



TÍTULO

**TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL COMO APOYO A LA
CARTOGRAFÍA DEL MACIZO ULTRAMÁFICO DE OJÉN, MÁLAGA**

AUTOR

Olides López Cruz

	Esta edición electrónica ha sido realizada en 2022
Tutores	Dr. D. Fernando Gervilla Linares ; Dr. D. Felipe González Barrionuevo
Instituciones	Universidad Internacional de Andalucía ; Universidad de Huelva
Curso	<i>Máster en Geología y Gestión Ambiental de los Recursos Minerales(2020/21)</i>
©	Olides López Cruz
©	De esta edición: Universidad Internacional de Andalucía
Fecha documento	2021



**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>



Teledetección multiespectral como apoyo a la cartografía del macizo ultramáfico de Ojén, Málaga

TRABAJO PRESENTADO EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MÁSTER EN GEOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL DE LOS RECURSOS MINERALES

Autor: Olides López Cruz

Tutores: Dr. Fernando Gervilla Linares

Dr. Felipe González Barrionuevo

A mi madre y mi hermano.

Contenido

1. Introducción	5
2. Capítulo 1	7
2.1 Ubicación del área de estudio	7
2.2 Marco geológico	7
2.2.1 Geología regional	7
2.2.2 Geología del Macizo Ultramáfico de Ojén	8
2.2.2 Yacimientos minerales en el área	14
2.3 Materiales y métodos	15
2.3.1 Materiales	15
2.3.1 Métodos	19
3. Capítulo 2	24
3.1. Análisis de la vegetación y la red de drenaje	24
3.2 Análisis de curvas espectrales de minerales mayoritarios	25
3.2 Resultados y discusión	27
3.2.1. Resultados del Rationing	27
3.2.3. Resultados y discusión del análisis de Componentes Principales Orientado a Objetos	38
4. Conclusiones	41

Resumen

El área del macizo ultramáfico de Ojén se encuentra en la provincia de Málaga. Al igual que el de Ronda, el de Carratraca y el del Rif (Beni Bousera), se encuentran contenidos en las Zonas Internas de la Cordillera Bético-Rifeña. Las rocas que abundan en este macizo en general son las lherzolitas estando en algunos casos alteradas a serpentinita. Esta zona presenta una actividad minera que en los últimos años se ha enfocado en la explotación de talco. Las alteraciones presentes en el mismo han sido poco estudiadas, además de que no hay una cartografía regional de estas que permita predecir otras zonas minerales. Para esto se utilizaron imágenes satelitales procedentes de los satélites Sentinel-2 y ASTER, las que permitirían poner a prueba la resolución del método y la capacidad de cada una. Los procesamientos utilizados se basaron sobre todo en las relaciones de bandas y el Análisis de Componentes Principales. Llegándose a cartografiar los límites del macizo, las zonas de alteración regional, las zonas más afectadas por la meteorización y los límites entre las unidades presentes. Además, se logró aislar la respuesta de depósitos de talco en las imágenes satelitales, lo que permite localizar zonas que pudieran ser perspectivas para depósitos de esta materia.

Palabras clave: satélite, cartografía, rocas ultramáficas, talco

Abstract

The ultramafic massif of Ojén is located in the province of Malaga. Like the massifs of Ronda, Carratraca and Rif (Beni Bousera), this is found in the Inner Zones of the Betic-Rifeña Mountain Range. The most common rocks in this massif are lherzolites, which, in some cases, are altered to serpentinite. This area presents a mining activity focused on the exploitation of talc in recent years. The alteration present in the massif has been scarcely studied, and no regional cartographic map useful for predicting additional mineral zones have been composed so far. For this study, the cartography was done using two sets of images from the satellites Sentinel-2 and ASTER. The processes used were mainly based on Rationing and Principal Component Analysis. The images processed with these technics are able to show the cartographic limits of the massif, the regional alteration, the areas most affected by weathering and the boundaries between internal units within the massif. Additionally, it was possible to isolate the response of talc mineralizations present in the area, permitting to map potential targets of this mineral.

Keywords: satellite, mapping, ultramafic rocks, talc

1. Introducción

La teledetección es una herramienta relativamente reciente, surgida a mediados del siglo XIX, pero que tuvo un importante auge primordialmente con objetivos militares durante la Primera Guerra Mundial. La aparición de la fotografía divide la historia de la teledetección en un periodo pre- y un periodo post- soporte físico, naciendo la teledetección moderna con la fotografía aérea en el siglo XX.

El primer satélite de observación de la Tierra fue lanzado al espacio por Estados Unidos en el año 1972, iniciándose entonces las técnicas de Teledetección, poco utilizadas hasta hace unos años debido al alto coste que suponía trabajar con imágenes de satélite. Hoy en día, gracias a la disponibilidad de imágenes, al desarrollo de nuevas tecnologías y al fuerte auge de la informática, son cada vez más las empresas y organismos públicos que incorporan el uso sistemático de imágenes en sus distintos proyectos.

La posibilidad de desarrollar sensores capaces de detectar radiación electromagnética en otras longitudes de onda distintas del espectro visible abrió las puertas a la tecnología de los sensores multispectrales, que “combinan” imágenes en el espectro visible con las correspondientes a otras frecuencias fuera del rango visible como, por ejemplo, infrarrojo próximo, o lejano.

La teledetección consiste en la adquisición de información a pequeña o gran escala de un objeto o fenómeno sin contacto directo (de aquí viene su nombre en inglés “remote sensing”), usando tanto instrumentos de grabación como de escaneo. La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor genera una serie de datos que son procesados posteriormente para obtener información interpretable de la superficie de la Tierra. La teledetección se basa, por tanto, en tres hechos bien diferenciados: la captura de datos, la transmisión de éstos y, finalmente su análisis.

La zona estudiada es el Macizo Ultramáfico de Ojén. El clima de la zona en estudio es mediterráneo oceánico con inviernos templados y lluviosos, y veranos secos y calurosos. En cuanto a la vegetación, casi todas las asociaciones y comunidades son endémicas de sustratos serpentínicos, predominando los serpentínófitos. Estos serían plantas que han tenido que evolucionar y adaptarse a las difíciles condiciones que propone las rocas ultramáficas, lo que provocaría que la zona presentara una flora peculiar ayudando a la delimitación del macizo.

En la zona de estudio ha existido a lo largo de los años una cartografía poco orientada a la definición de zonas de alteración, solo en el mapa geológico del Instituto Geológico y Minero de España escala 1:50000, zonas que en algunos casos pueden estar relacionadas con los depósitos de talco presentes en el área. Para esto se realizará una cartografía tanto litológica como de alteraciones que pueda aportar información al conocimiento geológico de la zona y comprobar las aplicaciones de la teledetección mediante el análisis de imágenes provenientes del procesado e interpretación de bandas de satélites, que han demostrado poseer una respuesta positiva a los contrastes litológicos. Al mismo tiempo aportar información que sea de interés para la búsqueda y exploración de depósitos minerales. Para la consecución de esta investigación se plantean varios objetivos y tareas.

Objetivos:

- Comprobar la capacidad de la teledetección para cartografiar este macizo ultramáfico y por extensión otros, con características análogas.

