegetación (Agrospace, 2026b).

En resumen, las mediciones efectuadas muestran que las firmas espectrales reflejan de manera consistente las condiciones dominantes de cada sitio, permitiendo distinguir tres patrones principales asociados a superficies dominadas por vegetación, superficies con condiciones mixtas, y superficies dominadas por suelo desnudo o costras salinas. Como una manera de ejemplificar estos tres patrones o condiciones de superficie identificadas tanto a través del análisis de las mediciones hiperespectrales como mediante la experiencia de campo, la Figura 15 presenta una composición y comparación de firmas espectrales obtenidas in situ junto con una fotografía correspondiente a tres sitios de muestreo (ESU) representativos de estos patrones, lo cual posibilita comprender de mejor manera la respuesta espectral obtenida en estos SVAHT. Composiciones de firmas y fotografías de los ESU para todos los SVAHT, se presentan en el Anexo 2.

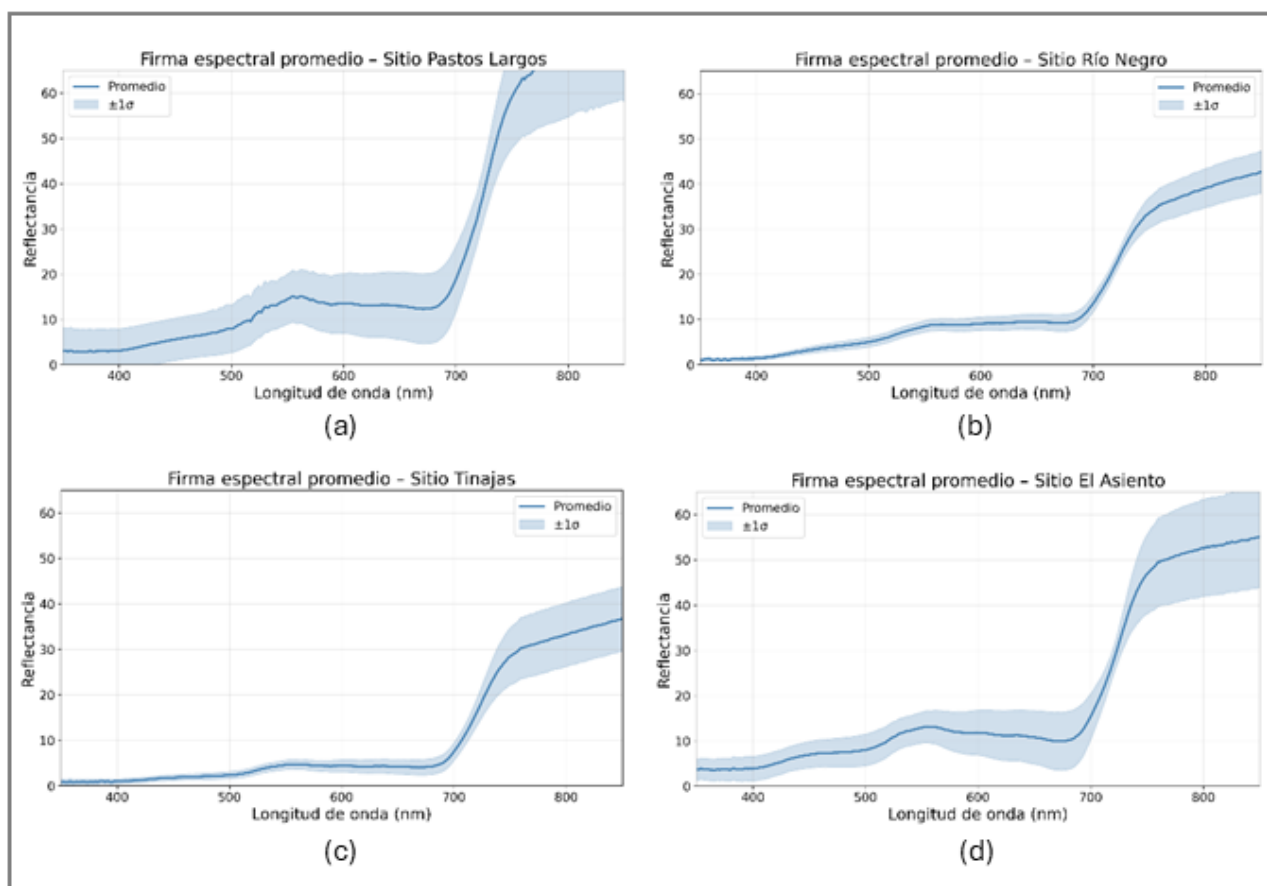


Figura 11. Reflectancia promedio y su desviación estándar en los sitios (ESU) de medición establecidos en los SVAHT: (a) Pastos Largos, (b) Río Negro, (c) Tinajas, (d) Asiento. Fuente: Elaborado en base a Agrospace (2026b)

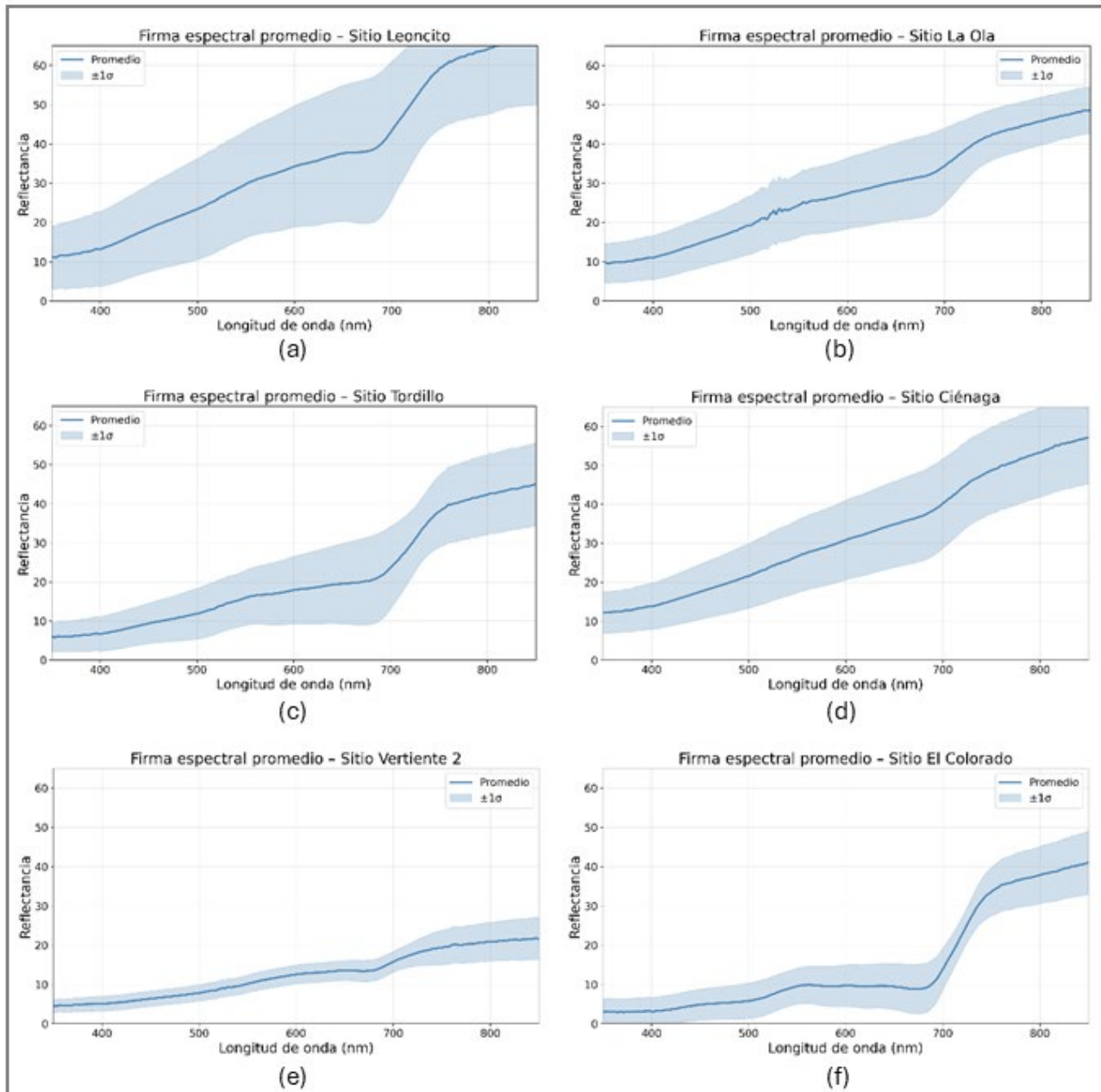


Figura 12. Reflectancia promedio y su desviación estándar en los sitios (ESU) de medición establecidos en los SVAHT: (a) Leoncito, (b) La Ola (c) Tordillos, (d) Ciénaga, (e) Vertiente 2, (f) El Colorado. Fuente: Elaborado en base a Agrospace (2026b)

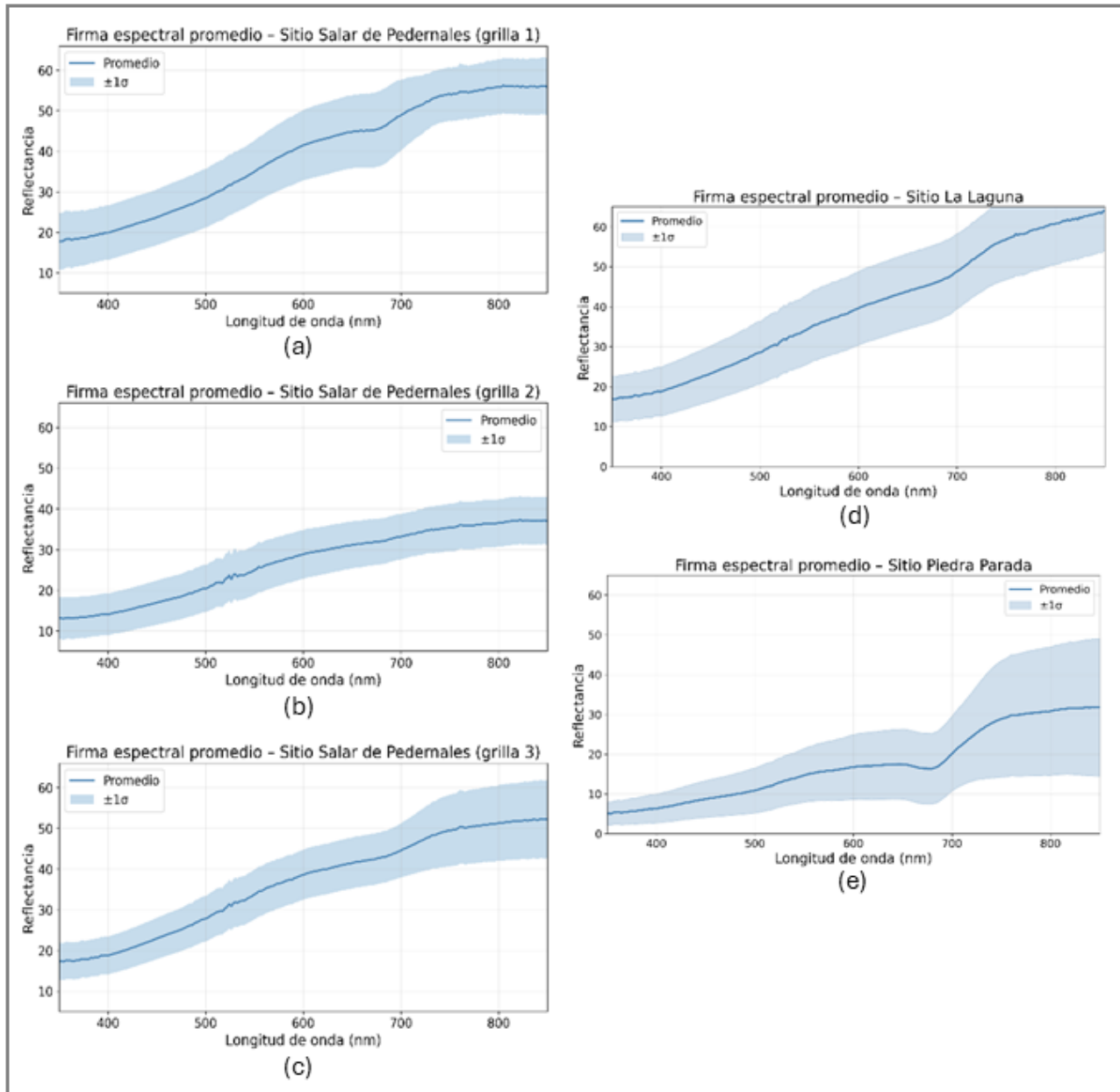


Figura 13. Reflectancia promedio y su desviación estándar en los sitios (ESU) de medición establecidos en los SVAHT: (a) Salar de Pedernales 1, (b) Salar de Pedernales 2, (b) Salar de Pedernales 3, (d) Salar La Laguna, (e) Salar Piedra Parada. Fuente: Elaborado en base a Agrospace (2026b)

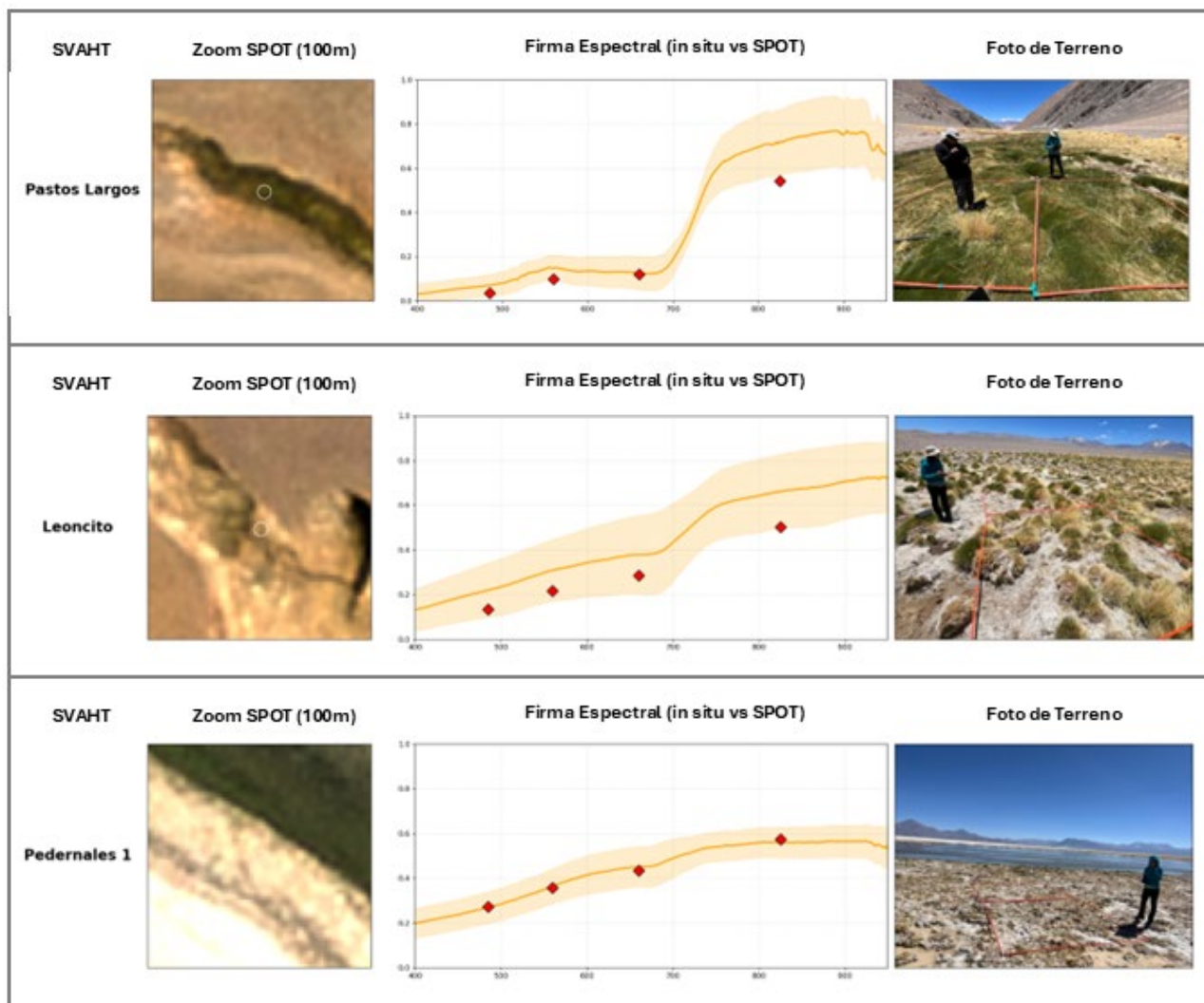


Figura 14. Detalle de firma espectral y fotografía representativa en sitio de muestreo (ESU) correspondiente a SVAHT de Pedernales 1. Línea naranja continua: Reflectancia Promedio. Puntos rojos: Valores promedio de pixeles de imagen satelital SPOT correspondiente a ubicación geográfica de ESU

La existencia de cuerpos (espejos) de agua superficiales en el área de estudio, en particular aquellos aledaños o cercanos a sectores delimitados como SVAHT de salares tales como los SVAHT de Salar Piedra Parada y Salar La Laguna, constituyen también un tipo de cobertura o condición de superficie terrestre relevante a considerar para efectos de identificación, delimitación y monitoreo de los ecosistemas SVAHT. Al respecto, es preciso señalar que la adquisición de muestras o mediciones hiperespectrales *in situ* en este tipo de condiciones no se justifica plenamente debido a que corresponden a entornos ópticamente complejos, producto entre otras posibilidades de la escasa profundidad de las aguas, donde la reflectancia del fondo y de la propia columna de agua se solapan generando con ello una señal mezclada que contribuye incertidumbre en los datos medidos para efectos de calibración y validación. En términos físicos, esto se debe a que el agua presenta una alta anisotropía lo cual se traduce en una mezcla de superficies que determinan finalmente un comportamiento especular de la reflectividad, cuestión que puede generar

efectos de brillo solar (*glint*) según haya sido el ángulo de adquisición o toma (captura) de la imagen por parte del sensor en la plataforma satelital. De todas maneras, esta complejidad para efectos de muestreo no representa mayores problemas para efectos de delimitación de cuerpos, espejos o superficies de agua en este tipo de entornos o ambientes, dado que se han desarrollado diversas medidas y/o técnicas de percepción remota satelital que permiten llevarlo a cabo a partir de imágenes debidamente corregidas (pre-procesadas).

Los resultados obtenidos con el proceso de medición hiperespectral *in situ* demuestran el potencial de las firmas espectrales como herramienta para la caracterización y diferenciación de coberturas altoandinas, y entregan una base sólida para su integración en estudios de monitoreo ambiental y análisis remoto de ecosistemas sensibles en ambientes de alta montaña (Agrospace, 2026b).

5.1.4 Calibración y validación de imágenes obtenidas

La comparación entre las firmas hiperespectrales medidas en terreno y las reflectancias provenientes de SPOT muestra patrones claros y coherentes con las condiciones superficiales observadas durante la campaña. En la Figura 15 se aprecia que los sitios dominados por vegetación continua, como Pastos Largos, Río Negro, Tinajas, El Asiento, presentan curvas bien definidas con un incremento pronunciado en el NIR, acompañado de desviaciones estándar estrechas. Esta homogeneidad espectral se refleja luego en la validación satelital. En la Figura 16, estos sitios se agrupan cercanos a la línea 1:1 en las bandas visibles y con una dispersión reducida, manteniendo valores de R^2 superiores a 0,83 en Blue, Green y Red, con RMSE entre 0,057 y 0,072. Estos umbrales se encuentran dentro de los rangos de error aceptables por el CEOS CAL/VAL (Agrospace, 2026c). En contraste, sitios catalogados en la medición *in situ* como heterogéneos o mixtos, como por ejemplo Leoncito, La Ola, Tordillos y Ciénaga, muestran en la Figura 15 espectros más suavizados, con ausencia de un salto marcado hacia el NIR y con bandas de desviación estándar considerablemente más amplias. Esto responde a la mezcla de parches de vegetación, suelo desnudo, zonas húmedas y costras salinas descritas en la campaña, lo que genera variación espacial significativa, incluso dentro de un área pequeña. Esa heterogeneidad se traslada directamente al desempeño de la validación. En la Figura 16, estos sitios exhiben barras de error extensas y una mayor separación respecto a la línea 1:1, especialmente en la banda NIR, donde el coeficiente de determinación baja a 0,54 y el RMSE aumenta a 0,114 (Agrospace, 2026c). La explicación física de esta diferencia radica en la sensibilidad del NIR a la estructura vegetal y a la continuidad del dosel. En los sitios homogéneos, la vegetación verde y relativamente densa proporciona una señal fuerte y estable; en cambio, en los sitios mixtos la señal NIR se ve modulada por la proporción de vegetación y suelo expuesto, que cambia abruptamente entre puntos de la misma cuadrícula. Esto significa que un único valor satelital integrando vegetación, suelo y sales no siempre coincide con el promedio espectral medido en terreno, lo que se observa como puntos desviados en los gráficos de validación (Agrospace, 2026c). En sectores dominados por suelos minerales o costras salinas, como partes del Salar de Pedernales y Salar La Laguna se registran curvas espectrales planas y de baja reflectancia (Figura 15), sin el incremento característico en el NIR. Esta baja señal amplifica el impacto relativo de cualquier discrepancia entre mediciones, lo que explica por qué algunos puntos presentan desviaciones que exceden la variabilidad observada en terreno. Del mismo modo, en sitios como Leoncito o Salar Piedra Parada, donde se documentaron transiciones abruptas entre vegetación húmeda, parches secos y áreas de suelo claro, los puntos en la Figura 16 muestran dispersión y barras horizontales más extensas, reflejando la variabilidad registrada en las firmas *in situ*.

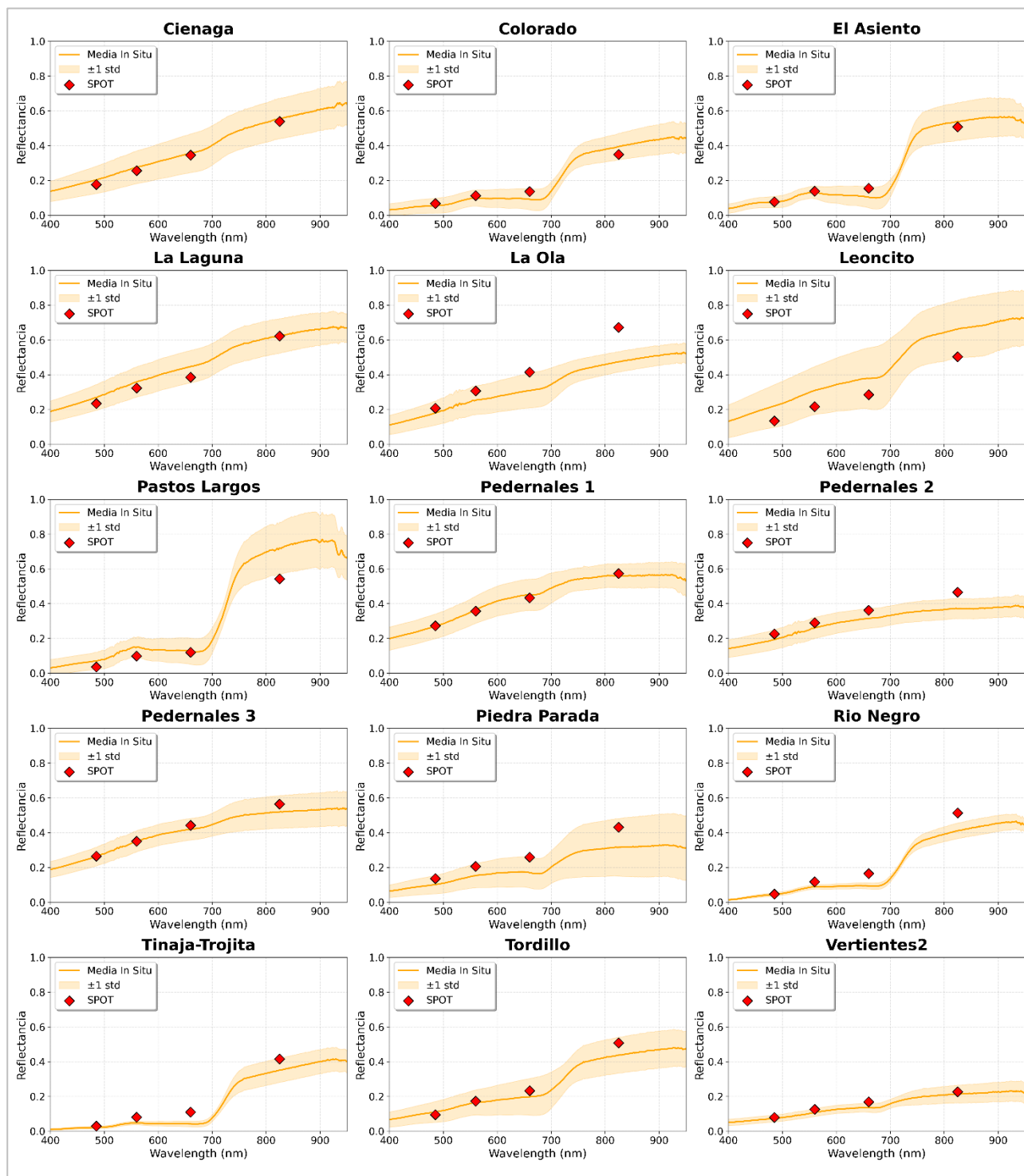


Figura 15. Valores de reflectancia hiperespectral promedio para cada sitio y su desviación estándar. Los puntos rojos corresponden al valor promedio de la reflectividad para cada longitud de onda de la imagen SPOT 6/7 del 08 de diciembre del 2025 para cada sitio. Fuente: Agrospace (2026c)

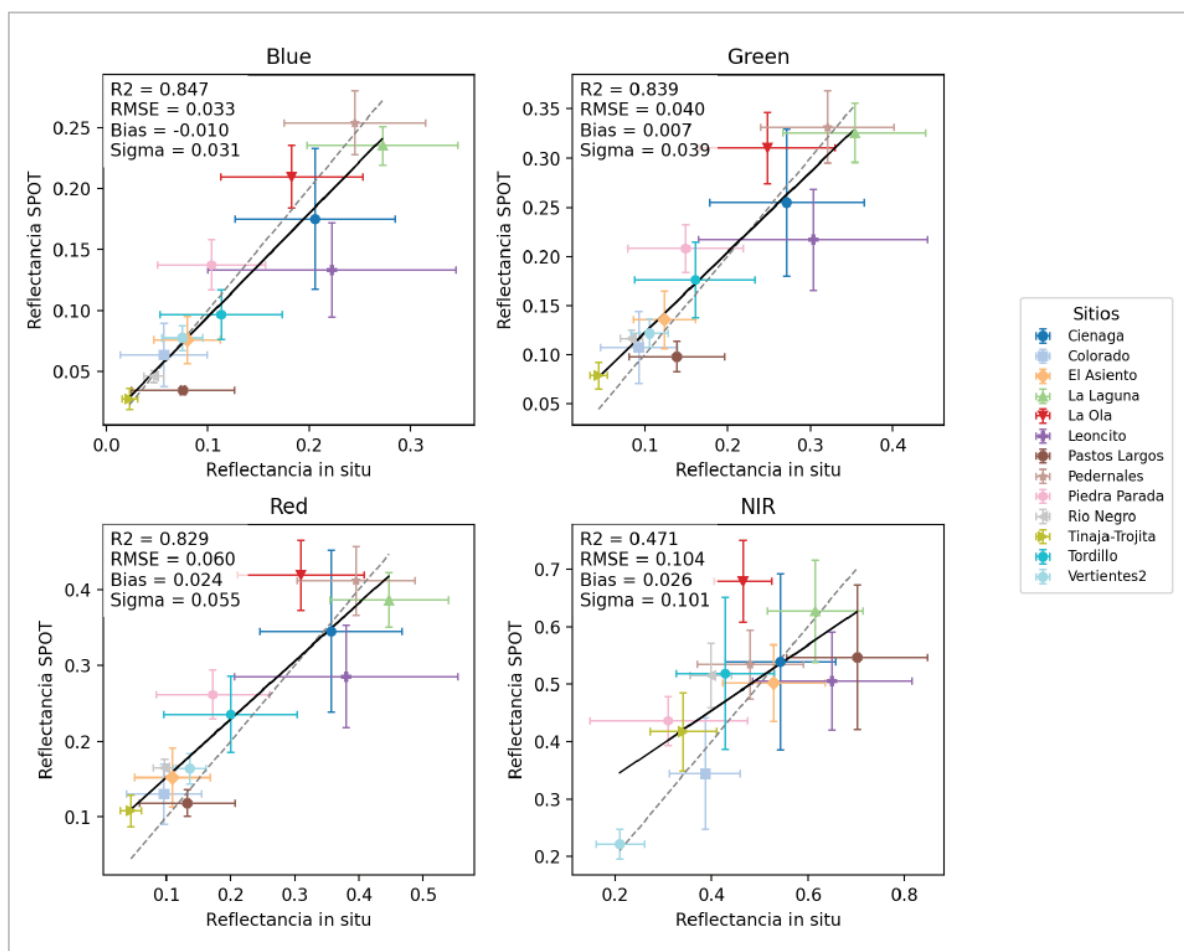


Figura 16. Validación de productos satelitales SPOT vs medidas hiperespectrales *in situ* para cada banda y sitio medido. Línea negra: relación lineal entre las mediciones *in situ* e imágenes satelitales. Línea ploma punteada: relación 1:1 teórica entre medición *in situ* e imagen satelital. Fuente: Agrospace (2026c)

En consideración de los análisis antes descritos, resulta especialmente relevante el desempeño del modelo generalizado (Figura 17), el cual integra simultáneamente todos los sitios y bandas espectrales. A pesar de incluir superficies altamente heterogéneas y condiciones espectrales contrastantes, el modelo mantiene una relación robusta entre reflectancia satelital y mediciones *in situ*, con un coeficiente de determinación global de $R^2 = 0,864$, un RMSE de 0,065 y un sesgo reducido (Bias = 0,012); valores que se encuentran bajo umbrales de error considerados aceptables según CEOS (Wang et al, 2018) y estudios que aplican métricas similares (Sánchez-Zapero et al, 2023). Estos resultados indican que el modelo es capaz de capturar de manera consistente la señal dominante del sistema superficie-atmósfera, amortiguando el efecto de la variabilidad sub-píxel y de la mezcla espectral presente en los sitios más complejos. En términos prácticos, esto demuestra que el enfoque adoptado no solo es válido en condiciones ideales u homogéneas, sino que presenta capacidad de generalización y estabilidad frente a escenarios reales de alta complejidad superficial, lo que refuerza su aplicabilidad operativa para análisis regionales y productos de monitoreo satelital (Agrospace, 2026c).

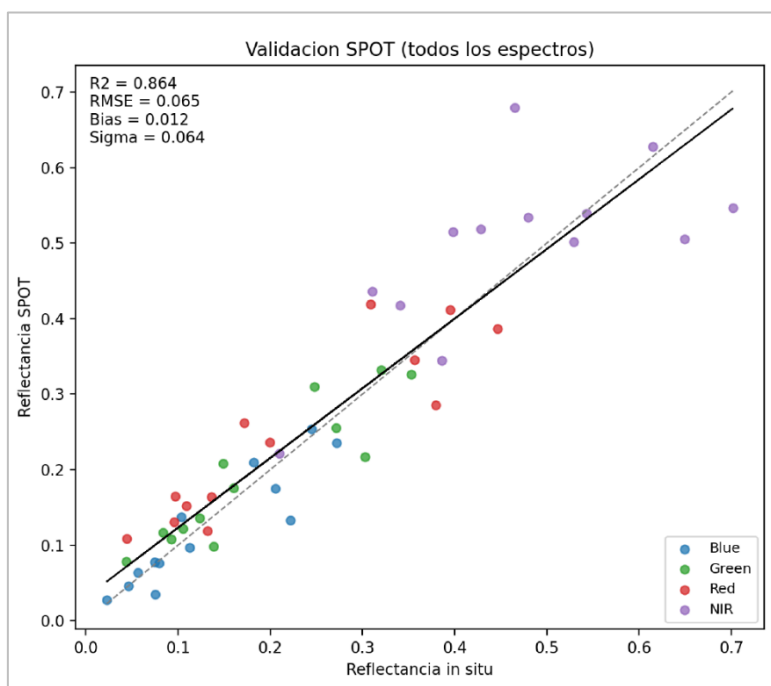


Figura 17. Validación generalizada de productos satelitales SPOT. Línea negra: relación lineal entre las mediciones in situ e imágenes satelitales. Línea ploma punteada: relación 1:1 teórica entre medición in situ e imagen satelital. Fuente: Agrospace (2026c)

Los resultados obtenidos indican que SPOT reproduce adecuadamente la reflectancia de superficies homogéneas, especialmente en las bandas visibles donde la respuesta espectral es menos sensible a la estructura del dosel. Las discrepancias más grandes se concentran en la banda NIR y corresponden directamente a sitios donde las firmas espectrales presentan mayor variabilidad interna. Esto confirma que las diferencias observadas en la validación responden a la naturaleza heterogénea de los sitios y no a un error sistemático del sensor ni del proceso de convolución espectral. En conclusión, los resultados en conjunto confirman que SPOT ofrece reflectancias estables y confiables para el monitoreo de ecosistemas altoandinos ($RMSE < 0,065$) con un desempeño particularmente robusto en el rango visible y una dispersión en NIR coherente con la complejidad biofísica de los sitios evaluados (Agrospace, 2026c).

A modo de resumen, se puede señalar que los resultados muestran una alta coherencia en las bandas visibles (*Blue*, *Green* y *Red*), con buena correspondencia entre la señal satelital y la medida *in situ*, lo que evidencia la estabilidad del procesamiento radiométrico y la capacidad del sensor para reproducir adecuadamente superficies homogéneas dominadas por vegetación continua. La mayor dispersión se observó en la banda NIR, donde las diferencias entre terreno y satélite se explican por la heterogeneidad espacial de ciertos sitios, caracterizados por mezclas de vegetación discontinua, suelo desnudo y costras salinas. Estas variaciones son inherentes a las condiciones biofísicas locales y no reflejan un sesgo sistemático del sensor. En conjunto, los resultados validan el uso de SPOT como una fuente confiable de reflectancia en estudios ecológicos y de monitoreo ambiental en zonas altoandinas, destacando su robustez en el visible y la necesidad de considerar la variabilidad superficial al interpretar la señal NIR en áreas mixtas (Agrospace, 2026c).

5.2 Etapa 2

5.2.1 Inspección visual (fotointerpretación) de SVAHT

Las Figura 18 a Figura 30 contienen cartografías de imágenes satelitales resultado de la combinación de bandas “falso color convencional” elaboradas para cada polígono de SVAHT en específico. Estas figuras permiten identificar y/o discriminar claramente los sectores que presentan vegetación (sectores con colores y tonos rojizos) al interior de los polígonos de los diferentes SVAHT.

