



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**RECONOCIMIENTO DE ALTERACIONES HIDROTERMALES Y
MINERALES EN LA ZONA SUR DE LA MEGACALDERA CARRIZALILLO Y
LA CALDERA EL DURAZNO, REGIÓN DE ATACAMA, MEDIANTE
TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL.**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
Geólogo.

Profesora guía: Dra. Paulina Fuentes

Annabelle Araceli Ghiani Iriarte

Copiapó, Chile 2025



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**RECONOCIMIENTO DE ALTERACIONES HIDROTERMALES Y
MINERALES EN LA ZONA SUR DE LA MEGACALDERA CARRIZALILLO Y
LA CALDERA EL DURAZNO, REGIÓN DE ATACAMA, MEDIANTE
TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL.**

Profesora guía: Dra. Paulina Fuentes
Profesor co-guía: Mg. Francisco Tapia

Annabelle Araceli Ghiani Iriarte

Copiapó, Chile 2025

AGRADECIMIENTOS

A mi profesora guía, Paulina Fuentes, por confiar en mí desde el primer momento y por abrirme las puertas a un mundo completamente nuevo para mí: la Teledetección.

A mis amistades de enseñanza media, quienes, a pesar de que cada uno tomó un camino distinto, siguen presentes en mi vida. A mis compañeras y compañeros de la universidad, con quienes compartí estos intensos cinco años y medio; gracias por hacer que cada clase, cada salida a terreno y cada traspase frente al computador se convirtiera en una experiencia inolvidable. Ustedes me ayudaron a crecer no solo como geóloga, sino también como persona. Nos volveremos a encontrar, futuros colegas.

A mis mejores amigos, Cristóbal, Jordan y Hernán, gracias por su incondicionalidad y por siempre saber qué decir en los momentos indicados. A Nagli, por tu compañía, tu cariño y por convertirte en una hermana elegida; me llevo una amiga para toda la vida.

A mi familia, que ha sido mi base durante todo este proceso y siempre han confiado en mis capacidades, en especial a mi mamá Elizabeth, quien siempre supo acompañarme con amor, intuición y sabiduría, incluso cuando yo misma no sabía lo que necesitaba.

A mi ahijado, que ha sido mi mayor alegría en los últimos tres años, y quien hoy es una de las razones más fuertes que tengo para seguir esforzándome por ser una mejor profesional y persona.

A Peter, que, aunque no lo sepa, ha estado presente en cada etapa de mi vida, acompañándome de manera silenciosa pero constante.

Y, finalmente, a mis abuelos, Marisa Rivera y Francisco Ghiani, por ser mi ejemplo y la raíz de todo lo que soy. Esta tesis, este logro y cada paso que doy es por y para ustedes. Gracias a su amor y enseñanzas, soy quien soy.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Problema de investigación.....	2
1.2 Hipótesis	3
1.3 Objetivos	4
1.4 Ubicación y accesos	4
1.5 Metodologías	6
1.6 Trabajos anteriores en el área de estudio.....	7
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	10
2.1 Sistemas hidrotermales.....	10
2.2 Alteraciones hidrotermales	10
2.2.1 Tipos de alteraciones hidrotermales	12
2.2.2 Vínculo de alteraciones hidrotermales en sistemas de calderas volcánicas.....	13
2.3 Fundamentos de teledetección.....	14
2.3.1 Correcciones radiométricas.....	14
2.3.2 Espectro electromagnético	14
2.3.3 Firma espectral.....	15
2.4 Sensores remotos	15
2.4.1 Sensor ASTER.....	16
2.4.2 Sensor OLI/TIRS de LANDSAT 8.....	16
2.4.3 Sentinel-2	16
2.4.4 ALOS PALSAR y DEMs.	17
2.5 Imágenes satelitales multiespectrales	17
2.6 Técnicas de análisis espectral	17
2.6.1 Matemática de bandas (<i>Band Ratios</i> y <i>Band Math</i>).....	17
2.6.2 Composiciones RGB en falso color.....	18
2.6.3 Mapeo de ángulo espectral (<i>Spectral Angle Mapper</i>)	18
2.7 Aplicaciones de sensores remotos en el estudio de calderas volcánicas	18
CAPÍTULO 3: MARCO GEOLÓGICO	20
3.1 Geología regional	20
3.1.1 Contexto tectónico y magmático regional	20
3.1.2 Evolución geológica desde el Cretácico	20
3.1.3 Complejo volcánico Megacaldera Carrizalillo	21
3.2 Geología local.....	23
3.2.1 Principales unidades geológicas descritas en el sector	23

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA DE TRABAJO	28
4.1 Revisión bibliográfica	28
4.2 Adquisición de imágenes satelitales	29
4.3 Preprocesamiento	30
4.4 Procesamiento	31
4.4.1 Matemática de bandas.....	32
4.4.2 Combinaciones RGB de falso color.....	33
4.4.3 SAM.....	35
4.5 Elaboración de mapas.....	38
4.5.1 Elaboración de Modelos de Elevación Digital (Modelos 3D).....	39
4.6 Validación de datos	40
CAPÍTULO 5: RESULTADOS	42
5.1 ASTER	42
5.1.1 Matemática de bandas.....	43
5.1.2 Composiciones RGB en falso color.....	45
5.1.3 SAM.....	49
5.2 Landsat 8	49
5.2.1 Matemática de bandas.....	50
5.2.2 Composiciones RGB en falso color.....	52
5.3 Sentinel-2.....	54
5.3.1 Matemática de bandas.....	54
5.3.2 Composiciones RGB en falso color.....	56
5.4 Modelos de elevación digital.....	58
CAPÍTULO 6: DISCUSIONES	60
6.1 Coherencia y comparación de los resultados espectrales entre sensores	60
6.2 Correlación con las unidades litológicas presentes en el área.....	61
6.3 Influencia estructural en la distribución de alteraciones	64
6.4 Interpretación del sistema hidrotermal y contexto metalogénico.....	66
6.5 Consideraciones finales	67
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
7.1 Conclusiones	68
7.2 Recomendaciones	69
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
ANEXOS	76

RESUMEN

Este trabajo se llevó a cabo en la Megacaldera Carrizalillo, ubicada en la Precordillera de la Región de Atacama, la cual presenta un complejo sistema de calderas anidadas con evidencia de intensa actividad hidrotermal. El estudio se enfocó en la zona sur de la Megacaldera y la caldera El Durazno, caracterizada por su escasa preservación estratigráfica, difícil acceso topográfico y cobertura superficial que dificulta la observación de afloramientos geológicos.

En este contexto, se realizó la identificación y caracterización de alteraciones hidrotermales y asociaciones minerales mediante teledetección multiespectral, utilizando imágenes de los sensores ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2. La metodología incluyó el preprocesamiento radiométrico de las imágenes, aplicación de razones de bandas, composiciones RGB en falso color y clasificación espectral mediante *Spectral Angle Mapper* (SAM), integrando los resultados en un entorno SIG.

Los resultados mostraron una alta coherencia entre sensores y permitieron correlacionar zonas alteradas con unidades litológicas y estructuras geológicas previamente descritas. Asimismo, se identificaron nuevas zonas con respuesta espectral significativa que no habían sido mapeadas anteriormente, lo que demuestra el valor de la teledetección como herramienta para la exploración preliminar en contextos volcánicos. Se proponen áreas prioritarias para validación en terreno, así como la aplicación del método en otras calderas del sistema para una caracterización regional más amplia.

Finalmente, se concluye que las imágenes satelitales representan una herramienta eficaz para estudios geológicos preliminares y exploración mineral, permitiendo enfocar futuras campañas de campo en sectores con mayor potencial.

TELEDETECCIÓN - ALTERACIONES HIDROTERMALES - ANÁLISIS ESPECTRAL

ABSTRACT

This study was conducted in the Carrizalillo Megacaldera, located in the Precordillera of the Atacama Region, which features a complex system of nested calderas with evidence of intense hydrothermal activity. The research focused on the southern sector of the Megacaldera and the El Durazno Caldera, an area characterized by poor stratigraphic preservation, difficult topographic access, and surface cover that hinders the observation of geological outcrops.

In this context, hydrothermal alterations and associated mineral assemblages were identified and characterized through multispectral remote sensing, using satellite imagery from ASTER, Landsat 8, and Sentinel-2. The methodology included radiometric preprocessing, band ratio calculations, false-color RGB composites, and spectral classification using the Spectral Angle Mapper (SAM), with all results integrated into a GIS environment.

The results showed high consistency among the sensors and allowed the correlation of altered zones with lithological units and geological structures previously described. Additionally, new areas with significant spectral responses were identified beyond the limits of existing geological maps, highlighting the usefulness of remote sensing for preliminary exploration in volcanic environments. Priority areas are proposed for future field validation, along with recommendations to apply this approach to other nested calderas within the system for regional-scale characterization.

In conclusion, satellite imagery proved to be an effective tool for preliminary geological assessment and mineral exploration, supporting more focused and efficient field campaigns in areas with high exploration potential.

REMOTE SENSING - HYDROTHERMAL ALTERATIONS - SPECTRAL ANALYSIS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

La Megacaldera Carrizalillo, ubicada en la Precordillera de la Región de Atacama, constituye un sistema de calderas anidadas que incluye, entre otras, a la caldera El Durazno. Ambas estructuras se caracterizan por su importante registro de actividad hidrotermal y mineralizaciones asociadas a un régimen tectónico global de carácter extensional del Paleoceno-Eoceno Inferior. La Megacaldera Carrizalillo, compuesta por una secuencia de traquiandesitas, dacitas, tobas de caída y flujos piroclásticos, ha sido objeto de estudios geológicos previos sobre su petrografía, estratigrafía, etc. Mientras que, la caldera El Durazno ha sido estudiada por sus alteraciones, estudios previos evidencian la presencia de zonas con alteración potásica, fílica y argílica, lo que refuerza su potencial como sistema hidrotermal con interés para la exploración minera.

En este contexto, la aplicación de tecnologías de percepción remota constituye una herramienta eficaz para complementar los estudios geológicos convencionales, especialmente en zonas de difícil acceso o con escasa exposición superficial. La teledetección se refiere a las tecnologías y procedimientos empleados para coleccionar, procesar e interpretar información relacionada con objetos o fenómenos que ocurren en la superficie terrestre, sin establecer contacto físico con éstos. Los sensores remotos multiespectrales como ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2 han demostrado ser herramientas efectivas en la exploración preliminar de recursos minerales, al facilitar la detección de firmas espectrales asociadas a minerales indicadores de alteración hidrotermal.

La integración de imágenes satelitales con herramientas de análisis espacial, como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), permite delimitar áreas de interés geológico, establecer relaciones estructurales y mineralógicas, optimizar el trabajo de campo y reducir significativamente los tiempos y costos de exploración.

En este trabajo, se aplicaron herramientas de teledetección y análisis espectral para caracterizar e identificar la distribución espacial de las alteraciones hidrotermales y

minerales presentes en la zona sur de la Megacaldera Carrizalillo y la caldera El Durazno con el fin de aportar antecedentes relevantes para futuras investigaciones y demostrar la utilidad de los sensores remotos en las etapas iniciales de evaluación prospectiva, o en estudios geocientíficos de carácter exploratorio.

1.1 Problema de investigación

Las calderas volcánicas son depresiones topográficas de escala kilométrica presentes en diversos entornos volcánicos del planeta (Geyer & Martí, 2008). Estas estructuras se forman por la subsidencia de la corteza terrestre tras la evacuación de magma por procesos de intrusión y/o erupción (Branney & Acocella, 2015; Holohan et al., 2013). A lo largo de su evolución geológica, las calderas experimentan múltiples episodios de actividad volcánica, comúnmente asociados a procesos de alteración hidrotermal y mineralización (Lipman, 2000; Cole et al., 2004). Dichas alteraciones se producen por la circulación de fluidos hidrotermales que modifican mineralógica y químicamente la roca de caja, dependiendo de parámetros físico-químicos como temperatura, presión, pH, composición del fluido y del hospedador litológico (Hedenquist et al., 1998; Corbett & Leach, 1998). Sin embargo, su caracterización detallada se ve dificultada por factores como la escasa preservación estratigráfica, el acceso topográfico limitado o la cobertura superficial que enmascara los afloramientos (Cole et al., 2004).

Un ejemplo representativo de este tipo de sistemas es la Megacaldera Carrizalillo, ubicada en la Precordillera de Copiapó, Región de Atacama, la cual corresponde a una estructura volcánica de colapso del Paleoceno-Eoceno Inferior (Rivera & Mpodozis, 1994). Este complejo volcánico alberga múltiples calderas anidadas, entre ellas la caldera El Durazno, las cuales muestran evidencias superficiales de actividad hidrotermal. No obstante, y a pesar de los avances alcanzados por estudios previos en el área (e.g., Fortt, 2024; Gerding, 2019; Rodríguez et al., 2025), persiste un vacío significativo en cuanto a su caracterización espectral sistemática. Mientras que dichos trabajos han abordado aspectos petrográficos, geoquímicos y evolutivos del sistema, y estudios más amplios (Iriarte et al., 1999; Rivera & Mpodozis, 1994) han contribuido a definir su contexto

estructural y volcánico, ninguno ha integrado sensores multiespectrales (ASTER, Landsat 8, Sentinel-2) ni generado cartografía espectral orientada a la detección de firmas minerales de alteración hidrotermal.

En este sentido, se propone una aproximación metodológica que combine el análisis de imágenes satelitales multiespectrales con herramientas SIG. Esta integración no solo permite identificar zonas de alteración no reconocidas previamente, sino también evaluar su relación con las unidades geológicas y estructuras activas. Esta propuesta resulta particularmente pertinente en áreas de difícil acceso y con escasa exposición superficial, como la caldera El Durazno, ya que la percepción remota ofrece una alternativa eficaz para el estudio preliminar de sistemas hidrotermales en contextos volcánicos de alta complejidad (Sabins, 1999).

Frente a esta situación, el presente estudio se plantea responder dos preguntas fundamentales: primero, si es posible identificar y caracterizar las alteraciones hidrotermales presentes en la Megacaldera Carrizalillo y la caldera El Durazno mediante el análisis de imágenes multiespectrales provenientes de los sensores ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2; y segundo, cómo se distribuyen espacialmente estas alteraciones y cuál es su relación con las unidades litológicas y estructurales del área de estudio. La respuesta a estas interrogantes permitirá subsanar vacíos en la caracterización espectral del área, entregar una base cartográfica útil para campañas de terreno y prospeccionar sectores con potencial económico.

1.2 Hipótesis

El uso de sensores remotos, a través del procesamiento de datos de ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2, permitiría identificar y caracterizar de manera eficiente las alteraciones hidrotermales y minerales presentes en la Megacaldera Carrizalillo y su caldera anidada El Durazno, proporcionando información clave sobre su distribución espacial y su relación con las litologías y estructuras geológicas de la zona.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Identificar, analizar y caracterizar las alteraciones hidrotermales y minerales en la zona sur de la Megacaldera Carrizalillo y la caldera El Durazno, mediante teledetección multispectral, con el propósito de determinar su distribución espacial y su relación con las unidades litológicas y las estructuras presentes en el área de estudio.

1.3.2 Objetivos específicos

- Emplear imágenes multispectrales ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2 para identificar zonas de alteración hidrotermal y minerales presentes en el área de estudio.
- Determinar la distribución espacial de la alteración hidrotermal y minerales detectados.
- Elaborar mapas temáticos que representen las distintas asociaciones minerales y/o alteraciones en la zona de estudio mediante el uso de los *softwares* GIS y ENVI, para facilitar la interpretación geológica y exploratoria.
- Correlacionar las alteraciones hidrotermales y minerales identificadas con las unidades litológicas y estructuras geológicas presentes en el área.

1.4 Ubicación y accesos

El área de estudio se encuentra ubicado en la Precordillera de la Región de Atacama, específicamente en la extensión correspondiente a la zona sur de la Megacaldera Carrizalillo y su caldera anidada, la caldera El Durazno, a aproximadamente 50 kilómetros al sureste de la ciudad de Copiapó. Los afloramientos de dicha megacaldera se reconocen desde la Quebrada San Miguel, por el norte hasta la zona de Lomas Bayas, por el sur (Rivera & Mpodozis, 1994).

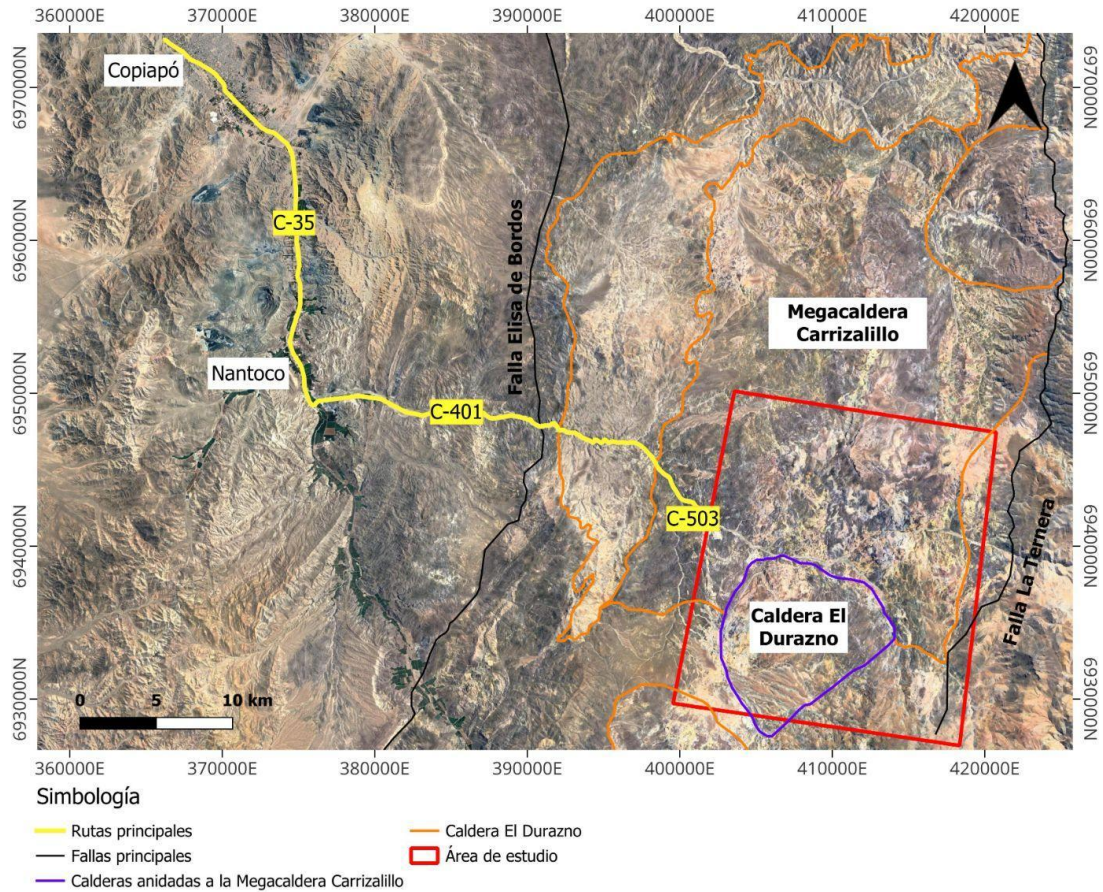


Figura 1.1 Ruta de acceso al área de estudio, desde Copiapó, Región de Atacama. Mapa de elaboración propia.

El acceso al área se realiza a través de la ruta C-35 en dirección hacia Tierra Amarilla, avanzando 18 kilómetros hasta la intersección con la ruta C-401 (Figura 1.1). Desde ese punto, se debe continuar hacia el este por dicha ruta durante aproximadamente 25 kilómetros, hasta ingresar a los sectores cercanos a la caldera El Durazno, donde se localiza el área de estudio (Figura 1.2).

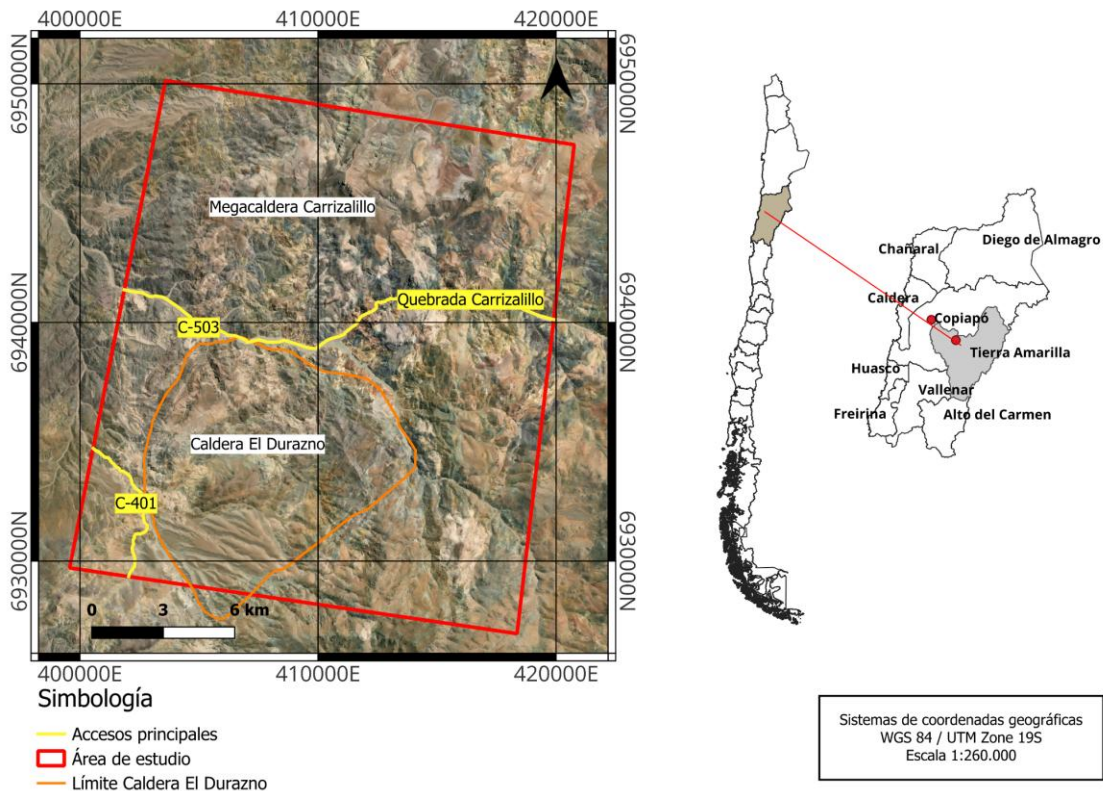


Figura 1.2. Mapa de ubicación detallada del área de estudio. A la izquierda, se observa la delimitación del sector correspondiente a la caldera El Durazno y su relación con la Megacaldera Carrizalillo, incluyendo accesos principales y quebradas relevantes. A la derecha, se muestra la localización regional dentro de la Región de Atacama, Chile. Mapa de elaboración propia.

1.5 Metodologías

El desarrollo metodológico de esta investigación se estructuró en seis etapas principales: (i) revisión bibliográfica, (ii) adquisición de imágenes satelitales (iii) preprocesamiento de imágenes, (iv) procesamiento de imágenes, (v) elaboración de mapas y (vi) validación de datos. Se utilizaron imágenes satelitales multiespectrales provenientes de los sensores ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2, reconocidos por su efectividad en la detección remota de alteraciones hidrotermales.

En la etapa de preprocesamiento, las imágenes fueron corregidas radiométrica y atmosféricamente. Posteriormente, durante el análisis espectral (procesamiento de imágenes), se aplicaron técnicas específicas para cada objetivo: las matemáticas de bandas

(mediante *Band Math* y *Band Ratios*) se utilizaron para resaltar firmas espectrales de minerales indicadores de alteración hidrotermal, cumpliendo el objetivo de identificación de zonas alteradas; las composiciones RGB en falso color, basadas en combinaciones estratégicas de bandas (detalladas en anexos), permitieron una visualización preliminar de asociaciones mineralógicas; y el algoritmo *Spectral Angle Mapper* (SAM), aplicado exclusivamente en ASTER por su alta resolución en el SWIR, se empleó para la caracterización mineralógica detallada, mediante la comparación de firmas espectrales con una biblioteca de referencia.

La información resultante fue integrada, elaborando mapas temáticos con georreferenciación precisa, y superposición con estructuras geológicas presentes en la carta Hoja La Guardia. Finalmente, se realizó una interpretación geológica integrada, correlacionando las alteraciones detectadas con las litologías del área de estudio, en función de sus distribuciones espaciales y su alineamiento con estructuras.

1.6 Trabajos anteriores en el área de estudio

En la zona se han desarrollado diversos trabajos de carácter exploratorio, incluyendo prospectos llevados a cabo por entidades privadas, investigaciones de tesis de pregrado y estudios geológicos formales de escala regional.

- Fortt, M. (2024)

Tesis de pregrado denominada “Geología, petrografía y estilos de alteración Paleocenos en el sector de Quebrada Carrizalillo, Tierra Amarilla, Región de Atacama”. Fortt estudió la evolución geológica y los estilos de alteración en el sector de la Megacaldera Carrizalillo. Mediante mapeo geológico, análisis petrográfico y espectral, identificó asociaciones minerales representativas de alteración hidrotermal, como alteración potásica, fílica y argílica. Su trabajo aportó antecedentes sobre la secuencia volcánica, el contexto tectónico y la evolución del sistema de calderas, resaltando el valor geológico y exploratorio del área.

- Gerding, V. (2019)

La tesis de pregrado denominada “Petrología de los depósitos asociados a la Megacaldera Carrizalillo en la precordillera de Copiapó, Región de Atacama”, aborda la formación y evolución de esta megaestructura volcánica, identificando una afinidad geoquímica entre la megacaldera y las calderas anidadas Bellavista y El Durazno. Este vínculo sugiere que compartieron un mismo reservorio magmático profundo, aunque se originaron a partir de diferentes pulsos magmáticos, favorecidos por el régimen tectónico extensional imperante en ese periodo.

- Iriarte et al., 1999.

La Hoja Geológica La Guardia describe en detalle las unidades volcánicas y estructuras asociadas a la Megacaldera Carrizalillo, incluyendo a la caldera El Durazno, y entrega antecedentes geológicos clave para su interpretación.

- Proyecto JASPE (Ex-Carrizalillo).

Aragonita Asesorías Ltda. (2017) identificó un prospecto de oro ubicado al noroeste del área de estudio, relacionado con alteración hidrotermal de alta sulfidación y el desarrollo de un sistema de calderas. En la zona predominan tobas dacíticas, unidades silicificadas y cuerpos de brechas hidrotermales y freáticas, con oro presente en formas de sílice residual tipo vuggy, masiva, granular y en vetillas. Se identificaron tres cuerpos principales de sílice; Ventarrón, Barrazata y Tortilla, alineados en dirección NW, ocupando un área de 1.500 por 300 metros. Hacia el exterior, se reconocen zonas con asociaciones minerales que gradan desde dickita-sílice hasta halos con clorita.

- Rivera and Mpodozis (1994).

Los autores interpretan la formación de la Megacaldera Carrizalillo como resultado de un volcanismo sin-extensional ocurrido entre el Cretácico Superior y el Paleoceno Inferior, en un contexto tectónico de transtensión dextral. Este régimen, asociado a la convergencia entre las placas Farallón y Sudamericana, habría favorecido el ascenso y acumulación de grandes volúmenes de magma en niveles corticales superiores.

- Rodríguez et al. (2025).

Los autores realizaron un estudio detallado sobre el campo de calderas de la Precordillera de Atacama, centrándose en la evolución estratigráfica, estructural y geoquímica de la Megacaldera Carrizalillo y sus calderas anidadas. El trabajo identificó cuatro etapas principales en la evolución del sistema caldérico: pre-colapso, colapso, resurgencia y post-colapso, las cuales estuvieron controladas por la interacción entre fracturas locales y estructuras regionales, como el sistema de fallas La Ternera. Destacan la ocurrencia de depósitos piroclásticos, flujos de lava, depósitos lacustres y domos post-colapso, los cuales fueron interpretados como resultado de múltiples episodios eruptivos y reactivaciones magmáticas. Además, se concluyó que este sistema caldérico se formó en un contexto tectónico extensional durante el Paleoceno-Eoceno, influenciado por la subducción oblicua de la dorsal Farallón-Aluk, lo que facilitó el ascenso del magma y el colapso del techo de la cámara magmática.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Sistemas hidrotermales

Los sistemas hidrotermales son entornos geológicos dinámicos donde fluidos calientes circulan a través de fracturas, poros o zonas permeables de la corteza terrestre. Esta circulación es impulsada por una fuente de calor, como un cuerpo magmático, un gradiente geotérmico elevado o actividad volcánica reciente, generando interacciones fisicoquímicas con las rocas encajantes (Pirajno, 2009; Henley & Ellis, 1983).

El desarrollo de un sistema hidrotermal requiere la presencia simultánea de cuatro elementos claves: una fuente de calor, un fluido (meteórico, magmático o connato), un medio de transporte permeable, y una cubierta impermeable que permita el confinamiento de los fluidos.