- Comparar la capacidad de los distintos satélites y procesamientos para establecer las herramientas y técnicas más eficaces en estudios como este.
- Poder discriminar la respuesta espectral del macizo de Ojén de las rocas que lo circundan.
- Cartografiar las zonas de alteración descritas para el macizo.
- Aislar la respuesta espectral de las zonas ricas en talco, a fin de usarla para predecir posibles zonas de máxima alteración hidrotermal y, en conexión con éstas, explorar la posible existencia de yacimientos de este mineral.

Tareas:

- Descargar las imágenes satelitales para el área de estudio teniendo en cuenta las épocas más propicias en términos de baja nubosidad y escasa vegetación.
- Preprocesar estas imágenes con el fin de eliminar ruidos y trabajar con valores corregidos.
- Aplicar distintos procesamientos para resaltar la respuesta de los minerales mayoritarios presentes en el Macizo de Ojén.
- Comparar los resultados de los procesamientos con los mapas geológicos y metalogenéticos de la zona.

2. Capítulo 1

2.1 Ubicación del área de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en España dentro de la comunidad autónoma de Andalucía, específicamente en la provincia de Málaga. Abarca un total de 6 municipios, Monda, Coín, Alhaurín el Grande, Ojén, Marbella y Mijas (figura 1). El Macizo Ultramáfico de Ojén cubre la mayor parte de la Sierra de Alpujata, al Este del pueblo de Ojén, ocupando un área de 65320239 km². En general es una región poco antropizada, y escasamente vegetada, por lo que representa una zona de estudio óptima para el empleo de la teledetección con fines cartográficos.

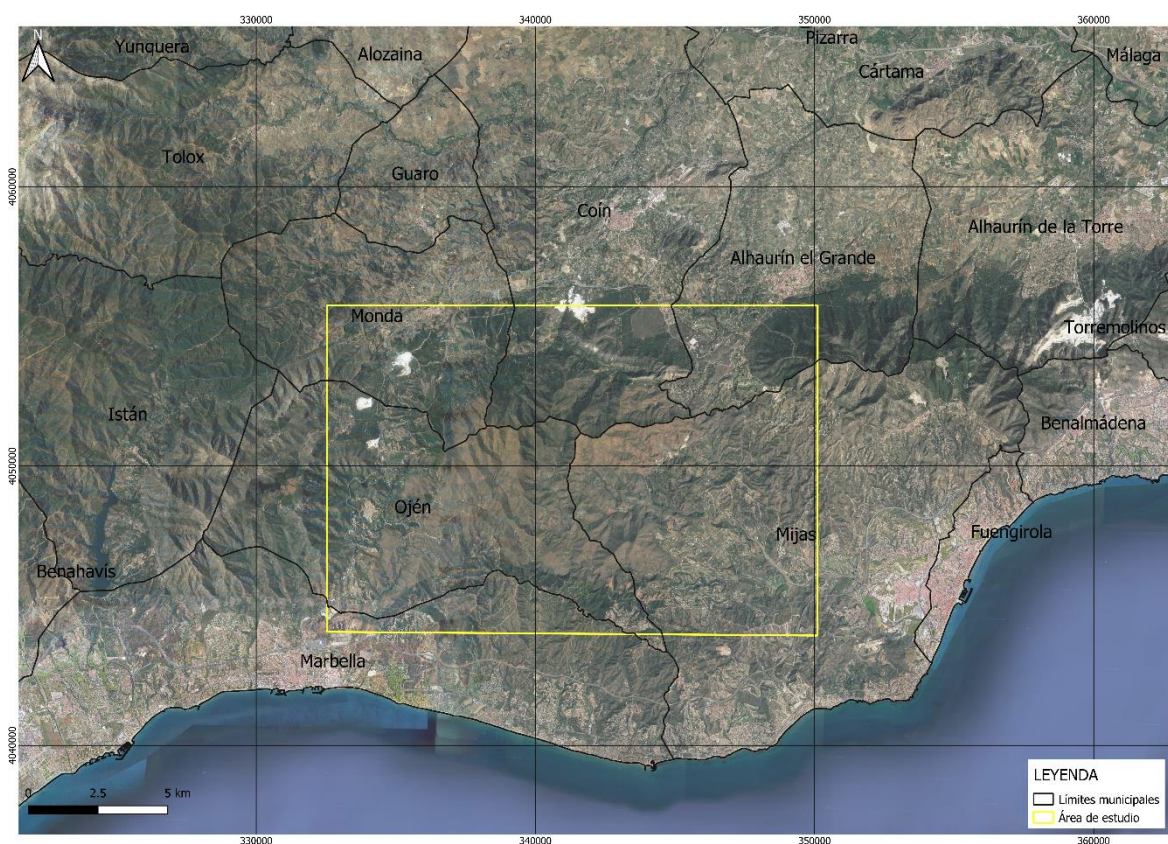


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio dentro de la provincia de Málaga.

2.2 Marco geológico

2.2.1 Geología regional

El mapa geológico de España se puede dividir en tres grandes unidades geológicas: el Macizo Ibérico, las cadenas alpinas (Cordillera Pirenaica, Cordillera Bética, Cordilleras Ibérica y Cordillera Costero-Catalana) y las Cuencas Cenozoicas (Vera, 2004).

El área de estudio se encuentra ubicada dentro de la Cordillera Bética, la cual constituye la cadena alpina más occidental de la rama europea del Orógeno Alpino Perimediterráneo. Tiene una dirección tectónica dominante (ejes de pliegues y direcciones de cabalgamiento) OSO-ENE, con vergencia hacia el NNO, que gira casi 180° al llegar a las proximidades del

Estrecho de Gibraltar (formando el Arco de Gibraltar) para continuar en África, en las cadenas norteafricanas, inicialmente en el Rif y posteriormente en el Tell, donde las vergencias son hacia el Sur.

En la Cordillera Bética se diferencian dos grandes conjuntos litológicos y estructurales: Las Zonas Externas y las Zonas Internas. Las Zonas Externas Béticas se localizan en la parte septentrional de la Cordillera y en su prolongación hacia las Islas Baleares (excluyendo Menorca). Están formadas por rocas sedimentarias del Triásico al Mioceno Inferior-Medio que se depositaron en el margen continental de la Placa Ibérica (paleomargen Sudibérico). Las Zonas Internas Béticas se localizan en la parte meridional y están constituidas por los afloramientos de rocas esencialmente metamórficas pertenecientes a un fragmento (Dominio de Alborán) de una placa (Placa Mesomediterránea) desplazado hacia el Oeste desde su posición originaria, hasta colisionar con el paleomargen Sudibérico (Vera, 2004). Las Zonas Internas se encuentran divididas en tres complejos tectónicos constituidos por varios mantos de cabalgamiento apilados:

- El complejo Nevado-Filábride: es el complejo de mantos más antiguo y aflora en ventanas tectónicas por debajo del Complejo Alpujarride. Está compuesto por tres unidades tectónicamente superpuestas: la Unidad de Veleta, compuesta por esquistos grafitosos y cuarcitas del Carbonífero Superior y las unidades de Calar Alto y Bédar-Macael, que comparten una secuencia litoestratigráfica similar. Esta secuencia está constituida por esquistos grafitosos y cuarcitas del Carbonífero Superior en la base, y hacia arriba, metapelitas y metapsammitas del Pérmico-Triásico que tienen, a techo, dolomitas y mármoles calcíticos de edad Triásico y más reciente (Martínez-Martínez y Azañón 1997). Estas dos últimas unidades también incluyen orthogneisses, gabros y rocas ultramáficas, presentando un registro de grado metamórfico mayor al de la Unidad de Veleta (Gervilla et al. 2019).
- Complejo Alpujarride: este complejo ocupa una posición intermedia en la estructura general de los diferentes complejos de las Zonas Internas. Está compuesto por unidades tectónicas (mantos de cabalgamiento) superpuestas constituidas por una secuencia litoestratigráfica similar. Cada unidad incluye una secuencia de metapelitas y cuarcitas del Paleozoico en la base, un miembro intermedio del Pérmico-Triásico Medio de filitas y cuarcitas con proporciones variables de calcoesquistos que van aumentando hacia techo, y un miembro superior compuesto por carbonatos de edad Triásico Medio-Superior (Martin-Rojas *et al.*, 2012). En las unidades Alpujarrides de la zona más occidental del Orógeno Bético, esta secuencia incluye rocas ultramáficas del manto litosférico subcontinental, entre las que se encuentra el Macizo Ultramáfico de Ojén (Gervilla et al. 2019).
- El complejo Maláguide: consiste en una secuencia metapelítica débilmente metamórfica, con intercalaciones locales de carbonatos y areniscas del Silúrico al Carbonífero, que presenta a techo una formación detrítica Permotriásica cubierta por carbonatos del Jurásico-Oligoceno (Martin-Algarra, 1987).

2.2.2 Geología del Macizo Ultramáfico de Ojén

El macizo ultramáfico de Ojén, al igual que el de Ronda, el de Carratraca y el del Rif (Beni Bousera), se encuentran contenidos en las Zonas Internas de la Cordillera Bético-Rifeña (Gervilla y Leblanc 1990). Se sitúa entre las unidades de Blanca (infrayacente) y Los Reales (suprayacente).

La Unidad de Blanca incluye una gran variedad de rocas metamórficas, que comprenden, en su parte inferior, gneises ricos en granate, intrusiones de leucogranitos, gneises migmatíticos y esquistos, y en su parte superior, una secuencia carbonatada compuesta por mármoles con intercalaciones de calcoesquistos, metapelitas, cuarcitas y anfibolitas (Tubía, *et al.* 1997).

La Unidad de Los Reales es una delgada sección de la corteza continental que se superpone a las peridotitas de Ronda. De techo a muro está compuesta por carbonatos (≤ 5 km de espesor), filitas de bajo grado con relictos de evidencias de alta presión y baja temperatura, micaesquistos grafitosos, gneises y migmatitas, y granulitas ricas en granate en contacto con las peridotitas (Platt *et al.*, 2003; Barich *et al.*, 2014). Esta secuencia exhibe una esquistosidad que es generalmente paralela a la de las peridotitas.

El Macizo Ultramáfico de Ojén está constituido por un 90-95% de peridotitas y un 5-10% de rocas máficas y diques de leucogranitos (Gervilla *et al.*, 2019). Las rocas más abundantes son las lherzolitas y las harzburgitas, con menores proporciones de dunitas (Mateo, *et al.* 1993).

En este macizo se han identificado tres dominios tectonometamórficos similares a los descritos en el Macizo Ultramáfico de Ronda (Gervilla *et al.* 2002 y 2019) (Figura 2). La zona central está constituida por tectónitas ricas en plagioclasa, flanqueadas hacia el norte y el sur por peridotitas granulares y tectónitas con espinela (incluyendo una banda exterior de milonitas con granate±espinela) (Gervilla *et al.* 2019). Esta zonación refleja la distribución geográfica de una sección mantélica en la que las tectonitas con plagioclasa representarían el tramo basal y las milonitas con granate±espinela (coronando el tramo de tectonitas con espinela) representarían el techo de la secuencia.

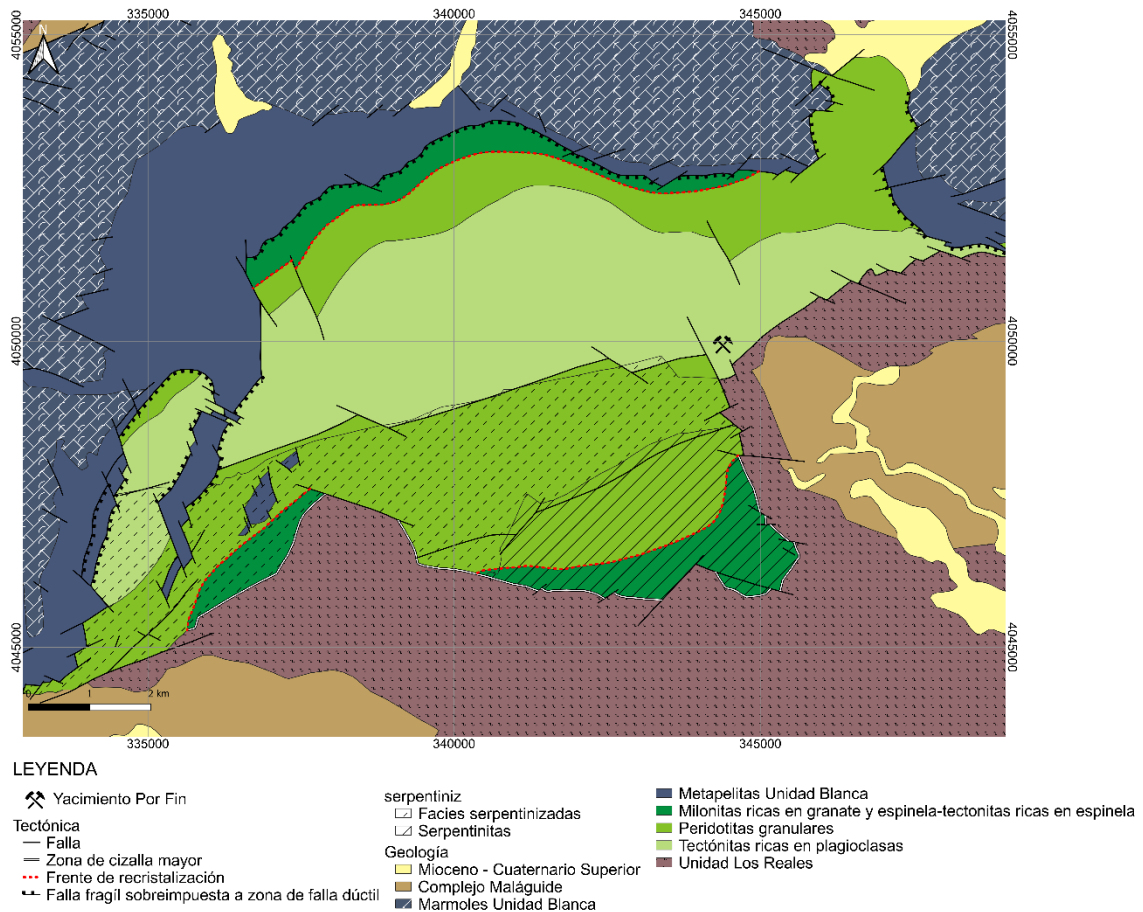


Figura 2. Mapa geológico del Macizo Ultramáfico de Ojén y áreas circundantes, basado en la zonación definida por la distribución espacial de los dominios tectonometamórficos (Gervilla et al. 2019). Se indican, además las zonas con diferentes grados de serpentización según (Pilar et al. 1993).