5.2.1.1 Cartografías de falso color convencional para SVAHT de Salares

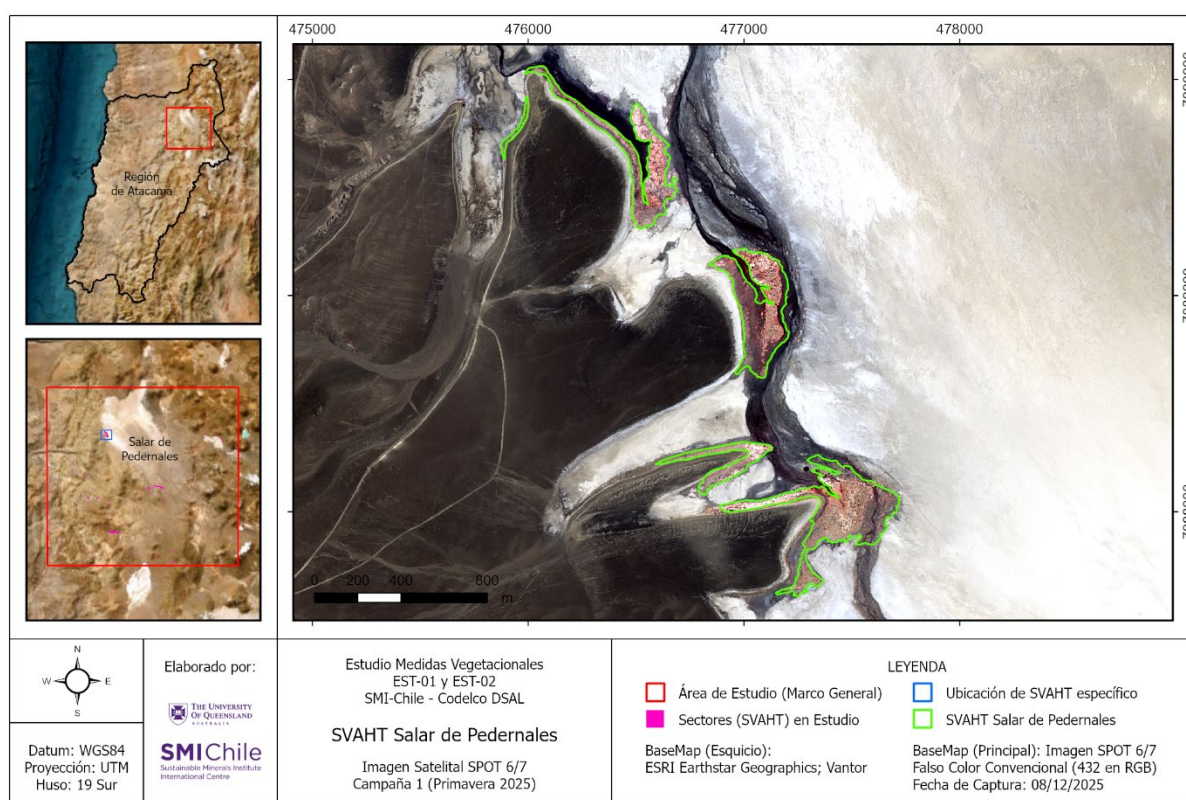


Figura 18. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Salar de Pedernales

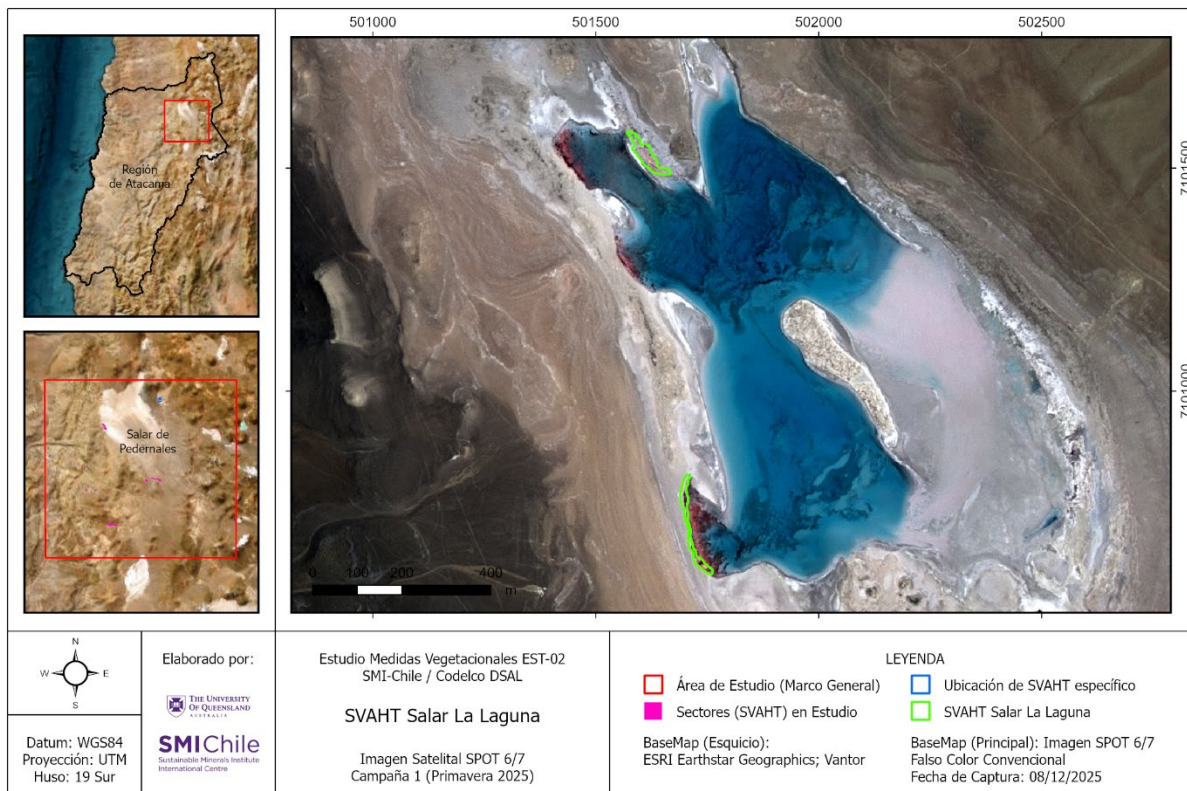


Figura 19. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Salar La Laguna

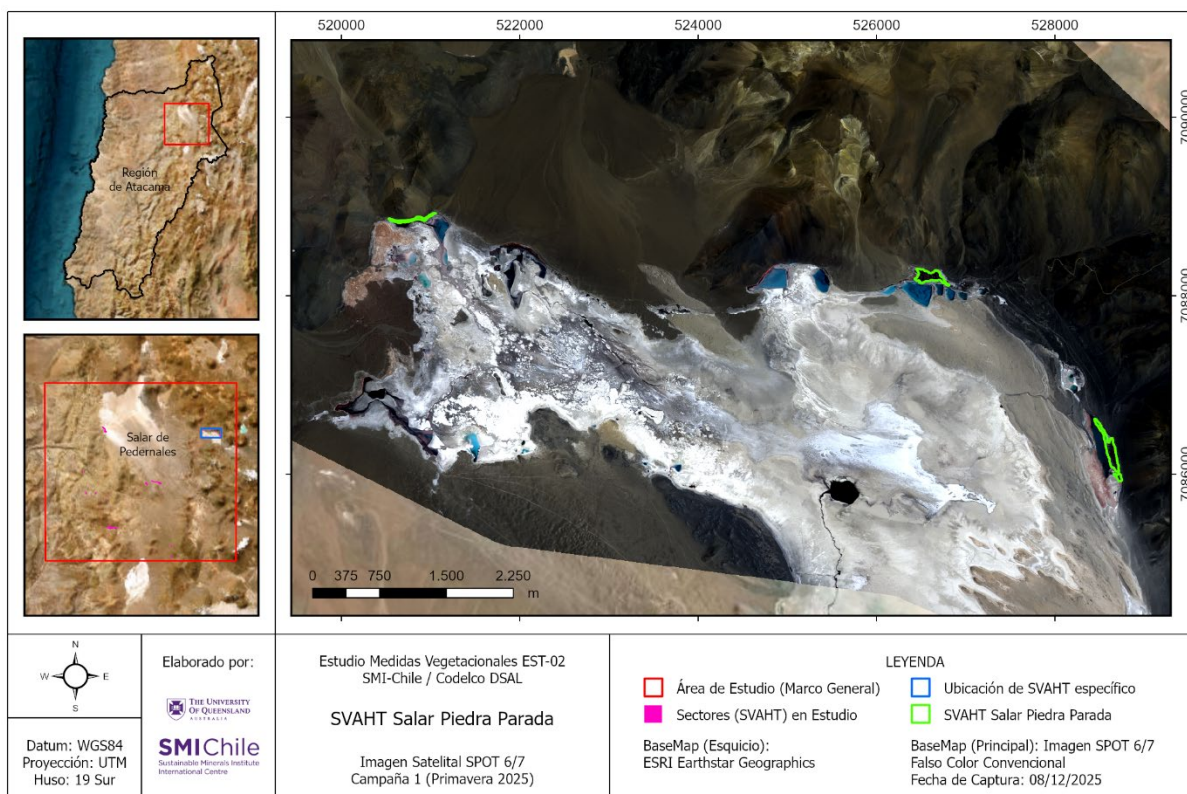


Figura 20. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Salar Piedra Parada

5.2.1.2 Cartografías de falso color convencional para SVAHT de Quebradas

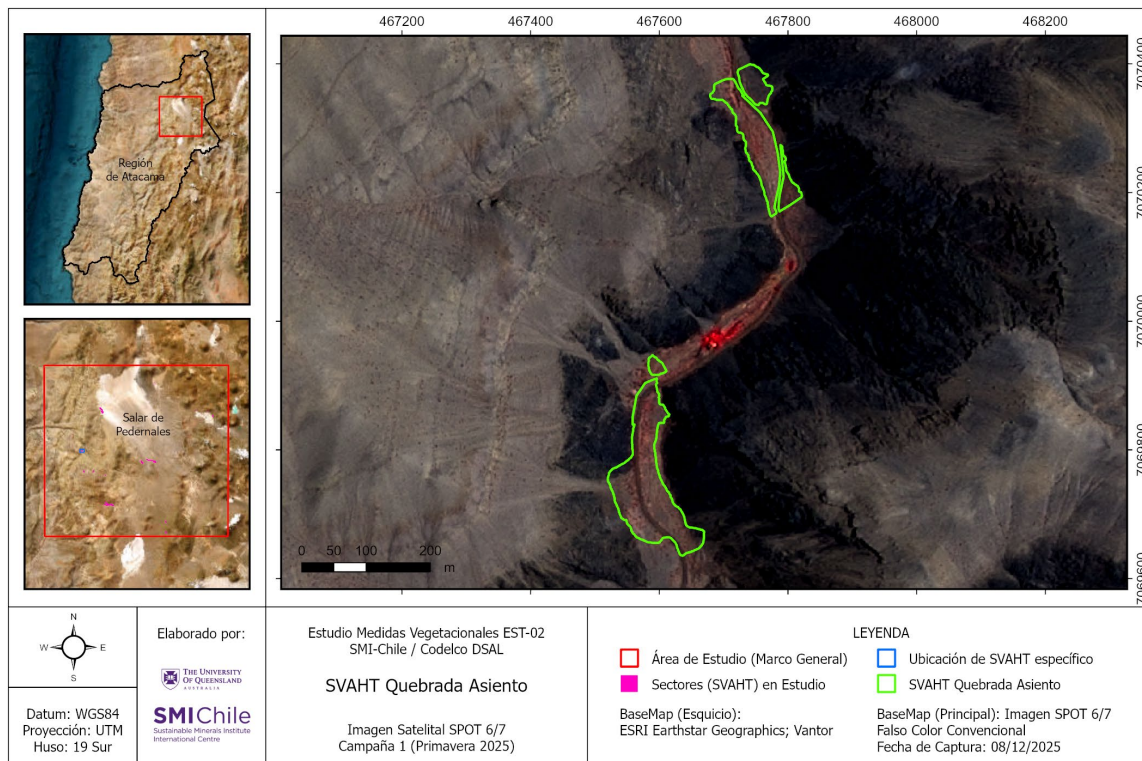


Figura 21. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Quebrada Asiento

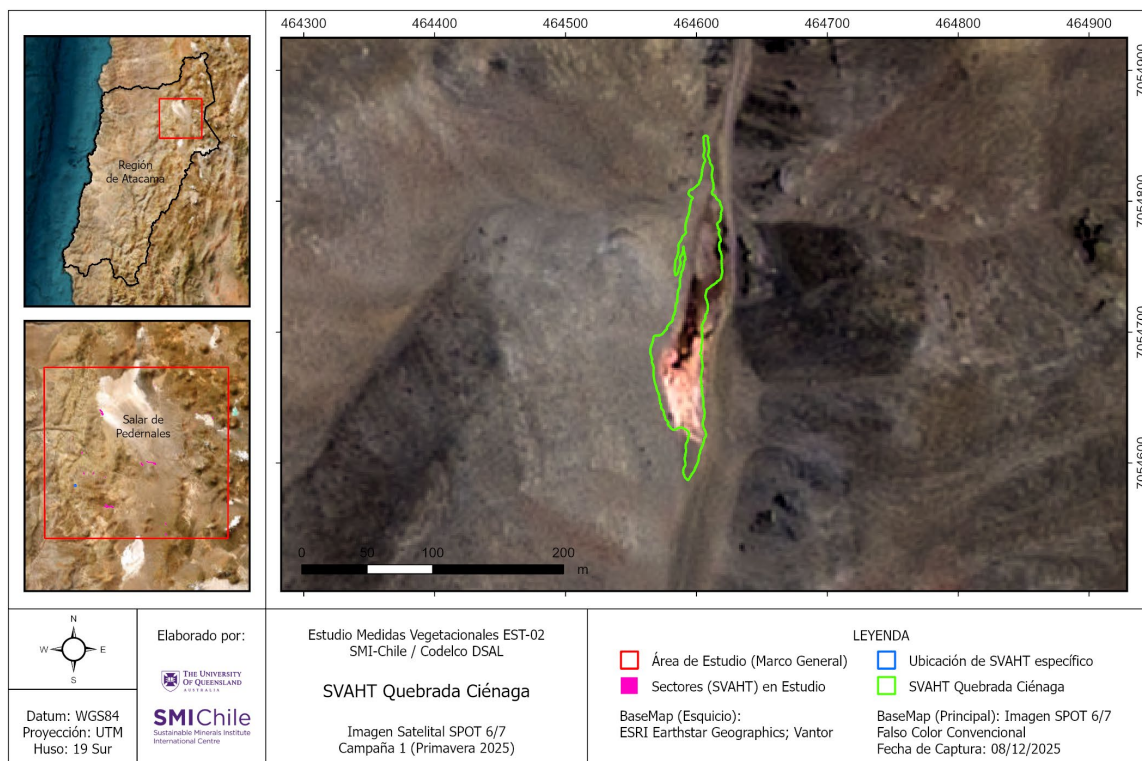


Figura 22. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Quebrada Ciénaga



Figura 23. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Quebrada Colorado



Figura 24. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Cabecera sur rio La Ola

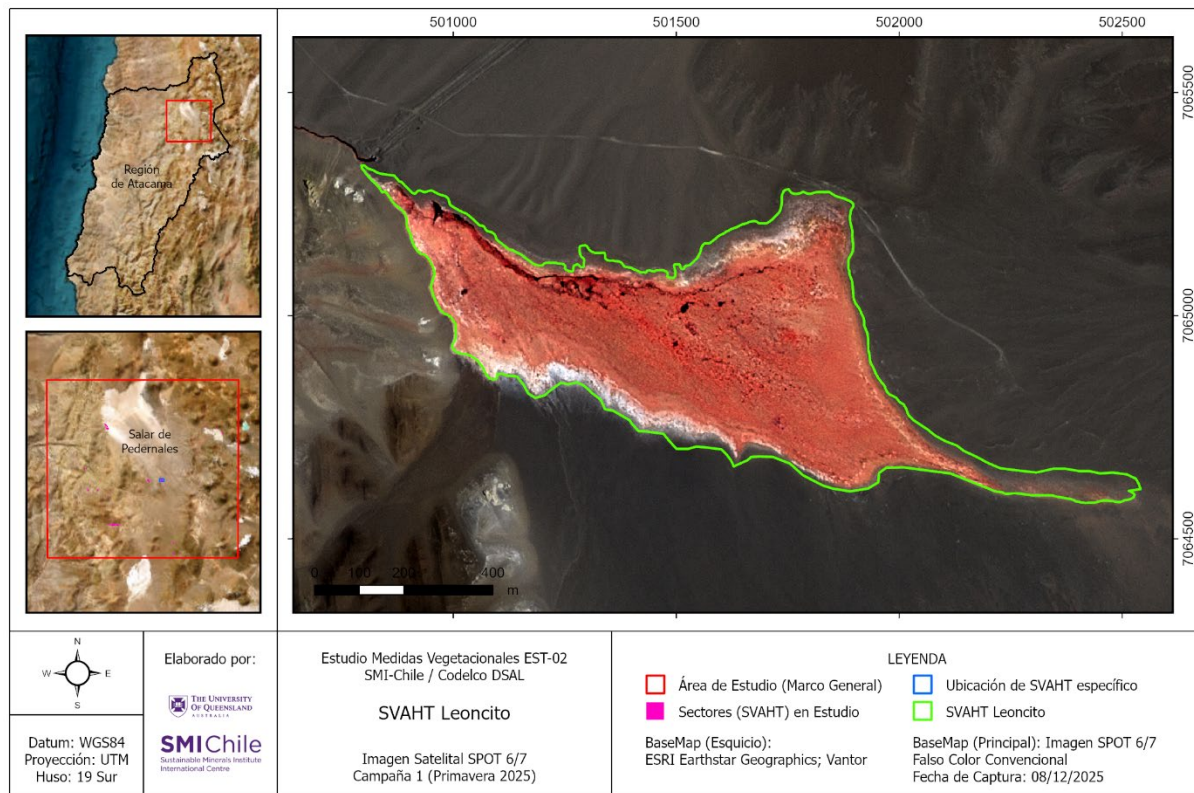


Figura 25. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Quebrada Leoncito

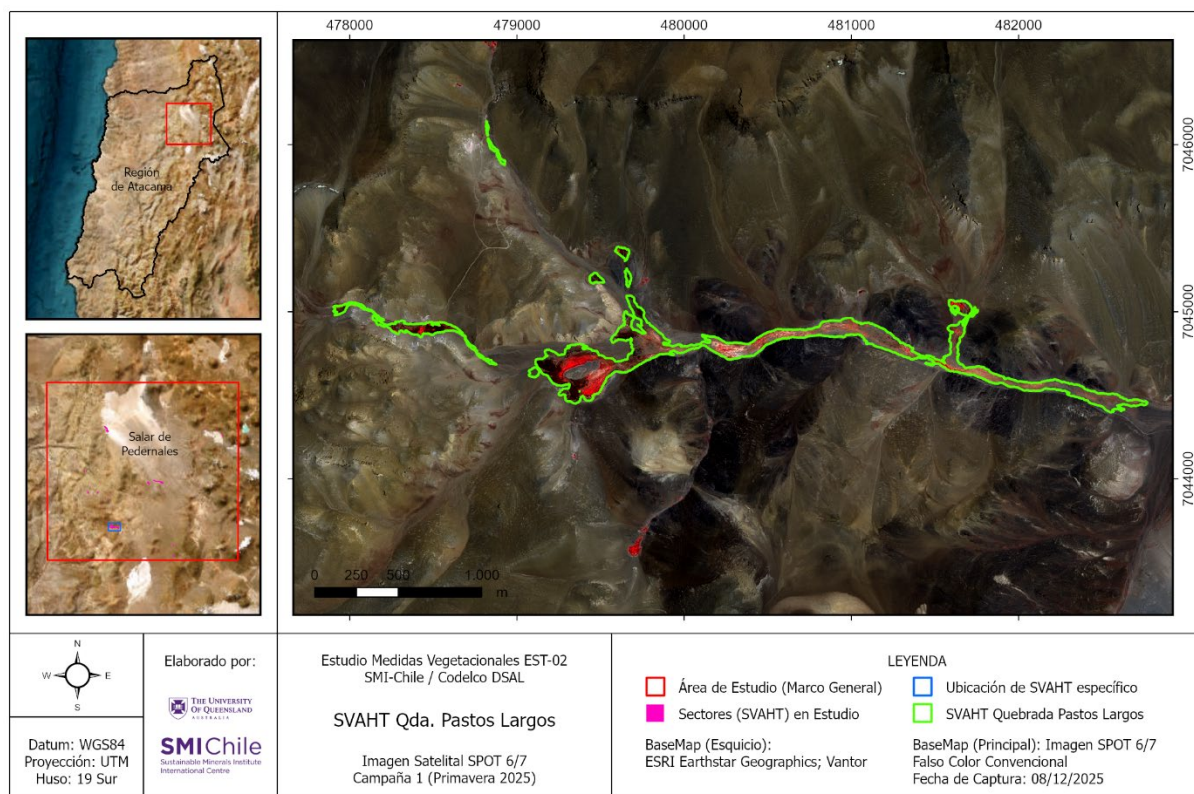


Figura 26. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Quebrada Pastos Largos

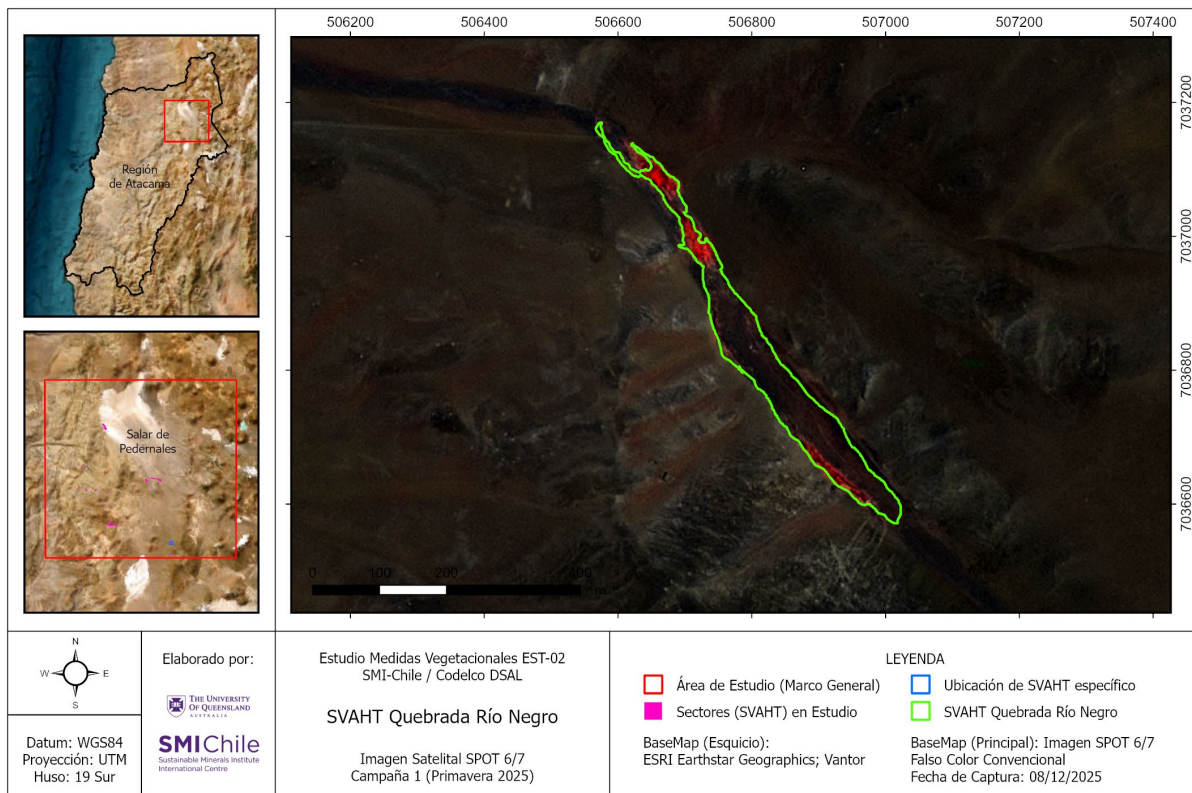


Figura 27. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Quebrada Río Negro

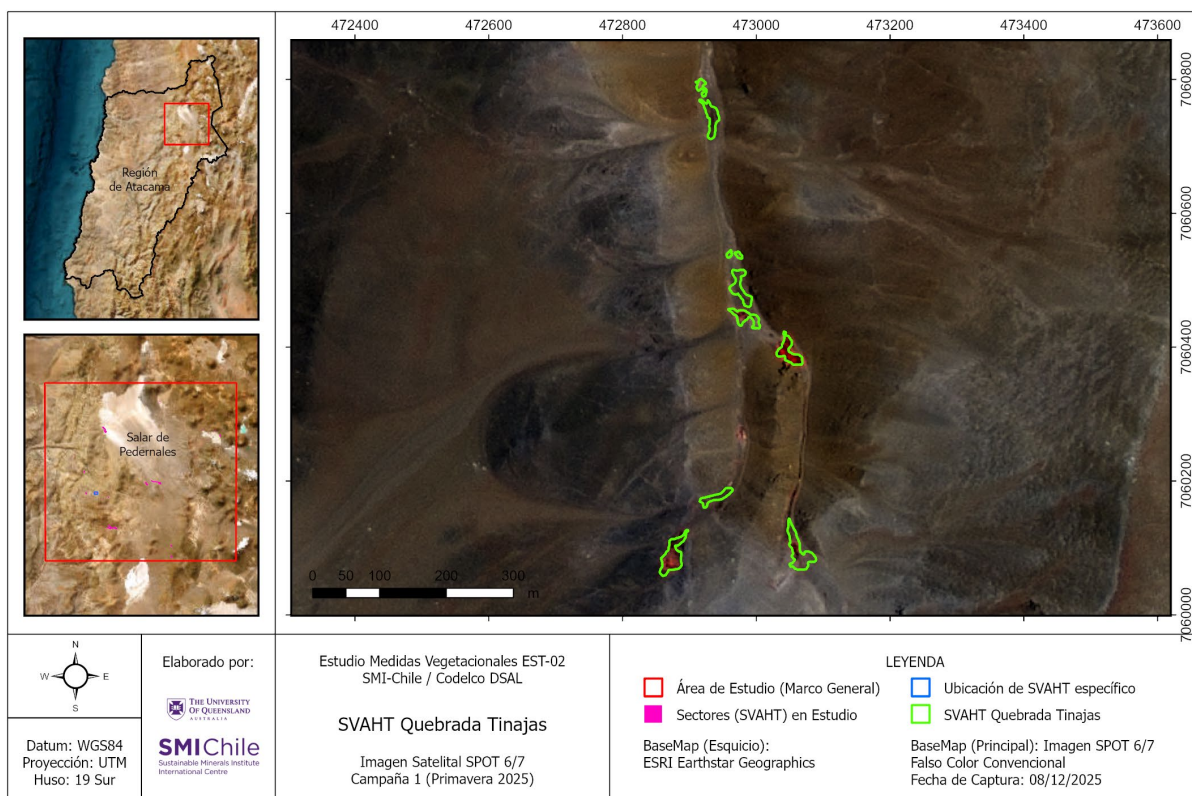


Figura 28. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Quebrada Tinajas

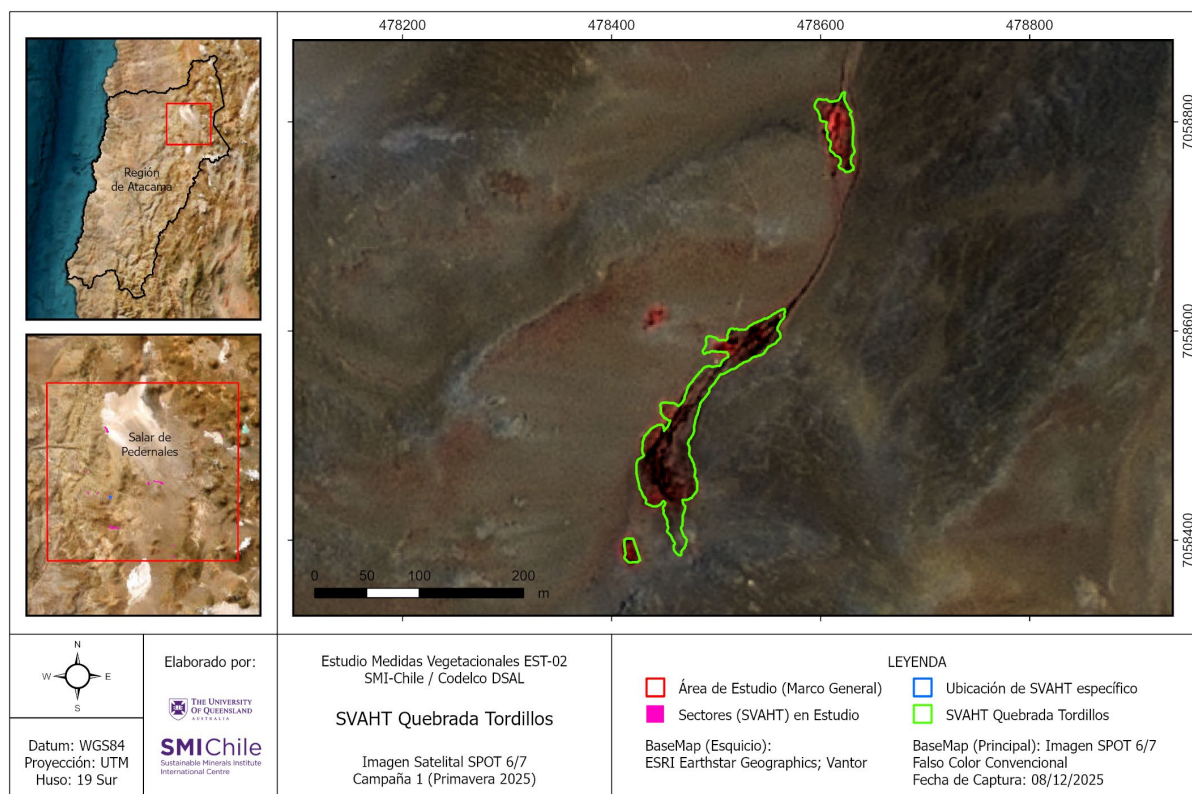


Figura 29. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Quebrada Tordillos

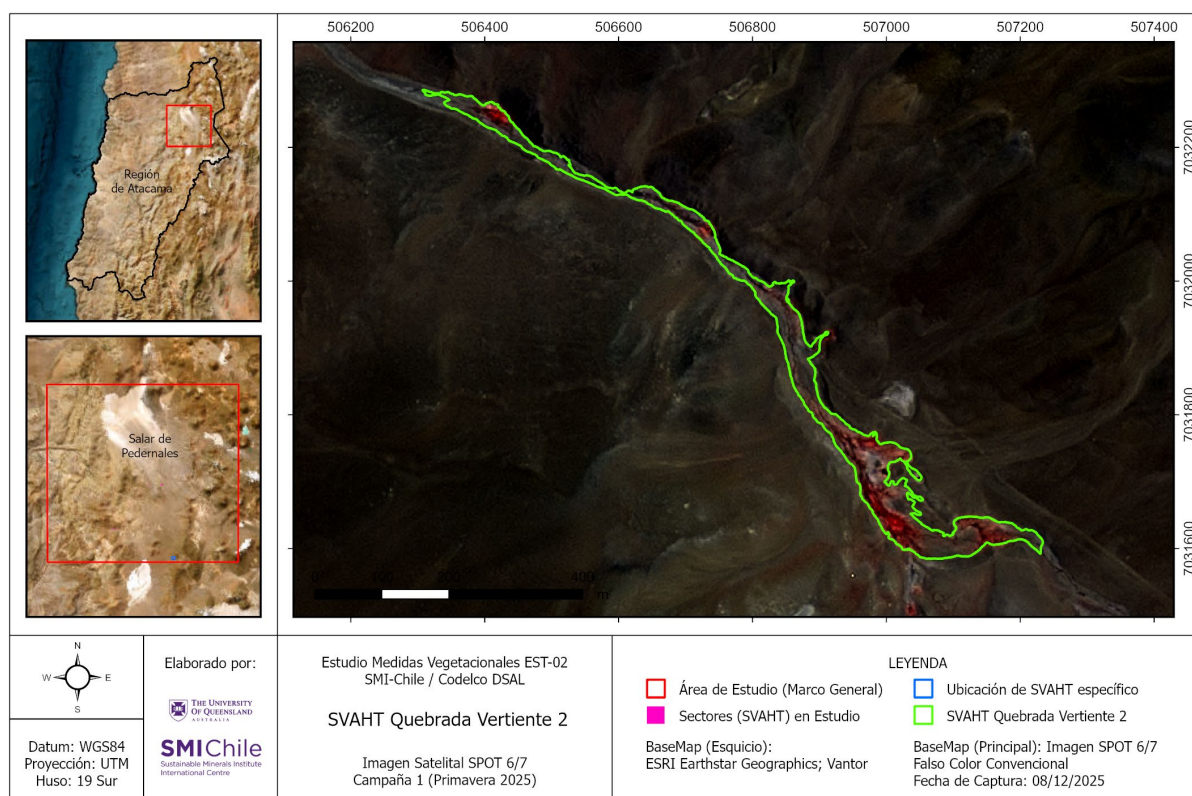


Figura 30. Combinación de bandas falso color convencional, SVAHT Quebrada Vertiente 2

5.2.2 Cálculo de índices espectrales NDVI y NDWI, para cada SVAHT

Las figuras Figura 31 a Figura 62 contienen los resultados del cálculo de los índices NDVI y NDWI para todos los SVAHT bajo estudio. Estas figuras corresponden a cartografías elaboradas para cada polígono de SVAHT en específico, para efectos de visualizar la variabilidad espacial que presentan los valores lo cual da cuenta de la alta heterogeneidad en términos de vigorosidad vegetal (según NDVI) y en cuanto a la presencia de cuerpos (espejos) de agua y/o zonas con agua-humedad superficial (según NDWI).

En general, analizando las imágenes del índice NDVI es posible señalar la alta concordancia entre los límites de polígonos de SVAHT y la presencia de vegetación (mayores valores de NDVI) en los distintos sectores estudiados; a excepción del polígono SL2 (SVAHT Salar La Laguna) y el SVAHT de Quebrada Ciénaga, el cual se presenta levemente desplazado con respecto a lo observable en el índice NDVI.

Por su parte, analizando las imágenes del índice NDWI es posible advertir la existencia de sectores con cuerpos de agua superficiales (valor de NDWI sobre cero) aledaños solamente a los polígonos de SVAHT de los salares La Laguna y Piedra Parada. En cuanto de los SVAHT de Quebradas, se obtienen valores de NDWI bajo cero, lo cual es indicador de terrenos áridos o secos en la superficie terrestre, sin presencia de cuerpos de agua superficiales evidentes.

