



Universidad
Internacional
de Andalucía

TÍTULO

CARACTERIZACIÓN DE ZONAS DE ALTERACIÓN HIDROTHERMAL A PARTIR DE TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES ASTER. CASO DE ESTUDIO FALLA DE CARBONERAS

AUTOR

Javier Ballote Álvarez

	Esta edición electrónica ha sido realizada en 2025
Tutor	Dr. Felipe J. González Barrionuevo
Instituciones	Universidad Internacional de Andalucía; Universidad de Huelva
Curso	<i>Máster Universitario en Geología y Gestión Ambiental de los Recursos Minerales (2023/24)</i>
©	Javier Ballote Álvarez
©	De esta edición: Universidad Internacional de Andalucía
Fecha documento	2024



Universidad
Internacional
de Andalucía



**Atribución-NoComercial-SinDerivadas
4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)**

Para más información:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.en>



Universidad
Internacional
de Andalucía



Universidad
de Huelva

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

**TÍTULO: CARACTERIZACIÓN DE ZONAS DE ALTERACIÓN
HIDROTERMAL A PARTIR DE TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE
IMÁGENES MULTIESPECTRALES ASTER. CASO DE ESTUDIO: FALLA
DE CARBONERAS**

AUTOR: JAVIER BALLOTE ALVAREZ

Máster Universitario en Geología y Gestión Ambiental de los Recursos
Minerales (2023/24)

Departamento de Geología. Universidad de Huelva.

Universidad Internacional de Andalucía

Tutor: Dr. Felipe J. González Barrionuevo

2024

ÍNDICE

Introducción	7
CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS DE LA REGIÓN DE ESTUDIO. PRINCIPALES INVESTIGACIONES.....	10
1.1 Características físico-geográficas del área de estudio	10
1.2 Contexto geológico regional	11
1.3 Alteración hidrotermal	14
1.4 Indicios de mineralización en la región de estudio.....	18
CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE: IMÁGENES ASTER.	20
2.1 Características del sensor ASTER.....	20
2.2 Principales estudios sobre alteraciones hidrotermales mediante imágenes ASTER.....	22
2.3 Antecedentes de uso de teledetección en la región de estudio. Principales técnicas de procesamiento de imágenes aplicadas en Rodalquilar.	26
Capítulo III. Materiales y métodos	29
3.1 Fuente de datos	29
3.2 Metodología de la investigación.....	29
3.2 Preprocesamiento	30
3.3 Procesamiento	31
Procesamiento imágenes ASTER.....	31
3.3.1 Cociente de bandas, índices y operadores lógicos.....	31
3.3.2 Análisis de Componentes Principales (ACP) y métodos basados en mejoras (MNF).....	31
3.3.3 Algoritmos basados en ajuste de forma como SAM, MF y MTMF	33
3.3.4 Métodos de desmezcla parcial: LSU y CEM.....	34
Procesamiento MDE	35
Capítulo IV: Análisis y discusión de los resultados	37
4.1 Resultados de los índices espectrales	37
4.2 Resultados de Análisis de Componentes Principales (PCA) y los métodos basados en mejoras: Minimum Noise Fraction (MNF).....	43
4.2.1 Resultados de APC en su forma clásica	43
4.2.2 Resultados Análisis de Componentes Principales Selectivo (ACPS) ...	45
4.2.3 Resultados de la Técnica de Crósta (Crósta y Moore,1989) o Análisis de Componentes Principales Orientado a Objetos (ACPOO)	46
4.2.4 Resultados MNF	50
4.3. Resultados de los algoritmos basados en ajuste de forma como SAM, MF y MTMF	52
4.3.1 Resultados SAM.....	52
4.3.2 Resultados MF.....	53

4.2.3 Resultados MTMF	54
4.3 Resultados de los algoritmos de desmezcla	55
4.3.1 Resultados LSU	55
4.3.2 Resultados CEM	57
4.4 Análisis MDE	57
4.5 Mapa de alteraciones hidrotermales.	59
Conclusiones	61
Recomendaciones	64
Referencias	65

Índice de figuras

Figura 1: Ubicación geográfica del área de estudio: Falla de Carboneras.	10
Figura 2. Mapa Geológico de la Cordillera Bética.....	11
Figura 3: Situación geológica de la región de estudio	13
Figura 4: Mapa Geológico Unificado de España 1:50 000 (MAGNA 50) en el área de Carboneras.	14
Figura 5: Esquema de la composición mineralógica de las alteraciones hidrotermales asociadas a la formación de depósitos minerales epitermales, mesotermiales y porfídicos, según el pH de las soluciones mineralizantes.	17
Figura 6: Actividad extractiva en Andalucía. Fuente: Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía	19
Figura 7: Firmas espectrales de minerales de alteración hidrotermal: moscovita, caolinita, alunita, epidota, calcita y clorita remuestreados en pasos de banda ASTER.....	21
Figura 8: Enfoque metodológico de la investigación	30
Figura 9: Firmas espectrales de minerales de alteración utilizadas en el análisis MF. Modificado de “mineral.jhu.nicolet_2287.lib”.....	34
Figura 10: Índices empleados por Díaz (2012) y González (2012). a) Alunita= $(b4+b7)/b5$, b) Caolinita= $(b4+b7)/b6$, c) Clorita= $(b5+b7)/b8$, d) Combinación RGB= Alunita-Caolinita-Clorita.	37
Figura 11: Índices de Ninomiya: a) ALI b) KLI c) CLI d) OHla.	38
Figura 12: Índices de Ninomiya: a) OHlb. b) SI c) QI d) RGB: ALI-KLI-SI	39
Figura 13: Combinaciones de falso color: a) 3-2-1. b) 4-6-8, c) 6-2-1 d) 4/5- 4/7-3/1, e) 4-6-1, f) 12-5-3 g) QI-13/14-12/13, h) 4/1-3/1-12/14.	41
Figura 14: a) Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), en verde las anomalías correspondientes a la vegetación y b) Combinación RGB: 7-3-1	42
Figura 15: a) Alteración fílica (Sericita / Muscovita / Illita / Esmeclita) = $(5+7)/6$, b) Alteración argílica avanzada (Alunita/Caolinita/Pirofilita)= $(4+6)/5$	43
Figura 16. Componentes Principales a) CP 4 b) CP3 c) CP2 d) Combinación RGB: CP4-CP3-CP2.	44
Figura 17: a) CP2 de la relación entre B5 y B7 (alunita). b) CP2 de la relación entre B6 y B7 (caolinita), c) CP2 de la relación entre B5 y B8 (clorita). d) Combinación RGB: CP2 alunita, CP2 caolinita y CP2 clorita	45
Figura 18: Componentes principales: Variante 1 a) CP4 de la alunita, b) CP3 de la caolinita, c) (-CP4) de Illita y d) CP4 de caolinita-esmeclita.....	47
Figura 19: Combinación RGB- R: CP4 Alunita, G: CP3 Caolinita y B: (-CP4) Illita	48
Figura 20: Componentes principales: Variante 2 a) -CP4 de la alunita, b) -CP4 caolinita y c) -CP4 de clorita y d) Composición RGB, R: alunita, G: caolinita y B: clorita.	49
Figura 21: a) MNF1, b) MNF 2 c) MNF 3, d) Combinación R: MNF3, G: MNF2 y B: MNF1.	51
Figura 22: a) SAM con ángulo máximo espectral de 1.25 radianes usando la librería espectral “mineral.jhu.nicolet_2287.lib” b) SAM-D con ángulo máximo espectral de 0.75 radianes usando la librería espectral de los minerales extraídos.....	52
Figura 23: Filtro combinado empleando la librería de minerales de alteración de la Figura 9. a) MF alunita, b) MF caolinita, c) MF Clorita d) Combinación R: Caolinita, G: Alunita y B: Clorita.	53
Figura 24: a) MTMF empleando la librería “mineral.jhu.nicolet_2287.lib”. Combinación R: Alunita, G: Caolinita y B: Illita/Smectita. b) Clasificación con el 98% de verosimilitud.....	54
Figura 25: LSU empleando la librería de minerales de alteración de la Figura 9a) Alunita, b) Caolinita, c) Clorita, d) Illita, e) Error RMS f) Combinación R: Caolinita, G: Illita y B: Alunita	56
Figura 26: Algoritmo CEM empleando la librería “mineral.jhu.nicolet_2287.lib”. Combinación R: Alunita, G: Baolinita y B: Illita	57

Figura 27: a) MDE de la región de estudio Fuente: GDEM ASTER. b) Mapa de aspecto del relieve. c) Mapa de Sombras (azimuth=315º, altitud=45º).	58
Figura 28: a) Mapa 3D de la región de Carboneras b) Análisis de cuencas, en azul microcuencas y en rojo picos divisorios.	58
Figura 29: Mapa de alteraciones hidrotermales en la Falla de Carboneras.	59

Índice de tablas

Tabla 1: Características espectrales, radiométricas y espaciales de la plataforma ASTER.	20
Tabla 2: Índices espectrales más comunes.	23
Tabla 3: Combinaciones de falso color utilizadas para identificar alteraciones hidrotermales mediante imágenes ASTER.	25
Tabla 4: Tabla de autovectores de la variante 1 de la Técnica de Crósta.....	46
Tabla 5: Tabla de autovectores de la variante 2 de la Técnica de Crósta.....	48
Tabla 6: Tabla de autovectores y autovalores del análisis MNF.	50

Resumen

Esta investigación se centra en la determinación de zonas de alteración hidrotermal en la región de Carboneras mediante imágenes multiespectrales ASTER. Se aplicaron cuatro tipos de técnicas de procesamiento para extraer información espectral de los datos: (1) métodos basados en relación de bandas, índices y operadores lógicos; (2) componentes principales (PCA) y métodos basados en mejoras, como *Minimum Noise Fraction (MNF)*; (3) algoritmos basados en ajuste de forma como *Spectral Angle Mapper (SAM)*, *Matched-Filtering (MF)* y *MixtureTuned Matched-Filtering (MTMF)*; (4) métodos de desmezcla parcial como *Linear Spectral Unmixing (LSU)* y *Constrained Energy Minimization (CEM)*. También se analizó el modelo digital de elevaciones para buscar relaciones entre los principales lineamientos de la Falla Carboneras y las zonas de alteración. Se lograron identificar tres variedades de alteración hidrotermal: argílica intermedia, argílica avanzada y fílica. Además, se proponen cinco zonas anómalas de interés para la exploración geológica.

Palabras claves: Alteración hidrotermal, ASTER, Falla de Carboneras

Abstract

This research focuses on the determination of hydrothermal alteration zones in the Carboneras region using multispectral ASTER images. Four types of processing techniques were applied to extract spectral information from the data: (1) band ratio, index and logical operator based methods; (2) principal component analysis (PCA) and enhancement based methods such as Minimum Noise Fraction (MNF); (3) shape fitting based algorithms such as Spectral Angle Mapper (SAM), Matched-Filtering (MF) and MixtureTuned Matched-Filtering (MTMF); (4) partial unmixing methods such as Linear Spectral Unmixing (LSU) and Constrained Energy Minimization (CEM). The digital elevation model was also analyzed to look for relationships between the main lineaments of the Carboneras Fault and the alteration zones. Three varieties of hydrothermal alteration were identified: intermediate argillic, advanced argillic and phyllic. In addition, five anomalous zones of interest for geological exploration are proposed.

Key words: Hydrothermal alteration, ASTER, Carboneras Fault.

Introducción

La mayoría de los depósitos minerales de oro, plata, cobre, plomo, zinc y molibdeno que se explotan actualmente en el mundo tienen un origen hidrotermal. La alteración hidrotermal de las rocas se produce como resultado de la transformación de la mineralogía original primaria de la roca en una nueva asociación de minerales, más estable bajo condiciones hidrotermales de temperatura, presión y composición de los fluidos. Estos minerales nuevos o secundarios difieren en composición química y mineralogía con respecto a los minerales originales de las rocas, dado que los componentes en solución y de los minerales sólidos se intercambian para lograr un equilibrio termodinámico (Orellana, 2022).

La alteración hidrotermal produce un amplio rango de mineralogía, abundancia mineral y textural en distintas rocas. Esto hace que sea complicado tener un criterio uniforme para la clasificación de tipos de alteración. Una práctica común es nombrar las alteraciones hidrotermales por la asociación de minerales de alteración presentes en las rocas, tal es el caso de la clasificación que plantean Corbett y Leach (1998), dado que una asociación de minerales de alteración refleja las condiciones de temperatura, presión, composición química del fluido hidrotermal, mineralogía de la roca original y el tiempo que se tarda en lograr un equilibrio termodinámico entre la roca y el fluido. Por lo mismo, según Orellana, (2022), es que se requiere una observación detallada de los minerales, su química y sus texturas para identificar la asociación de minerales correcta.

Los procesos de alteración hidrotermal no solo conllevan la transformación mineralógica y química de las rocas, sino que también dan lugar a la concentración de minerales metálicos o elementos nativos económicamente rentables. Dado que existe una íntima relación entre las reacciones químicas relacionadas con la alteración y aquellas que dan lugar al enriquecimiento metálico, es posible establecer relaciones directas entre tipo o zonas de alteración y naturaleza de la mineralización. Según González, (2012) en la actualidad el reconocimiento de zonas, asociaciones minerales y estilos de alteración hidrotermal es una herramienta de uso común en exploración minera, dado que aporta información tanto de la existencia de posibles zonas de enriquecimiento mineral como de la propia naturaleza de la mineralización.

En este sentido, el uso de imágenes satelitales o “Teledetección” constituyen una técnica de exploración minera muy útil actualmente para la cartografía de las zonas de alteración hidrotermal, pues posibilita estudiar áreas de grandes extensiones con relativa rapidez, a la vez que su aplicación, a priori, resulta más económica que otras técnicas de investigación geológica, permitiendo campañas de exploración a mayor detalle en los sitios donde se identifiquen zonas de alteración hidrotermal con potencialidades mineras.

Desde la década del 70 del siglo pasado, las investigaciones geológicas mediante Teledetección se han centrado en el uso de firmas espectrales para la discriminación de tipos de rocas y la cartografía de las zonas de alteración hidrotermal. Hasta el año 2000, Landsat fue la plataforma satelital más utilizada para proporcionar información sobre la composición geológica de la superficie terrestre. Sus escáneres, además de las bandas visibles (VNIR), tenían dos

bandas infrarrojas de onda corta (SWIR) y una única banda infrarroja térmica (Abrams y Yamaguchi, 2019). Una sola banda SWIR fusionaba las características espectrales de las arcillas, carbonatos y sulfatos. En cambio, la banda TIR no proporcionaba información suficiente sobre la composición de los silicatos. Luego del lanzamiento de la plataforma ASTER, todas estas distinciones mineralógicas, y más, se han podido lograr gracias a su mejor resolución espectral.

Una de las regiones de España donde más estudios se han realizado con imágenes ASTER es en la caldera de Rodalquilar, Almería, primer ejemplo documentado de mineralización de oro epitermal relacionada con una caldera en Europa (Arribas *et al.*, 1995). En Rodalquilar, las zonas de alteración hidrotermal han sido muy bien caracterizadas aplicando diversas técnicas de procesamiento a las imágenes ASTER, combinándolas con trabajos de campo, geoquímica y laboratorio. Esto ha permitido un mejor entendimiento de la génesis de este depósito epitermal, y hace que sea un referente en cuanto a las técnicas de procesamiento de imágenes que se pueden aplicar en la región.

La presente investigación se centra en el entorno de Sierra Cabrera, en Almería, concretamente en la conocida como falla de Carboneras, accidente tectónico que pone en contacto el Complejo Volcánico de Cabo de Gata y las Zonas internas de las Cordilleras Béticas. Un área cercana a Rodalquilar que presenta algunas características geológicas propias y donde existen manifestaciones minerales que pudieran tener interés económico, pero que no ha sido lo suficientemente estudiada mediante teledetección. Por tal motivo, se plantea como **objetivo general** de esta investigación: Caracterizar la alteración hidrotermal en la Falla de Carboneras mediante el análisis de las imágenes multiespectrales ASTER.

Como objetivos específicos:

- Revisar las técnicas de procesamiento que permiten identificar y diferenciar las zonas de alteración hidrotermal mediante el tratamiento de imágenes multiespectrales ASTER.
- Cartografiar las zonas de alteración hidrotermal mediante el análisis de imágenes multiespectrales ASTER en la región de Carboneras.

Se define como **hipótesis científica**: Mediante el empleo de distintas técnicas de procesamiento de las imágenes ASTER se podrán cartografiar las zonas de alteración hidrotermal en el entorno de la falla de Carboneras, lo cual permitirá orientar la exploración geológica en el área y evaluar su potencial económico.

Las tareas a realizar implican:

1. Revisión bibliográfica
2. Identificación y selección de técnicas de teledetección utilizadas en la identificación de zonas de alteración hidrotermal.
3. Aplicación de las técnicas de procesamiento de imágenes ASTER que mejores resultados han brindado.
4. Caracterización de zonas de alteración y potenciales estructuras locales y regionales.

5. Elaboración de un mapa con la distribución en superficie de las zonas de alteración hidrotermal en el área de estudio.

El presente Trabajo de fin de máster consta de cuatro capítulos. En el Capítulo 1 se aborda la geología de la región de estudio y los rasgos mineralógicos de las alteraciones hidrotermales. En el Capítulo 2 se presentan las principales características del sensor ASTER y cuáles son las técnicas de procesamiento aplicadas en la bibliografía para la identificación de las zonas de alteración hidrotermal. El Capítulo 3, describe las técnicas de procesamiento empleadas en la región de estudio y finalmente en el Capítulo 4 se discuten los principales resultados obtenidos en la investigación.

CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS DE LA REGIÓN DE ESTUDIO. PRINCIPALES INVESTIGACIONES.

En este capítulo se presentan las principales características físico-geográficas de la región de estudio, así como su contexto geológico regional. Además, se describen los distintos tipos de alteración hidrotermal y los indicios de mineralización en la región de estudio a partir de un depósito epitermal cercano.

1.1 Características físico-geográficas del área de estudio

La zona de estudio (Figura 1) se ubica en la provincia andaluza de Almería, en el margen suroriental de la Península Ibérica, donde confluyen los términos municipales de Mojácar, Turre y Carboneras. Se localiza aproximadamente a 6 km al Norte del poblado de Carboneras.

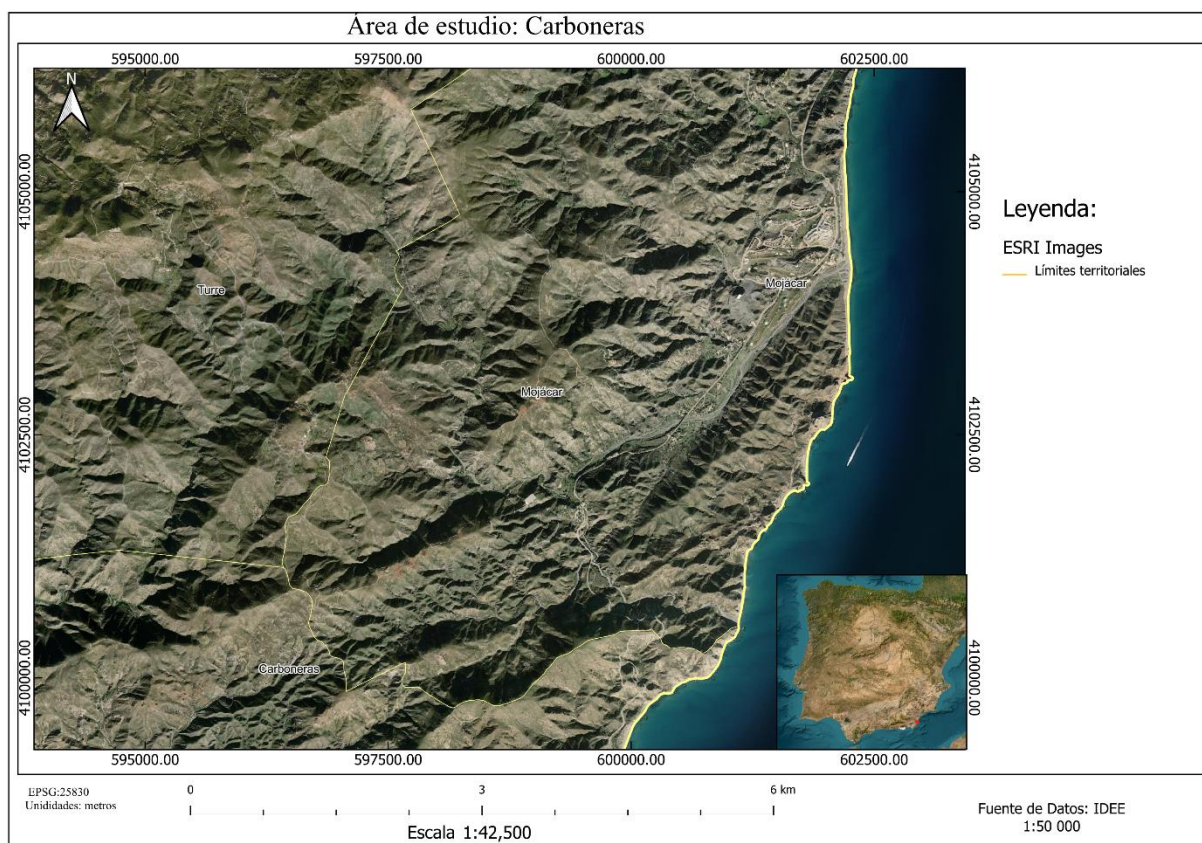


Figura 1: Ubicación geográfica del área de estudio: Falla de Carboneras. Elaboración propia

Los límites del área están definidos por las siguientes coordenadas en el sistema de referencia UTM 30N (EPSG:25830): 594400; 4098800 para el punto extremo que se encuentra al SW y 602500; 4107500 para el punto localizado al NE.

El clima en la región se caracteriza por ser Mediterráneo subdesértico, según la clasificación de Köppen-Geiger hay una transición entre BSh y Csa. Las precipitaciones anuales promedian 300 mm y las temperaturas medias son de 18° C. En el territorio se encuentran bien definidos dos dominios: el de Sierras y Valles Béticos denominado Sureste árido y el dominio Litoral (Mediterráneo),

donde se pueden apreciar numerosas ramblas, barrancos secos y desfiladeros. La geomorfología está marcada por sierras y valles Béticos, destacándose Sierra Cabrera que se extiende de suroeste a noreste; al sur, se encuentra la porción más oriental de la Sierra de Cabo de Gata. Las alturas medias son de 319 msnm.

1.2 Contexto geológico regional

El área de estudio se encuentra representada por las rocas de la Cordillera Bética y las rocas volcánicas del Complejo Cabo de Gata, separadas tectónicamente por el sistema de fallas Carboneras.

La Cordillera Bética forma parte de una cordillera arqueada, que recibe el nombre de Arco Bético-Rifeño, que se prolonga hacia el sur con el rif norteafricano y que continúa hacia el Este, hasta las Baleares, incluyendo los sedimentos del Mar de Alborán (Gil, 2008). Es una cadena montañosa formada durante el plegamiento alpino y forma parte del conjunto de cadenas alpinas que rodean al Mediterráneo occidental (Orógeno Perimediterráneo occidental), como resultado del choque de la placa africana con la placa euroasiática y el Dominio Alborán (placa Mesomediterránea).

En la Cordillera Bética (Figura 2) en función de la edad de las rocas que afloran y del grado de deformación que les afecta se pueden diferenciar cuatro grandes unidades geológicas: las Zonas Externas Béticas, las Zonas Internas Béticas, el Complejo del Campo de Gibraltar y las Cuencas Neógenas postorogénicas (Vera, 2004).

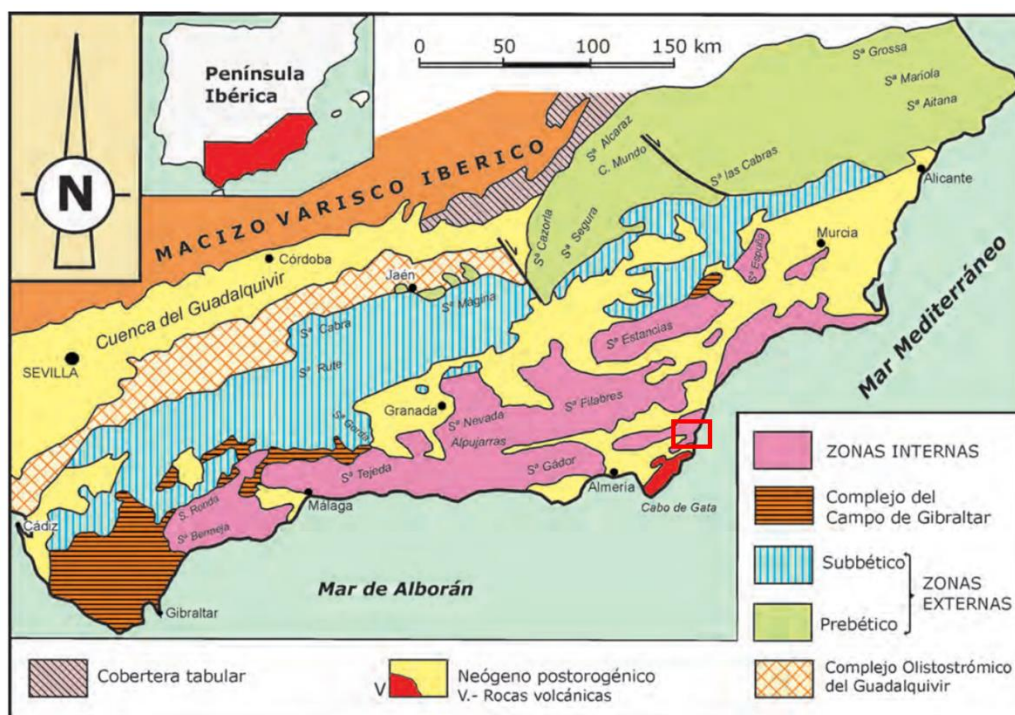


Figura 2. Mapa Geológico de la Cordillera Bética. El rectángulo en rojo representa la región de estudio. Modificado de Vera, (2004).

Dentro de las Zonas Internas se delimitan tres grandes complejos constituidos por pilas de mantos superpuestos, que de más bajo a más alto en orden tectónico son: Complejo Nevado-Filábride, Complejo Alpujárride y Complejo Maláguide, con diferencias notables entre ellos por la edad y litología de las rocas y el grado de la deformación y del metamorfismo.