El dominio de tectonitas con plagioclasa está compuesto por lherzolitas ricas en plagioclasa que incluyen subdominios de harzburgitas (a menudo con textura granular) que contienen cuerpos tabulares de dunitas de extensión métrica a hectométrica. Las lherzolitas con plagioclasa presentan una textura fuertemente foliada en la que la plagioclasa envuelve y reemplaza parcialmente a los cristales de espinela (Gervilla et al. 2019).

Las peridotitas granulares flanquean y se superponen por el norte y el sur a las tectonitas con plagioclasa y no muestran signos evidentes de deformación. En un dominio equivalente a este en el Macizo de Ronda, Van der Val y Bodinier (1996) diferencian tres subdominios: 1) peridotitas granulares de grano grueso, 2) peridotitas granulares de grano fino, y 3) peridotitas granulares bandeadas. Este último subdominio se caracteriza por presentar una estratificación de lherzolitas ricas en olivino, harzburgitas, dunitas y piroxenitas en zonas ricas con lherzolitas con plagioclasa (Van Der Wal y Jean-Louis 1996; Gervilla et al. 2019). En el Macizo Ultramáfico de Ojén, el subdominio de peridotitas bandeadas define las zonas de transición entre el dominio de tectonitas con plagioclasa del centro del macizo y los afloramientos del dominio de peridotitas granulares suprayacentes situados al norte y sur. Las peridotitas granulares bandeadas evolucionan a techo, y hacia el norte y el sur de las zonas en las que afloran, hacia las peridotitas granulares de grano fino y finalmente a peridotitas granulares de grano grueso. En las primeras el olivino crece a expensas de los cristales de ortopiroxeno, los cuales muestran texturas de disolución y tamaños de grano

inferiores a 0.5cm. Las peridotitas granulares de grano grueso están compuestas esencialmente por harzburgitas ricas en ortopiroxeno, de tamaño de grano entre 0.5 y 2cm y se disponen justo por debajo de una banda de transición, de espesor variable (100-200m), que se denomina “Frente de Recristalización” (Van der Val y Visser, 1993, 1996). El frente de recristalización es interpretado como un límite térmico encima de las peridotitas granulares parcialmente fundidas. No obstante, esta disposición de los diferentes subdominios está muy comprimida en la zona norte del macizo y, hacia el sur, está fuertemente distorsionada por el conjunto de fallas que constituyen el graben central del macizo de Ojén. En esta zona, los diferentes tipos de peridotitas granulares están fracturadas, desplazadas y basculadas; a menudo, se encuentran cortadas por intrusiones de leucogranitos con los que reaccionan dando lugar a concentraciones importantes de mica.

Las tectonitas con espinela se sitúan por encima del Frente de Recristalización y afloran en dos bandas de espesor variable, en los contactos norte y sur del Macizo de Ojén (Figura 2). Este dominio está constituido por lherzolitas y harzburgitas con espinela con porcentajes significativos (~5-10%) de piroxenitas con granate. Las peridotitas muestran una intensidad de la deformación creciente hacia el techo de la sección mantélica, hacia los contactos norte y sur del macizo, hasta desarrollar una zona de milonitas con granate±espinela.

La foliación en el macizo presenta una dirección N30-80°E buzante hacia el sur, buzamiento que va aumentando hacia el contacto norte (Tubía, 1988). Las peridotitas también presentan pliegues con rumbo de N40E y vergencia hacia el noroeste, más abiertos (pliegues en rodilla) hacia la zona central y más apretados (pliegues isoclinales) hacia el contacto norte (Gervilla y Leblanc, 1990).

Se estima que la edad de las peridotitas del conjunto de macizos de la Serranía de Ronda está en torno a 1.2-1.4 Ga, momento en el cual las rocas ultramáficas habrían dejado el manto convectivo para incorporarse a la litosfera subcontinental (Gervilla et al. 2019).

El emplazamiento cortical de este macizo tuvo lugar durante la orogenia Alpina, en una fase final que alcanzó su máximo durante el Mioceno temprano (Araña y Vegas 1974; Hidas et al. 2013). El modelo geodinámico propuesto para este proceso implica el plegamiento y cizallamiento de una porción del manto litosférico, el cual tiene lugar como consecuencia de la inversión de una cuenca de antearco durante la colisión hacia el Sur del Dominio de Alborán con el paleo margen pasivo del dominio Magrebí (Hidas *et al.*, 2013). Según este modelo (figura 3) el plegamiento se inició durante la descompresión y enfriamiento del macizo desde las facies de lherzolitas con espinela hasta las lherzolíticas ricas en plagioclasas en profundidad; la parte más caliente de esta porción del manto se encontraría parcialmente fundida y quedaría por debajo del frente de recristalización (Hidas et al. 2013; Gervilla et al. 2019).