Estos sistemas juegan un rol fundamental en la génesis de distintos tipos de depósitos minerales, como los pórfidos cupríferos, los epitermales y los skarn. Por lo que su caracterización es clave en la exploración minera (Hedenquist et al., 1996; Sillitoe, 2010). Las condiciones de temperatura, pH y composición de los fluidos dentro del sistema controlan las reacciones que originan las alteraciones en las rocas hospedantes.

2.2 Alteraciones hidrotermales

La alteración hidrotermal es el proceso mediante el cual las rocas sufren modificaciones mineralógicas, texturales y químicas producto de su interacción con fluidos calientes. Este fenómeno se genera por un desequilibrio fisicoquímico entre el fluido y la roca huésped, lo que provoca la disolución de minerales inestables, el reemplazo de minerales primarios y la precipitación de nuevos minerales secundarios, dando origen a las denominadas zonas de alteración (Pirajno, 2009). Los fluidos hidrotermales, al actuar como agentes de transferencia de calor y masa, movilizan elementos químicos, favoreciendo la formación de asociaciones minerales estables bajo condiciones específicas del sistema (Redd, 1997).

Estas alteraciones se desarrollan en diferentes contextos geotectónicos, desde condiciones magmáticas profundas hasta sistemas hidrotermales más someros, y su evolución está influenciada por factores como la composición del fluido, la permeabilidad del medio, la duración del sistema, control estructural y la litología de la roca de caja (Pirajno, 2009).

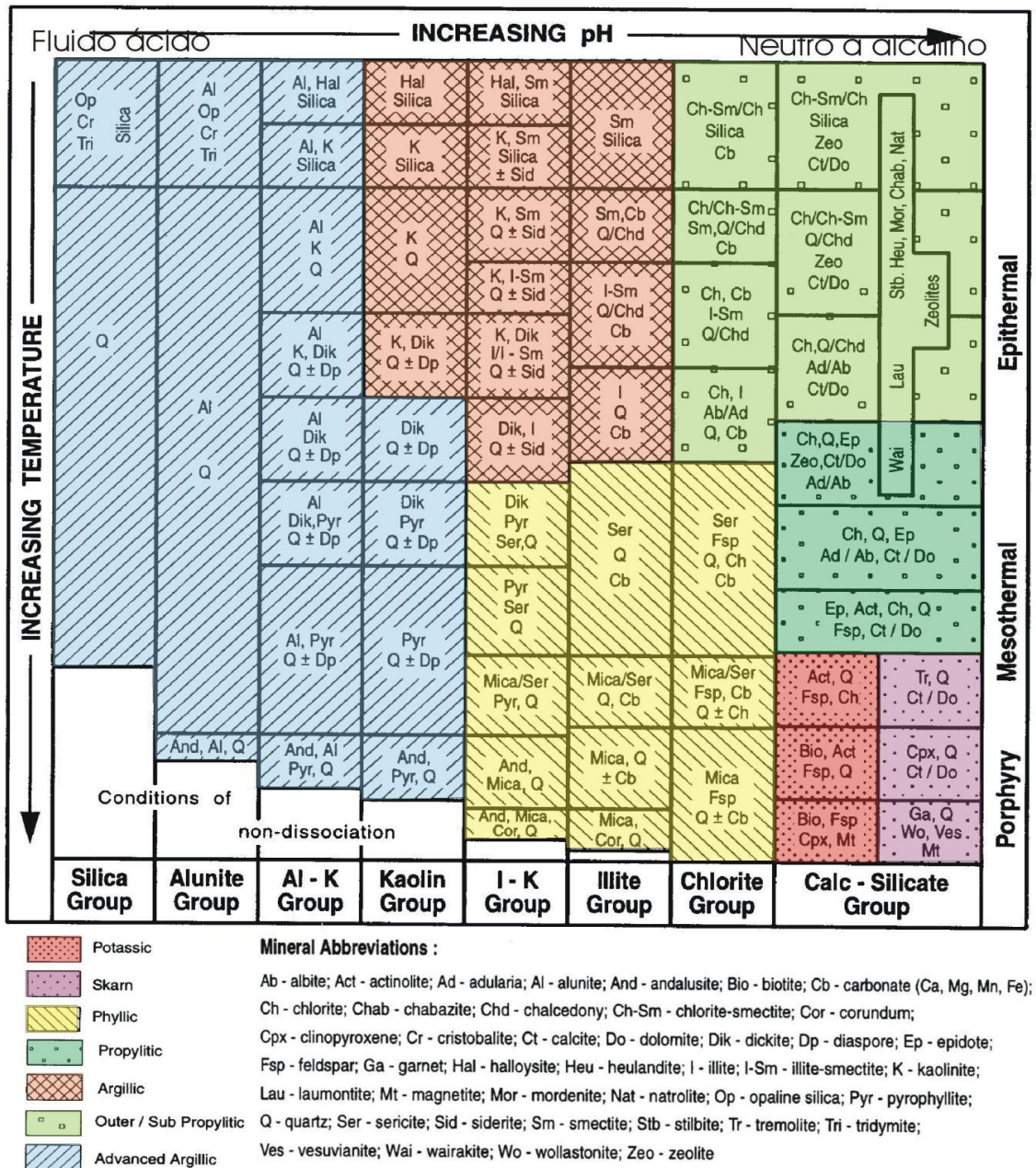


Figura 2.1. Tabla de alteraciones hidrotermales. Extraída de Corbett and Leach (1998).

En la exploración geológica, estas zonas de alteración representan indicadores relevantes de posibles depósitos minerales de interés económico. Su distribución responde a patrones espaciales que permiten inferir la estructura de los sistemas hidrotermales y orientar estrategias de prospección más eficientes. La figura 2.1, adaptada de Corbett and Leach (1998), ilustra tipos de alteración y sus asociaciones minerales típicas.

2.2.1 Tipos de alteraciones hidrotermales

De acuerdo con Beane y Bodnar (1995), Sillitoe (2010) y Pirajno (2009), las principales alteraciones reconocidas en los sistemas epitermales corresponden a las siguientes:

- **Alteración Potásica:** esta alteración es típica de zonas profundas o centrales en sistemas porfídicos y se desarrolla bajo condiciones de alta temperatura (aprox. 450–650 °C) y pH neutro a alcalino. Se caracteriza por la incorporación de potasio (K^+) en la roca, lo que genera el reemplazo de plagioclasa y minerales ferromagnesianos por feldespato potásico y biotita secundaria. En presencia de hierro, puede precipitar magnetita, mientras que en su ausencia predomina el desarrollo de feldespato potásico. Esta alteración no implica hidrólisis, sino un cambio catiónico selectivo, y suele estar acompañada por minerales como cuarzo, anhidrita y sulfuros metálicos.
- **Alteración Propilítica:** se caracteriza por la formación de minerales como clorita, epidota, albita y calcita, y ocurre a bajas temperaturas (entre 200 °C y 300 °C) en condiciones de pH neutro a ligeramente ácido. Esta alteración es comúnmente desarrollada en zonas periféricas de sistemas hidrotermales, en interacción con aguas meteóricas y fluidos pobres en H^+ . Puede presentarse como una alteración pervasiva pero selectiva, generando cloritización de biotita y hornblenda, albitización de plagioclasa y carbonatación.
- **Alteración Fílica o Cuarzo-Sericítica:** ocurre en condiciones de temperatura moderada (300 °C a 400 °C) y pH ligeramente ácido (5 a 6). Se caracteriza por la hidrólisis de feldespatos, los cuales son transformados principalmente en sericita y cuarzo secundario, y por la destrucción de minerales máficos que generan pirita.

Puede presentarse junto a minerales accesorios como caolinita, calcita, biotita y rutilo. Esta alteración, común en ambientes frágiles y en interacción con aguas meteóricas, puede afectar significativamente la textura original de la roca.

- **Alteración Argílica:** corresponde a un proceso de hidrólisis intensa en condiciones ácidas (pH 3–5) y temperaturas entre 150 °C y 300 °C, común en sistemas epitermales someros. Se caracteriza por la transformación de feldespatos en minerales arcillosos como caolinita, illita, montmorillonita y esmectita, en presencia de aguas meteóricas. Puede presentarse como una zona pervasiva, aunque frecuentemente conserva la textura original de la roca.
- **Alteración Argílica avanzada:** ocurre en condiciones de pH extremadamente ácido (1–3.5) y temperaturas variables, comúnmente en ambientes epitermales de alta sulfuración a poca profundidad. Se caracteriza por una hidrólisis severa que destruye por completo feldespatos y silicatos, generando minerales como alunita, dickita, pirofilita, caolinita y cuarzo residual. Esta alteración borra la textura original de la roca y puede producir zonas de sílice vuggy asociadas a vapores condensados ricos en ácido.

2.2.2 Vínculo de alteraciones hidrotermales en sistemas de calderas volcánicas

Las calderas volcánicas son estructuras formadas por el colapso de grandes cámaras magmáticas tras erupciones de gran volumen. Durante y posterior al colapso de la caldera, el sistema queda estructuralmente controlado por fracturas concéntricas, depósitos piroclásticos, cuerpos intrusivos resurgentes y zonas de debilidad, que facilitan el ascenso de fluidos hidrotermales desde profundidades mayores. La cámara magmática residual actúa como fuente térmica, impulsando la convección de fluidos. Este sistema favorece el desarrollo de zonas sistemáticas de alteración, estrechamente asociadas a la estructura caldérica y los sistemas de fracturas dominantes (Corbett & Leach, 1998; Pirajno, 2009).

Muchas calderas albergan depósitos minerales de interés económico, como sistemas epitermales de alta y baja sulfuración, depósitos tipo pórfido e incluso sistemas IOCG. El

análisis de las alteraciones permite delimitar sectores con potencial exploratorio (Sillitoe, 2010; Rivera & Mpodozis, 1994).

2.3 Fundamentos de teledetección

La teledetección se basa en el principio de que cada superficie terrestre refleja o emite radiación electromagnética de manera característica, lo que permite identificar diferentes materiales mediante sensores remotos. Esta técnica no solo comprende la adquisición de datos, sino también su procesamiento y la generación de productos cartográficos utilizables en distintos ámbitos de estudio (Chuvienco, 2000).

2.3.1 Correcciones radiométricas

Las imágenes satelitales registran radiancia influida por la atmósfera, lo que puede distorsionar la señal real proveniente de la superficie terrestre. Factores como la dispersión y absorción atmosférica, que varían según la longitud de onda, alteran la señal captada por el sensor (Pellat et al., 2018). Las correcciones radiométricas permiten minimizar estas distorsiones, mejorando la calidad visual y espectral de la imagen, y facilitando análisis más precisos en estudios geológicos y de alteración mineral.

2.3.2 Espectro electromagnético

El espectro electromagnético se presenta como una sucesión de longitudes de onda, las que están divididas en regiones donde la radiación electromagnética presenta un comportamiento similar. Desde el punto de vista de la teledetección, conviene destacar una serie de bandas espectrales, que son frecuentemente empleadas por la tecnología actual (Chuvienco, 1990).

Tipler y Llewellyn, (2000) indican cinco divisiones del espectro electromagnético. El espectro visible considera las longitudes de onda de 0,4 a 0,7 μm . Suelen distinguirse tres bandas, que se denominan azul (0.4 a 0.5 μm); verde (0.5 a 0.6 μm), y rojo (0.6 a 0.7 μm),

en razón de los colores elementales asociados a esas longitudes de onda. El infrarrojo próximo o cercano (NIR) con longitudes de onda de 0,7 a 2 μm . El infrarrojo medio (SWIR), con longitudes de onda de 2 a 8 μm . El infrarrojo lejano o térmico (TIR), que considera longitudes de onda desde 8 a 16 μm , que incluye la porción emisora del espectro terrestre. Y por último y las micro-ondas (a partir de 1nm).

2.3.3 Firma espectral

La firma espectral es la respuesta reflectiva única de cada material a la radiación electromagnética, permitiendo su identificación mediante sensores remotos (Sabins, 1999).

2.4 Sensores remotos

El dispositivo utilizado para adquirir imágenes se suele denominar “sensor”. Los sensores remotos son instrumentos diseñados para captar la radiación electromagnética reflejada o emitida por los objetos en la superficie terrestre, sin necesidad de contacto físico directo (Chuvioco, 1990). Estos dispositivos pueden estar instalados en plataformas aéreas o espaciales y permiten obtener información del entorno mediante el análisis de la energía recibida en diferentes longitudes de onda.

Existen dos grandes tipos de sensores; los sensores pasivos son los que no envían señal alguna, sino que recogen la respuesta radiométrica de un objeto que recibe el flujo del espectro de la radiación electromagnética del espacio. Mientras que los sensores activos son los que envían ellos mismos una señal de la cual más luego recuperan la respuesta cuando se refleja sobre un objeto: se trata esencialmente del radar.

Los sensores pasivos son actualmente los sistemas más utilizados con funciones bien establecidas en los dominios de la observación terrestre, mientras que los sensores activos espaciales tienen menos utilización.

2.4.1 Sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer*)

El sensor ASTER, es un instrumento con capacidad estereoscópica que se encuentra situado a bordo de la plataforma EOS AM-1(Terra) de la NASA, lanzada en diciembre de 1999, y es fruto de la cooperación entre Japón y EEUU. El sensor ASTER cubre una región espectral de 14 bandas, las cuales abarcan tres subsistemas, desde el visible infrarrojo hasta el infrarrojo termal, con características de alta resolución espacial, espectral y radiométrica (Abrams et al., 2002). Estos tres subsistemas de ASTER corresponden al radiómetro visible NIR con 3 bandas de 15 metros de resolución, el subsistema en la región del SWIR, con 6 bandas de 20 metros de resolución espacial, y el radiómetro TIR, con 5 bandas de 90 metros de resolución espacial (Abrams, M., Hook, S., & Ramachadran, B., 2002).

2.4.2 Sensor OLI/TIRS de LANDSAT 8

El satélite Landsat 8, lanzado el 11 de febrero de 2013, es un satélite óptico de resolución media diseñado para proporcionar información útil en áreas como la agricultura, la educación, la investigación científica y la gestión estatal (Markham et al., 2015). Está equipado con dos sensores principales: el OLI (*Operational Land Imager*), que capta bandas reflectantes del espectro visible e infrarrojo cercano, y el TIRS (*Thermal Infrared Sensor*), que registra información del infrarrojo térmico. Este satélite tiene la capacidad de detectar minerales indicativos de alteración hidrotermal, como óxidos e hidróxidos férricos, minerales con grupos OH y zonas ricas en carbonatos, aunque no permite identificar minerales específicos de forma directa (Knight & Kvaran, 2014; Loughlin, 1991).

2.4.3 Sentinel-2

El satélite Sentinel-2, parte del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA), está equipado con el sensor óptico MSI (*Multispectral Instrument*), que registra

datos en 13 bandas espectrales con diferentes resoluciones espaciales (10, 20 y 60 m). Su alta resolución espectral en el visible, infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR) lo convierte en una herramienta eficaz para el monitoreo de la vegetación, suelos y detección de alteraciones hidrotermales superficiales, aunque al igual que otros sensores multiespectrales, no permite identificar minerales específicos (Drusch et al., 2012).

2.4.4 ALOS PALSAR y DEMs.

ALOS PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*) es un sensor radar de apertura sintética en banda L, desarrollado por JAXA. Es ampliamente utilizado en geología por su capacidad para generar Modelos Digitales de Elevación (DEM) de alta resolución, útiles en el análisis topográfico de áreas remotas y cubiertas por sedimentos o vegetación (Shimada et al., 2009). Los DEMs o modelos de elevación digital se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Felicísimo, 1994).

2.5 Imágenes satelitales multiespectrales

Imagen que lleva asociados varios valores numéricos a cada píxel, tantos como bandas espectrales sea capaz de detectar el sensor. A priori, es el tipo de producto más útil ya que nos proporciona, en cierto modo, la firma espectral de los distintos elementos presentes en la imagen. Es captada mediante un sensor digital que mide la reflectancia en muchas bandas (Bravo, 2017).

2.6 Técnicas de análisis espectral

2.6.1 Matemática de bandas (*Band Ratios y Band Math*)

Las operaciones matemáticas entre bandas espectrales, como las razones de bandas, se emplean para resaltar propiedades espectrales específicas de materiales en la superficie terrestre. Esta técnica permite atenuar los efectos del sombreado topográfico y minimizar

las variaciones de brillo, lo que facilita la discriminación litológica y la identificación de zonas de alteración hidrotermal (Campbell & Wynne, 2011).

2.6.2 Composiciones RGB en falso color

La combinación de bandas, o composición RGB, consiste en asignar tres bandas espectrales a los canales rojo, verde y azul de un *software* de procesamiento de imágenes, permitiendo visualizar en pantalla distintas propiedades espectrales de los objetos en la superficie terrestre. El color resultante de cada píxel dependerá de la reflectancia relativa de las bandas asignadas y, por tanto, de las características espectrales del material presente (Lillesand, Kiefer & Chipman, 2015).

2.6.3 Mapeo de ángulo espectral (*Spectral Angle Mapper*)

El SAM (*Spectral Angle Mapper*) es un método de clasificación espectral que asigna los píxeles de una imagen según su similitud con espectros de referencia conocidos (Kruse et al., 1999). Este algoritmo calcula el ángulo espectral entre el vector del espectro del píxel y el del espectro de referencia, tratándolos como vectores en un espacio n-dimensional. Los espectros de referencia pueden obtenerse de la imagen o de una biblioteca espectral. Cuanto menor es el ángulo, mayor es la similitud espectral; valores cercanos a cero indican una alta correspondencia, mientras que ángulos mayores reflejan menor similitud (Sabins, 1999).

2.7 Aplicaciones de sensores remotos en el estudio de calderas volcánicas

La teledetección se ha consolidado como una herramienta fundamental en el estudio de calderas volcánicas, permitiendo identificar zonas de alteración hidrotermal, estructuras volcánicas y áreas con potencial mineralizado. Sensores como ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2 han demostrado ser particularmente eficaces en estos contextos, debido a su capacidad para detectar firmas espectrales asociadas a minerales como alunita, caolinita,

óxidos de hierro y filosilicatos, especialmente en ambientes áridos y con buena exposición aflorante.

Investigaciones como las de Rowan et al. (2003) y Mars & Rowan (2006) evidencian el uso exitoso del sensor ASTER para el mapeo de alteraciones hidrotermales en regiones áridas, aprovechando la sensibilidad de sus bandas SWIR. Por su parte, estudios más recientes, como el de Ibáñez (2021), han empleado técnicas de análisis espectral para caracterizar alteraciones en volcanes activos y sistemas geotermales, reafirmando la utilidad de la percepción remota en la exploración temprana de zonas mineralizadas.

A pesar de estos avances, estructuras volcánicas de gran escala como la Megacaldera Carrizalillo no han sido aún exploradas sistemáticamente mediante técnicas de teledetección multiespectral. Este vacío en la caracterización espectral de sus alteraciones hidrotermales representa una oportunidad para aplicar nuevas metodologías y generar información clave para la exploración geológica y minera regional. En este sentido, el presente estudio contribuye al fortalecimiento del uso de sensores remotos como herramienta de apoyo en el reconocimiento preliminar de áreas alteradas, permitiendo orientar con mayor precisión futuras campañas de prospección.

CAPÍTULO 3: MARCO GEOLÓGICO

3.1 Geología regional

3.1.1 Contexto tectónico y magmático regional

La Región de Atacama se emplaza sobre el margen activo de América del Sur, configurado desde el Jurásico por la subducción de la placa de Nazca (anteriormente Farallón) bajo la placa Sudamericana. Este proceso ha originado una evolución tectono-magmática compleja, marcada por la generación de arcos magmáticos calcoalcalinos y un sostenido volcanismo e intrusión desde el Mesozoico (Mpodozis & Ramos, 1989; Vivallo et al., 2009).

La Cordillera de Domeyko, donde se emplaza el área de estudio, se compone principalmente de rocas volcánicas e intrusivas del Paleoceno-Eoceno, y alberga depósitos tipo pórfido cuprífero, epitermales y vetiformes (Vivallo et al., 2009). Su evolución ha estado fuertemente controlada por sistemas de fallas con orientación N-S, destacando el Sistema de Falla Domeyko, el cual ha influido en el emplazamiento de cuerpos intrusivos y calderas paleógenas, como la Megacaldera Carrizalillo y su caldera anidada El Durazno (Rivera & Mpodozis, 1994; Arévalo et al., 1994).

3.1.2 Evolución geológica desde el Cretácico

Durante el Cretácico Superior y el Paleógeno, la Región de Atacama experimentó una evolución tectono-magmática significativa, asociada a cambios en la geometría de subducción que provocaron la migración del arco magmático hacia el este y el desarrollo de un régimen extensional (Mpodozis & Ramos, 1989). Este contexto favoreció la formación de la Cuenca Hornitos, un hemigraben activo entre 78 y 55 Ma, estructuralmente controlado por fallas como La Ternera y Elisa de Bordos (Arévalo et al., 1994).

La ascensión de magmas y el colapso de cámaras someras originaron calderas como Carrizalillo, El Durazno y Lomas Bayas, acompañadas por extensos depósitos ignimbríticos y lavas andesíticas (Rivera & Mpodozis, 1994). Más tarde, durante el Eoceno medio a superior, el cambio hacia un régimen compresivo marcó el término del volcanismo extensional, favoreciendo tanto el alzamiento y la erosión de la Cordillera de Domeyko como el emplazamiento de grandes cuerpos pórfidos cupríferos (Mpodozis et al., 1991).

3.1.3 Complejo volcánico Megacaldera Carrizalillo

La Megacaldera Carrizalillo es una estructura volcánica de colapso ubicada al sureste de Copiapó. Presenta una morfología elíptica con orientación NNE y dimensiones aproximadas de 58×32 km, cubriendo una superficie superior a 1.400 km^2 (Rivera & Mpodozis, 1994; Rivera & Falcón, 2000).

Su formación comenzó durante el Cretácico Superior, con la construcción de estratovolcanes de composición intermedia a básica que rellenaron las depresiones tectónicas de la Cuenca Hornitos. El ascenso sostenido y la acumulación de magmas a nivel cortical originaron una gran cámara magmática, la cual colapsó tras la evacuación masiva de material piroclástico. Este evento generó amplias ignimbritas riolíticas, fiammes y depósitos masivos con estructuras de flujo y soldadura, que constituyen la base de las unidades intracaldera (Rivera & Mpodozis, 1994).

El colapso se detuvo cuando la presión en la cámara fue parcialmente restablecida mediante el ascenso de nuevos pulsos magmáticos desde niveles profundos, lo que dio paso a una etapa de volcanismo post-colapso, caracterizada por el emplazamiento de domos y estructuras volcánicas tardías (Lipman, 1984).

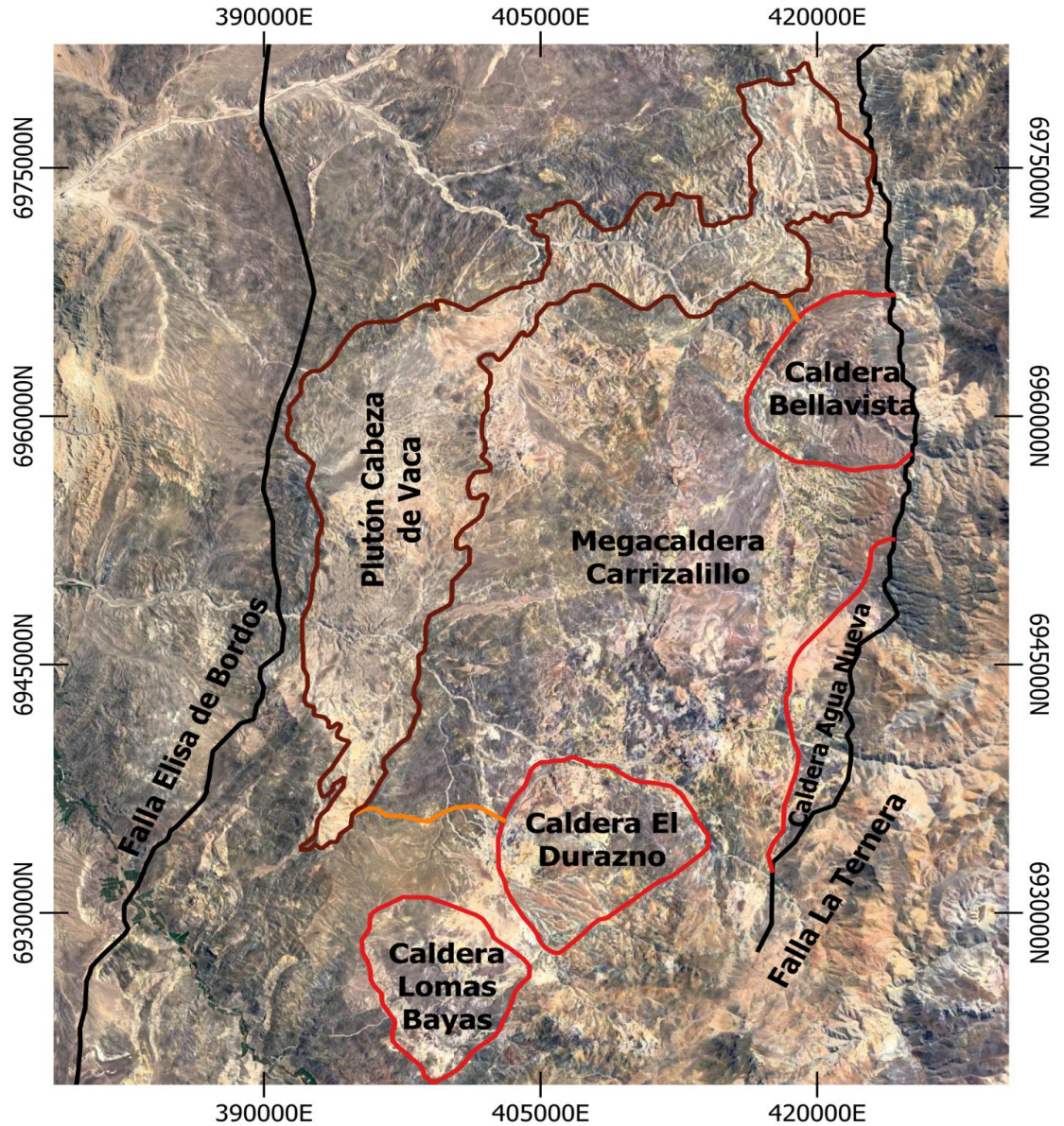


Figura 3.1. Calderas anidadas a la Megacaldera Carrizalillo. Mapa de elaboración propia.

El contorno de la megacaldera está delineado parcialmente por un anillo intrusivo granodiorítico, conocido como el Plutón Cabeza de Vaca, de más de 50 km de longitud, que aflora principalmente en los bordes oriental y septentrional. En contraste, los márgenes meridional y suroccidental están truncados por fallas regionales, como San Antonio y La Ternera, que controlaron tanto el emplazamiento de domos post-colapso como la configuración estructural del campo caldérico anidado (Rivera & Falcón, 2000).

En fases posteriores, la cámara magmática evolucionó hacia reservorios de menor volumen, los cuales también colapsaron en sucesivos eventos eruptivos. Estos generaron al menos cuatro calderas anidadas: Lomas Bayas, El Durazno, Agua Nueva y Bellavista (ver Figura 3.1). Dichas estructuras conservan fracturas anulares y otras evidencias estructurales de colapso, además de depósitos característicos como megabrechas, tobas eutaxíticas, flujos piroclásticos, lavas traquiandesíticas y riolíticas, así como depósitos lacustres asociados (Rivera & Mpodozis, 1994; Gerding, 2019).

3.2 Geología local

La caldera El Durazno presenta una morfología semicircular, con un diámetro aproximado de 12 km, delimitada por una fractura anular parcialmente conservada. Su relleno está constituido por grandes bloques de megabrechas dispuestos desde la base hacia el techo e inclinados hacia el centro, acompañados de secuencias de traquiandesitas, dacitas, tobas de caída y otros depósitos piroclásticos. Las dataciones disponibles indican una edad entre 56,5 Ma (plagioclasa) y 48,2 Ma (roca total) (Arévalo et al., 1994). En este contexto, el área del proyecto se emplaza sobre unidades formadas por depósitos volcánicos piroclásticos y de flujo (Rivera & Mpodozis, 1994).

La caldera se desarrolló sobre el basamento compuesto por unidades sedimentarias y volcánicas del Triásico al Cretácico Superior, como la Formación La Ternera y las Lavas de Sierra La Dichosa, respectivamente. Estas unidades forman parte del relleno de la cuenca extensional Hornitos, originada bajo un régimen transtensional activo durante el Cretácico Superior–Paleoceno (Arévalo et al., 1994).

3.2.1 Principales unidades geológicas descritas en el sector

Según la carta geológica Hoja La Guardia (Iriarte et al., 1999), en el área de estudio se identifican las siguientes unidades geológicas, ordenadas desde la más reciente a la más antigua. Estas unidades abarcan depósitos superficiales, secuencias volcánicas y sedimentarias, cuerpos intrusivos, y calderas de colapso con sus respectivas facies. La

información cartográfica ha sido complementada y representada en el mapa geológico local (Figura 3.2), el cual permite visualizar su distribución espacial en el sector de la caldera El Durazno.