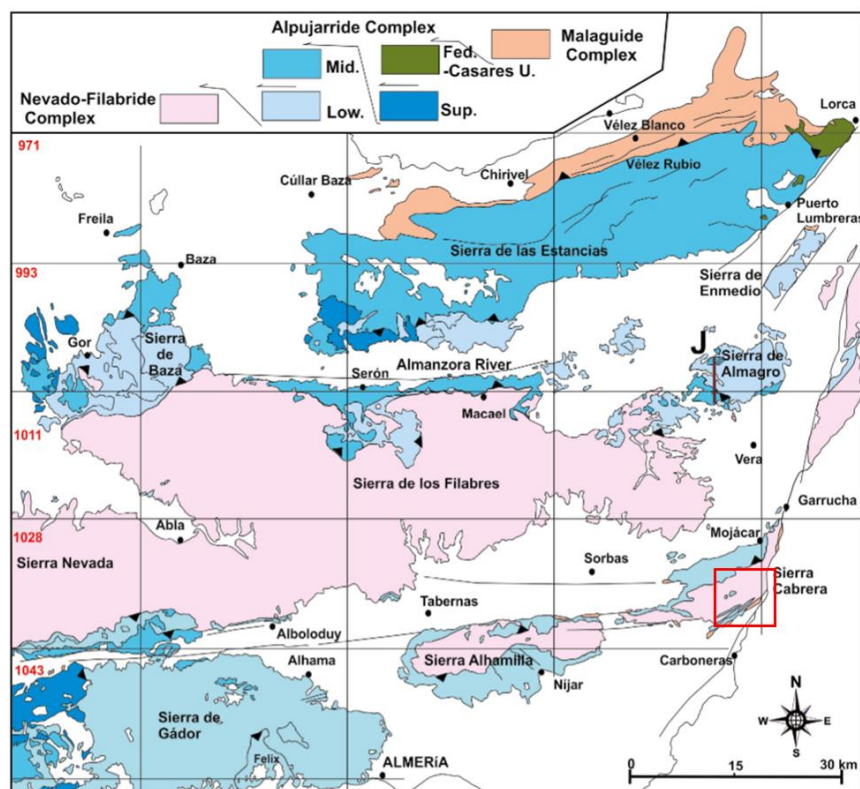
El **Complejo Nevado-Filábride** es la unidad más inferior tectónicamente, y aflora extensamente en Sierra Nevada y la Sierra de los Filabres. Sus afloramientos son los núcleos de grandes antiformas de manera que los materiales de los otros dos complejos, situados encima, les rodean. Todas las rocas que afloran en este complejo son metamórficas, dominando los micaesquistos grafitosos, a los que siguen, con menor abundancia, las cuarcitas, los gneises, las metabasitas y los mármoles (Vera, 2004).

El **Complejo Alpujárride** es la segunda de las grandes unidades que forman las Zonas Internas Béticas y ocupa una posición intermedia, de manera que se dispone sobre el Complejo Nevado-Filábride y está debajo del Complejo Maláguide. De los tres complejos es el que mayor extensión de afloramiento ocupa en la actualidad. El Paleozoico está constituido por micaesquistos, cuarcitas, gneises y metabasitas, afectado por un metamorfismo de grado medio a alto. Según Vera (2004), sobre el Paleozoico se disponen los materiales permotriásicos, que se inician con una unidad de filitas y cuarcitas (Pérmico-Triásico inferior) a la que sigue una potente unidad de rocas carbonatadas (calizas y dolomías) del Triásico medio-superior que en algunas unidades están marmolizadas por efecto del metamorfismo.

En cambio, el **Complejo Maláguide** es la unidad tectónicamente superior, y presenta rasgos bastante diferentes al Complejo Alpujárride y al Nevado Filábride. De una parte, es el único complejo, de los tres, en el que hay materiales del Jurásico, Cretácico y Paleógeno. Por otra parte, el metamorfismo, que afecta solamente a una parte del Paleozoico, lo hace de manera desigual en las diferentes unidades que constituyen el Complejo, pero siempre en un grado muy inferior al de los otros dos complejos, hasta el punto de que en algunas unidades no hay metamorfismo. El Paleozoico tiene una unidad basal de filitas y areniscas (Ordovícico?-Silúrico), una intermedia de calizas y areniscas (Devónico) y otra superior de areniscas, lutitas y conglomerados (Carbonífero). Los materiales del Pérmico y Triásico, discordantes sobre los anteriores, están formados esencialmente por facies detríticas rojas. El Jurásico, el Cretácico y el Paleógeno afloran de manera desigual, según las áreas geográficas (Vera, 2004).

Como principal elemento estructural de la región, se encuentra la **Falla de Carboneras**, falla de desgarre tipo siniestra que separa el macizo volcánico de Cabo de Gata de la cuenca neógena de Níjar. La falla de Carboneras, localizada al este de Almería, presenta 50 Km de longitud en tierra y 100 Km en mar, con una orientación 45°-65° N, forma parte del sistema de fallas de salto sinistro que recibe el nombre de Cizallas de las Béticas Orientales, se cree que la falla de Carboneras podría estar relacionada con fallas que conecta las Béticas con el Rif Norte Africano. Según (Gil, 2008), se trata de una falla donde no se ha registrado mucha sismicidad a lo largo del tiempo, pero presenta actividad tectónica reciente y con periodos de recurrencia del orden de 100 000 años para

terremotos de magnitudes elevadas. Los fenómenos volcánicos producidos en esta zona aprovecharon la debilidad de la corteza creada por esta falla para ascender y aflorar en superficie aprovechando la comprensión N-S, producida por el acercamiento de las placas de África y Europa (Duran, 1999).



En el Mapa Geológico de España 1:50 000 (MAGNA 50), (Figura 4), se puede apreciar que en el área de estudio predominan micasquistos, cuarcitas, rocas carbonatadas y esquistos de epidota, con edades que van desde el Precámbrico al Devónico Superior pertenecientes al complejo Alpujárride. Actualmente es más

acertado el criterio que en Sierra Cabrera, aparecen las unidades del Complejo Alpujárride como una orla rodeando un núcleo de materiales nevado-filábrides, tal como plantean Aldaya *et al.*, (1979) y Sanz de Galdeano (2023). Al norte, según MAGNA 50, se encuentran las filitas, cuarcitas y rocas carbonatadas de edad Pérmico- Triásico, al sur, se observa un intenso plegamiento compuesto por cabalgamientos y fallas inversas (correspondiente a la zona de Falla de Carboneras) donde se intercalan las filitas y cuarcitas del Complejo Alpujárride con imbricaciones de argilitas, pizarras, cuarcitas, conglomerados y rocas carbonatadas que conforman el Complejo Maláguide. Al sureste del área se ubican las rocas volcánicas neógenas características de la Sierra de Cabo de Gata.

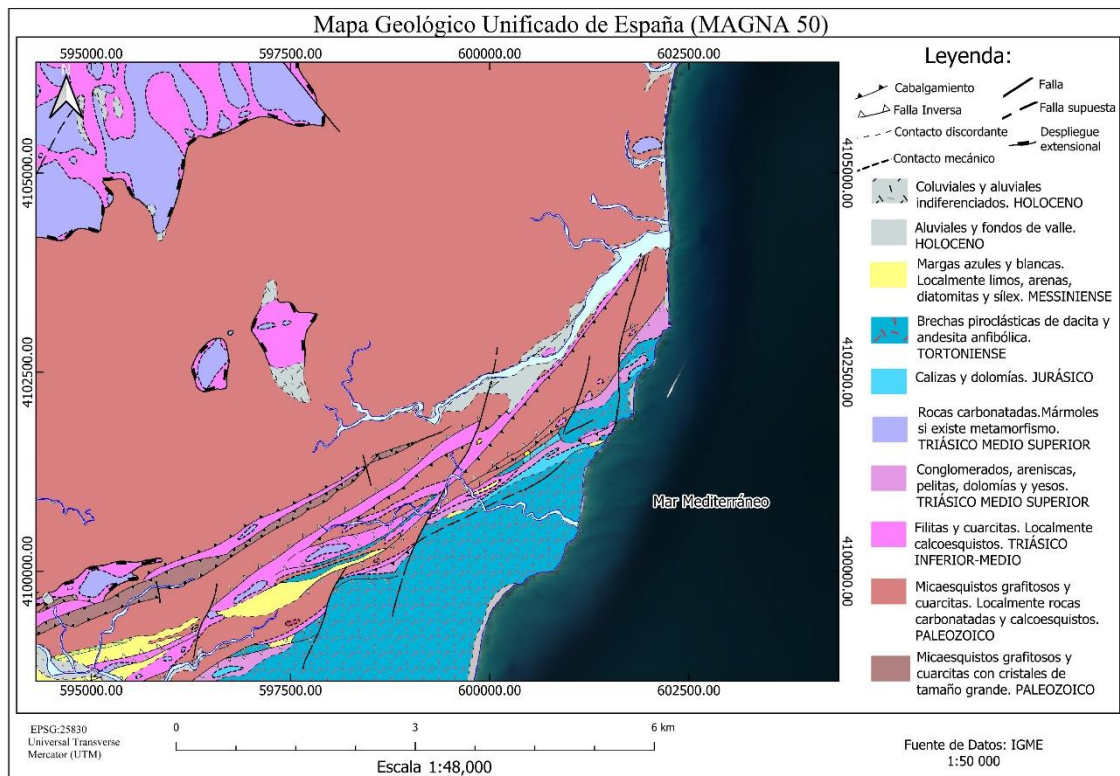


Figura 4: Mapa Geológico Unificado de España 1:50 000 (MAGNA 50) en el área de Carboneras. Fuente: Elaboración propia.

1.3 Alteración hidrotermal

Según Meyer y Hemley (1967) los tipos de alteraciones hidrotermales más comunes se pueden clasificar en: potásica, propilítica, argílica intermedia, argílica avanzada y cuarzo-sericítica. Otros autores como Corbett y Leach (1998) y Pirajno (2009) realizaron importantes contribuciones. A continuación, se resumen las principales características:

- **Alteración potásica:** caracterizada principalmente por feldespato potásico y/o biotita, resultados de una alteración de plagioclasas y minerales máficos, teniendo por minerales accesorios cuarzo, magnetita, pirita, calcopirita, sericita y clorita. Esta alteración corresponde a un intercambio catiónico, con adición de K⁺ a la roca. Ocurre en condiciones de pH neutro a alcalino a elevadas temperaturas en el rango 350°-500°C, motivo por el cual se presenta en la parte más central (núcleo) de zonas

alteradas, dada su relación con el emplazamiento de plutones. La alteración potásica de alta temperatura (400 a 800°C) se caracteriza por una alteración selectiva y penetrativa (Orellana, 2022). La biotita ocurre entre 350 a 400°C, mientras que el feldespato entre 300 y 350°C.

- **Alteración propilítica:** presencia de la asociación clorita-epidota, en ausencia de un metasomatismo apreciable de H⁺. Otros minerales que también se presentan son albita, calcita y/o pirita. Esta alteración se forma a condiciones de pH neutro a alcalino a rangos de temperatura bajo (200 a 250°C). Ocurre por lo general como halo gradacional y distal de una alteración potásica, gradando desde actinolita-biotita (en el contacto de la zona potásica) a actinolita-epidota (en la zona propilítica). Al representar un grado bajo de hidrólisis de los minerales de las rocas, su posición en zonas alteradas tiende a ser marginal. La presencia de actinolita (280 a 300°C) podría ser indicador de zona de alteración propilítica interior (Berrios, 2020)
- **Alteración argílica intermedia:** Abundantes cantidades de arcillas (caolinita, montmorillonita, esmectita o arcillas amorfas), puede haber sericita acompañando a las arcillas. Arcillas reemplazan principalmente a plagioclasas. Hay una significativa lixiviación de Ca, Na y Mg de las rocas, la alteración argílica intermedia representa un grado más alto de hidrólisis. Ocurre en rango de pH entre 4 y 5, y puede coexistir con la alunita en un rango transicional de pH entre 3 y 4. En cuanto a los rangos de temperatura, la caolinita se forma a temperaturas bajo 300°C, típicamente en el rango <150°-200°C, sobre los 300°C la fase estable es la pirofilita (Orellana, 2022).
- **Alteración argílica avanzada:** se caracteriza principalmente por cuarzo residual (cuarzo oqueroso o *“vuggy silica” en inglés*). Se produce la destrucción total de feldespatos en condiciones de una hidrólisis muy fuerte, dando lugar a la formación de caolinita y/o alunita, pudiendo encontrarse: jarosita, diásporo, dickita, pirofilita, pirita y/o zunyita. El rango de temperaturas de ocurrencia es bastante amplio, pero a pH entre 1 y 3,5. Sobre los 350°C puede darse con andalucita además de cuarzo. Bajo pH=2 domina el cuarzo, y sobre pH>2 alunita (Townley, 2001).
- **Alteración sericítica o cuarzo-sericítica (filica):** se caracteriza porque la plagioclasa y feldespato potásico son transformados a sericita y cuarzo secundario, con minerales accesorios como clorita, illita y pirita. Esta alteración es el resultado de una hidrólisis que va de moderada a fuerte de los feldespatos, en un rango de temperaturas de 300-400°C y de pH de 5 a 6 (Berrios, 2020). A temperaturas más bajas se da illita (200°-250°C) o illita-smectita (100°-200°C). A temperaturas sobre los 450°C, corindón aparece en asociación con sericita y andalucita. (Universidad de Granada).

Atendiendo a la evolución geológica del área de estudio, las alteraciones hidrotermales serán las propias de un depósito epitermal. Los depósitos epitermales están asociados directamente a márgenes de subducción activos en diferentes épocas geológicas. La distribución de los depósitos epitermales coincide, no sólo con arcos volcánicos en márgenes convergentes (subducción de placa oceánica continental u oceánica oceánica), sino también con los rifts de tras-arco asociados (Camprubí y Albison, 2006), como posiblemente sucedió en el Neógeno del SE peninsular.

El término epitermal, se refiere a depósitos minerales formados a partir de fluidos hidrotermales con temperaturas $<320^{\circ}\text{C}$ y a niveles corticales someros, de 1 a 2 km. Son yacimientos de metales preciosos, como Au y Ag en diferentes proporciones, y en algunos casos con subproductos de Pb, Zn, Cu, Bi, As, Sb, Hg, Se, Te, Ga, Ge, In, Ti, Mo, Cd, Sn, entre otros, con asociación temporal y espacial a centros volcánicos (Espinoza. 2020).

En la literatura tradicionalmente se ha distinguido dos tipos principales de depósitos epitermales: ácidos y alcalinos (Sillitoe, 1977). El primer tipo de depósito es el llamado de enargita-oro, alunita-caolinita, ácido-sulfato, o de alta sulfuración (high-sulfidation epithermal deposit). El segundo tipo recibe el nombre de depósito epitermal de adularia-sericita o de baja sulfuración (low-sulfidation epithermal deposit). La denominación de los términos alta sulfuración y baja sulfuración fue propuesta por Hedenquist (1987) en base al estado de oxidación-reducción (o sulfuración) del azufre en los fluidos de sistemas geotérmicos actuales, equivalentes por origen a los depósitos fósiles de uno y otro tipo. El primer tipo se originaría a partir de fluidos de carácter oxidado y ácido (azufre en estado de oxidación +6 o +4, o sea, “alta sulfuración”, en forma de SO_4^{2-} o SO_2), típicos de fuentes termales ácidas próximas a volcanes; el otro tipo, en cambio, se originaría a partir de fluidos reducidos y de pH aproximadamente neutro (en los que el azufre se presenta con su estado de oxidación de -2, esto es, “baja sulfuración”), como los hallados en sistemas geotérmicos más o menos distales a la fuente de calor principal. Actualmente se ha introducido el término de depósitos epitermales de sulfuración intermedia. Estos depósitos son estructuralmente muy similares a los de baja sulfuración, aunque las características geoquímicas de los fluidos mineralizantes asociados y de las mineralizaciones metálicas en sulfuración intermedia suele guardar una mayor afinidad con los depósitos de alta sulfuración (Camprubí y Albison, 2006)

Camprubí y Albison (2006) plantean un esquema de composición mineralógica en función del pH de las soluciones mineralizantes (Figura 5) tomando como referencia el modelo Corbett y Leach, (1998) y Camprubí *et al.*, (2003.)

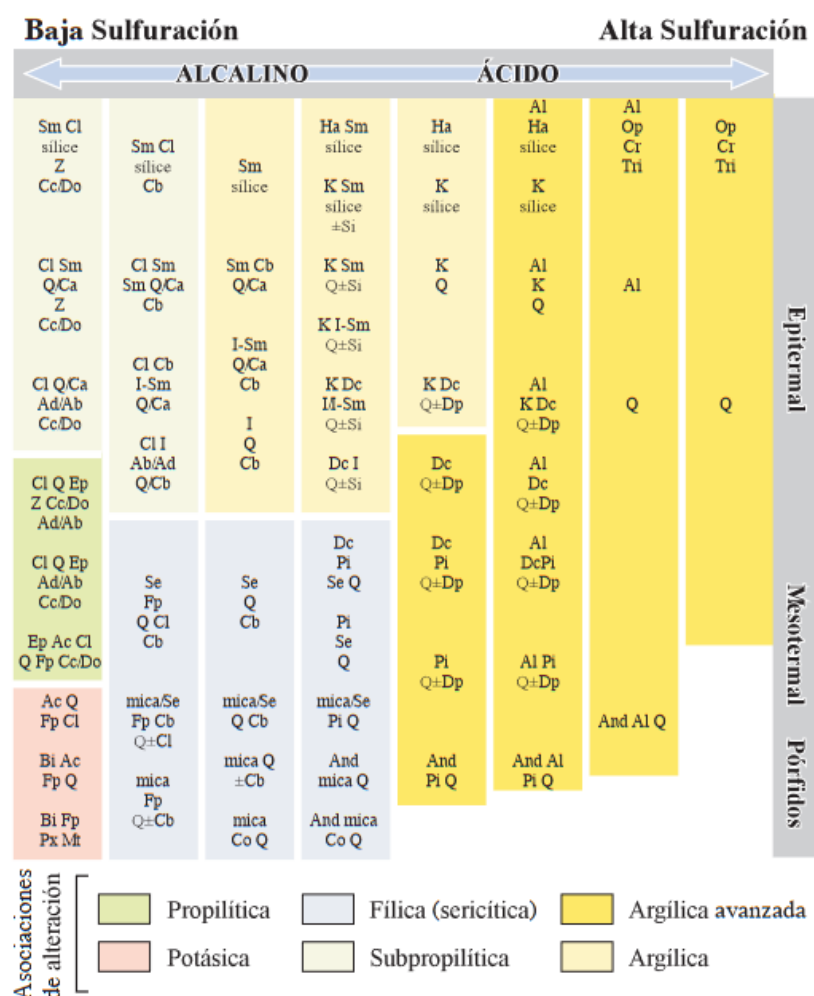


Figura 5: Esquema de la composición mineralógica de las alteraciones hidrotermales asociadas a la formación de depósitos minerales epitermales, mesotermiales y porfídicos, según el pH de las soluciones mineralizantes (modificado y simplificado de Corbett y Leach, 1998). Abreviaciones: Ab = albita, Ac = actinolita, Ad = adularia, Al = alunita, And = andalucita, Bi = biotita, Ca = calcedonia, Cb = carbonatos (de Ca, Mg, Mn y/o Fe), Cc = calcita, Cl = clorita, Co = corindón, Cr = cristobalita, Dc = dickita, Di = diápora, Do = dolomita, Ep = epidota, Fp = feldespatos potásicos, Ha = halloysita, I = illita o illita-esmectita, K = caolinita, Mt = magnetita, Op = ópalo o sílice opalina, Pi = pirofilita, Px = clinopiroxenos, Q = cuarzo, Se = sericita, Si = siderita, Sm = esmectita o esmectita-illita, Tri = tridimita, Z = zeolitas (de menor a mayor temperatura: natrolita, chabazita, mordenita, heulandita; laumontita; wairakita). Tomado de Camprubí y Albison, (2006).

En la mayoría de los casos, los depósitos epitermales están relacionados de forma espacial y temporal con vulcanismo subaéreo, de carácter ácido a intermedio, pudiendo el basamento ser de cualquier tipo. Existen algunas excepciones donde los depósitos epitermales están asociados a vulcanismo básico, de afinidad alcalina o shoshonítica. En Europa la mayoría de los depósitos epitermales de relevancia están ubicados en los Cárpatos, tectónicamente asociados al cierre del Tetis durante la orogénesis Alpina (Camprubí y Albison, 2006).

El caso del depósito de Rodalquilar es un caso típico, primer ejemplo documentado de mineralización de oro epitermal relacionada con una caldera en

Europa (Arribas *et al.*, 1995). En Rodalquilar, las rocas volcánicas calco-alcalinas experimentaron una extensa alteración hidrotermal que dio lugar a la formación de nuevos minerales de alta a baja temperatura como sílice, alunita, caolinita, montmorillonita y clorita. Dos estilos de mineralización están asociados con esas zonas de alteración, como los minerales de Au-(Cu-Te-Sn) de alta sulfuración y la mineralización en vetas de cuarzo de Pb-Zn-(Cu-Ag-Au) de baja sulfuración (Bedini, 2019).

En Sierra Almagrera, al noreste de la zona de estudio, tanto los depósitos de plomo-plata como los auríferos del Mal Paso, según Navarro (2015) se pueden clasificar como de “sulfuración intermedia”, entendiéndose por ello al carácter alcalino o próximo a la neutralidad de los fluidos que los originaron, aunque presentan también características geoquímicas y mineralógicas que los relacionan con los depósitos de alta sulfuración, como los de Rodalquilar.

1.4 Indicios de mineralización en la región de estudio.

Los sistemas hidrotermales asociados al Complejo Volcánico de Cabo de Gata han generado importantes mineralizaciones de interés económico cuyo beneficio ha dejado una marcada impronta en la historia y en el paisaje de este territorio (Braga, 2007). Sin dudas, los yacimientos más célebres son los de oro de Rodalquilar, Los Alemanes Nuevos y Palai Islica, que se encuentran ubicados al SO del área de estudio y están asociados magmatismo calco- de menas metálicas como las de plomo y zinc, cobre o manganeso también han sido explotadas en zonas aledañas. Estas mineralizaciones forman parte de un arco metalogénico, cuyos extremos se pueden situar en la Sierra de Cartagena-La Unión por Levante y el Cabo de Gata por el oeste, comprendiendo los distritos mineros ante citados y los de Las Herrerías-Sierra Almagrera, Mazarrón y Rodalquilar, la mayoría con indicios de haber sido explotados desde épocas pre-romanas.

También asociadas a estos sistemas del complejo volcánico Cabo de Gata se han generado otras mineralizaciones no metálicas de interés comercial. Las bentonitas son actualmente las más importantes, aunque en el pasado también se explotó alunita, mineral (sulfato de aluminio y sodio o potasio) que se concentra en filones cortando la roca volcánica alterada (Braga, 2007).

El Mapa Metalogénico de Andalucía (1:400 000), muestra mineralizaciones de Fe, Cu, Pb, Zn y Sb, en Sierra de Cabrera, asociado al sistema de Falla de Carboneras, sin embargo, en la actualidad, según el portal andaluz de minería(<https://www.juntadeandalucia.es/portalandaluzdelamineria>) en la zona no existe actividad minera extractiva (Figura 6).

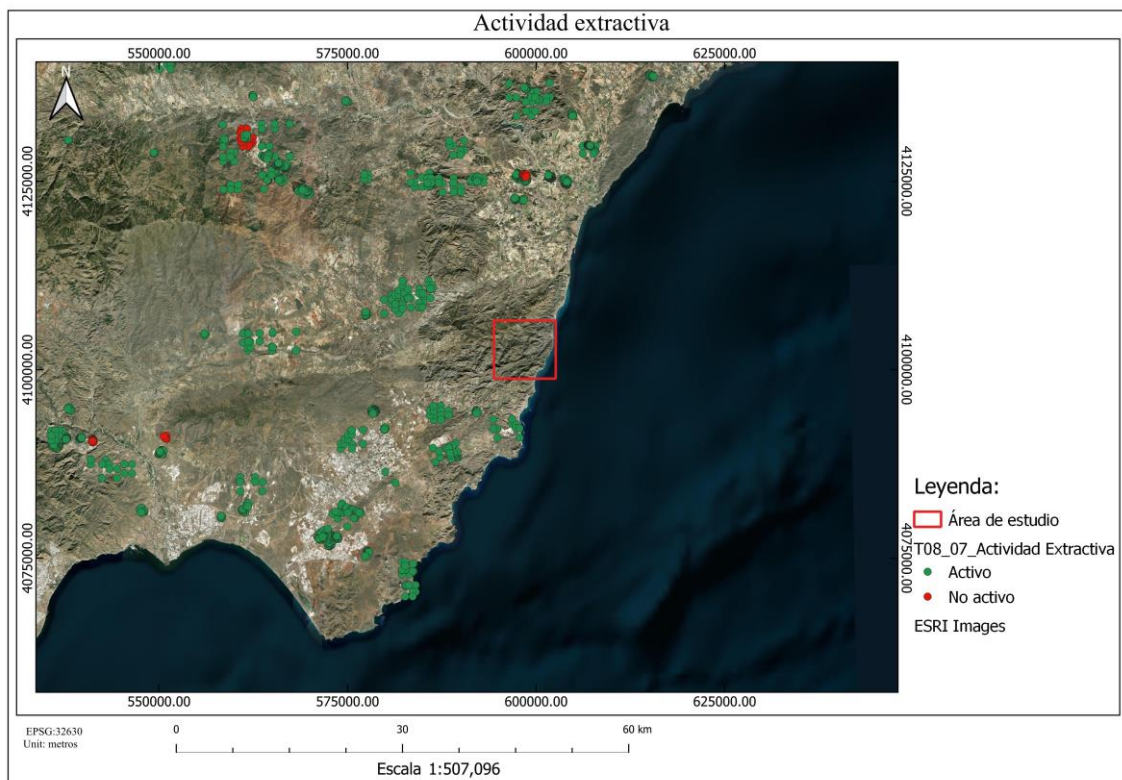


Figura 6: Actividad extractiva en Andalucía. Fuente: Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (<https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia>). Elaboración propia.

CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE: IMÁGENES ASTER.

En este capítulo se abordan las particularidades de la plataforma satelital ASTER y se exponen cuáles han sido las técnicas de procesamiento de imágenes ASTER que mejores resultados han brindado para la caracterización de las zonas de alteración hidrotermal. Se hace especial énfasis en aquellas técnicas aplicadas con éxito en el cercano depósito de Rodalquilar. También se abordan las características espectrales de los principales minerales de alteración hidrotermal.

2.1 Características del sensor ASTER

ASTER (The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) surge como un proyecto de colaboración entre la NASA y el Ministerio de Comercio Economía e Industria de Japón (METI). Se lanzó en el año 1999 con el objetivo de mejorar el entendimiento de los procesos a escala local y regional que ocurren sobre o cerca de la superficie de la Tierra y en la atmósfera inferior, incluyendo la interacción superficie-atmósfera.

La plataforma de satélite ASTER presenta una órbita heliosincrónica a 705 kilómetros de la superficie de la Tierra, con un ciclo de repetición de 16 días, un ancho de barrido de 60 kilómetros (Abrams y Yamaguchi, 2019). Está compuesto por 3 subsistemas: bandas del espectro visible e infrarrojo cercano (VNIR), bandas del infrarrojo de onda corta (SWIR) y las bandas térmicas de longitudes de ondas más largas (TIR). La tabla 1, muestra las distintas características espectrales, radiométricas y espaciales de cada una de las bandas que componen a la plataforma ASTER.

Tabla 1: Características espectrales, radiométricas y espaciales de la plataforma ASTER. Tomado de Vargas, (2013).