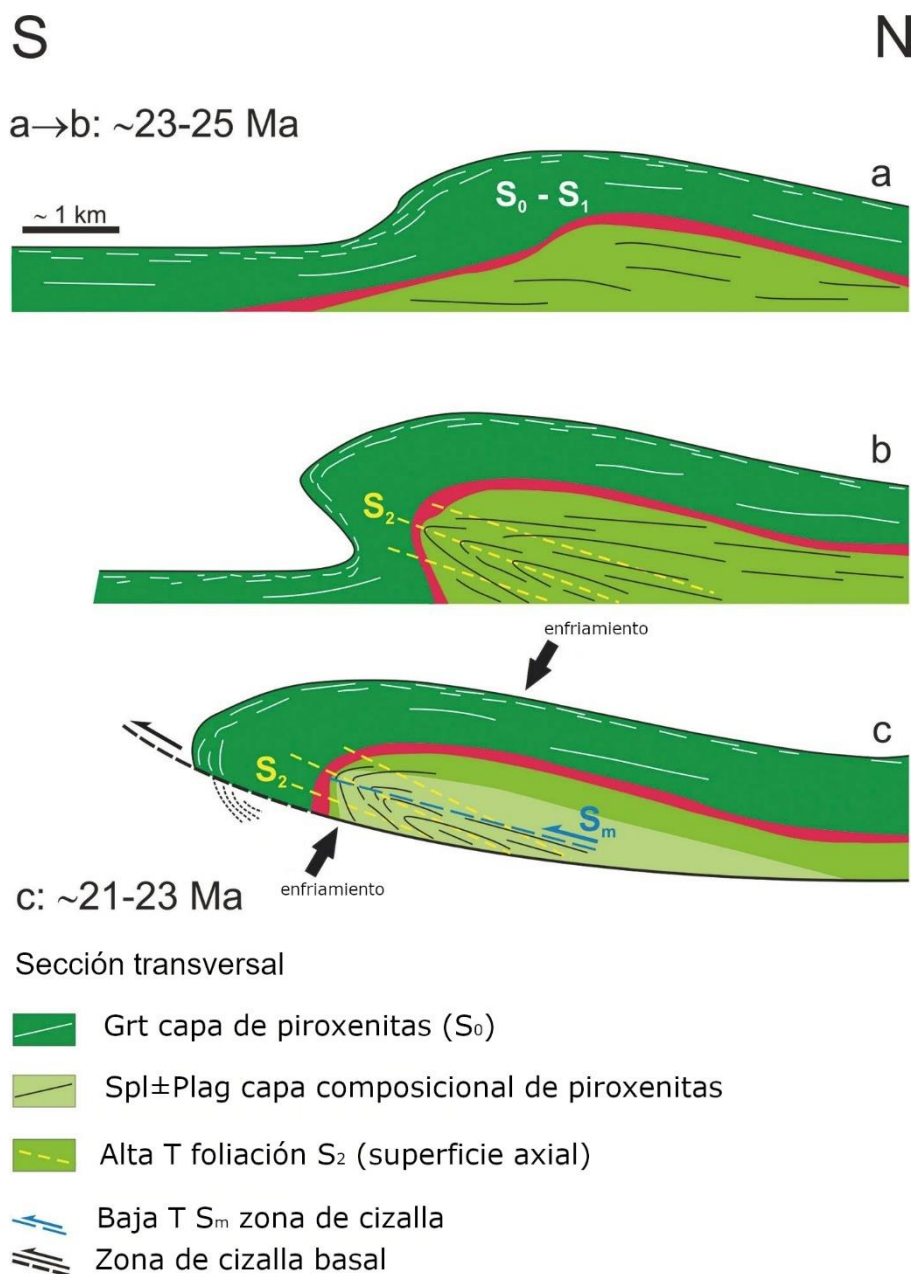


Figura 3. Escenario propuesto en sección transversal Norte-Sur para la evolución y emplazamiento cortical en el Oligo-Mioceno del macizo. Donde: S_0 : estratificación composicional, S_1 foliación de las tectonitas con espinela, S_2 : foliación de las tectonitas con plagioclasas; S_m : foliación de la zona de cizalla de baja temperatura (Gervilla *et al.*, 2019).

Estudios gravimétricos realizados en esta zona determinaron la profundidad máxima del macizo en torno a 10-12km. Este constituye un bloque de manto litosférico que se emplazó dentro de las unidades del complejo de Alpujarride (Torné *et al.*, 1992).

En el área aparecen dos direcciones preferenciales de fracturas, las ENE-OSO que son las principales y las de mayor dimensión y las de dirección NO-SE. Las primeras limitan en algunos casos los dominios tectonometamórficos cartografiados y serían las causantes de la mayor deformación y alteración de las peridotitas. Las de dirección preferente NO-SE parecen posteriores dado que localmente desplazan a las primeras.

El contacto Sur del macizo y parte del contacto Este están compuestos por fallas coincidentes en dirección con las que separan los grandes compartimentos tectónicos. Este hecho indica que las fracturas se han formado en una fase de distensión, seguramente en una etapa tardía de la Orogénesis Alpina. En los bloques levantados se puede observar la presencia de una desarrollada red de fracturas, que en el Cerro Camorro (bloque S) tiene dirección dominante N60°E, y en el bloque de los Castillejos (bloque N) una dirección dominante N-S (Mateo et al. 1993).

1.2.3 Alteración de los minerales presentes en el Macizo Ultramáfico de Ojén

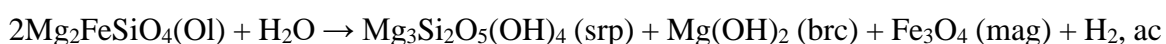
En general, el Macizo ultramáfico de Ojén se ha visto poco afectado por procesos de meteorización. En este sentido, teniendo en cuenta la Ley de Goldich por la que “la estabilidad físico-química de un mineral es función inversa de su temperatura de formación” (Goldich, 1938), el mineral más afectado por la meteorización habría de ser el olivino.

El olivino incluso en roca fresca se encuentra a menudo alterado por transformaciones magmáticas y metamórficas a ortopiroxeno o serpentina, por procesos hidrotermales a talco, y por meteorización a mezclas de filosilicatos hidratados y óxidos de hierro (Wilson, 2004). El proceso de serpentización ha sido estudiado por Klein et al., (2009), analizando esta alteración para una dunita monomineral en un sistema cerrado, a 400°C el olivino es dominante acompañado de trazas de serpentina y magnetita. A medida que disminuye la temperatura, las cantidades de serpentina y magnetita aumentan a expensas del olivino



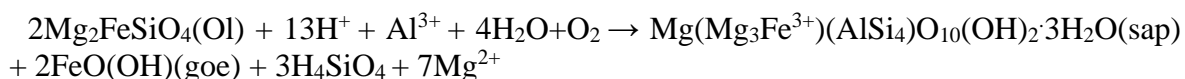
Donde: ol: olivino, ac: en solución acuosa, srp: serpentina, mag: magnetita

En esta ecuación a medida que se va formando serpentina se consume la sílice disuelta; así la actividad de la SiO₂ acuosa decae dificultando la formación de serpentina y el resto de los productos. Pero este proceso también conlleva una disminución de la temperatura que al llegar a 330°C da lugar a la descomposición total del olivino y la formación de brucita, la cual pasa a formar parte del grupo de minerales en equilibrio:



Donde: brc: brucita

Bajo los efectos de la meteorización, el olivino es alterado a “iddingsita”, un término que ha sido utilizado para describir la alteración rojiza resultado de su interacción con el agua y la atmósfera. Algunos autores presentan una definición más concisa al describirla como un intercrecimiento de goetita y esmectita (presumiblemente saponita) formado en un ambiente de oxidación rico en fluidos (Eggleton, 1984), como se puede ver en la siguiente reacción:



Donde: sap: saponita, goe: goetita

La deshidratación de la goetita formaría posteriormente hematites (Kuebler *et al.*, 2003).

Las rocas ultramáficas del Macizo de Ojén se han visto afectadas por procesos de serpentización que ocupan todo el extremo noreste del macizo, así como gran parte del

centro y del Sur. Las rocas que afloran en la zona Sur, al estar constituidas por más del 90% por serpentina se clasificadas como serpentinitas, disminuyendo su abundancia hacia el Norte. Están formada por minerales de alteración (minerales del grupo de la serpentina) y, a partir de una determinada profundidad de la superficie, desaparece totalmente para convertirse en roca fresca (Mateo et al, 1993). La serpentinización ha sido controlada por la presencia de fracturas de mesoescala, sobre todo en la zona central. La circulación de fluidos por estas redes de fracturas penetrativas produjo intensa actividad hidrotermal y la formación de depósitos de talco, asbestos y vermiculitas (Rodas et al. 1980; Luque et al. 1985; Gervilla et al., 2019). En algunos lugares esta alteración hidrotermal está relacionada con la intrusión de diques de plagiogranitos (Gervilla et al. 2019).