5.2.2.1 Cartografías de índices NDVI y NDWI para SVAHT de Salares

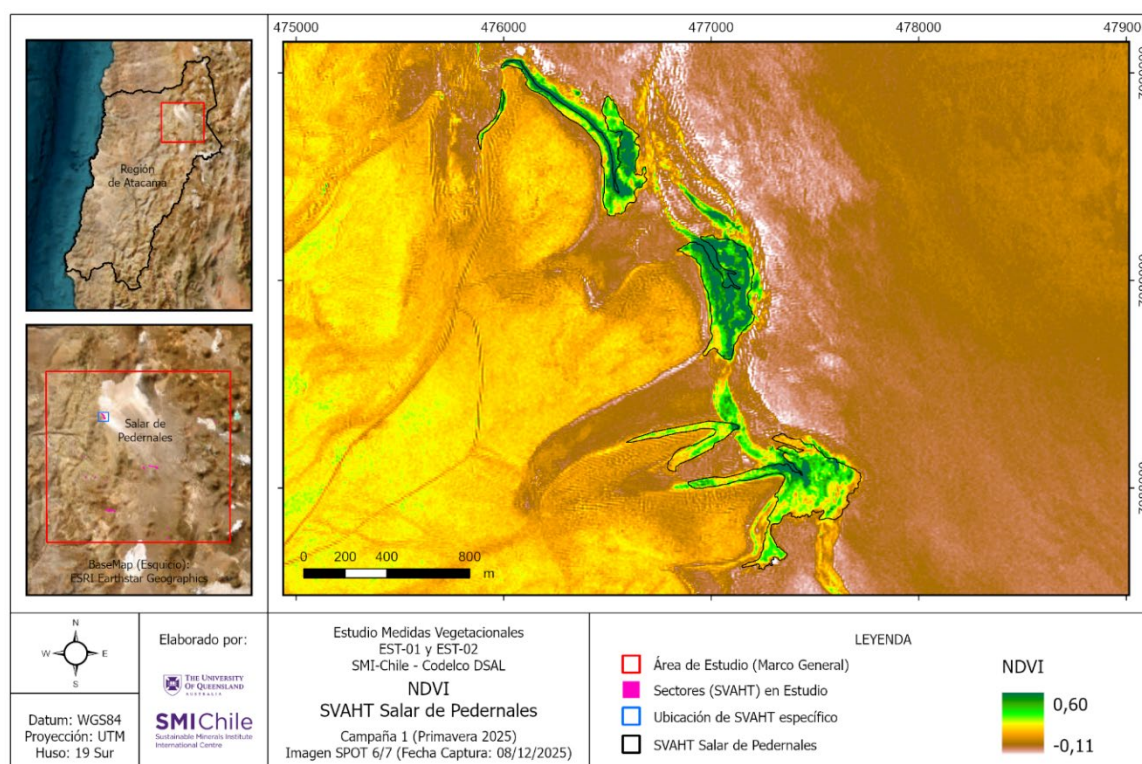


Figura 31. Índice NDVI, SVAHT Salar de Pedernales

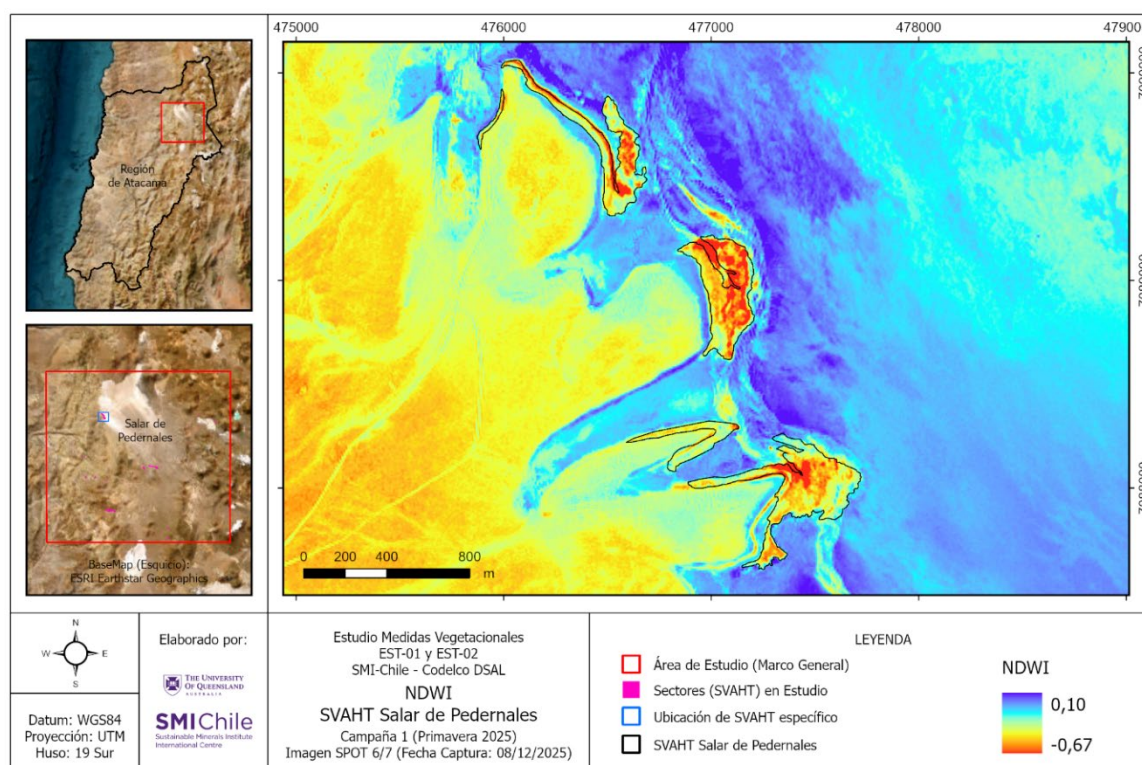


Figura 32. Índice NDWI, SVAHT Salar de Pedernales

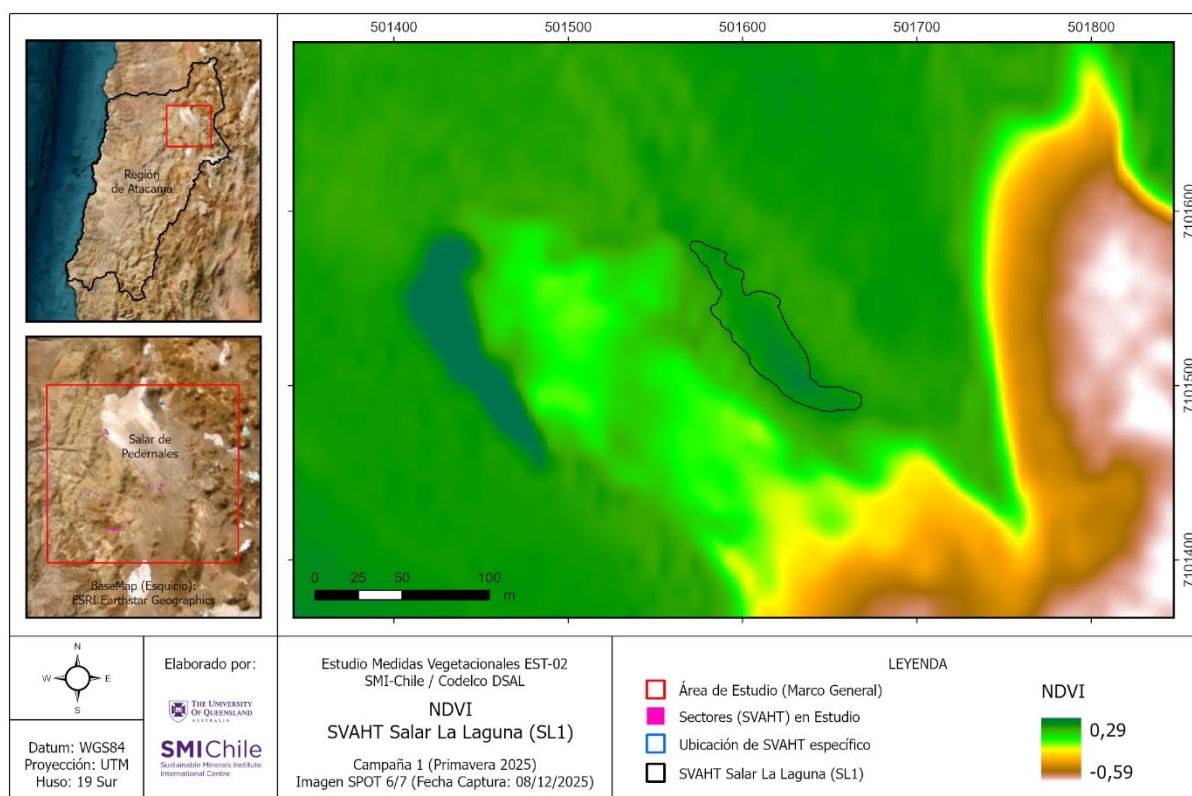


Figura 33. Índice NDVI, SVAHT Salar La Laguna (Polígono SL1)

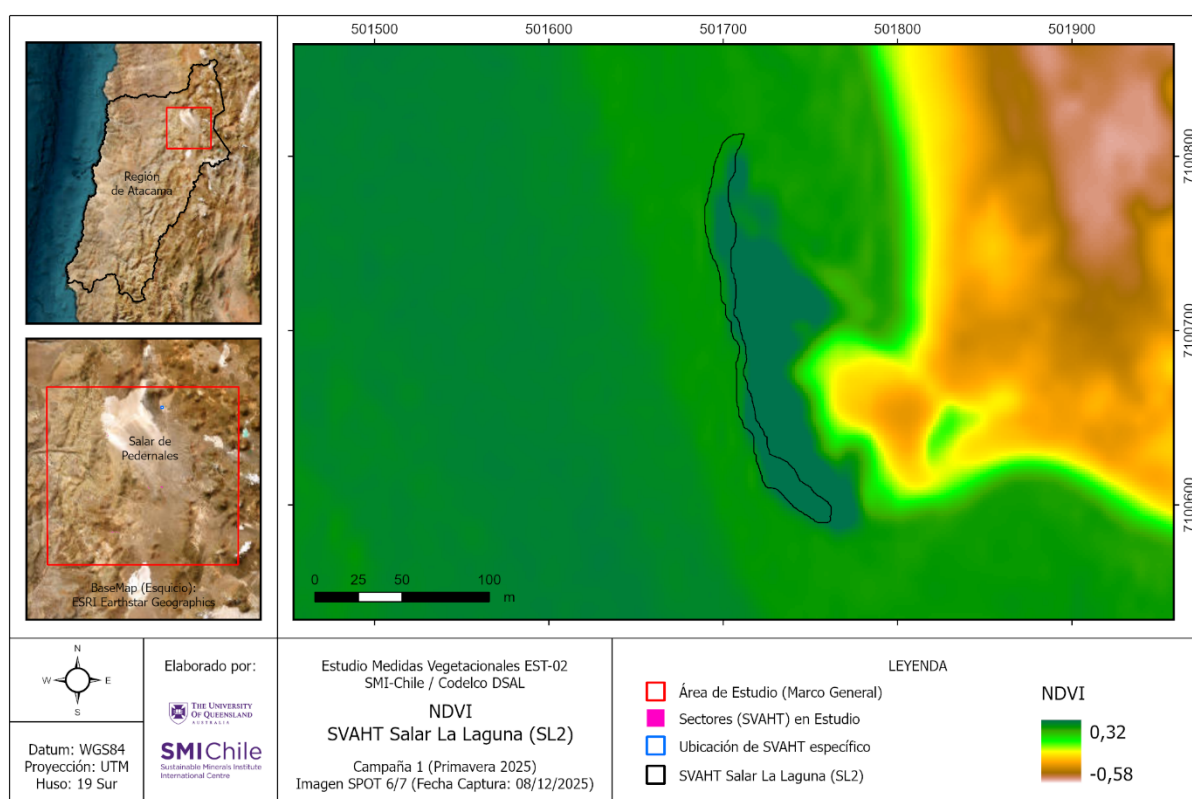


Figura 34. Índice NDVI, SVAHT Salar La Laguna (Polígono SL2)

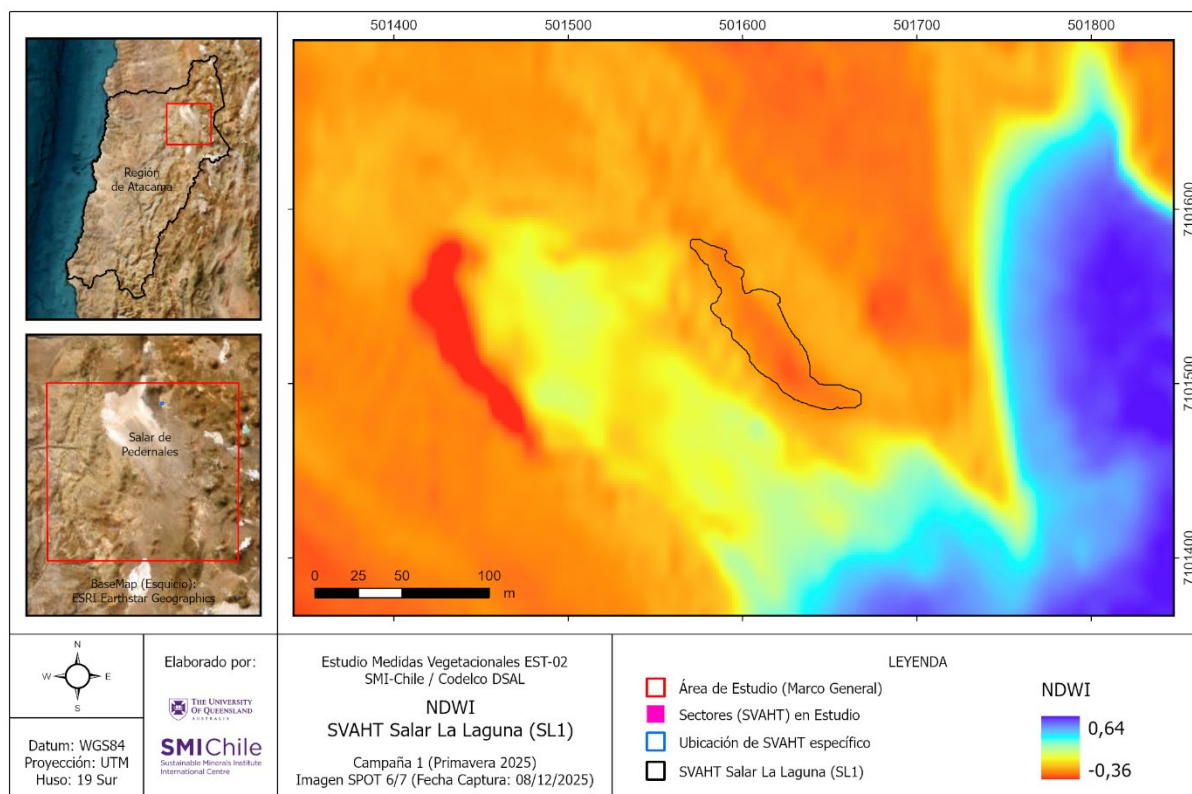


Figura 35. Índice NDWI, SVAHT Salar La Laguna (Polígono SL1)

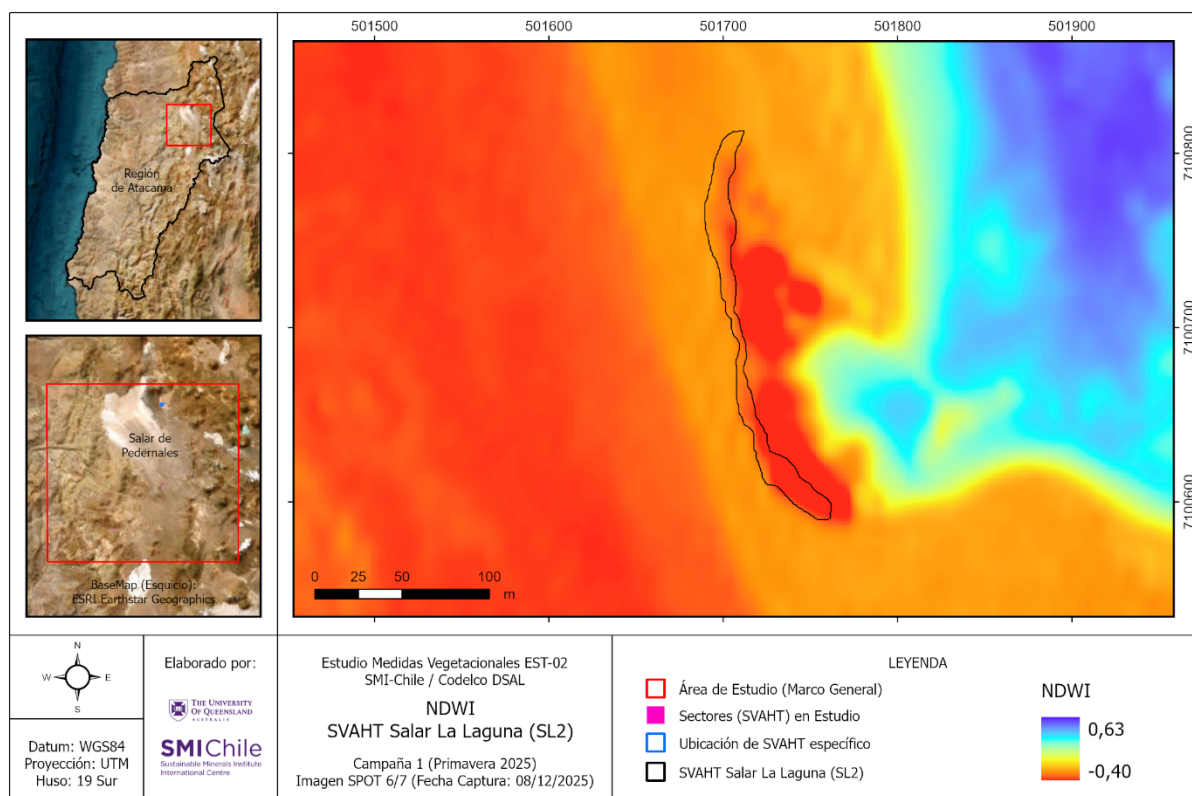


Figura 36. Índice NDWI, SVAHT Salar La Laguna (Polígono SL2)

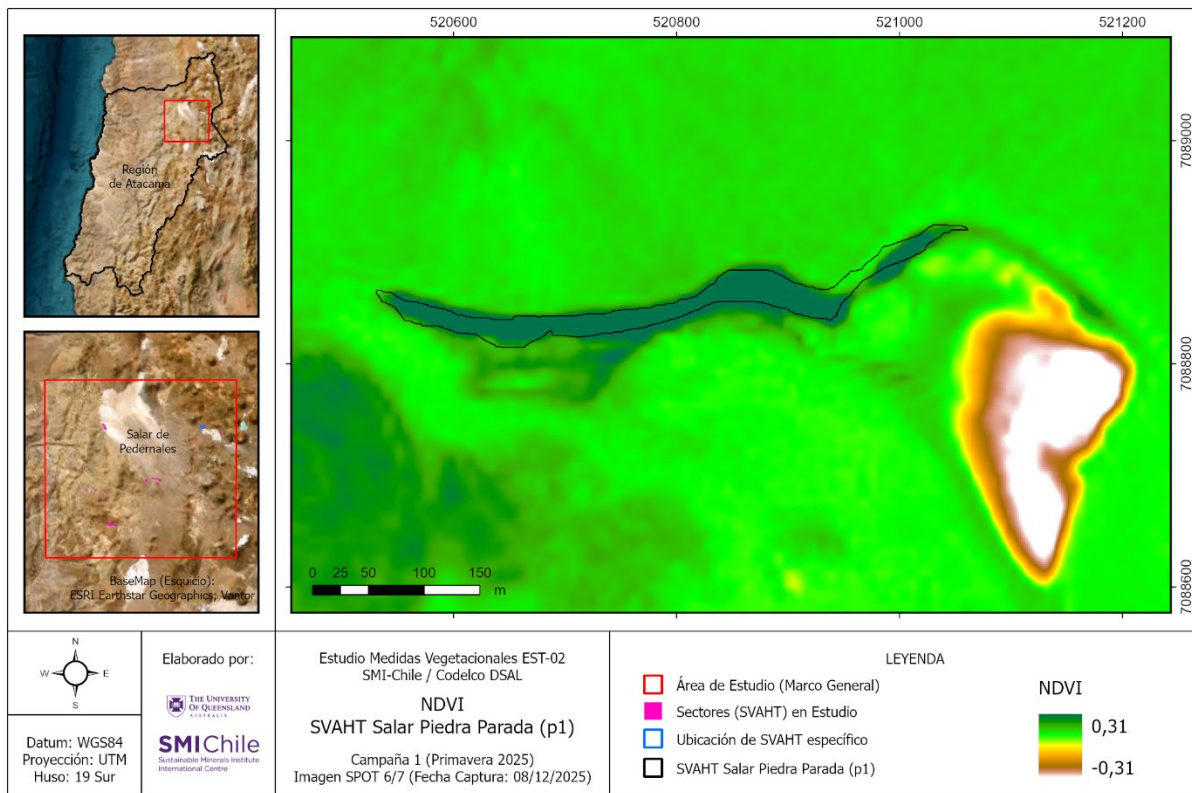


Figura 37. Índice NDVI, SVAHT Salar Piedra Parada (Polígono P1)

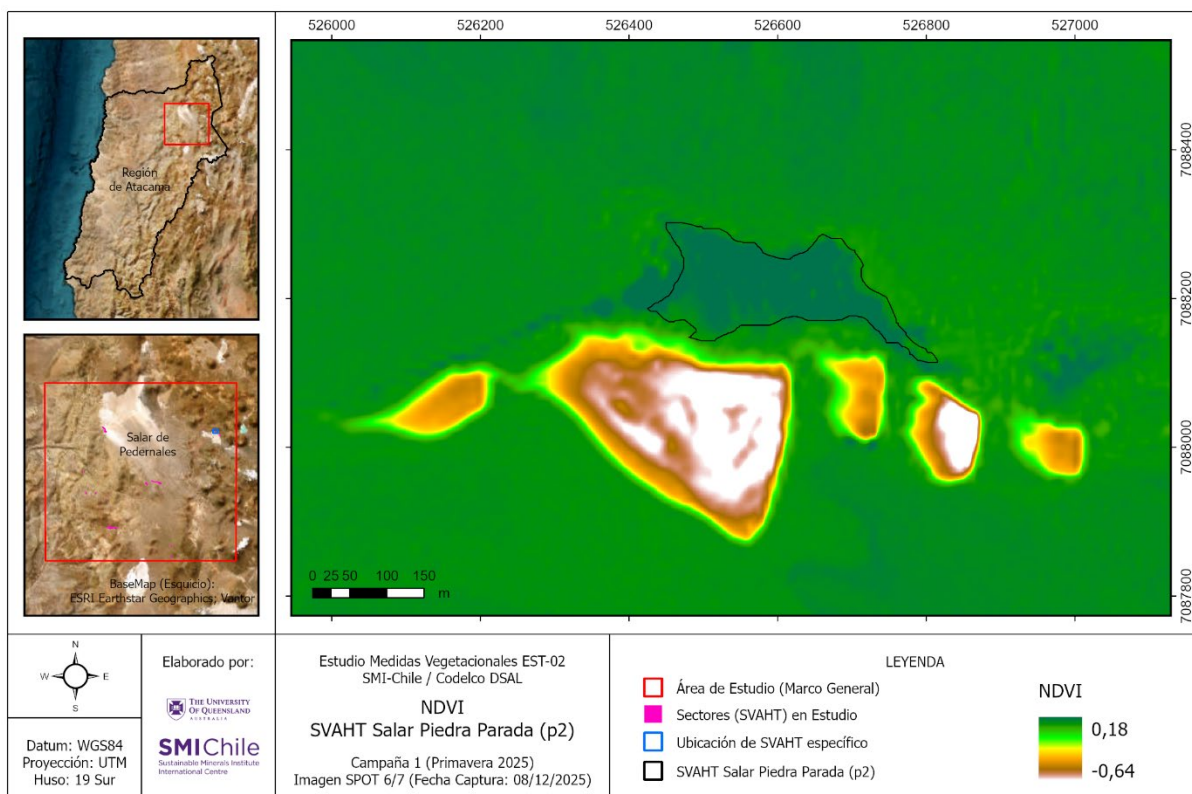


Figura 38. Índice NDVI, SVAHT Salar Piedra Parada (Polígono P2)

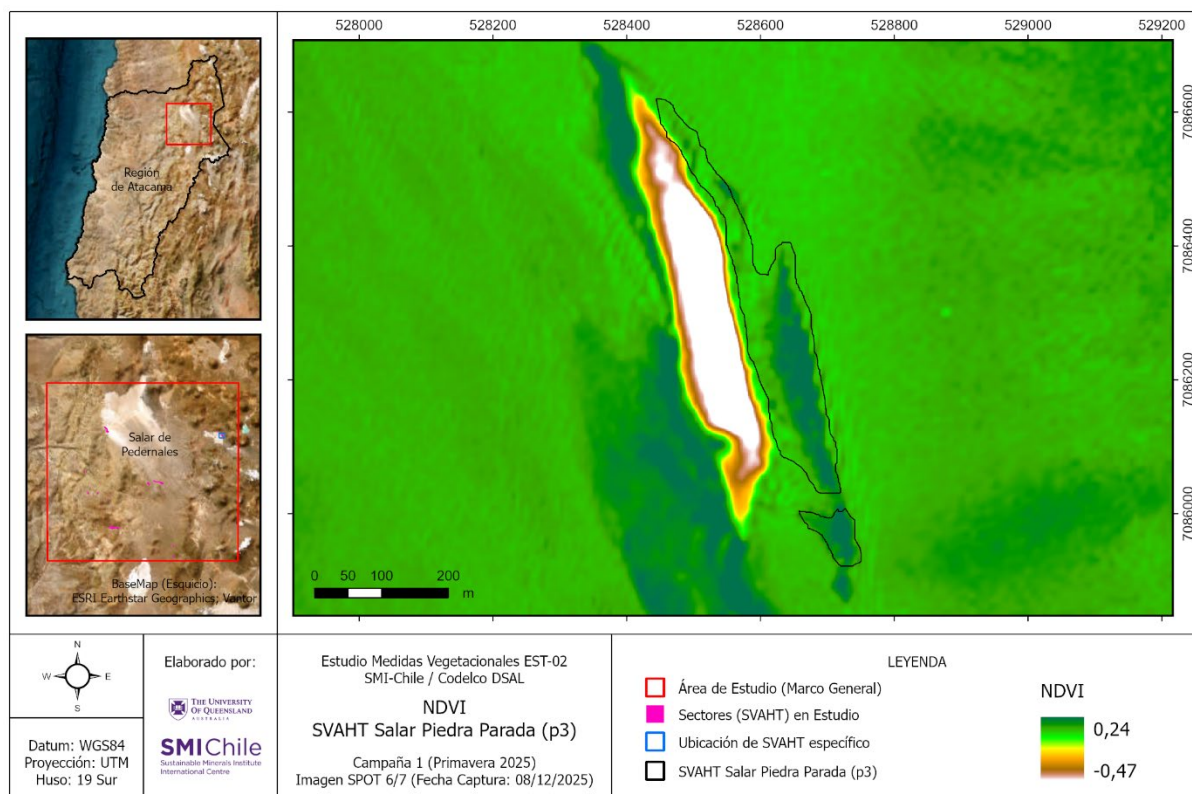


Figura 39. Índice NDVI, SVAHT Salar Piedra Parada (Polígono P3)

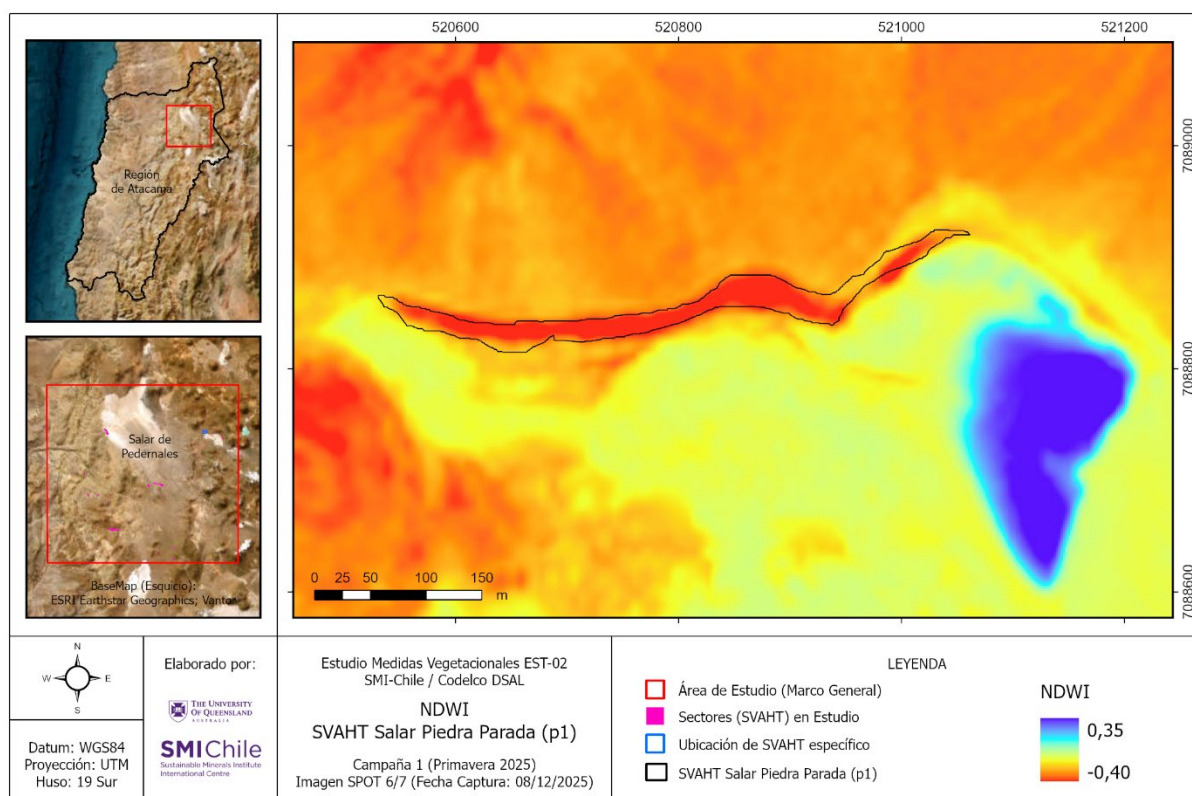


Figura 40. Índice NDWI, SVAHT Salar Piedra Parada (Polígono P1)

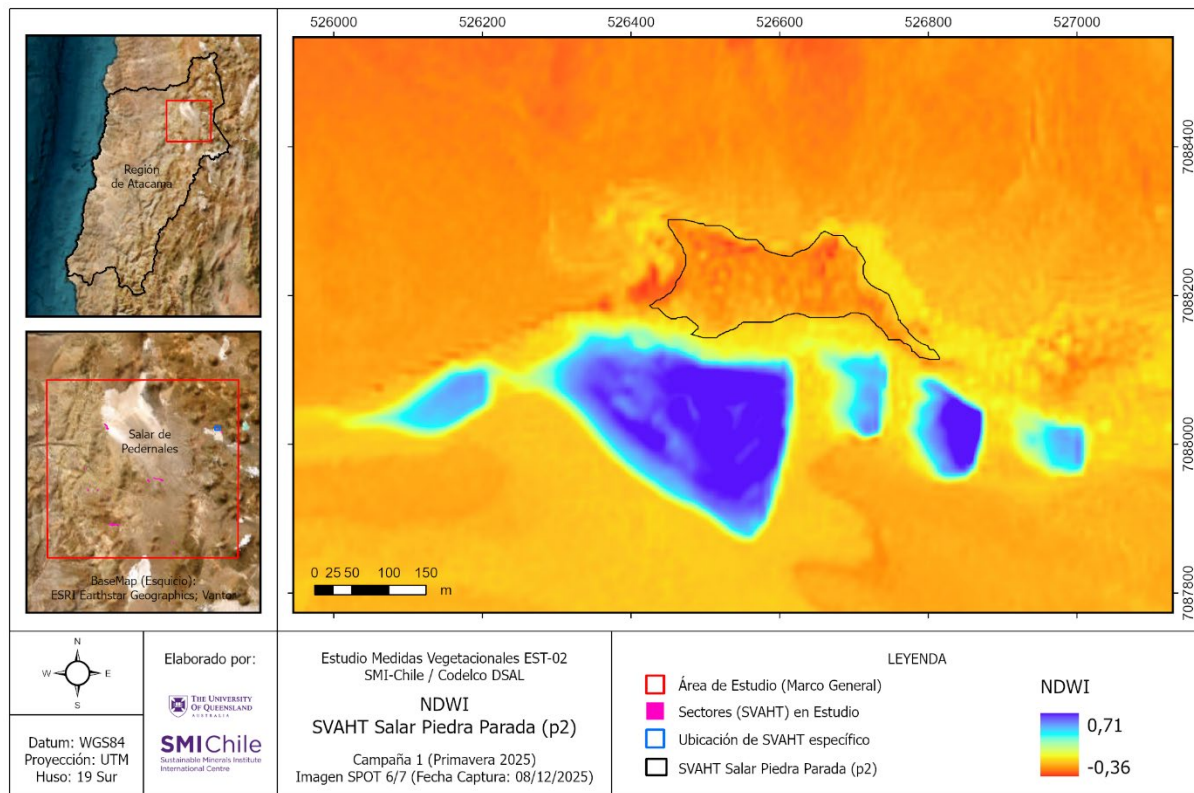


Figura 41. Índice NDWI, SVAHT Salar Piedra Parada (Polígono P2)

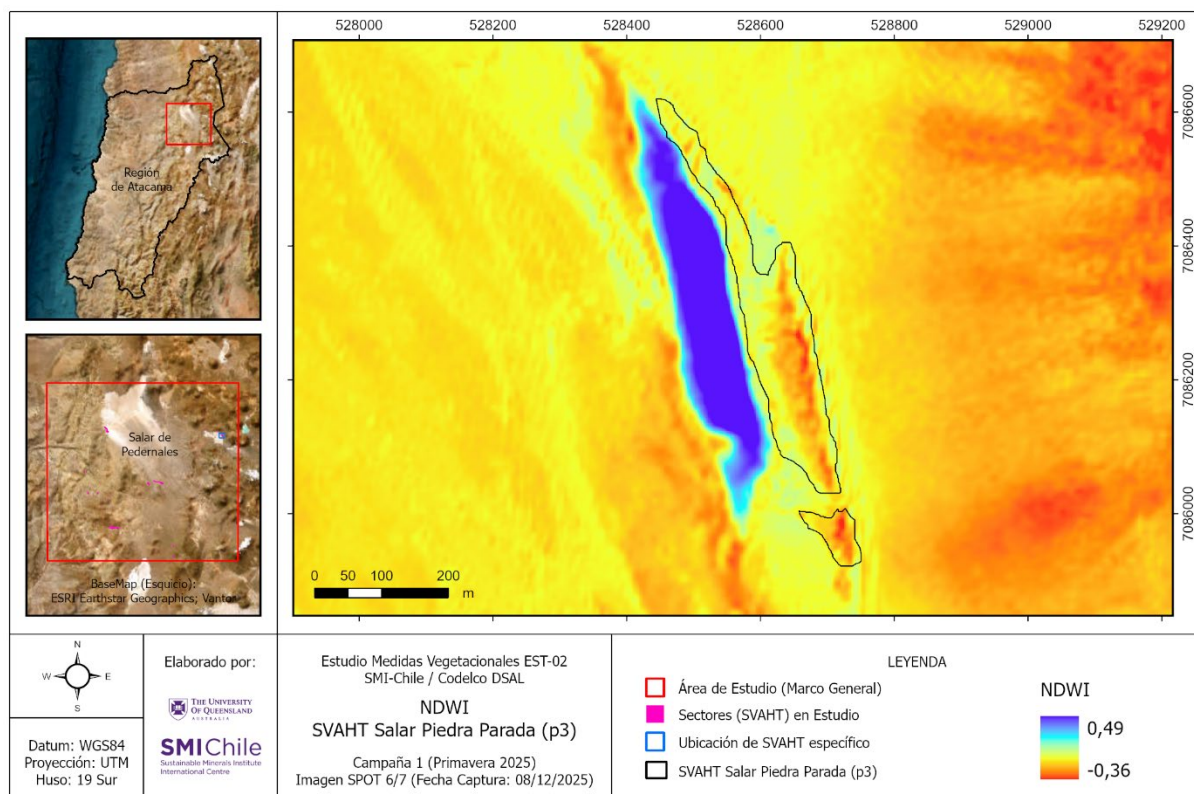


Figura 42. Índice NDWI, SVAHT Salar Piedra Parada (Polígono P3)