Subsistema	Número de Bandas	Rango Espectral (µm)	Resolución Espacial (m)	Resolución radiométrica
VNIR	1	0.52 - 0.60	15 m	8 bits
	2	0.63 - 0.69	15 m	8 bits
	3 N	0.78 - 0.86	15 m	8 bits
	3 B	0.78 - 0.86	15 m	8 bits
SWIR	4	1.600 - 1.700	30 m	8 bits
	5	2.145 - 2.185	30 m	8 bits
	6	2.185 - 2.225	30 m	8 bits
	7	2.235 - 2.285	30 m	8 bits
	8	2.295 - 2.365	30 m	8 bits
	9	2.360 - 2.430	30 m	8 bits
TIR	10	8.125 - 8.475	90 m	12 bits
	11	8.475 - 8.825	90 m	12 bits
	12	8.925 - 9.275	90 m	12 bits
	13	10.25 - 10.95	90 m	12 bits
	14	10.95 - 11.65	90 m	12 bits

Un principio básico en la teledetección es conocer que cada mineral presenta características propias de absorción, transmisión y reflexión de la energía en determinadas longitudes ondas del espectro electromagnético, esto es conocido como firma, curva o “signatura espectral”.

Los espectros de reflectancia se han utilizado durante muchos años para obtener información sobre la composición de la superficie terrestre. La reflectancia espectral en visible e infrarrojo cercano ofrece una técnica rápida y económica para determinar la mineralogía de muestras y obtener información sobre su composición química. Según Tangestani, (2008), los minerales comúnmente muestran características de absorción intensa debido a procesos electrónicos en metales de transición como Fe, y a los procesos de vibración molecular en minerales que contienen hidroxilo y carbonato. Muchos minerales arcillosos como caolinita, montmorillonita, dickita y alunita muestran una intensa absorción entre 2,1 y 2,4 μm debido a las vibraciones de Al-OH, Fe-OH y Mg-OH, y una reflectancia máxima de aproximadamente 1,6 μm (Sabins, 1999). Los minerales comunes del grupo de los carbonatos como la calcita, la magnesita y la dolomita también presentan bandas de absorción a 2,35 μm (Tangestani, 2008). La Figura 7 muestra las firmas espectrales de algunos de los minerales más comunes en zonas de alteración hidrotermal: moscovita, caolinita, alunita, epidota, calcita y clorita.

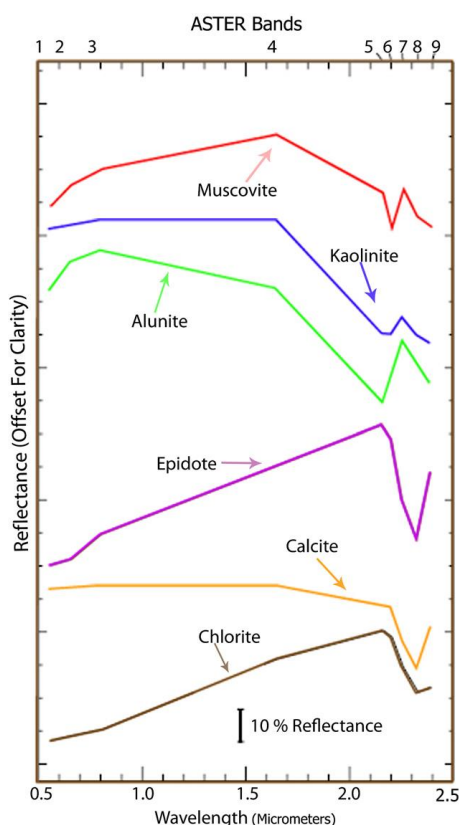


Figura 7: Firmas espectrales de minerales de alteración hidrotermal: moscovita, caolinita, alunita, epidota, calcita y clorita remuestreados en pasos de banda ASTER. Tomado de Pour y Hashim (2012).

Las bandas espectrales 4, 5, 6 y 7 de ASTER son utilizadas para diferenciar la alteración fílica o sericítica y la argílica. La amplia zona fílica se caracteriza por illita/moscovita (sericita) que produce una intensa característica de absorción de Al-OH centrada en 2,20 μm , coincidiendo con la banda 6 de ASTER. La zona argílica más estrecha incluye caolinita y alunita, que en conjunto muestran una característica de absorción secundaria de Al-OH a 2,17 μm que corresponde con la banda 5 de ASTER. Los conjuntos minerales de la zona propilítica, incluyen epidota, clorita y calcita, todos los cuales exhiben características de absorción

situadas a 2,35 μm , que coinciden con la banda 8 de ASTER (Pour y Hashim, 2012). Las bandas TIRS (10-14) son especialmente útiles para las zonas de alteración sílica y los carbonatos, siendo los índices de Ninomiya (2004) los más empleados.

2.2 Principales estudios sobre alteraciones hidrotermales mediante imágenes ASTER

Los principales estudios de alteraciones hidrotermales mediante imágenes ASTER se han concentrado en zonas de áridas y desérticas donde las rocas y suelos quedan expuestos en la superficie, condiciones ideales para la aplicación de teledetección. Debido a las extensiones de los depósitos de pórfido de cobre y su valor económico, las alteraciones hidrotermales más estudiadas mediante ASTER han estado asociadas a estos. Hasta el presente, los estudios en Irán dominan la literatura (Abrams y Yamaguchi, 2019). Irán alberga el mayor número de depósitos de pórfido de cobre encontrados hasta ahora; los depósitos están ubicados en paisajes áridos y desérticos donde la cobertura vegetal es mínima y hay una amplia gama de minerales de alteración, ya que la erosión ha cortado a diferentes profundidades los sistemas de pórfido de cobre individuales, exponiendo zonas de alteración desde potásica y fílica hasta propilítica y argílica. Esto hace que muchas técnicas de procesamiento y análisis de imágenes ASTER como los índices espectrales, el Análisis de Componentes Principales (Cròsta y Moore, 1989), *Spectral Angle Mapper "SAM"* (Kruse *et al.*, 1993), *Mixture Tuned Matched Filtering "MTMF"* (Boardman, 1998) y otras, hayan sido aplicadas con éxito en Irán por Tangestani, (2008) Pour y Hashim (2012), Safari *et al.*, (2017), entre otros.

Los depósitos de pórfidos en Sudamérica: Chile, Perú y Argentina también han sido estudiados por Sabins (1999); Tomasso y Rubinstein (2007); Testa *et al.*, (2018), pero en menor medida que los depósitos iraníes. En China las imágenes ASTER también se han empleado con éxito en la determinación de alteraciones asociadas a depósitos de cobre porfídico (Chen *et al.*, 2021; Dai *et al.*, 2017), pero los últimos estudios (Zhang *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2022) se han centrado en calibrar los resultados con ASTER en comparación con los satélites hiperespectrales de fabricación china GF5 y ZY1-02D.

Después de los pórfidos cupríferos, las alteraciones asociadas con los depósitos de oro han sido las más investigadas, fundamentalmente en Egipto, donde el principal objetivo ha sido desarrollar métodos para identificar nuevos depósitos (Abrams y Yamaguchi, 2019). Recientemente diferentes algoritmos de aprendizaje automático de "Machine Learning" se han utilizado en la región. Aboelkhair *et al.*, (2021) combina imágenes ASTER con datos geofísicos, aplica: relaciones entre banda, *Minimum Noise Fraction (MNF)*, la técnica de Cròsta, *Constrained Energy Minimization (CEM)* y el Parámetro F a los datos radiométricos, esto permiten discriminar diferentes unidades litológicas y delinear zonas de alteración hidrotermal.

La cartografía geológica y la identificación de rasgos estructurales a escala regional ha podido ser estudiada también mediante imágenes ASTER en Omán (Rajendran *et al.*, 2011, Rajendran y Nasir ,2014), Egipto (Amer *et al.*, 2010), India (Parakha *et al.*, 2016; Guha, 2014), Tibet (Ninomiya y Fu, 2016), Marruecos

(Adiri, 2018; El Janati, 2014), Irán (Nasiri y Arfania 2017). En este sentido, la adición del MDE en el conjunto de datos de entrada mejora la precisión de la clasificación de dominios geológicos, pues el MDE puede resultar un indicador estructural y litológico, dado que cada tipo de roca en dependencia de su resistencia relativa a la erosión presenta características topográficas diferentes Abdeen *et al.*, (2009), Parakha *et al.*, (2016), son algunos de los autores que utilizan esta combinación. De igual manera, los datos geofísicos aeromagnéticos, gravimétricos y radiometría espectral, muestran muy buenos resultados en conjunto con las imágenes ASTER (Aboelkhair *et al.*, 2021; El Galladi *et al.*, 2022; El Raouf, *et al.*, 2023)

Cardoso-Fernandes *et al.*, (2020), resaltan que las aplicaciones de las imágenes ASTER pueden incluir la investigación de depósitos de mineral de hierro, sulfuros masivos volcanogénicos (VMS), depósitos alojados en skarn, depósitos de cromita, de uranio, exploración de elementos de tierras raras (REE), depósitos de sales y evaporitas, depósitos de pórfido de molibdeno, de zinc-plomo (Zn-Pb), y en la exploración de diamantes, bauxita y litio.

En cuanto a cobertura de análisis, un caso particular es Australia. En 2012 la Organización de Investigación Científica e Industrial de la *Commonwealth* de Australia (CSIRO, por sus siglas en inglés) publicó una serie de mapas de minerales de toda Australia, elaborados a partir de cientos de imágenes hiperespectrales e imágenes ASTER. Estos fueron descritos por Cudahy (2016).

A modo de resumen, se pueden definir cinco tipos de algoritmos para extraer información espectral de los datos ASTER: (i) métodos basados en relación de bandas, índices y operadores lógicos; (ii) componentes principales (PCA) y métodos basados en mejoras, como Minimum Noise Fraction (MNF); (iii) algoritmos basados en ajuste de forma como Spectral Angle Mapper (SAM), Matched-Filtering (MF) y MixtureTuned Matched-Filtering (MTMF), (iv) métodos de desmezcla parcial como Linear Spectral Unmixing (LSU) y Constrained Energy Minimization (CEM) y (v) métodos que aplican Machine Learning como Random Forest (RF), *Support Vector Machine* (SVM), y el Fuzzy Inference System (FIS), por solo citar algunos. En esta investigación se aplicarán los cuatro primeros conjuntos de métodos.

En cuanto a los métodos basados en relación de bandas, índices y operadores lógicos, existen un gran número de combinaciones y posibilidades de aplicarlos. La tabla 2 resume los más utilizados según el tipo de alteración.

Tabla 2: Índices espectrales más comunes. Fuente: Elaboración propia. Modificado de Kalinowski y Oliver, (2004), Van de Meer et al., (2012), Pour y Hashim (2012), Ninomiya (2004).

Características	Bandas o Ratios	Comentarios
Hierro		
Hierro férrico, Fe ³⁺	2/1	
Hierro ferroso, Fe ²⁺	5/3 + 1/2	
Laterita/Alteración	4/5	
Gossan	4/2	

Silicatos ferrosos (biot, chl, amph)	5/4	Alteración de óxido de Fe, Cu-Au
Óxidos férricos	4/3	Puede ser ambiguo
Carbonatos / Minerales Máficos		
Carbonato / Clorita / Epidota	(7+9)/8	Alteración propilítica
Epidota / Clorita / Anfíbol	(6+9)/(7+8)	Endoskarn
Clorita	(5+7)/8	Díaz (2012) y González (2012)
Anfíbol / MgOH	(6+9)/8	Puede ser otro MgOH o carbonato
Anfíbol	6/8	
Dolomita	(6+8)/7	
Carbonatos (Cl)	13/14	Exoskarn (cal/dolom)
Índice de Calcita (CLI)	(6/8) x (9/8)	
Índice de Minerales de alteración OH (OHI)	(7/6) x (4/6)	
Silicatos		
Sericita / Muscovita / Illita / Esmeclita	(5+7)/6	Alteración fílica
Alunita / Caolinita / Pirofilita	(4+6)/5	Alteración argílica avanzada
Alunita	(4+7)/5	Díaz (2012) y González (2012)
Índice de Alunita (ALI)	(7/5)x(7/8)	(Ninomiya, 2004). Alteración argílica avanzada (Pirajno 2009)
Fengita/Host Rock	5/6	
Muscovita	7/6	
Caolinita	7/5	Aproximadamente
Caolinita ₂	(4+7)/6	Díaz (2012) y González (2010)
Índice Caolinita (KLI)	(4/5) x (8/6)	(Ninomiya, 2004) Alteración argílica avanzada (Pirajno 2009)
Arcillas	(5x7)/(6 x 6)	
Silica		
Rocas ricas en cuarzo	14/12	
Basic Degree Index (gnt, cpx, epi, chl), (SI)	12/13	Exoskarn (gnt, px)
SiO ₂	13/12	Igual que 14/12
Siliceous Rocks	(11x11)/(10x12)	Quartz Index (QI) (Ninomiya, 2004)
Silica 1	11/10	
Silica 2	11/12	
Silica 3	13/10	
Otros		
Vegetación	3/2	
NDVI	(3-2)/(3+2)	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Las composiciones de falso color se utilizan para resaltar las características espectrales de las bandas o ratios de bandas, de forma tal que sea más fácil su identificación por el profesional a cargo. La Tabla 3 muestra algunas de las combinaciones de falso color más empleadas en la literatura.

Tabla 3: Combinaciones de falso color utilizadas para identificar alteraciones hidrotermales mediante imágenes ASTER. Modificado de Kalinowski y Oliver, (2004), Van de Meer et al., (2012), Tommaso y Rubinstein, (2007)

Características	Red	Green	Blue	Comentarios
Vegetación y Bandas visibles	3, 3/2, or NDVI	2	1	Equivalente a Landsat RGB (432)
Minerales AIOH / Alteración argílica avanzada	5/6 (phen)	7/6 (musc)	7/5 (kaol)	Alunita/Pirofilita, Mica, Caolinita/Dickita
Arcilla, Anfíbol, Laterita	(5x7)/(6x6) (clay)	6/8 (amph)	4/5 (lat)	
Gossan, Alteración, Host Rock	4/2 (goss)	4/5 (alt)	5/6 (host)	
Gossan, Alteración, Host Rock	6 (goss)	2 (alt)	1 (host)	
Decorrelation Stretch	13	12	10	
Silica, Carbonate, Basic Degree Index (Carb)	(11x11)/10/12 (silica)	13/14 (carb)	12/13 (basic)	
Silica, Carbonato	(11x11)/(10x12) (QI)	13/14	12/13	
Silica	11/10	11/12	13/10	
Discriminación para cartografía	4/1	3/1	12/14	
Discriminación en áreas ricas en sulfuros	12	5	3	
Discriminación 1	4/7	4/1	(2/3) x (4/3)	
Discriminación 2	4/7	4/3	2/1	
Discriminación 3	4	6	8	Tommaso y Rubinstein (2007)
Alteración Silica 1	4/5	4/7	3/1	Testa (2018)
Alteración Silica 2	4/6	4/7	3/1	Tommaso y Rubinstein (2007)

Alteración mineral	4/5	4/6	4/7	Tommaso y Rubinstein (2007)
Silica, Fe ²⁺	14/12	(1/2)+ (5/3)	MNF Band 1	
Características estructurales mejoradas	7	4	2	

Según Pour y Hashim (2012), los algoritmos de operadores lógicos pueden ser más adecuados para detectar zonas fílicas y argílicas sin perturbaciones de los efectos de la vegetación a escala regional. Las técnicas de ajuste de forma y de desmezcla parcial son sólidas y confiables para distinguir minerales específicos y conjuntos de minerales en zonas de alteración hidrotermal a escala de distrito. La integración del operador lógico, los algoritmos basados en ajuste de forma y de desmezcla parcial pueden crear información completa y precisa para las etapas de reconocimiento de la exploración de cobre/oro.

2.3 Antecedentes de uso de teledetección en la región de estudio. Principales técnicas de procesamiento de imágenes aplicadas en Rodalquilar.

En la provincia de Almería, las principales investigaciones mediante Teledetección se han concentrado en Cabo de Gata, en la caracterización de las zonas de alteración hidrotermal y los depósitos epitermales de oro asociados a la caldera de Rodalquilar Arribas *et al.*, (1995), Bedini (2005), Van de Meer *et al.*, (2012), Van der Meer (2018).

A pesar de que Rodalquilar presenta características geológicas propias, su cercanía con el área del presente estudio, su contexto geológico similar y el hecho de que probablemente sea el depósito epitermal de oro más estudiado mediante teledetección, hacen que sea un referente en cuanto a técnicas de procesamiento de imágenes satelitales. Por este motivo, se utiliza como patrón de comparación en la aplicación de las distintas técnicas de procesamiento de las imágenes ASTER en la región de Carboneras.

En Rodalquilar las principales plataformas utilizadas son: Landsat, Sentinel y ASTER, siendo esta última la que mejores resultados brinda en la caracterización de las zonas de alteración debido a su mayor resolución espectral. Investigaciones más recientes Carmona (2022), Abera, (2019), Van der Meer *et al.*, (2018), Contreras (2017), Quan (2010), Bedini *et al.*, (2009) emplean sensores hiperespectrales como HyMap y PRISMA, porque brindan aún mayores posibilidades en la detección y clasificación de las zonas de alteración hidrotermal, aunque las imágenes ASTER ofrecen una mejor cobertura y accesibilidad a la información.

A escala regional, se han utilizado las imágenes Landsat para la cartografía geológica y la distinción de principales las unidades litológicas (Crósta y Moore 1989b; Chen, 2023).

Al igual que sucede en otras regiones, los índices espectrales e imágenes de falso color son empleados de forma preliminar para caracterizar el área. Díaz (2012) y González (2012), utilizan los índices espectrales ASTER: $(b4+b7)/(b5)$ para detectar alunita, $(b4+b7)/(b6)$ para la caolinita, y $(b5+b7)/(b8)$ para la clorita. Bedini (2019) emplea la relación $b14/b12$ para la detección de zonas ricas en cuarzo en Rodalquilar obteniendo resultados muy similares al índice 13/12 (Rowan *et al.*, 2006). Van de Meer *et al.*, (2012) aplica varios índices $b2/b1$, $b4/b3$, $(b4 + b6) / b5$, $b5/b3$, $(b5 + b7)/b6$ para resaltar las zonas de alteración hidrotermal, además realiza una síntesis de los índices espectrales y las distintas combinaciones de falso color que se pueden emplear para la cartografía de dichas zonas, algunos de ellos aparecen recogidos en las tablas 2 y 3.

Según Chen (2023), las imágenes de falso color, por sí solas, no dan buenos resultados en la caracterización litológica, requieren aplicar otras técnicas de procesamiento como: *Enhanced Transformation*, análisis de componentes principales, índices espectrales, extracción de información de textura, transformación IHS, *Spectral Matching (SM)*, *Similarity Index (SI)*, *Spectral Angle Mapper (SAM)*, transformación MNF o NAPC (*Noise-adjust Principal Components Transform*). Además, recomienda el uso de imágenes ASTER e hiperespectrales en conjunto con el modelo digital de elevaciones (MDE), la información geoquímica y los datos geofísicos.

Quan, (2010) combina el análisis de imágenes ASTER con el MDE, los datos hiperespectrales Hymap y ALOS-PALSAR. Las combinaciones de falso color usadas como delimitador litológico son R:4/1, G:3/1, B:12/14. El análisis del terreno muestra que existe una alta correlación de las calizas y la calcarenitas con las zonas de mayor elevación, en el caso de la zona de la Falla Carboneras solo se muestra esta correlación fuerte con las calizas bioclásticas. Además, en su investigación realizan clasificaciones supervisadas utilizando los algoritmos SAM y *Maximum Likelihood Classification*.

En la región de Almería las dos técnicas más empleadas son SAM y Análisis de Componente Principales (ACP.) En el caso de la primera se utiliza de dos variantes: una es usando la librería espectral del USGS para identificar cada mineral y la otra variante es tomando las firmas espectrales de muestras de rocas de la región Carmona (2022), Contreras (2017), Quan (2010). En el caso de los datos hiperespectrales, Van der Meer *et al.*, (2018), utilizan los clasificadores '*QuanTools*' y '*Wavelength Mapper*' en vez de SAM, pues con la identificación de los parámetros de longitud de onda de absorción (profundidad y posición) pueden interpretarse cambios sutiles en la química mineral que se relacionan con facies de alteración y las diferentes etapas del vulcanismo.

El análisis de componentes principales (ACP) es una técnica recurrente en la región por su relativa sencillez y la información que aporta en la interpretación (Díaz, 2010; González. 2012; Rigol y Chica-Olmo, (2005); Chica-Olmo *et al.*, 2002). Dentro de sus diferentes variantes, la técnica de Crósta es la más utilizada, en este sentido, González (2012) compara los distintos ACP: Análisis Componentes Principales Dirigido (ACPD), Análisis de Componentes Principales Selectivo (ACPS) y Análisis de Componentes Principales Orientado a Objetos (ACPOO), usando tanto imágenes Landsat 7 como ASTER, y concluye que no

existen diferencias significativas entre la información aportada por la combinación o cociente de bandas y la generada por las distintas técnicas basadas en el ACP en la región de estudio. Díaz (2012), emplea la técnica de Crósta junto *Decorrelation stretch* y *Density slicing*, los resultados obtenidos son coherentes entre sí y con el mapa de alteración de Arribas et al. (1995) obtenido a partir de datos de campo. Tanto González (2012) como Díaz (2012) emplean las bandas 3,4,5 y 7 (alunita); 3,4,6 y 7 (caolinita), y 1,3,5 y 8 (clorita) para el análisis mediante ACPOO. Esto se debe a que la composición mineralógica de las distintas zonas de alteración descritas en Rodalquilar se deben a un grupo reducido de minerales que domina en cada uno de los cuatro halos de alteración que se observan en superficie. En los núcleos de mayor intensidad hidrotermal, donde se aprecia vuggy silica (alteración silica), domina el cuarzo, en la zona de alteración argilítica avanzada domina la alunita y la caolinita, en la argilítica intermedia la caolinita y en la zona de alteración propilítica la clorita. En el caso de los núcleos de vuggy silica se hace difícil su observación en imágenes con resolución espacial de 30 m, por lo que ambos autores han desestimado su utilización en el análisis.

Diferentes autores Rodríguez-Galiano *et al.*, (2015), Debba *et al.*, (2009), Carranza, (2008), Debba *et al.*, (2005), Rigol *et al.*, (2003), Chica-Olmo *et al.*; (2002) usan imágenes hiperespectrales de alta resolución para establecer modelos predictivos de mineralización, para ello utilizan zonas de entrenamiento con mineralización comprobada y emplean diversas técnicas como: lógica difusa, redes neuronales, SVD, árboles de decisión, SAM, *Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis* (MESMA) para estimar la mineralización. Como información complementaria a los datos satelitales y para una mayor robustez de los algoritmos de clasificación, Rodríguez-Galiano *et al.*, (2015), Rigol *et al.*, (2003), Chica-Olmo *et al.*, (2002) incluyen el MDE, información geoquímica, datos espectrales de campo y geofísica (gravimetría, radiometría, magnetometría).

Capítulo III. Materiales y métodos

El presente capítulo aborda el enfoque metodológico de la investigación, se explican las principales técnicas de procesamiento utilizadas para la identificación de las zonas de alteración hidrotermal en la región de Carboneras mediante el uso de imágenes satelitales ASTER y el Modelo Digital de Elevaciones (MDE).

3.1 Fuente de datos

Los datos usados en esta investigación son:

- Imágenes ASTER. Fuente: Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) perteneciente al Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés).
- Mapa Geológico 1:50 000 (MAGNA 50) Hojas:1031 “Sorbas” y 1032 “Mojácar”. Fuente: Instituto Geológico y Minero de España (IGME)
- Mapa Geológico 1:50 000 (MAGNA 50 Unificado). Fuente: Datos WMS (IGME)
- Modelo Digital de Elevaciones. Fuente: ASTER GDEM. Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>)

Todo el procesamiento se llevó a cabo utilizando el software ENVI (Environment for Visualizing Images) versión 5.3. y el software QGIS versión 3.34.

3.2 Metodología de la investigación

La metodología de trabajo tiene como primer paso la descarga de las imágenes ASTER de la región de estudio, luego se aplicó un preprocesamiento que incluye la calibración radiométrica, corrección atmosférica y normalización de los datos. Posteriormente se realizó el procesamiento de las imágenes con las técnicas identificadas en la revisión bibliográfica y, por último, se definieron las zonas de alteración.

El enfoque metodológico adoptado en esta investigación se puede observar en la Figura 8.

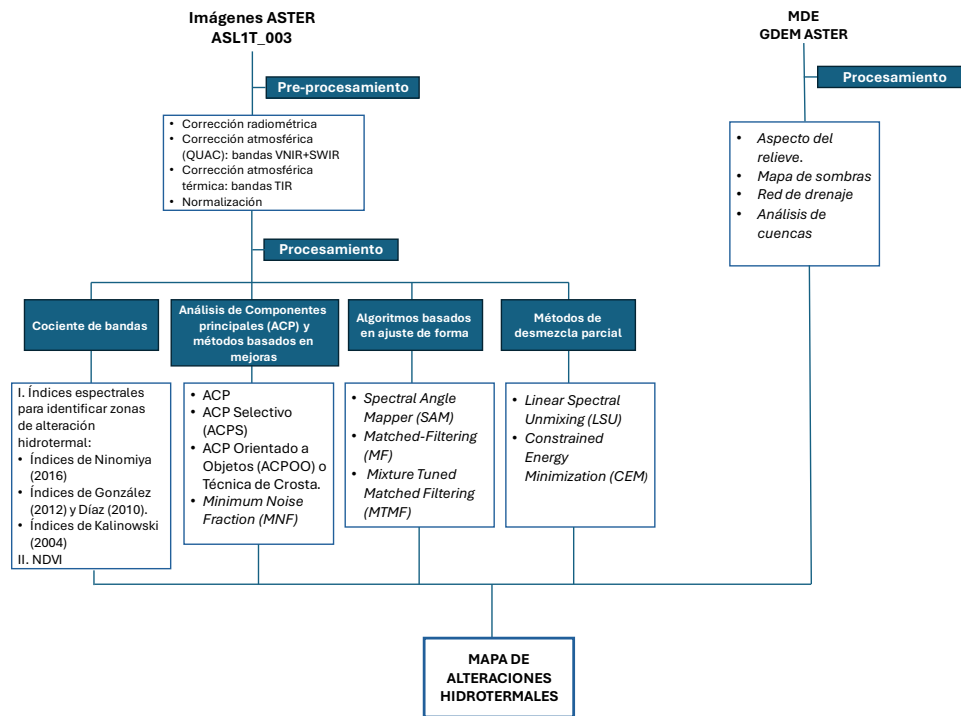


Figura 8: Enfoque metodológico de la investigación

3.2 Preprocesamiento

Para la descarga de las imágenes ASTER se seleccionaron aquellas imágenes que tuviesen la menor cobertura de nubes y que fuesen de época de verano para minimizar el efecto de la vegetación. Las imágenes corresponden a septiembre de 2006 y pertenecen al nivel “ASL1T_003”, lo cual indica que son imágenes ortorrectificadas y que se encuentran en escala de radiancia.

A la imagen ASTER correspondiente al área de estudio, se le aplicó una calibración radiométrica en el programa ENVI v 5.3 para convertir los valores de radiancia a valores de reflectancia mediante la ecuación (1):

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESUN_{\lambda} \sin \theta} \quad (1)$$

Donde: L_{λ} = radiancia aparente de cada banda en unidades $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$, d = distancia Tierra-Sol (en unidades astronómicas); $ESUN_{\lambda}$ = Irradiancia solar en unidades de $W/(m^2 \cdot \mu m)$, θ = Elevación del sol en grados.