La compartimentación de la masa ígnea en tres bloques, según líneas de fractura N70°E. aproximadamente, ha determinado la formación de un graben, cuyo bloque hundido es el central, en el que existe un gran desarrollo de serpentinitas (Mateo et al., 1993).

2.2.2 Yacimientos minerales en el área

En el Macizo Ultramáfico de Ojén se han descrito varios depósitos de vermiculita en el Majar de la Parra, Arroyo del Laurel y Camino Forestal. La vermiculita deriva de micas trioctraedricas tipo flogopita y se presenta en serpentinitas acompañada por talco, clorita y esmectita en forma de filones (de dirección preferente E-O) y en diques que pueden llegar a tener hasta 6m de potencia (Luque et al. 1985). Los depósitos tendrían dos orígenes distintos, siendo el del Camino Forestal hidrotermal, y los del Majar de la Parra y Arroyo del Laurel producto de la meteorización de las micas formadas por la interacción entre las intrusiones leucograníticas y las peridotitas encajantes.

También se han descrito yacimientos de talco, en unos casos asociados a fracturas del contacto con gneises y pizarras arcillosas en los bordes del macizo (yacimientos Por Fin y Marina) y, en otros, formados por procesos hidrotermales desarrollados en fracturas en el interior de las masas serpentínicas (yacimientos Inesperada, Pérez-Brian, Rafaela y María del Pilar). Estos depósitos tienen en común la presencia de clorita rica en Mg y con cierta sustitución tetraédrica de Si por Al. La serpentinita es el protolito de la mineralización de talco, encontrándose ésta muy alterada a talco y clorita. Como metalotectos para este tipo de mineralización se dan las áreas serpentinizadas por autometamorfismo, fuertemente tectonizadas y con frecuentes manifestaciones ácidas.

Para los depósitos formados en el interior de la serpentina , la asociación mineral descrita por Rodas (1978) es:

1. Serpentina-clorita-(tremolita)
2. Clorita-(tremolita)-talco-magnesita-cuarzo-(calcita-dolomita)

Para los que se encuentran en contacto con serpentinas:

1. Serpentina-clorita-(tremolita)
2. Clorita-(tremolita)-talco-(cuarzo)

El macizo de peridotitas alberga, también, mineralizaciones magmáticas de Cr-Ni, (explotadas en las minas Baeza, El Lentisco, El Nebral y La Gallega) así como pequeños cuerpos de cromita. Las primeras consisten en cuerpos de cromita masiva y arseniuros de Ni \pm ortopiroxeno \pm cordierita, los cuales se presentan en forma de venas o capas concordantes

y discordantes a la foliación de las peridotitas de caja. El espesor de los cuerpos minerales individuales varía entre 5 y 70cm y se extienden lateralmente entre 20 y 50m, aunque localmente pueden alcanzar más de 100m, como se observa en la Mina La Gallega (Gervilla et al. 2019). Los cuerpos de cromitita se presentan en forma de venas y bolsadas de extensión lateral y espesor inferiores a 1,5 m y 30cm, respectivamente, y encajan en las dunitas localizadas en el dominio de tectonitas con plagioclasa.

2.3 Materiales y métodos

2.3.1 Materiales

La teledetección es la disciplina que permite la adquisición a distancia de datos de la superficie terrestre. El concepto incluye el procesamiento e interpretación de los mismos. En particular, la teledetección registra las características espectrales y texturales de los recursos, los efectos de procesos naturales y las consecuencias de actividades humanas, entre otros (Marín y Ninci 2010). El fundamento principal de la teledetección es la detección y registro de la energía electromagnética procedente de los objetos.

Existen principalmente dos clases de teledetección: teledetección pasiva y teledetección activa:

- Los sensores pasivos detectan radiación natural emitida o reflejada por el objeto o área circundante que está siendo observada. La fuente más común de esta clase es el sol a través de la radiación que emite.
- Los sensores activos por otra parte emiten energía para poder escanear objetos y áreas con lo que el posteriormente miden la radiación reflejada del objetivo. Los radares serían un ejemplo de sensor activo, midiendo el tiempo que se demora la onda en ir y volver de un punto, estableciendo así parámetros de ubicación y desplazamiento.

Los sensores mide la intensidad de la energía electromagnética después de haber sido reflejada por la superficie terrestre, o bien la intensidad de la radiación electromagnética directamente emitida por ella, convirtiendo cada medición en un pixel y su conjunto en una imagen (Pineda-Falcone *et al.*, 2017).

La energía electromagnética que es medida en los sistemas de teledetección es ondulatoria y como tal queda definida por su longitud de onda y su frecuencia. La energía solar, la que emite la Tierra y la que emiten los haces energéticos artificiales poseen distinta longitud de onda y frecuencias. Así, el sol emite radiación en un rango de longitudes de onda que oscila entre 200 nm a 3000 nm y la Tierra emite entre 3 μm y 80 μm . Por otra parte, los objetos que se encuentran en la superficie terrestre refleja radiación con mayor o menor intensidad en distintas longitudes de onda, de tal forma que todo cuerpo queda definido por su curva espectral, curva que muestra la relación existente entre la energía reflejada y la longitud de onda de la radiación.

Aplidaciones de distintas longitudes de onda:

- Azul visible: cartografía de aguas someras. Diferenciación de suelo y vegetación.
- Verde visible: diferenciación de la vegetación en términos salud.
- Rojo visible: diferenciación de la vegetación por especies.

- Infrarrojo cercano: cartografía de la vegetación. Cartografía de vigor/salud de la vegetación. Diferenciación de la vegetación por especies.
- Infrarrojo de onda corta: diferenciación de los tipos de rocas según su composición. Detección de humedad en la vegetación y el suelo. Cartografía de la estructura geológica. Trazado de límites tierra/agua.

La energía electromagnética que emite y refleja la superficie terrestre es un fenómeno continuo que es medido por los sensores y discretizado para poder ser mostrado como una imagen. El modo de medir y discretizar es definido por los cuatro tipos de resolución con los que se trabaja en teledetección:

- Resolución geométrica o espacial: esta determinada por el tamaño del pixel de la imagen de salida. Este concepto designa al objeto más pequeño que se puede distinguir en la imagen. Una forma habitual de definir la resolución espacial necesaria, es establecer una relación entre el tamaño del pixel de la imagen y la escala a la que se pretende trabajar.
- Resolución espectral: indica el número y ancho de las regiones del espectro en las que el sensor puede captar radiación electromagnética. Cuantas más bandas sea capaz de capturar y más estrechas sean, mejor resolución espectral ofrecerá el sensor.
- Resolución temporal: refleja el intervalo de tiempo entre cada imagen obtenida por el sensor del mismo punto de la superficie terrestre. Este tipo de resolución depende básicamente de las características de la órbita (altura, velocidad e inclinación), del ancho de barrido de la imagen y del ángulo de inclinación del sensor.
- Resolución radiométrica: indica el número de bits por píxel que se utilizan para almacenar la imagen y por tanto la cantidad de niveles de gris en que se almacena la radiación recibida para ser procesada posteriormente. Define la sensibilidad del sensor, es decir la capacidad de discriminar entre pequeñas variaciones en la radiación que capta (Arenas, 2016).