- a) **Qa** - **Depósitos aluviales (Cuaternario)**: rípios, gravas y arenas, asociadas a sistemas de drenaje activos e intermitentes. Se componen de clastos heterocomposicionales y subangulosos en una matriz limo arenosa. Incluyen depósitos transportados por agua que se interdigitan con flujos de barro y detritos provenientes de las quebradas secundarias.
- b) **Qc** - **Depósitos coluviales (Cuaternario)**: mezcla caótica de fragmentos rocosos de diversos tamaños, sin estratificación y mala selección. Se restringen a taludes y quebradas cortas de gran pendiente.
- c) **TMga** - **Gravas de Atacama (12-15 Ma)**: gravas mal consolidadas, heterocomposicionales, con lentes de arena y limos bien estratificados, e intercalaciones locales de tobas. Constituyen depósitos aterrazados, acumulados como relleno de una antigua red hidrográfica coincidente, en parte, con los valles actuales.
- d) **TEmd** - **Pórfido monzoníticos y dioríticos (51-47 Ma)**: intrusivos hipabisales de piroxeno y anfíboles que se encuentran como “stocks” y pequeños apófisis, emplazados en las lavas e ignimbritas del Cretácico superior y Paleoceno. Incluyen al “Stock de La Presidenta” (Rivera, 1992), formado por leucogabros de olivino y piroxeno y monzodioritas de piroxeno que intruyen las ignimbritas de la caldera Lomas Bayas. Las rocas huéspedes de los pórfidos, especialmente los Estratos de Quebrada El Romero, al oeste de la falla La Ternera, están afectadas por alteración hidrotermal intensa (silicificación-argilización).
- e) **TEgg** - **Plutón El Gato e intrusivos asociados (46-40 Ma)**: conjunto de intrusivos formado por el plutón El Gato que intruye a las formaciones La Ternera, Lautaro, Quebrada Monardes y Quebrada Seca. Se incluyen dos stocks menores y algunos afloramientos aislados que, en Sierra de Los Chilenos, intruyen las formaciones La Ternera y Lautaro. El grupo está formado principalmente por granodioritas equigranulares de anfíbol y biotita. El plutón El Gato desarrolla, en sus bordes,

aureolas con metamorfismo de contacto caracterizadas por una intensa silicificación.

f) **TPc - Calderas Lomas Bayas, El Durazno, Agua Nueva y Jorquera (65-55 Ma):** calderas de colapso semicirculares de diámetro menor a los 12 km, emplazadas sobre basamento Triásico (Fm. La Ternera) a Cretácico superior (Lavas Sierra La Dichosa), conservando en su mayoría, su fractura anular y sus facies de intracaldera. Las rocas de la caldera El Durazno varían composicionalmente entre andesitas basálticas y riolíticas (55-73% SiO₂).

- **TPc (a) - Tobas y lavas precolapso:** tobas pumíceas eutaxíticas, tobas de caída, depósitos de flujos de oleada piroclástica, lavas traquiandesitas porfídicas y brechas, de color rojizo y pardo-verdoso, que forman grandes bloques rotados, de hasta 500 metros de largo, en las cercanías del borde interno de la caldera El Durazno.
- **TPc (b) - Brechas de colapso:** depósitos lenticulares de brechas con clastos andesíticos, de dimensiones métricas a decamétricas, dispuestos en una matriz cinerítica. Aparecen adosados al borde interno de la fractura anular de las calderas El Durazno, Agua Nueva y Jorquera, o bien, intercalados en las ignimbritas de intracaldera en la caldera Agua Nueva (Arévalo et al., 1994).
- **TPc (c) - Ignimbritas de intracaldera:** tobas pumíceas y líticas dacíticas, soldadas (62-63% SiO₂) de hasta 800 metros de potencia (Caldera El Durazno) que forman varias unidades de flujo y/o enfriamiento, de colores blanquecinos a rosado claro. Poseen textura eutaxítica e incluyen fragmentos líticos cogenéticos, lobulados, y, en la caldera El Durazno, niveles de vitrófiro. En la caldera Lomas Bayas, corresponden a tobas de flujo de ceniza y pómez, con variable grado de soldamiento, y color rosado a blanquecino que forman unidades de flujo con espesor variable de 2 y 90 m. Contienen de 15 a 20% de líticos, accidentales, andesíticos y dacíticos (Arévalo et al., 1994).
- **TPc (d) - Lavas de intracaldera:** secuencias de lavas de hasta 500 metros de espesor, compuesta de dacitas rosadas en la base a traquiandesitas pardo

rojizas en el techo (58-68% SiO₂). Presenta coladas de 5 a 10 metros de espesor.

- **TPc (e) - Depósitos sedimentarios de intracaldera:** areniscas finas, limolitas, lutitas negras fisibles y calizas, depositadas en un ambiente lacustre, reductor a salino, que constituyen secuencias de hasta 150 m de espesor en las calderas Lomas Bayas y Agua Nueva. Se incluyen calizas estromatolíticas, limolitas calcáreas con *Thalassinoides* y ostrácodos, y lutitas arenosas, con ondulitas, pliegues sedimentarios, microestratificación cruzada y marcas de fondo.
- **TPc (f) - Domos y diques riolíticos:** cuerpos de menores de riolitas blanquecinas (66-79% SiO₂) que afloran dentro de las calderas y a los cuales se asocian diques de composición similar. Presentan fenocristales de cuarzo y oligoclasa y desvitrificación de masa fundamental a agregados félsicos y perlíticos.
- **TPc (g) - Tobas reomórficas:** tobas soldadas reomórficas, sin estratificación visible, con pliegues de flujo convolutos, que se encuentran en la caldera Lomas Bayas.

- g) **TPisp - Ignimbritas de Sierra La Peineta (65-60 Ma?):** secuencias piroclásticas de 1.100 metros de espesor. Según Rivera y Mpodozis (1994) se asocia a una actividad posterior a la formación de la caldera El Durazno.
- h) **TPqr2 - Estratos de Quebrada El Romero (Paleoceno inferior):** 500 metros de lavas cuya composición varía de dacitas en su base (63-67% SiO₂) a andesitas y traquiandesitas en el techo (58-67% SiO₂).
- i) **Ksd - Lavas de Sierra La Dichosa (Cretácico Inferior) (Arévalo et al., 1994):** corresponde a una secuencia volcánica de composición basáltica a traquibasáltica (45-52% SiO₂), caracterizada por coladas de lava porfídicas con fenocristales de plagioclasa y piroxeno, desarrolladas sobre una masa fundamental pilotaxítica a intersertal. Presenta espesores de hasta 800 m y localmente contiene intercalaciones de brechas, paraconglomerados y areniscas rojas. En la Hoja La Guardia, su base no aflora, pero constituye el basamento inmediato de las Ignimbritas de Sierra La Peineta y de las calderas paleocenas Lomas Bayas y El

Durazno, lo que la hace geológicamente significativa en la evolución estratigráfica del área.

j) **Ksl** - Estratos de Sierra Los Leones (Cretácico Superior): 500 metros de brechas volcánicas, mal estratificadas, color pardo claras, que alternan con coladas de lavas traquibasálticas de piroxeno y olivino, de 7 a 10 metros de espesor, a veces aparecen lentes de paraconglomerados y areniscas rojas.

k) **ah** - Alteración Hidrotermal: zona de alteración hidrotermal.

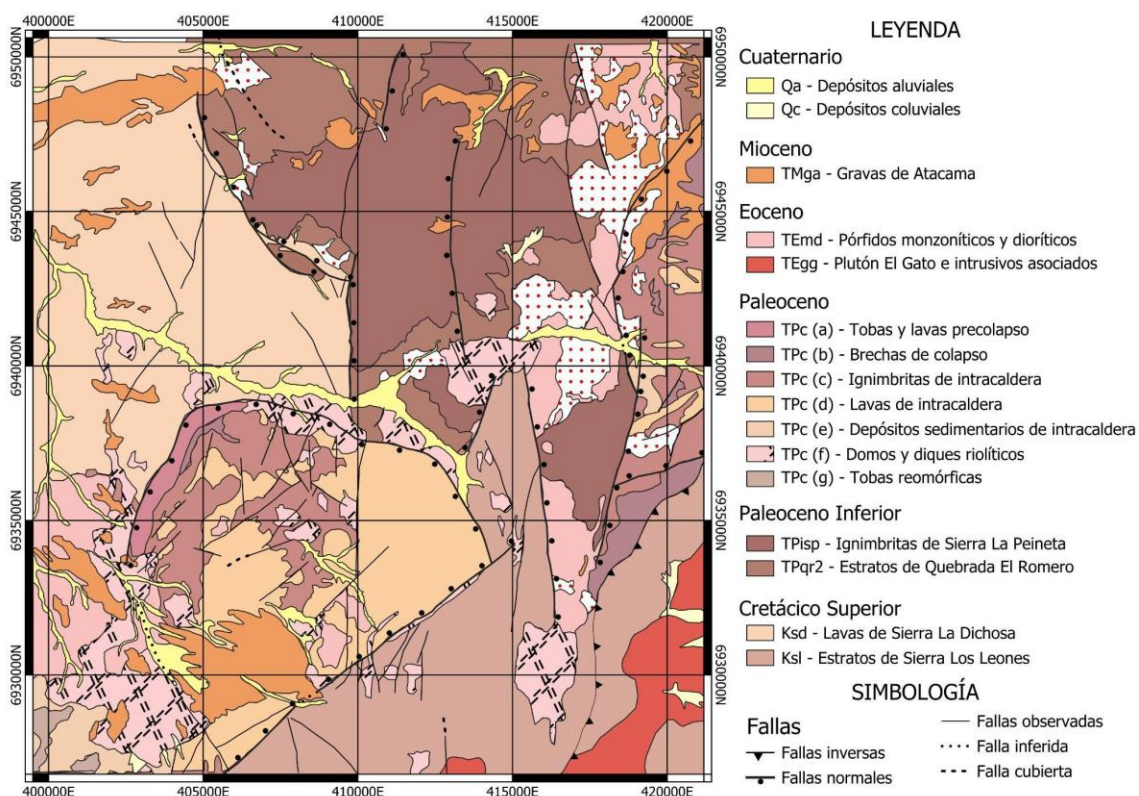


Figura 3.2. Mapa geológico local del área de estudio, basado en la Hoja La Guardia (Iriarte et al., 1999), mostrando la distribución de las principales unidades geológicas descritas. Mapa de elaboración propia.

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA DE TRABAJO

En el presente capítulo se detallan los procedimientos realizados para llevar a cabo este estudio. La metodología fue diseñada en función de seis etapas principales, cada una de las cuales permitió avanzar de forma sistemática en la obtención y análisis de los datos. Estas etapas permitieron abordar de manera integral la identificación, caracterización y validación de zonas alteradas en el área de estudio.

Todos los procesamientos, correcciones y manejo de las imágenes satelitales en este estudio se llevaron a cabo en el *software* ENVI 6.1, especializado en el análisis de imágenes geospaciales. La elaboración de los mapas temáticos, en tanto, se realizó en QGIS 3.34.1, *software* gratuito orientado a la creación y gestión de sistemas de información geográfica (SIG).

Las etapas desarrolladas fueron:

4.1 Revisión bibliográfica

El desarrollo inicial de esta investigación contempló una revisión exhaustiva de la literatura científica, con el propósito de establecer el sustento teórico necesario para comprender tanto el contexto geológico del área de estudio como los fundamentos metodológicos que orientaron el trabajo.

La búsqueda de información se sustentó en fuentes científicas relevantes, tales como artículos académicos, tesis universitarias, documentos técnicos y bibliografía especializada en sensores remotos aplicados a estudios geológicos. Se revisaron investigaciones enfocadas en el reconocimiento espectral de zonas de alteración en entornos volcánicos, tanto activos como fósiles, así como estudios que validan la aplicación de imágenes ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2 en regiones áridas con buena exposición aflorante. Asimismo, se incorporaron antecedentes geológicos específicos sobre la Megacaldera Carrizalillo y su subunidad, la caldera El Durazno, con el fin de

establecer una base contextual que facilitara la interpretación y análisis de los resultados obtenidos.

4.2 Adquisición de imágenes satelitales

Para el desarrollo del procesamiento de imágenes de este estudio, se emplearon imágenes satelitales multiespectrales provenientes de tres sensores ópticos: ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2. Estos sensores fueron seleccionados por su disponibilidad gratuita, resolución espacial y espectral adecuadas, y su capacidad para detectar firmas minerales asociadas a alteraciones hidrotermales en regiones áridas.

La imagen ASTER (*Level 1T*) fue obtenida desde la plataforma *Earthdata Search* de la NASA y correspondió a una adquisición realizada el 12 de agosto de 2002. Este sensor resultó especialmente útil para el estudio de alteraciones hidrotermales, ya que contaba con bandas en el infrarrojo térmico (TIR) y en el infrarrojo medio (SWIR), este último permitió identificar minerales como alunita, caolinita y clorita a partir de sus firmas espectrales. Asimismo, sus bandas en el infrarrojo cercano (NIR) permitieron mapear óxidos e hidróxidos de hierro. Por estas características, ASTER fue considerado un sensor eficiente para la detección remota de zonas de alteración. Se recomienda usar imágenes ASTER previas a 2008 porque son las únicas que conservan calidad espectral adecuada en el rango SWIR, ya que posteriores a esa fecha el SWIR presentó fallas que afectan gravemente la calidad de los datos adquiridos.

Por su parte, la imagen Landsat 8, capturada el 29 de abril de 2025, fue descargada desde la plataforma USGS *Earth Explorer*. Este sensor ofreció cobertura completa desde el espectro visible hasta el SWIR, lo que permitió aplicar matemática de bandas (*band ratios*) orientadas a la detección de óxidos e hidróxidos.

Además, se utilizó una imagen del satélite Sentinel-2A, capturada el 22 de abril de 2025 y descargada desde el portal oficial de *Copernicus Open Access Hub*. Este sensor resultó especialmente útil para la detección de minerales de óxidos de hierro, gracias a su

resolución espectral en el espectro visible e infrarrojo medio (VNIR). Debido a que los archivos nativos de Sentinel-2 requerían un preprocesamiento específico para su análisis en entornos como ENVI, la imagen fue procesada previamente mediante el *software* SNAP, con el fin de convertirla a un formato compatible.

En todos los casos, se seleccionaron imágenes con mínima cobertura nubosa, buena calidad radiométrica y fechas representativas del comportamiento espectral del terreno bajo condiciones atmosféricas estables. La elección de dichas fechas respondió a la necesidad de asegurar consistencia estacional y coherencia con los datos geológicos de base disponibles para el área de estudio.

Adicionalmente, para el modelamiento del relieve y la generación de mapas tridimensionales, se utilizó un Modelo Digital de Elevación (DEM) proveniente de la misión ALOS PALSAR (*Advanced Land Observing Satellite – Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*), descargado desde la plataforma ASF DAAC. Este producto proporcionó una resolución espacial de 12,5 metros, considerada adecuada para representar con detalle las formas del terreno en la zona de estudio.

4.3 Preprocesamiento

Antes de aplicar cualquier análisis espectral, fue necesario someter las imágenes a una etapa de preprocesamiento con el propósito de organizar y preparar adecuadamente los datos. Esto se debió a que los archivos descargados desde las plataformas oficiales de los sensores ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2 presentaban sus bandas espectrales separadas en archivos individuales, lo que exigió unificar esta información para que fuera reconocida como una única imagen multibanda. Para ello, se empleó la herramienta *Build Layer Stack* de ENVI, que permitió combinar todas las bandas manteniendo su orden e integridad espectral. Particularmente para Sentinel-2A, fue necesario realizar un preprocesamiento adicional mediante el *software* SNAP (*Sentinel Application Platform*), ya que sus archivos nativos en formato JPEG2000.

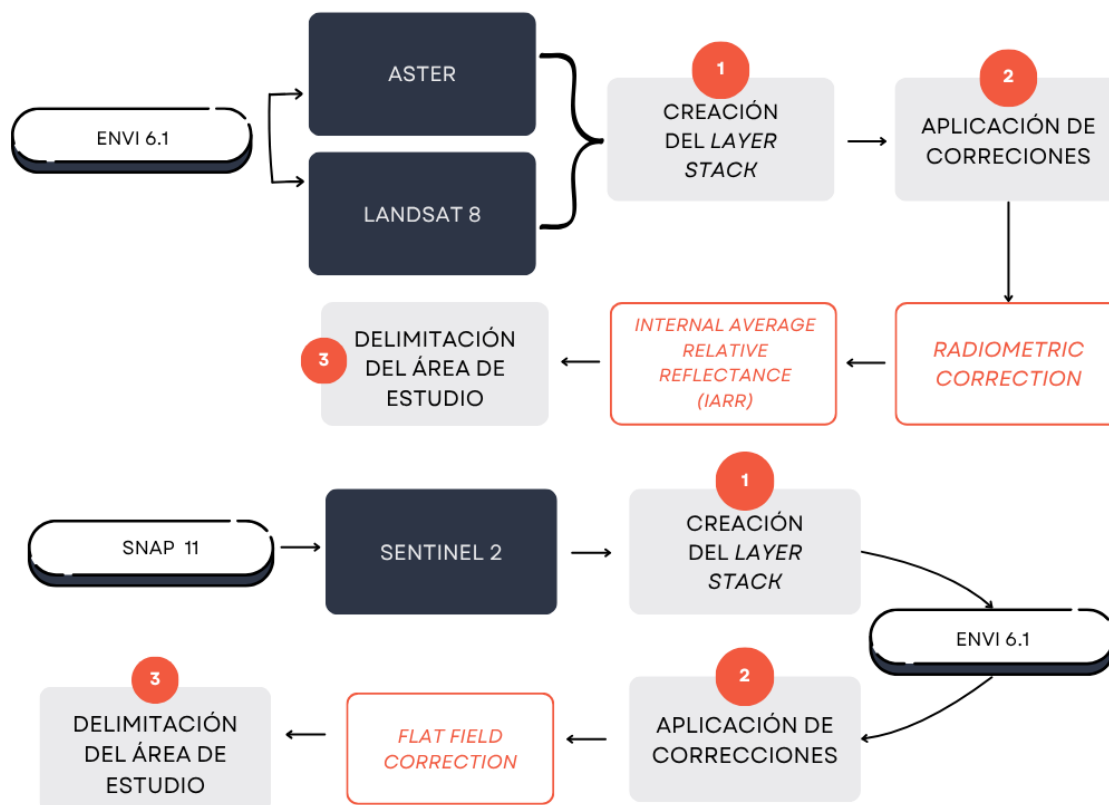


Figura 4.1. Diagrama de flujo del proceso de preprocesamiento aplicado a las imágenes satelitales ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2. Incluye la organización de bandas, correcciones radiométricas y reproyección para su integración en el análisis espectral. Elaboración propia.

Una vez integradas las bandas, se aplicaron distintas técnicas de corrección radiométrica en función del sensor. Para ASTER y Landsat 8 se utilizaron las herramientas *Radiometric Correction* e *Internal Average Relative Reflectance (IARR)* de ENVI, convirtiendo los valores digitales en unidades de radiancia física y posteriormente en reflectancia relativa, utilizando el promedio espectral de todos los píxeles como referencia interna. Para Sentinel-2A, se aplicó *Flat Field Correction* dentro de ENVI. Finalmente se realizó la delimitación del área de estudio a través de la herramienta *Subset Data Using ROIs*. El flujo detallado de este preprocesamiento se resume en la Figura 4.1.

4.4 Procesamiento

Luego del preprocesamiento y de las correcciones radiométricas, se llevó a cabo el

análisis espectral de las imágenes satelitales mediante tres enfoques complementarios: matemáticas de bandas, composiciones en falso color (RGB) y clasificación dirigida mediante *Spectral Angle Mapper* (SAM). Estas técnicas se aplicaron a las imágenes procesadas de los sensores ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2, y así se determinaron las distribuciones espaciales de minerales indicadores de alteración hidrotermal en el área de estudio.

Las metodologías empleadas en cada una de estas técnicas se detallan a continuación.

4.4.1 Matemática de bandas

Para el análisis espectral se aplicaron distintas razones de bandas a las imágenes de los sensores ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2, utilizando las herramientas *Band Math* y *Band Ratios* disponibles en el *software* ENVI. Las razones de bandas simples (*Band Ratios*) consistieron en divisiones entre bandas específicas (Figura 4.2), mientras que las operaciones más complejas se realizaron mediante *Band Math* (Figura 4.3), integrando ecuaciones diseñadas para resaltar firmas espectrales particulares.

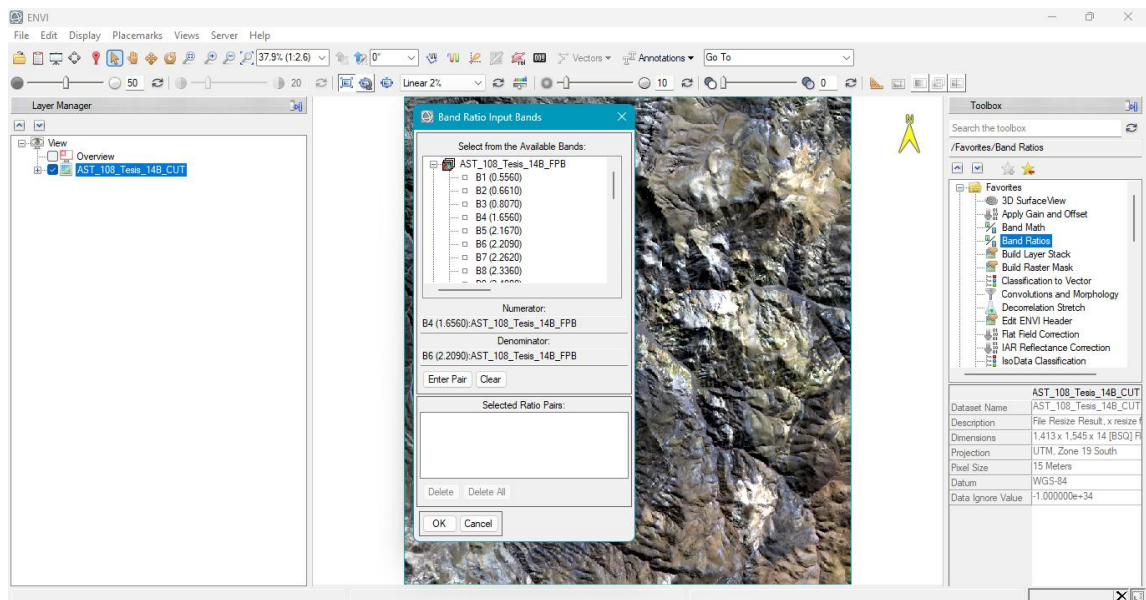


Figura 4.2. Panel de la herramienta *Band Ratios*, donde se muestra un ejemplo de la aplicación de matemáticas de bandas. Imagen propia.

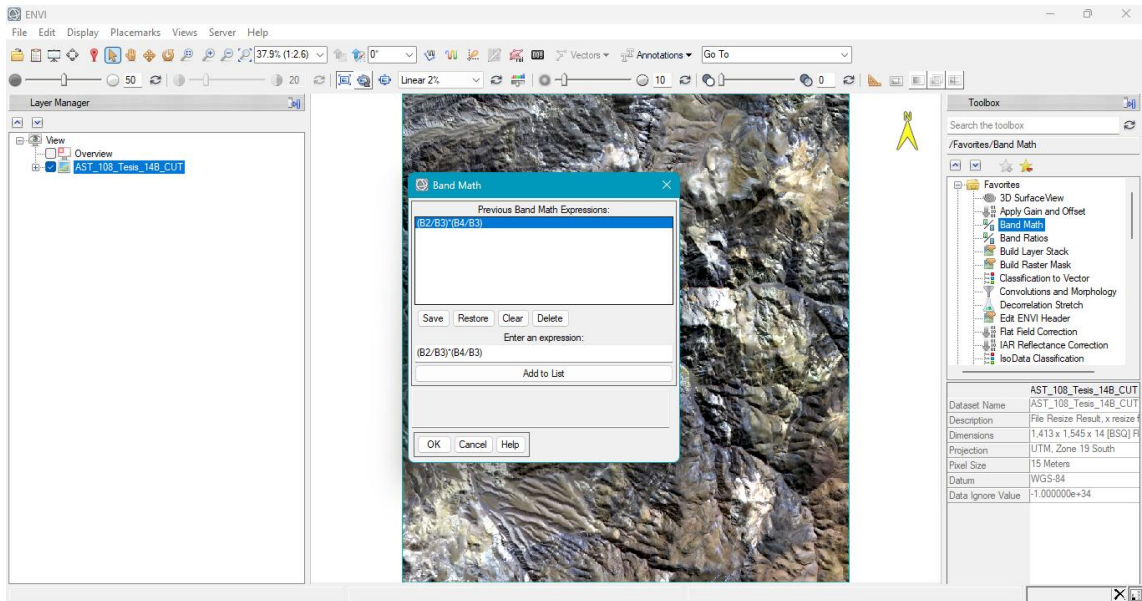


Figura 4.3. Panel de la herramienta *Band Math*, donde se muestra un ejemplo de la aplicación de matemáticas de bandas. Imagen propia.

Estas operaciones fueron seleccionadas a partir de bibliografía específica en sensores remotos, utilizando fórmulas previamente validadas en estudios similares. Su aplicación permitió caracterizar asociaciones minerales vinculadas a procesos de alteración hidrotermal. La interpretación comparativa de los resultados facilitó la identificación de zonas alteradas dentro del área de estudio.

Cabe destacar que las matemáticas aplicadas variaron entre los tres sensores, debido a que cada uno posee una configuración espectral diferente, con distintas bandas y resoluciones, lo que exigió la aplicación de diferentes ecuaciones con características propias de cada imagen satelital. Las matemáticas de bandas aplicadas en este estudio se detallan en los Anexos A (Tabla A1, A2 y A3), donde se presentan las fórmulas utilizadas para cada uno de los sensores analizados.

4.4.2 Combinaciones RGB de falso color

Para la generación de composiciones RGB en falso color, se utilizó la herramienta *Decorrelation Stretch* del software ENVI, la cual permitió asignar bandas individuales a

los canales rojo, verde y azul. Esta herramienta fue aplicada tanto con bandas originales (Figura 4.4) como con combinaciones derivadas de las matemáticas de bandas previamente calculadas (Figura 4.5). En los tres sensores utilizados, las combinaciones fueron seleccionadas con base en bibliografía especializada en teledetección. Las composiciones realizadas se encuentran detalladas en Anexos C (Tabla C1, C2 y C3).

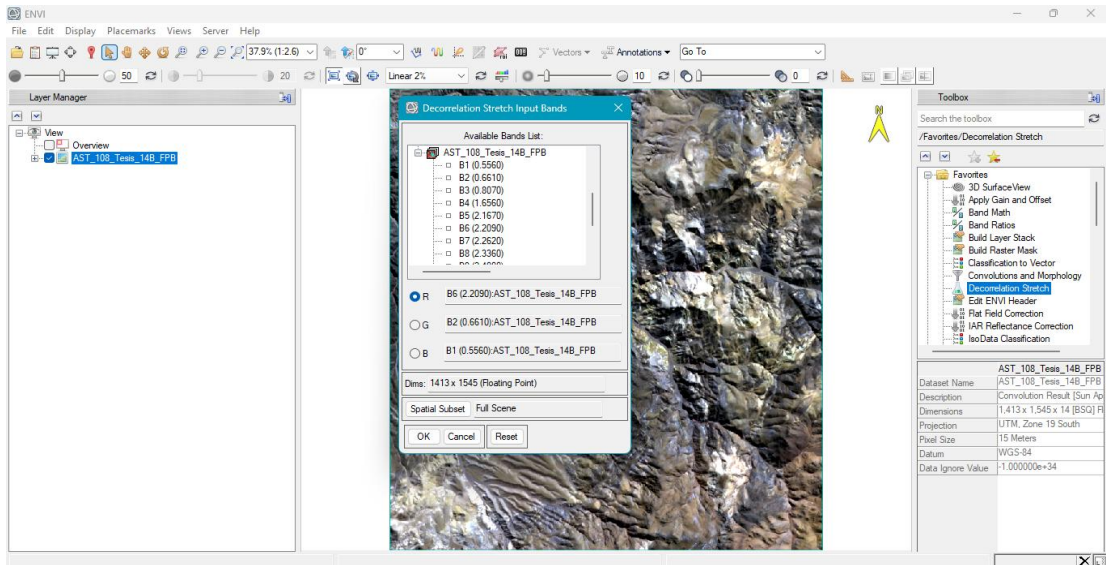


Figura 4.4. Aplicación de la herramienta *Decorrelation Stretch* utilizando las bandas originales de la imagen satelital. Imagen propia.