5.2.2.2 Cartografías de índices NDVI y NDWI para SVAHT de Quebradas

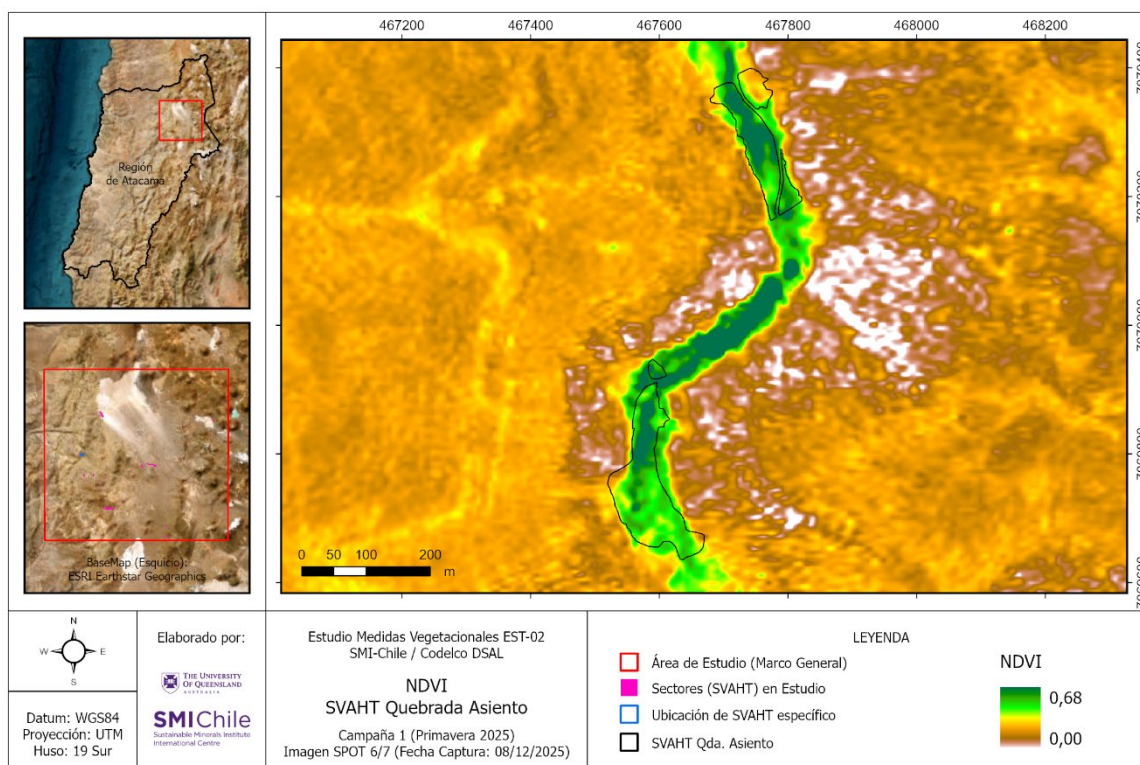


Figura 43. Índice NDVI, SVAHT Quebrada Asiento

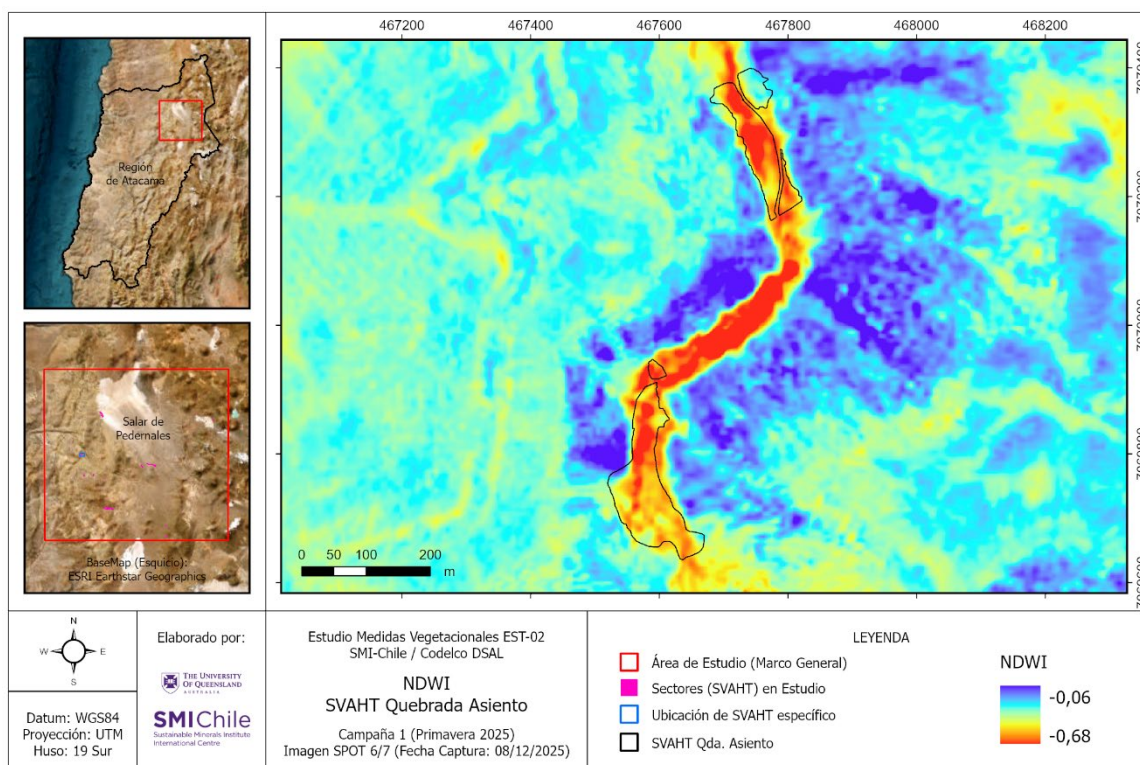


Figura 44. Índice NDWI, SVAHT Quebrada Asiento

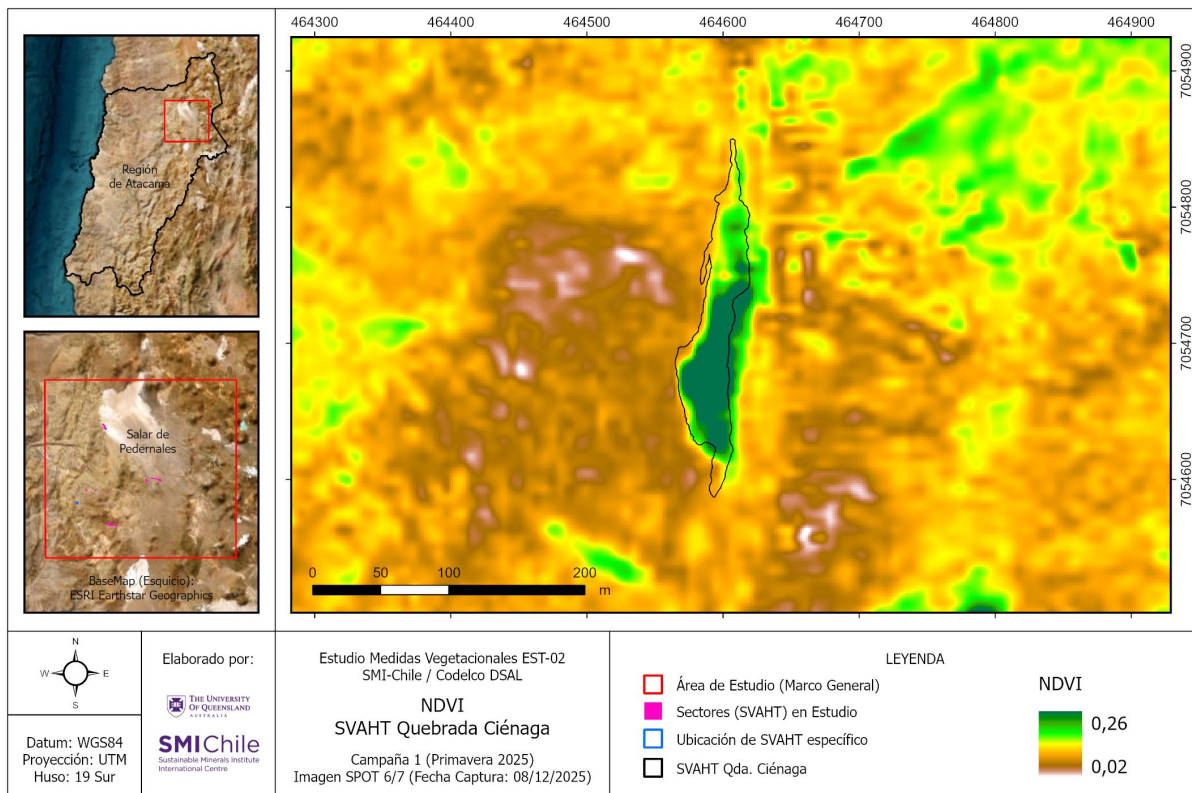


Figura 45. Índice NDVI, SVAHT Quebrada Ciénaga

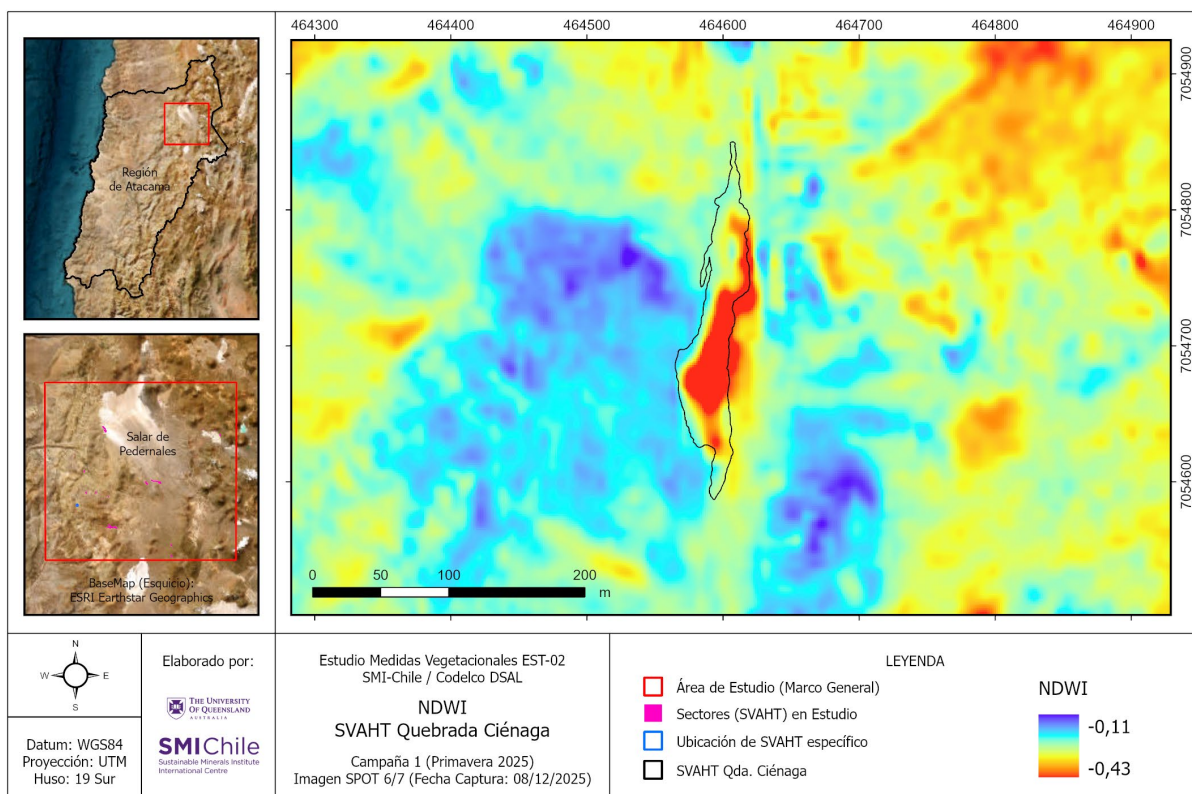


Figura 46. Índice NDWI, SVAHT Quebrada Ciénaga

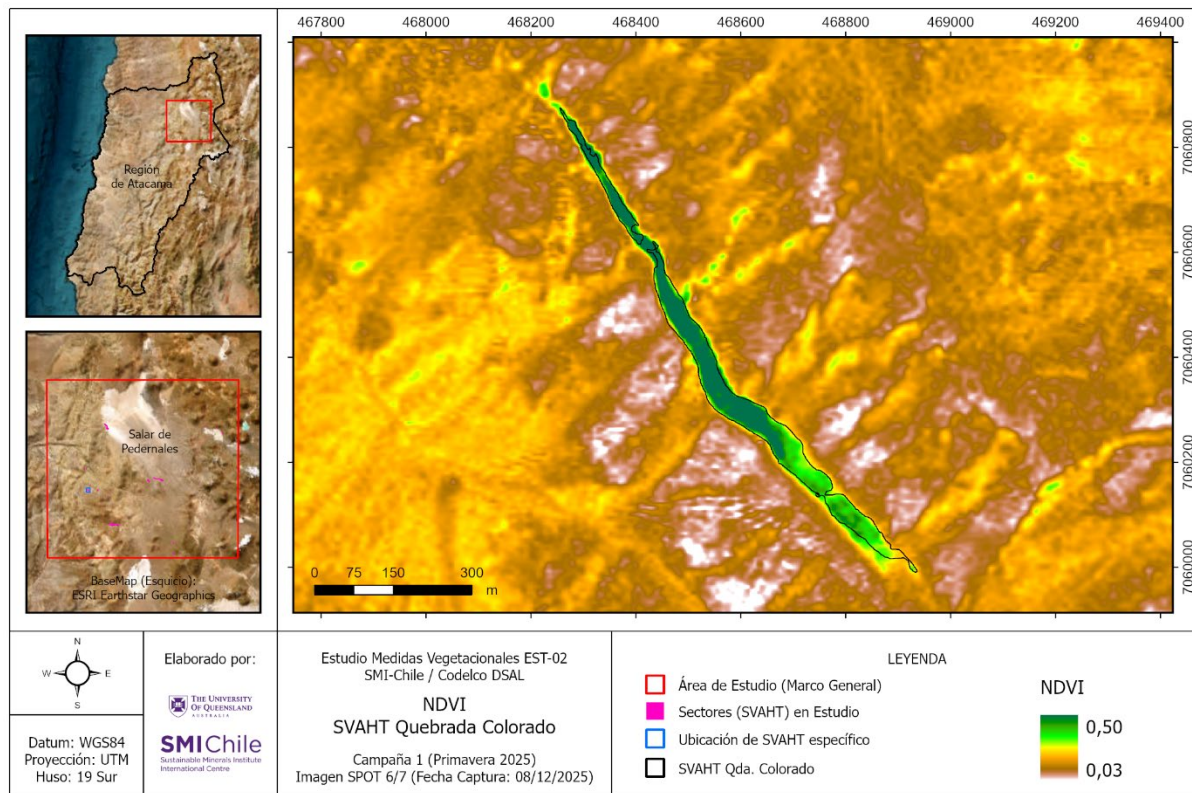


Figura 47. Índice NDVI, SVAHT Quebrada Colorado

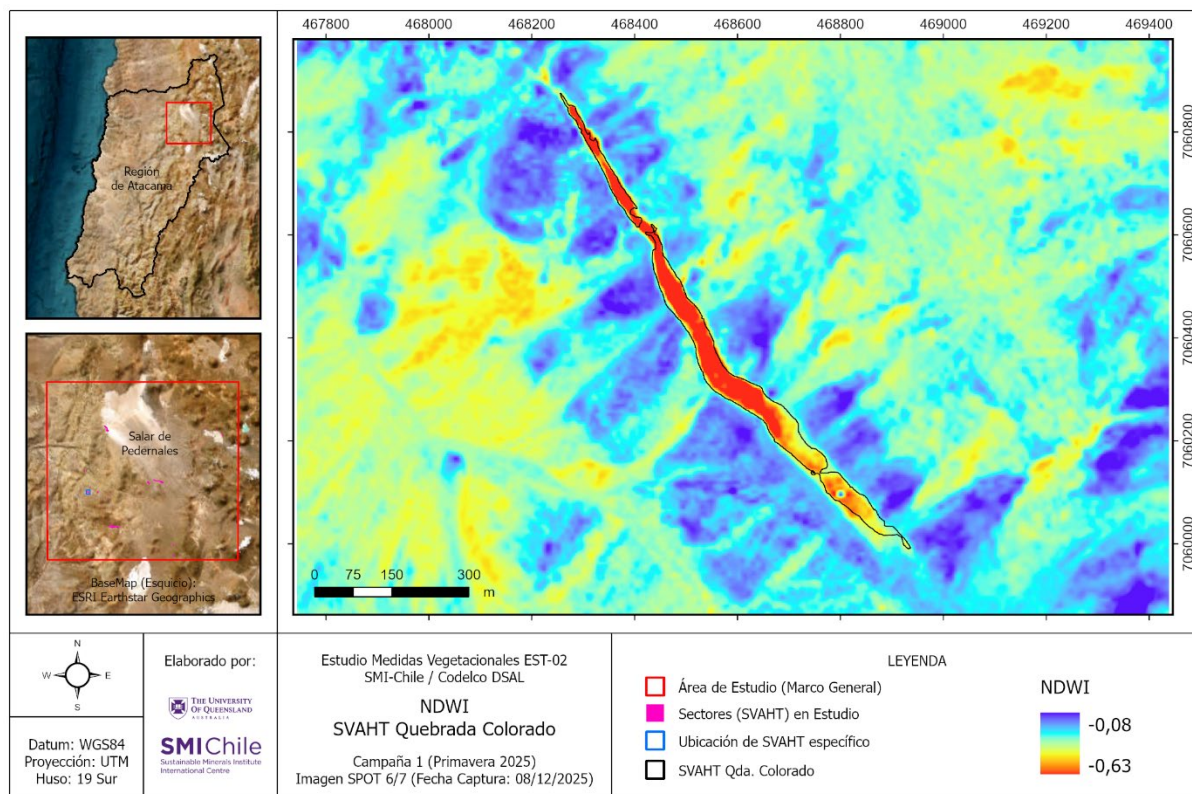


Figura 48. Índice NDWI, SVAHT Quebrada Colorado

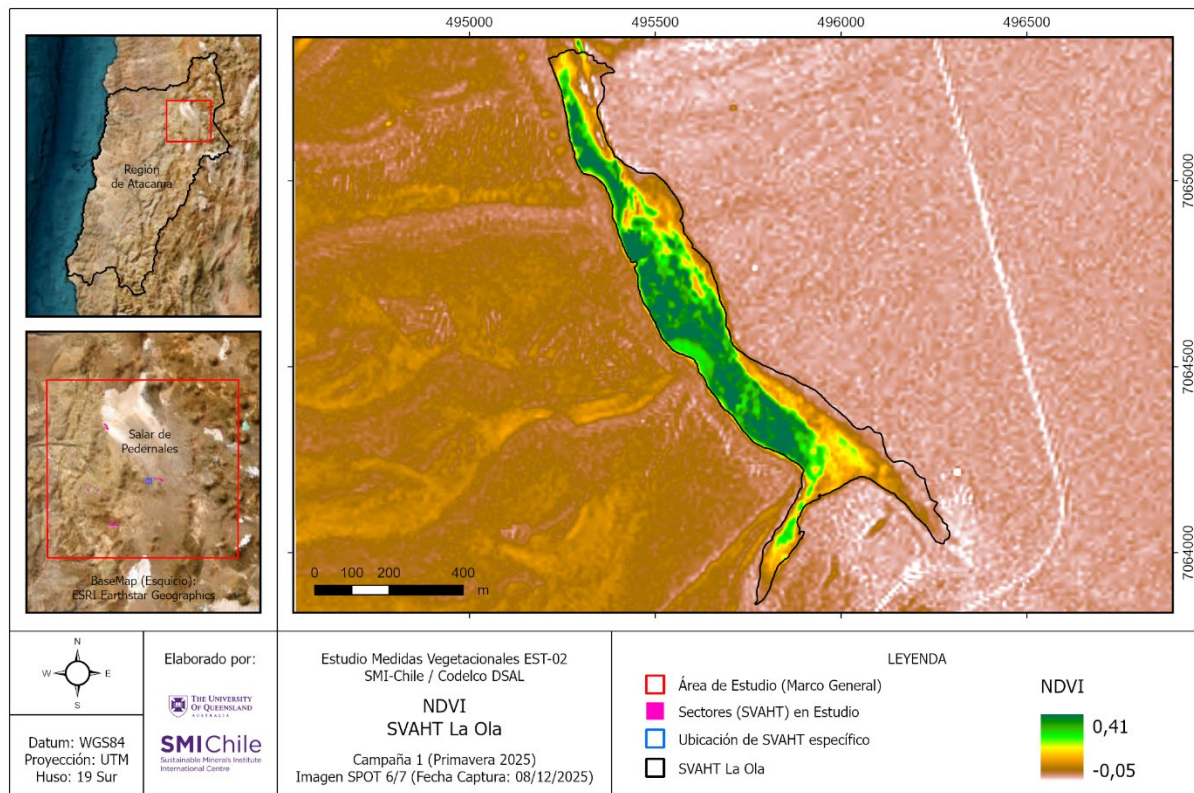


Figura 49. Índice NDVI, SVAHT Cabecera Sur rio La Ola

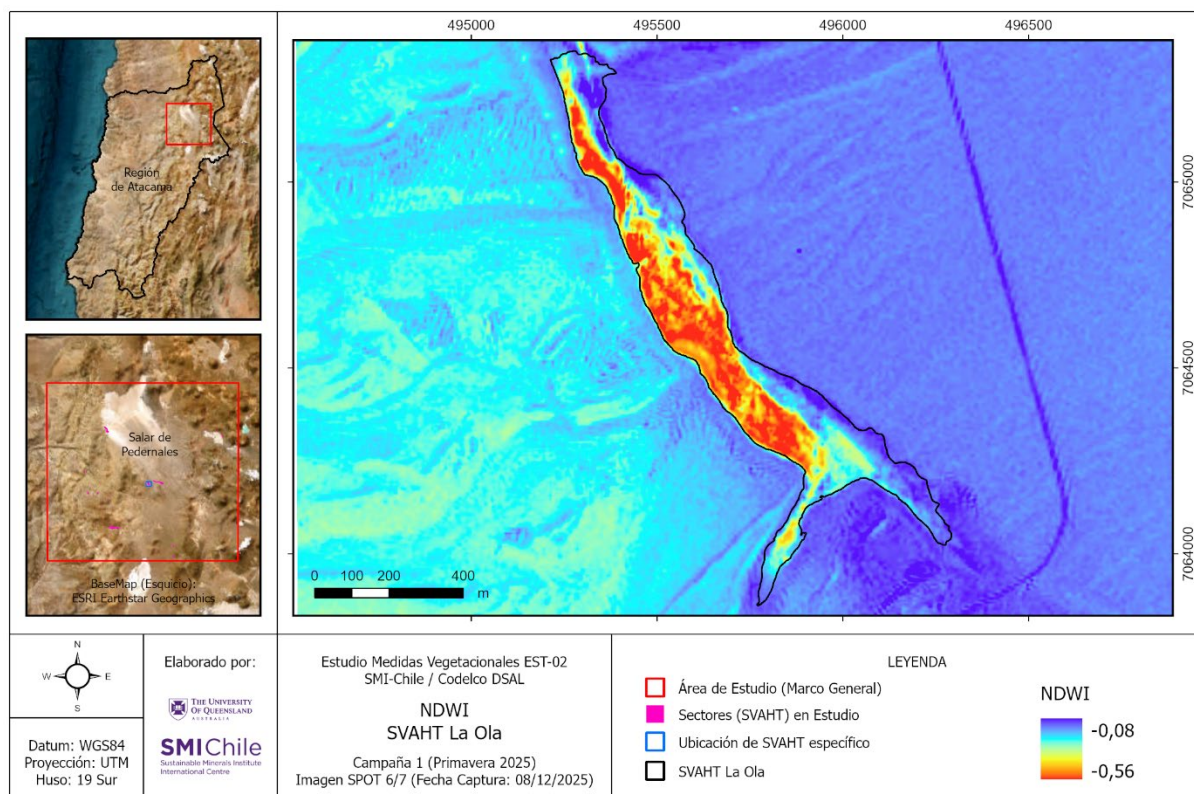


Figura 50. Índice NDWI, SVAHT Cabecera Sur rio La Ola

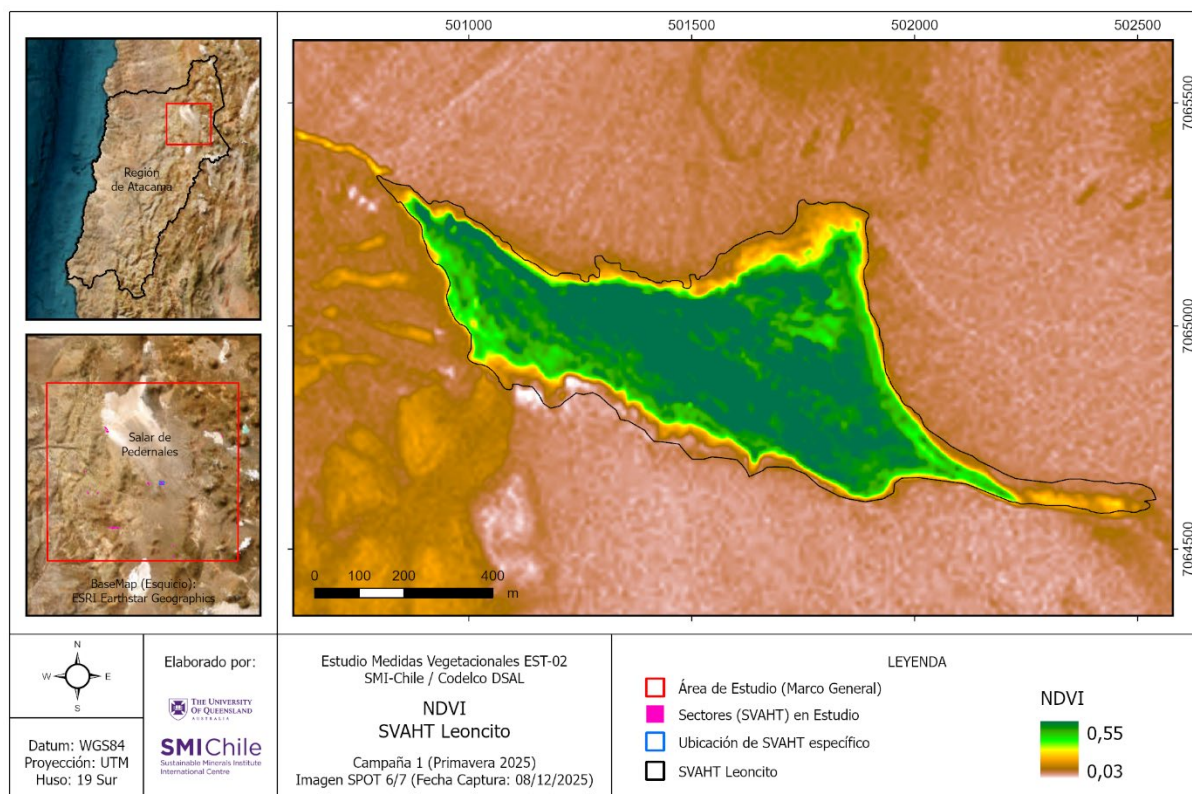


Figura 51. Índice NDVI, SVAHT Quebrada Leoncito

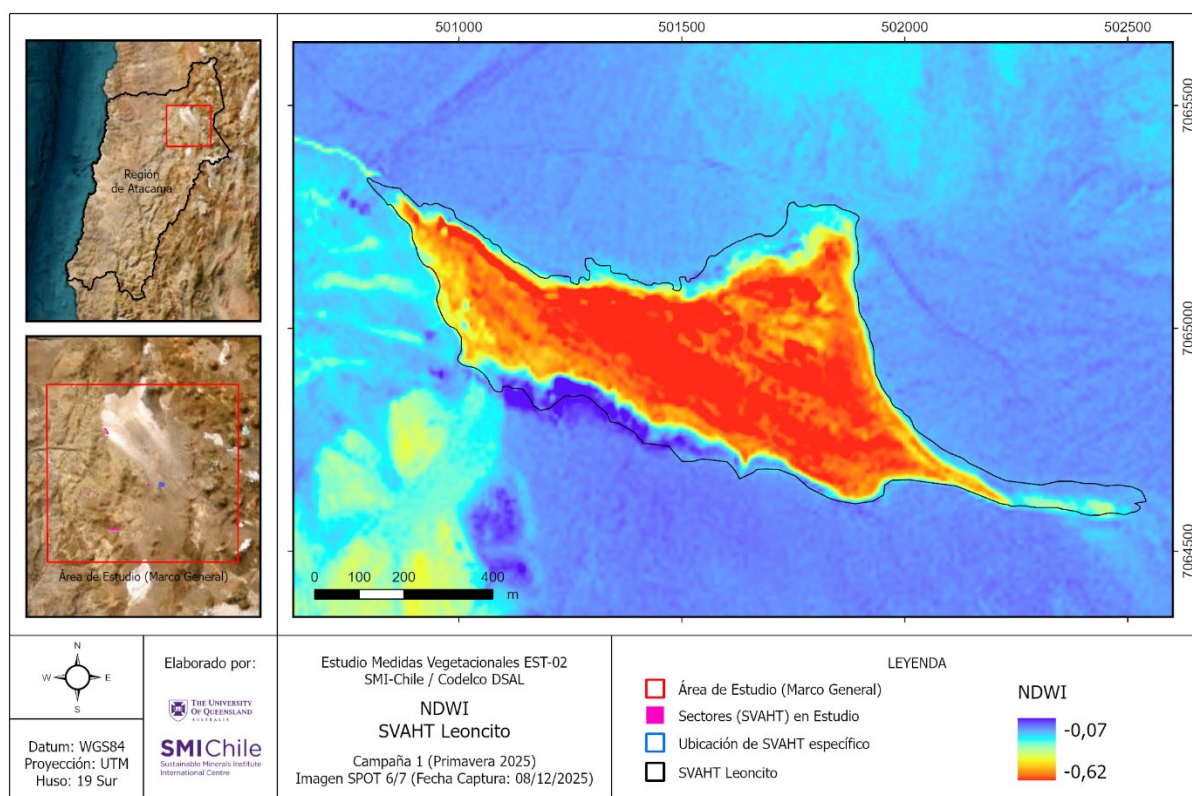


Figura 52. Índice NDWI, SVAHT Quebrada Leoncito

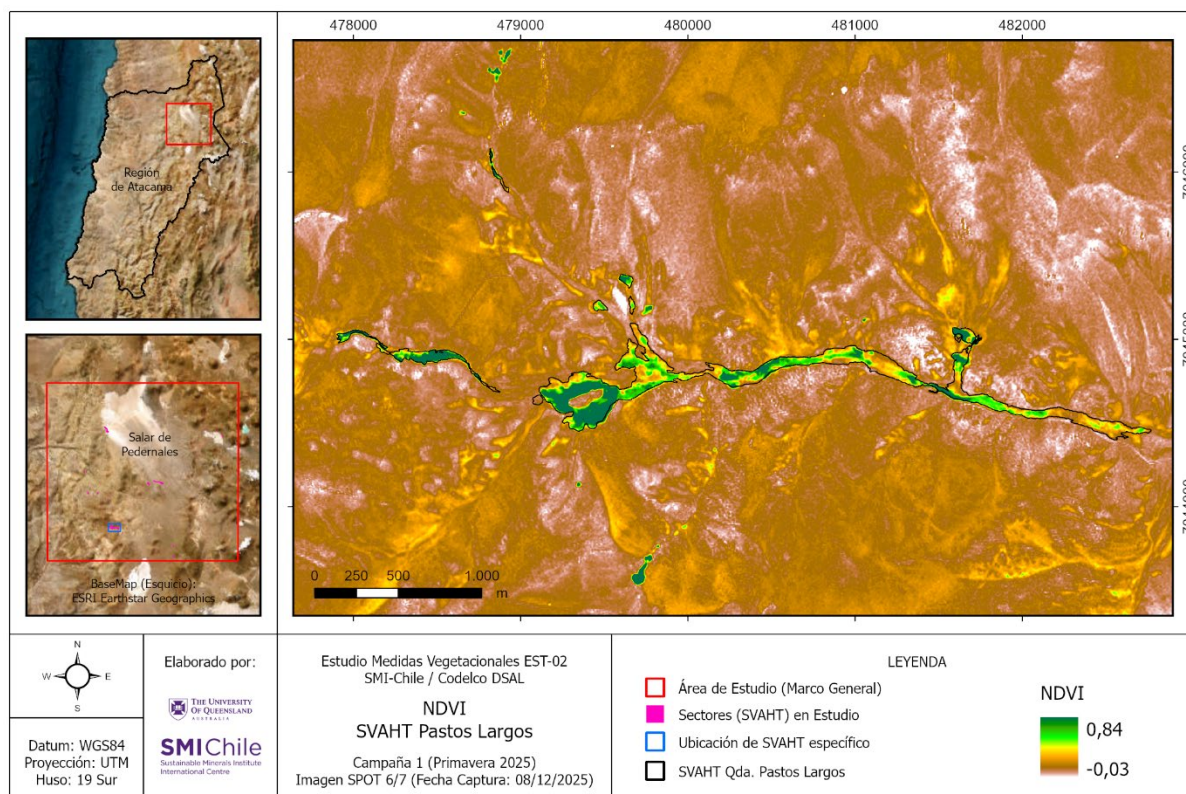


Figura 53. Índice NDVI, SVAHT Quebrada Pastos Largos

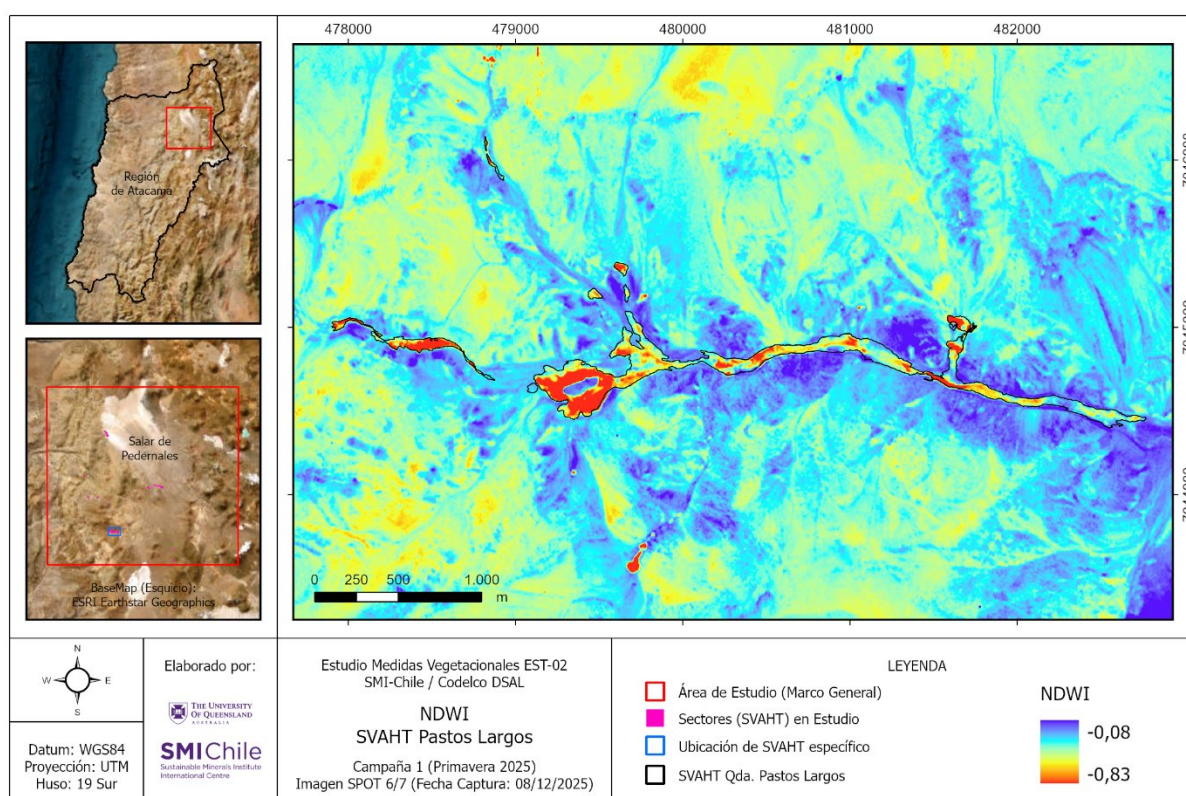


Figura 54. Índice NDWI, SVAHT Quebrada Pastos Largos

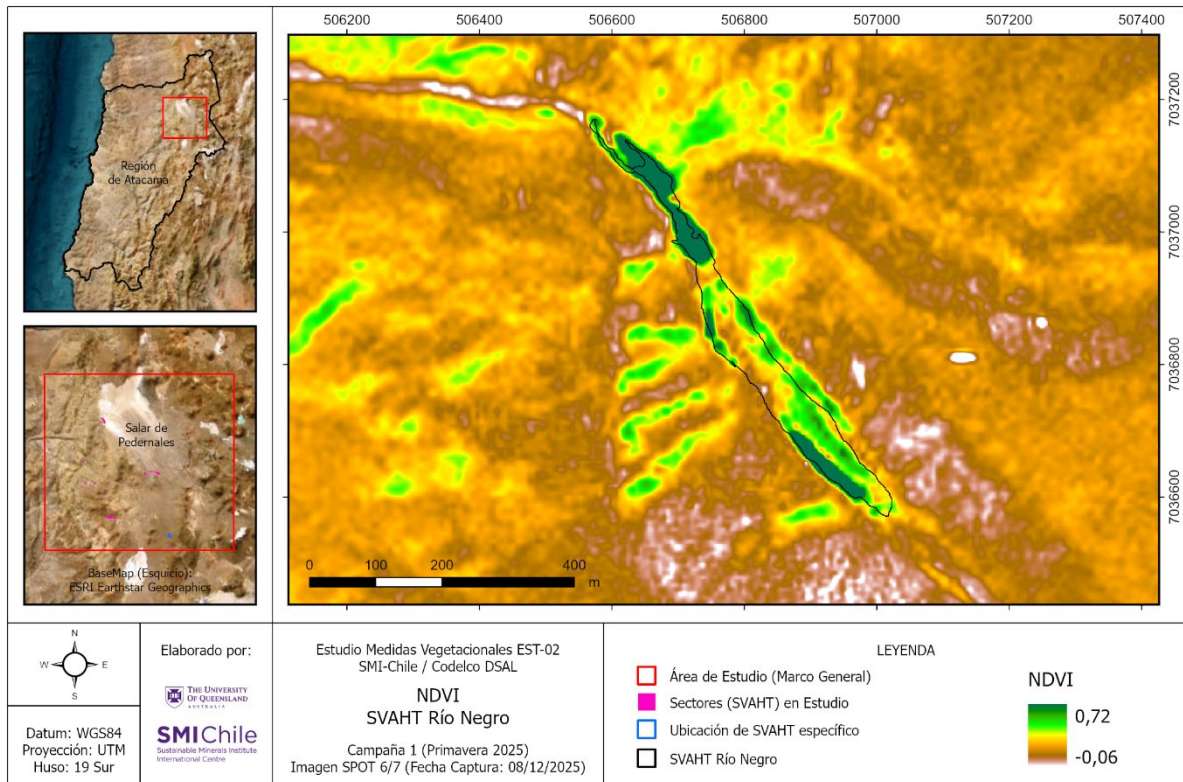


Figura 55. Índice NDVI, SVAHT Quebrada Río Negro

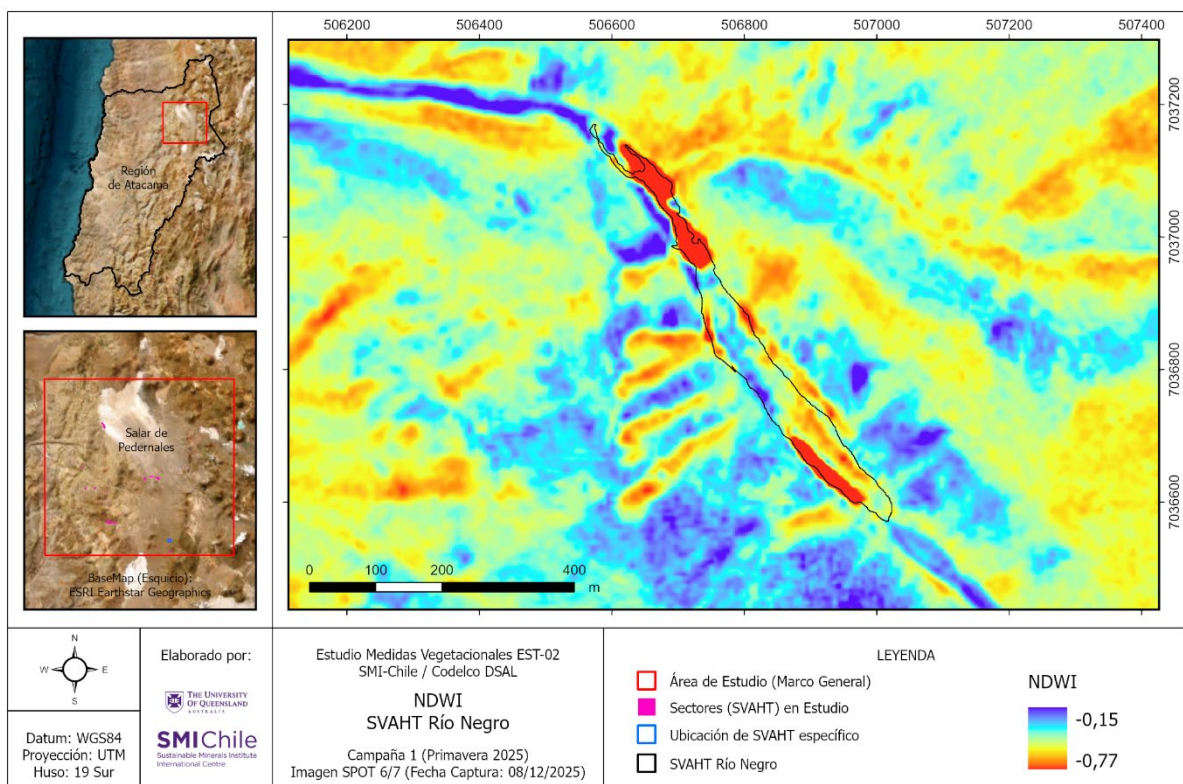
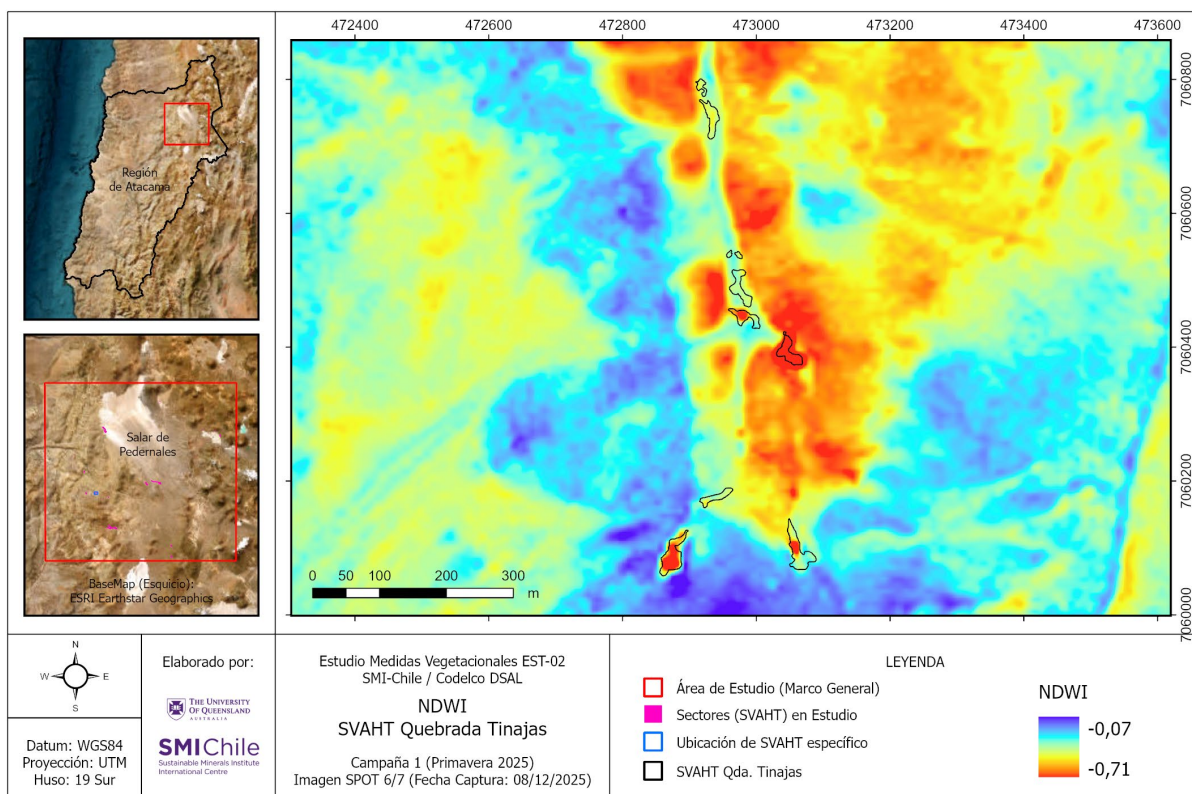
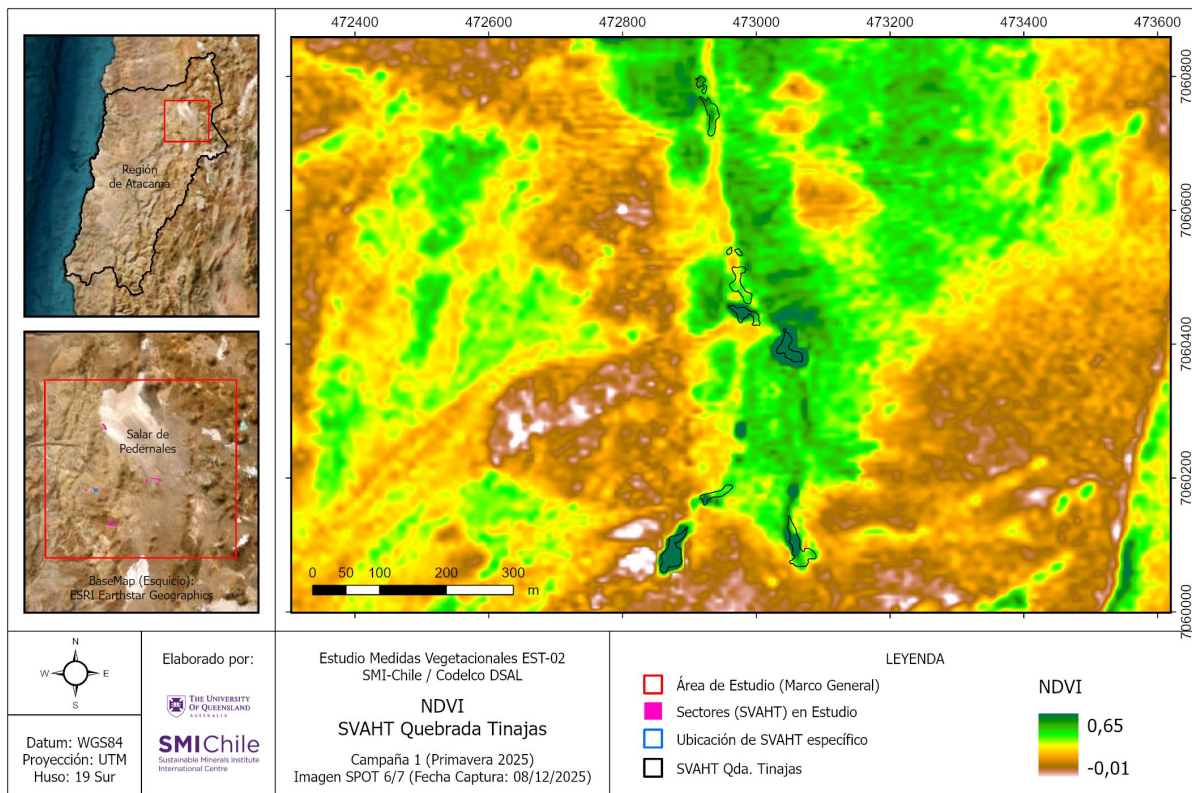


Figura 56. Índice NDWI, SVAHT Quebrada Río Negro



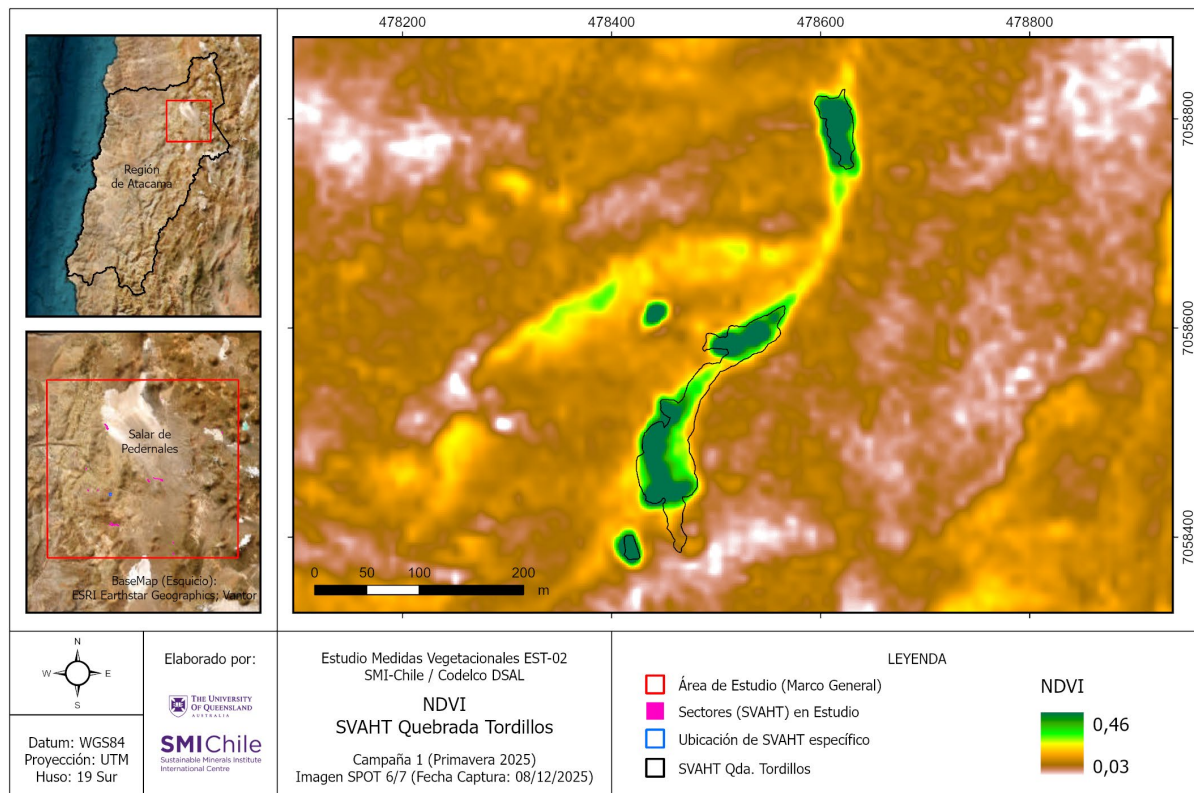


Figura 59. Índice NDVI, SVAHT Quebrada Tordillos

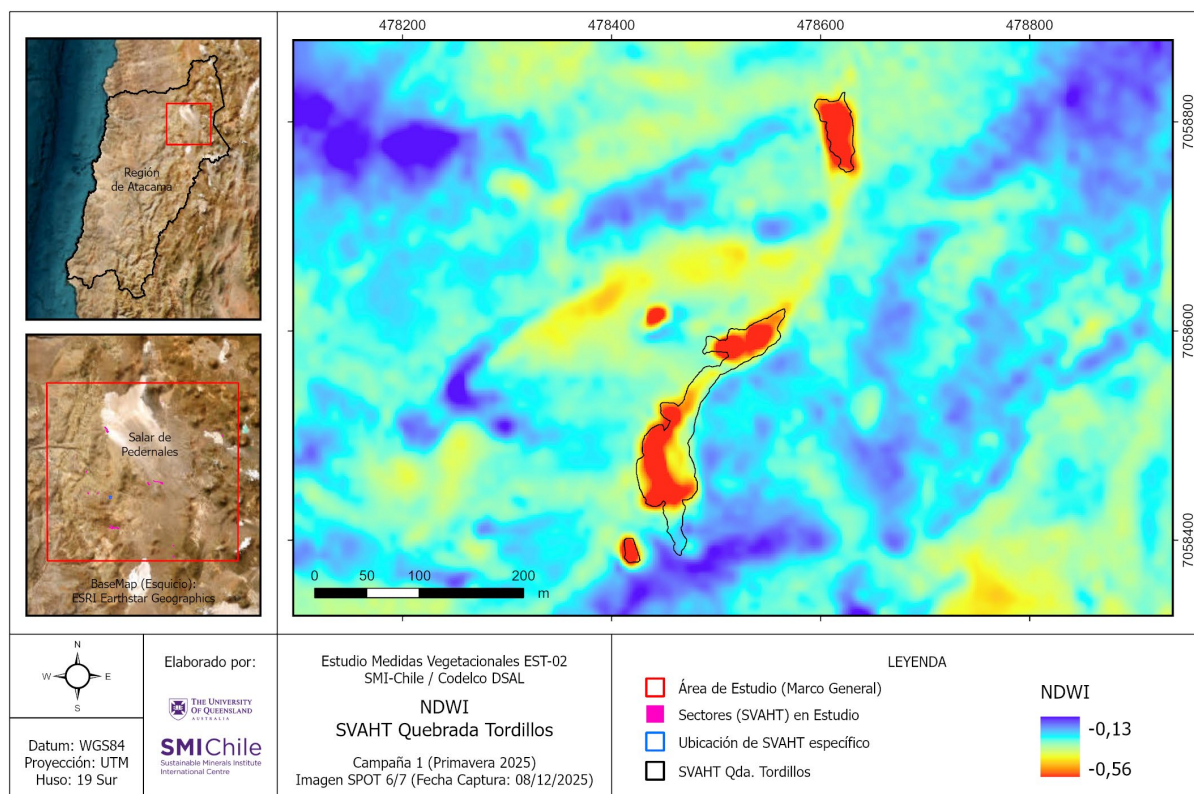


Figura 60. Índice NDWI, SVAHT Quebrada Tordillos

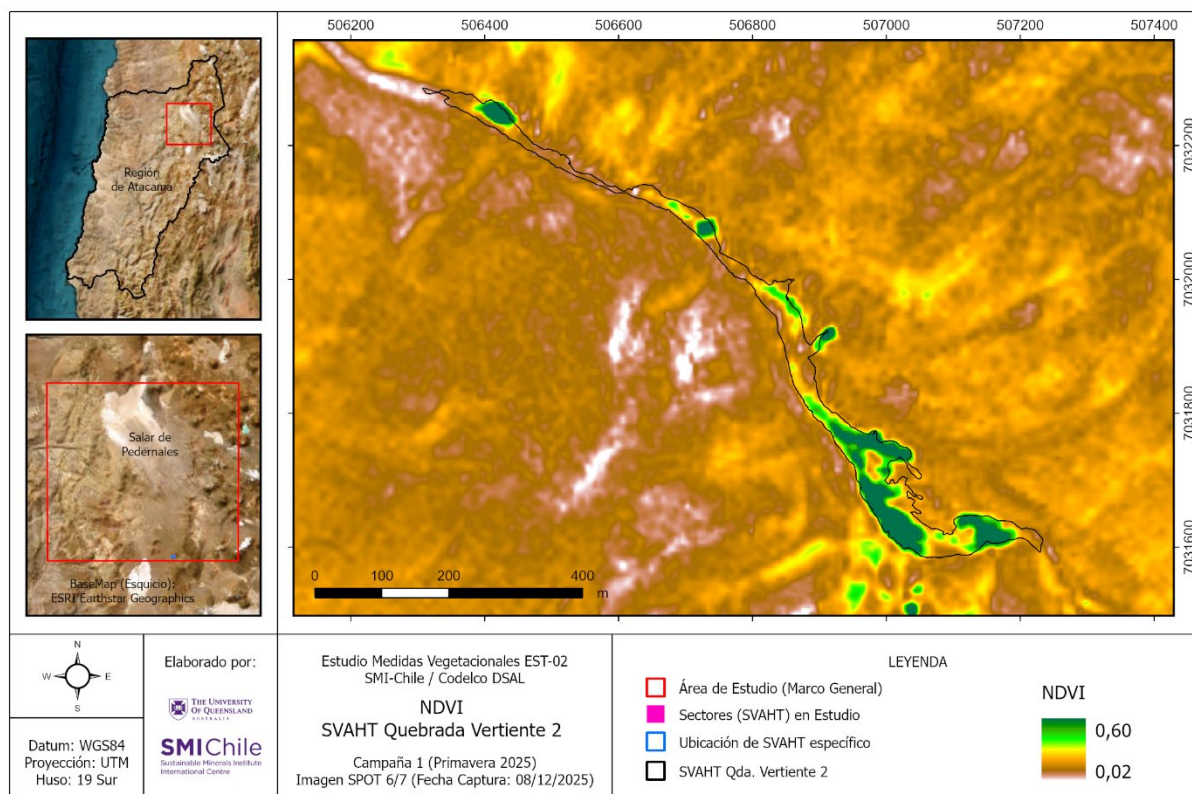


Figura 61. Índice NDVI, SVAHT Quebrada Vertiente 2

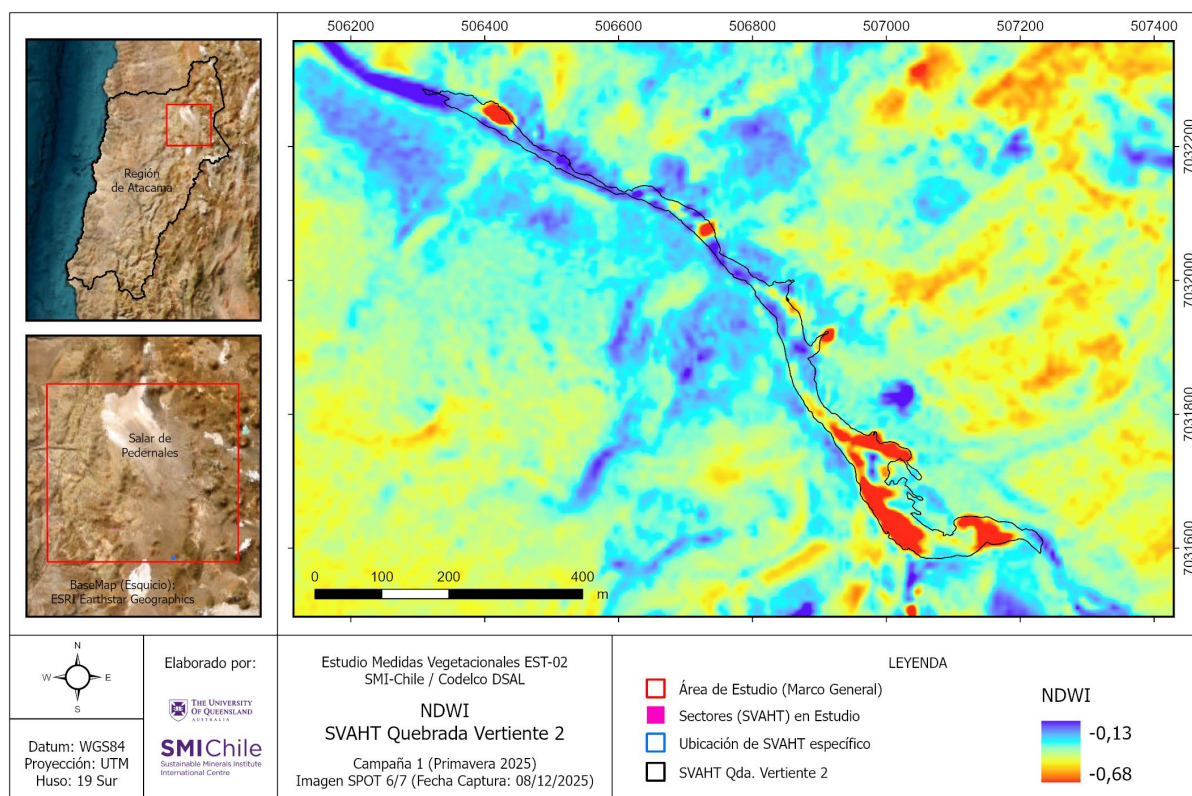


Figura 62. Índice NDWI, SVAHT Quebrada Vertiente 2

5.2.3 Cálculo de estadísticas zonales de NDVI y NDWI, para cada SVAHT

Las siguientes Tabla 7 y Tabla 8 contienen las estadísticas zonales de NDVI y NDWI, respectivamente, para cada SVAHT. En general se observan mayores valores de estadísticos de NDVI en SVAHT de Quebradas en comparación con SVAHT de Salares. Entre los SVAHT de Salares destaca Pedernales con mayores valores NDVI, y entre los SVAHT de Quebrada destacan por sus mayores valores (promedio y mediana) los SVAHT de Leoncito, Tordillos, Colorado, Pastos Largos y Tinajas. Pastos Largos destaca también por presentar el valor máximo absoluto de NDVI (0,85), aunque presenta también alta desviación standard (0,12) lo que habla de alta variabilidad en cuanto a valores de NDVI al interior del polígono.

En cuanto a valores estadísticos de NDWI, en general se observan valores bajo cero, lo cual conforme lo indicado en la Tabla 6 es indicador de una baja presencia de agua (humedad superficial, cuerpos o espejos de agua superficial) al interior de los polígonos de SVAHT. Los SVAHT de Salares presentan medianas de NDWI más cercanos a cero en comparación con SVAHT de Quebradas, lo cual es indicador de un menor grado (relativo) de aridez, sequedad o existencia de suelos secos en la superficie correspondiente a los polígonos analizados. Destaca el SVAHT de Piedra Parada por presentar un valor máximo de NDWI sobre cero (0,13) lo cual es indicador de sectores pequeños húmedos al interior del polígono.

Tabla 7. Estadísticas zonales de NDVI para cada polígono de SVAHT.

SVAHT	Valor Mínimo	Valor Máximo	Promedio	Desviación Estándar	Mediana
SVAHT de Salares					
Pedernales	0,01	0,46	0,15	0,05	0,14
La Laguna	0,04	0,32	0,11	0,06	0,09
Piedra Parada	-0,16	0,32	0,10	0,06	0,10
SVAHT de Quebradas					
Asiento	0,04	0,27	0,16	0,04	0,15
Ciénaga	0,08	0,27	0,14	0,04	0,14
Colorado	0,09	0,51	0,21	0,06	0,20
La Ola	0,04	0,42	0,18	0,08	0,18
Leoncito	0,04	0,56	0,27	0,09	0,30
Pastos Largos	0,05	0,85	0,21	0,12	0,18