A las bandas VIS y SWIR se les realizó la corrección atmosférica *Quick Atmospheric Correction (QUAC)* para eliminar el efecto de la dispersión producida en la atmósfera y en el caso de las bandas TIR se utilizó *Thermal Atmospheric Correction*. Una vez corregidas las bandas, se les aplicó una normalización mediante la ecuación (2):

$$\text{Normalización} = \text{float}((b1 \text{ le } 0) * 0 + (b1 \text{ ge } 10000) * 1 + (b1 \text{ gt } 0 \text{ and } b1 \text{ lt } 10000) * \text{float}(b1/10000.0))$$

(2)

Donde: b1 es la banda a corregir, y los comandos ge means "greater or equal" (i.e. >=), gt means "greater than" (i.e. strictly greater, >), le means "lower or equal" (i.e. <=), lt means "lower than" (i.e. strictly lower, <), escritos en el lenguaje IDL

Esto se realiza para llevar los valores a una escala espectral estándar entre 0 y 1, en el lenguaje de programación de ENVI mediante un script IDL.

3.3 Procesamiento

Procesamiento imágenes ASTER

3.3.1 Cociente de bandas, índices y operadores lógicos

El cociente de bandas se aplica para resaltar espectralmente el material con alta reflectancia. En el numerador se encuentra la banda con el rasgo de alta reflectancia y en el denominador el de alta absorbancia, en consecuencia, se espera que los píxeles más brillantes correspondan al material de interés (Elizalde *et al.*, 2018).

A partir de la información recopilada en la literatura científica (Tabla 2), se calcularon los índices espectrales que permitiesen resaltar no solo las zonas de alteración hidrotermal, sino también unidades litológicas. De igual manera, se aplicaron las distintas combinaciones de falso color (Tabla 3) para resaltar las características espectrales de cada una de ellas.

3.3.2 Análisis de Componentes Principales (ACP) y métodos basados en mejoras (MNF).

Como se mencionó en el capítulo anterior, existen distintas variantes de ACP. Las utilizadas en este trabajo son:

Análisis de Componentes Principales (ACP)

Análisis de Componente Principales (ACP), dígase la “forma clásica”, definida por (Pearson, 1901) y extendida por (Hotelling, 1933). Es un procedimiento matemático ampliamente utilizado en procesamiento de imágenes satelitales que transforma un número de bandas espectrales correlacionadas, en un número menor de bandas espectrales no correlacionadas llamadas componentes principales. La primera componente principal contendrá la mayor varianza espectral del conjunto de datos, en cambio el resto de las componentes contendrá la información restante.

Al igual que en investigaciones anteriores, en esta se utilizaron como datos de entrada las bandas SWIR y VNIR que son las que más resultados aportan en la identificación de alteraciones hidrotermales.

Análisis de Componentes Principales Selectivo (ACPS)

La técnica de ACPS (Chávez y Kwarteng, 1989) es la más fácil de usar de las variantes de ACP, dado que se basa en el estudio de únicamente dos bandas, aquellas que muestren un mayor gradiente en la curva espectral del mineral a estudiar. La información común a ambas bandas quedará reflejada en la CP1, mientras que la CP2 contendrá la información no correlacionable (González, 2012)

En el análisis de componentes principales selectivo se emplearon las relaciones de bandas que muestran un mayor gradiente en la curva espectral de los minerales de alteración: B5 y B7 (alunita), B6 y B7 (caolinita), B5 y B8 (clorita).

Técnica de Crósta o Análisis de Componentes Principales Orientado a Objetos (ACPOO)

La técnica de Crósta (Crósta y Moore, 1989) es la más extendida para la identificación de las zonas de alteración hidrotermal. Se basa en la selección de las bandas que más información aportan sobre un determinado mineral y se les aplica un ACP. Esta técnica se basa en la capacidad de la transformación de componentes principales de detectar cada vez variaciones más pequeñas en la varianza de los datos en sucesivos componentes principales, de forma que los vectores propios son examinados para decidir qué componentes principales concentran la información directamente relacionada con la firma espectral teórica de objetos o materiales específicos (Rigol y Chica-Olmo, 2005)

La técnica de Crósta se empleó de dos formas: la primera, usando la variante descrita por Crósta *et al.*, 2003y aplicada con anterioridad en Rodalquilar por Rigol y Chica-Olmo (2005), la misma utiliza los siguientes juegos de bandas: (1) bandas 1, 3, 5 y 7 para la alunita; (2) bandas 1, 4, 6 y 7 para identificar la caolinita; (3) bandas 1, 3, 5 y 6- Illita; y (4) bandas 1, 4, 6 y 9 para Caolinita+Esmectita. La otra variante es la empleada por González (2012) y Díaz (2012) que analizan las bandas: 3, 4, 5 y 7 (alunita); 3, 4, 6 y 7 (caolinita), y 1, 3, 5 y 8 (clorita), dado que son los minerales más abundantes en las zonas de alteración hidrotermal de Rodalquilar.

Minimum Noise Fraction (MNF)

La transformación de fracción mínima de ruido o *Minimum Noise Fraction (MNF)*, Green *et al.*, (1988); Boardman *et al.*, (1995) se utiliza para determinar la dimensionalidad inherente de los datos de la imagen, segregar el ruido en los datos y reducir los requisitos computacionales para el procesamiento posterior (Pour y Hashim, 2012). La transformación MNF implica dos pasos; primero, lo que también se denomina blanqueamiento de ruido, se calculan los componentes principales de la matriz de covarianza del ruido. Este paso descorrelaciona y reescala el ruido en los datos. En el segundo paso, los componentes principales se derivan de los datos de ruido blanqueados. Luego, los datos se pueden dividir en dos partes: una parte asociada con los autovalores grandes y la otra parte con los autovalores casi unitarios e imágenes dominadas por ruido. El uso de datos con autovalores grandes separa el ruido de los datos y mejora los resultados espectrales (Green *et al.*, 1988).

En el caso de esta investigación, al igual que en Ducart *et al.*, (2005), Pour y Hashim (2012), se aplicó la transformación MNF solamente a las bandas SWIR,

pues son estas bandas las que mejor caracterizan a las rocas con alteración hidrotermal.

3.3.3 Algoritmos basados en ajuste de forma como SAM, MF y MTFM

Spectral Angle Mapper (SAM).

Las técnicas de mapeo espectral cuantitativo, como el método *Spectral Angle Mapper (SAM)* (Kruse *et al.*, 1993), operan comparando los espectros de las imágenes con espectros de referencia, donde los umbrales más pequeños representan un emparejamiento más cercano al espectro de referencia. Fue desarrollado para imágenes hiperespectrales, pero puede usarse en sistemas de menor resolución espectral (Rowan y Mars, 2003). Sin embargo, se deben considerar algunas limitaciones debido a la menor resolución espectral de ASTER. (Tomasso y Rubinstein, 2007)

La técnica SAM ha permitido no solo identificar minerales de alteración hidrotermal en zonas áridas y semiáridas (Tangestani, 2008), sino también en zonas tropicales y subtropicales con abundante vegetación (Galvao *et al.*, 2005), Vargas, (2013).

En la presente investigación, al no contarse con información espectral de rocas de la región de estudio, se empleó la Librería Espectral ASTER “*mineral.jhu.nicolet_2287.lib*” que cuenta con un total de 404 firmas espectrales. Se realizaron dos clasificaciones mediante SAM: una empleando el total de firmas espectrales disponibles en la librería seleccionada y una segunda clasificación (SAM-Dirigido) usando solo las firmas espectrales de los minerales de alteración hidrotermal más abundante. En ambas clasificaciones, se modificaron los parámetros de “ángulo máximo” con el objetivo de obtener la clasificación con menor apertura posible.

Matched-Filtering (MF)

La técnica *Matched-Filtering* o filtro combinado (MF), Harsanyi *et al.*, (1994); Boardman *et al.*, (1995), realiza una separación parcial de espectros para estimar la abundancia de miembros finales “*endmembers*” definidos por el usuario a partir de un conjunto de espectros de referencia. Esta técnica maximiza la respuesta del miembro final conocido y suprime la respuesta compuesta del fondo desconocido, coincidiendo así con la firma conocida (Pour y Hashim, 2012).

Según el criterio de Neyman-Pearson, la estrategia de decisión óptima se puede lograr maximizando la probabilidad de detección manteniendo la probabilidad de falsa alarma por debajo de un cierto valor. Para Geng *et al.*, (2017), MF es uno de los mejores detectores de objetivos desde la perspectiva de máxima verosimilitud.

Se aplicó MF a las bandas SWIR y VNIR, tomando como referencia una selección de minerales (Figura 9) extraídos de la librería espectral “*mineral.jhu.nicolet_2287.lib*”

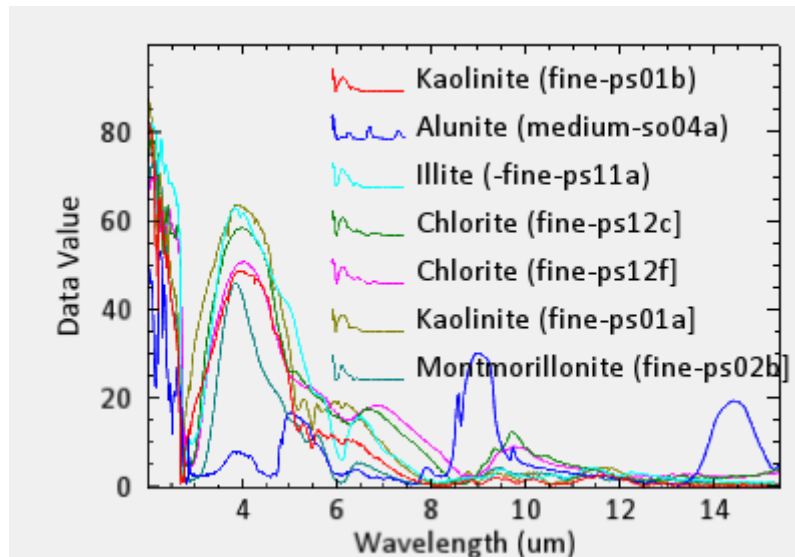


Figura 9: Firmas espectrales de minerales de alteración utilizadas en el análisis MF. Modificado de "mineral.jhu.nicolet_2287.lib", Software ENVI.

Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF).

MTMF es un algoritmo avanzado de separación espectral (Boardman *et al.*, 1995; Boardman, 1998), donde no es necesario que todos los materiales dentro de una escena sean conocidos o que tengan miembros finales identificados. Esta técnica combina los mejores aspectos del método de Separación Espectral Lineal (LSU, por sus siglas en inglés) y el filtro MF, evitando los inconvenientes de los métodos originales. Consiste en un filtro que permite discriminar con mayor eficacia los valores extremos de los espectros, es decir, emparejando los píxeles que no tienen mezclas con ruido.

El método MTMF incluye tres pasos principales: (1) una transformación MNF de datos de reflexión aparente (Green *et al.*, 1988), (2) filtrado combinado (MF) para estimación de abundancia y (3) separación espectral lineal (LSU) para identificar píxeles inviables o falsos positivos (Boardman 1998). La salida de MTMF es un conjunto de imágenes de reglas dadas como MF y puntuaciones de inviabilidad para cada píxel relacionado con cada miembro final Goodarzi *et al.*, (2013).

Los resultados de MTMF se pueden presentar en forma de imágenes en escala de grises con valores entre 0 y 1, los cuales proporcionan un medio de estimar la abundancia mineral, o como mapas en colores mostrando los minerales que predominan espectralmente en cada píxel. (Ducart *et al.*, 2005). El MTMF genera imágenes de abundancia donde los valores más altos pertenecen a las mejores parejas. (Vargas 2013)

En el presente estudio se aplicó MTMF usando la librería espectral "mineral.jhu.nicolet_2287.lib".

3.3.4 Métodos de desmezcla parcial: LSU y CEM

En muy pocas ocasiones un píxel de una imagen está compuesto de un solo material, más bien, es una mezcla de energía reflejada y emitida que no puede

detectarse mediante algoritmos de clasificación simples. Es por esto que surgen las técnicas de clasificación de subpíxeles.

Linear Spectral Unmixing (LSU).

Linear Spectral Unmixing o Separación Espectral Lineal (LSU), (Boardman, 1993) se conoce como muestreo de subpíxeles; donde se supone que la reflectancia en cada píxel de la imagen es una combinación lineal de la reflectancia de cada material (o miembro final) presente dentro del píxel (Pour y Hashim, 2012). Según Boardman *et al.*, (1995) la técnica de LSU no requiere un conocimiento previo del material de fondo.

En la desmezcla espectral de subpíxeles, el espectro medido de un píxel mezclado se descompone en una colección de espectros de constituyentes, o miembros finales, y se determina un conjunto de fracciones o abundancias que representan la proporción de cada miembro final en el píxel. Los miembros finales normalmente corresponden a objetos puros de la escena, como agua, tierra, roca, mineral o cualquier material natural o artificial Hosseinjani y Tangestani (2011)

Se utilizaron como espectros de referencia los seleccionados en la Figura 9.

Constrained Energy Minimization (CEM)

La técnica de *Constrained Energy Minimization* o Minimización de Energía Restringida (CEM), Harsanyi (1993), tiene su origen en la solución del problema típico de formación de haz adaptativo en el procesamiento de señales. El algoritmo CEM es una implementación del método de filtrado combinado (MF) utilizado fundamentalmente en el contexto del análisis hiperespectral, donde se intenta maximizar la respuesta de un espectro objetivo y suprimir la respuesta de las firmas de fondo desconocidas (Pour y Hashim, 2012). Según Gabr *et al.*, (2010) desde su creación, se ha convertido en una de las técnicas más utilizadas en la actualidad para la cartografía de abundancia de objetivos.

Se utilizó la librería espectral “*mineral.jhu.nicolet_2287.lib*” y la elaborada a partir de los minerales típicos de alteración (Figura 9).

Procesamiento MDE

A escala regional, los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) son útiles para cartografiar estructuras geológicas como fallas, valles, cauces de ríos y montañas, lo que contribuye al análisis de procesos erosivos y sedimentarios. También pueden resultar muy útiles en la identificación de zonas de alteración hidrotermal, ya que permiten analizar la morfología del terreno, detectar anomalías topográficas y estructuras tectónicas, como fallas y fracturas, que actúan como vías de circulación de los fluidos hidrotermales. Además, los MDE ayudan a identificar patrones anómalos en el drenaje, pendientes y deslizamientos, lo que facilita la delimitación espacial de las zonas alteradas. Al integrarse con datos espectrales y geofísicos, proporcionan una herramienta precisa y eficiente para explorar y caracterizar estas áreas en terrenos geológicamente complejos.

Los mapas de aspecto del relieve, red de drenaje, análisis de cuencas y mapas de sombras se realizaron mediante el programa informático QGIS v 3.34. El primer paso consiste en rellenar los píxeles sin información interpolando los píxeles aledaños, esto es fundamental para tener una continuidad en los píxeles del mapa y sea posible estimar la dirección de las aguas.

Capítulo IV: Análisis y discusión de los resultados

En este capítulo se presentan los principales resultados obtenidos durante la investigación. Se discute sobre cuales técnicas de procesamiento de imágenes multispectrales fueron las más efectivas para la determinación de las zonas de alteración hidrotermal en el área de estudio. La interpretación de los resultados se centra en la zona de la falla de Carboneras, lugar donde es más probable que se produzcan zonas de alteración debido a que los fluidos hidrotermales tienden a circular por fallas y fracturas.

4.1 Resultados de los índices espectrales

Se estimaron un total de 39 índices espectrales, haciendo especial énfasis en los minerales alunita, caolinita y clorita (Figuras 10, 11 y 12).

Los índices utilizados por Díaz (2012) y Felipe (2012), (Figura 10) no resaltan zonas de alteración hidrotermal con tanta intensidad como en Rodalquilar. La alunita (Figura 10 a) presenta una serie de lineamientos en la falla Carboneras, siendo los más visibles los que se ubican en la región central cuasi paralelos (Anomalías I, II y III). En la región oriental se observa una peculiar anomalía en forma de “Y” invertida. Estos pixeles brillantes en Mácnas también se aprecian en el índice de caolinita (Figura 10 b), en cambio, la clorita es prácticamente imperceptible en esta área. La clorita presenta una dirección Suroeste-Noreste coincidente con los lineamientos estructurales. La composición RGB resalta el predominio de alunita en tonos rojizos y en tonos azules se observa aclorita.

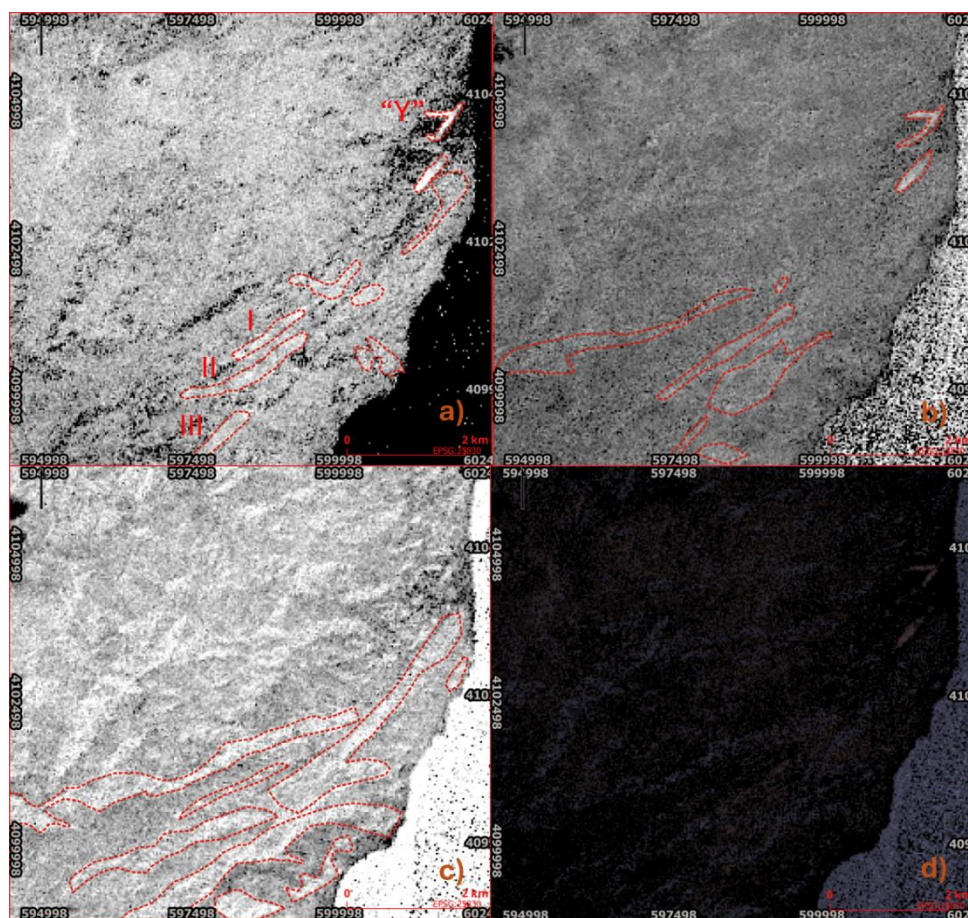


Figura 10: Índices empleados por Díaz (2012) y González (2012). a) Alunita= $(b4+b7)/b5$. Se observan anomalías en dirección SW-NE, tres de las anomalías son paralelas. En la región de Mácnas hay una anomalía en forma de “Y” invertida. b) Caolinita= $(b4+b7)/b6$, algunas de las anomalías son coincidentes con la alunita c) Clorita= $(b5+b7)/b8$,

las anomalías siguen los principales lineamientos d) Combinación RGB= Alunita-Caolinita-Clorita, en rojo zonas con probable acumulación de alunita y en azul de clorita.

Los índices de Ninomiya (2004), actualmente constituyen una referencia obligatoria en la determinación de zonas de alteración hidrotermal y en la caracterización litológica. Las figuras 11 y 12, presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de los índices: alunita (ALI), caolinita (KLI), calcita (CLI), minerales de alteración: montmorillonita (OH_{Ia}) y pirofilita (OH_{Ib}), sílice (SI) y cuarzo (QI).

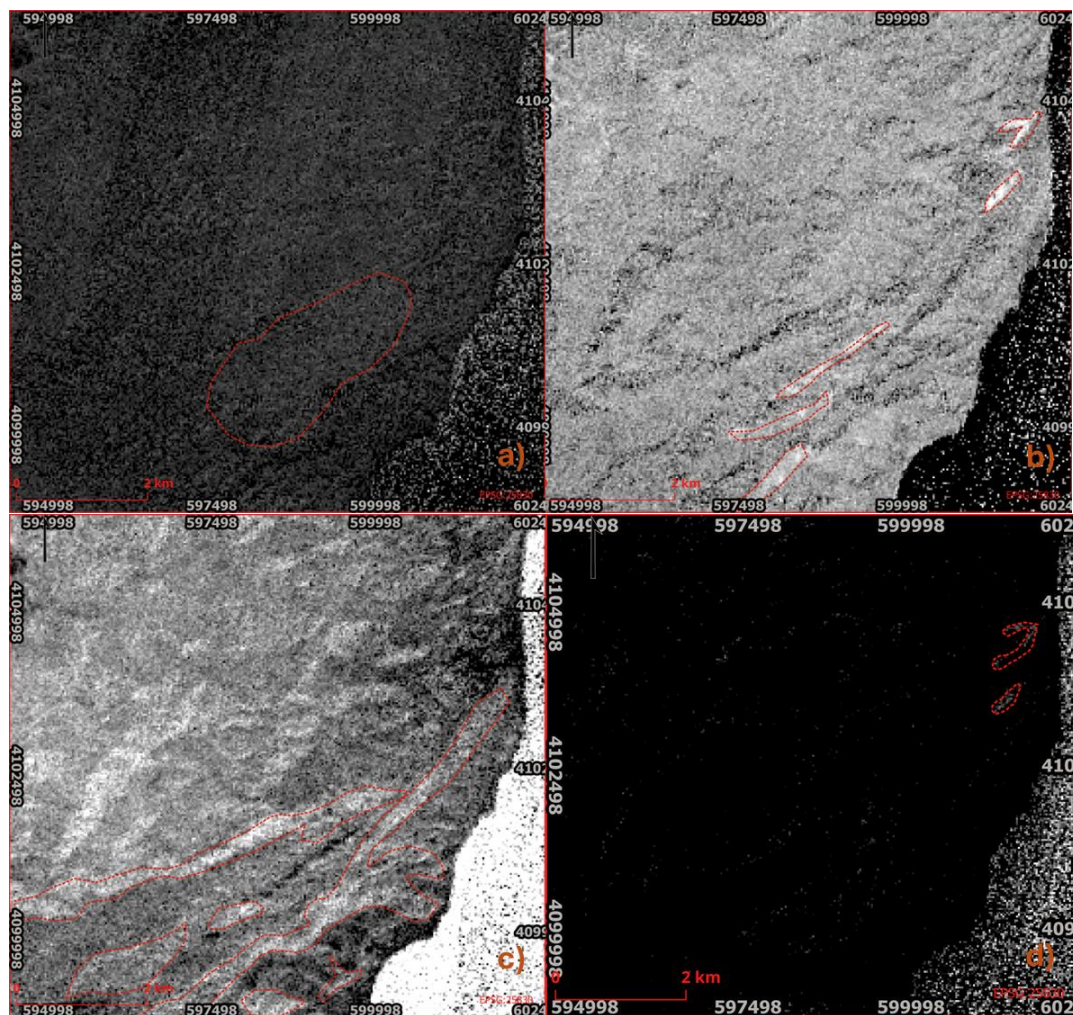


Figura 11: Índices de Ninomiya: a) ALI b) KLI c) CLI d) OH_{Ia}. En figura b), las líneas rojas paralelas de N a S: anomalías I, II y III.

El índice ALI, resulta más complejo de interpretar que el índice empleado por Díaz (2012) y González (2012). No se observan grandes contrastes, ni se puede distinguir la zona de Mácenas, por otro lado, el índice KLI si resalta en Mácenas la anomalía de “Y” invertida, al igual que una franja en dirección suroeste-noreste en las cercanías de El Sopalmo (Anomalía I), que aparece también destacada por el índice OH_{Ib} (Figura 12 a). Otras dos zonas aparecen al sur de Sopalmo (anomalías II y III), el predominio de caolinita y en este caso la disminución de alunita, pueda indicar la presencia de una zona de alteración argílica intermedia en vez de argílica avanzada. En el caso de la calcita (índice CLI) se aprecia una correlación inversa con la caolinita, siendo más marcados los lineamientos estructurales.

Los minerales alteración que contienen hidroxilo (OH^-) pueden ser identificados mediante los índices OHI_a y OHI_b . Por ejemplo, la montmorillonita, presenta un rasgo de absorción profundo y agudo en la región de la banda 6, de igual manera otro mineral hidroxilado, la moscovita, presenta una característica espectral similar. Esto hace que con el índice OHI_a puedan ser identificados estos minerales. En el caso particular de la región de estudio (Figura 11 d) se observa cierta acumulación en anomalía en forma de “Y” invertida en Mácenas. Otro grupo de minerales de hidróxidos alterados que incluye a la pirofilita, tienen un rasgo de absorción profundo y agudo en la región espectral de la banda 5 de ASTER. Para detectar este grupo de minerales se utiliza el índice OHI_b (Figura 12 a). En la Falla Carboneras se observan pequeñas manifestaciones minerales hidroxilados alineadas en dirección SW-NE, y algunas pequeñas manifestaciones en las rocas volcánicas neógenas. Como la caolinita y la alunita, presentan absorción tanto en la banda 5 como en la 6, los índices OHI_a y OHI_b son útiles para discriminar los minerales alterados hidrotermalmente.

El índice SI (Figura 12 b) muestra mayor contenido en la región central y en el extremo suroeste correspondiente al complejo volcánico de Cabo de Gata. El SI se correlaciona con el contenido de SiO_2 en rocas ígneas, pero también es algo sensible a los carbonatos, por esto es probable que en la región al norte de la falla esté señalando la secuencia carbonatada cartografiada en el Mapa Geológico (MAGNA 50).