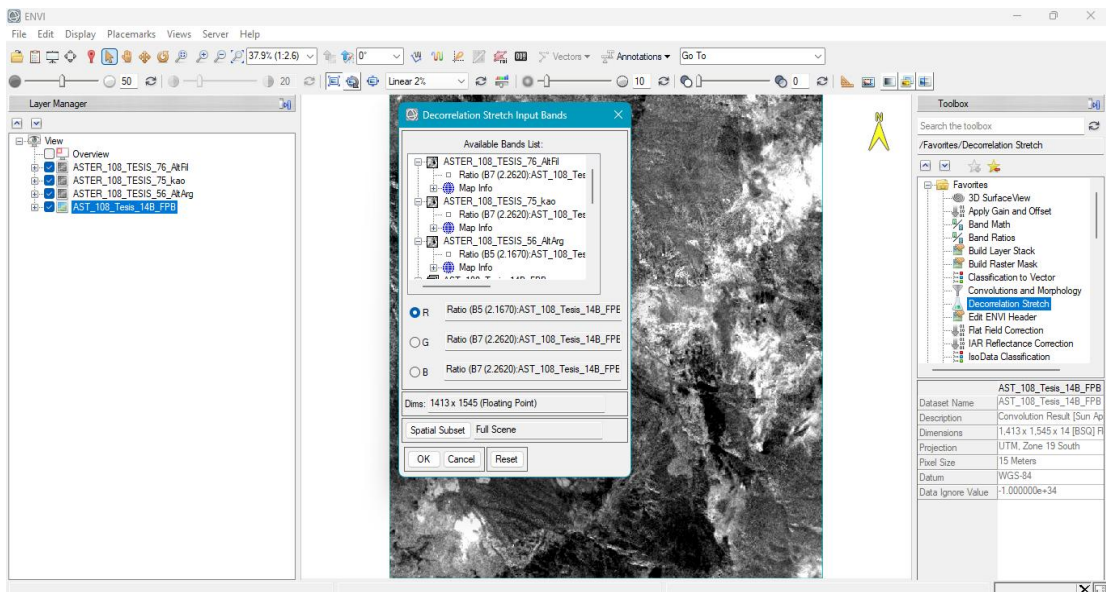


Figura 4.5. Aplicación de la herramienta *Decorrelation Stretch* utilizando combinaciones generadas a partir de matemáticas de bandas previamente aplicadas. Imagen propia.

4.4.3 SAM

En el presente estudio, la técnica de clasificación dirigida *Spectral Angle Mapper* (SAM) fue aplicada exclusivamente a la imagen ASTER, debido a su alta resolución espectral en el rango del infrarrojo de onda corta (SWIR), clave para la detección de minerales portadores de iones OH. Durante el proceso se seleccionaron minerales representativos de las principales zonas de alteración hidrotermal. El umbral angular se ajustó individualmente por mineral, con el fin de maximizar la precisión de la clasificación y minimizar los falsos positivos.

Para ello, se accedió a la herramienta *Spectral Angle Mapper* (Figura 4.6) en ENVI y se cargó la biblioteca espectral *USGS_V6*, seleccionando específicamente el archivo “*minerals_beckman_3375.sli*” (Figura 4.7).

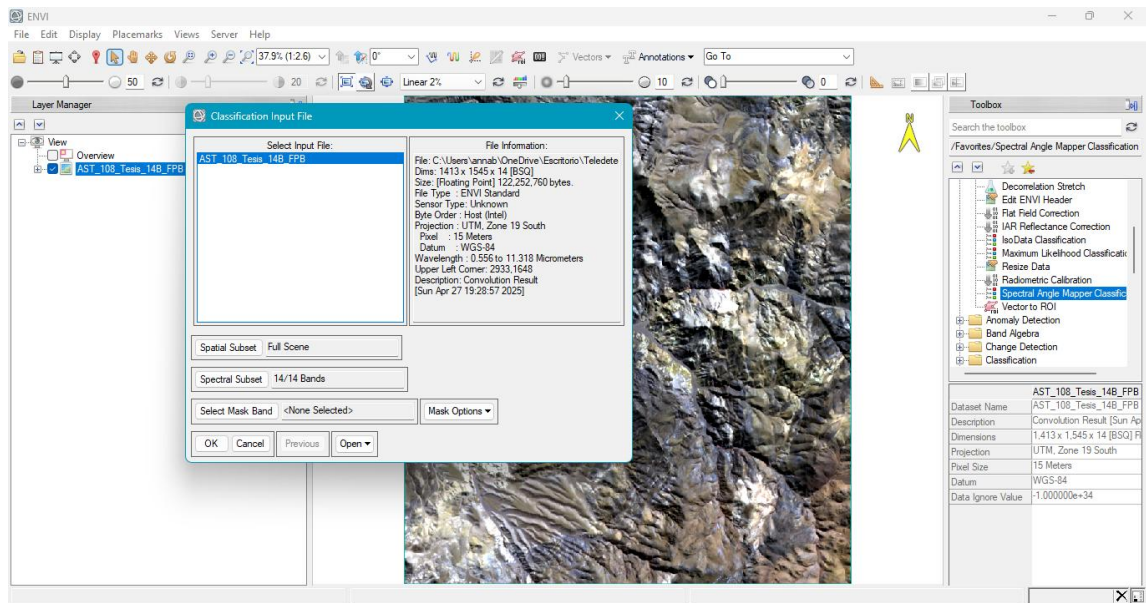


Figura 4.6. Herramienta *Spectral Angle Mapper Classification*. Imagen propia.

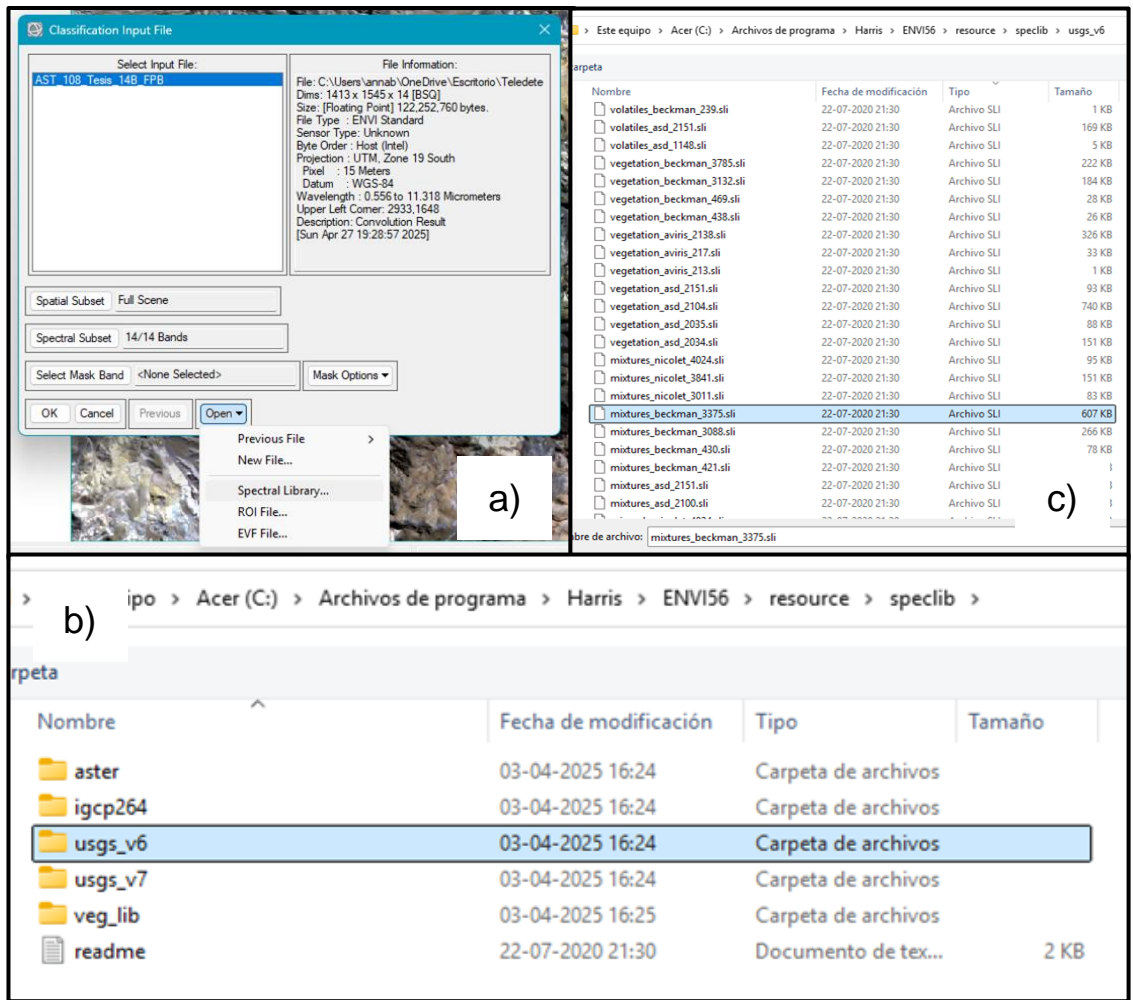


Figura 4.7. Secuencia para cargar la biblioteca espectral en ENVI: a) interfaz de la herramienta *Spectral Angle Mapper Classification*, donde se habilita la opción para cargar bibliotecas espectrales, b) visualización de las carpetas disponibles por defecto en ENVI, destacando la selección de la carpeta “USGS_V6”, y c) selección de la biblioteca “*minerals_beckman_3375*”, utilizada en este estudio para la clasificación espectral. Imágenes propias.

Una vez abierta la biblioteca, se eligieron únicamente los minerales relevantes para el estudio (Figura 4.8), en función de su asociación con alteraciones hidrotermales típicas descritas en la literatura geológica para sistemas de calderas. Se seleccionaron minerales representativos de distintos tipos de alteración: argílica avanzada (alunita, caolinita, dickita, diáspora, pirofilita), argílica intermedia (illita, moscovita), propilítica (epidota, clorita, actinolita, albita, calcita), fílica (cuarzo, moscovita, turmalina), y minerales indicadores de procesos oxidativos o supergénicos como hematita, goethita, limonita y jarosita. Además, se incluyeron minerales menos comunes como andradita, grosularia y

hornblenda por su posible aparición en ambientes de alteración específicos o en rocas de caja dentro del área de estudio.

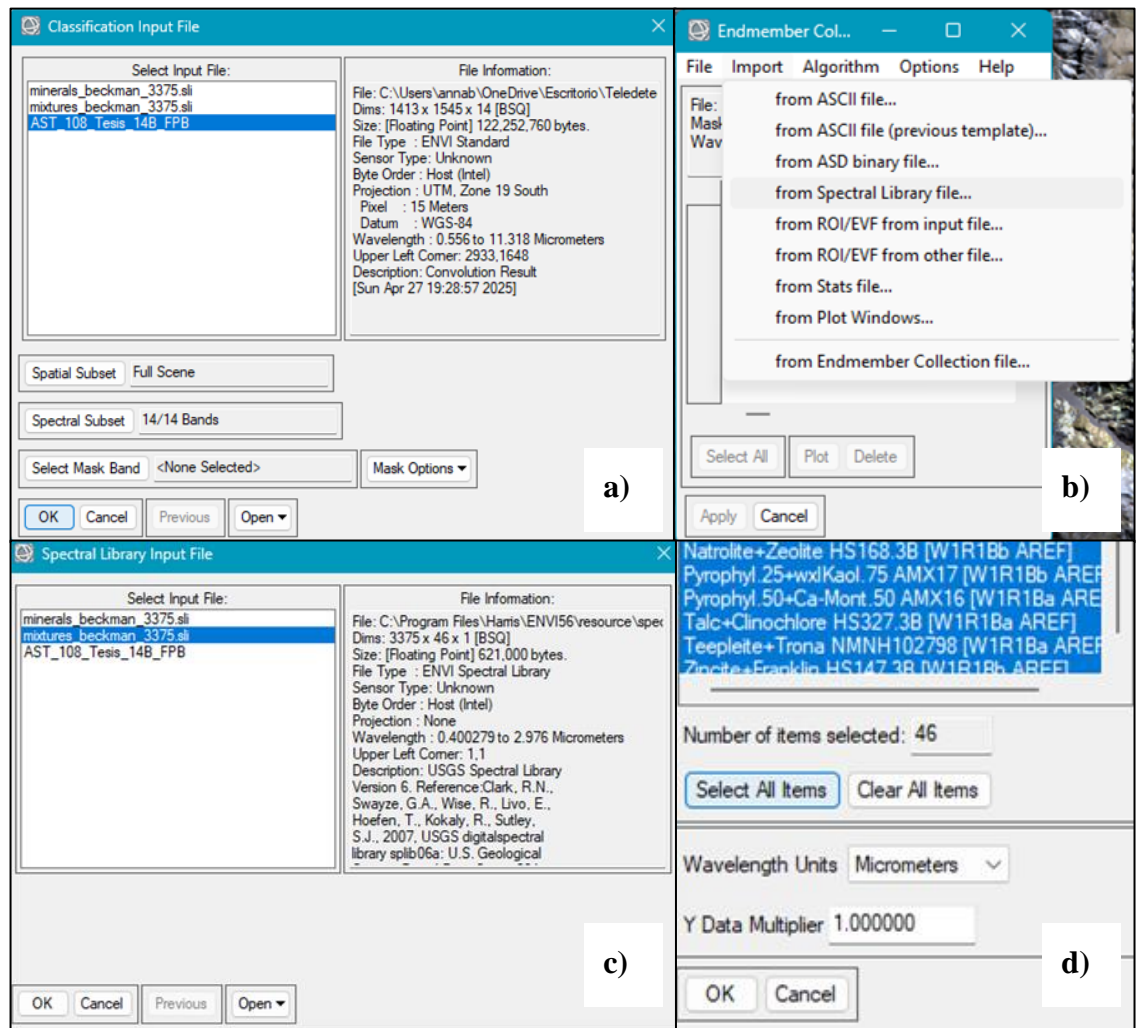


Figura 4.8. Secuencia para la selección de minerales en la herramienta SAM: a) selección de la imagen procesada sobre la cual se aplicará la clasificación, b) importación de la biblioteca espectral previamente cargada, c) visualización y selección de la biblioteca *minerals_beckman_3375* y d) selección de los minerales de interés para la clasificación espectral. Imágenes propias.

Posteriormente, se configuró un umbral angular (en radianes) para cada mineral, lo que permitió discriminar la presencia espectral en función de su similitud con la firma de referencia (Figura 4.9). Los resultados obtenidos para cada mineral fueron exportados como capas vectoriales (*shapefiles*) para su posterior análisis espacial en entornos SIG. Esta metodología permitió generar mapas mineralógicos detallados, indicando la distribución espacial de los minerales indicativos de alteración hidrotermal en la zona de

estudio. Los umbrales establecidos se detallan en Anexos B, en la Tabla B1, para cada mineral utilizado.

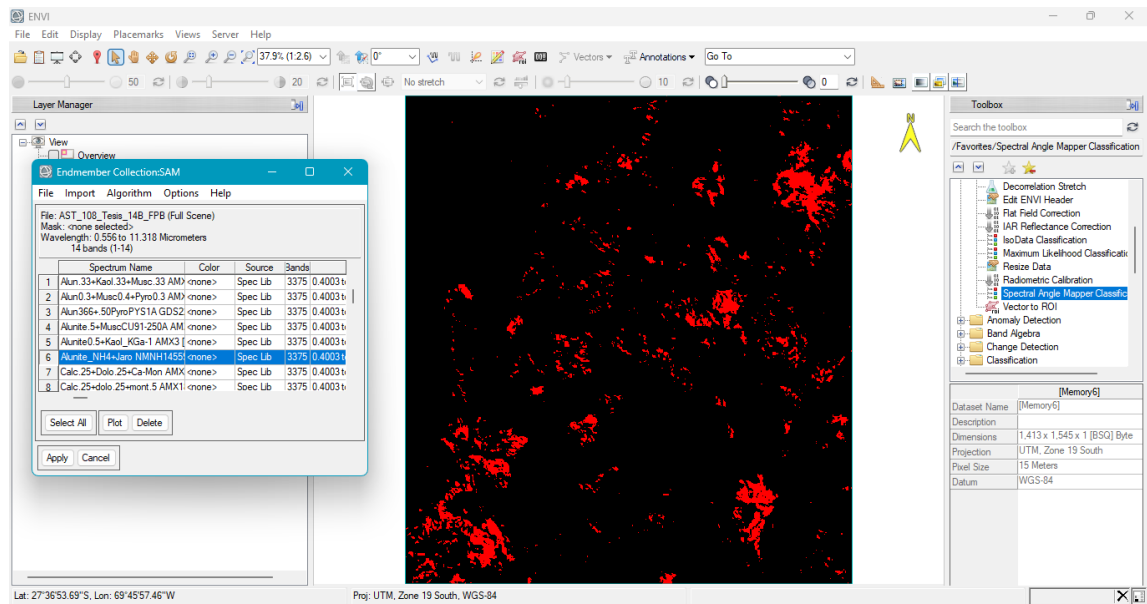


Figura 4.9. Resultado de la clasificación SAM que muestra la presencia de un mineral específico, según el umbral angular establecido. La intensidad del color (rojo) representa la similitud espectral entre el pixel y la firma del mineral seleccionado. Imagen propia.

4.5 Elaboración de mapas

Una vez obtenidos los resultados del análisis espectral mediante matemáticas de bandas, composiciones RGB en falso color y clasificación SAM, se procedió a la elaboración de mapas temáticos que representaron la distribución espacial de las alteraciones hidrotermales y minerales detectados en el área de estudio. Para ello, se emplearon las funcionalidades del *software* de sistemas de información geográfica QGIS 3.34.1, el cual permitió integrar los productos generados en ENVI y transformarlos en mapas interpretativos con coordenadas geográficas, simbología estandarizada y compatibilidad con información geológica adicional. Las imágenes previamente procesadas (composiciones RGB en falso color, capas resultantes de las matemáticas de bandas y clasificaciones SAM) fueron exportadas desde ENVI e importadas a QGIS para su análisis espacial y representación.

4.5.1 Elaboración de Modelos de Elevación Digital (Modelos 3D)

Para complementar la representación espacial de los datos obtenidos, y facilitar su interpretación morfológica en el contexto topográfico del área de estudio, se elevaron modelos tridimensionales (3D) mediante el uso de un Modelo Digital de Elevación (DEM) proveniente de la misión ALOS PALSAR.

Los modelos 3D se generaron dentro del *software* ENVI, una vez cargado el DEM en ENVI, se incorporaron las composiciones RGB en falso color generadas a partir de los distintos sensores (ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2). Posteriormente, se empleó la herramienta *3D Surface View* (Figura 4.10), la cual permitió construir una visualización tridimensional combinando el relieve con las imágenes procesadas (Figura 4.11).

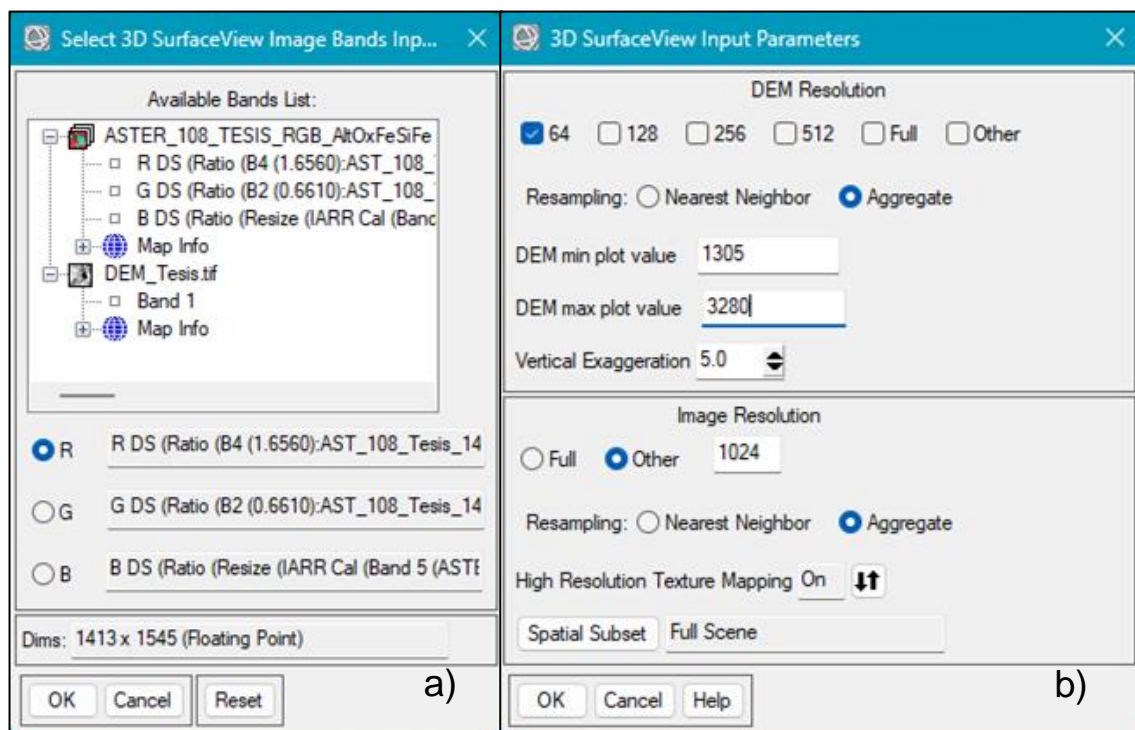


Figura 4.10. a) Panel de herramientas de *3D SurfaceView* en ENVI, donde se selecciona la imagen RGB a proyectar sobre el modelo tridimensional. b) Panel de configuración donde se asignan los valores mínimo y máximo de elevación del DEM para ajustar el relieve del modelo.

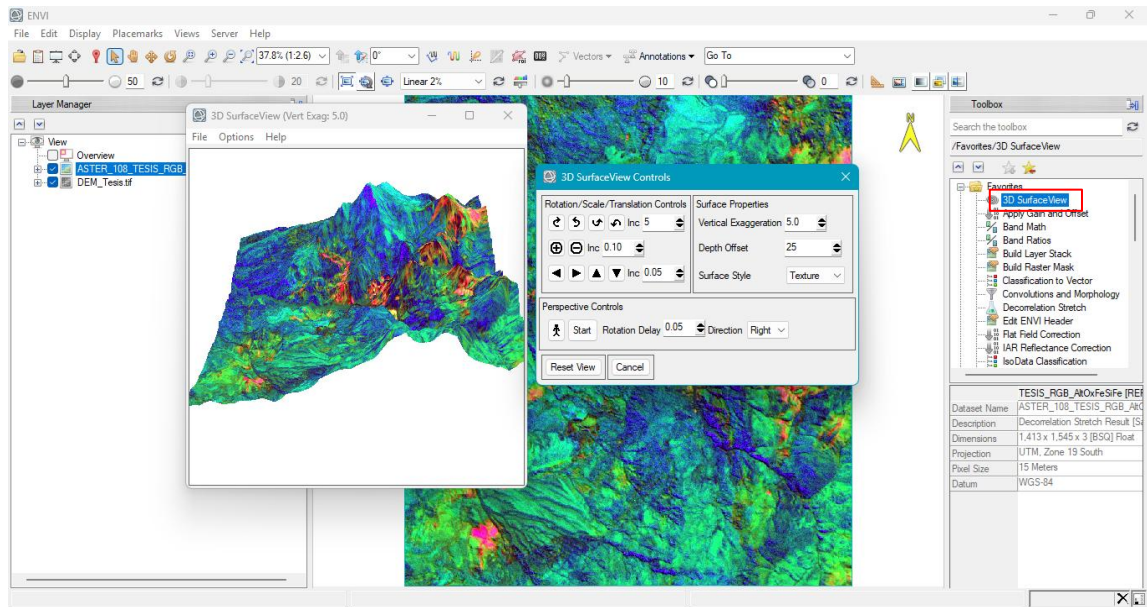


Figura 4.11. Visualización resultante del modelo 3D generado en ENVI, donde se aprecia la integración del relieve con la imagen RGB. Se muestra además el panel de control que permite rotar, escalar y explorar la escena tridimensional.

4.6 Validación de datos

Con el objetivo de validar e interpretar los resultados obtenidos a partir del procesamiento espectral, se realizó una comparación entre los mapas generados y diversas fuentes geológicas previas. Entre ellas se incluye la carta geológica oficial Hoja La Guardia (SERNAGEOMIN), elaborada a escala 1:100.000, así como estudios más detallados a escala local. Fortt (2024) presenta un mapa específico de la Caldera El Durazno a escala 1:10.000, mientras que Gerding (2019) desarrolló un levantamiento geológico a escala 1:15.000 dentro de la Megacaldera Carrizalillo. Por su parte, Trevisan (2018) elaboró cartografía espectral a escala 1:80.000 en la Quebrada Carrizalillo. La comparación entre estos trabajos y los resultados obtenidos en este estudio permitió establecer relaciones espaciales y litológicas, y evaluar la coherencia entre la información espectral y la cartografía geológica disponible para el área de estudio.

Para ello, se realizó un análisis comparativo entre las unidades descritas en la carta y alteraciones descritas en trabajos anteriores en el área de estudio. Durante el análisis se

consideraron principalmente tres aspectos: 1. Correlaciones litológicas, verificando si las zonas con alta respuesta espectral coincidieron con unidades reconocidas como volcánicas, brechadas o alteradas. 2. Relaciones estructurales, observando si los alineamientos o patrones de alteración se asociaron con fallas o fracturas previamente mapeadas. 3. Consistencia espectral, evaluando si las zonas alteradas se mantienen en los diferentes sensores utilizados (ASTER, Landsat 8, Sentinel-2).

Cabe destacar que, además de la comparación con la carta geológica oficial, se realizó un análisis más detallado considerando la tesis de postgrado de Marco Trevisan, quien desarrolló un estudio espectral en el área del Plutón Cabeza de Vaca. Esta revisión tuvo como objetivo identificar similitudes entre los mapas generados en su investigación y los obtenidos en el presente estudio, permitiendo así evaluar la consistencia de los resultados y aportar mayor respaldo a la interpretación de las alteraciones detectadas.

Finalmente, se realizó una comparación entre las firmas espectrales obtenidas en este estudio y las curvas teóricas proporcionadas por la biblioteca espectral de ENVI, con el objetivo de validar la correspondencia mineralógica entre los resultados obtenidos y los patrones espectrales de referencia.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

En este capítulo se describieron y analizaron los productos generados a partir de la metodología aplicada. En primer lugar, se presentaron los resultados del procesamiento espectral de las imágenes satelitales ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2, utilizando técnicas como matemáticas de bandas, composiciones en falso color (RGB) y clasificación dirigida mediante *Spectral Angle Mapper* (SAM). Los resultados fueron organizados por sensor y técnica empleada, dado que cada imagen abarcó diferentes rangos del espectro electromagnético.

Para los mapas resultantes de las matemáticas de bandas, los resultados se representaron en formato de mapas de intensidad en escala de grises, donde los tonos oscuros (negro) indicaron los valores bajos y menor presencia de un mineral, mientras que los tonos claros (blanco) reflejaron valores altos y, por lo tanto, mayor ocurrencia de un mineral. Mientras que la interpretación de las imágenes de las composiciones RGB en falso color se basó en un cuadro cromático triangular, donde cada vértice representa el 100% de presencia relativa del índice asignado a cada canal (rojo, verde y azul). Los colores intermedios reflejan combinaciones proporcionales de estos índices, lo que permitió inferir la coexistencia o dominancia de determinados minerales en el área de estudio.

Finalmente, los productos obtenidos permitieron visualizar las zonas con potencial presencia de alteración, facilitando su interpretación geológica y permitiendo su comparación con las litologías y estructuras previamente descritas por otros autores en el área de estudio.

5.1 ASTER

Los resultados obtenidos a partir del análisis de la imagen del sensor ASTER se presentan a continuación. Se aplicaron técnicas de matemáticas de bandas, composiciones RGB en falso color y la clasificación espectral mediante el algoritmo *Spectral Angle*

Mapper (SAM). Cada una de estas metodologías permitió resaltar diferentes aspectos del comportamiento espectral del terreno, contribuyendo a la identificación de zonas con posibles procesos de alteración.

5.1.1 Matemática de bandas

A partir de una serie de índices espectrales enfocados a resaltar zonas potencialmente afectadas por alteración hidrotermal (e.g., Origen y Sánchez (2010), Crosta et al. (2003), Van der Meer et al. (2014); Anexos A, Tabla A1) se aplicaron razones espectrales y fórmulas adaptadas específicamente a las bandas disponibles del sensor ASTER.

En particular, se lograron destacar tres alteraciones presentes en la zona de estudio, la alteración argílica avanzada, propilítica y fílica. En el caso de la alteración argílica avanzada (Figura 5.1, a) se resaltan minerales como alunita, caolinita y pirofilita. Para la alteración propilítica (Figura 5.1, b) se resaltan los minerales como clorita, epidota y carbonatos. Finalmente, para la alteración fílica (Figura 5.1, c) se resaltan minerales como moscovita, illita y esmectita.