Río Negro	0,05	0,73	0,20	0,13	0,14
Tinajas	0,09	0,65	0,21	0,13	0,15
Tordillos	0,07	0,47	0,23	0,08	0,22
Vertiente 2	0,04	0,61	0,17	0,10	0,14

Tabla 8. Estadísticas zonales de NDWI para cada polígono de SVAHT.

SVAHT	Valor Mínimo	Valor Máximo	Promedio	Desviación Estándar	Mediana
SVAHT de Salares					
Pedernales	-0,51	-0,05	-0,23	0,05	-0,23
La Laguna	-0,41	-0,08	-0,18	0,06	-0,16
Piedra Parada	-0,41	0,13	-0,18	0,08	-0,18
SVAHT de Quebradas					
Asiento	-0,39	-0,11	-0,27	0,04	-0,27
Ciénaga	-0,43	-0,18	-0,26	0,05	-0,25
Colorado	-0,63	-0,16	-0,36	0,07	-0,35
La Ola	-0,57	-0,08	-0,31	0,09	-0,31
Leoncito	-0,62	-0,08	-0,40	0,10	-0,44
Pastos Largos	-0,84	-0,14	-0,36	0,12	-0,34
Río Negro	-0,78	-0,19	-0,34	0,11	-0,30
Tinajas	-0,72	-0,21	-0,35	0,12	-0,30
Tordillos	-0,56	-0,21	-0,39	0,07	-0,39
Vertiente 2	-0,69	-0,14	-0,32	0,10	-0,29

5.2.4 Estimación de áreas (ha) de vegetación a partir de clasificación de NDVI

5.2.4.1 Superficies (ha) con vegetación a partir de rangos de clasificación común de NDVI

Las siguientes Tabla 9 y Tabla 10 contienen los resultados de los cálculos de superficies (en hectáreas) con vegetación en función de los rangos de clasificación común de NDVI (Tabla 4), acotando a los polígonos de SVAHT y a los polígonos correspondientes a las zonas buffer (100 m; incluyendo a los polígonos de SVAHT en la estimación), respectivamente.

Mediante esta aproximación, se destaca como primera observación la diferencia entre SVAHT de Salares en comparación con SVAHT de Quebradas, donde estas últimas presentan mayores superficies con vegetación en las categorías con valores más altos de NDVI. En el caso de SVAHT de Salares, destaca el SVAHT de Salar de Pedernales con mayores superficies de vegetación activa (lo cual está dado también por el tamaño de los polígonos que conforman el SVAHT). En el caso de los SVAHT de Quebradas, los SVAHT que presentan mayores superficies con vegetación activa corresponden a los SVAHT de Leoncito, Pastos Largos y La Ola.

Comparando las estimaciones acotadas a los polígonos de SVAHT (Tabla 9) e incluyendo las zonas de buffer (Tabla 10), es posible advertir la alta concordancia en la delimitación que presentan los polígonos de SVAHT (especialmente de Quebradas) con respecto a la presencia de vegetación según los valores de NDVI. Esto se advierte mayormente en la Tabla 10, en donde se registran superficies dentro de las zonas buffer que presentan valores de NDVI bajo cero, es decir, que no presentan vegetación. Destaca también en el análisis incluyendo zonas buffer, el aumento relativo de superficie con vegetación en los SVAHT de Salar de Pedernales y Quebrada Asiento, lo cual es indicador de presencia de vegetación activa por fuera de los polígonos oficiales de SVAHT, pero dentro del área de buffer.

Tabla 9. Superficie (ha) utilizando rangos de clasificación común de NDVI en polígonos de SVAHT.

SVAHT	Superficie (ha) Vegetación Activa (Poligono SVAHT)						Total
	NDVI -1 a 0	NDVI 0 a 0.02	NDVI 0.02 a 0.1	NDVI 0.1 a 0.2	NDVI 0.2 a 0.3	NDVI 0.3 a 1	
SVAHT de Salares							
Pedernales (SP)		0,00	5,06	27,89	4,22	0,30	37,48
Laguna 1 (SL1)			0,25	0,03			0,28
Laguna 2 (SL2)			0,07	0,12	0,04	0,01	0,24
Piedra Parada 1 (PP1)			0,06	0,25	0,67	0,03	1,01
Piedra Parada 2 (PP2)		0,00	1,39	1,81			3,20
Piedra Parada 3 (PP3)	0,04	0,21	2,69	1,25	0,02		4,22
SVAHT de Quebradas							
Asiento			0,17	2,31	0,32		2,80
Cienaga			0,08	0,45	0,07		0,61
Colorado			0,00	1,68	1,46	0,20	3,34
La Ola			4,90	9,26	10,59	0,73	25,47
Leoncito			4,33	6,95	12,16	22,78	46,22
Pastos Largos			3,85	20,64	10,25	7,37	42,10
Río Negro			0,32	1,96	0,20	0,49	2,97
Tinajas 1			0,00	0,37	0,10	0,12	0,59
Tordillos			0,03	0,35	0,43	0,15	0,96
Vertiente 2			1,05	1,55	0,68	0,42	3,70
						Total:	175,18

Tabla 10. Superficie (ha) utilizando rangos de clasificación común de NDVI en zonas Buffer (100m).