El uso de la Teledetección en los estudios de Geología, y de los distintos procesos geológicos se sustenta sobre la base de que cada material que cubre la superficie terrestre presenta una respuesta espectral propia (Pérez y Muñoz, 2006). Cada mineral presenta un espectro característico, siendo los de más fácil mapeo aquellos que presentan regiones de su curva espectral con máximos de reflectancia y de absorción. Las bandas más usadas para el mapeo de minerales son aquellas localizadas en el espectro visible e infrarrojo (Arenas, 2016). Ambas regiones son comunmente usadas en la búsqueda y exploración de yacimientos minerales (Bakardjiev y Popov, 2014; Crosta y Moore, 1989; Crosta et al., 2003; Mazhari et al., 2017; Ramachandra et al., 2020; Sícoli Seoane et al., 2009; Testa et al., 2018), dando apoyo a la detección de zonas de alteración generadas durante la formación de los depositos, a la tectónica (Beygi *et al.*, 2021; Farah *et al.*, 2021), resaltando sobre todo lineamientos y generación de minerales asociados a alteración en zonas de falla, y al mapeo geológico, con el empleo combinado de bandas capaces de reflejar minerales mayoritarios (Bakardjiev y Popov, 2014; Beygi et al., 2021; Pineda-Falcone et al., 2017; Ramachandra et al., 2020; Rowan, 1998; Rowan y Mars, 2003).

Para esta investigación se usarán imágenes multiespectrales de los satélites Terra ASTER (Radiómetro Avanzado Espacio Transportado de Emisión Térmica y Reflexión) y Sentinel-

2. El primero por su elevado número de bandas en el campo del infrarrojo de onda corta, que es donde se detectan los minerales de alteración arcillosos, y el segundo por aportar mayor resolución espacial en el rango visible (400-750nm) e infrarrojo cercano (750-2600nm).

El radiómetro ASTER es un sensor multiespectral montado sobre el satélite Terra, uno de los satélites del Sistema de Observación de la Tierra de la NASA. Fue lanzado en 1999 por un consorcio formado por la Nasa y el gobierno de Japón. Los sensores de este radiómetro miden la reflectancia y la radiación electromagnética proveniente de la superficie de la Tierra y la atmósfera a través de 14 canales (o bandas). Posee tres grupos de canales que se adquieren con instrumentos distintos (tabla 1). El primer grupo contiene tres bandas en el rango del visible e infrarrojo cercano (VNIR) más una cuarta banda (Banda 3R) en el infrarrojo cercano que toma imágenes en sentido opuesto con fines estereoscópicos. Su resolución espacial es de 15m (figura 4). El segundo grupo incluye seis bandas localizadas en el campo de la radiación infrarroja de onda corta (SWIR). Su resolución espacial es de 30m. Por último, el tercer grupo está representado por cinco bandas que miden en la radiación térmica infrarroja (TIR), a una resolución de 90m. Este sensor presenta una resolución temporal de 16 días y radiométrica de 8 bits (Arenas, 2016). Tal y como se ha apuntado anteriormente, la alta resolución espectral de este sensor, especialmente en la región del SWIR, le confieren un gran valor para el desarrollo de estudios de naturaleza geológica, pues hace posible identificar minerales del grupo de las arcillas, carbonatos, cuarzo, óxidos de hierro y silicatos (Kalinowski y Oliver, 2004). En el presente trabajo se han empleado las bandas del VNIR y SWIR y se han descartado la del TIR dado que su escasa resolución espacial (90m) es inviable para un estudio de esta escala.

Tabla 1. Especificaciones de resolución espacial y espectral del sensor ASTER.

Subsistema	Bandas	Rango espectral (μm)	λ central (μm)	Resolución espacial (m)
VNIR	1	0.52-0.6	0.556	15
	2	0.63-0.69	0.661	15
	3N	0.78-0.86	0.807	15
	3B	0.78-0.86	0.804	15
SWIR	4	1.6-1.7	1.656	30
	5	2.145-2.185	2.167	30
	6	2.185-2.225	2.209	30
	7	2.235-2.285	2.262	30
	8	2.295-2.395	2.336	30
	9	2.36-2.43	2.4	30
TIR	10	8.125-8.475	8.291	90
	11	8.475-8.825	8.634	90
	12	8.925-9.275	9.075	90
	13	10.25-10.95	10.657	90
	14	10.95-11.65	11.318	90

La misión Sentinel-2 es parte del Programa Global de Monitoreo del Medio Ambiente y la Seguridad (GMES), una iniciativa conjunta de la Comisión Europea (EC) y la Agencia Espacial Europea (ESA). El objetivo de este satélite es proporcionar información sistemática de imágenes multiespectrales de alta resolución con una alta frecuencia de muestreo, proporcionando mapas de la superficie terrestre y de los cambios que ocurren en ella (ESA,

2015). La misión cuenta con dos satélites gemelos de igual órbita y desfasados 180°. Sentinel-2 lleva un instrumento óptico que adquiere imágenes en 13 bandas espectrales (figura 4). Estas presentan diferente resolución espacial con cuatro bandas a 10m/píxel en el VNIR, seis a 20m/píxel en el SWIR y tres bandas a 60m/píxel en la región del TIR (tabla 2). La resolución espacial de Sentinel-2 es de 10 días y 5 si se combinan los dos satélites de la constelación. Su resolución radiométrica es de 12 bits (SUHET, 2013). Las bandas 1, 9 y 10, con una resolución espacial es de 60m, no han sido usadas en este procesamiento.

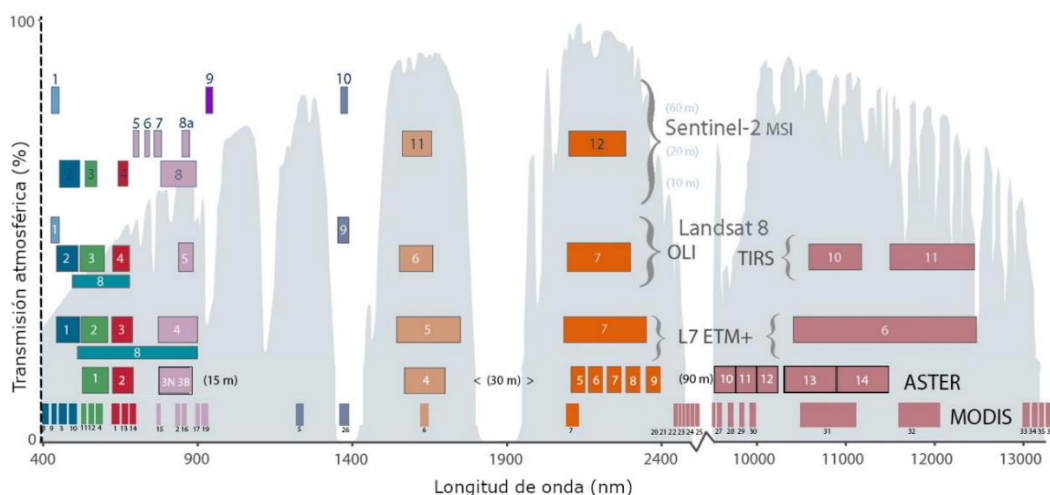


Figura 4. Comparación de las características espaciales y espectrales de distintos satélites, incluyendo Terra ASTER y Sentinel-2, ambos empleados en este estudio. Tomado de USGS Landsat Program (2017)