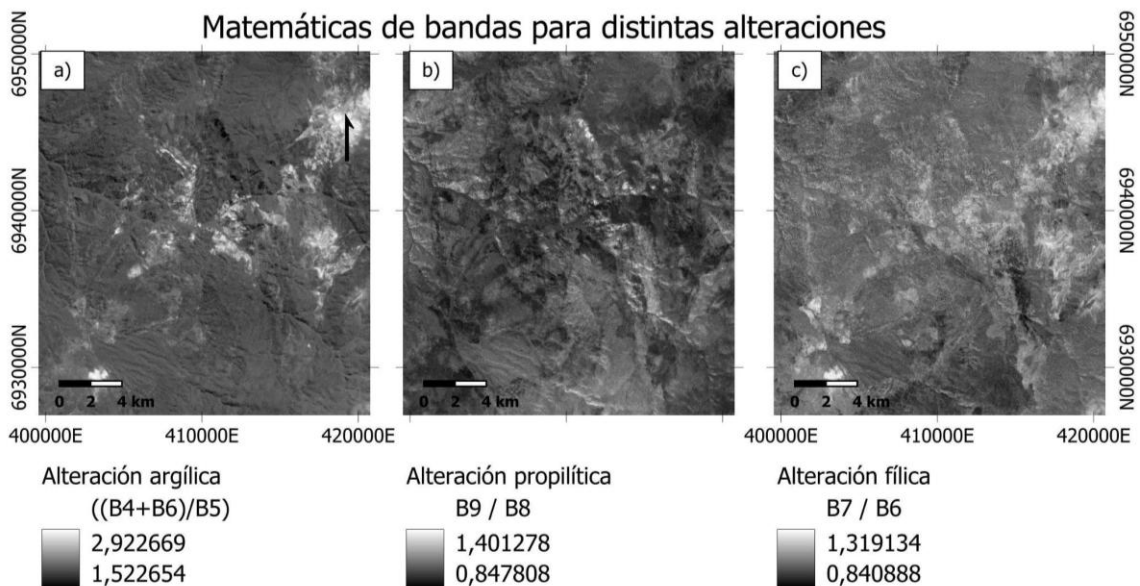


Figura 5.1. Resultados del análisis de matemáticas de bandas aplicadas a la imagen ASTER para la detección de alteraciones hidrotermales: a) índice para alteración argílica avanzada, b) índice para alteración propilítica y c) índice para alteración fílica. Mapas de elaboración propia.

Además de la identificación de zonas de alteración hidrotermal, las matemáticas de bandas aplicadas a la imagen ASTER permitieron resaltar zonas con contenido significativo de óxidos de hierro, tanto en su estado ferroso (Fe^{2+}) (Figura 5.2, a y b) como férrico (Fe^{3+}) (Figura 5.2, c y d). Mediante razones espectrales sensibles al hierro, como B2/B1 y B2/B4, se identificaron áreas con respuestas espectrales asociadas a minerales como hematita, goethita y jarosita.

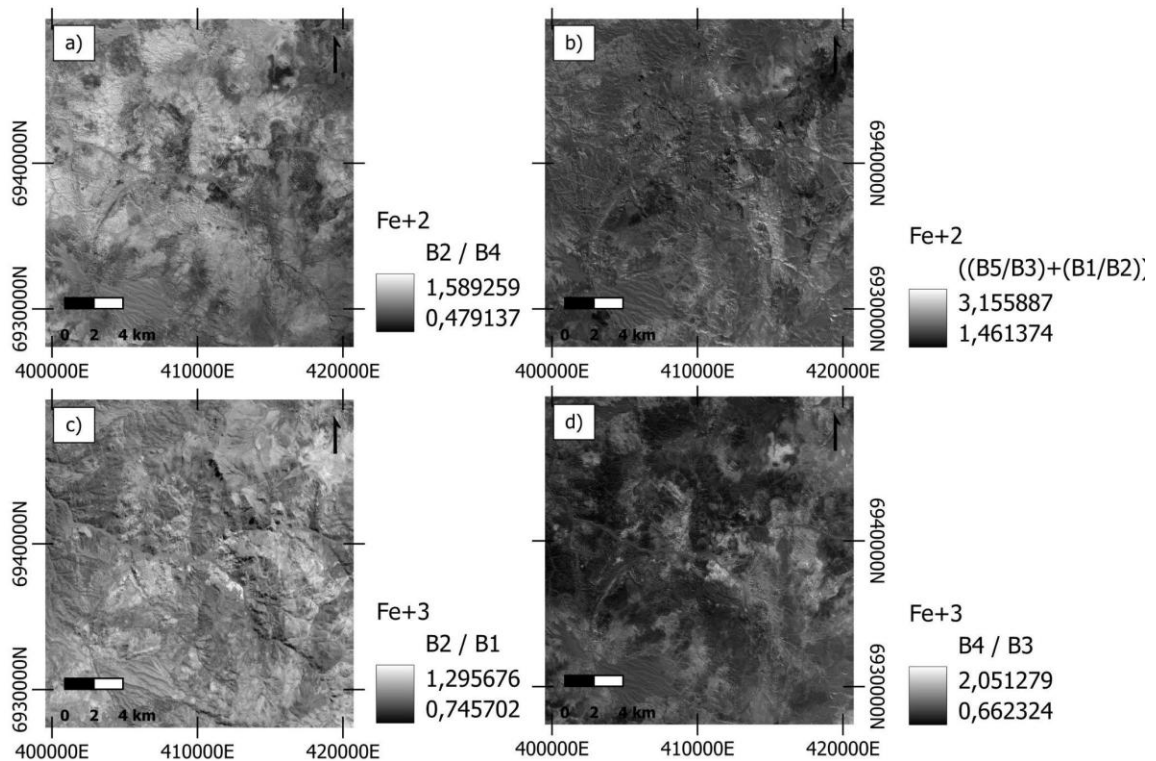


Figura 5.2. Resultados del análisis de matemáticas de bandas aplicadas a la imagen ASTER para la detección de óxidos de hierro: a) índice para óxidos de hierro en estado ferroso, b) índice para óxidos de hierro en estado ferroso, c) índice para óxidos de hierro en estado férrico y d) índice para óxidos de hierro en estado ferroso. Imágenes procesadas a partir del sensor ASTER. Mapas de elaboración propia.

Asimismo, se utilizaron índices orientados a resaltar materiales como lateritas, zonas con desarrollo de *gossans*, silicatos ferrosos y afloramientos ricos en hematita, los cuales suelen estar vinculados a ambientes alterados y mineralizados. Estos resultados se representaron en la Figura 5.3 (a, b, c y d, respectivamente), permitiendo delimitar áreas de interés geológico adicionales, más allá de las zonas típicamente asociadas a alteración hidrotermal.

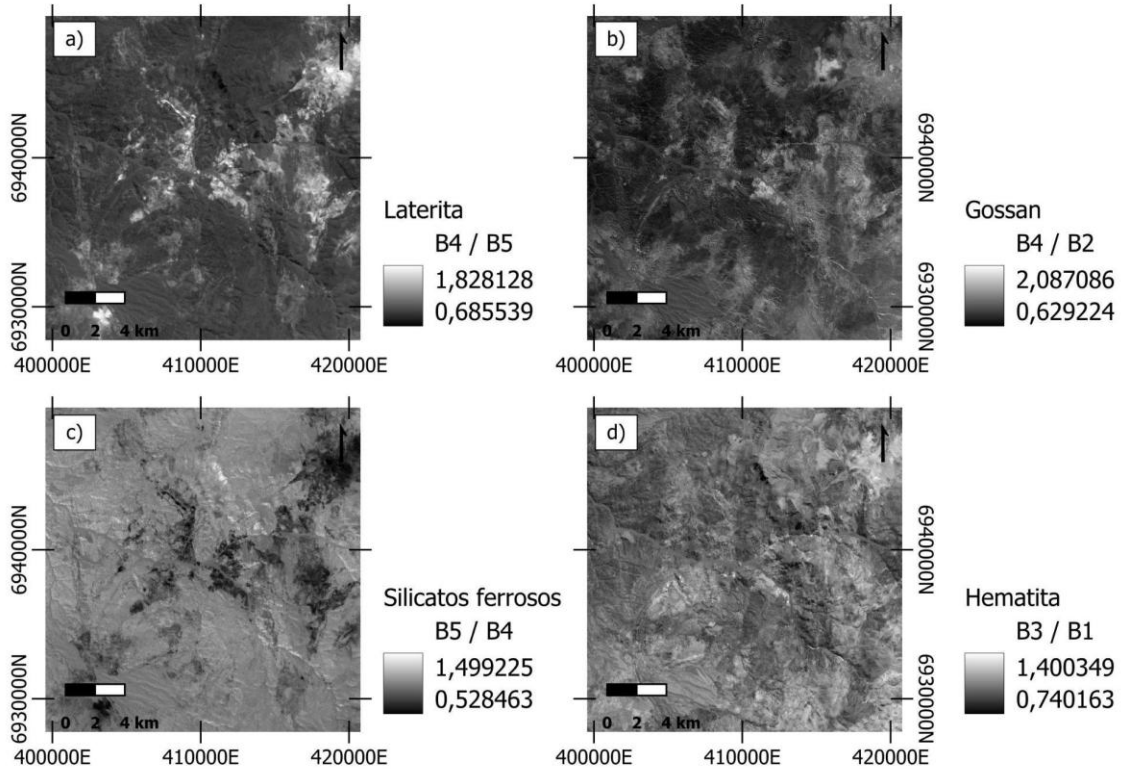


Figura 5.3. Resultados de matemáticas de bandas aplicadas con el fin de resaltar materiales indicadores de ambientes alterados y mineralizados: a) índice para lateritas, b) índice para zonas con *gossans*, c) índice para silicatos ferrosos, y d) índice para afloramientos ricos en hematita. Imágenes procesadas a partir del sensor ASTER. Mapas de elaboración propia.

5.1.2 Composiciones RGB en falso color

Para el sensor ASTER se aplicaron composiciones en falso color (RGB) utilizando la herramienta *Decorrelation Stretch* del software ENVI, a partir de las matemáticas de bandas aplicadas anteriormente. Se generaron tres composiciones específicas. La primera combinación asignó al canal rojo un índice de alteración portadora de iones OH^- , al verde un índice de óxidos de hierro, y al azul un índice de silicatos ferrosos, permitiendo resaltar zonas con presencia de minerales hidratados, hematita y minerales como clorita o epidota (Figura 5.4). La segunda composición asignó óxido férrico al canal rojo, óxido ferroso al verde y alteración portadora de OH^- al azul, destacando áreas con hematita, goethita y arcillas (Figura 5.5). Finalmente, la tercera composición combinó óxido férrico (rojo), óxido ferroso (verde) y silicatos ferrosos (azul), lo que permitió visualizar zonas

ferruginosas con presencia conjunta de minerales ricos en hierro y silicato (Figura 5.6).

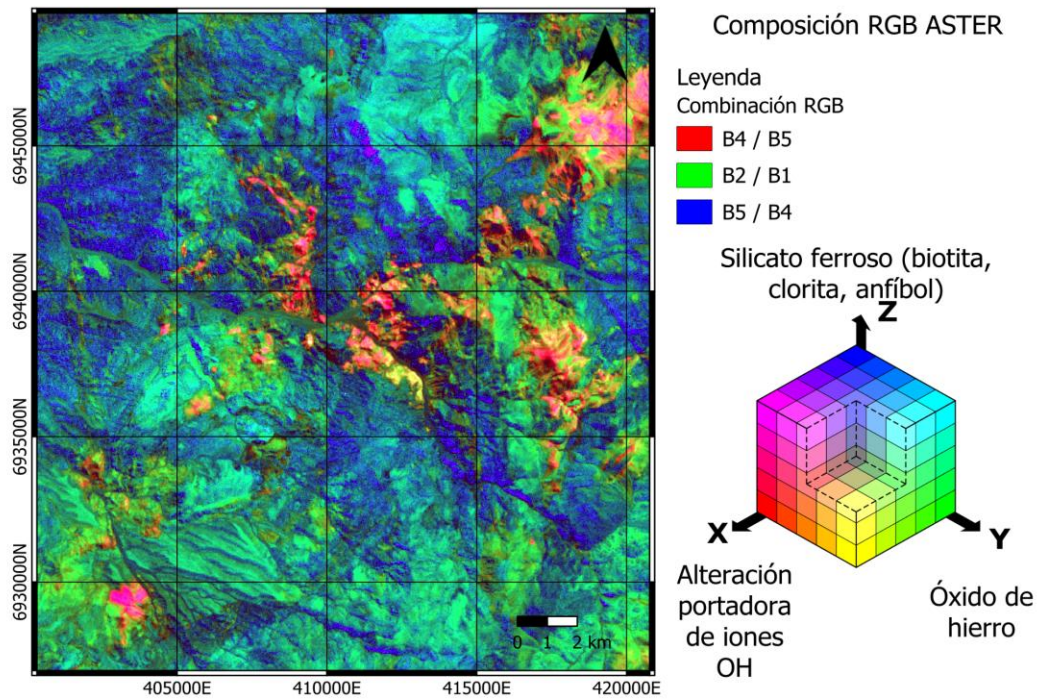


Figura 5.4. Mapa generado a partir de combinaciones RGB de bandas multispectrales correspondientes a la imagen ASTER. Elaboración propia.

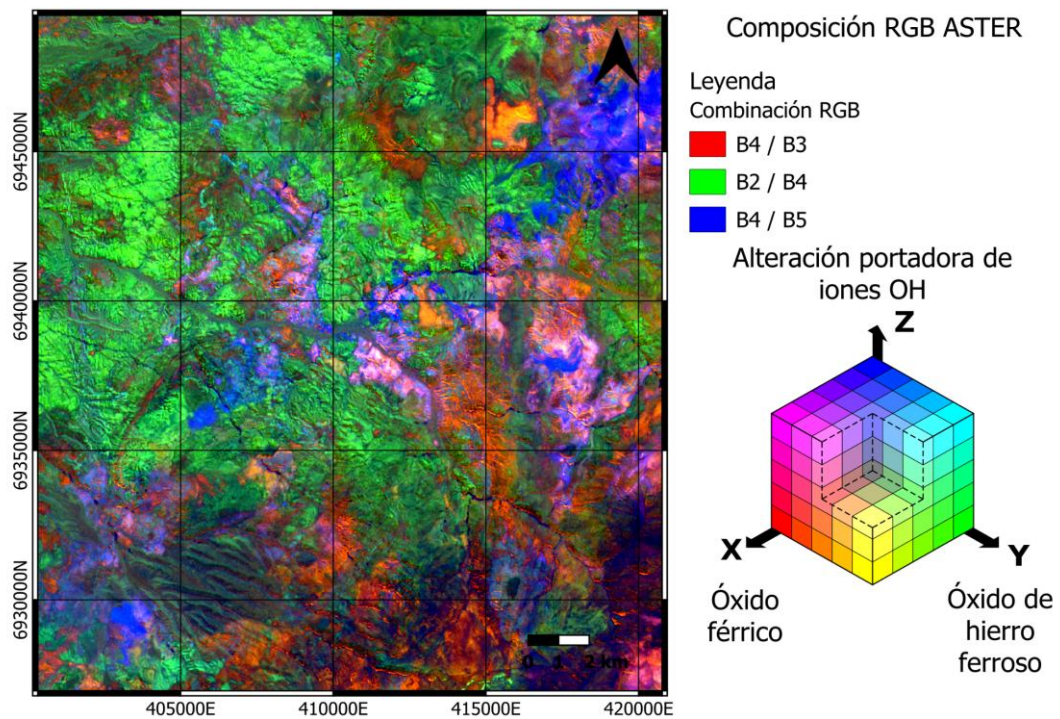


Figura 5.5. Mapa generado a partir de combinaciones RGB de bandas multispectrales correspondientes a la imagen ASTER. Elaboración propia.

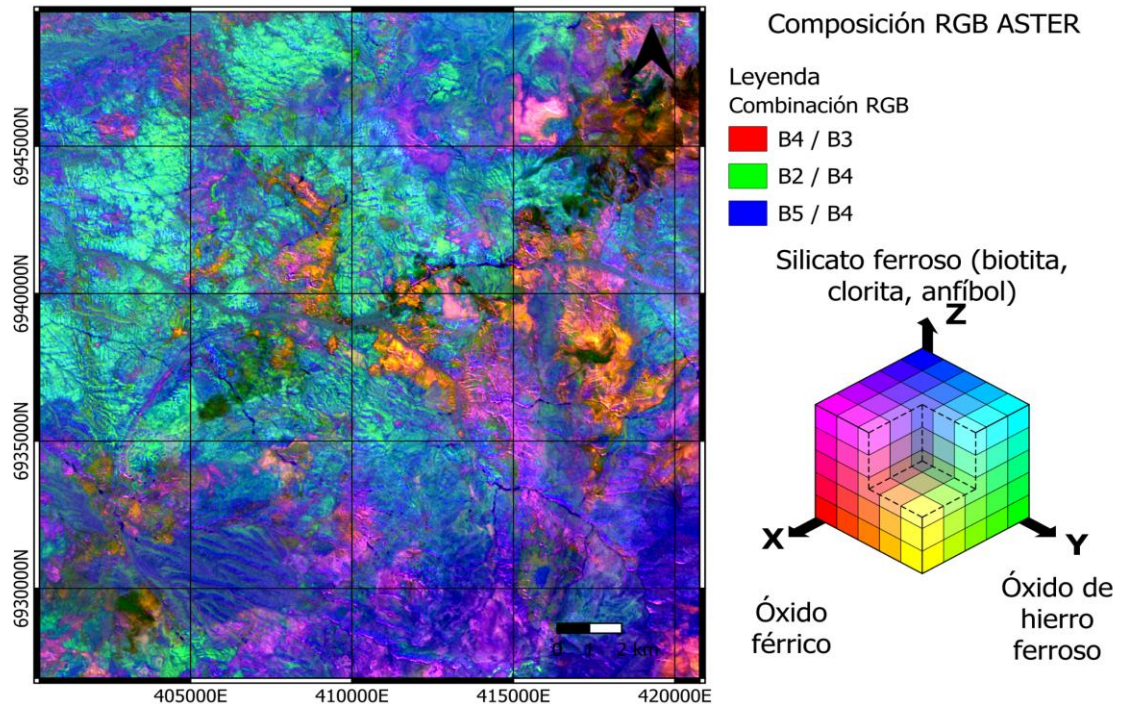


Figura 5.6. Mapa generado a partir de combinaciones RGB de bandas multispectrales correspondientes a la imagen ASTER. Elaboración propia.

Para complementar la caracterización espectral, se elaboraron más RGB que se diseñaron para resaltar minerales específicos vinculados a distintas zonas de alteración hidrotermal, como moscovita, caolinita, epidota, alunita, clorita y jarosita (Figura 5.7).

Composiciones RGB

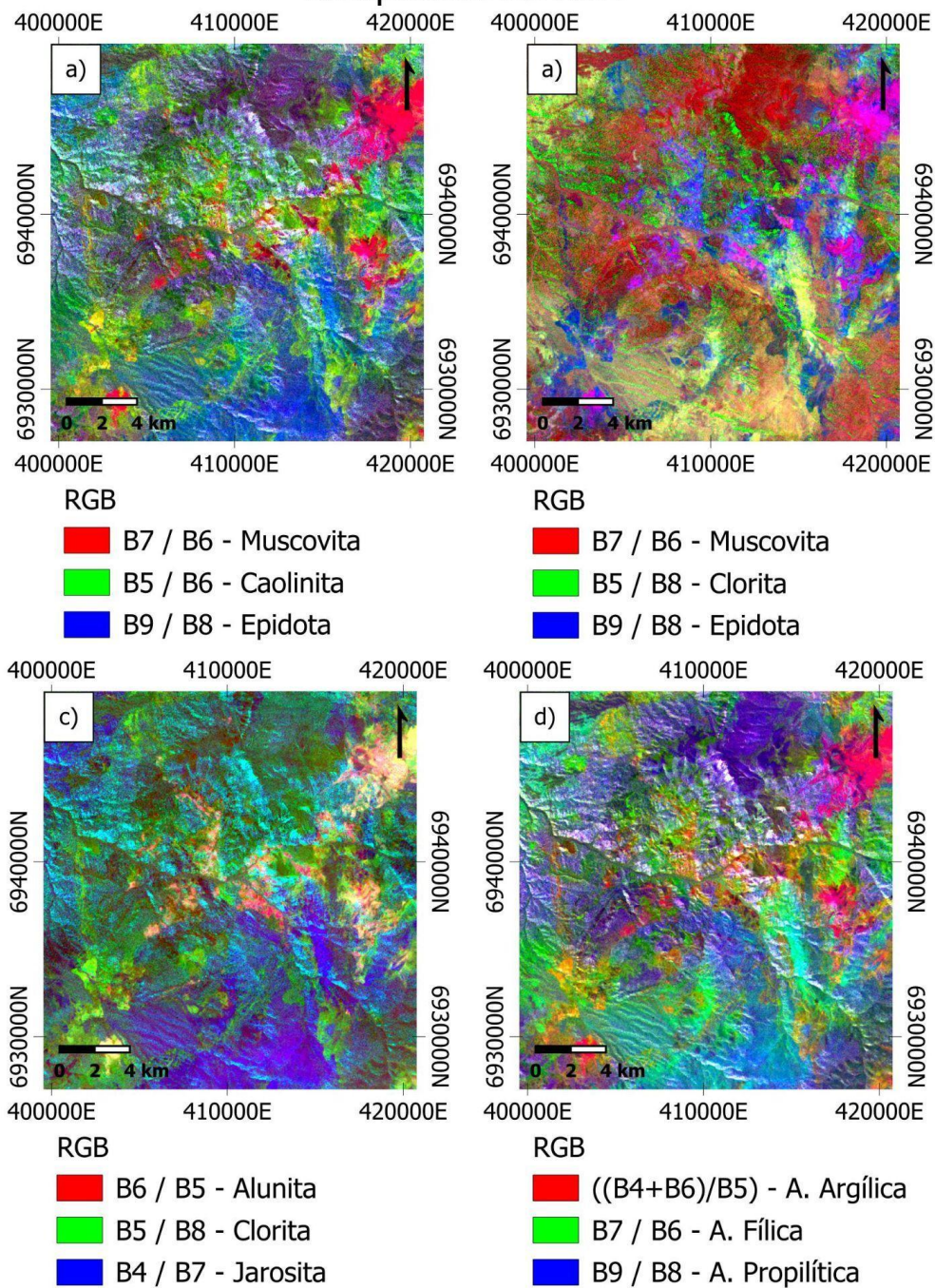


Figura 5.7. Combinaciones RGB en falso color para minerales específicos. a) Composición RGB para moscovita (R), caolinita (G) y epidota (B). b) Composición RGB para moscovita (R), clorita (G) y epidota (B). c) Composición RGB para alunite (R), clorita (G) y jarosita (B). d) Composición RGB a partir de índices para alteración argílica avanzada (R), fílica (G) y propilítica (B). Mapas de elaboración propia.

5.1.3 SAM

El resultado fue un mapa temático que muestra la distribución espacial de los minerales de alteración presentes en el área de estudio (Figura 5.8). Este producto permitió comparar directamente la presencia de firmas espectrales específicas con las zonas previamente identificadas mediante composiciones RGB en falso color y matemáticas de bandas, funcionando como una validación cruzada de dichas metodologías.

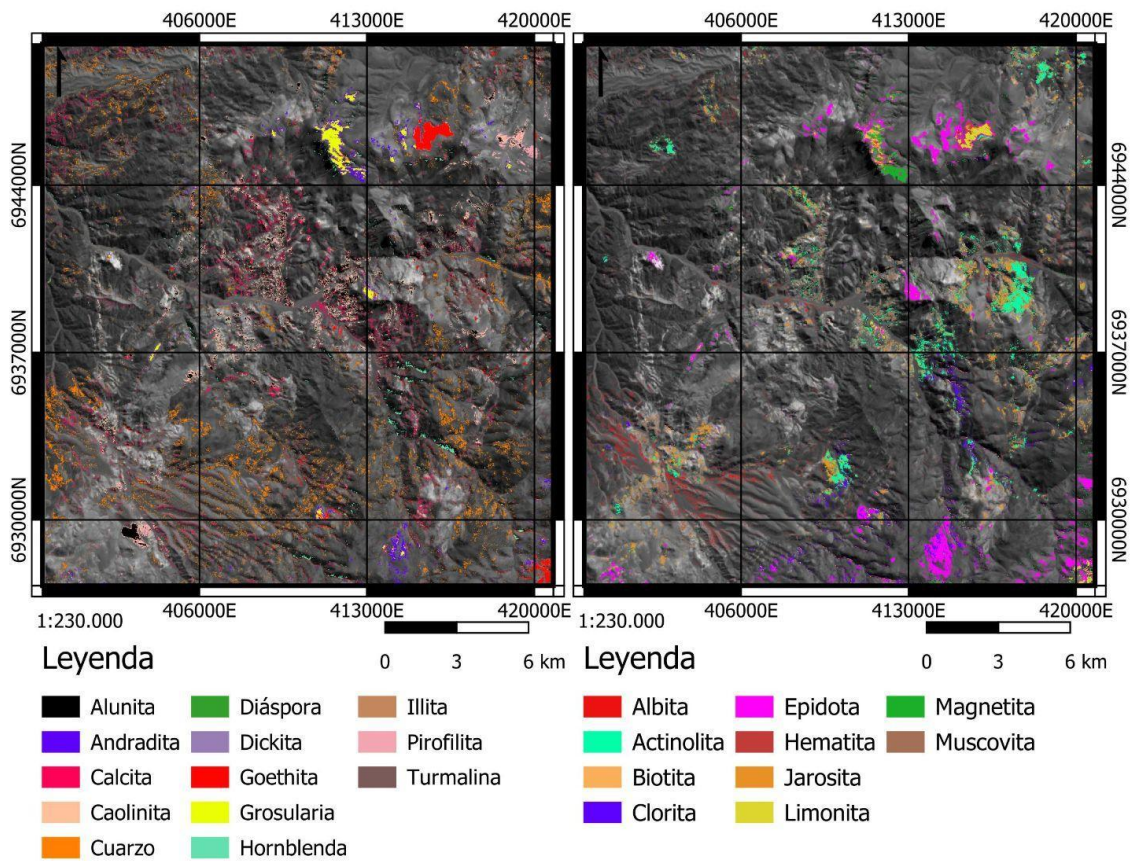


Figura 5.8. Mapas de clasificación espectral generados mediante la técnica *Spectral Angle Mapper* (SAM), aplicado sobre la imagen ASTER. Se muestra la distribución espacial de minerales representativos de alteraciones hidrotermales. Mapa de elaboración propia.

5.2 Landsat 8

Los resultados obtenidos a partir del procesamiento de la imagen Landsat 8 se organizaron según las técnicas aplicadas: matemáticas de bandas, composiciones en falso color (RGB).

5.2.1 Matemática de bandas

En esta etapa se aplicaron razones de bandas propuestas por Sabins (1999) (Anexos A; Tabla 2), adaptadas a la configuración espectral del sensor Landsat 8. Las fórmulas utilizadas fueron seleccionadas en función de la respuesta espectral de los minerales objetivos en las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del infrarrojo de onda corta (SWIR), especialmente las bandas 4, 5, 6 y 7. Estas razones permitieron realzar zonas con alteraciones hidrotermales comparables a las detectadas mediante ASTER, incluyendo la alteración argílica avanzada (Figura 5.9, a), la alteración propilítica (Figura 5.9, b) y la alteración fílica (Figura 5.9, c).

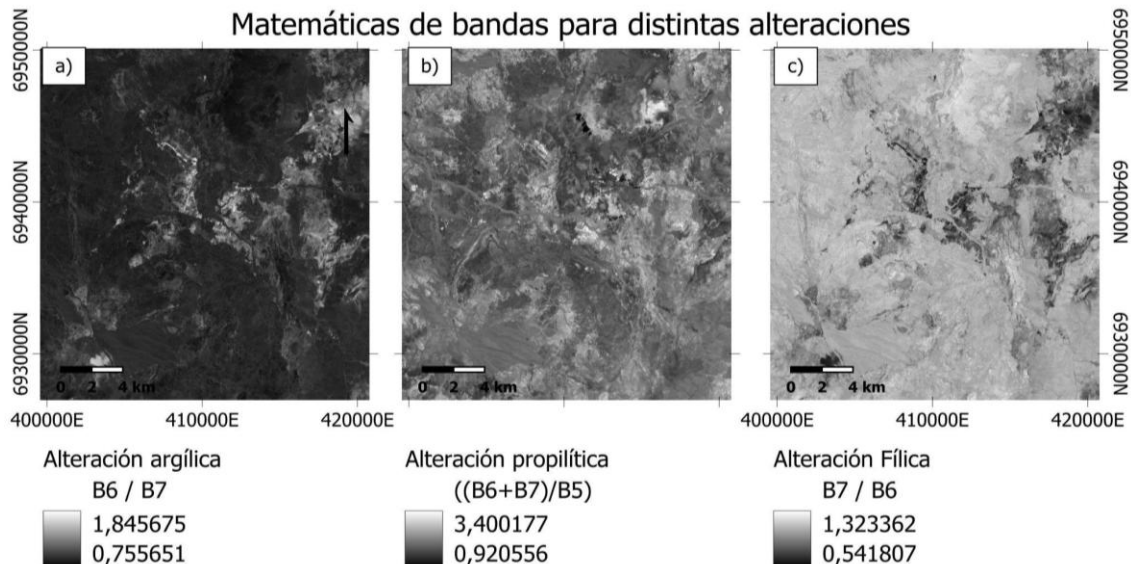


Figura 5.9. Resultados del análisis de matemáticas de bandas aplicadas a la imagen Landsat 8, para la detección de alteraciones hidrotermales: a) índice para alteración argílica avanzada, b) índice para alteración propilítica y c) índice para alteración fílica. Mapas de elaboración propia.