SVAHT	Superficie (ha) Vegetación Activa (Buffer 100m)						Total
	NDVI -1 a 0	NDVI 0 a 0.02	NDVI 0.02 a 0.1	NDVI 0.1 a 0.2	NDVI 0.2 a 0.3	NDVI 0.3 a 1	
SVAHT de Salares							
Pedernales (SP)	0,05	0,15	108,08	40,80	5,64	0,96	155,66
Laguna 1 (SL1)	2,03	0,19	3,00	0,03			5,25
Laguna 2 (SL2)	1,01	0,11	5,12	0,59	0,28	0,01	7,11
Piedra Parada 1 (PP1)	0,19	0,11	12,68	1,92	0,78	0,03	15,72
Piedra Parada 2 (PP2)	3,12	0,49	9,62	2,13			15,36
Piedra Parada 3 (PP3)	4,88	0,57	14,12	1,71	0,02		21,29
SVAHT de Quebradas							
Asiento		0,02	18,25	6,70	0,76	0,20	25,92
Ciénaga			7,25	1,65	0,07		8,97
Colorado			21,85	5,63	1,55	0,24	29,26
La Ola	0,01	0,00	49,57	11,64	10,62	0,73	72,58
Leoncito			50,31	9,28	12,18	22,78	94,56

SVAHT	Superficie (ha) Vegetación Activa (Buffer 100m)						Total
	NDVI -1 a 0	NDVI 0 a 0.02	NDVI 0.02 a 0.1	NDVI 0.1 a 0.2	NDVI 0.2 a 0.3	NDVI 0.3 a 1	
Pastos Largos			138,04	52,54	11,06	7,65	209,29
Río Negro			12,22	8,31	0,38	0,58	21,48
Tinajas 1			9,81	16,17	0,19	0,15	26,33
Tordillos			10,75	3,78	0,54	0,17	15,24
Vertiente 2			21,13	9,86	0,79	0,44	32,21
						Total:	756,25

5.2.4.2 Cartografías de índice NDVI clasificado (1ra Aprox), SVAHT de Salares

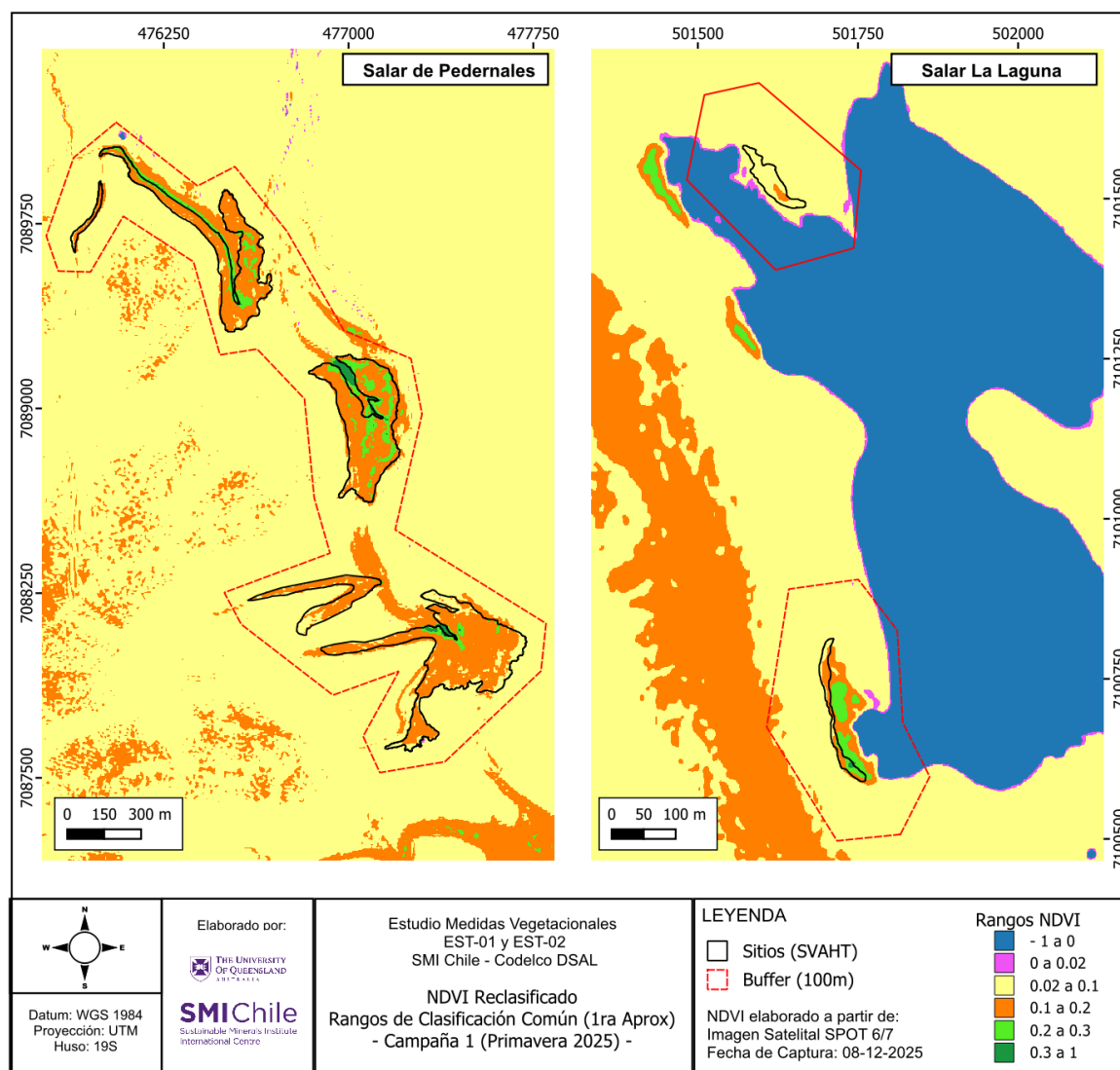


Figura 63. Índice NDVI reclasificado con rangos de clasificación común, para los SVAHT de Salar de Pedernales y Salar La Laguna (polígonos SL1 y SL2)

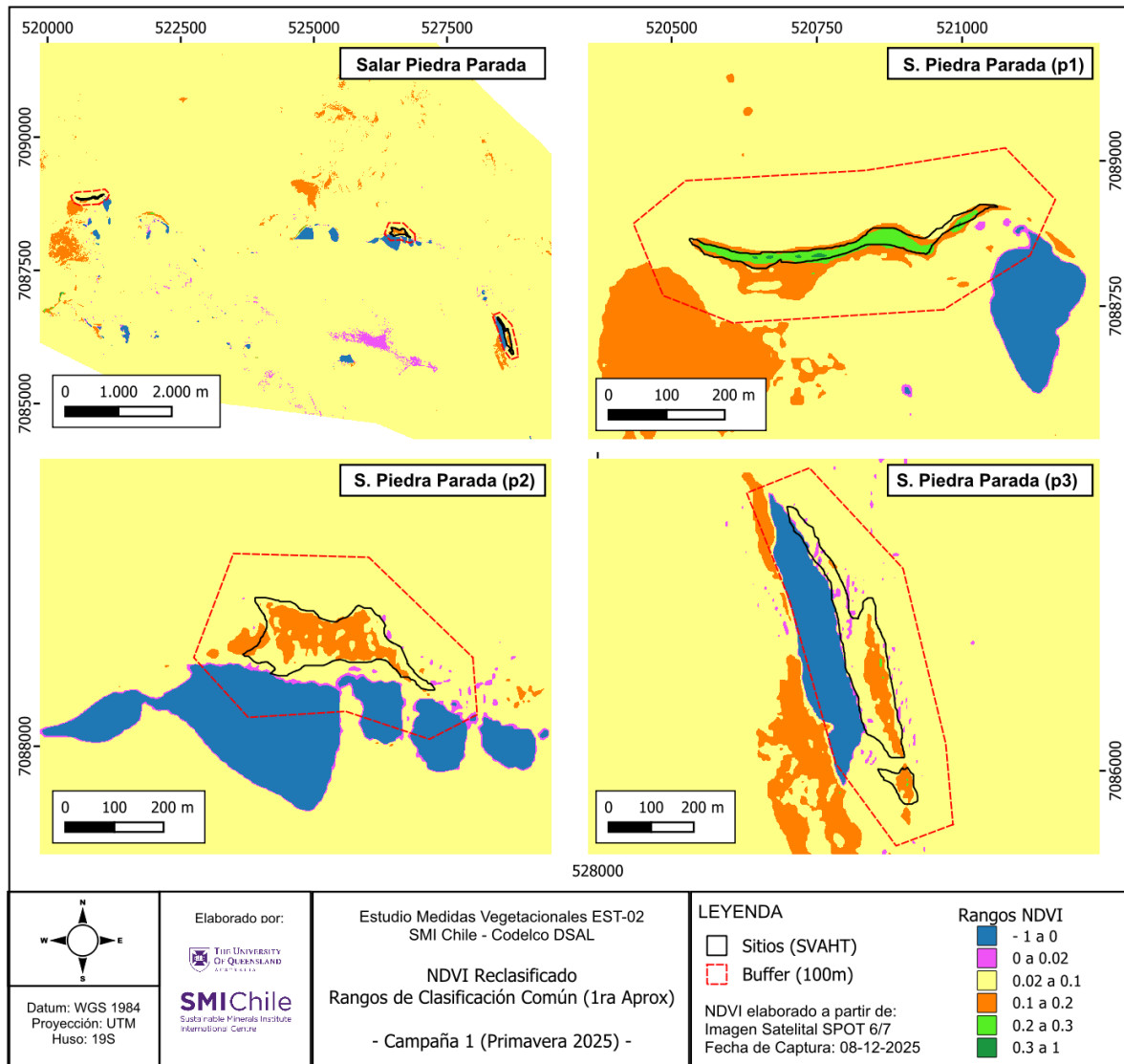


Figura 64. Índice NDVI reclasificado con rangos de clasificación común, para SVAHT Piedra Parada (Polígonos P1, P2 y P3)

5.2.4.3 Cartografías de índice NDVI clasificado (1ra Aprox), SVAHT de Quebradas

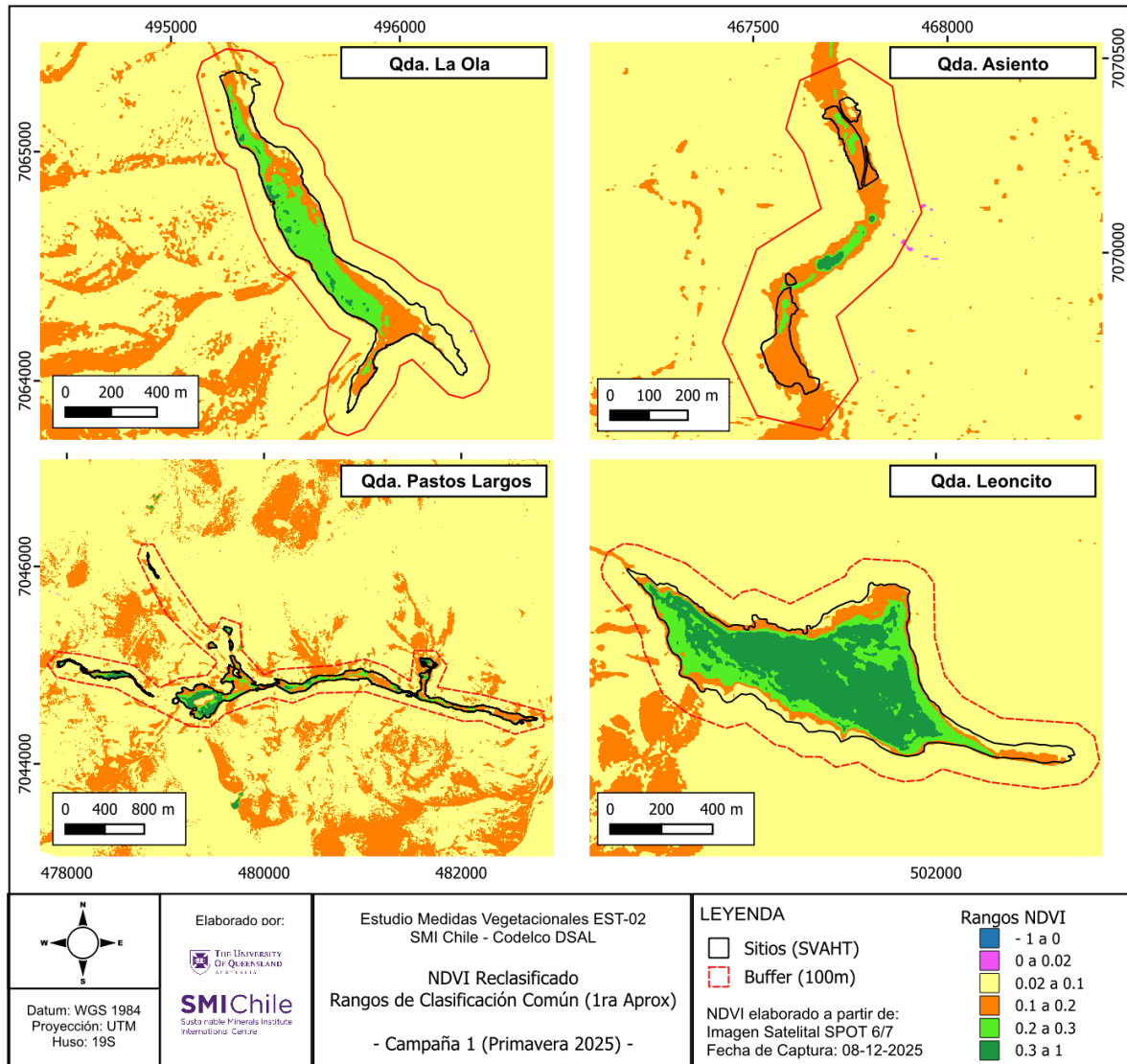


Figura 65. Índice NDVI reclasificado con rangos de clasificación común, para los SVAHT Quebradas La Ola, Asiento, Pastos Largos y Leoncito

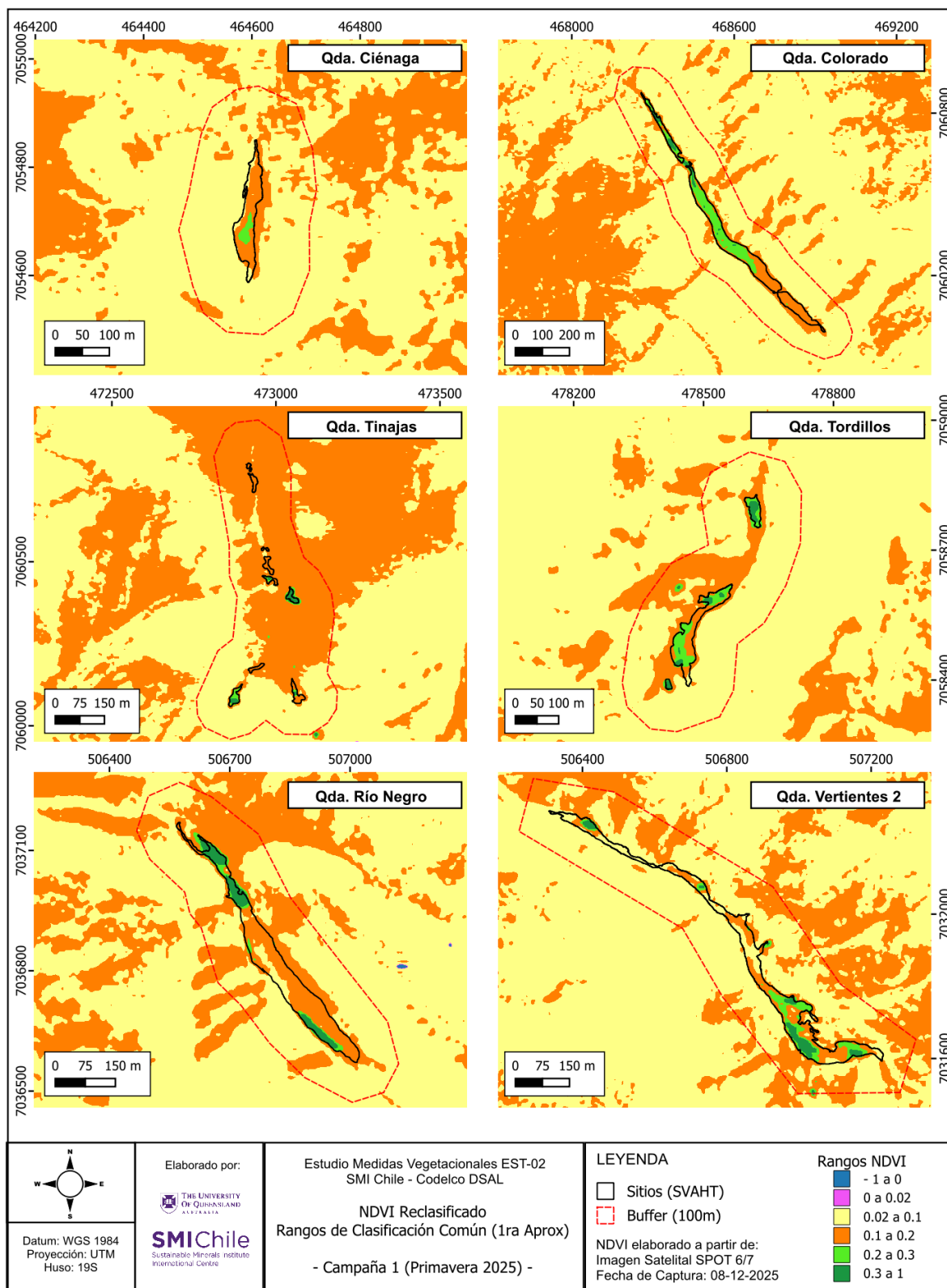


Figura 66. Índice NDVI reclasificado con rangos de clasificación común, para los SVAHT Quebradas Ciénaga, Colorado, Tinajas, Tordillos, Río Negro y Vertiente 2.

5.2.4.4 Superficies (ha) a partir de umbrales mínimos específicos por SVAHT para la clasificación de NDVI

La siguiente Tabla 11 contiene los resultados de los cálculos de superficies (en hectáreas) con vegetación en función de la clasificación obtenida mediante umbrales mínimos de NDVI (Tabla 5), incluyendo los cálculos de superficies acotando a los polígonos de SVAHT y a los polígonos correspondientes a las zonas buffer (100 m; estimación que incluye los polígonos de SVAHT). Mediante esta segunda aproximación, se mantiene como observación la diferencia entre SVAHT de Salares en comparación con SVAHT de Quebradas, donde estas últimas presentan mayores superficies con vegetación en las categorías con valores más altos de NDVI. No obstante, debido a que la determinación de la vegetación activa con esta segunda aproximación depende de umbrales mínimos como criterio de corte, se aprecia un aumento general de las superficies con vegetación activa en todos los SVAHT. Esto se puede observar también analizando las Figura 67 a Figura 82, en comparación con los respectivos SVAHT y NDVI con reclasificación común dispuestos en las Figura 63 a Figura 66. En el caso de SVAHT de Salares, destaca el SVAHT Salar de Pedernales con mayores superficies de vegetación activa, mientras que en el caso de los SVAHT de Quebradas presentan mayores superficies con vegetación activa los SVAHT de Leoncito, Pastos Largos y La Ola; en ambos casos, situación determinada por el tamaño de los polígonos que conforman los SVAHT.

Tabla 11. Superficie (ha) utilizando umbrales mínimos de clasificación de NDVI.

SVAHT	Superficie (ha) Vegetación Activa (Buffer 100m)			Total (ha)	Superficie (ha) Vegetación Activa (Polígono SVAHT)			Total (ha)
	1	2	3		1	2	3	
Pedernales	82,98	28,11	44,56	155,65	0,87	5,68	30,93	37,48
Laguna 1	2,33	2,23	0,69	5,25	0,00	0,07	0,20	0,28
Laguna 2	6,15	0,18	0,78	7,11	0,07	0,01	0,17	0,24
La Ola	41,54	19,95	11,07	72,57	3,23	11,20	11,05	25,47
Piedra Parada 1	13,35	0,84	1,52	15,72	0,08	0,05	0,88	1,01
Piedra Parada 2	12,22	0,92	2,22	15,36	0,62	0,69	1,89	3,20
Piedra Parada 3	14,85	2,28	4,16	21,28	1,19	0,42	2,60	4,22
Asiento	19,51	2,20	4,21	25,92	0,33	0,66	1,81	2,80
Cienaga	4,44	4,01	0,53	8,97	0,02	0,20	0,39	0,61
Pastos Largos	151,98	31,74	25,57	209,29	5,49	12,88	23,73	42,10
Río Negro	1,84	13,19	6,45	21,48	0,01	0,57	2,38	2,97
Tinajas 1	12,99	12,88	0,46	26,32	0,06	0,28	0,25	0,59
Tordillos	14,09	0,37	0,79	15,25	0,16	0,17	0,63	0,96
Vertientes 2	0,63	26,71	4,87	32,21	0,03	1,42	2,26	3,70
Leoncito	56,74	18,03	19,80	94,56	8,58	17,84	19,80	46,22
Colorado	15,57	11,51	2,17	29,26	0,00	1,35	2,00	3,34
Total:				756,22	Total:			175,18

1: Superficies con valores NDVI bajo umbral mínimo absoluto; 2: Superficies con valores NDVI entre umbral mínimo absoluto y umbral de medianas; 3: Superficies con valores NDVI sobre umbral de mediana de los mínimos.

5.2.4.5 Cartografías de índice NDVI clasificado (2da Aprox), SVAHT de Salares

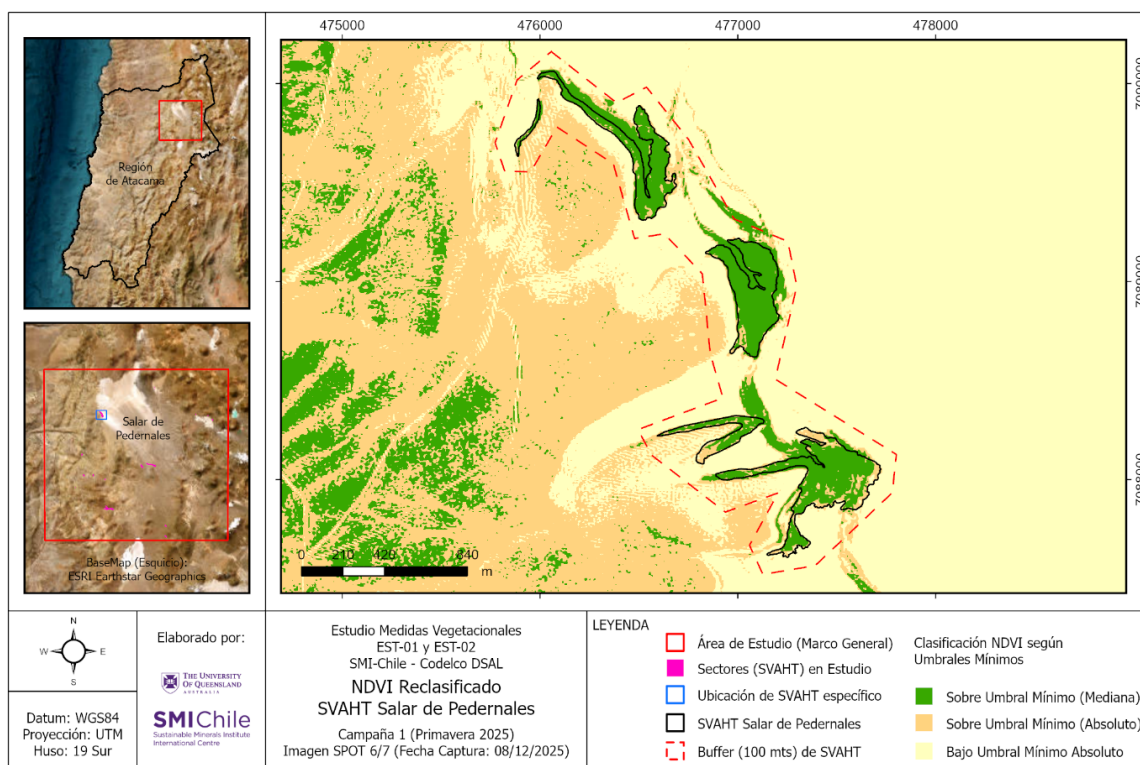


Figura 67. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Salar de Pedernales

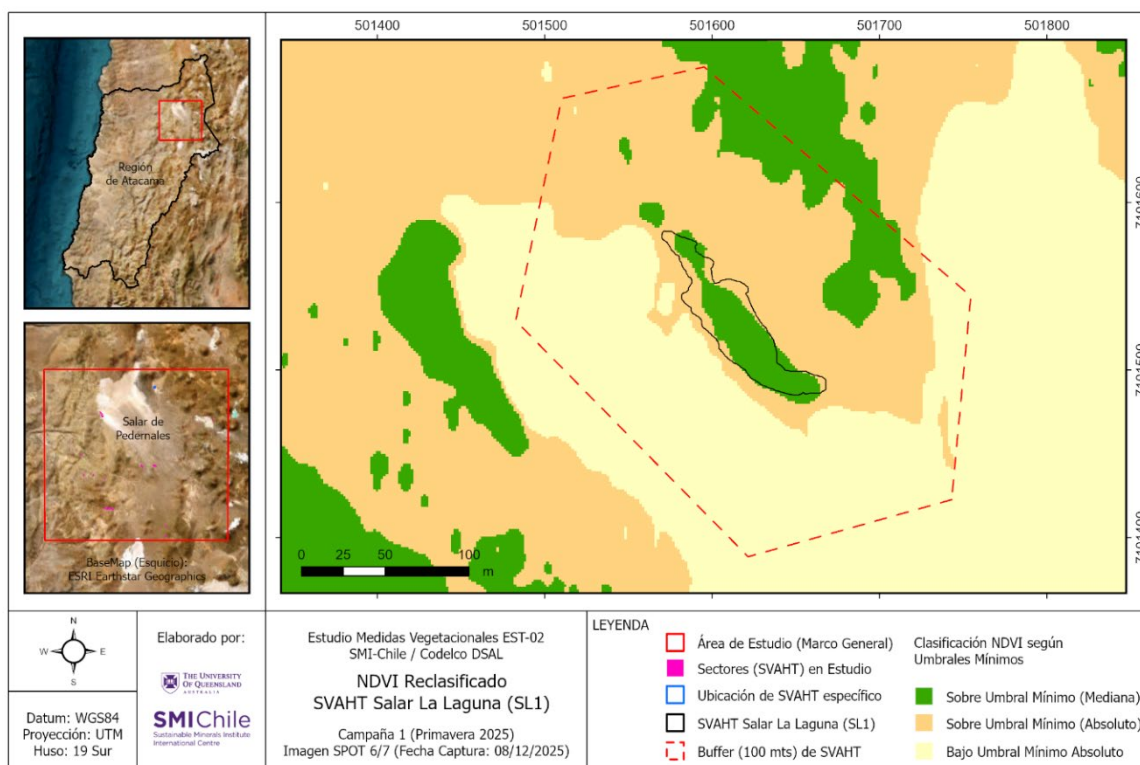


Figura 68. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Salar La Laguna (SL1)

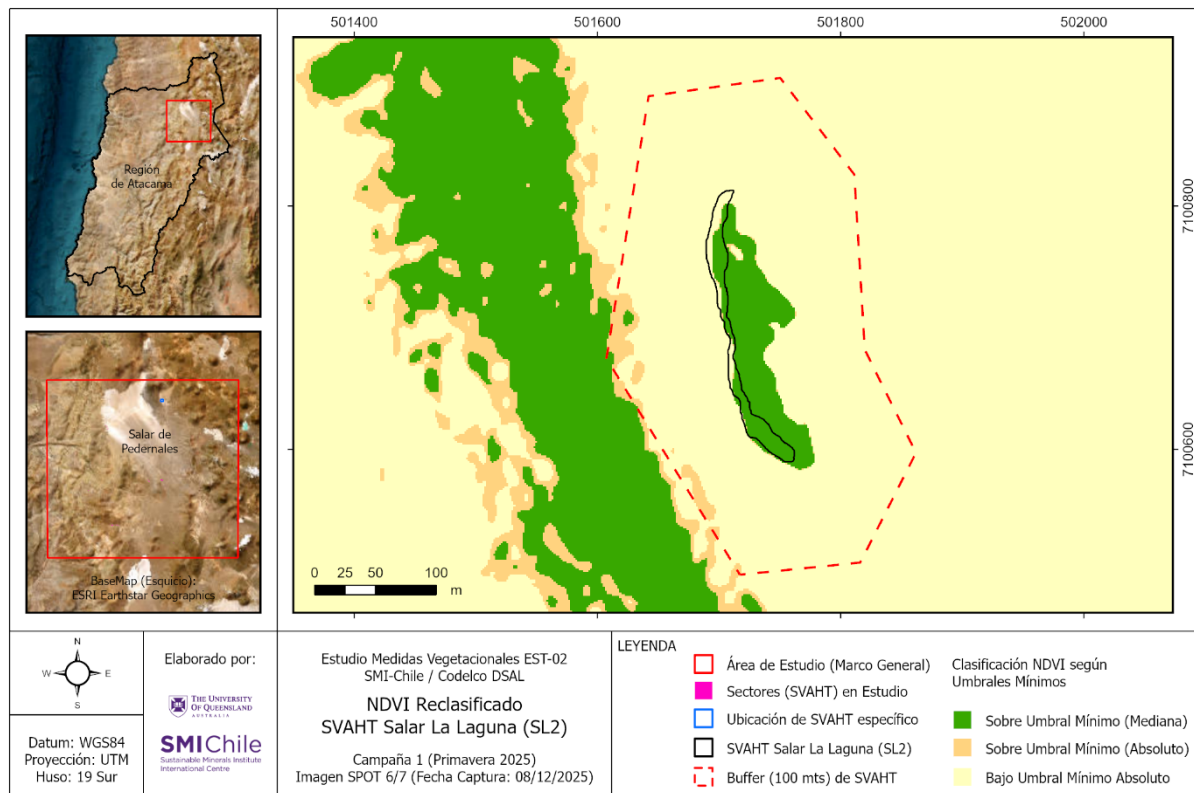


Figura 69. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Salar La Laguna (SL2)

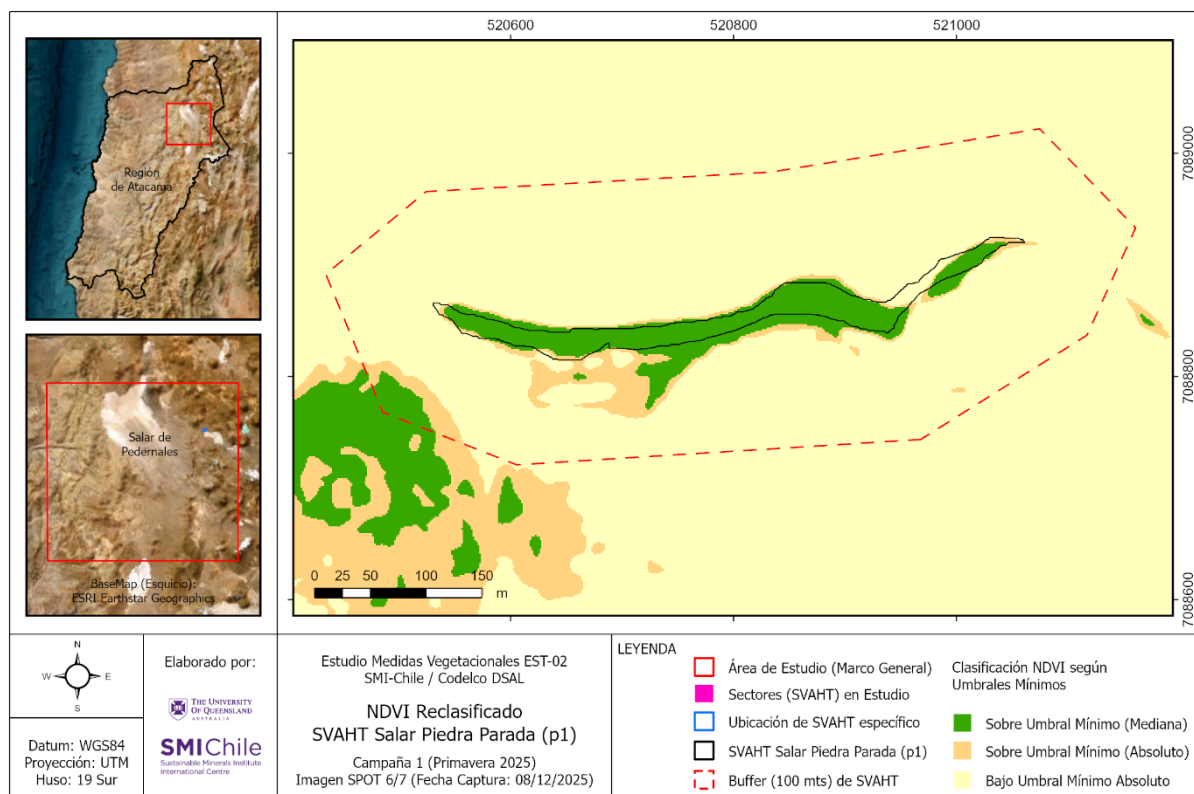


Figura 70. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Salar Piedra Parada (P1)

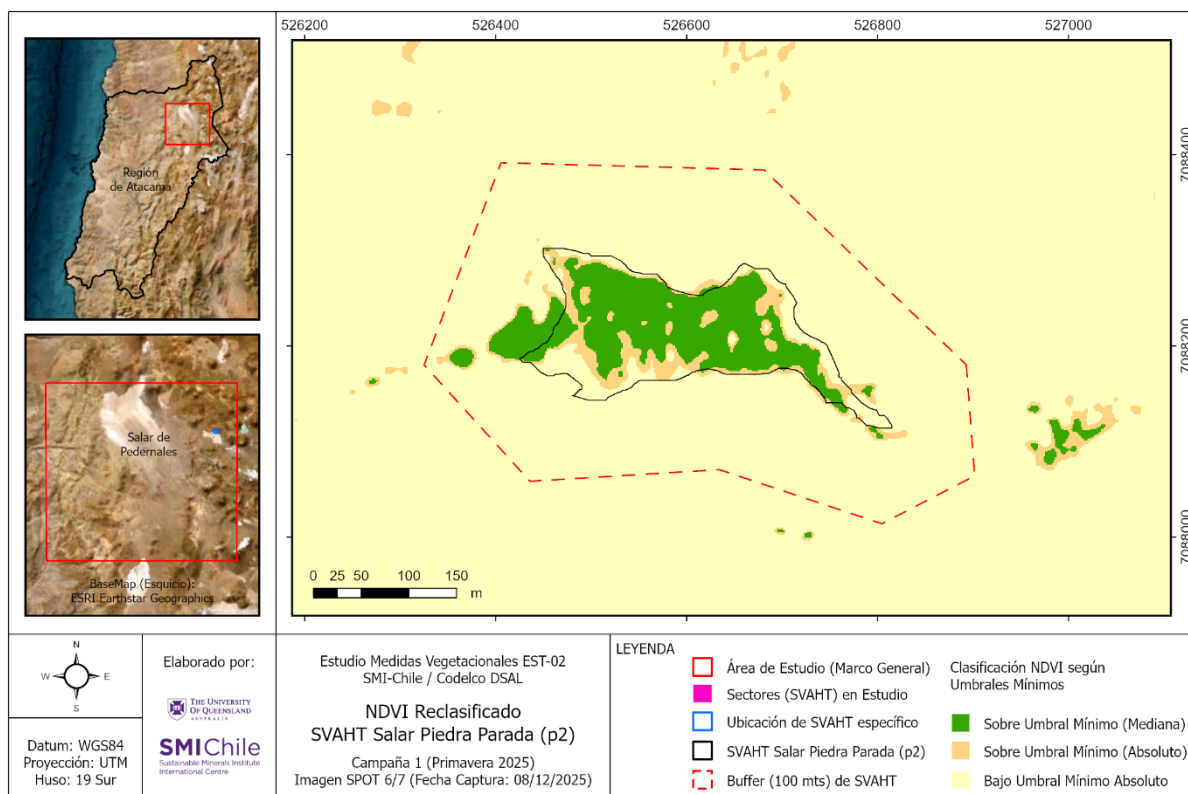


Figura 71. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Salar Piedra Parada (P2)

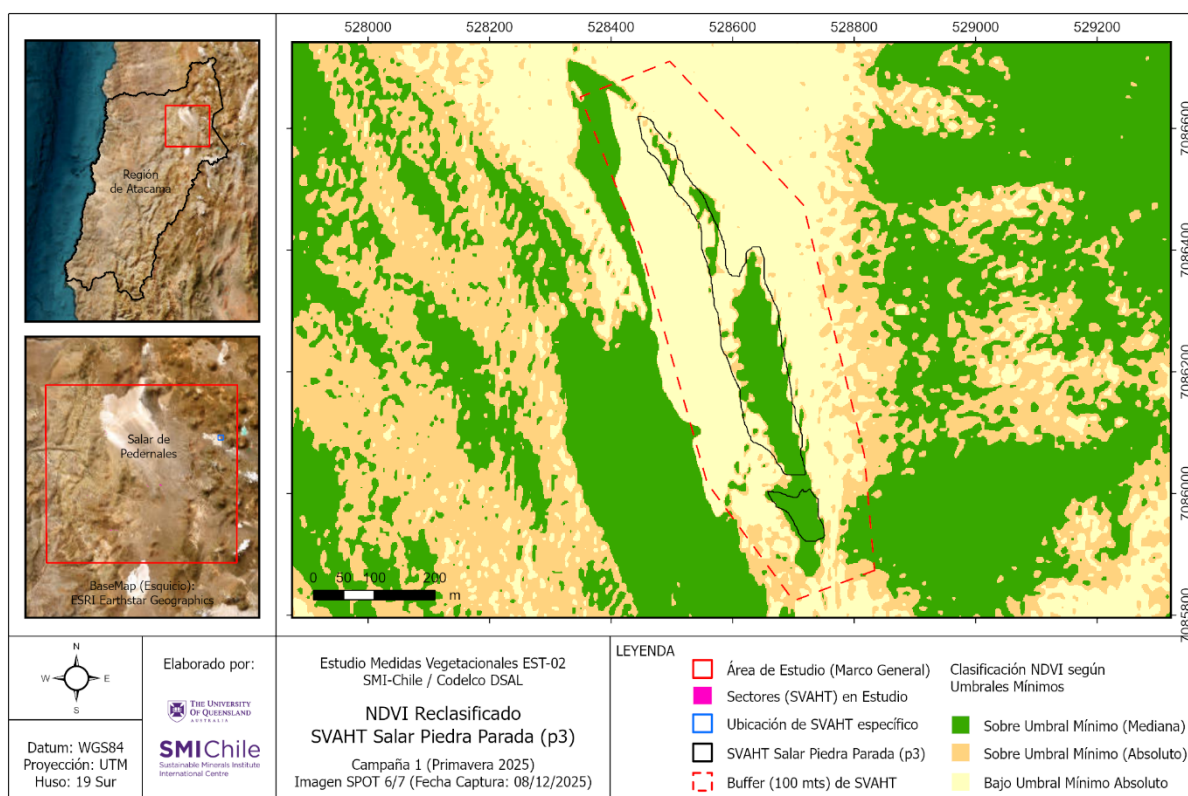


Figura 72. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Salar Piedra Parada (P3)