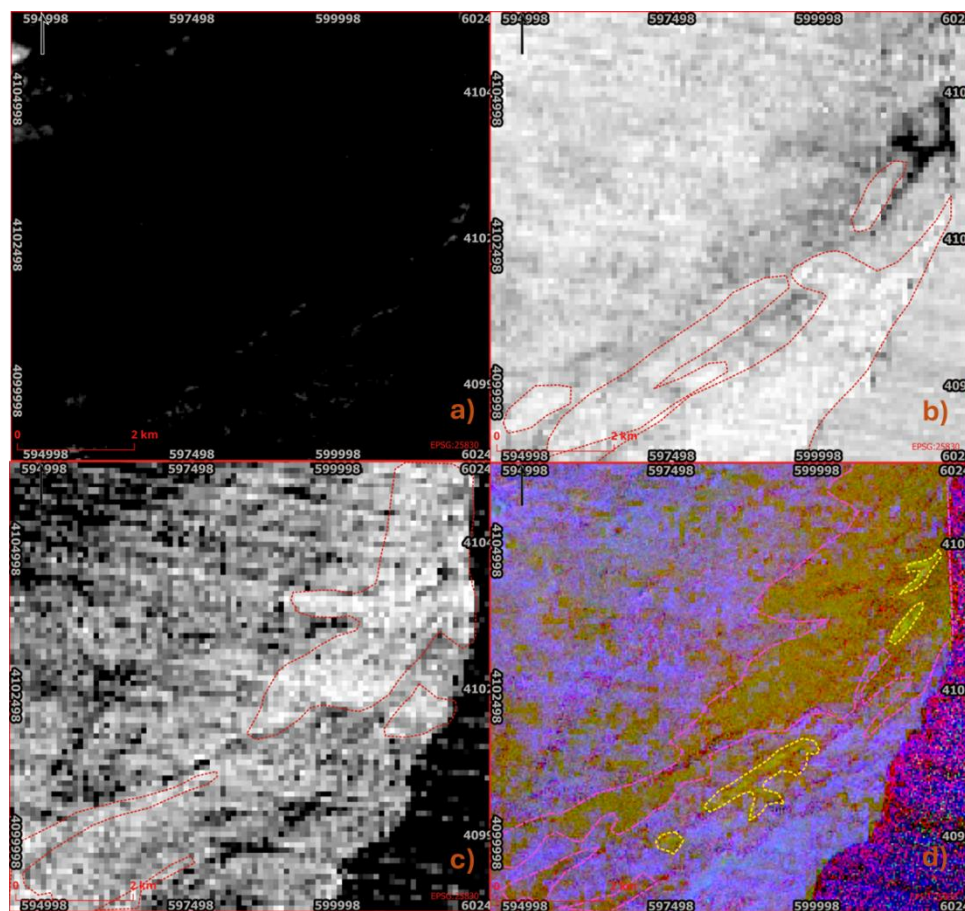
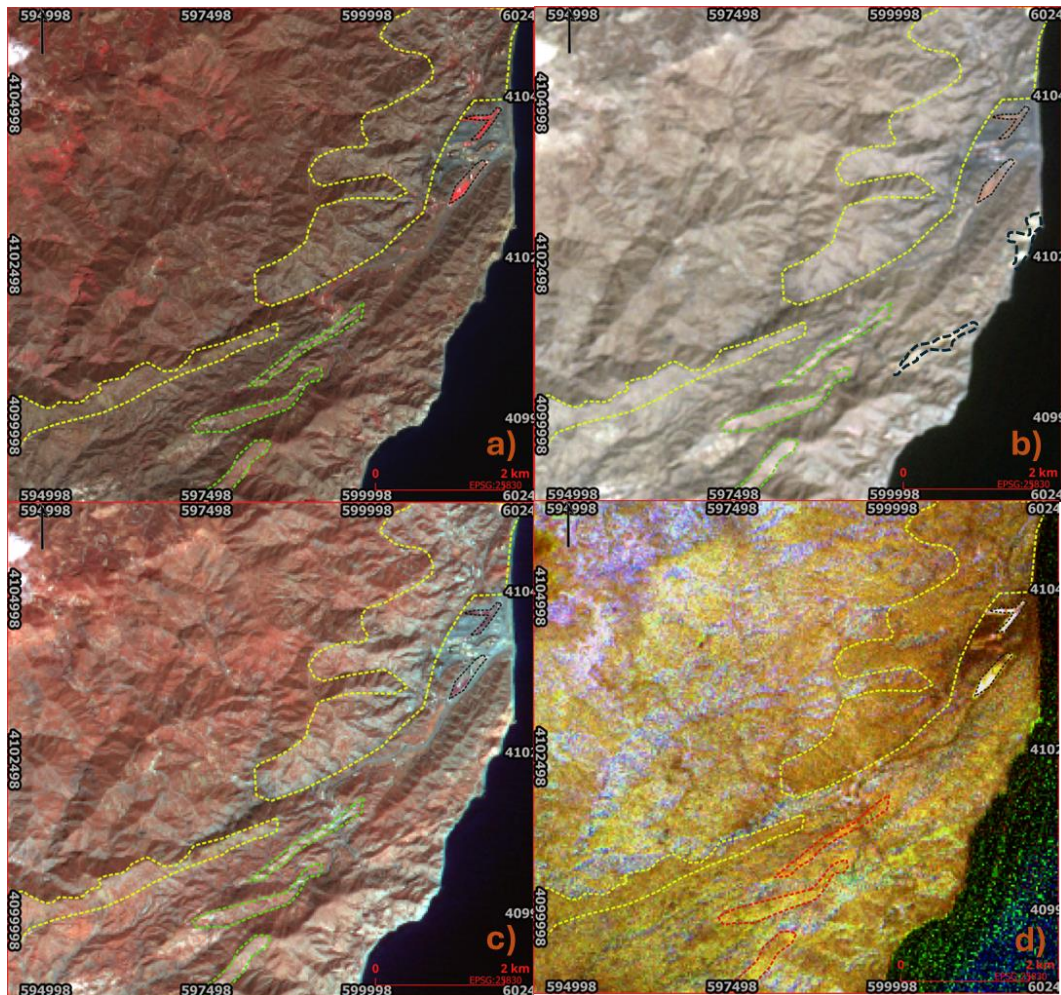


Figura 12: Índices de Ninomiya: a) OHI_b . b) SI c) QI d) RGB: ALI-KLI-SI. En figura d) líneas amarillas en el centro de la falla (dirección SW-NE) corresponden a la anomalía I. Líneas moradas: alteración filica.

El índice QI (Figura 12 c) es sensible principalmente al cuarzo puro o cuarcita, y secundariamente a rocas silíceas (generalmente sedimentarias) que contienen relativamente mucho cuarzo, pero con menor cantidad de feldespato. Además, el mineral de sulfato más común, el yeso, indica un QI especialmente bajo, por lo que sería útil como identificador de yeso (Ninomiya y Fu, 2016). En el extremo oriental de la región es donde se observa mayor contenido del índice QI, esto podría corresponder a una probable zona de alteración fílica, donde el cuarzo es el mineral predominante. La combinación: ALI-KLI-SI muestra en tonalidades amarillas concentraciones de alunita+caolinita (alteración argílica avanzada) y en tonos más verdosos la zona de alteración fílica.

Los índices y combinaciones de falso color mencionadas en las tablas 2 y 3, fueron sumamente útiles para cartografiar las unidades geológicas que componen la región de estudio e identificar zonas de probable alteración hidrotermal. La Figura 13 presenta algunos de los índices propuestos por Kalinowski y Oliver (2004), Van de Meer *et al.*, (2012), Tomasso y Rubinstein (2007)



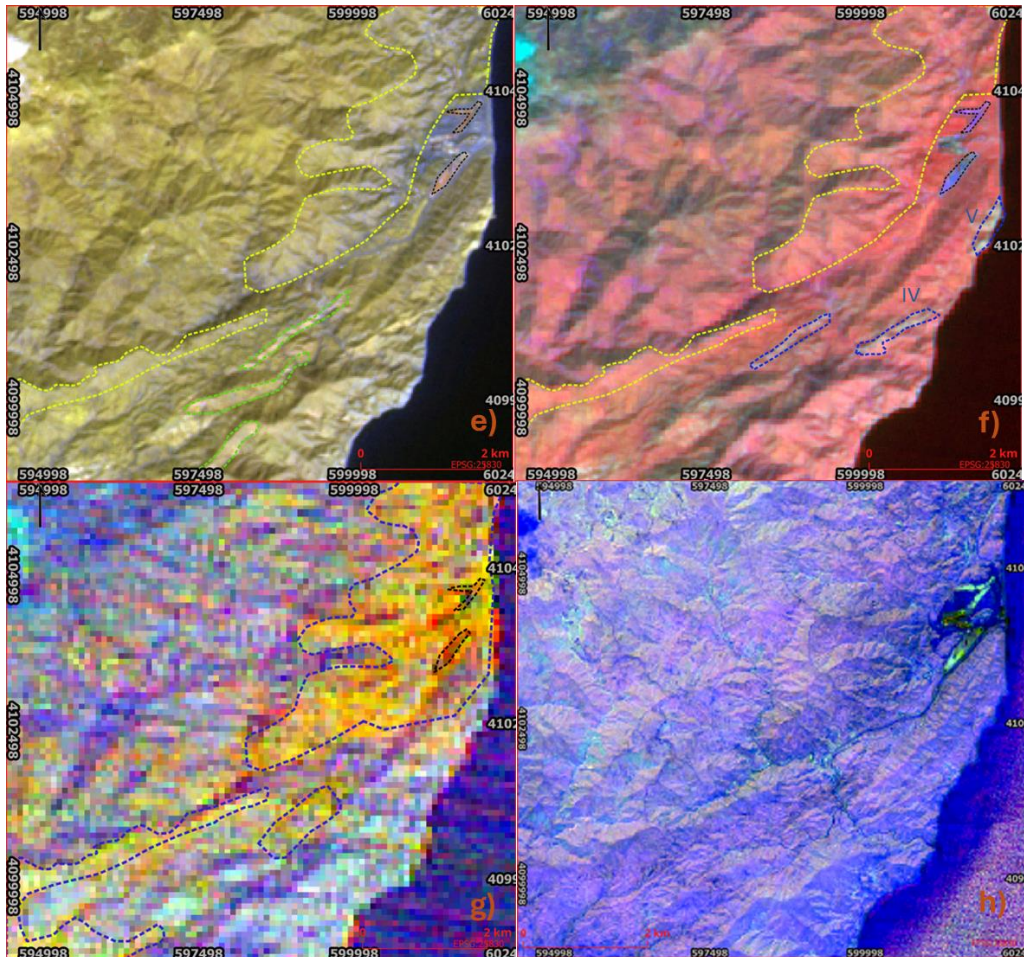


Figura 13: Combinaciones de falso color: a) 3-2-1. b) 4-6-8, c) 6-2-1 d) 4/5- 4/7-3/1, e) 4-6-1, f) 12-5-3 g) QI-13/14-12/13, h) 4/1-3/1-12/14. En figura f) de W a E, anomalías: I, IV y V. En líneas amarillas: alteración filica.

Las combinaciones 3-2-1 y 6-2-1 (Figura 13 a y c), muestran resultados muy similares, ambas señalan en tonos magentas-azulados la zona de silificación en el extremo oriental, también son identificadas en tonalidades más oscuras el área urbana de Mácnas, las ramblas y carreteras cercanas. En la imagen 3-2-1, se aprecia una posible extensión hacia el suroeste de la zona de silificación paralela a la zona de la Falla Carboneras.

La combinación 4-6-8 (Figura 13 b), constituye también una de las combinaciones más utilizadas para identificar zonas de alteración hidrotermal, sin embargo, en el área no resulta un gran identificador si lo comparamos, por ejemplo, con la zona de Rodalquilar. Esto puede resultar un indicador cualitativo de la intensidad de la alteración, no obstante, se logran observar en la zona de Sopalmo (Anomalía I), tonos rojizos muy tenues que coinciden con la alteración argílica avanzada. Otras combinaciones como 4/5- 4/7-3/1 (Figura 13 d) y 4/6-4/7-3/1 que suelen usarse en la cartografía de zonas de alteración hidrotermal, fundamentalmente en pórfidos, no brindan buenos resultados en la región.

La combinación 12-5-3 (Figura 13 f) resulta ser un excelente delimitador. Esta imagen combina las bandas menos correlacionadas y podría destacar la presencia de óxidos de cuarzo y hierro, caolinita y vegetación verde. La banda 12 ayuda a identificar el alto contenido de cuarzo, la banda 5 responde a las variaciones principalmente entre el óxido de hierro y la arcilla, mientras que la banda 3 tiene una respuesta muy baja a los silicatos de Fe-Mg asociados con

las rocas máficas (Bakardjiev y Popov, 2015). En tonos rojizos se ven las zonas con silificación descritas con anterioridad. Pequeñas franjas en color cyan que transicionan a tono oscuros, se aprecian en los lineamientos de la frontera sur de la falla Carboneras. Se observan tres zonas de alta reflectividad en tonalidades amarillo-blanco, una es cercana a Sopalmo (Anomalía I) y dos en el complejo volcánico de Cabo de Gata (Anomalías IV-V). Los carbonatos suelen reflejar bien tanto en la banda 5 (infrarrojo de onda corta) como en la banda 3 (infrarrojo cercano), y pueden emitir en la banda 12 (infrarrojo térmico), lo que da como resultado un color blanco o claro en la imagen. La caolinita y otras arcillas suelen tener una firma espectral distintiva y reflejar en esta tonalidad, tal es el caso de la montmorillinita, que también es visible en ambas zonas mediante el índice OHI_b. En este caso podría abordarse las anomalías IV y V como zonas de alteración argílica moderada o intermedia.

En magenta (Figura 13 f) se aprecian zonas dispersas por toda el área que también pudieran responder a zonas con desarrollo de cuarzo, pues tiene una alta reflectancia en el infrarrojo cercano (banda 3), pero baja reflectancia en el SWIR (banda 5), lo que contribuye a su aparición en tonos morados en esta combinación. Los óxidos de hierro también podrían contribuir a tonos morados debido a su alta respuesta en la banda 12 y en la banda 3, asimismo, zonas con cierto contenido de humedad. Igualmente, estas anomalías aparecen en las combinaciones RGB: (4/1)-(3/1)-(12/14) y 3-2-1 (Figura 13 h y a). Al analizar el NDVI y la combinación 7-3-1 (Figura 14 a y b), se puede definir una correlación entre las anomalías y la vegetación en zonas con mayor contenido de humedad. La rambla en Mácenas y su típica forma de “Y” invertida, presenta las mismas características.

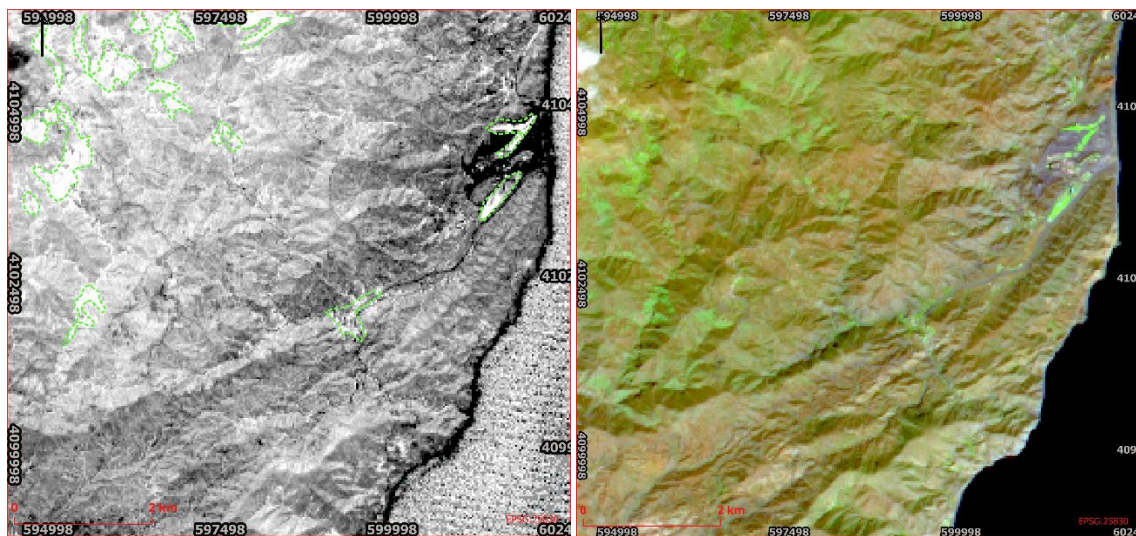


Figura 14: a) Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), en líneas verdes las anomalías correspondientes a la vegetación y b) Combinación RGB: 7-3-1.

La Figura 13 g), correspondiente a la combinación RGB: QI-13/14-12/13, presentan en rojo las zonas más intensas de silificación, y en tonos amarillos y verdes las zonas silificación+carbonatos. En tonos blancuzcos se observan las rocas del complejo volcánico Cabo de Gata, mientras que los carbonatos del noroeste en azul intenso.

Kalinowski y Oliver (2004) recomiendan dos índices que resaltan de manera independiente la alteración fílica (sericita / muscovita / illita / esmectita) y la alteración argílica (alunita/caolinita/pirofilita), (Figura 17 a y b).

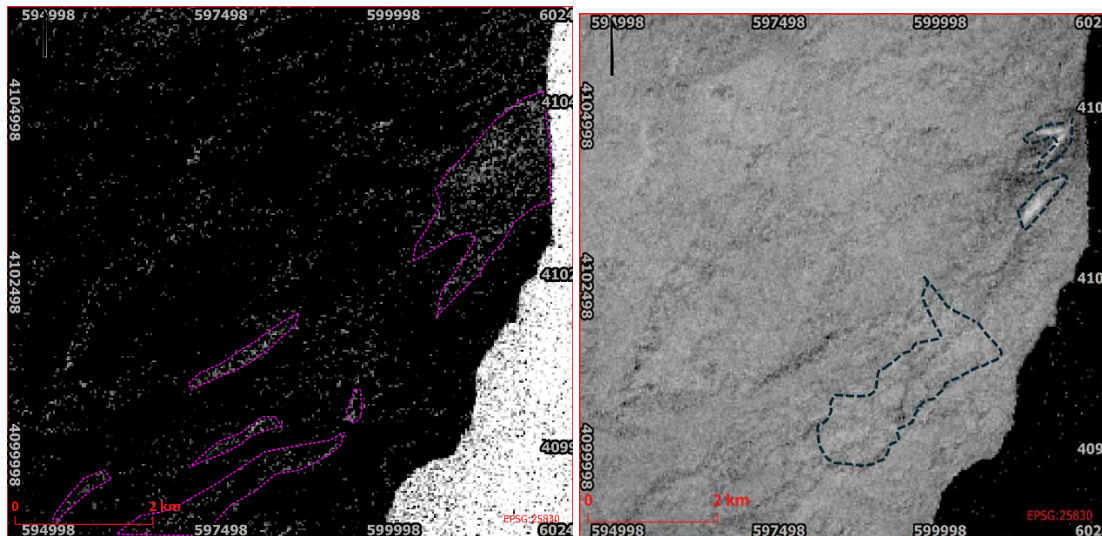


Figura 15: a) Alteración fílica (Sericita / Muscovita / Illita / Esmectita) = $(5+7)/6$. En magenta se aprecian pequeños lineamientos b) Alteración argílica avanzada (Alunita/Caolinita/Pirofilita)= $(4+6)/5$. Solo es distingue la zona de Mácnas. En el centro de la falla de Carboneras hay unos pixeles con muestras que muestran una probable acumulación muy leve, casi imperceptible.

En la Figura 15 a) se logra apreciar levemente la zona de alteración fílica, asimismo, la zona de alteración argílica avanzada resulta prácticamente imperceptible mediante el índice alunita/caolinita/pirofilita propuesta por Kalinowski y Oliver (2004), sólo es apreciable con mayor nitidez la zona de Mácnas.

Los índices espectrales y las combinaciones de falso color han permitido identificar tres probables zonas de alteración hidrotermal en la región de Carboneras: alteración argílica intermedia, alteración argílica avanzada y alteración fílica.

4.2 Resultados de Análisis de Componentes Principales (PCA) y los métodos basados en mejoras: Minimum Noise Fraction (MNF).

4.2.1 Resultados de APC en su forma clásica

La Figura 16 muestra los resultados de las componentes principales CP4, CP3 y CP2 que contienen respectivamente el 0.24%, 0.32% y 1.6% de la varianza de los autovalores.

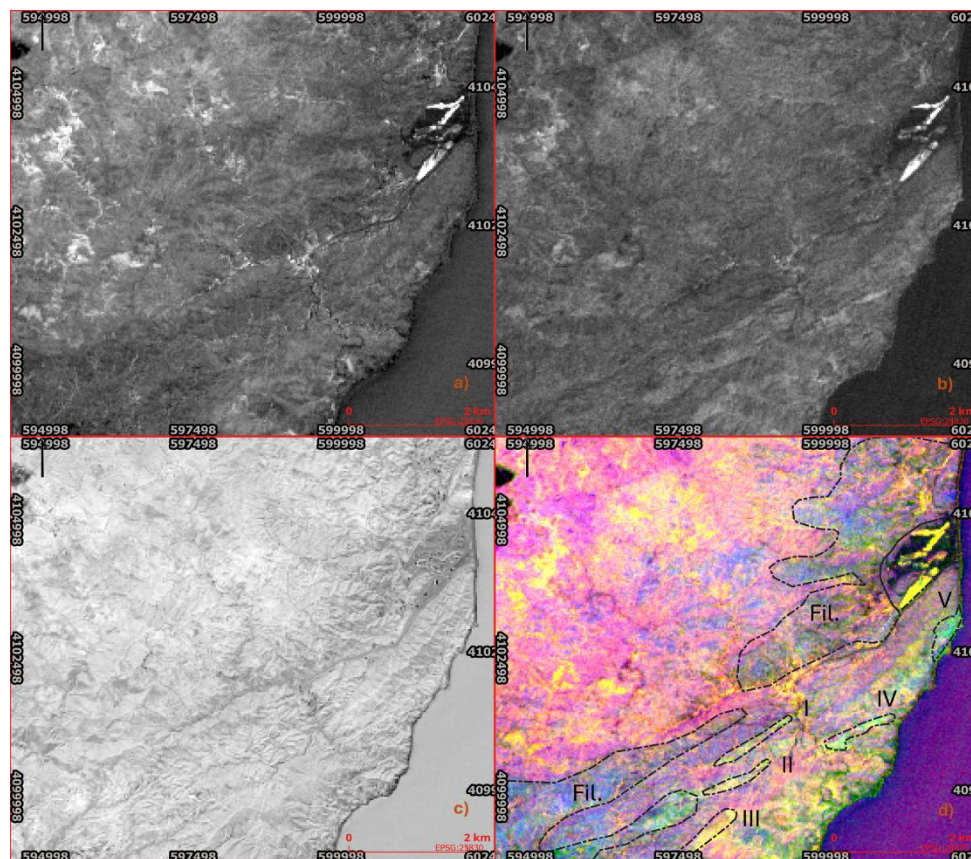


Figura 16. Componentes Principales a) CP 4 b) CP3 c) CP2 d) Combinación RGB: CP4-CP3-CP2. En figura d), anomalías I, II, III, IV y V. Fil: alteración filica

Tanto la CP4 (Figura 16 a) como la CP3 (Figura 16 b) resaltan muy bien los lineamientos de la Falla Carboneras, en el caso de la CP2 al contener mayor varianza se resaltan rasgos más generales de la región. En la combinación RGB: CP4-CP3-CP2 se observa en un amarillo intenso en el área de la rambla de Mácenas, rodeada de tonalidades oscuras, pertenecientes a la zona urbana. Al sureste de la región predominan los colores amarillos correspondientes a las rocas volcánicas de Cabo de Gata. La Falla de Carboneras, se muestra en tonos en diferentes tonalidades, en verdes, azul-violáceo y amarillo, debido a las particularidades geológicas del sitio. En verde intenso se resaltan las zonas que con anterioridad se han definido como de alteración argílica moderada y en azul-violáceo la zona de alteración filica. En la misma falla, las tonalidades de amarillo muestran cierta relación con la alteración argílica avanzada identificada por los índices espectrales. Otros subtonos amarillos, pero menos intensos se observan en toda el área y en zonas con vegetación

Tal como plantea González (2012), la utilización del ACP puede ser útil para identificar zonas con alteración hidrotermal pero rara vez ofrecerá información sobre el contenido mineral de las mismas, es por esto que se emplean otras técnicas basadas en APC que si han mostrado mejores resultados. Sin embargo, Chica-Olmo *et al.*, (2002). destacan que PCA es muy útil en la comparación visual de los resultados, debido a la calidad visual de las imágenes generadas y también porque permite operaciones simultáneas con todas las bandas.

4.2.2 Resultados Análisis de Componentes Principales Selectivo (ACPS)

En las imágenes obtenidas mediante el ACPS (Figura 17), las segundas componentes (CP2) contienen la información no correlacionable, en este caso, permiten diferenciar tres zonas de alteración para los tres minerales analizados: alunita, caolinita y clorita.

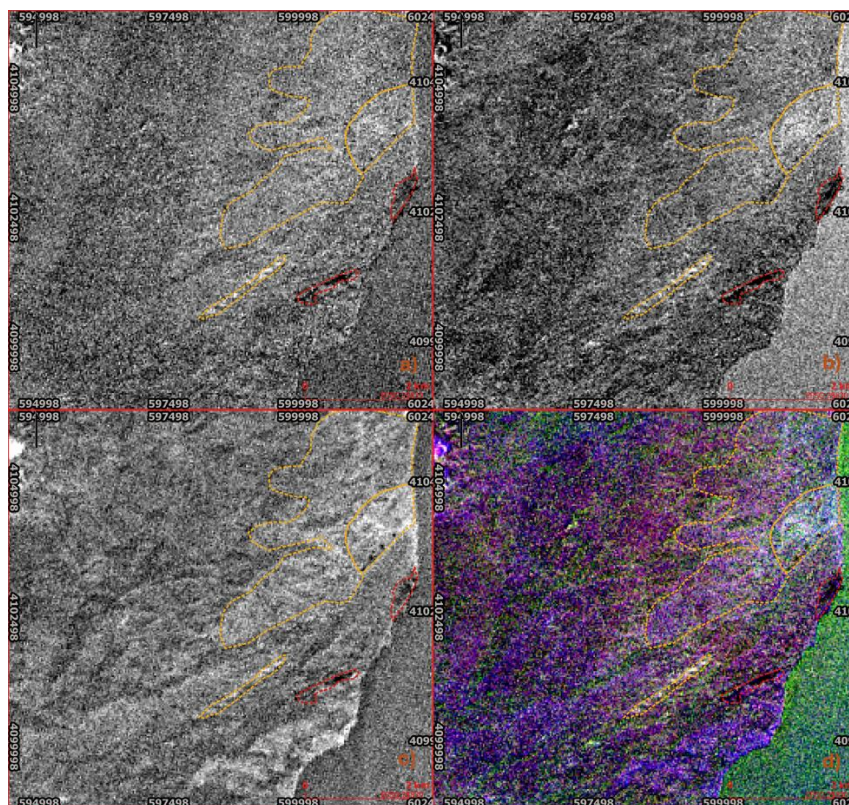


Figura 17: a) CP2 de la relación entre B5 y B7 (alunita). b) CP2 de la relación entre B6 y B7 (caolinita), c) CP2 de la relación entre B5 y B8 (clorita). d) Combinación RGB: CP2 alunita, CP2 caolinita y CP2 clorita. En líneas amarillas, anomalía I (dirección SW-NE), en líneas rojas de W-E: anomalías IV y V. Líneas amarillas Este: alteración filica.

La CP2 de la relación B5/B7 (Figura 17 a) mostraría un predominio de alunita, en la región de Mácnas, también en la zona de Sopalmo (Anomalía I) y en las rocas del Complejo Volcánico. Las otras CP2, también tienden acumularse, aunque en menor medida, en la zona de Mácnas y en la franja cercana a Sopalmo. Esto se observa con mayor claridad en la composición RGB (Figura 17 d), donde se ven en tonos blancuzcos las zonas con alunita+caolinita+clorita, en cambio, siguiendo el mismo patrón encontrado en Rodalquilar, las zonas de probable alteración argílica avanzada podrían estar representadas por los tonos amarillos, tal como se observa muy ligeramente en Sopalmo. Los tonos verdosos, podrían tratarse como zonas de alteración argílica intermedia, aunque se aprecia una tendencia a extenderse hacia el noreste con cierta correspondencia con el relieve, por lo que debe analizarse con cautela. Las anomalías IV y V se aprecian en tonos oscuros en todas las CP2.