Adicionalmente, se identificaron zonas con alta presencia de óxidos de hierro (Figura 5.10), así como materiales relacionados con procesos de alteración y mineralización, tales como lateritas, *gossans*, silicatos ferrosos y afloramientos ricos en hematita (Figura 5.11, a, b, c y d, respectivamente). Debido a las diferencias en la disposición y número de bandas del sensor, estas firmas espectrales se obtuvieron mediante combinaciones específicas para Landsat 8.

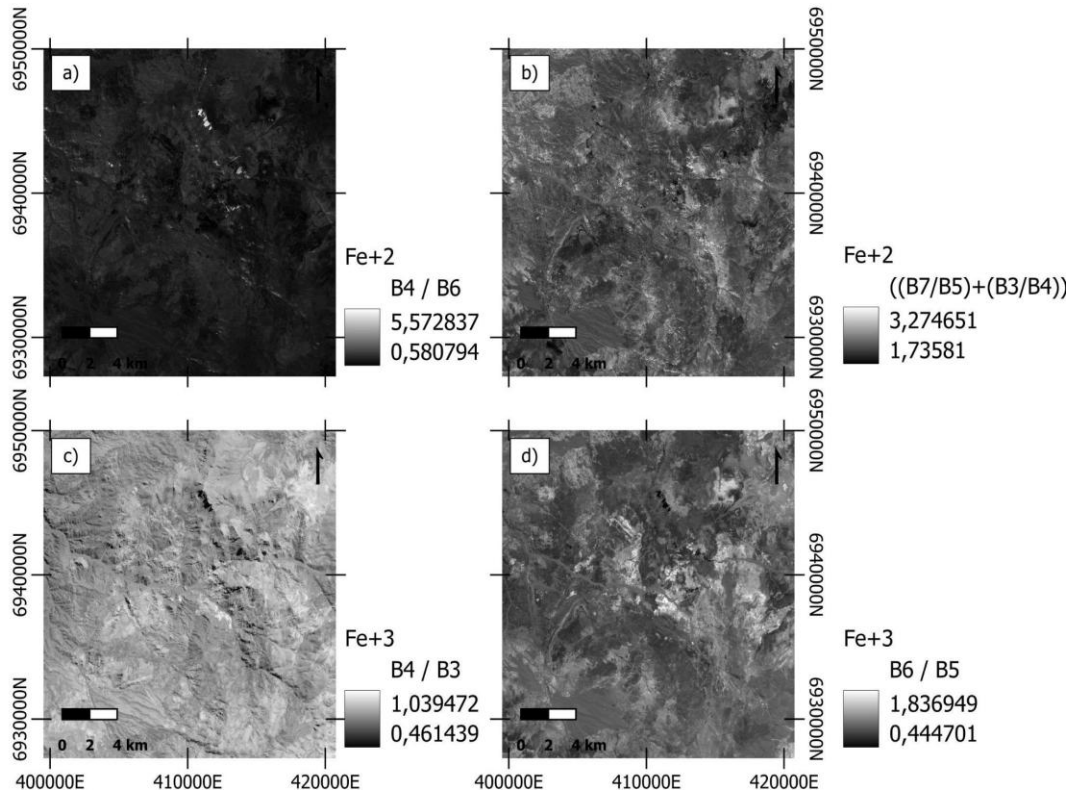


Figura 5.10. Mapas derivados de Landsat 8 que muestran índices espectrales para óxidos de hierro en estado ferroso (a, b, d) y férrico (c). Mapas de elaboración propia.

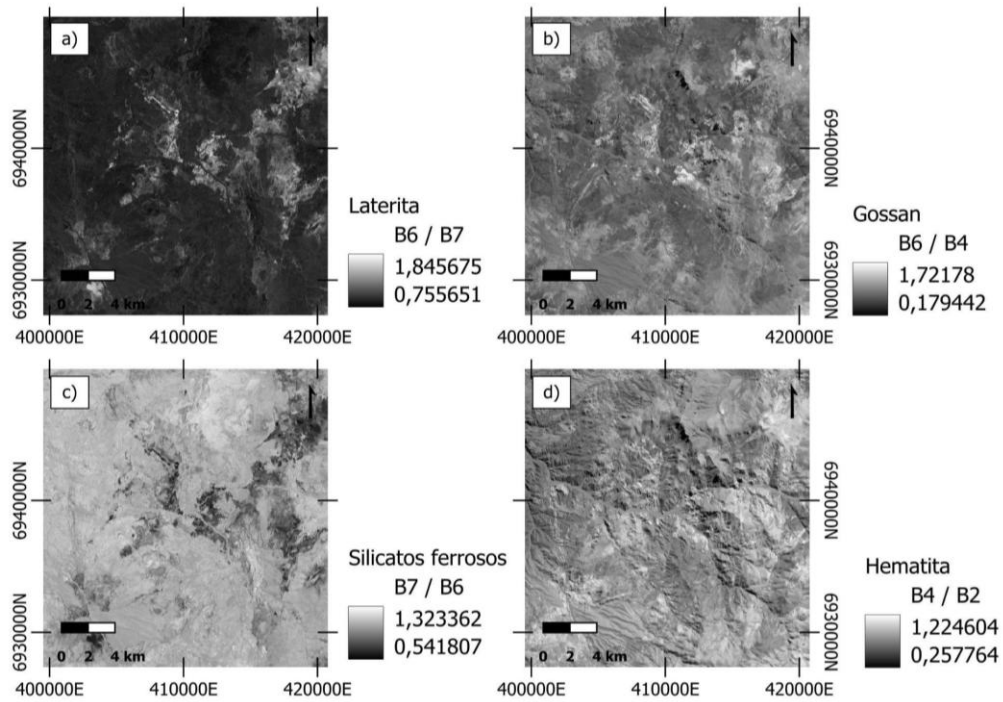


Figura 5.11. Mapas generados a partir de Landsat 8 mediante matemáticas de bandas para resaltar materiales indicadores de ambientes alterados: a) lateritas, b) gossans, c) silicatos ferrosos y d) hematita. Mapas de elaboración propia.

5.2.2 Composiciones RGB en falso color

Se generaron tres composiciones RGB en falso color a partir de matemáticas de bandas aplicadas a las imágenes del sensor Landsat 8, orientadas a resaltar zonas con alteración hidrotermal y minerales indicadores. En la primera combinación, se asignó al canal rojo una razón asociada a alteración portadora de iones OH^- , al canal verde un índice vinculado a óxidos de hierro, y al canal azul una razón sensible a silicatos ferrosos, lo que permitió identificar zonas con alunita, hematita y minerales como clorita o epidota (Figura 5.12). La segunda composición asignó al canal rojo un índice de óxido férrico, al canal verde uno de óxido ferroso, y al canal azul una razón de alteración asociada a iones OH^- , destacando sectores con presencia de hematita, goethita y arcillas (Figura 5.13). Finalmente, en la tercera composición, se combinaron razones sensibles a óxidos férricos (rojo), óxidos ferrosos (verde) y silicatos ferrosos (azul), generando una visualización de áreas ferruginosas con mayor contenido de hierro y presencia de minerales silicatados (Figura 5.14).

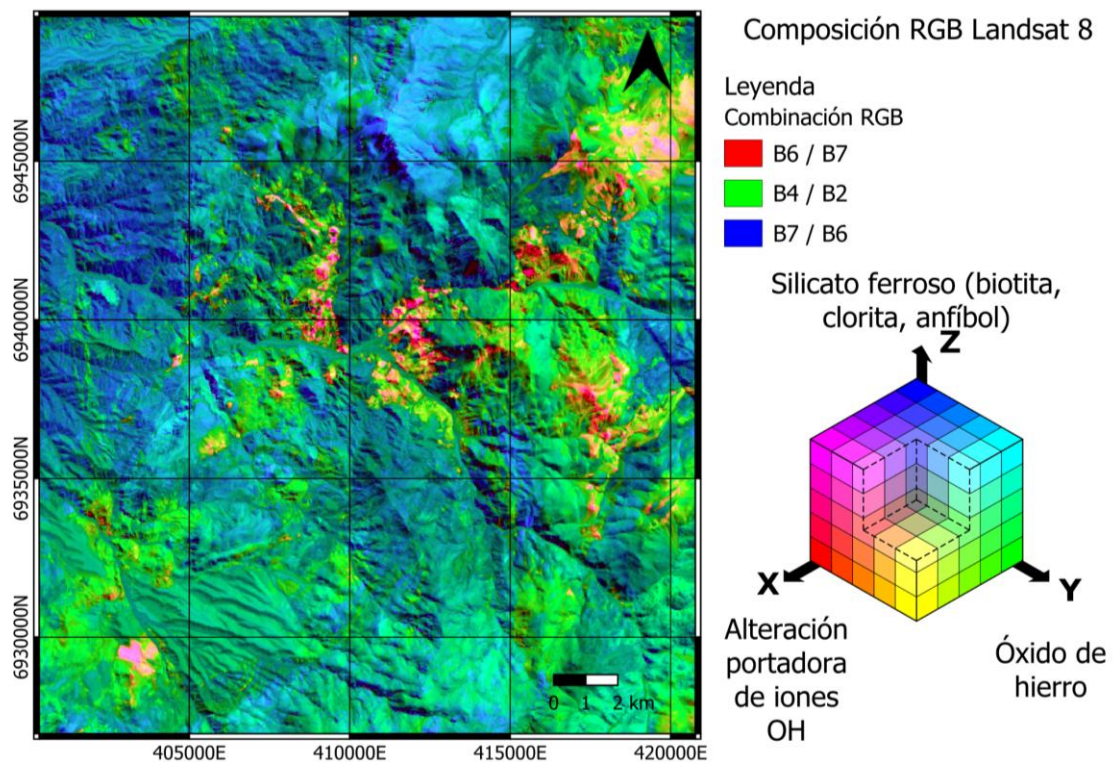


Figura 5.12. Mapa generado a partir de combinaciones RGB de bandas multiespectrales correspondientes a la imagen Landsat 8. Elaboración propia.

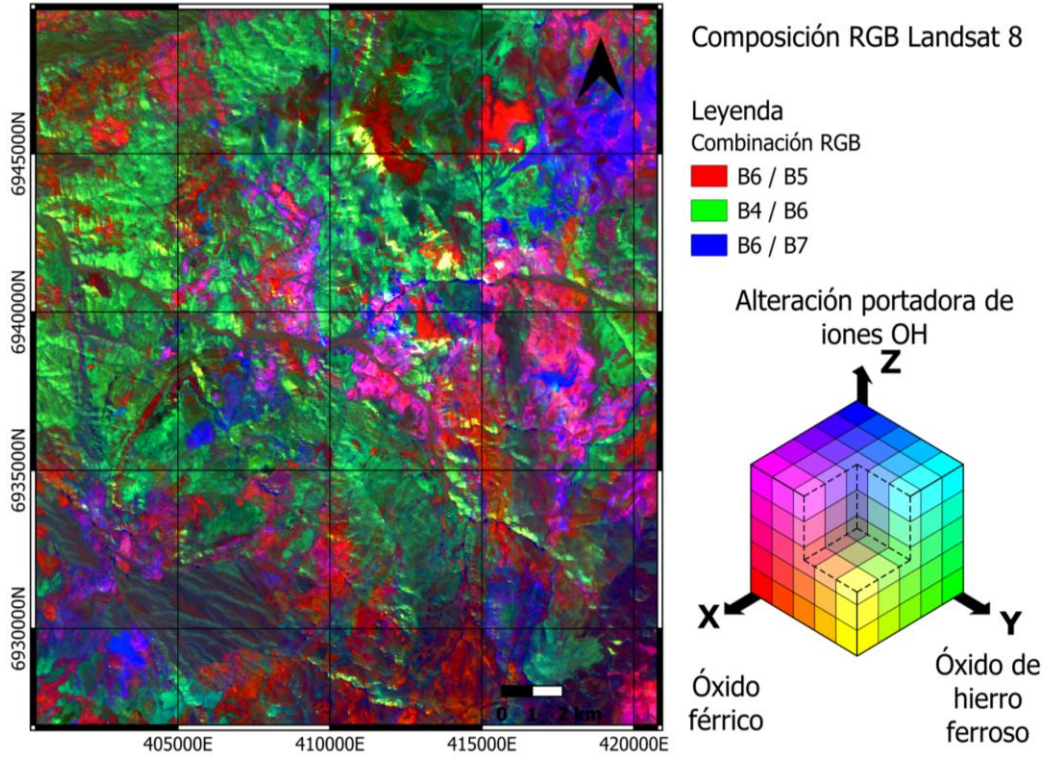


Figura 5.13. Mapa generado a partir de combinaciones RGB de bandas multispectrales correspondientes a la imagen Landsat 8. Elaboración propia.

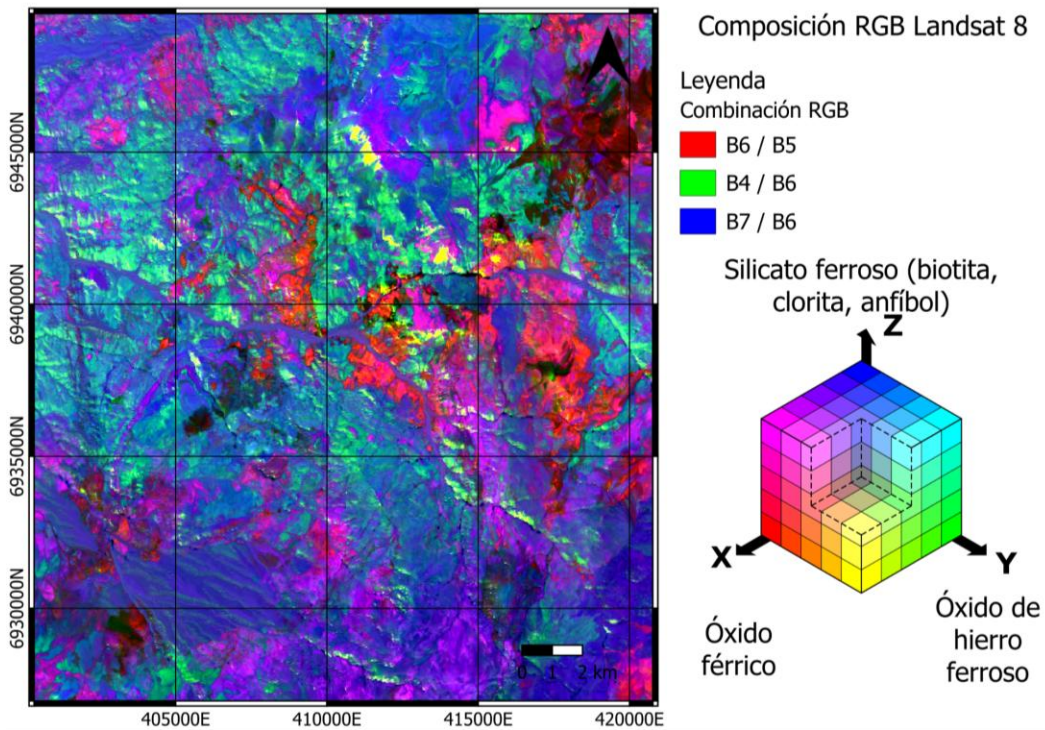


Figura 5.14. Mapa generado a partir de combinaciones RGB de bandas multispectrales correspondientes a la imagen Landsat 8. Elaboración propia.

5.3 Sentinel-2

El análisis espectral de la imagen Sentinel-2 permitió complementar los resultados obtenidos con los sensores ASTER y Landsat 8, destacando su utilidad en la detección de óxidos de hierro y minerales asociados a alteraciones hidrotermales en ambientes áridos. Las técnicas aplicadas incluyeron matemáticas de bandas, composiciones RGB en falso color e índices adaptados a sus bandas espectrales.

5.3.1 Matemática de bandas

Kalinowski y Oliver (2004), entre otros autores, propusieron una serie de índices espectrales orientados a resaltar zonas afectadas por alteración hidrotermal, para imágenes del sensor Sentinel-2. Se logró distinguir zonas potencialmente asociadas a las principales facies de alteración: argílica avanzada, propilítica y fílica. En el caso de la alteración argílica avanzada (Figura 5.15, a), se destacaron minerales como alunita y caolinita; para la propilítica (Figura 5.15, b), se identificaron firmas compatibles con clorita y carbonatos; mientras que en la fílica (Figura 5.15, c), se reconocieron asociaciones mineralógicas con moscovita, illita y esmectita.

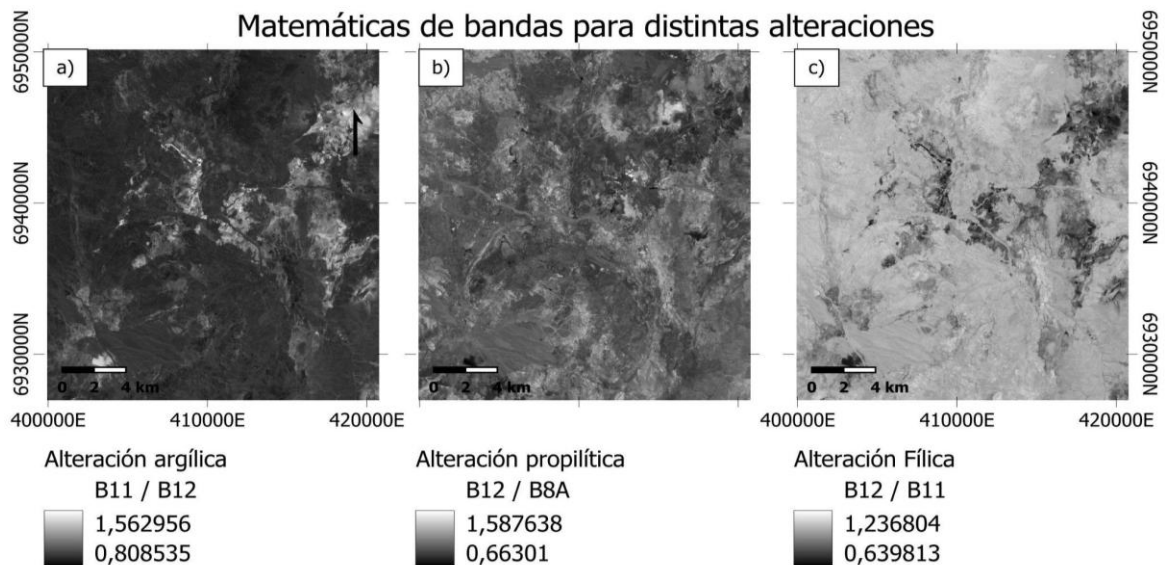


Figura 5.15. Resultados del análisis de matemáticas de bandas aplicadas a la imagen Sentinel-2, para la detección de alteraciones hidrotermales: a) índice para alteración argílica avanzada, b) índice para alteración propilítica y c) índice para alteración fílica. Mapas de elaboración propia.

Además, las matemáticas de bandas permitieron detectar zonas con contenido significativo de óxidos de hierro, tanto en su forma ferroso (Fe^{2+}) como férrico (Fe^{3+}), mediante relaciones espectrales entre bandas del infrarrojo cercano y el SWIR. Estas firmas espectrales, representadas en la Figura 5.16, se asociaron a minerales como hematita, goethita y jarosita. Finalmente, se generaron índices adicionales que realzaron zonas potencialmente asociadas a *gossans*, lateritas, silicatos ferrosos y cuerpos ricos en hematita (Figura 5.17, a, b, c y d), aportando una visión complementaria del potencial de alteración y potencial mineralógico del área de estudio.

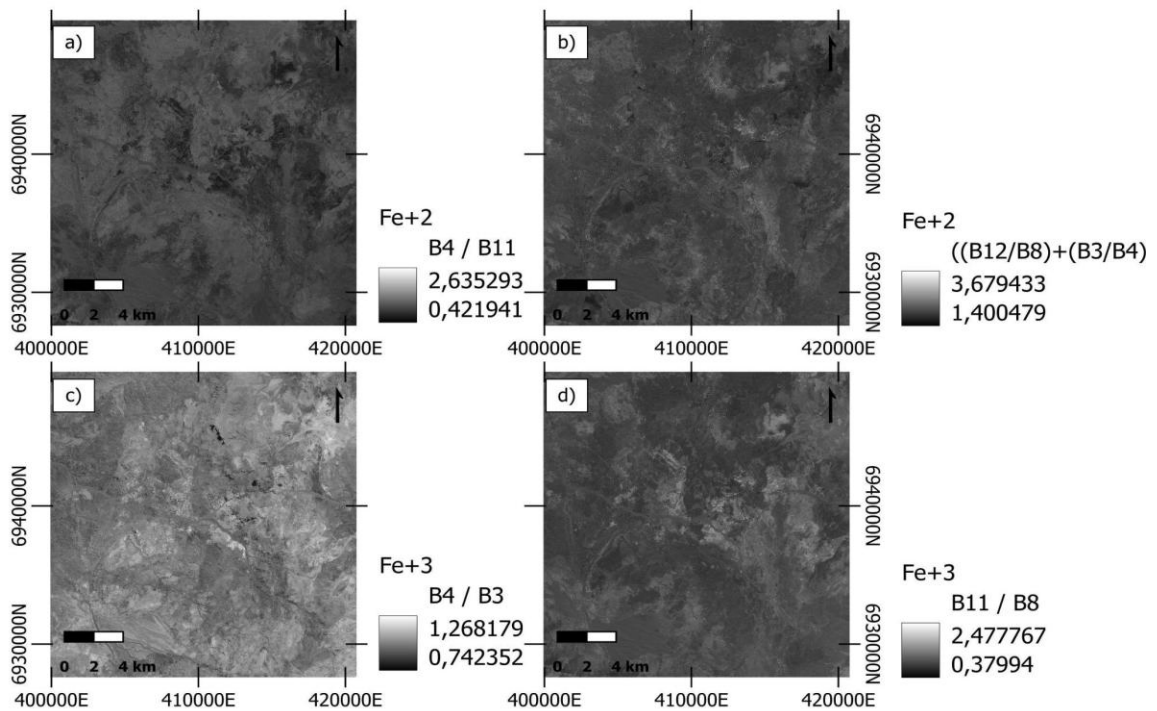


Figura 5.16. Resultados del análisis de matemáticas de bandas aplicadas a la imagen Sentinel-2, para la detección de óxidos de hierro: a) índice para óxidos de hierro en estado ferroso, b) índice para óxidos de hierro en estado ferroso, c) índice para óxidos de hierro en estado férrico y d) índice para óxidos de hierro en estado ferroso. Imágenes procesadas a partir del sensor Sentinel. Mapas de elaboración propia.

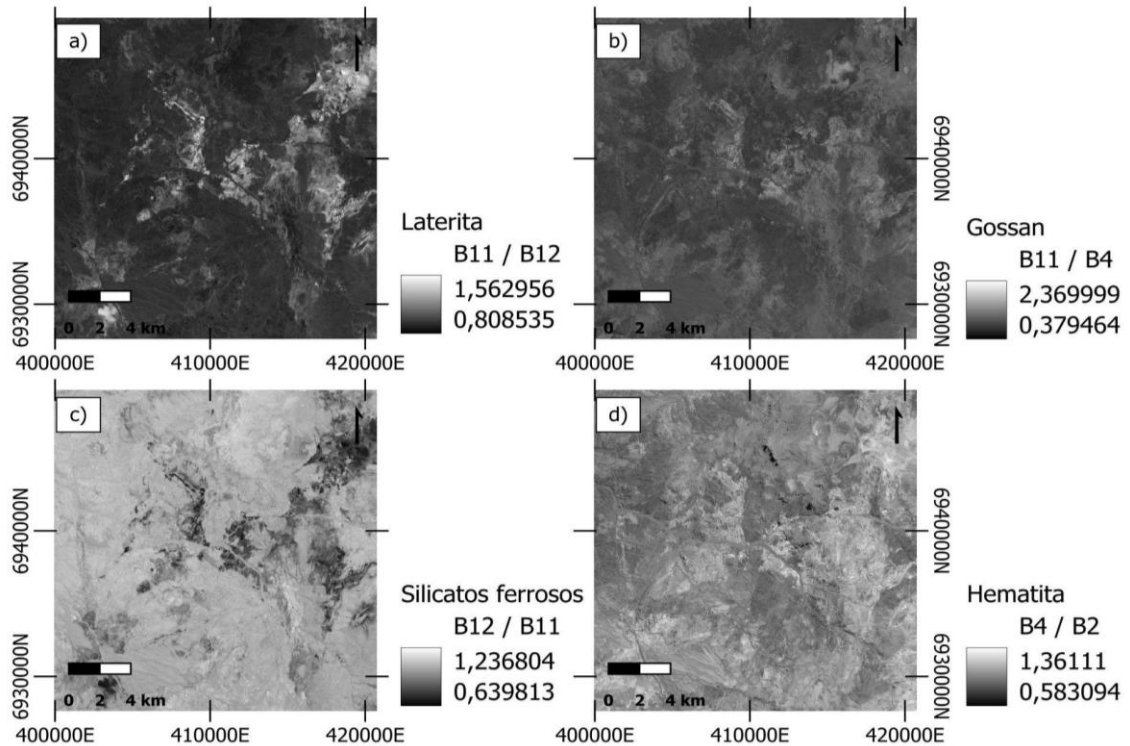


Figura 5.17. Resultados de matemáticas de bandas aplicadas con el fin de resaltar materiales indicadores de ambientes alterados y mineralizados: a) índice para lateritas, b) índice para zonas con *gossans*, c) índice para silicatos ferrosos, y d) índice para afloramientos ricos en hematita. Imágenes procesadas a partir del sensor Sentinel-2. Mapas de elaboración propia.

5.3.2 Composiciones RGB en falso color

En el caso de Sentinel-2, también se generaron tres composiciones RGB en falso color adaptadas a las bandas disponibles en este sensor, con el objetivo de resaltar áreas con potenciales alteraciones hidrotermales. La primera composición asignó al canal rojo una razón sensible a alteración portadora de iones OH^- (B11/B12), al verde un índice asociado a óxidos de hierro (B4/B2), y al azul una razón vinculada a silicatos ferrosos (B12/B11), lo que permitió identificar zonas con minerales hidratados, hematita y minerales del tipo clorita (Figura 5.18). La segunda combinación asignó al rojo un índice de óxidos férricos (B11/B8), al verde uno de óxidos ferrosos (B4/B11) y al azul una razón asociada a iones OH^- (B11/B12), generando un realce de sectores ricos en goethita, hematita y minerales arcillosos (Figura 5.19). Por último, se realizó una composición que integró razones sensibles a óxidos férricos (B11/B8) (rojo), óxidos ferrosos (B4/B11) (verde) y silicatos

ferrosos (B12/B11) (azul), la cual permitió mapear zonas ferruginosas con posibles asociaciones mineralógicas complejas ricas en hierro (Figura 5.20).

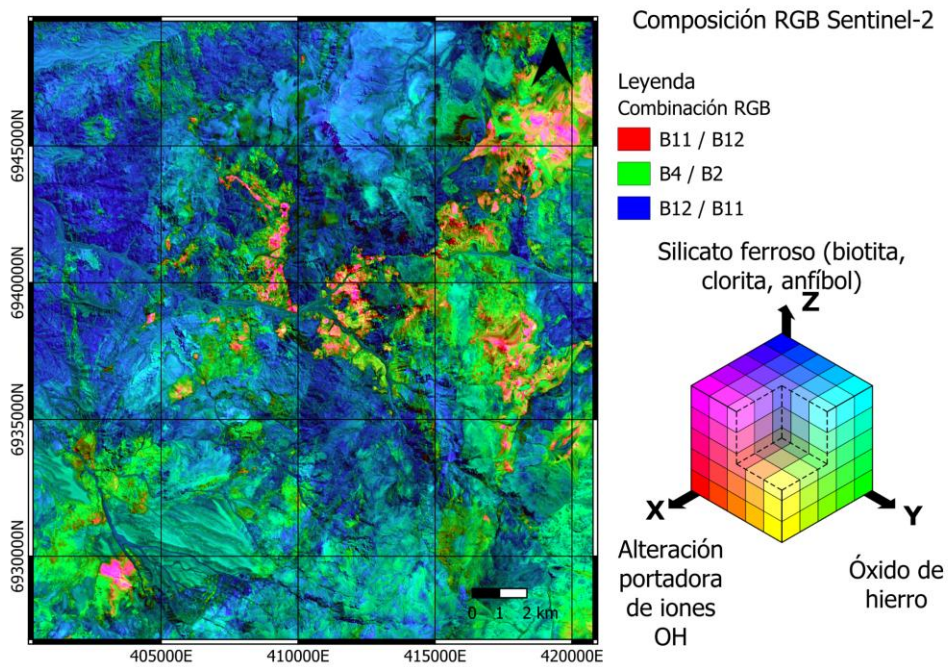


Figura 5.18. Mapa generado a partir de combinaciones RGB de bandas multiespectrales correspondientes a la imagen Sentinel-2. Elaboración propia.