5.2.4.6 Cartografías de índice NDVI clasificado (2da Aprox), SVAHT de Quebradas

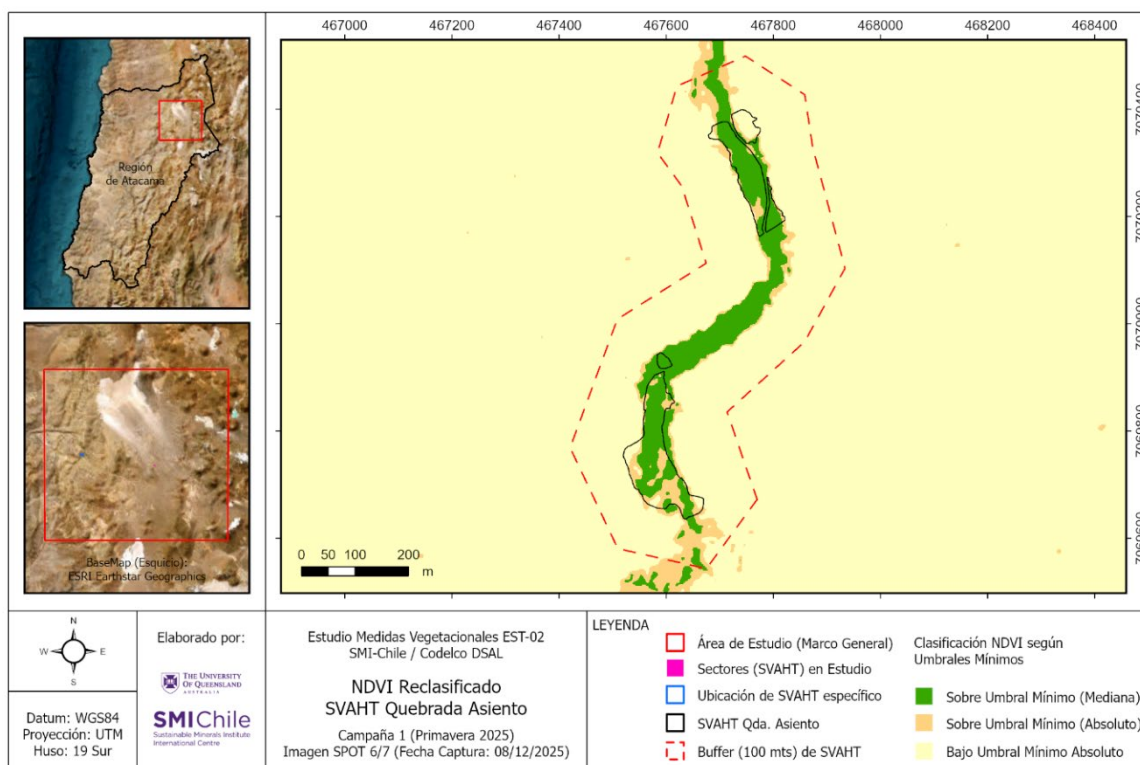


Figura 73. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Quebrada Asiento

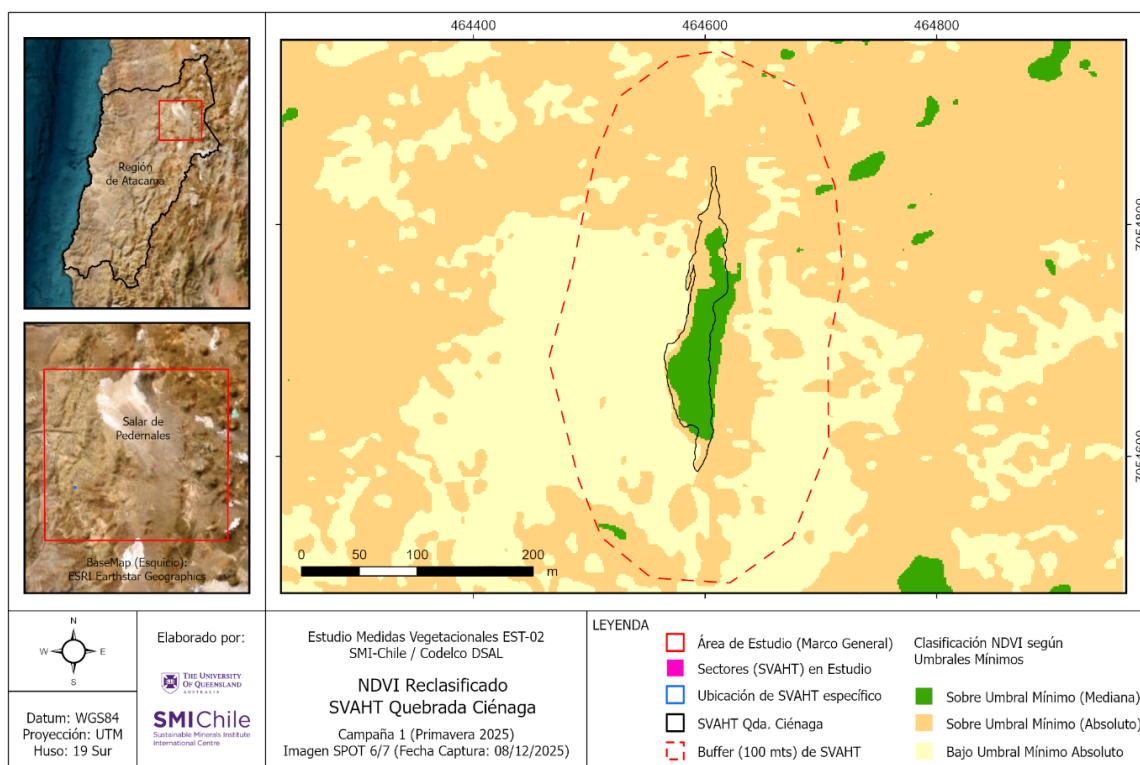


Figura 74. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Quebrada Ciénaga

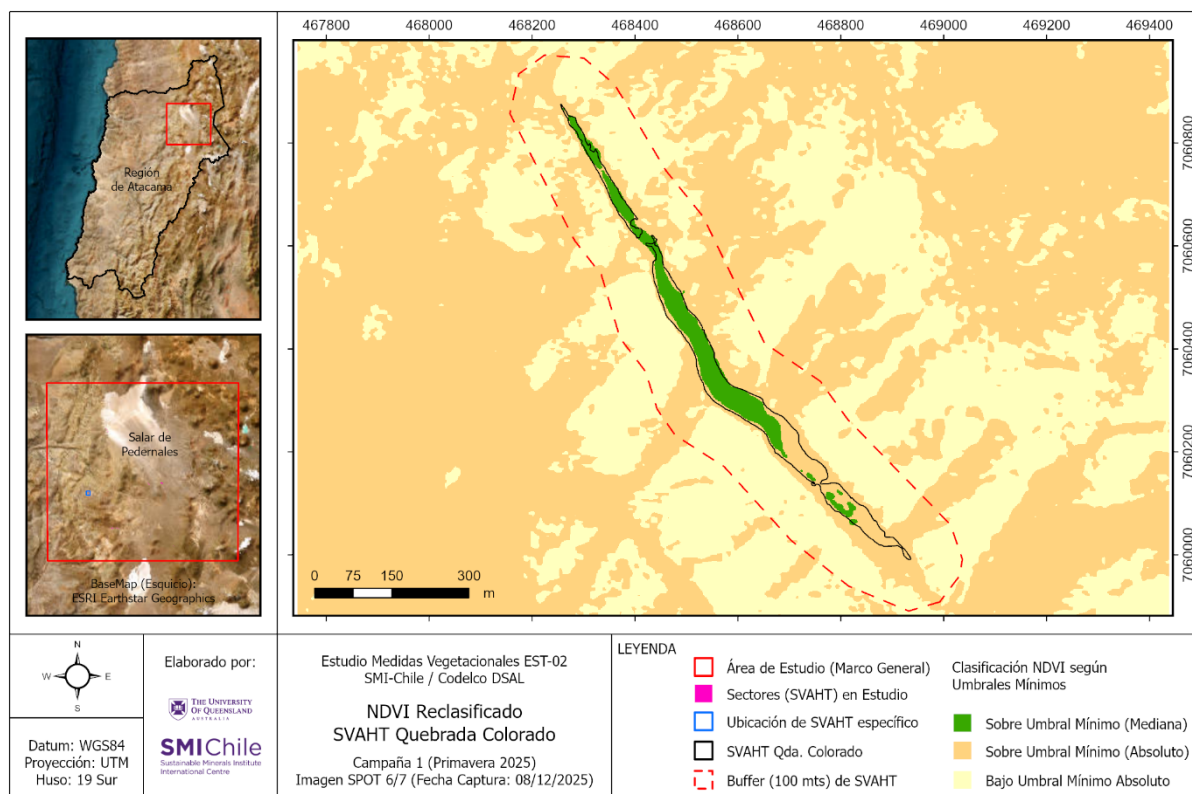


Figura 75. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Quebrada Colorado

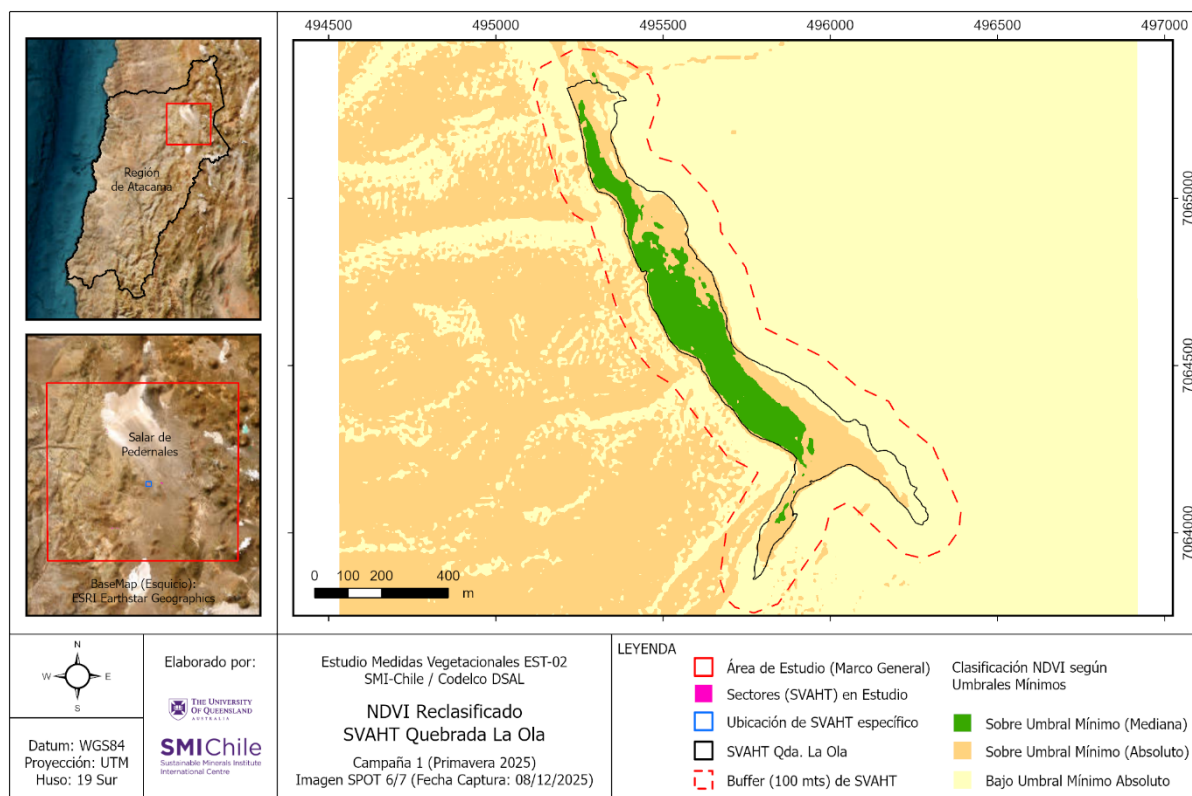


Figura 76. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Cabecera sur rio La Ola

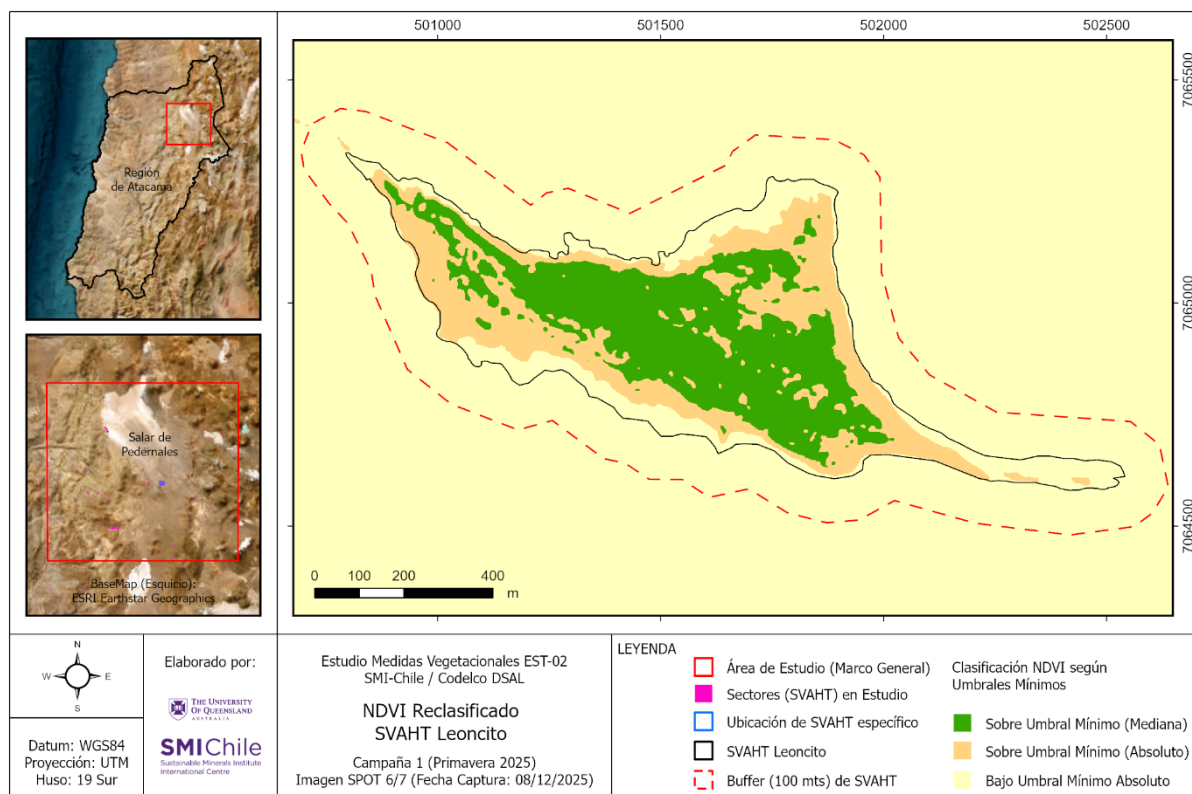


Figura 77. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Quebrada Leoncito

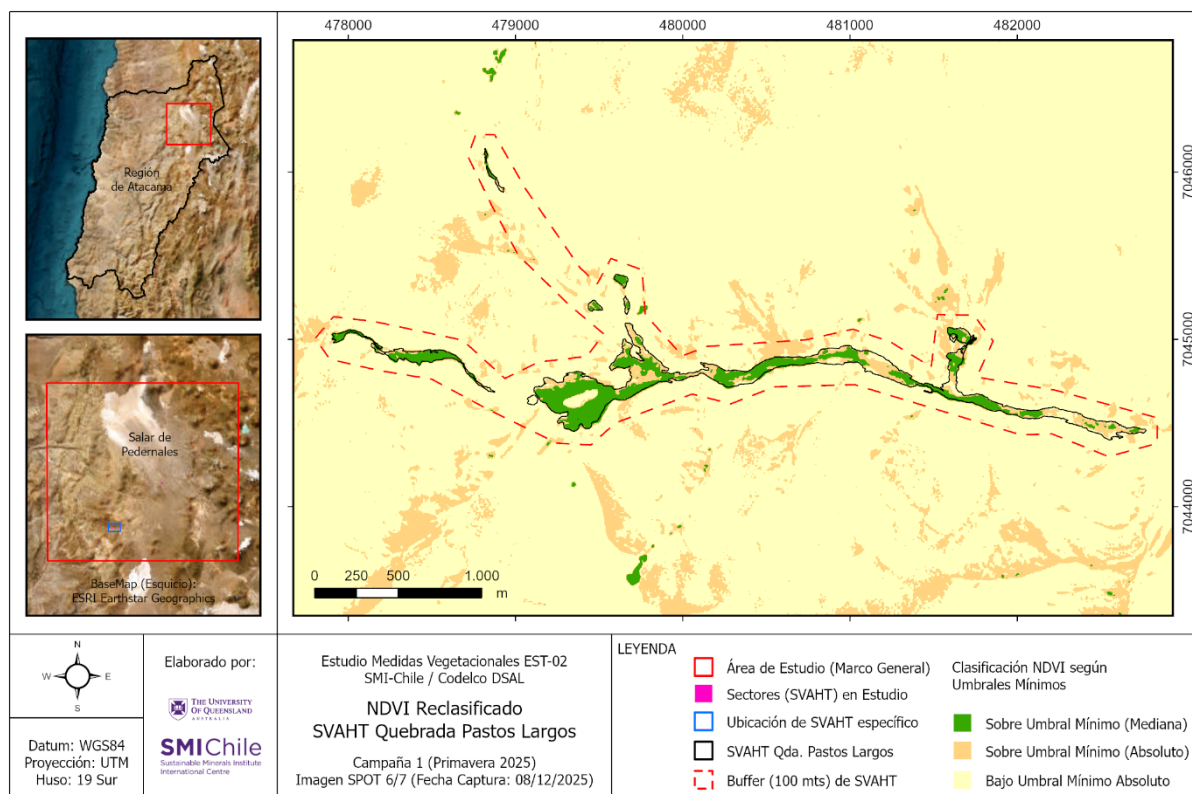


Figura 78. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Quebrada Pastos Largos

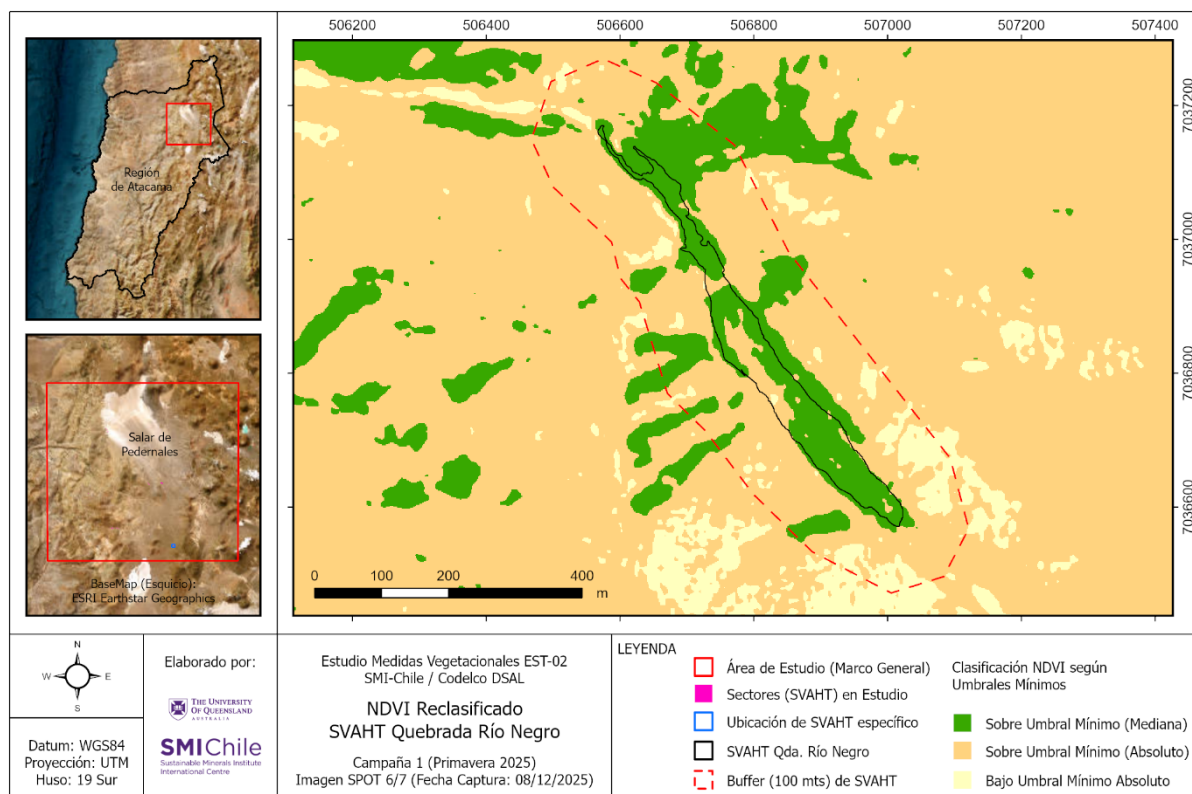


Figura 79. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Quebrada Río Negro

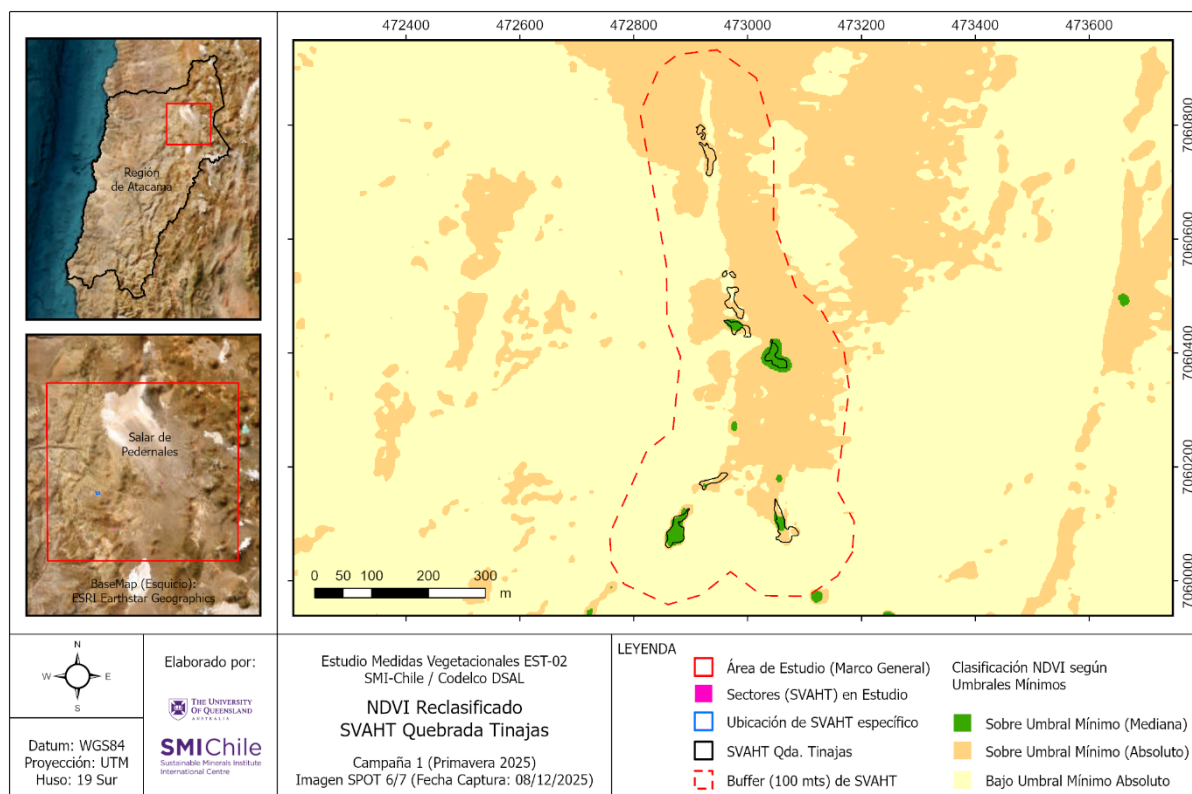


Figura 80. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Quebrada Tinajas

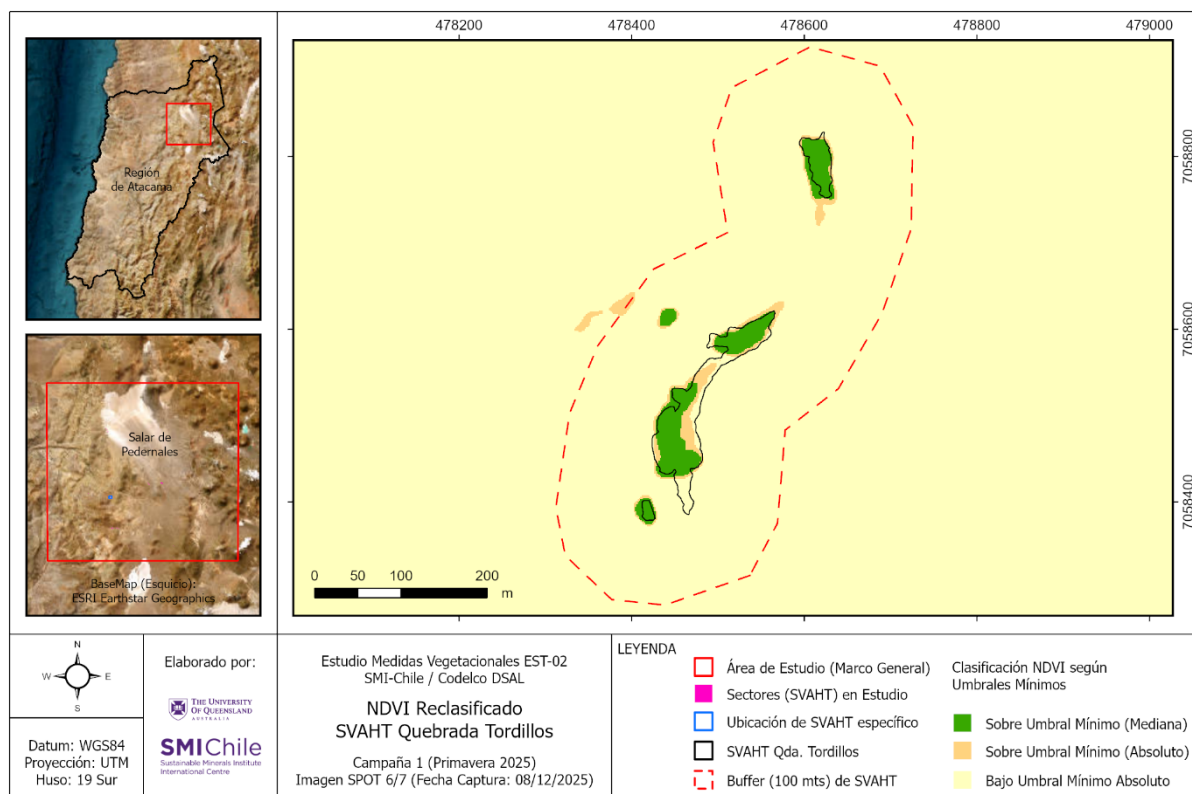


Figura 81. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Quebrada Tordillos

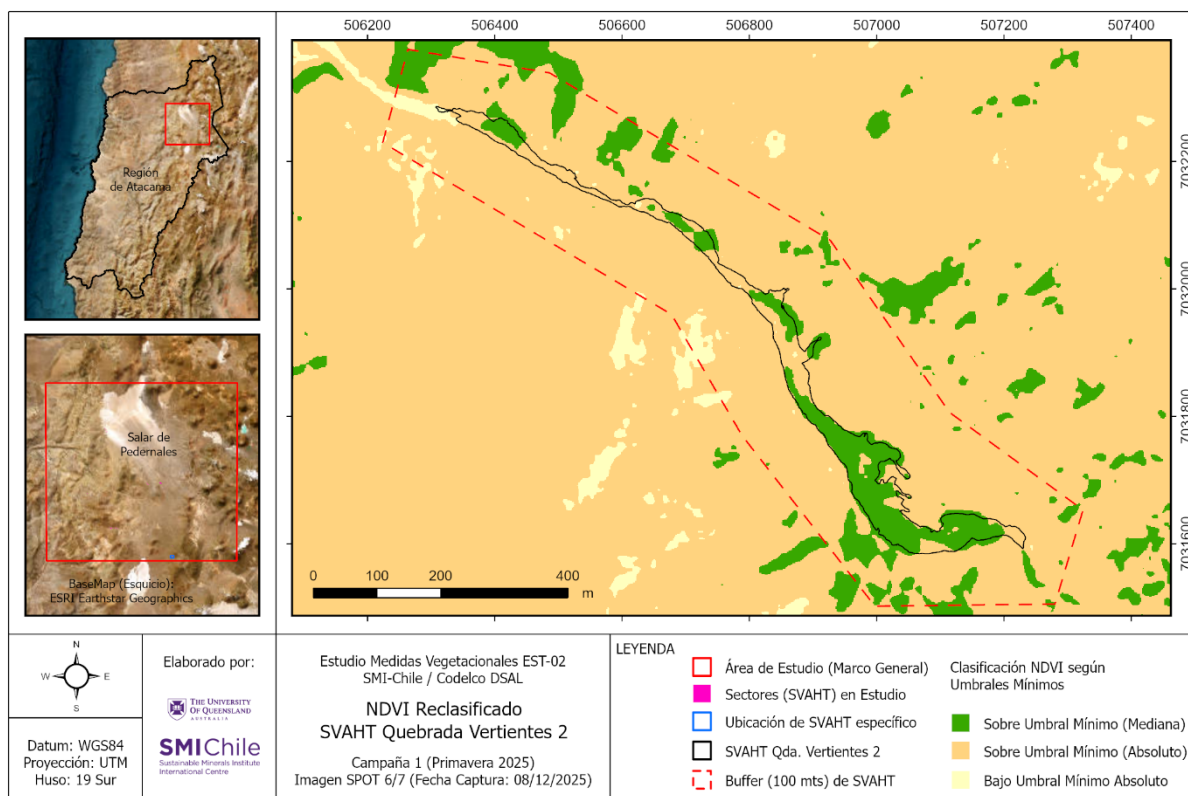


Figura 82. Índice NDVI reclasificado según umbrales mínimos, SVAHT Quebrada Vertiente 2

5.2.5 Estimación de áreas (ha) cuerpos de agua a partir de clasificación de NDWI

5.2.5.1 Superficies (ha) cuerpos de agua según rangos de clasificación común de NDWI

Las siguientes Tabla 12 a Tabla 15 contienen los resultados de los cálculos de superficies (en hectáreas) correspondientes a cuerpos (espejo) de agua, en función de los rangos de clasificación común de NDWI correspondientes a la Tabla 6. Dado que al interior de los polígonos de SVAHT no se identifican sectores (píxeles) con valores de NDWI sobre cero (indicador de presencia de agua, cuerpos o espejos de agua superficiales), los resultados expuestos en los cuadros siguientes corresponden a los cuerpos de agua identificados y medibles en términos de superficie, que se encuentran aledaños y vinculados a los polígonos de SVAHT, lo cual ocurre fundamentalmente en los SVAHT Salar La Laguna y Salar Piedra Parada, tal como se observa en las Figura 83 y Figura 84. Para efectos de acotar la contabilización y medición de cuerpos de agua observables, luego de un análisis preliminar de los resultados de la clasificación de NDWI y conforme a la aplicación de un criterio de experto, se reportan en este informe todos aquellos cuerpos de agua identificables (categorías 4 y 5, correspondientes a valores de NDWI sobre cero) que se encontraron hasta 750 m de distancia desde los polígonos de SVAHT, correspondiente a la distancia promedio de todos los polígonos de estos SVAHT en donde se concentra la mayor cantidad de cuerpos de agua de mayor tamaño y medibles como producto de aplicación de la clasificación de NDWI.

De los resultados obtenidos, destaca como cuerpo (espejo) de agua con mayor superficie al ubicado al Este de los polígonos de SVAHT Salar La Laguna, el cual abarca una superficie de 38,2 hectáreas (Código SA-SL-1; ver Tabla 12). También destacan los cuerpos de agua aledaños a los polígonos de SVAHT Salar Piedra Parada, que en su conjunto suman un total de 13 cuerpos (espejos) de agua. De estos, el cuerpo de agua de mayor tamaño corresponde al código CA-P2-2, con 6,45 ha, vinculado al polígono P2.

Tabla 12. Superficie (ha) de cuerpos de agua vinculados a Salar La Laguna utilizando rangos de clasificación común de NDWI.

	Código Rango NDWI	Superficie (ha) por Rangos NDWI	Superficie Total (ha)
CA-SL-1	4	6,40	38,20
	5	31,80	
CA-SL-2	4	3,53	4,75
	5	1,22	

Tabla 13. Superficie (ha) de los cuerpos de agua vinculados a Salar Piedra Parada (P1) utilizando rangos de clasificación común de NDWI.

	Código Rango NDWI	Superficie (ha) por Rangos NDWI	Superficie Total (ha)
CA-P1-1	4	1,05	2,57
	5	1,52	
CA-P1-2	4	0,54	0,54
	5		
CA-P1-3	4	0,36	0,38
	5	0,02	
CA-P1-4	4	1,12	1,24
	5	0,12	

Tabla 14. Superficie (ha) de los cuerpos de agua vinculados a Salar Piedra Parada (P2) utilizando rangos de clasificación común de NDWI.

	Código Rango NDWI	Superficie (ha) por Rangos NDWI	Superficie Total (ha)
CA-P2-1	4	0,40	1,02
	5	0,62	
CA-P2-2	4	1,03	6,45
	5	5,42	
CA-P2-3	4	0,41	0,91
	5	0,49	
CA-P2-4	4	0,26	1,12
	5	0,86	
CA-P2-5	4	0,32	0,66
	5	0,34	
CA-P2-6	4	0,20	0,21
	5	0,01	

Tabla 15. Superficie (ha) de los cuerpos de agua vinculados a Salar Piedra Parada (P3) utilizando rangos de clasificación común de NDWI.