4.2.3 Resultados de la Técnica de Crósta (Crósta y Moore,1989) o Análisis de Componentes Principales Orientado a Objetos (ACPOO)

La técnica de Crósta centra su análisis en el aporte de cada autovector en las distintas componentes principales. La tabla 4 contiene los autovectores para la variante 1 de la técnica de Crósta.

Tabla 4: Tabla de autovectores de la variante 1 de la Técnica de Crósta

Variante1: Alunita				
Autovectores	Band 1	Band 3	Band 5	Band 7
CP1	-0.376824	-0.581253	-0.534244	-0.484492
CP2	-0.67518	-0.357867	0.522175	0.378677
CP3	-0.628899	0.71016	-0.316157	-0.014228
CP4	0.081373	-0.172478	-0.584774	0.78846
Variante1: Caolinita				
Autovectores	Band 1	Band 4	Band 6	Band 7
CP1	0.345943	0.631516	0.522323	0.456825
CP2	0.932207	-0.292351	-0.200746	-0.072265
CP3	-0.09276	-0.195029	-0.457282	0.8627
CP4	0.052046	0.691145	-0.691211	-0.204541
Variante1: Illita				
Autovectores	Band 1	Band 3	Band 5	Band 6
CP1	-0.36294	-0.560413	-0.517891	-0.534791
CP2	-0.64715	-0.423075	0.429305	0.466799
CP3	-0.668607	0.708502	-0.080097	-0.211125
CP4	-0.04936	0.070496	-0.735575	0.671955
Variante1: Caolinita-Esmectita				
Autovectores	Band 1	Band 4	Band 6	Band 9
CP1	-0.347359	-0.633325	-0.524082	-0.451198
CP2	-0.928016	0.303549	0.211772	0.042386
CP3	0.133595	0.387118	0.208318	-0.888198
CP4	0.016722	0.597409	-0.798182	0.075688

La estadística de los autovectores de la alunita evidencia un fuerte contraste entre la B5 y B7 de la CP4. Esta componente principal presenta una alta carga negativa (-0.584774) para la B5 y una alta carga positiva (0.78846) para la B7, esto coincide con la firma espectral de la alunita (Figura 7), por tanto, la información espectral relevante se mostrará mediante los pixeles brillantes en la imagen de la CP4. Aplicando este mismo análisis para el resto los minerales de alteración hidrotermal, se tiene que, para el caso de la Illita, en la CP4 se observa una correspondencia inversa a la firma espectral, por consiguiente, en la imagen de la CP4 se identificarán las zonas con probable concentración de illita como pixeles oscuros, en este caso se multiplicó la imagen por (-1) para que los pixeles se mostraran brillantes en la imagen.

La Figura 18 contiene las imágenes de las componentes principales representativas para los minerales de alteración: a) alunita (bandas 1, 3, 5 y 7), b) caolinita (bandas 1, 4, 6 y 7), c) illita (bandas 1, 3, 5 y 6) y d)

Caolinita+esmectita (bandas 1, 4, 6 y 9) utilizados por Crósta *et al.*, (2003), Rigol y Chica-Olmo (2005).

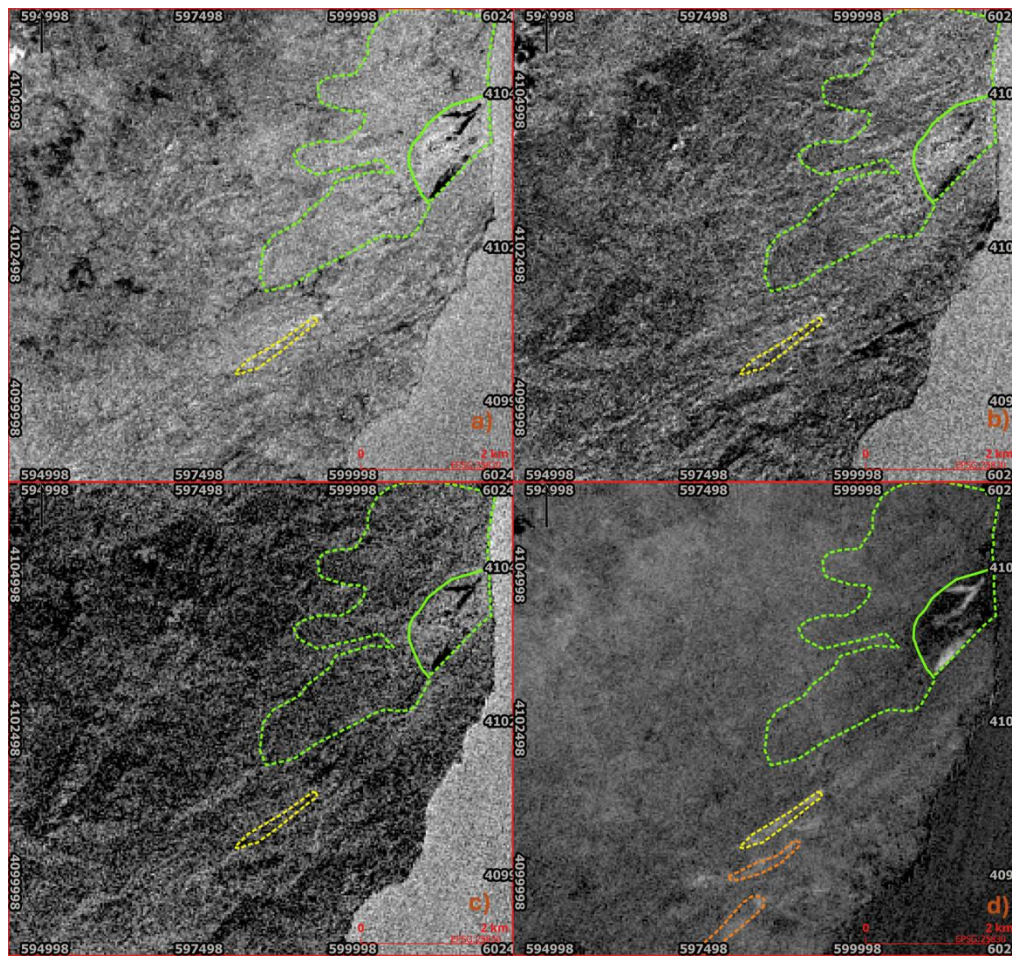


Figura 18: Componentes principales: Variante 1 a) CP4 de la alunita, b) CP3 de la caolinita, c) (-CP4) de illita y d) CP4 de caolinita-esmectita. En líneas amarillas: anomalía I (b y d). En líneas naranjas de N a S: anomalías II y III. En líneas verdes: alteración filica (a, b y c).

La CP4 de la alunita (Figura 18 a) resalta solo la región de Mácnas y a Sopalmo como probable zona de alteración argílica avanzada. Ambas zonas también son visibles en la CP3 de la caolinita y la CP4 de la illita. En el caso de la CP4 de la caolinita/smectita se observan las cinco anomalías, extendiéndose en dirección NE.

La combinación de falso color de las componentes principales (Figura 19) presenta en tonos blancuzcos una mayor concentración de alunita+caolinita+clorita en la zona urbana correspondiente Mácnas. Alrededor, en tonos amarillos claros, lo que otras técnicas han considerado como zona alteración filica que transiciona hacia el oeste con tonos pardos (alunite), verde (caolinita) y azul (illita).

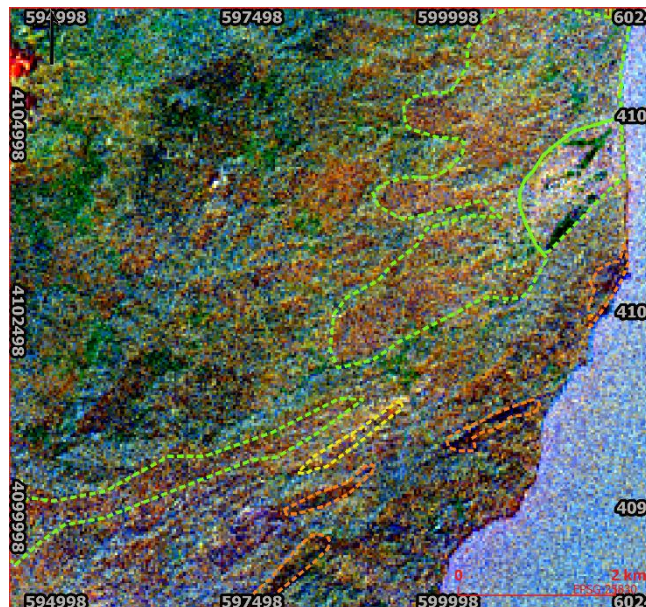


Figura 19: Combinación RGB- R: CP4 Alunita, G: CP3 Caolinita y B: (-CP4) Illita. En líneas amarillas: anomalía I, en líneas naranjas de W a E: anomalías II, III, IV y V. En líneas verdes: alteración filica.

En la zona de la Falla Carboneras, la illita (azul oscuro) identifica a las zonas que han sido clasificadas anteriormente como argílica intermedia. Hay que señalar que la Illita puede aparecer en zonas filicas. En cuanto al occidente de la falla, los tonos violáceos sugieren que en esta área hay una coexistencia de alunita (asociada a la alteración argílica avanzada) e illita (asociada a la alteración filica), a diferencia de lo que muestran algunos de los índices estudiados que lo presentan solo como una zona de alteración filica.

La variante 2 utilizada por González (2012) y Díaz (2012), toman las bandas: 3, 4, 5 y 7 (alunita); 3, 4, 6 y 7 (caolinita), y 1, 3, 5 y 8 (clorita), pues son los minerales más abundantes en las zonas de alteración hidrotermal de Rodalquilar. El análisis que se realiza es el mismo que para la variante 1, se debe observar el aporte de cada autovector en las componentes principales. En el caso de los autovectores de la variante 2 (Tabla 5), se debió multiplicar las componentes principales por (-1) para visualizar los minerales de alteración hidrotermal como pixeles brillantes en las imágenes.

Tabla 5: Tabla de autovectores de la variante 2 de la Técnica de Crósta

Variante 2: Alunita				
Autovectores	Band 3	Band 4	Band 5	Band 7
CP1	0.503463	0.58738	0.46998	0.425004
CP2	0.854947	-0.387548	-0.323385	-0.119556
CP3	0.120718	0.441964	0.115332	-0.881359
CP4	0.031896	-0.556291	0.813166	-0.168179
Variante 2: Caolinita				
Autovectores	Band 3	Band 4	Band 6	Band 7
CP1	0.49966	0.583205	0.48182	0.421974
CP2	0.85463	-0.359917	-0.359501	-0.104045
CP3	0.13145	0.369716	0.202049	-0.897333
CP4	0.051651	-0.627409	0.773166	-0.076845
Variante 2: Clorita				

Autovectores	Band 1	Band 3	Band 5	Band 8
CP1	0.38186	0.58834	0.540827	0.464269
CP2	0.65946	0.366046	-0.522676	-0.397407
CP3	0.627647	-0.708176	0.053489	0.318881
CP4	-0.159231	0.135474	-0.656852	0.724456

En la Figura 20 se puede apreciar las imágenes de CP que mejor discriminan los minerales de alteración: a) alunita, b) caolinita y c) clorita.

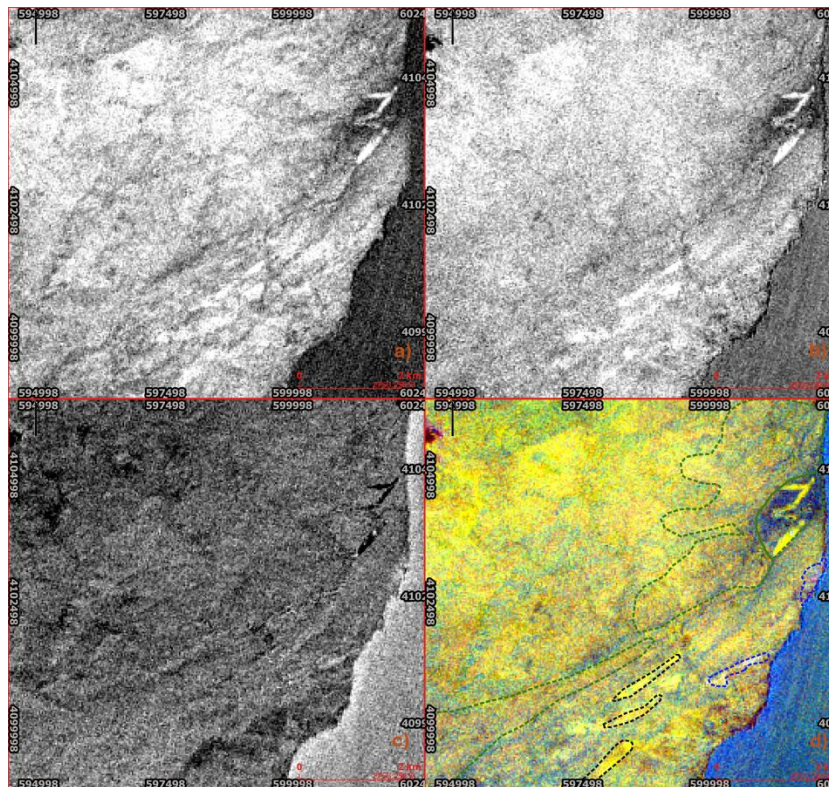


Figura 20: Componentes principales: Variante 2 a) -CP4 de la alunita, b) -CP4 caolinita y c) -CP4 de clorita y d) Composición RGB, R: alunita, G: caolinita y B: clorita. En figura d, líneas negras de N a S: anomalías I, II y III. En líneas azules de W a E: anomalías IV y V. En líneas verdes: alteración filica.

La combinación RGB de la variante 2 (Figura 20 d) puede diferenciar por intercalaciones en tonalidades amarillas y azules los lineamientos de Falla Carboneras. En amarillo intenso, además de las anomalías típicas de Mácenas, se observan tres franjas con dirección SW-NE, el color amarillo indica la presencia de alunita+caolinita, característico de zonas de alteración. Al suroeste se observa cierta presencia de alunita (rojo) y clorita (azul), dentro de un fondo amarillo predominante. La clorita es más abundante en zonas de alteración propilítica, aunque en el área parece estar respondiendo más a las características del relieve. En tono blancuzco se distingue las anomalías IV y V, que responden a la presencia de alunita+caolinita+clorita.

Después de analizar ambas variantes de la Técnica de Crósta, se puede decir que en la región de Carboneras las bandas utilizadas en la variante 1 (Crósta *et al.*, 2003; Rigol y Chica-Olmo, 2005) brindan mejores resultados que las utilizadas en la variante 2 por Díaz, (2012) y González, (2012)

4.2.4 Resultados MNF

El autovalor de cada banda transformada de MNF proporciona una medida de la cantidad de información contenida en cada MNF. A medida que los valores propios se acercan a cero, más ruidosas se vuelven. Según Pour y Hanshim (2012), las bandas que tienen valores propios bajos generalmente tienen una coherencia espacial muy limitada (o nula), lo que nuevamente refleja el predominio del ruido incoherente. Las imágenes propias de MNF con valores cercanos a 1% de varianza, contienen principalmente ruido, por tanto, la calidad de las imágenes de componentes de MNF disminuye constantemente con el aumento del número de componentes.

La tabla 6 muestra los autovectores y autovalores luego de realizar el análisis MNF.

Tabla 6: Tabla de autovectores y autovalores del análisis MNF.

Autovectores	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9	Autovalores	Autovalores (%)
MNF 1	0.960226	0.121805	0.141606	-0.06529	0.077536	-0.18111	430.127458	89.82
MNF 2	-0.22011	0.748028	0.199141	-0.49624	0.008629	-0.32561	20.8616	4.36
MNF 3	0.082265	-0.26073	0.133023	-0.55254	-0.73488	0.249403	11.55892	2.41
MNF 4	-0.02123	-0.4088	-0.12549	-0.65737	0.61989	0.016742	9.30076	1.94
MNF 5	-0.14924	-0.39883	0.730215	0.102157	0.002189	-0.52441	4.228075	0.88
MNF 6	0.005275	0.177347	0.611256	0.040046	0.263802	0.723665	2.782433	0.58

Los resultados de la transformación de MNF muestran que las imágenes propias correspondientes a las bandas MNF 4, 5 y 6, tienen valores propios cercanos a 1%, por tal motivo se debe excluir estas bandas MNF en el análisis, ya que aportarían una menor información con mayor cantidad de ruido. En este sentido, se emplearon combinaciones de falso color RGB para las bandas MNF 1, 2 y 3. La Figura 21 muestra los resultados de las composiciones de color RGB en el área de estudio.

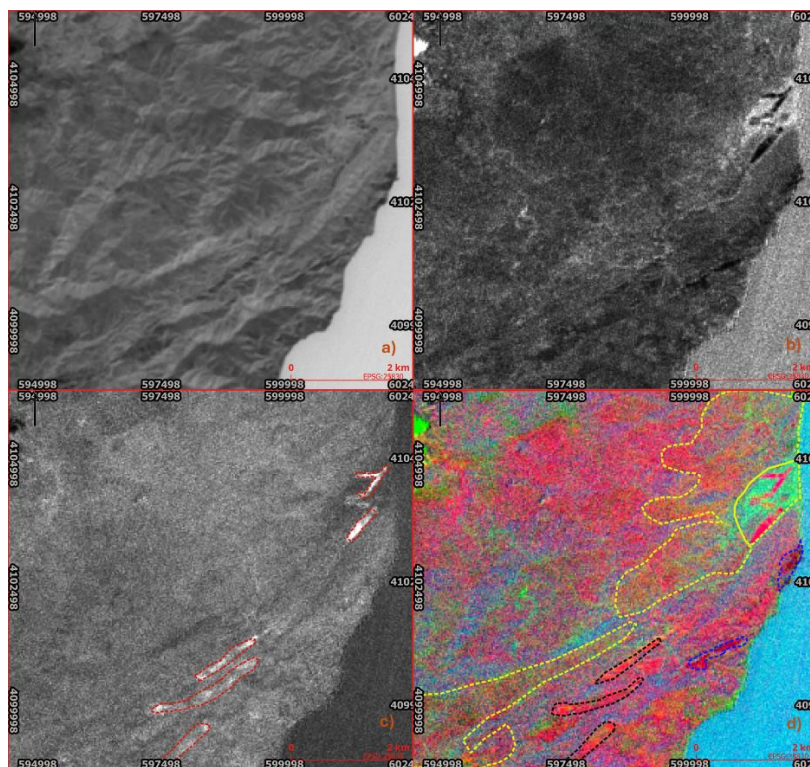


Figura 21: a) MNF1, b) MNF 2 c) MNF 3, d) Combinación R: MNF3, G: MNF2 y B: MNF. En la Figura d, en líneas negras de N a S: anomalías I, II y III. En líneas azules de W a E: anomalías IV y V. En líneas amarillas alteración fílica.

Las componentes MNF2 y MNF3 destacan muy bien las zonas de alteración argílica avanzada y fílica. La combinación RGB (Figura 21 d), muestra un predominio de tonos rojizos debido al mayor aporte de la MNF1 con respecto al resto de MNF. En la parte oriental se aprecian tonalidades que van desde los ocre-naranjas pertenecientes a la zona de alteración fílica, hasta el verde intenso en el área urbana de Mácenas. En el centro de la falla, se distinguen las tres anomalías I, II y III en tonos rosa-naranjas, mientras que las anomalías IV y V en color rojo vino. También se delimita el contacto de las brechas piroclásticas del Complejo volcánico de Cabo de Gata y las rocas pertenecientes al Complejo Nevado Filábride.

Luego de calcular la transformación MNF, se aplicó el algoritmo Índice de Pureza de Píxeles (PPI por sus siglas en inglés) para identificar los píxeles “puros” en la imagen. El objetivo es buscar aquellos píxeles que están cubiertos por una firma espectral única, esto permitirá luego realizar clasificaciones como SAM y MTMF con una mayor exactitud. En el caso particular del área de estudio, se realizaron un total de 10000 iteraciones y con un *threshold factor* de 2.5, y la imagen analizada no muestra píxeles puros, por tanto, podría decirse que los píxeles presentan una gran mezcla espectral, lo cual dificulta la clasificación de minerales de alteración hidrotermal en su forma más pura. Hay que considerar que no solo las características mineralógicas del sitio condicionan la pureza de los píxeles, la resolución espacial del sensor ASTER (30 m) y la resolución espectral, influyen en gran medida en la pureza de los píxeles. A medida que disminuyen el tamaño de los píxeles y aumentan las ventanas espectrales, es posible identificar más píxeles puros, tal es el caso de los sensores hiperespectrales de última generación que permiten identificar un mayor espectro de minerales.

4.3. Resultados de los algoritmos basados en ajuste de forma como SAM, MF y MTF

4.3.1 Resultados SAM

Este método es una de las técnicas de procesamiento de imágenes más aceptadas y populares para el procesamiento de imágenes hiperespectrales. Sin embargo, puede que no sea óptimo para datos multispectrales como las imágenes ASTER. En el caso de la escena de la región de estudio, el algoritmo elimina la mayoría de los píxeles y muestra “sin clasificar”. Esto se debe a que el parámetro “ángulo máximo” es predeterminado de 0,10 radianes, este valor es realmente útil en datos hiperespectrales donde sutiles diferencias en los espectros permite distinguir entre diferentes minerales (Gabr *et al.*, 2010). En el caso de los datos ASTER en la escena de estudio, hubo que aumentar el “ángulo máximo” hasta 1.25 radianes debido a que quedaban un gran número de píxeles sin clasificar. Aumentar este ángulo no siempre es recomendable ya que las variaciones espectrales pequeñas puede que no sea clasificadas correctamente con una apertura mayor.

Hay que decir que las clasificaciones mediante SAM pueden variar en función de la librería espectral de referencia y el ángulo máximo espectral. Dado que no fue posible aplicar SAM a partir de los PPI, la clasificación se realizó utilizando la librería espectral “*mineral.jhu.nicolet_2287.lib*” (Figura 22 a). La Figura 22 b) muestra la clasificación SAM-D que toma como librería espectral los principales minerales de alteración hidrotermal utilizados con anterioridad (Figura 9).

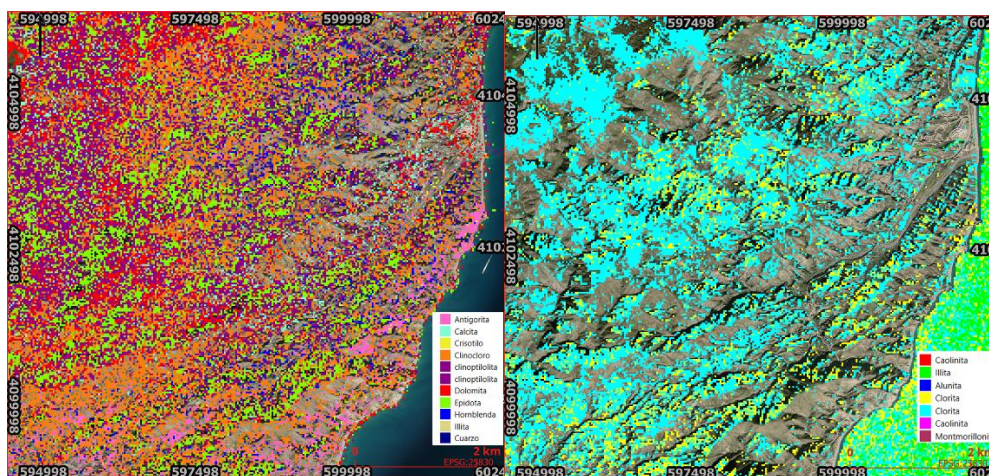


Figura 22: a) SAM con ángulo máximo espectral de 1.25 radianes usando la librería espectral “*mineral.jhu.nicolet_2287.lib*” b) SAM-D con ángulo máximo espectral de 0.75 radianes usando la librería espectral de los minerales extraídos (Figura 9).

En la clasificación SAM empleando la librería espectral “*mineral.jhu.nicolet_2287.lib*” (Figura 22 a), aparecen minerales que son poco probables de encontrar según las condiciones geológicas del sitio, como pueden ser antigorita y crisotilo. Esto puede deberse a la contaminación espectral antes comentada donde hay un predominio de píxeles impuros. Otro elemento que considerar es que las firmas espectrales de la librería empleada no se ajusten a las condiciones mineralógicas del territorio. No obstante, se observa el contacto entre las rocas del complejo Nevado Filábride y el Complejo Volcánico de Cabo de Gata, marcado en este caso por la presencia de antigorita. La zona de Falla Carboneras está representada por intercalaciones de clinocloro, epidota y

hornblenda. En cambio, en la región central se evidencia un contraste en la composición mineralógica de las rocas del área en forma de medialuna roja. Se observa al oeste una mayor presencia de dolomita y clinoptilolita, mientras que, al Este, crisotilo, hornblenda y calcita. Los carbonatos del noroeste son clasificados como dolomita, que, en este caso, no deja de estar alejado de la realidad.

En la zona de la Falla Carboneras, la clasificación de la epidota podría interpretarse como zonas con alteración propilítica, sin embargo, en ciertas locaciones existe una alta correlación con el aspecto del relieve. Las pendientes con dirección Este coinciden con la acumulación propilítica, por lo que la clasificación pudiera estar contaminada por pixeles oscuros.

En la técnica SAM-D las firmas espectrales utilizadas, no logran vislumbrar las zonas de alteración hidrotermal, es necesario emplear firmas espectrales típicas de la región como patrones de entrenamiento (ROIs) para una correcta clasificación de las zonas de alteración. Esta es la causa de que en la Figura 22 b) se aprecie un predominio absoluto de dos variedades de clorita, dado que la clasificación está condicionada por la librería espectral empleada, el ángulo espectral y la pureza de los pixeles. Si se realiza la clasificación SAM empleando los pixeles puros PPI, se tiene que una clasificación más fidedigna de los pixeles, aunque la cobertura disminuye considerablemente.

4.3.2 Resultados MF

La Figura 23 muestra la combinación RGB para la alunita, caolinita y clorita luego de aplicar el filtro combinado.