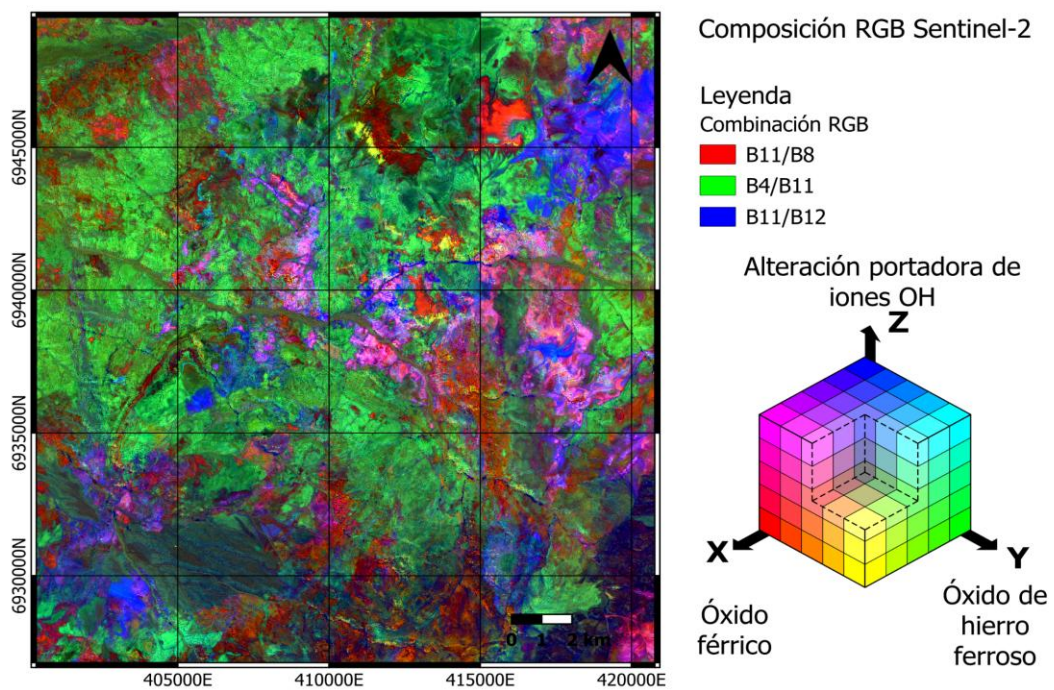


Figura 5.19. Mapa generado a partir de combinaciones RGB de bandas multiespectrales correspondientes a la imagen Sentinel-2. Elaboración propia.

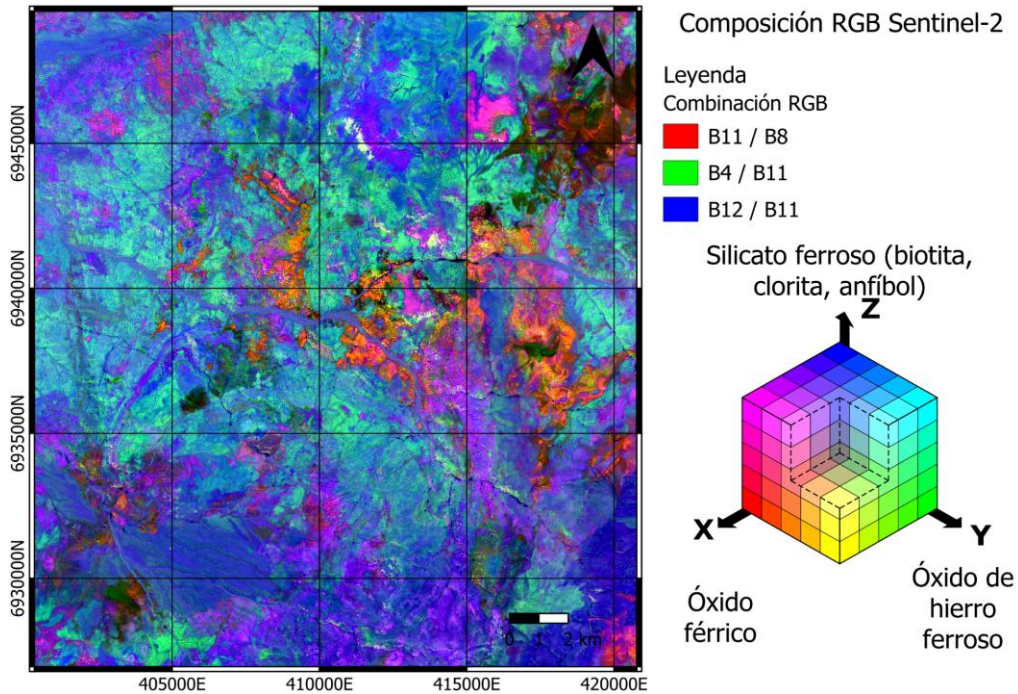


Figura 5.20 Mapa generado a partir de combinaciones RGB de bandas multispectrales correspondientes a la imagen Sentinel-2. Elaboración propia.

5.4 Modelos de elevación digital

Se generaron modelos tridimensionales a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM) provisto por la misión ALOS PALSAR. Este DEM, con una resolución espacial de 12,5 metros, permitió representar de forma detallada las características topográficas del área de estudio. Inicialmente, se elaboró un modelo base con sombreado de relieve (*hillshade*) (Figura 5.21). Posteriormente, las composiciones RGB en falso color previamente generadas fueron integradas al DEM mediante la herramienta 3D *SurfaceView* del *software* ENVI. Esta integración permitió representar simultáneamente la topografía y los patrones de alteración espectral en un entorno tridimensional (Figura 5.22).

El análisis 3D facilitó la observación de la correspondencia entre zonas de alteración y rasgos geomorfológicos o estructurales, como fracturas, escarpes y depresiones internas. Esto permitió inferir una posible relación entre el control estructural y la distribución

espacial de las alteraciones hidrotermales, contribuyendo a delimitar zonas prioritarias para estudios geológicos futuros en el marco de la Megacaldera Carrizalillo.

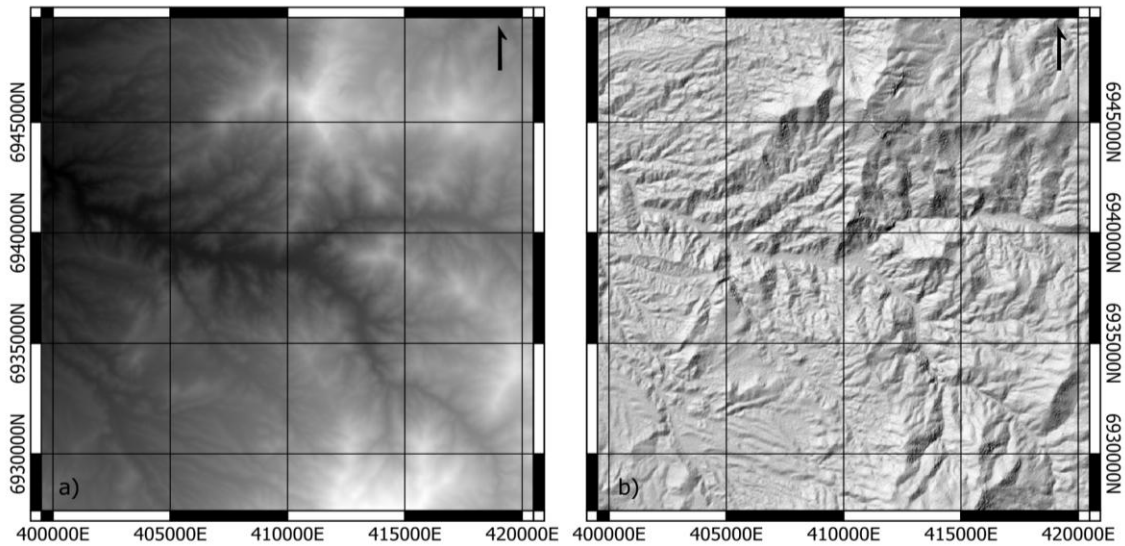


Figura 5.21. a) Modelo de Elevación Digital (DEM) de la zona de estudio. La escala de grises representa la altitud, donde los tonos blancos indican mayores elevaciones y los tonos oscuros corresponden a zonas de menor altitud. Imagen basada en datos ALOS PALSAR DEM. b) Mapa de sombreado (*hillshade*) generado con un ángulo de azimut de 315° y una altura solar de 45°, simulando la iluminación del relieve. Mapas de elaboración propia.

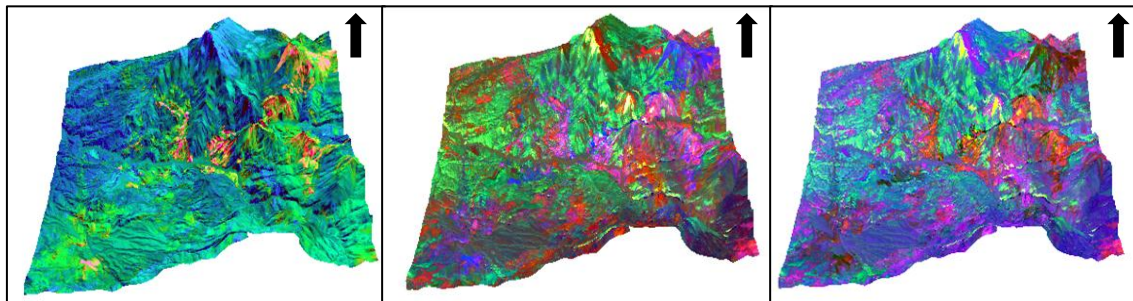


Figura 5.22. Modelos 3D generados a partir de combinaciones RGB en falso color aplicadas sobre la topografía de la zona de estudio, a partir de la imagen Landsat 8. a) Composición RGB: R = B6/B7, G = B4/B2, B = B7/B6. b) Composición RGB: R = B6/B5, G = B4/B6, B = B6/B7. c) Composición RGB: R = B6/B5, G = B4/B6, B = B7/B6.

CAPÍTULO 6: DISCUSIONES

6.1 Coherencia y comparación de los resultados espectrales entre sensores

La comparación de los resultados obtenidos a partir de los sensores ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2 permitió evaluar el desempeño espectral de cada uno en la detección de alteraciones hidrotermales dentro del área de estudio. Cada sensor presentó ventajas específicas, determinadas por su resolución espectral, espacial y la configuración de sus bandas, lo que influyó directamente en su capacidad para discriminar tipos de alteración y minerales asociados.

ASTER destacó particularmente por su alta resolución espectral en el infrarrojo de onda corta (SWIR), lo que le permitió identificar con mayor precisión minerales como alunita, caolinita y clorita, claves en zonas de alteración argílica y propilítica. Además, su cobertura en el infrarrojo térmico (TIR) y su compatibilidad con herramientas analíticas como el *Spectral Angle Mapper* (SAM) posibilitaron una caracterización más detallada de la mineralogía y, por ende, de los patrones de alteración. Gracias a estas características, las composiciones RGB en falso color y las matemáticas de bandas aplicadas con ASTER generaron mapas temáticos altamente representativos de las zonas alteradas dentro del sistema de calderas.

Landsat 8, pese a su menor resolución espectral en el SWIR, entregó resultados coherentes y útiles en la detección de óxidos e hidratados. Su desempeño se respalda en la coincidencia espacial con unidades geológicas conocidas, la concordancia con otros sensores y su buena resolución espacial, lo que permitió delimitar zonas alteradas con mayor precisión en áreas bien expuestas.

Sentinel-2 mostró una alta efectividad en la detección de óxidos de hierro, atribuida a su resolución espacial superior en las bandas del visible y NIR. Aunque no dispone de bandas SWIR tan específicas como ASTER, sus características espectrales permitieron representar con detalle firmas superficiales asociadas a alteraciones férricas,

contribuyendo a reforzar la interpretación espectral en áreas aflorantes.

En términos comparativos, los mapas generados mediante composiciones RGB en falso color a partir de los tres sensores mostraron una notable coherencia espacial entre sí, validando la selección de bandas y razones espectrales aplicadas en cada caso. Esta concordancia respalda la robustez de la metodología implementada y demuestra el potencial de integrar múltiples sensores para una interpretación más completa y confiable de los patrones espectrales presentes en el área de estudio.

Cabe destacar que el sensor ASTER, a bordo del satélite Terra de la NASA, ha sido ampliamente reconocido por su alta capacidad en estudios geológicos, gracias a su cobertura espectral en las regiones VNIR, SWIR y TIR (Abrams, 2002; Van der Meer et al., 2014). En particular, cuenta con seis bandas en el SWIR y cinco en el TIR, lo que le otorga una ventaja significativa sobre sensores como Landsat 8 y Sentinel-2 para la identificación precisa de minerales portadores de OH^- y análisis térmico de litologías (Sabins, 1999). No obstante, desde abril de 2008, ASTER sufrió una falla en su subsistema SWIR, lo que afectó la calidad de las imágenes capturadas en ese rango espectral. Por esta razón, en este estudio se priorizó el uso de una imagen anterior a esa fecha, garantizando la integridad de los datos espectrales necesarios para la detección de alteraciones hidrotermales. Dado que ASTER ya no proporciona imágenes SWIR confiables en la actualidad, el uso complementario de Landsat 8 y Sentinel-2 resultó esencial. Estos sensores, aunque no poseen la misma resolución espectral, ofrecen ventajas como mayor frecuencia de revisita, mejor resolución espacial (Sentinel-2) y acceso gratuito a imágenes recientes (Markham et al., 2015). Su integración con ASTER permitió ampliar el alcance temporal y espacial del análisis, consolidando un enfoque metodológico adaptable tanto para zonas de difícil acceso como para investigaciones futuras con fines geológicos y exploratorios.

6.2 Correlación con las unidades litológicas presentes en el área

Para validar los resultados obtenidos mediante el procesamiento espectral de imágenes

satelitales, se realizó una comparación espacial entre los mapas de alteración generados y la carta geológica oficial Hoja La Guardia, publicada por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Esta carta permitió identificar una notable coherencia entre los patrones de alteración detectados y las unidades litológicas mapeadas en el sector. En general, las composiciones RGB en falso color evidenciaron una correspondencia cromática adecuada con unidades volcánicas y piroclásticas, en especial aquellas relacionadas con tobas, brechas y lavas alteradas.

Las respuestas espectrales más intensas se asociaron principalmente a unidades volcánicas de composición intermedia a ácida (dacíticas y traquiandesíticas), que conforman el relleno intracaldera de El Durazno. Estas litologías, ampliamente reconocidas por su susceptibilidad a la circulación de fluidos hidrotermales, presentaron señales claras en los índices aplicados, particularmente en los resultados obtenidos con ASTER y Sentinel-2. Este comportamiento es consistente con estudios previos que destacan cómo las rocas volcánicas félsicas, al presentar mayor fracturación y reactividad mineralógica, facilitan la formación de sistemas de alteración hidrotermal en contextos de colapsos volcánicos (Lipman, 1984; Sillitoe, 2010; Pirajno, 2009).

En contraste, los sectores dominados por unidades intrusivas granodioríticas y por rocas sedimentarias más antiguas evidenciaron una baja o nula respuesta espectral en los análisis realizados, reforzando la relación entre tipo litológico y grado de alteración hidrotermal. Según Pirajno (2009), la susceptibilidad de una roca a ser alterada depende de su competencia litológica, porosidad y fracturamiento, siendo las rocas volcánicas intermedias a ácidas mucho más favorables para la circulación de fluidos hidrotermales que las rocas intrusivas masivas y cristalinas, como las granodioritas. Del mismo modo, Hedenquist et al. (2000) señalan que las rocas porosas y altamente fracturadas tienden a actuar como caminos preferenciales para los fluidos, a diferencia de las rocas más competentes que funcionan como barreras. Corbett y Leach (1998) también destacan que la alteración hidrotermal suele concentrarse en lavas, tobas y brechas volcánicas, mientras que las unidades más antiguas o de baja permeabilidad, como las sedimentarias o intrusivas, muestran escasa alteración detectable por sensores remotos. Este

comportamiento observado en el área de estudio sugiere una fuerte influencia litológica en la expresión espectral de las zonas alteradas.

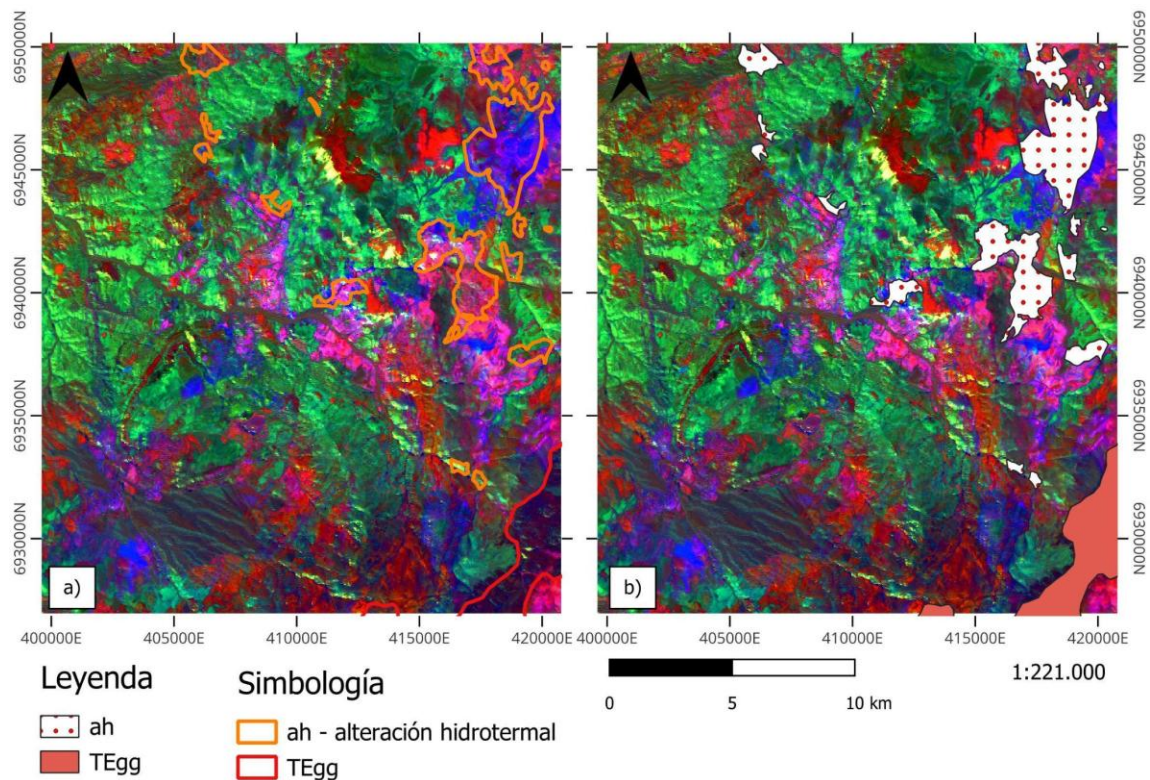


Figura 6.1. a) Visualización de la unidad TEGg (Plutón El Gato) en color rojo y de las zonas de alteración hidrotermal mapeadas en la carta geológica en color naranja. b) Superposición de las unidades litológicas de la carta Hoja La Guardia sobre la composición RGB generada, lo que permite evaluar la relación espacial entre las alteraciones detectadas por sensores remotos y la cartografía geológica previa. Mapas de elaboración propia.

Un caso destacado se observó en la segunda composición RGB generada con Sentinel-2 —que asignó al rojo un índice de óxidos férricos (B11/B8), al verde óxidos ferrosos (B4/B11) y al azul una razón asociada a iones OH^- (B11/B12)— donde se identificó una zona de tonalidad azul oscura en el extremo inferior derecho del área de estudio (Figura 6.1). Esta zona coincidió espacialmente con la unidad TEGg, correspondiente al Plutón El Gato, lo que sugiere que dicha litología presenta respuestas espectrales coherentes con la presencia de minerales hidratados u óxidos de hierro, posiblemente vinculados a procesos de alteración hidrotermal en sus contactos o bordes estructurales.

Finalmente, los resultados del análisis espectral evidenciaron una alta concordancia entre las zonas alteradas detectadas y las unidades volcánicas descritas en la carta Hoja La Guardia. Además, se identificaron áreas con respuestas espectrales destacadas que no se encontraban explícitamente mapeadas como alteradas, lo que sugiere la existencia de sectores subcartografiados o con potencial interés geológico (Figura 6.2).

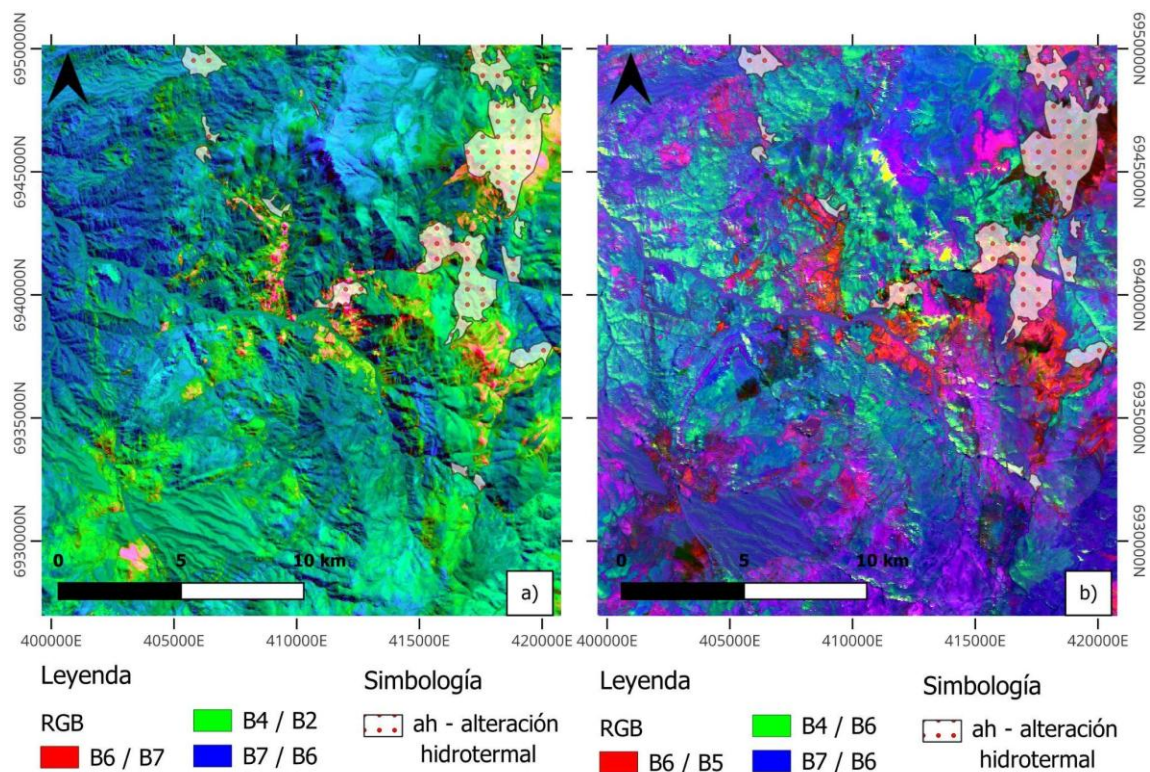


Figura 6.2. a) y b) Composiciones RGB en falso color generadas a partir de índices espectrales, donde se observa que las zonas de alteración hidrotermal se extienden más allá de los límites previamente mapeados en la carta geológica oficial. Mapas de elaboración propia.

Esta correspondencia litológica se ve reforzada por la distribución estructural que condiciona dichas alteraciones, lo cual se discute a continuación.

6.3 Influencia estructural en la distribución de alteraciones

La distribución espacial de las zonas alteradas detectadas en este estudio presentó una relación evidente con las principales estructuras tectónicas que afectan al sector de la Megacaldera Carrizalillo y el borde de la caldera El Durazno. En los mapas de

composiciones RGB en falso color (Figura 6.3) se observaron alineamientos de firmas espectrales que siguen trayectorias estructurales reconocidas, lo que sugiere un fuerte control tectónico en el desarrollo de las alteraciones.

Particularmente, sectores con alta concentración de óxidos de hierro y minerales hidratados aparecen alineados en torno al borde suroeste de la caldera El Durazno y a zonas interpretadas como zonas de subsidencia o fracturamiento interno. Estos patrones coinciden con lo descrito en estudios previos (Rivera & Mpodozis, 1994; Arévalo, 1994), que destacan el rol de las fracturas anulares y de sistemas de fallas regionales en la evolución postcolapso de la caldera.

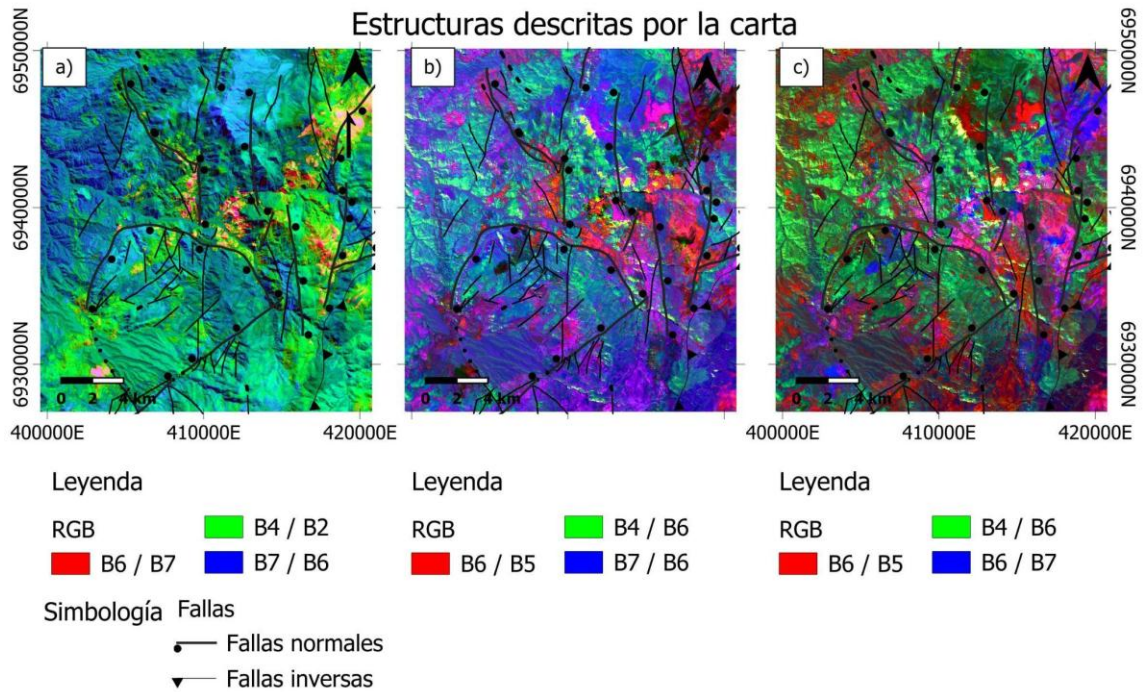


Figura 6.3. a), b) y c) Superposición de las estructuras geológicas extraídas de la carta Hoja La Guardia sobre diferentes composiciones RGB en falso color generadas a partir del procesamiento espectral. Mapas de elaboración propia.

En la Figura 6.4 se observa cómo la distribución espacial de las alteraciones hidrotermales presenta un fuerte control estructural. En particular, las zonas de alteración representadas en color celeste se encuentran delimitadas por dos fallas normales, lo que sugiere un confinamiento estructural. Por otro lado, las alteraciones mostradas en color azul siguen el trazado de una falla principal, evidenciando una relación directa entre el

desarrollo de estas zonas y la presencia de estructuras tectónicas preexistentes en el área de estudio.