	Código Rango NDWI	Superficie (ha) por Rangos NDWI	Superficie Total (ha)
CA-P3-1	4	0,16	0,16
	5		
CA-P3-2	4	0,22	0,32
	5	0,10	
CA-P3-3	4	1,37	4,77
	5	3,40	

5.2.5.2 Cartografías de índice NDWI clasificado, SVAHT de Salares

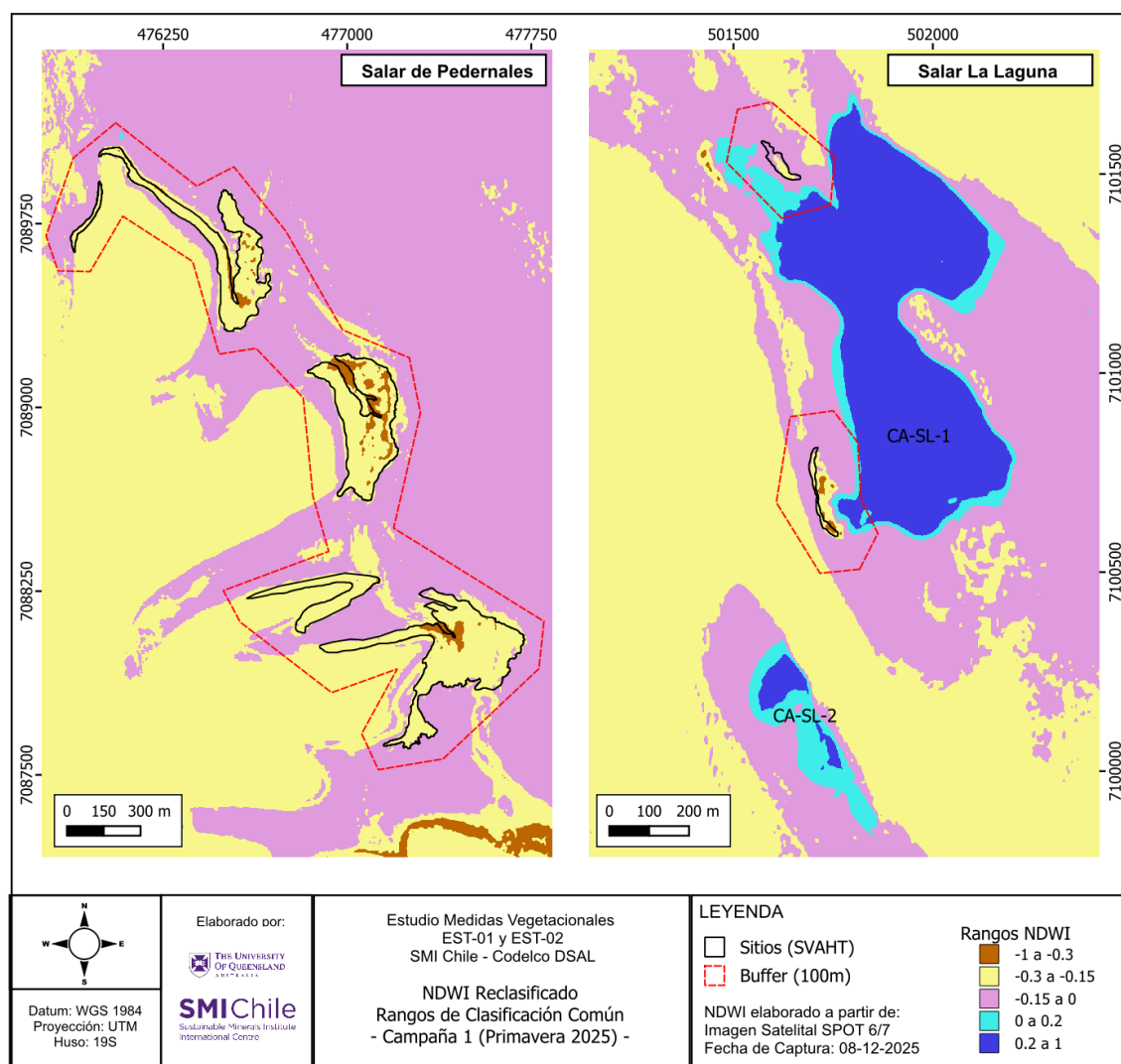


Figura 83. Índice NDWI reclasificado con rangos de clasificación común, SVAHT Salar de Pedernales y SVAHT Salar La Laguna

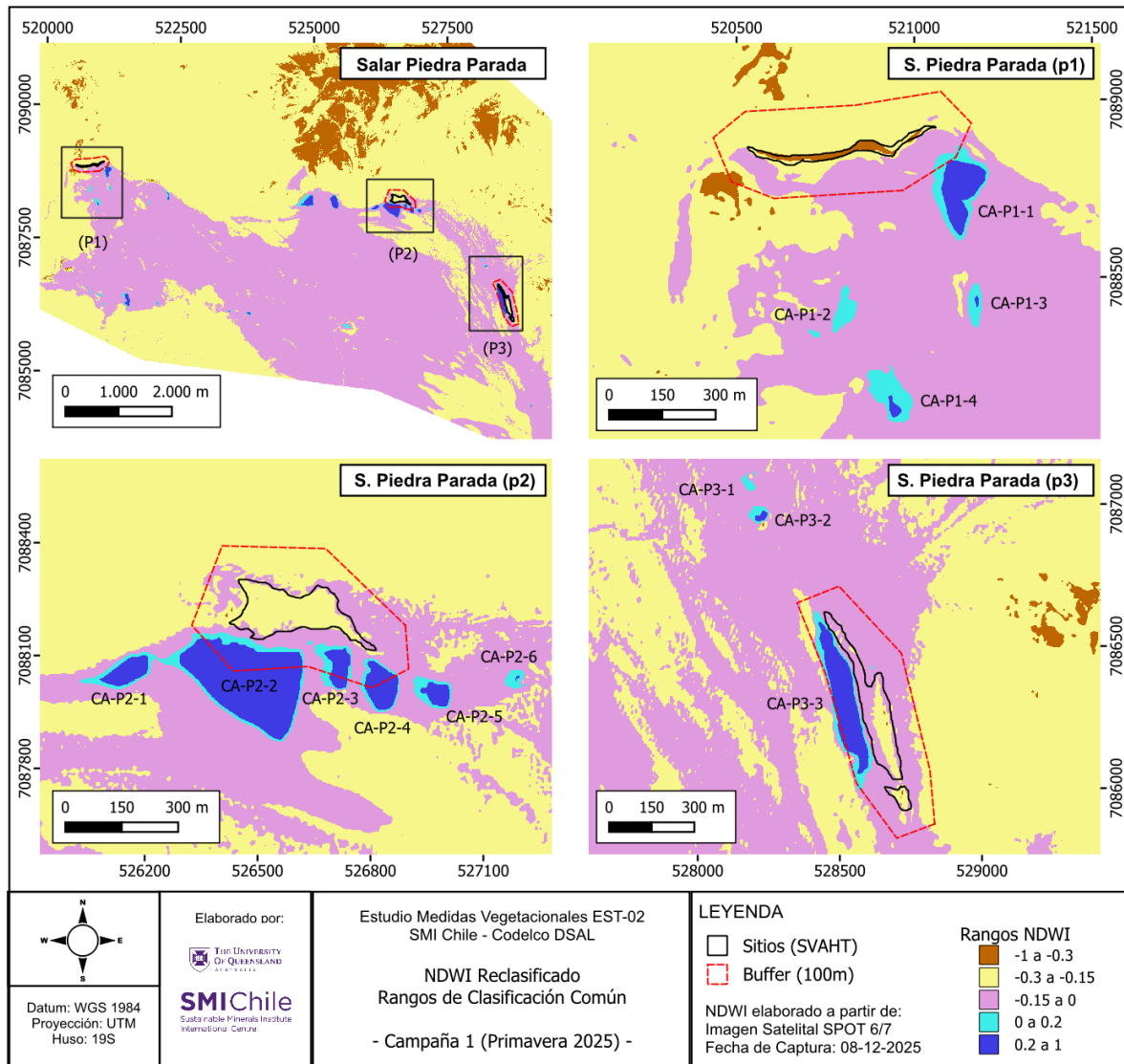


Figura 84. Índice NDWI reclasificado con rangos de clasificación común, SVAHT Piedra Parada

5.2.5.3 Cartografías de índice NDWI clasificado, SVAHT de Quebradas

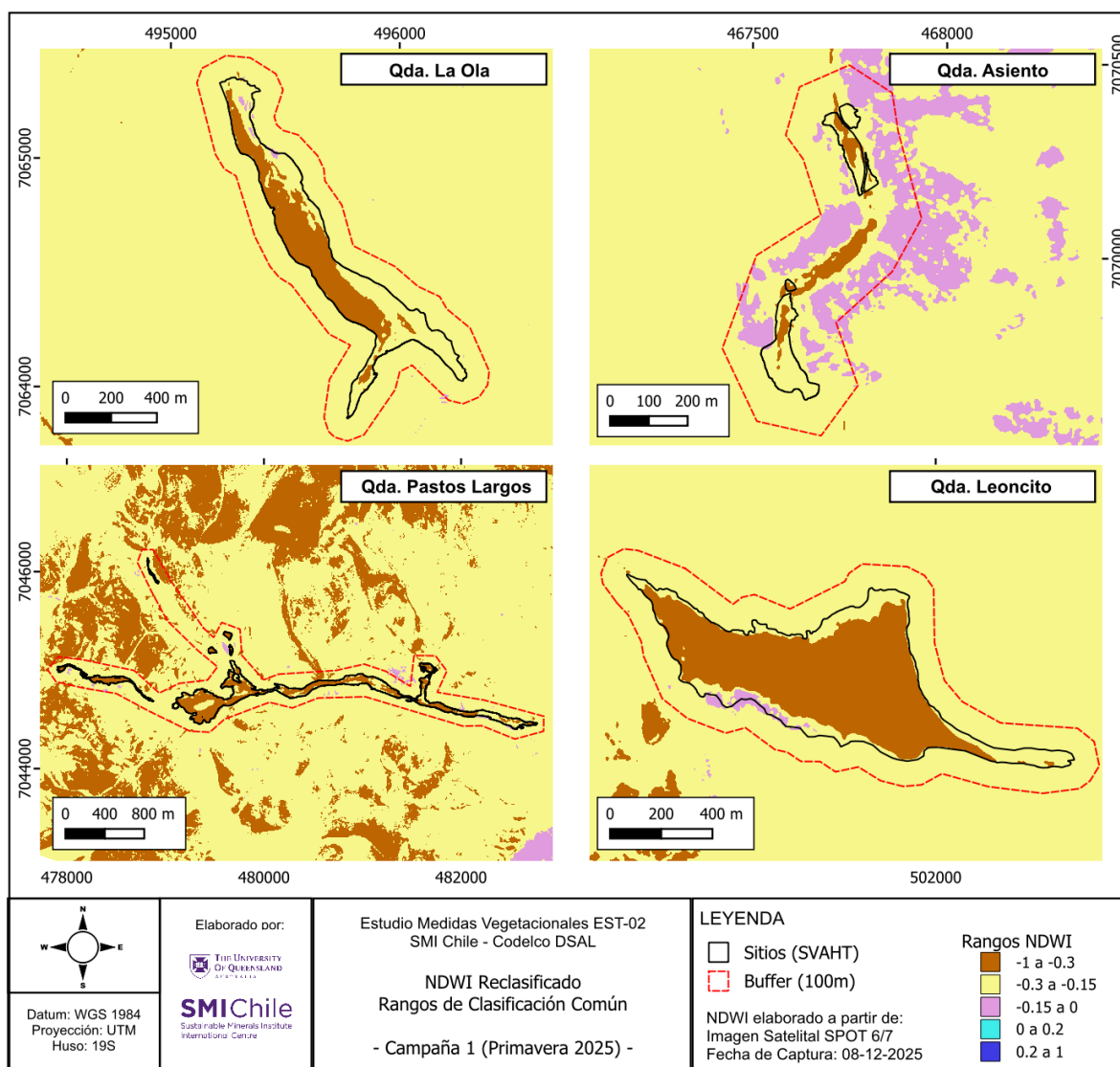


Figura 85. Índice NDWI reclasificado con rangos de clasificación común, para los SVAHT de Quebradas La Ola, Asiento, Pastos Largos y Leoncito

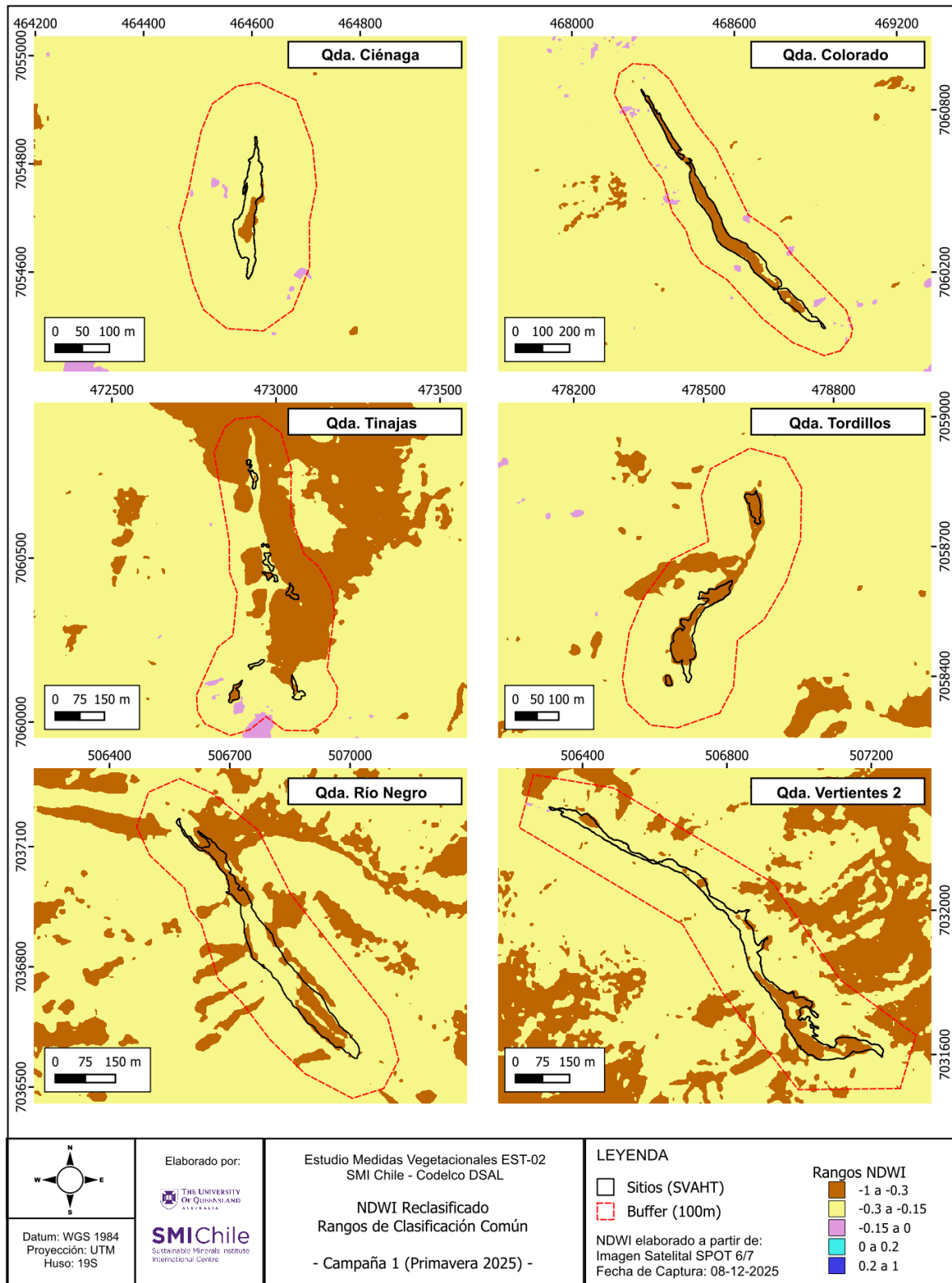


Figura 86. Índice NDWI reclasificado con rangos de clasificación común, para los SVAHT de Quebradas Ciénaga, Colorado, La Tinajas, Tordillos, Río Negro y Vertiente 2

6. Discusiones y conclusiones

El análisis de las imágenes satelitales multiespectrales SPOT obtenidas, corregidas, calibradas y validadas, para diciembre 2025, mediante el índice NDVI permite visualizar, identificar y estimar las superficies con vegetación activa en el área de estudio correspondiente a los polígonos de SVAHT de Salares y Quebradas. Las diferentes visualizaciones de la vegetación, ya sea mediante cartografías de imágenes falso color convencional, NDVI y clasificaciones de NDVI, permiten corroborar una alta concordancia entre los límites actualmente existentes de los polígonos de SVAHT con respecto a la presencia de vegetación en la superficie terrestre según se observa en los diferentes productos satelitales. Existen algunos polígonos de SVAHT que se encuentran levemente desplazados (posición geográfica y/o delimitación) con respecto a lo observable en los productos satelitales desarrollados para este informe, tales como SVAHT de Quebrada Ciénaga y el polígono SL2 de SVAHT Salar La Laguna, ante lo cual se sugiere la realización de ajustes en la delimitación de estos polígonos conforme avanza el estudio y monitoreo de estos SVAHT para una mejor cobertura de los sectores con vegetación existentes en estos lugares. En estos casos, la incorporación en el análisis de las zonas buffer (100 m alrededores de los polígonos de SVAHT) permite incluir aquellos sectores con vegetación que se encuentran actualmente fuera de los límites de los polígonos oficiales de SVAHT, lo cual posibilita una mejor comprensión, integración y análisis de los SVAHT como ecosistemas de humedales altoandinos que no se limitan solamente a la presencia de vegetación activa, sino que involucran también otros elementos o componentes ambientales circundantes y relevantes a considerar.

El análisis del índice NDVI permite advertir en general mayores valores de NDVI en SVAHT de Quebradas en comparación con SVAHT de Salares. Entre los SVAHT de Salares se destaca el SVAHT del Salar de Pedernales con mayores valores de NDVI, mientras que entre los SVAHT de Quebradas destacan los SVAHT de Leoncito, Tordillos, Colorado, Pastos Largos y Tinajas por este mismo concepto. Por su parte, en términos de superficies (en hectáreas) de la vegetación activa, destacan los SVAHT de Salar de Pedernales y los SVAHT de Leoncito, Pastos Largos y La Ola.

La estimación o cálculo de superficies con vegetación activa difiere entre las dos aproximaciones realizadas en este informe, de modo que la aproximación en base a umbrales mínimos de NDVI (específicos para cada SVAHT, identificados a partir de los transectos para el levantamiento y caracterización de la componente flora y fauna *in situ*) presenta superficies mayores de vegetación activa en comparación con el método a partir de rangos de clasificación común (para todos los SVAHT). Esta observación se explica debido a que, la utilización de umbrales mínimos de NDVI para la identificación de la vegetación activa, amplía la consideración de píxeles de las imágenes NDVI para el cálculo de superficies en comparación con el método de clasificación por rangos comunes. En este sentido, se sugiere la utilización de los resultados de la primera aproximación para el cálculo de superficies de vegetación activa a partir de rangos de clasificación común para todos los SVAHT, como una aproximación que permite comparar entre el conjunto de SVAHT (es decir, comparar entre SVAHT de Salares y de Quebradas, o dentro de una sola tipología) ya que esta aproximación posibilita visualizar sectores que presentan mayor vigorosidad de la vegetación independiente del tipo de flora o vegetación específica existente, cuestión que puede estar explicando las diferencias entre los valores de NDVI alcanzados. Por su parte, se sugiere la utilización de los resultados de la segunda aproximación para el cálculo de superficies basada en umbrales mínimos de NDVI específicos e identificados para cada SVAHT, como una manera de estudiar las características y valores de vigorosidad, la flora y vegetación de cada SVAHT de

manera específica. Esto ya que los umbrales permiten visualizar de mejor manera la vegetación específica existente en cada SVAHT.

En cuanto a los valores umbrales determinados para las clasificaciones de NDVI utilizadas en este informe, se encuentra que los valores de umbrales utilizados son consistentes con lo reportado en literatura científica y lo reportado en informes técnicos precedentes para el área de estudio. Los rangos de NDVI para la clasificación común utilizan valores sobre 0,1 de NDVI para la identificación de vegetación activa (con baja densidad o cobertura y/o con baja vigorosidad, ver Tabla 4). Por su parte, los valores de umbrales mínimos de NDVI utilizados para delimitar la vegetación fluctuaron entre los valores 0,02 (mínimo absoluto *más bajo* utilizado como umbral para el caso de polígono SL1 correspondiente a SVAHT Salar La Laguna) y 0,15 (mínimo absoluto *más alto* utilizado como umbral en los casos de SVAHT Leoncito y Tordillos); y entre los valores 0,05 (mediana de los mínimos de NDVI *más bajo* utilizado como umbral para el caso de polígono P3 correspondiente a SVAHT Salar Piedra Parada) y 0,30 (mediana de los mínimos de NDVI *más alto* utilizado como umbral para el caso de SVAHT Leoncito) (Ver Tabla 5). Estudios similares reportan la utilización de valor de 0,08 para el monitoreo de humedales altoandinos (Castillo, 2019), valor de 0,09 para el caso de Salar de Pedernales (De la Fuente et al, 2021), valor de 0,1 para el caso de Salar Michincha (Puertas et al, 2023), valor de 0,23 para el estudio de pajonales altoandinos en el altiplano chileno (Chávez et al, 2019). Finalmente, en relación al estudio de la vegetación mediante índices espectrales, se sugiere como siguientes pasos complementar el estudio de la presencia, tamaño y vigorosidad vegetal mediante otros índices existentes, mejor adaptados y recomendados en la literatura científica e informes técnicos precedentes para el área de estudio, tales como los índices SAVI (Huete, 2012) y MSAVI (Qi et al., 1994). Estos índices corrigen anomalías que produce la reflectividad del suelo en zonas áridas (p.e. para el estudio de ecosistemas zonales en zonas desérticas, donde existe un alto porcentaje de suelo desnudo circundante y reflectante), lo cual aumenta la respuesta de la vegetación captada por los sensores satelitales.

El análisis del índice NDWI permitió advertir la existencia de sectores con cuerpos de agua superficiales (valor de NDWI sobre cero) aledaños solamente a los polígonos de SVAHT de los salares La Laguna y Piedra Parada. En el caso de los SVAHT de Quebradas, solo se obtienen valores de NDWI bajo cero, lo cual es indicador de terrenos áridos o secos en la superficie terrestre, sin presencia de cuerpos de agua superficiales evidentes. De los resultados de estimaciones de tamaños de cuerpos (espejos) de agua obtenidos en este informe, se destaca como cuerpos de agua con mayor superficie a los vinculados al SVAHT Salar La Laguna (38,2 hectáreas, código CA-SL-1; 4,75 hectáreas, código CA-SL-2), y los 13 cuerpos de agua aledaños a los polígonos de SVAHT Salar Piedra Parada, destacando el cuerpo de agua código CA-P2-2 con 6,45 ha, vinculado al polígono P2 de este SVAHT.

7. Listado de profesionales

Tabla 16. Profesionales en terreno y procesamiento en gabinete.

N	Nombre	Rol en el Proyecto	Institución
1	Laura Collao	Jefa de Terreno	SMI-Chile
2	Daniela Cortés	Jefa de Terreno	SMI-Chile
3	Valentina Carrasco	Especialista en Terreno Mediciones Hiperespectrales	Agrospace
4	Dilan Campos	Investigador en Terreno	SMI-Chile
5	Felipe Labra	Especialista SIG e Imágenes Satelitales Elaboración análisis e informe	SMI-Chile
6	Cristian Mattar	Asesor Experto Teledetección	Agrospace
7	Tomás Acuña	Asesor Experto Teledetección	Agrospace
8	Italo Moletto	Asesor Experto Teledetección	Agrospace
9	Jacques Wiertz	Administrador de Contrato	SMI-Chile
10	Daniela Gamboa	Coordinación de Proyecto	SMI-Chile

8. Referencias

- Agrospace, (2026a). Documentación Módulo de Corrección Atmosférica y Fusión Pan-Sharpening para SPOT 6-7. Informe técnico preparado para SMI-Chile en el marco de la ejecución del Proyecto.
- Agrospace, (2026b). Caracterización espectral de superficies altoandinas mediante mediciones de terreno. Informe técnico preparado para SMI-Chile en el marco de la ejecución del Proyecto.
- Agrospace, (2026c). Reporte de Validación Imágenes Satelitales SPOT 6-7. Informe técnico preparado para SMI-Chile en el marco de la ejecución del Proyecto.
- Sanchez-Zapero, J., Martínez-Sánchez, E., Camacho, F., Wang, Z., Carrer, D. et al. (2023) Surface Albedo VALidation (SALVAL) Platform: Towards CEOS LPV Validation Stage 4-Application to Three Global Albedo Climate Data Records. *Remote Sensing*, 15. doi:10.3390/rs15041081
- Castillo, D. (2019). Monitoreo semi-automatizado de vegetación en humedales altoandinos. Superintendencia del Medio Ambiente. Gobierno de Chile. Disponible en el enlace: [https://static.cmm.uchile.cl/descargas/2019/copernicus/20190923 - Copernicus Monitoreo Humedales 02.pdf](https://static.cmm.uchile.cl/descargas/2019/copernicus/20190923_-_Copernicus_Monitoreo_Humedales_02.pdf)
- Centro de Ecología Aplicada (CEA, 2020). Apéndice 2: Diseño plan de seguimiento multiescalado. Fojas 217. Anexo Supuestos y medidas adoptadas por Codelco en el marco del Acuerdo de Avenimiento y Transacción con el Consejo de Defensa del Estado. Causa Rol D-7-2020. Fojas 176.
- Chavez, R., Chirstie, D., Olea, M. y Anderson, T. (2019). A Multiscale Productivity Assessment of High Andean Peatlands across the Chilean Altiplano Using 31 Years of Landsat Imagery. *Remote sensing*. Vol 11. 23 p.
- Chuvieco, E. (2002). Teledetección ambiental: La Observación de la Tierra desde el Espacio. Editorial Ariel. 586 p.
- De la Fuente, A., Meruane, C. y Suárez, F. (2021). Long-term spatiotemporal variability in high Andean wetlands in northern Chile. *Science of the Total Environment*. Vol. 756. 13 p.
- Econativa Consultores (2024). Plan de Seguimiento Multiescalado de la dinámica ecosistémica en el Salar de Pedernales y Sistemas Aledaños. Caracterización de Flora y Vegetación. Disponible en el Enlace: https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20240723/20240723135006/flora_y_vegetacion_psme_r...
- EOS Data Analytics (2023). Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI). Disponible en el enlace: <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndwi/>
- Huete, A. (2012) Vegetation indices, remote sensing and forest monitoring. *Geogr. Compass*, 6.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432.
- Puertas, O., Cardenas, M., Barría, J., Lizama, T. y Jiménez, H. (2023). Detección de cambios a largo plazo con análisis multiespectral en la vegetación azonal hídrica altoandina: caso de estudio salar Michincha, 1985-2029. *Revista de Geografía Norte Grande*, 84, 1-24. <https://doi.org/10.4067/S0718--34022023000100177>

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote sensing of environment*, 48(2), 119-126.

Wang, Z., Schaaf, C., Lattanzio, A., Carrer, D., Grant, I., Román, M., Camacho, F., Yu, Y., Sánchez-Zapero, J. y Nickeson, J. (2019). Global Surface Albedo Product Validation Best Practice Protocol. Version 1.0. In Z. Wang, J. Nickeson y M. Román (Eds.), *Good Practices for Satellite Derived Land Product Validation* (p.45): Land Product Validation Subgroup (WGCV/CEOS), doi: 10.5067/DOC/CEOSWGCV/LPV/ALBEDO.001

Xue, J. & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Hindawi Journal of Sensors*. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>

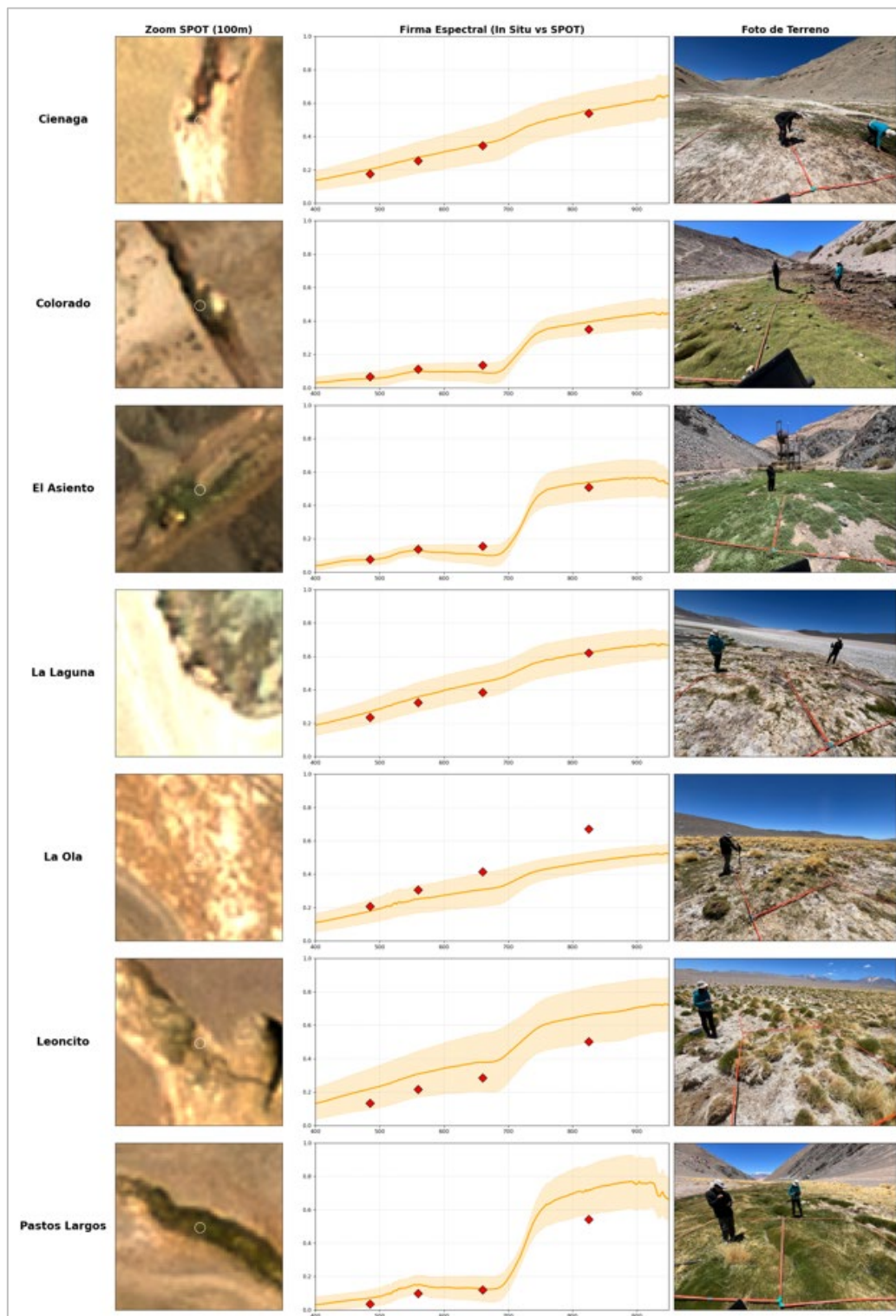
9. Anexos

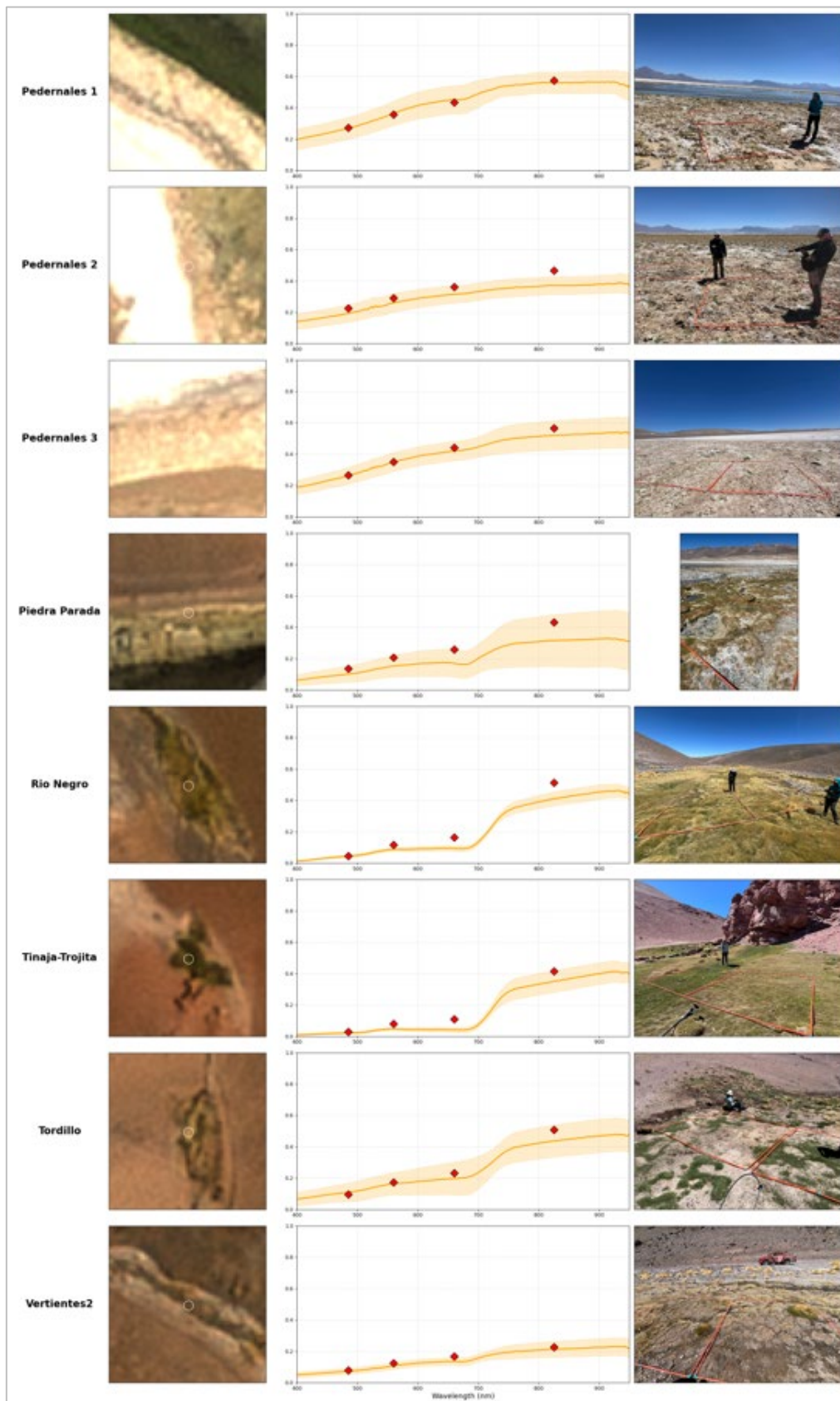
9.1 Anexo 1. Informes de las etapas metodológicas de calibración

- Corrección Atmosférica y Fusión Pan-Sharpening para SPOT 6-7.
- Caracterización espectral de superficies altoandinas mediante mediciones de terreno.
- Reporte de validación imágenes satelitales SPOT 6/7

El documento en referencia se encuentra en formato digital, en la carpeta de Anexos. Nombre del archivo es: *DSAEST_Anual26_Apéndice08_Anexo01.pdf*

9.2 Anexo 2. Detalle de firmas espectrales *in situ* y sitios de muestreo





Detalle de contacto:

Daniela Gamboa Rosas
Coordinadora de Proyecto

Sustainable Minerals Institute International Centre (SMI Chile)
The University of Queensland

T +56 2 2307 9710
E d.gamboa@smi-chile.com
W smi-chile.com

CRICOS Provider Number 00025B TEQSA PRV12080