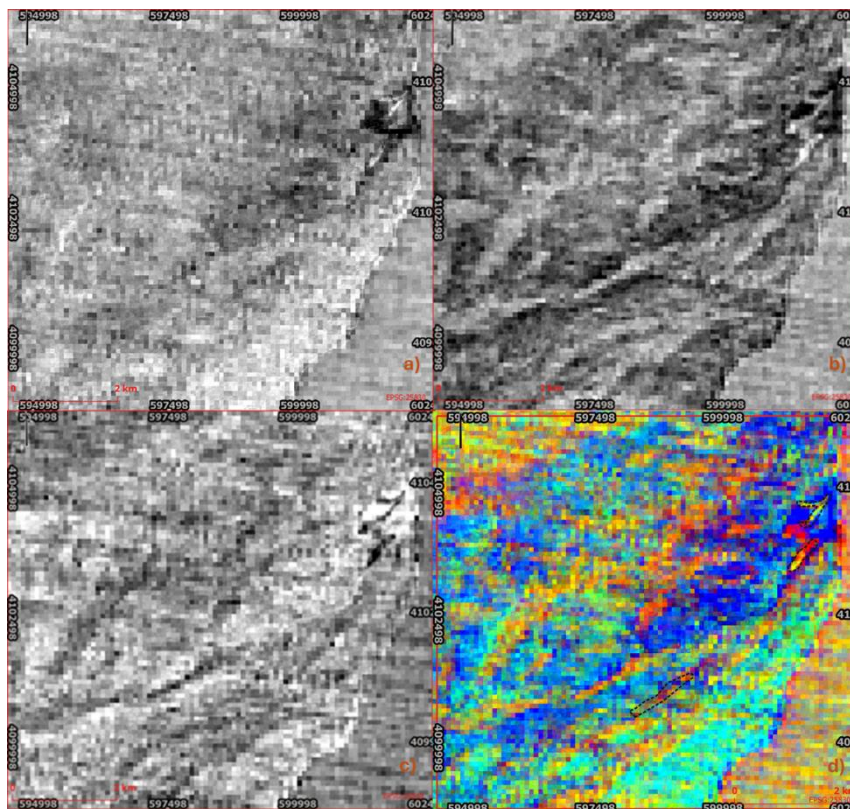


Figura 23: Filtro combinado empleando la librería de minerales de alteración de la Figura 9. a) MF alunita, b) MF caolinita, c) MF Clorita d) Combinación R: Caolinita, G: Alunita y B: Clorita, en líneas negras la anomalía I y la anomalía de "Y" invertida en Mácnas.

El filtro combinado muestra en color azul oscuro un predominio de clorita (alteración propilítica) con orientación SW-NE paralelo a la Falla Carboneras, esta zona ha sido cartografiada por otras técnicas como zona de alteración filica. La zona de falla Carboneras se denota por la presencia en tonos amarillos de caolinita+alunita (alteración argílica avanzada), la misma se muestra siguiendo los principales lineamientos. El predominio de caolinita se muestra en una porción pequeña de Mácenas (anomalía de “Y” invertida) y en la región central (anomalía I), llegando a subtonos naranjas tanto en esta zona como en la porción más noroccidental. La alunita (color verde) y la combinación alunita+clorita (color cyam) marcan el complejo volcánico. Los resultados obtenidos usando la librería espectral “*mineral.jhu.nicolet_2287.lib*” no difieren de los obtenidos con las firmas espectrales seleccionadas (Figura 9) y conllevan mayores exigencias de cómputo.

Al analizar los resultados obtenidos con MF en la región de estudio, estos tienden a caracterizar mejor los límites de las unidades geológicas o de las zonas de alteración hidrotermal, no son representativos de la composición mineralógica de las zonas de alteración hidrotermal.

4.3.3 Resultados MTMF

Los resultados de MTMF se puede generar tanto en imágenes en escala de grises y utilizando la composición RGB (Figura 24 a) o como una imagen de clasificación, donde cada color destaca los minerales que predominan espectralmente en cada píxel (Figura 24 b).

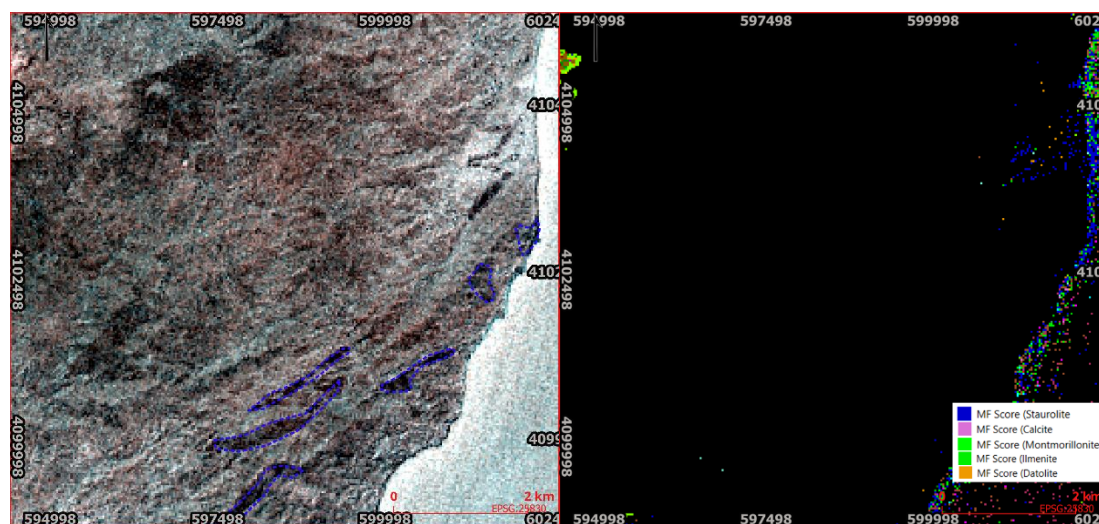


Figura 24: a) MTMF empleando la librería “*mineral.jhu.nicolet_2287.lib*”. Combinación R: Alunita, G: Caolinita y B: Illita/Smectita. En líneas azul anomalías I, II, III, IV y V b) Clasificación con el 98% de verosimilitud.

La zona de Mácenas, en el extremo oriente del área, se observa en tonos blancos (Figura 24 a), lo cual puede interpretarse como una concentración los tres elementos en el área urbana, en dicha zona no debe prestarse especial interés pues la contaminación espectral es abundante y tiene un carácter antrópico. En la región de la Falla Carboneras al Este predomina la alunita, mientras que en la porción occidental hay más contenido caolínítico. En

tonalidades oscuras se logran diferenciar varias zonas, incluidas las anomalías I, II, III, IV y V. La clasificación mediante la librería espectral “*mineral.jhu.nicolet_2287.lib*” con verosimilitud del 98% (Figura 24 b), deja sin clasificar la mayoría de los píxeles del área, llama la atención que la staurolita (azul) y datolita (naranja), muestran píxeles aislados en zonas cercanas a Mácnas. Estos minerales son raros, aunque el primero está asociado a cierto grado de metamorfismo, tal como se puede apreciar en los esquistos del Complejo Nevado Filábride. También se identifican zonas con ilmenita (verde), fundamentalmente en la zona costera.

Disminuir el grado de verosimilitud es fundamental para que más píxeles sean clasificados, pero se perdería en exactitud de la clasificación. La principal limitación en que no existan suficientes píxeles clasificados con una verosimilitud de 98% no está solo en las mezclas parciales de los píxeles, sino en la resolución espectral de las imágenes ASTER.

4.4 Resultados de los algoritmos de desmezcla

4.4.1 Resultados LSU

Normalmente, LSU se aplica a cada píxel utilizando el conjunto de miembros finales obtenido de la imagen completa. El número de miembros finales puede variar sustancialmente dependiendo de la complejidad espectral de una escena, el número de bandas, la resolución espacial y espectral de la imagen. Normalmente, el número de bandas es mayor que el número de miembros finales necesarios para separar un solo píxel de la escena.

Los resultados de la desmezcla espectral aparecen como una serie de imágenes en escala de grises, una para cada miembro final, más una imagen de error de raíz cuadrática media (RMS). Las abundancias más altas (y los errores más altos para la imagen de error RMS) se representan mediante píxeles más brillantes. Los resultados de la separación deben tener un rango de datos (que represente la abundancia del miembro final) de 0 a 1. Sin embargo, según Hosseinjani y Tangestani (2011) son posibles valores negativos y valores mayores que 1.

En la Figura 25 se muestran los resultados de aplicar LSU con las firmas espectrales seleccionadas en la Figura 9.

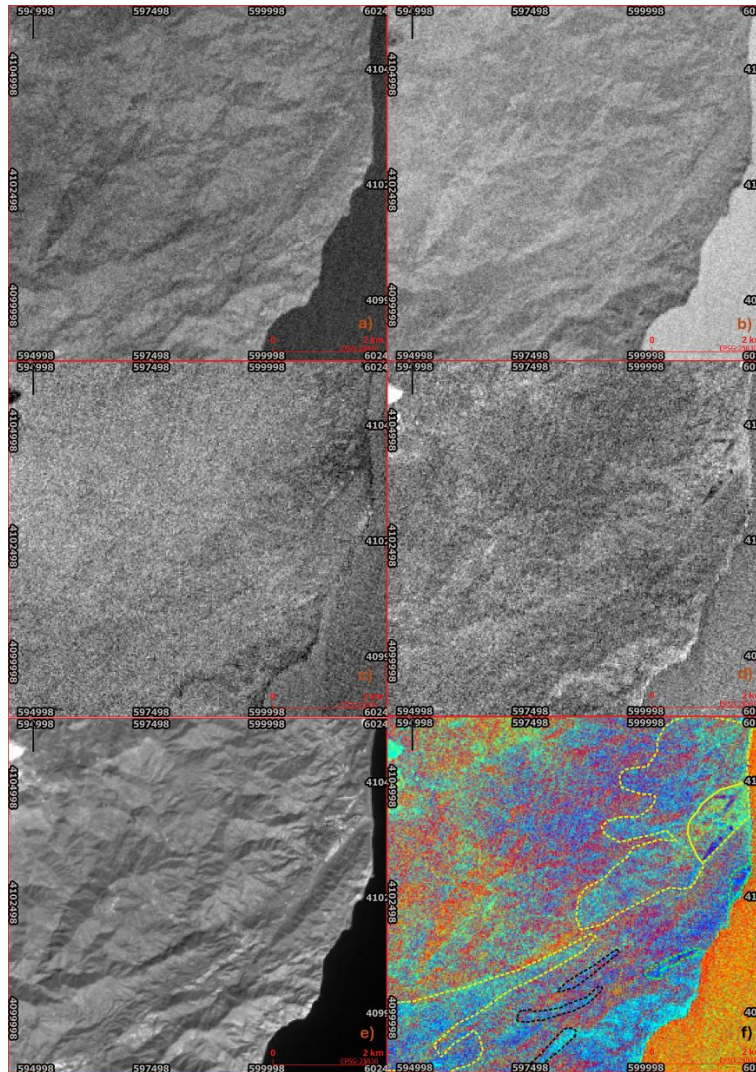


Figura 25: LSU empleando la librería de minerales de alteración de la Figura 9a) Alunita, b) Caolinita, c) Clorita, d) Illita, e) Error RMS f) Combinación R: Caolinita, G: Illita y B: Alunita. En figura f), en líneas negras de N a S: anomalías I, II y III. En líneas verdes de W a E: anomalías IV y V. En líneas amarillas: alteración filica.

Los minerales identificados mediante la técnica LSU resaltan diferentes zonas de alteración hidrotermal. La Figura 25 a) evidencia mayor concentración de alunita en la región más occidental de la falla, donde pudiera existir una zona de transición entre la alteración argílica avanzada y la zona fílica (tonos verdes y cyam). La caolinita (Figura 25 b) define muy bien los lineamientos de la falla, en cambio, la clorita (Figura 25 c) muestra una correlación inversa con la caolinita y presenta un inusual comportamiento en gran parte de la región de estudio. La illita (Figura 25 d) está presente, en menor medida, en la zona de Mácnas y tiene una ligera tendencia suroeste-noreste correspondiendo con la zona de alteración filica.

La combinación RGB (Figura 25 f) permite zonificar en menor o en mayor medida, los tipos de alteración hidrotermal. Al oeste de la Falla Carboneras, se observa una probable zona de transición entre la alteración filica (tonos verdes) y argílica avanzada (azul). Las anomalías I, II y III no se resaltan tan bien como con otras técnicas, en cambio las anomalías IV y V si son más visibles. En un color cyam intenso se distinguen las brechas piroclásticas de dacita y andesita anfibólica del complejo volcánico de Cabo de Gata. En este sentido, hay que

señalar que la imagen RMS (Figura 25 e), presenta los mayores valores de error medio cuadrático en dicha área, por tanto, no debe tomarse en cuenta la composición mineralógica para su determinación.

4.4.2 Resultados CEM

Las imágenes obtenidas mediante la técnica CEM no muestran diferencias al usar ambas librerías espectrales. A simple vista, la Figura 26 resalta más las características topográficas del territorio que las espectrales.

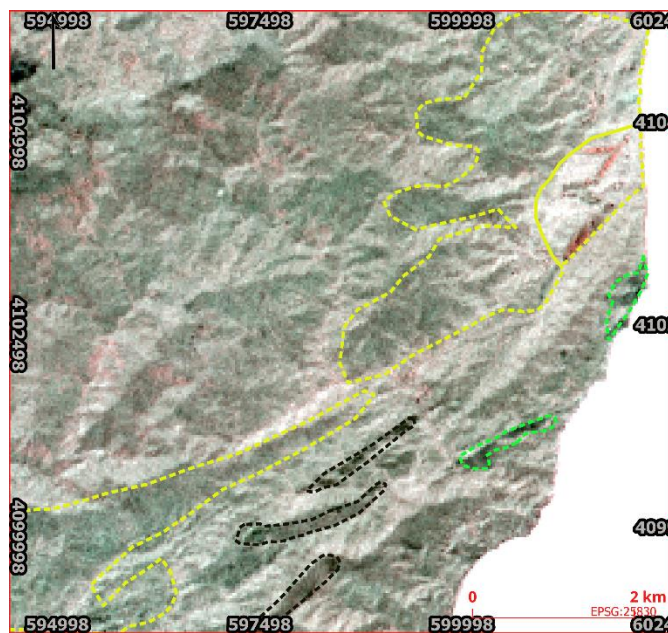


Figura 26: Algoritmo CEM empleando la librería "mineral.jhu.nicolet_2287.lib". Combinación R: Alunita, G: Caolinita y B: Illita. En figura f), en líneas negras de N a S: anomalías I, II y III. En líneas verdes de W a E: anomalías IV y V. En líneas amarillas: alteración filica

En la región central de Carboneras se observa en tonos rojizos donde predomina la alunita, mientras que, al Este, existe una mayor concentración de caolinita. La zona urbana de Mácnas, se muestra en tono blancuzco y la anomalía "Y" invertida en tonos oscuros, al igual que las anomalías I, II, III, IV y V. De manera general, se observa un fondo regional en tono verdes (caolinita) y tonalidades rojizas en la zona central (alunita)

La técnica CEM no funciona bien en condiciones en las que la firma del fondo no se detecta fácilmente, pues resulta sumamente difícil mejorar los espectros del objetivo y al mismo tiempo minimizar la energía de fondo cuando no hay una diferencia aparente entre las firmas espectrales (Gabr *et al.*, 2010).

4.5 Análisis MDE

La porción más oriental de Sierra Cabrera abarca la mayor parte del área, siendo junto a la Falla Carboneras los elementos geomorfológicos más importantes (Figura 27).

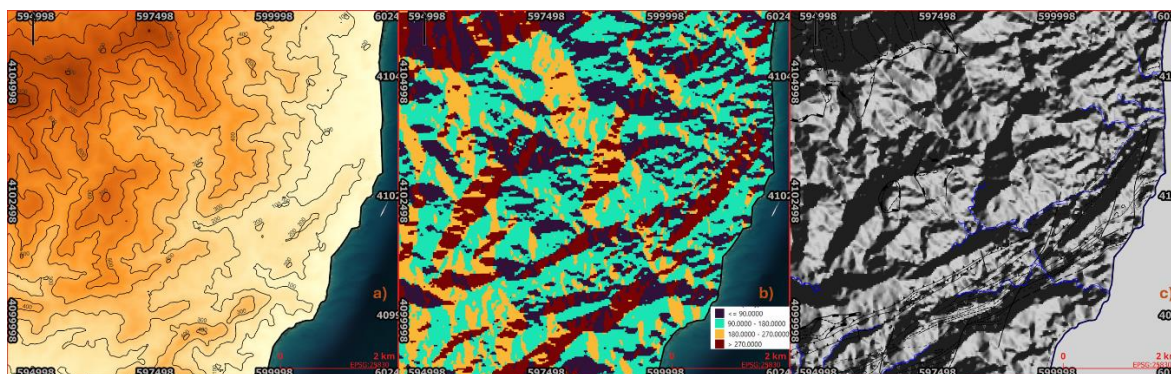


Figura 27: a) MDE de la región de estudio Fuente: GDEM ASTER. b) Mapa de aspecto del relieve. c) Mapa de Sombras (azimuth=315°, altitud=45°).

Las alturas medias en la región rondan los 300 m (Figura 27 a) y presentan fuertes pendientes hacia el sureste (Figura 27 b). Al noroeste, se encuentran las mayores elevaciones de Sierra Cabrera, con alturas que superan los 900m, estas son el contacto natural entre las rocas carbonatadas del complejo Alpujárride y las cuarcitas, filitas, micaesquistos y rocas metamorfizadas de la región central del Complejo Nevado-Filábride.

En la Falla Carboneras, los lineamientos tienen un aspecto de pendientes hacia el norte y un rumbo suroeste-noreste claramente visible en la Figura 28 a). El análisis de la red de drenaje Figura 28 b), muestran las principales subcuencas y el patrón de escorrentía superficial. Las menores elevaciones se observan en la zona de Mácenas. La mayoría de las aguas vierten hacia el Este, siendo canalizadas por la rambla de Mácenas hacia las zonas más bajas de la costa mediterránea.

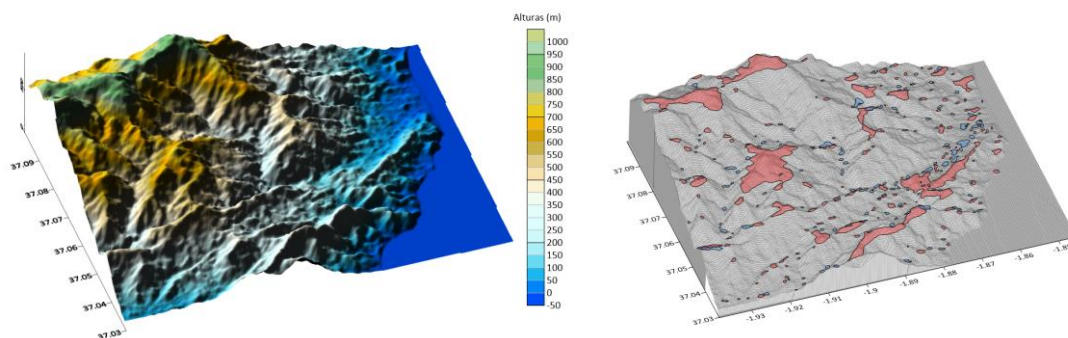


Figura 28: a) Mapa 3D de la región de Carboneras b) Análisis de cuencas, en azul microcuencas y en rojo picos divisorios.

En los carbonatos al norte, las aguas vierten hacia el noroeste, mientras que en la porción más occidental vierten hacia el oeste siguiendo la dirección predominante de las pendientes.

Tanto el mapa de aspecto del relieve como el de sombras (Figuras 29 b y c) permiten observar como el relieve puede estar condicionando la identificación de zonas de alteración. El relieve, produce zonas de sombras o “píxeles oscuros” que pueden ser clasificados erróneamente.

4.6 Mapa de alteraciones hidrotermales.

Luego de evaluar las distintas técnicas procesamiento aplicadas a las imágenes multispectrales ASTER, se propone el siguiente mapa de alteraciones hidrotermales para la región de Carboneras (Figura 31).

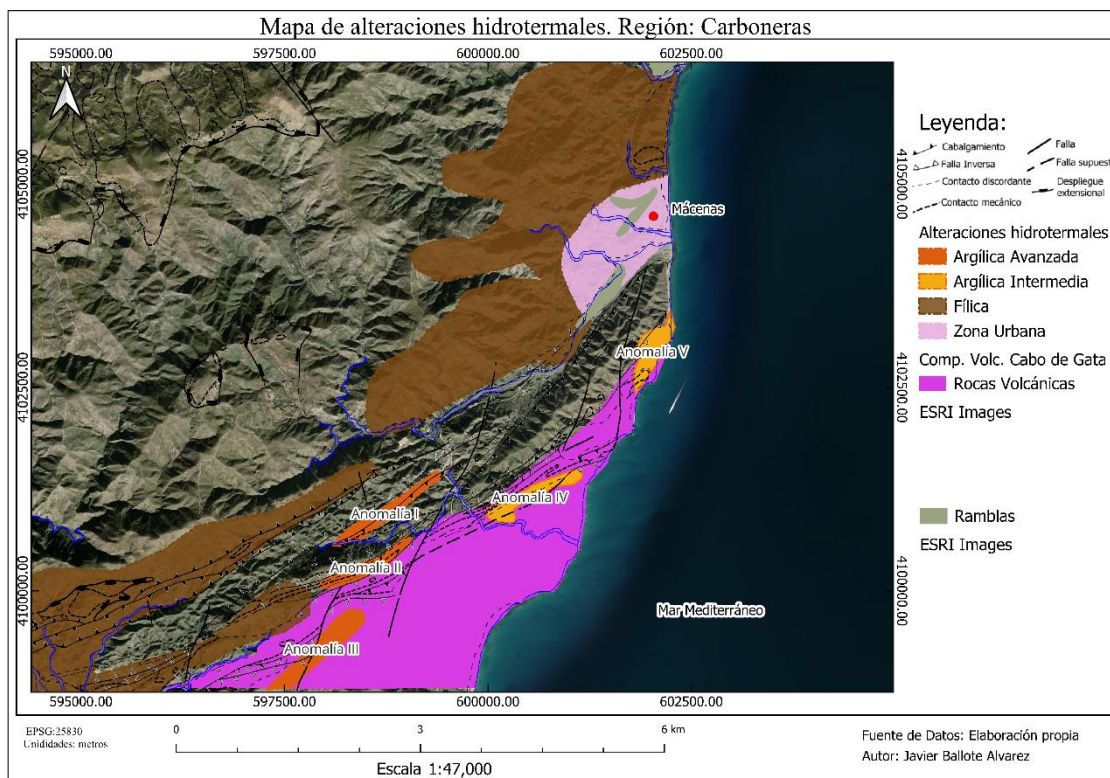


Figura 29: Mapa de alteraciones hidrotermales en la Falla de Carboneras.

Los depósitos minerales generalmente ocurren a lo largo o adyacentes a estructuras geológicas y suelen presentar fuertes alteraciones en la superficie, siguiendo esta premisa, se pudieron identificar cinco anomalías de interés exploratorio en la región de Carboneras:

- **Anomalía I:** Probable zona de alteración argílica avanzada. Se localiza en el centro de la Falla Carboneras con dirección SW-NE, coordenadas de referencia: 598716, 4100976 (EPSG:25830), se encuentra relativamente cerca de Sopalmo. Constituye la anomalía de mayor intensidad en el área e interés para la exploración geológica. Aparece identificada por diferentes técnicas e índices: KLI, OH_b, RGB: ALI-KLI-SI, ACP, ACPS, ACPOO, MNF, MTMF, CEM. Índice alunita y caolinita, RGB: 3-2-1, RGB: 4-6-8, RGB: 6-2-1.
- **Anomalía II:** Probable zona de alteración argílica avanzada. Dirección SW-NE. Coordenadas de referencia: 598507, 4100251 (EPSG:25830). Identificada por: KLI, ACP, ACPOO, MNF, MTMF, Índice alunita y caolinita, RGB: 3-2-1, RGB: 4-6-8 y RGB: 6-2-1.
- **Anomalía III:** Probable zona de alteración argílica avanzada. Dirección SW-NE. Coordenadas de referencia: 597933, 4099266 (EPSG:25830). Cartografiada por: KLI, ACP, ACPOO, MNF y MTMF

- **Anomalía IV:** Probable zona de alteración argílica intermedia. Dirección SW-NE. Coordenadas de referencia: 600507.3, 4101173.3 (EPSG:25830). Identificada por las siguientes técnicas: KLI, OHI_b, ACP, ACPS, ACPOO, MNF, MTMF, LSU, RGB:12-5-3 y RGB:4-6-1
- **Anomalía V:** Probable zona de alteración argílica intermedia. Dirección S-N. Coordenadas de referencia: 602040.2, 4103043.7 (EPSG:25830). Aparece identificada por los índices y técnicas: KLI, OHI_b, ACP, ACPS, ACPOO, MNF, MTMF, LSU, RGB:12-5-3 y RGB:4-6-1.

La identificación de rocas de alteración hidrotermal con abundante cuarzo (alteración filica) y rocas carbonatadas también requieren atención para la exploración de depósitos minerales, dado que estas rocas pueden ser hospederas de una amplia gama de tipos de depósitos de minerales metálicos (Pour y Hashim, 2012).

En el caso de los núcleos de *vuggy silica*, tal como refieren Díaz (2012) y González (2012) se hace muy difícil su observación en imágenes con resolución espacial de 30 m, por lo que ha sido desestimado su localización en este análisis.

A pesar de que se ha podido distinguir clorita en las técnicas aplicadas, no ha sido identificada una zona de alteración propilítica, dado que la clorita en la región muestra un comportamiento muy correlacionado con el relieve y con los píxeles con sombras. Tampoco se puede excluir la opción de que existan zonas de alteración de este tipo en el Complejo Volcánico de Cabo de Gata

Las zonas de alteración identificadas en Carboneras no muestran una continuidad espacial conforme avanza la alteración cómo es posible observar en Rodaquilar, donde están mejor definidos los límites entre las distintas zonas. En Carboneras no se aprecian halos de alteración, sino las alteraciones se muestran de forma aislada en los alrededores de fallas y contactos geológicos. No se descarta la posibilidad de que puedan coincidir en las pequeñas anomalías identificadas varios tipos de alteración, por lo que se recomienda su estudio a mayor detalle, especialmente el caso de la anomalía I.

Conclusiones

La aplicación de los índices espectrales y las combinaciones de falso color fueron determinantes en la identificación de las zonas de alteración hidrotermal. Tomando en consideración los minerales predominantes, se pudieron cartografiar tres probables zonas de alteración hidrotermal: alteración argílica intermedia (caolinita), alteración argílica avanzada (alunita+caolinita) y alteración fílica (cuarzo-sericita). En el caso particular de la alteración fílica, tiene una alta correspondencia con la dirección preferencial de la Falla Carboneras (suroeste-noreste).

Los índices Ninomiya (2004): ALI, KLI, CLI, OHI_a, OHI_b, SI y QI, junto con los índices aplicados por González (2012), Díaz (2012) y los recomendados por Kalinowski y Oliver (2004), para la zona fílica y la zona argílica avanzada, son los que mejores resultados brindaron. La combinación de falso color 12-5-3 es un excelente delimitador para la región de estudio, en cambio, otras combinaciones como 4-6-8, 4/5- 4/7-3/1 y 4/6-4/7-31, que han sido empleadas con éxito, tanto en Rodalquilar como en otros yacimientos epitermales o de pórfidos, no proporcionan los resultados esperados en Carboneras.

A pesar de que el paisaje sur almeriense es una zona de escasa vegetación, el NDVI se utilizó para discriminar las zonas de mayor vegetación, donde los píxeles pueden estar contaminados por la misma y generar falsas anomalías. Se identificaron pequeños valles donde había vegetación y zonas de humedad donde los índices espectrales generaban falsas anomalías.

Dentro de las técnicas de Análisis de Componentes Principales, la técnica de Cròsta (ACPOO) en la variante 1 (Cròsta *et al.*, 2003; Rigol y Chica-Olmo, 2005), es la más resolutive para la definición de las zonas de alteración en la región de Carboneras. Los juegos de bandas empleados son: alunita (1-3-5-7), caolinita (1-4-6-7), illita (1-3-5-6), caolinita-smectita (1-4-6-9).