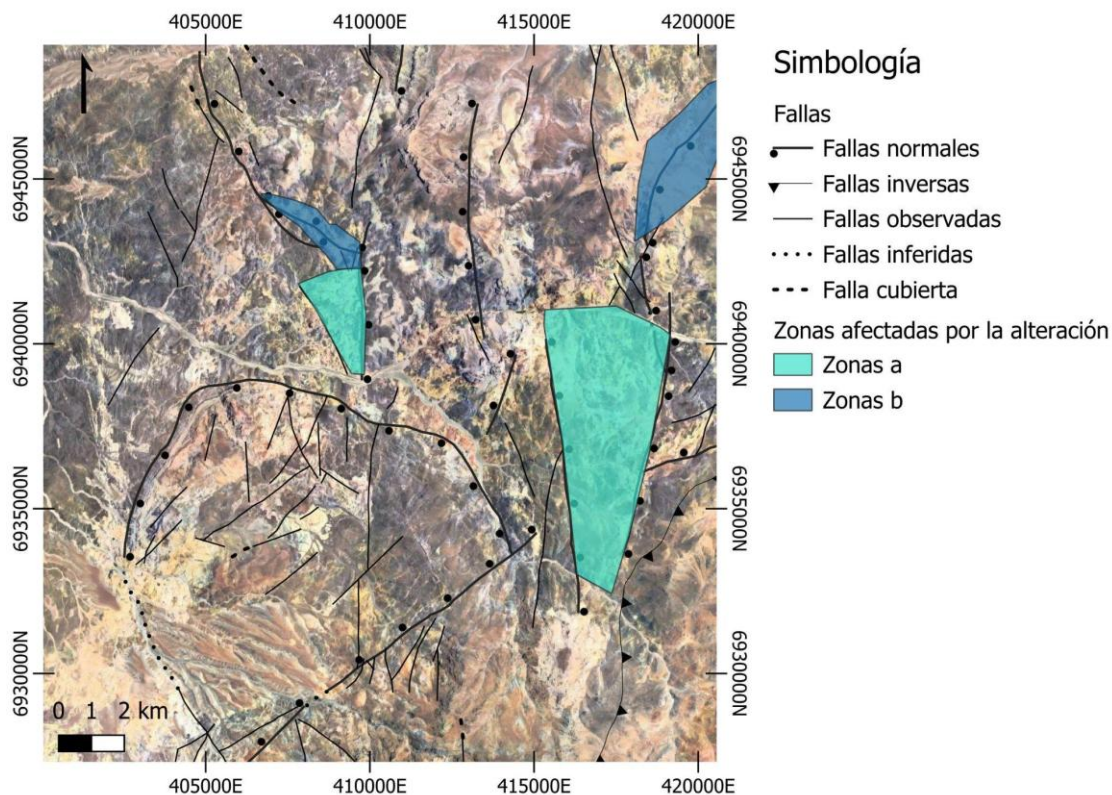


Figura 6.4. Zonas de alteración hidrotermal con posible control estructural evidenciado por la disposición de fallas principales. Mapa de elaboración propia.

En conjunto, los resultados espectrales, litológicos y estructurales apuntan a un sistema hidrotermal fuertemente controlado por la arquitectura de la caldera volcánica y sus fracturas asociadas, lo que refuerza la utilidad del análisis multiespectral para caracterizar entornos volcánicos complejos y guiar futuras campañas de exploración geológica.

6.4 Interpretación del sistema hidrotermal y contexto metalogénico

Los resultados obtenidos a través del análisis multiespectral y la correlación geológica sugieren que el área de estudio se encuentra dentro de un ambiente propicio para el desarrollo de un sistema epitermal de alta sulfidación. Esta interpretación se sustenta en la identificación de minerales típicos de alteración argílica avanzada, tales como alunita, caolinita, dickita y pirofilita, los cuales indican la presencia de fluidos hidrotermales

ácidos y oxidantes. Además, la predominancia de litologías volcánicas de composición intermedia a ácida (como dacitas y traquiandesitas), junto con la morfología estructural dominada por bordes de caldera y fallas normales, refuerza la posibilidad de un entorno caldérico mineralizado. Estos elementos son consistentes con lo planteado por el Proyecto JASPE, que reconoce en la Megacaldera Carrizalillo un sistema epitermal de alta sulfidación activo durante el Paleoceno-Eoceno Inferior. En este sentido, los resultados espectrales obtenidos permiten proponer que el área estudiada podría formar parte de un sistema epitermal evolucionado, y que, por tanto, constituye un objetivo de interés para futuras campañas de prospección minera en la región.

6.5 Consideraciones finales

Los resultados obtenidos a partir del análisis multiespectral permitieron caracterizar con éxito las alteraciones dentro del área de estudio, destacando el rol de las condiciones litológicas y estructurales en su distribución. La integración de sensores remotos con cartografía geológica fortaleció el enfoque metodológico aplicado, abriendo posibilidades para futuras aplicaciones exploratorias en contextos similares.

No obstante, este estudio presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas al extrapolar sus resultados. En primer lugar, la utilización de imágenes ASTER anteriores a 2008, motivada por la falla del subsistema SWIR en ese año, restringe la posibilidad de obtener datos espectrales recientes. A esto se suma la ausencia de verificación en terreno, lo que impide confirmar directamente la presencia física de los resultados obtenidos. Además, tanto las imágenes satelitales como la cartografía geológica utilizada poseen restricciones de resolución y escala que pueden afectar la precisión de patrones espaciales. A nivel metodológico, se reconoce que la detección espectral es sensible a variables como la cobertura superficial, el ángulo solar y las condiciones atmosféricas al momento de la captura, así como a las limitaciones propias de la resolución espectral de los sensores multiespectrales empleados. Estos factores pueden influir en la intensidad o visibilidad de ciertas firmas espectrales, particularmente en zonas de alteración incipiente o mineralización tenue.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

La aplicación de teledetección multiespectral en este estudio permitió caracterizar e interpretar con éxito las alteraciones hidrotermales presentes en la zona sur de la Megacaldera Carrizalillo, con especial énfasis en su caldera anidada, El Durazno. Mediante el uso combinado de los sensores remotos ASTER, Landsat 8 y Sentinel-2, junto con técnicas como razones de bandas, composiciones RGB en falso color y clasificación mediante *Spectral Angle Mapper* (SAM), fue posible identificar distintos minerales y asociaciones de alteración, demostrando el valor de los datos satelitales como una herramienta eficaz en etapas preliminares de exploración geológica en zonas de difícil acceso.

La alta concordancia entre los resultados obtenidos con los tres sensores valida el enfoque metodológico utilizado y confirma la correcta selección de bandas e índices espectrales aplicados. Esta coherencia respalda el uso de la teledetección multiespectral como una técnica confiable para el reconocimiento temprano de zonas alteradas en ambientes áridos y con buena exposición aflorante, como también ha sido planteado por Sabins (1999), Crosta et al. (2003) y Van der Meer et al. (2014).

Respecto a la correlación litológica, se observó una clara correspondencia entre zonas con alta respuesta espectral y unidades volcánicas previamente descritas en la carta geológica Hoja La Guardia, tales como tobas, brechas y lavas de composición dacítica a traquiandesítica. Esto sugiere que los sensores remotos no solo permiten detectar alteraciones, sino también delimitar su distribución en relación con el contexto geológico local, aportando antecedentes clave para la actualización cartográfica y el diseño de futuras campañas de terreno.

Asimismo, se identificaron zonas alteradas fuera de los límites definidos por la cartografía oficial, lo que plantea la posibilidad de extensiones no reconocidas

previamente, ya sea por limitaciones en la escala de mapeo o por cobertura superficial. Esta observación refuerza el rol complementario que puede desempeñar la teledetección en áreas poco cartografiadas o de difícil acceso.

El principal aporte de este estudio, respecto a trabajos anteriores (Fortt, 2024; Gerding, 2019; Rodríguez et al., 2025), radica en la aplicación sistemática y comparativa de sensores multiespectrales para la detección de alteraciones. A diferencia de enfoques centrados en análisis petrográficos, geoquímicos o mapeo geológico convencional, esta investigación integró percepción remota con análisis litológico y estructural, permitiendo reconocer nuevas firmas espectrales asociadas a zonas de potencial interés mineralógico.

Además, la metodología empleada —basada en imágenes satelitales de libre acceso, índices espectrales reproducibles y técnicas robustas como *Band Math*, RGB y SAM— constituye un enfoque replicable en otros contextos geológicos con condiciones aflorantes similares. Esta replicabilidad resulta particularmente útil en programas regionales de prospección, donde se requiere priorizar áreas con potencial geológico y optimizar recursos en terreno.

Finalmente, se reconocen algunas limitaciones. La ausencia de verificación directa en terreno restringe la validación empírica de los resultados, y tanto la resolución espectral de los sensores como la escala de la cartografía base pueden influir en la precisión del análisis. No obstante, la integración de percepción remota con herramientas SIG ha demostrado ser una alternativa metodológica sólida para la exploración preliminar de alteraciones hidrotermales, especialmente en ambientes volcánicos complejos y de difícil acceso.

7.2 Recomendaciones

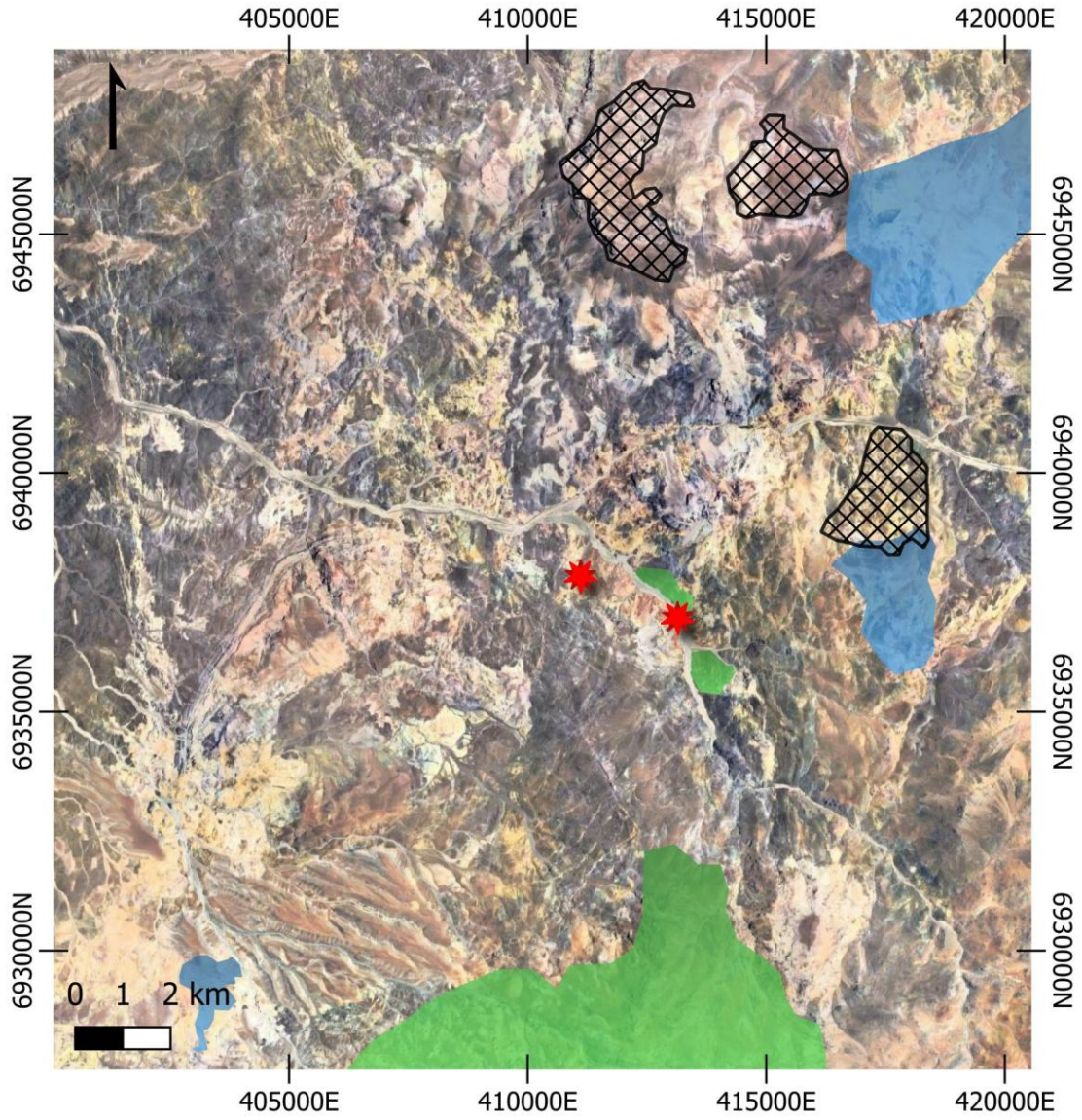
Si bien las imágenes multiespectrales han demostrado ser una herramienta eficaz para la identificación de alteraciones hidrotermales, su interpretación se basa en una porción limitada del espectro continuo de los minerales. Por ello, se recomienda complementar

estos análisis con datos geológicos y geoquímicos adicionales, especialmente en los sectores de mayor respuesta espectral definidos en este estudio (Figura 7.1).

Se sugiere:

- Para futuros estudios, realizar un análisis cuantitativo de la efectividad de las distintas configuraciones de índices espectrales y algoritmos de clasificación empleados, incorporando métricas de incertidumbre y sensibilidad del método.
- Expandir la metodología a otras calderas del sistema Carrizalillo (Lomas Bayas, Agua Nueva, Bellavista), lo que permitiría comparar patrones de alteración y avanzar hacia una caracterización regional más integrada del sistema volcánico.
- Realizar análisis petrográficos y espectroscopía portátil (e.g., Terraspec), especialmente en zonas con alteración propilítica —donde los minerales suelen estar mejor preservados— y en sectores con alta concentración espectral, para validar asociaciones minerales e interpretar su posible significado económico.
- Incorporar estudios geoquímicos de roca, orientados a identificar elementos traza y *pathfinder* que permitan discernir si las zonas alteradas corresponden a un sistema epitermal de alta sulfidación o a un sistema tipo pórfido.
- Aplicar métodos geofísicos indirectos, como magnetometría o polarización inducida (IP), para detectar intrusivos profundos, estructuras asociadas y zonas conductivas relacionadas con alteración hidrotermal, especialmente en áreas cubiertas o sin afloramientos.
- Evaluar la posibilidad de sondajes exploratorios en los puntos definidos como prioritarios, particularmente en aquellos donde se identificó pirofilita, mineral indicativo de zonas de alta temperatura en profundidad.

Esta integración de herramientas multispectrales, geoquímicas, petrográficas y geofísicas permitiría validar las zonas de alteración detectadas y generar un modelo geológico-estructural más robusto, optimizando futuras campañas de exploración.



Simbología

- | | |
|--------------------------|--------------------------------|
| Sondajes | Alteración filica |
| ★ Puntos de interés | ⊠ Zona de mayor mineralización |
| Áreas de interés | |
| ■ Alteración propilítica | |

Figura 7.1. Áreas recomendadas para futuros proyectos. Mapa de elaboración propia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abrams, M., Hook, S., & Ramachadran, B. (2002). ASTER user handbook, version 2. California: Jet Propulsion laboratory.
2. Acocella, V., Palladino, D. M., Cioni, R., Russo, P., & Simei, S. (2012). Caldera structure, amount of collapse, and erupted volumes: The case of Bolsena caldera, Italy. *Geological Society of America Bulletin*, 124(9–10), 1562–1576.
3. Arévalo, C., Rivera, O., Iriarte, S., & Mpodozis, C. (1994). Cuencas extensionales y campos de calderas del Cretácico Superior-Terciario Inferior en la Precordillera de Copiapó (27–28°S), Chile. Chile. 7° Congreso Geológico Chileno, Vol. II, p.1288-1292.
4. Beane, R; Bodnar, R. 1995. Hydrothermal fluids and hydrothermal alterations in porphyry copper deposits. *Porphyry copper deposits of the American Cordillera. Arizona geological Society Digest*, Tucson, AZ. p. 83-89.
5. Bravo Morales, N. F. (2017). Teledetección espacial LANDSAT, SENTINEL-2, ASTER LIT y MODIS. En *Geomática ambiental* (Vol. 1).
6. Campbell, J. B., & Wynne, J. H. (2011). *Introduction to remote sensing* (5th ed.). The Guilford Press.
7. Chuvieco, E. (1990). Fundamentos de teledetección espacial. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/bd2db3ec-3e1b-4390-9f2b-e230906db133>
8. Chuvieco, E. (2000). Fundamentos Básicos para la Teledetección Ambiental. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20684.44161>
9. Cole, J. W., D. M. Milner, K. D. Spinks. (2004). Calderas and caldera structures: A review, *Earth Sci. Rev.*, 69, 1 –26.
10. Corbett, G. J., & Leach, T. M. (1998). Southwest Pacific RIM gold-copper systems. Structure, alteration and mineralisation: *Economic Geology, Special Publication 6*, 238 p., Society of Economic Geologists.
11. Crosta, A., De Souza Filho, C., Azevedo, F., & Brodie, C. (2003). Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 24(21), 4233–4240.
12. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36.
13. Felicísimo, Á. M. (1994). Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales.
14. Fortt, M. (2024). Geología, petrografía y estilos de alteración Paleocenos en el sector de Quebrada Carrizalillo, Tierra Amarilla, Región de Atacama. [Tesis de

- titulación, Universidad de Atacama]. Repositorio Académico Universidad de Atacama.
15. Gerding, B. (2019). Petrología de los depósitos asociados a la Megacaldera Carrizalillo en la pre-cordillera de Copiapó, Región de Atacama. [Tesis de titulación, Universidad de Atacama]. Repositorio Académico Universidad de Atacama.
 16. Geyer, A., & Martí, J. (2008). The new worldwide collapse caldera database (CCDB): A tool for studying and understanding caldera processes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177(3), 515–529.
 17. Hedenquist, J., Arribas, A., & Gonzalez-Urien, E. (2000). Exploration for epithermal gold deposits.
 18. Hedenquist, J., Izawa, E., Arribas, A., & White, N. C. (1996). Epithermal gold deposits: Styles, characteristics, and exploration.
 19. Henley, R., & Ellis, A. (1983). Geothermal systems ancient and modern: A geochemical review. *Earth-Science Reviews*, 19(1), 1–50.
 20. Holohan, E. P., Walter, T. R., Schöpfer, M. P., Walsh, J. J., Van Wyk De Vries, B., & Troll, V. R. (2013). Origins of oblique-slip faulting during caldera subsidence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(4), 1778–1794.
 21. Ibáñez, J. (2021). Análisis espectral remoto de minerales asociados a los volcanes Olca e Irruputuncu. [Tesis de titulación, Universidad de Chile]. Repositorio Académico Universidad de Chile
 22. Iriarte, S., Arévalo, C., & Mpodozis, C. (1999). Hoja La Guardia, Región de Atacama (Mapa geológico No. 13, escala 1:100.000). Servicio Nacional de Geología y Minería.
 23. Knight, E., & Kvaran, G. (2014). Landsat-8 Operational Land Imager design, characterization and performance. *Remote Sensing*, 6(11), 10286–10305.
 24. Kruse, F., A., Lefkoff, B., & Dietz, J. B., 1993, Expert System-Based Mineral Mapping in Northern Death Valley, California/Nevada, Using the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS), *Remote Sensing of Environment*, vol.44, no.2, pp. 309-336.
 25. Laferte, A. (2022). Caracterización y distribución de la alteración hidrotermal y mineralización asociada a las lavas de Sierra La Dichosa, Tercera Región de Atacama, Chile. [Tesis de titulación, Universidad Andrés Bello]. Repositorio Académico Universidad Andrés Bello.
 26. Lillesand, TM y Kiefer, RW (2015) Teledetección e interpretación de imágenes. 7.ª edición, Wiley, Nueva York.
 27. Lipman, P. W. (2000). The central San Juan caldera cluster: Regional volcanic framework. En P. M. Bethke & R. L. Hay (Eds.), *Ancient Lake Creede: Its volcano-tectonic setting, history of sedimentation, and relation to mineralization* (pp. 9–69). Geological Society of America.

28. Lipman, P. W., Self, S., & Heiken, G. (1984). Introduction to calderas special issue. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B10), 8219–8221.
29. Loughlin, W. P. (1991). Principal component analysis for alteration mapping. *Transportation Research Information Services (TRIS)*.
30. Markham, B., Storey, J., & Morfitt, R. (2015). Landsat-8 Sensor Characterization and Calibration. *Remote Sensing*, 7(3), 2279–2282. <https://doi.org/10.3390/rs70302279>
31. Mpodozis, C., Allmendiger, R. W., Jordan, T. E. (1991). La zona del Nevado de Jotabeche y Laguna del Negro Francisco: evolución tectónica y volcánica de la extremidad meridional del Altiplano Chileno. *Congreso Geológico Chileno*, No. 6, Actas, p. 91-95. Viña del Mar.
32. Mpodozis, C., & Ramos, V. A. (1989). The Andes of Chile and Argentina. En G. E. Erickson, M. T. Cañas Pinochet, & J. A. Reinemund (Eds.), *Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources* (Vol. 11, pp. 59–90). Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources.
33. Origel, G., & Sánchez-Cárdenas, E. G. (2010). Methodological guide for the detection of mineral alteration zones with ASTER images.
34. Pellat, F. P., Sánchez, L. a. P., Mota, J. L. O., Sandoval, B. F., Menez, M. M., Solorio, C. a. O., & García, A. E. (2018). Corrector atmosférico en imágenes Landsat. *Terra Latinoamericana*, 36(4), 309. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.232>
35. Pirajno, F. (2009). Hydrothermal systems and the biosphere. En *Hydrothermal processes and mineral systems* (pp. 1025–1096). Springer.
36. Proyecto Jaspe (ex-Carrizalillo) (2016). Depósito de oro relacionado a alteración hidrotermal de alta sulfidización (high-sulphidation), integrado al desarrollo de un complejo de calderas volcánicas de edad Paleoceno-Eoceno, Región de Atacama del Norte de Chile.
37. Reed, M. (1997). Hydrothermal Alteration and Its Relation ship to Ore Fluid Composition. En: *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. John Wiley and Sons Inc. Publication, 303-366.
38. Rivera, O.M., Falcón, M.F. 2000, Calderas tipo colapso-resurgentes del Terciario inferior en la Precordillera de la Región de Atacama: Emplazamiento de complejos volcano-plutónicos en las cuencas volcano-tectónicas extensionales Hornitos e Indio Muerto.
39. Rivera, O. y Mpodozis, C. (1991). Volcanismo explosivo del Terciario inferior en la Precordillera de Copiapó, Región de Atacama, Chile: Las calderas Lomas Bayas y El Durazno.
40. Rivera, O. y Mpodozis, C. 1994. La Megacaldera Carrizalillo y sus calderas anidadas: Volcanismo sinextensional Cretácico Superior-Terciario Inferior en la Precordillera de Copiapó. *Proceedings 7th Congreso Geológico Chileno*, Concepción, 1, 149–153.

41. Rodríguez, N., Fuentes, P., Aragón, E., Lillo, M., Fernández, C., y Díaz-Alvarado. (2025) The calderas field of northern Chile (Atacama region): Eruptive mechanisms and structural control in the latest Cretaceous to Eocene Andean magmatic arc.
42. Rowan, L., Hook, S., Abrams, M. & Mars, J. (2003). Mapping Hydrothermally Altered rocks at Cuprite, Nevada, using the advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), a new satellite-imaging system. *Economic geology*, 98, 1019–1027.
43. Rowan, L. C., Mars, J. C., & Simpson, C. J. (2005). Lithologic mapping of the Mordor, NT, Australia ultramafic complex by using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *Remote Sensing of Environment*, 99(1–2), 105–126. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.021>
44. Sabins, F. F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14(3–4), 157–183. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(99\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(99)00007-4)
45. Shimada, M., Isoguchi, O., Tadono, T., & Isono, K. (2009). PALSAR Radiometric and Geometric calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(12), 3915–3932. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2009.2023909>
46. Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Society of Economic Geology, Inc. Economic Geology*, v 105, p 3–41.
47. Smith, R. L., & Bailey, R. A. (1968). Resurgent cauldrons. *En Memoir of the Geological Society of America* (Vol. 116, pp. 613–662).
48. Tipler, A. P. y Llewellyn, A. R. (2000). “Modern Physics”. USA: Freeman.
49. Trevisan, M. (2018) Geological characterisation of Cabeza de Vaca Mining District (Copiapó – Chile) by remote sensing, fieldwork and spectral analysis.
50. Van Der Meer, F., Van Der Werff, H., & Van Ruitenbeek, F. (2014). Potential of ESA’s Sentinel-2 for geological applications. *Remote Sensing of Environment*, v 148, p 124–133.
51. Vivallo, W., Díaz, A., & Jorquera, R. (2009). Provincias Metalogénicas en la Región de Atacama, Chile.

ANEXOS

ANEXOS A: Tablas de matemáticas de bandas

Tabla A1. Razones e índices espectrales aplicados al sensor ASTER.

Fuente	Minerales o alteraciones	Matemática de bandas
Origel y Sánchez (2010)	Alteración argílica	$(B4+B6)/B5$
Crosta et al., 2003.	Alteración fílica	$B7/B6$
Crosta et al., 2003.	Alteración propilítica	$B9/B8$
Van der Meer et al., 2014.	Fe+2	$B2/B4$
Origel y Sánchez (2010)	Fe+2	$(B5/B3)+(B1/B2)$
Origel y Sánchez (2010)	Fe+3	$B2/B1$
Origel y Sánchez (2010)	Fe+3	$B4/B3$
Crosta et al., 2003.	Hematita	$B3/B1$
Kalinowski and Oliver (2004)	Silicatos ferrosos	$B5/B4$
Van der Meer et al., 2012.	Laterita	$B4/B5$
Van der Meer et al., 2012.	<i>Gossan</i>	$B4/B2$

Tabla A2. Razones e índices espectrales aplicados al sensor Landsat 8.

Fuente	Minerales o alteraciones	Matemática de bandas
Sabins., 1999.	Alteración argílica	B6/B7
Sabins., 1999.	Alteración fílica	B7/B6
Pour and Hashim (2012)	Alteración propilítica	$(B6+B7)/B5$
Sabins., 1999.	Fe+2	B4/B6
Sabins., 1999.	Fe+2	$(B7/B5)+(B3/B4)$
Sabins., 1999.	Fe+3	B4/B3
Sabins., 1999.	Fe+3	B6/B5
Sabins., 1999.	Hematita	B4/B2
Sabins., 1999.	Silicatos ferrosos	B7/B6
Sabins., 1999.	Laterita	B6/B7
Sabins., 1999.	<i>Gossan</i>	B6/B4

Tabla A3. Razones e índices espectrales aplicados al sensor Sentinel-2.

Fuente	Minerales o alteraciones	Matemática de bandas
Kalinowski and Oliver, 2004.	Alteración argílica	B11/B12
Kalinowski and Oliver, 2004.	Alteración fílica	B12/B11
Bretar et al., 2021.	Alteración propilítica	B12/B8A
Kalinowski and Oliver, 2004.	Fe+2	B4/B11
Kalinowski and Oliver, 2004.	Fe+2	(B12/B8)+(B3/B4)
Kalinowski and Oliver, 2004.	Fe+3	B4/B3
Kalinowski and Oliver, 2004.	Fe+3	B11/B8
Kalinowski and Oliver, 2004.	Hematita	B4/B2
Kalinowski and Oliver, 2004.	Silicatos ferrosos	B12/B11
Kalinowski and Oliver, 2004.	Laterita	B11/B12
Kalinowski and Oliver, 2004.	<i>Gossan</i>	B11/B4

ANEXOS B: Clasificación espectral SAM

Tabla B1. Umbrales angulares utilizados para cada mineral, en la clasificación SAM en el sensor ASTER.

Mineral	Ángulo aplicado
Actinolita	0.1
Albita	0.02
Alunita	0.15
Andradita	0.68
Biotita	0.65
Calcita	0.09
Caolinita	0.15
Clorita	0.23
Cuarzo	0.025
Diáspora	0.25
Dickita	0.28
Epidota	0.75
Goethita	0.25
Grosularia	0.67
Hematita	0.3
Hornblenda	0.5
Illita	0.08
Jarosita	0.07
Limonita	0.25
Magnetita	0.07
Moscovita	0.07
Pirofilita	0.17
Turmalina	0.06

ANEXOS C: Tablas de Composiciones RGB en falso color.

Tabla C1. Composiciones RGB en falso color aplicadas al sensor ASTER.

Fuente	Minerales o alteraciones	R	G	B
Crosta et al., 2003.	Alteraciones	B4/B5	B2/B1	B5/B4
Crosta et al., 2003.	Alteraciones	B4/B3	B2/B4	B4/B5
Crosta et al., 2003.	Alteraciones	B4/B3	B2/B4	B5/B4
Rowan (2010)	Moscovita, caolinitas y epidota.	B7/B6	B5/B6	B9/B8
Sabins (1999)	Moscovita, clorita y epidota.	B7/B6	B5/B8	B9/B8
Sabins (1999)	Alunita, clorita y jarosita.	B6/B5	B5/B8	B4/B7
Rowan (2010)	Alteración argílica, alteración fílica y alteración propilítica.	(B4+B6)/B 5	B7/B6	B9/B8

Tabla C2. Composiciones RGB en falso color aplicadas al sensor Landsat 8.

Fuente	Minerales o alteraciones	R	G	B
Sabins (1999)	Alteración.	B6/B7	B4/B2	B7/B6
Sabins (1999)	Alteración.	B6/B5	B4/B6	B6/B7
Sabins (1999)	Alteración.	B6/B5	B4/B6	B7/B6

Tabla C3. Composiciones RGB en falso color aplicadas al sensor Sentinel-2

Fuente	Minerales o alteraciones	R	G	B
Van der Meer et al. (2014)	Alteraciones.	B11/B12	B4/B2	B12/B11

Van der Meer et al. (2014)	Alteraciones.	B11/B8	B4/B11	B11/B12
Van der Meer et al. (2014)	Alteraciones.	B11/B8	B4/B11	B12/B11