La técnica MNF, en sus tres primeras componentes, logran delimitar lo que, a priori, se identificaron como zonas de alteración: argílica intermedia, argílica avanzada y fílica, a pesar, de que no pudieron identificarse píxeles puros. La técnica MNF aún cuando no se pueda afirmar categóricamente que son zonas de alteración hidrotermal, si delimita muy bien estas zonas, por tanto, si se puede afirmar que existen diferencias espectrales entre las diferentes áreas

Atendiendo a la resolución espectral, espacial y radiométrica de la plataforma satelital ASTER, junto a la intensidad de las alteraciones en la región de Carboneras, se puede concluir que las técnicas de desmezcla parcial (LSU y CEM) y los métodos de ajuste de forma (SAM, MF y MTMF) no aportan información adicional a la cartografía de las zonas de alteración. Solo las técnicas de filtro combinado (MF) y Separación Espectral Lineal (LSU), logran

zonificar partes de ellas. La principal causa, además de las limitaciones de las imágenes ASTER frente a las imágenes hiperespectrales, es que las firmas espectrales disponibles son muestras tomadas en laboratorio y en la naturaleza no es usual encontrar superficies extensas con presencia de un solo tipo de mineral. Entonces, se debe tomar en cuenta las mezclas espectrales que se puedan dar en la superficie terrestre. En las clasificaciones se obtienen mejores resultados cuando se utilizan librerías espectrales elaboradas a partir de muestras de rocas y minerales de la región de estudio, lo cual posibilita que los resultados se ajusten mejor a las condiciones del sitio.

La región de Mácnas debe ser analizada con cautela, pues es una zona que puede estar marcada por un fuerte contenido antrópico. La anomalía en forma de “Y invertida” es la Rambla de Mácnas, que se ubica en la misma localidad, varias técnicas de procesamiento resaltan acumulación de minerales de alteración hidrotermal, sin embargo, al observar la red de drenaje, se distingue como la red de drenaje puede estar falseando los datos. En este sentido, los análisis de la red de drenaje y de microcuencas hidrográficas, añaden un criterio geomorfológico a la interpretación, pues permiten analizar de forma más integral el contexto geológico donde se desarrollan las alteraciones hidrotermales. Las zonas de alteración pueden interpretarse erróneamente si no se considera la ubicación que tienen en el relieve regional. Si la locación coincide con la dirección de vertido y acumulación de las aguas, puede darse el caso que sea causada por la erosión de rocas aguas arriba, por esto, se debe acompañar la interpretación de imágenes satelitales con prospecciones geológicas de campo con el objetivo de identificar el origen de las zonas de alteración y donde es más factible que se encuentren mineralizaciones de interés económico.

El MDE, también permitió identificar las zonas con “píxeles oscuros” donde es más probable encontrar errores en la interpretación de índices y clasificaciones. El relieve abrupto del territorio, el ángulo del sensor y la posición relativa del sol en el momento de captura de la imagen, producen sombras en las imágenes que deben ser excluidas del análisis, aunque es cierto que existen técnicas como APC que reducen efectos de este tipo, es necesario tenerlo en consideración.

De manera general la alteración hidrotermal presente en la zona de estudio es muy inferior a la cartografiada en Rodalquilar. Las distintas técnicas empleadas, muestran pequeñas zonas con probables indicios de alteración, pero son poco significativas si se comparan con Rodalquilar en cuanto a intensidad y extensión de las anomalías.

El principal resultado de esta investigación es que a partir de las técnicas de procesamiento aplicadas a las imágenes ASTER, se pudo elaborar un mapa con las zonas de alteración hidrotermal e identificar cinco zonas de interés geológico en la región de Carboneras (Figura 31). Dichas zonas deberán ser corroboradas con un levantamiento geológico de campo. De encontrarse indicios de alteración hidrotermal, las firmas espectrales de las muestras tomadas servirán como

patrones espectrales para clasificaciones más precisas de las zonas de alteración en la región de Carboneras.

Recomendaciones

- Aplicar los algoritmos de clasificación de desmezcla parcial y los métodos de ajuste de forma a imágenes hiperespectrales. Para mayor precisión se recomienda realizar un levantamiento geológico que incluya toma de muestras en campo con un espectrómetro de precisión y realizar un estudio petro-mineralógico para validar las zonas de alteración hidrotermal propuestas en el presente estudio. Valorar las potencialidades de aplicar otras técnicas de Machine Learning como Random Forest (RF), *Support Vector Machine* (SVM), y Fuzzy Inference System (FIS).
- Utilizar la información geoquímica y geofísica disponible en los archivos geológicos, como complemento a esta investigación. El uso combinado de varias técnicas de exploración ha dado excelentes resultados en la cartografía de las zonas de alteración hidrotermal y permite disminuir la ambigüedad que pueda existir en la interpretación.
- En próximos estudios se recomienda crear máscaras para identificar y excluir áreas de sombra o píxeles oscuros, así como de vegetación.

Referencias

- Abera, M. G. (2019). Characterization of rock samples using SWIR-LWIR hyperspectral imaging techniques – an example of the high sulfidation epithermal system of Rodalquilar, southeast Spain. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente.
- Abdeen, M.; EL-Kazzaz, Y. A.; Attia, G. M.; Yehia, M. A.; Hassan, S. M. (2009). Mapping geological structures in Wadi Ghoweiba area, northwest Gulf of Suez, Egypt, using ASTER-SPOT data fusion and ASTER DEM. *Egypt. J. Remote Sensing & Space Sci.*, V.12, pp. 101-126 .
- Abrams, M; Yamaguchi, Y (2019). Twenty Years of ASTER Contributions to Lithologic Mapping and Mineral Exploration. *Remote Sens.* 2019, 11, 1394; doi:10.3390/rs11111394
- Adiri, Z.; El Harti, A.; Jellouli, A.; Maacha, L.; Azmi, M.; Zouhair, M.; Bachaoui, E. M. (2018): Mineralogical mapping using Landsat-8 OLI, Terra ASTER and Sentinel-2A multispectral data in Sidi Flah-Bouskour inlier, Moroccan AntiAtlas, *Journal of Spatial Science*, DOI: 10.1080/14498596.2018.1490213
- Aldaya, F; García-Dueñas, V.; Navarro-Vila, F. (1979). Los mantos alpujárrides del tercio central de las Cordilleras Béticas. Ensayo de correlación tectónica de los alpujárrides. *Acta Geol. Hispanica.*, 14: 154-166.
- Amer, R.; Kusky, T.; Ghulam, A (2010). Lithological mapping in the Central Eastern Desert of Egypt using ASTER data. *Journal of African Earth Sciences* 56 (2010) 75–82. doi:10.1016/j.jafrearsci.2009.06.004
- Arribas, A., Cunningham, C.G., Rytuba, J.J., Rye, R.O., Kelly, W.C., Podwysocki, M.H., McKee, E.H. and Tosdal, R.M. (1995). Geology, geochronology, fluid inclusions, and isotope geochemistry of the Rodalquilar gold alunite deposit, Spain. *Economic Geology*, 90, 795-822.
- Aboelkhair, H., Ibraheem, M.; El-Magd, I.A (2021). Integration of airborne geophysical and ASTER remotely sensed data for delineation and mapping the potential mineralization zones in Hamash area, South Eastern Desert, Egypt. *Arab J Geosci* 14, 1157 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07471-y>
- Bakardjiev, D.; Popov, K (2015) ASTER spectral band ratios for detection of hydrothermal alterations and ore deposits in the Panagyurishte Ore Region, Central Srednogie, Bulgaria. *Review of the Bulgarian Geological Society*, vol. 76, part 1, 2015, p. 79–88
- Bendini, E. (2019). Application of WorldView-3 imagery and ASTER TIR data to map alteration minerals associated with the Rodalquilar golddeposits, southeast Spain. *Advances in Space Research*, Vol 63. 3346-3357. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.01.047>
- Bedini, E.; van der Meer, F.; van Ruitenbeek, F., (2009). Use of HyMap imaging spectrometer data to map mineralogy in the Rodalquilar caldera, southeast Spain. *Int. J. Remote Sens.* 30, 327–348.
- Bedini, E (2005), Mapping minerology in the Rodalquilar Caldera, Spain with airborne Image Spectrometer Data using Spectral Information Divergence and Multiple Endmember Spectral Mixture Models. Master grade Thesis. International Institute for Geo Information Sciene and Earth Observation Enschede, The Netherlands
- Boardman, J.W., (1998). Leveraging the high dimensionality of AVIRIS data for improved sub-pixel target unmixing and rejection of false positives: mixture tuned matched filtering. *Summaries of the Seventh Annual JPL Airborne Geoscience Workshop*, Pasadena, CA, p. 55
- Boardman, J. W., Kruse, F. A., Green, R. O. (1995). Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. *Proceedings of the Fifth JPL Airborne Earth Science workshop*. JPL Publication, Vol. 95-01 (pp. 2326). Pasadena, Calif.: Jet Propulsion Laboratory.
- Boardman, J.W., (1993). Automated Spectral Unmixing of AVIRIS Data Using Convex Geometry Concepts: in *Summaries, Fourth JPL Airborne Geoscience Workshop*.
- Berrios Toro, D. A. (2020) Alteración hidrotermal en el sector Las Amarillas, Valle del Río Volcán, Región Metropolitana, Chile. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología.

- Braga Alarcón, J. C. (2007). Geología del entorno árido Almeriense. Guía didáctica de campo. Supervisor Científico. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. ISBN: 84-933537-0-1.
- Carrillo-Rosua, F. J., Morales Ruano, S.; Fenoll Hach-Alí (2002). The three generations of gold in the Palai-Islica epithermal deposit, southeastern Spain. *The Canadian Mineralogist*. Vol. 40, pp. 1465-1481 (2002). <https://www.researchgate.net/publication/228826286>
- Cardoso-Fernandes, J.; Teodoro, A.; Lima, A.; Perrotta, M.; Roda-Robles, E (2020). Detecting Lithium (Li) Mineralizations from Space: Current Research and Future Perspectives. *Appl. Sci.*, 10, 1785; doi:10.3390/app10051785
- Carmona Juárez, L. (2022) Mapping mineralogy in the Rodalquilar caldera, Spain, using prisma satellite image. Faculty of Geosciences of Utrecht University in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Earth Structure and Dynamics.
- Camprubí, A.; Albinson, T. (2006) Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen Conmemorativo del Centenario. Revisión de Algunas Tipologías de Depósitos Minerales de México. Tomo LVIII, Núm. 1, P. 27-81
- Camprubí, A., González-Partida, E., Levresse, G., Tritlla, J., CarrilloChávez, A., (2003). Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 56, 10-18
- Carranza, E.J.M., van Ruitenbeek, F.J.A., Hecker, C., van der Meijde, M., van der Meer, F.D., (2008). Knowledge-guided data-driven evidential belief modeling of mineral prospectivity in Cabo de Gata, SE Spain. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 10, 374–387.
- Chávez, P.S. Jr., Kwarteng, Y.A., (1989). Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using Selective Principal Component Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55, 339–348
- Chen, H. (2023). Application of remote sensing techniques in lithology identification in Almeria. Proceedings of the 3rd International Conference on Materials Chemistry and Environmental Engineering DOI: 10.54254/2755-2721/7/20230469
- Chen, Q., Zhao, Z., Zhou, J., Zhu, R., Xia, J., Sun, T., Zhao, X., Chao, J., (2022). ASTER and GF-5 Satellite Data for Mapping Hydrothermal Alteration Minerals in the Longtoushan Pb-Zn Deposit. SW China. *Remote Sens.* 14, 1253. <https://doi.org/10.3390/rs14051253>
- Chen, Q.; Zhao, Z.; Zhou, J.;vZeng, M.; Xia, J.; Sun, T.; Zhao, X. (2021) New Insights into the PulangvPorphyry Copper Deposit in Southwest China: Indication of Alteration Minerals Detected Using ASTER and WorldView-3 Data. *Remote Sens.* 2021, 13, 2798. <https://doi.org/10.3390/rs13142798>.
- Chica-Olmo, M., Abarca, F., Rigol, J.P., (2002). Development of a decision support system based on remote sensing and GIS techniques for gold-rich area identification in SE Spain. *Int. J. Remote Sens.* 23, 4801–4814
- Contreras Acosta, I. C., (2016). Mapping Epithermal alteration mineralogy with high spatial resolution hyperspectral imaging of rocks samples. Faculty of Geosciences of Utrecht University in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Earth Structure and Dynamics.
- Corbett, G.J., Leach, T.M., (1998), Southwest Pacific rim gold-copper systems: Structure, alteration and mineralisation: Society of Economic Geologists, Special Publication, 6, 238 p.
- Crósta, A. P., Moore, J. M., (1989). Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State Brazil: a prospecting case history in greenstone belt terrain. Proceedings of the 9th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, Calgary (Ann Arbor, MI: Environmental Research Institute of Michigan), pp. 1173–1187.
- Crósta, A. P., Moore, J. M. (1989b). Geological mapping using Landsat Thematic Mapper imagery in Almeria Province, south-east Spain. *International Journal of Remote Sensing*, 10(3), 505–514. doi:10.1080/01431168908903888
- Crósta, A.P., Filho, C.R.S., Azevedo, F., Brodie, C., (2003). Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *Int. J. Remote. Sens.* 24, 4233–4240.

- Cudahy, T.J., (2016). Mineral mapping for exploration: an Australian journey of evolving spectral sensing technologies and industry collaboration. *Geosciences* 6, 52.
- Dai, J., Qu, X., Song, Y. (2017). Porphyry Copper Deposit Prognosis in the Middle Region of the Bangonghu-Nujiang Metallogenic Belt, Tibet, Using ASTER Remote Sensing Data. *Resource Geology*, 68(1), 65–82. doi:10.1111/rge.12154
- Debba, P., Carranza, E.J.M., Stein, A., Meer, F.D., (2009). Deriving optimal exploration target zones on mineral prospectivity maps. *Math. Geosci.* 41, 421–446.
- Debba, P., van Ruitenbeek, F.J.A., van der Meer, F.D., Carranza, E.J.M., Stein, A., (2005). Optimal field sampling for targeting minerals using hyperspectral data. *Remote Sens. Environ.* 99, 373–386
- Díaz, K. (2012). Análisis de los sistemas Landsat ETM+ y Terra ASTER como método de prospección de yacimientos epitermales. EL caso del depósito aurífero de Rodalquilar, Almería. Universidad Internacional de Andalucía.
- Ducart, D. F.; Penteado Crósta, A.; de Souza Filho, C. R. (2005). Discriminación de minerales de alteración hidrotermal mediante la clasificación espectral de imágenes ASTER: Los Menucos, Río Negro.XVI Congreso Geológico Argentino - Simposio Internacional Avances de la Teledetección en Geología, 2005, La Plata. Actas del XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata: Editorial Universitaria de La Plata.
- Duran Valsero J.J.; Nuche del Rivero R. (Editores), (1999). Patrimonio Geológico de Andalucía. Enresa. 1999; 357 pp. <http://info.igme.es/ielig/LIGInfo.aspx?codigo=GRs006>
- El Galladi, A; S. Araffa, M. Mekki et al. Egypt. J. (2022). Exploring mineralization zones using remote sensing and aeromagnetic data, West Allaqi Area, Eastern-Desert, Egypt. *Remote Sensing Space Sci.* 25 417–433
- Elizalde Guerrero, J. D.; Camus Contreras, E.; Veloso Espinosa, E. A.; Aron, F.; Morata Céspedes, D (2018). Identificación espectral de áreas con potencial de alteración hidrotermal utilizando imágenes ASTER en el Campo Geotérmico Licancura, Norte de Chile. *Memorias del XXV Congreso Anual – Morelia, Mich.*
- Espinoza Sánchez, A. (2020), Apuntes de Yacimientos Magmático-Hidrotermales para el curso de Metalogenia de la Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería
- El Janati, M.; Soulaïmani, A.; Admou, H.; Youbi, M.; Hafid, A.; Hefferan, K. (2014) Application of ASTER remote sensing data to geological mapping of basement domains in arid regions: A case study from the Central. Anti-Atlas, Iguerda inlier, Morocco. *Arab. J. Geosci.* 2014, 7, 2407–2422.
- El-Raouf, A.A.; Doğru, F.; Azab, I.; Jiang, L.; Abdelrahman, K.; Fnais, M.S.; Amer, O. (2023). Utilizing Remote Sensing and Satellite-Based Bouguer Gravity data to Predict Potential Sites of Hydrothermal Minerals and Gold Deposits in Central Saudi Arabia. *Minerals* 2023, 13, 1092. <https://doi.org/10.3390/min13081092>
- Gabr, S., Ghulam, A., Kusky, T., (2010). Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data. *Ore Geol. Rev.* 38, 59–69
- Galvao, L.S., Filho, R.A., Vitorello, I., (2005). Spectral discrimination of hydrothermally altered materials using ASTER short-wave infrared bands: evaluation in a tropical savannah environment. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 7, 107–114.
- García-Cortés, A., (2011). Cartografía de recursos minerales de Andalucía (ed. Ppal). Madrid: Instituto Geológico y Minero de España; Consejería de Economía, Innovación y Ciencia de la Junta de Andalucía, 2011.
- Geng, X.; Yang, W.; Ji, L.; Wang, F.; Zhao, Y. (2017). The match filter (MF) is always superior to constrained energy minimization (CEM), *Remote Sensing Letters*, 8:7, 696–702, DOI: 10.1080/2150704X.2017.1312616
- Green, A.A., Berman, M., Switzer, P., Craig, M.D., (1988). A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 26 (1), 65–74
- Guha, A.; Kumar, K.; Rao, E.; Parveen, R. (2014). An image processing approach for converting ASTER derived spectral maps for mapping Kolhan limestone, Jharkhand, Indian. *Curr. Sci.*, 106, 40–49.
- Gil de la Iglesia, A. (2008). Estudio de fallas activas en la Cordillera Bética Oriental entre 3°-0° O y 36°30'- 38°30'N. Departament de Geodinàmica i Geofísica. <https://www.researchgate.net/publication/37911297>

- González, F., (2012) *Aportaciones de la teledetección multiespectral a la exploración minera. El caso del depósito epitermal aurífero de Rodalquilar, Almería*. Curso de especialista en SIG y Teledetección. Universidad de Castilla La Mancha.
- Goodarzi Mehr, S.; Ahadnejad, V.; Ali Abbaspour, R.; Hamzeh, M. (2013) Using the mixture-tuned matched filtering method for lithological mapping with Landsat TM5 images, *International Journal of Remote Sensing*, 34:24, 8803-8816. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2013.853144>
- Harsanyi, J.C., Farrand, W.H., Chang, C.I., (1994). Detection of subpixel signatures in hyperspectral image sequences. *Proceedings of 1994 ASPRS Annual Conference*, Reno, Nevada, pp. 236–247
- Harsanyi, J. C. (1993). Detection and classification of subpixel spectral signatures in hyperspectral image sequences. Ph. D. thesis, University of Maryland
- Hedenquist, J.W., (1987), Mineralization associated with volcanic-related hydrothermal systems in the Circum-Pacific Basin, en *Transactions 4th Circum Pacific Energy and Mineral Resources Conference*, Singapore, 1-26
- Hosseini, M.; Tangestani M. H. (2011). Mapping alteration minerals using sub-pixel unmixing of ASTER data in the Sarduyeh area, SE Kerman, Iran, *International Journal of Digital Earth*, 4:6, 487-504. <http://dx.doi.org/10.1080/17538947.2010.550937>
- Hotelling, H. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *J. Educ. Psychol.* 1933, 24, 417–441.
- IGME (1975), Mapa Geológico de España 1:50 000. Hoja SORBAS No.1031. Ministerio de Industria.
- Nasiri Khaneghah, A.; Arfania, R. (2017) Lithological Analysis of Nain Ophiolitic Zone Using ASTER Data. *Open Journal of Geology*, 7, 1200-1214. <https://doi.org/10.4236/ojg.2017.78080>
- Meyer, C., Hemley, J. (1967). *Wall Rock Alteration. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Hubert L. Barnes (1st ed.). Rinehart and Winston Inc. Publication, 166-235 p. Citado por Berrios (2020)
- Navarro, A. (2015). Minas de oro de Sierra Almagrera: datos históricos y características de las mineralizaciones. Dep. Mec. de Fluidos. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial y Aeronáutica(etseiat). Universidad Politécnica de Cataluña (UPC),
- Ninomiya, Y (2004). Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data. *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VII*, edited by Roland Meynart, Steven P. Neeck, Haruhisa Shimoda, Joan B. Lurie, Michelle L. Aten, *Proceedings of SPIE Vol. 5234* (SPIE, Bellingham, WA, 2004). doi: 10.1117/12.511902
- Ninomiya, Y.; Fu, B. (2016). Regional Lithological Mapping Using ASTER-TIR Data: Case Study for the Tibetan Plateau and the Surrounding Area. *Geosciences* 2016, 6, 39.
- Orellana Rodríguez, N. M. (2022) Caracterización de alteraciones hidrotermales según: geoquímica y mapeo geológico de sondajes, del yacimiento vetiforme de Cu-Co del proyecto minero Las Cobalteras, región de Atacama, Chile. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología.
- Kalinowski, A., Oliver, S. (2004). *ASTER Mineral Index Processing Manual*. Australian Government. Geoscience Australia. Website: http://www.ga.gov.au/image_cache/GA7833.pdf
- Parakha, K.; Thakura, S.; Chudasama, B.; Tirotkara, S.; Porwala, A.; Bhattacharyya, A. (2016) Machine learning and spectral techniques for lithological classification. *Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Remote Sensing Technology, Techniques and Applications VI*, edited by Allen M. Larar, Prakash Chauhan, Makoto Suzuki, Jianyu Wang, *Proc. of SPIE Vol. 9880*, 98801Z 2016 SPIE · CCC code: 0277-786X/16/\$18 · doi: 10.1117/12.2223638.
- Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., Boardman, J.W., Heidebrecht, K.B., Shapiro, A.T., Barloon, P.J., Goetz, A.F.H., (1993). The spectral image-processing system (SIPS)—interactive visualisation and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment* 44, 145–163.
- Pearson, K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *Philos. Mag.* 1901, 2, 559–572.
- Pirajno, (2009) *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*, Springer, Berlin, 2009, 1250 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-8613-7>

- Pour, A. B; Hashim, M (2012). The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Reviews* 44 (2012) 1–9. doi:10.1016/j.oregeorev.2011.09.009
- Quang Hung, H. (2010). Methodology for quantifying the usefulness of remotely sensed data in studying geology, a case study in the Cabo de Gata, southeast Spain. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation.
- Rajendran, S.; Hersi, O.; Al-Harthy, A.; Al-Wardi, M.; El-Ghali, M.; Al-Abri, A (2011). Capability of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer (ASTER) on discrimination of carbonates and associated rocks and mineral identification of eastern mountain region (Saih Hatat window) of Sultanate of Oman. *Carbonates Evaporates* 2011, 26, 352–364.
- Rajendran, S.; Nasir, S (2014) ASTER spectral sensitivity of carbonate rocks Study in Sultanate of Oman. *Adv. Space Res.*, 53, 656–673.
- Rigol Sánchez, J.P., Chica-Olmo, M., Abarca-Hernandez, F., (2003). Artificial neural networks as a tool for mineral potential mapping with GIS. *Int. J. Remote Sens.* 24, 1151–1156.
- Rigol Sánchez, J. y Chica-Olmo, M (2005). Cartografía de minerales de alteración hidrotermal en el área de Cabo de Gata, Almería, mediante imágenes ASTER. XI Congreso Nacional de Teledetección, Puerto de la Cruz. Tenerife.
- Rodríguez-Galiano, V., Sanchez-Castillo, M. Chica-Olmo, M.; Chica-Rivas, M. (2015). Machine learning predictive models for mineral prospectivity: An evaluation of neural networks, random forest, regression trees and support vector machines, *Ore Geol. Rev.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.01.001>.
- Rowan, L. C.; Schmidt, R. G.; Mars, J. C (2006). Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data. *Remote Sensing of Environment* 104 (2006) 74–87. doi:10.1016/j.rse.2006.05.014
- Rowan, L.; Mars, J. (2003). Lithological Mapping in the Mountain Pass, California Area Using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 84, No. 3 :350-366.
- Sabins, F.F., (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews* 14, 157–183.
- Safari, M.; Maghsoudi, A.; Beiranvand Pour, A. (2017): Application of Landsat-8 and ASTER satellite remote sensing data for Porphyry copper exploration: a case study from Shahr-e-Babak, Kerman, south of Iran, Geocarto International, DOI: 10.1080/10106049.2017.1334834
- Sanz de Galdeano, C. (2022) Discussion on the differentiation of tectonic units in the Alpujarride Complex (Betic Cordillera). *Estudios Geológicos* 79(1): e151. <https://doi.org/10.3989/egeol.44907.627>
- Sillitoe, R.H., (1977), Metallic mineralization affiliated to subaerial volcanism: a review, en *Volcanic processes in ore genesis*: Institution of Mining and Metallurgy-Geological Society of London, 99-116.
- Tangestani, M. H., Mazhari, N., Agar, B., & Moore, F. (2008). Evaluating Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data for alteration zone enhancement in a semi-arid area, northern Shahr-e-Babak, SE Iran. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 29, No. 10, 2833-2850.
- Testa, F. J.; Villanueva, C.; Cooke, D. R.; Zhang, L.; (2018). Lithological and Hydrothermal Alteration Mapping of Epithermal, Porphyry and Tourmaline Breccia Districts in the Argentine Andes Using ASTER Imagery. *Remote Sens.* 2018, 10, 203; doi:10.3390/rs10020203
- Tommaso, I.; Rubinstein, N. (2007) Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geol. Rev.*, 32, 275–290
- Townley, B. (2001). Metalogénesis: Hidrotermalismo y Modelos de Yacimientos. INGLOMAYOR. Section C. Volume 19(2020). Page 6 of 90. ISSN 0719-7578
- Universidad de Granada (2024). Alteraciones hidrotermales. Materiales para estudiantes. <https://www.ugr.es/~minechil/epitermales.htm>. Consultado en marzo de 2024.
- Vera, J. A. (2004). Capítulo: Geología de la Cordillera Bética. *Geología de Alicante*. Alfaro, J. M. Andreu, A. Estévez, J. E. Tent-Manclús y A. Yébenes (editores) Alicante 2004, 17-36. ISBN 84-86980-07-0
- Van der Meer, F.; van der Werff, H.; van Ruitenbeek, F.;Hecker, C.; Bakker, W.; Noomen, M.; van der Meijde, J.; Carranza, J.M; de Smeth,J.; Woldai, T. (2012). Multi- and

- hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 14 (2012) 112–128
- Van der Meer, F. D., Kopačková, V., Koucká, L., Van der Werff, H. M. A., Van Ruitenbeek, F. J. A., & Bakker, W. H. (2018). Wavelength feature mapping as a proxy to mineral chemistry for investigating geologic systems: An example from the Rodalquilar epithermal system. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 237–248. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.09.008>
 - Vargas Gonzales, C. (2013). *Identificación de depósitos utilizando el sensor Aster*. *Geología Colombiana*, Vol. 38. Bogotá, Colombia. pp. 149-157
 - Zhang, X.; Zhao, Z; Chen, Q.; Chai, W.; Li, Z.; Zhang, G.; Yang, H.; Niu, L (2023). Mapping hydrothermal alteration of the Pulang porphyry copper deposit, SW China, using ASTER and ZY1-02D satellite data.