Tabla 2. Especificaciones de resolución espacial y espectral del Sentinel-2

Bandas	Nombre	Rango espectral (μm)	λ central (μm)	Resolución espacial (m)
1	Aerosol	0.43-0.45	0.0443	60
2	Blue	0.45-0.52	0.49	10
3	Green	0.54-0.57	0.56	10
4	Red	0.65-0.68	0.665	10
5	Red edge 1	0.69-0.71	0.705	20
6	Red edge 2	0.73-0.74	0.74	20
7	Red edge 3	0.77-0.79	0.783	20
8	Near Infrared (NIR) 1	0.78-0.9	0.842	10
8A	Near Infrared (NIR) 2	0.85-0.87	0.865	20
9	Water vapour	0.93-0.95	0.945	60
10	Cirrus	1.36-1.39	1.375	60
11	SWIR 1	1.56-1.65	1.61	20
12	SWIR 2	2.1-2.28	2.19	20

Para manejo de datos y su representación se usaron los software SNAP y QGIS. El primero de ellos para realizar todo el preprocesamiento y procesamiento de las imágenes satelitales, tanto Sentinel-2 como ASTER, y el otro para la digitalización de los materiales geológicos, trabajo con Modelo Digital del Terreno, y en general para la generación de resultados gráficos.

SNAP proviene del acrónimo Sentinel Application Platform y responde a un programa gratuito ofrecido por la ESA para procesar y analizar las imágenes satélites provenientes de la flota de satélites Sentinel. Permite operar además con satélites no pertenecientes a la ESA, como ASTER.

QGIS (anteriormente llamado también Quantum GIS) es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de software libre y de código abierto para plataformas GNU/Linux, Unix, Mac OS, Microsoft Windows y Android. Algunas de sus características son:

- Soporte para la extensión espacial de PostgreSQL, PostGIS.
- Manejo de archivos vectoriales Shapefile, ArcInfo coverages, MapInfo, GRASS GIS, DXF, etc.
- Soporte para un importante número de tipos de archivos ráster (GRASS GIS, GeoTIFF, TIFF, JPG, etc.).

2.3.1 Métodos

Las imágenes fueron adquiridas en uno de los portales del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). La imagen Sentinel-2 fue tomada el 10 de septiembre de 2020 y la del ASTER el 17 de abril del 2015, por presentar nula nubosidad y escasa vegetación. Para poder utilizar las imágenes tuvieron que ser corregidas durante la etapa de pre-procesamiento. Las correcciones aplicadas fueron:

- Corrección radiométrica: implica por una parte la restauración de líneas o píxeles anómalos y por otra la corrección de bandeo en la imagen. Cuando se pierde el valor de algún píxel la solución más simple es estimarlo como la media de los valores del mismo píxel en las líneas anterior y posterior (no es recomendable utilizar los píxeles contiguos de la misma línea dado que han sido captados por el mismo detector que ha generado el fallo). El fenómeno del bandeo se debe a una mala calibración entre detectores y resulta especialmente visible en las zonas de baja radiancia (zonas marinas, por ejemplo). El resultado es la aparición periódica de una banda más clara u oscura que las demás. Para corregir el bandeo se asume que, en caso de no haber error, los histogramas obtenidos por cada uno de los detectores serían similares entre sí y similares al histograma global de la imagen que se toma como referencia. Las imágenes utilizadas en este trabajo ya tenían incorporadas estas correcciones en el momento de la descarga.

- Correcciones atmosféricas: se realiza para corregir alteraciones de los valores de intensidad de los píxeles que componen una imagen y que son producidas por la interacción de la radiación electromagnética con la atmósfera. Esta actúa de dos formas distintas: (1) aumentando selectivamente la energía de ciertas longitudes de onda y (2) absorbiendo la energía en determinadas longitudes de onda debido a determinados gases atmosféricos. Hay distintos métodos de corrección atmosférica habitualmente usados en teledetección. Por una parte existen métodos como COST o FLAASH, que emplean modelos de la ecuación de transferencia radiativa con los que emulan las condiciones atmosféricas en el momento de la adquisición. Por otra parte, existen también métodos basados en la estimación del efecto atmosférico en cada banda. Uno de estos, el método DOS (Dark Object Subtraction), ha sido el empleado

para corregir atmosféricamente las dos imágenes empleadas en este estudio. El modelo DOS fue propuesto por Chavez (1988) y ha sido utilizado en numerosas ocasiones, probablemente por ser de aplicación simple. Postula que la bruma atmosférica incrementa los valores de Nivel Digital, Radiancia o Reflectancia en aquellos píxeles situados sobre agua limpia, profunda y calma. Dichos píxeles, por sus características espectrales, deberían presentar reflectancia nula. La diferencia entre valor medido y estimado se sustrae, en cada banda, y en todos los píxeles de la escena (Brizuela, Aguirre, y Velasco 2007).

- Correcciones geométricas: se realizan para corregir el efecto de la rotación de la Tierra durante el tiempo de adquisición de las imágenes, la velocidad limitada de barrido de los sensores (en relación a la velocidad de la plataforma), la curvatura terrestre, las variaciones en la latitud y la velocidad de altitud de la plataforma, y los efectos panorámicos relacionados con la geometría de mapeo. Este proceso de corrección se desarrolla en varias etapas: 1) determinación de la relación entre el sistema de coordenadas del mapa y la imagen; 2) establecimiento de un conjunto de puntos definiendo los centros de los píxeles en la imagen corregida, este conjunto de puntos es definido por una malla con las propiedades cartográficas del mapa, 3) cálculo de los valores de intensidad de los píxeles en la imagen rectificadas por interpolación de los tonos de grises de la imagen original. La biblioteca desde la que se descargaron las imágenes posee la ventaja de ofrecer productos con esta corrección ya aplicada (Arenas, 2016).

Una vez corregidas las imágenes geométrica y atmosféricamente, los métodos de análisis espectral usados en este trabajo fueron Rationing y Análisis de Componentes Principales.

El método de relaciones entre bandas conocido como Rationing es un procesamiento matemático usado para lograr una amplificación de la respuesta del material buscado, teniendo en cuenta las características más significativas de su espectro electromagnético (Crósta *et al.*, 2003).

Dado que minerales diferentes generalmente absorben y reflejan la radiación en regiones diferentes del espectro, es posible enfatizar la presencia de un determinado mineral mediante la división de la banda de mayor reflectancia entre la más absorbente (Ramachandra *et al.*, 2020). Para la clasificación de los resultados del Rationing se tuvieron en cuenta los datos estadísticos de la imagen resultante, los cuales presentan un comportamiento casi gaussiano. De manera general se seleccionaban como valores estadísticamente más probables aquellos que mostraban los valores más altos de la campana de gauss resultante.

Para la determinación del umbral efectivo, es decir, para determinar los valores por encima de los cuales se pudiera considerar real la existencia de los minerales analizados, se utilizó un criterio estadístico a partir de los valores de media y desviación estándar. Dado el hecho de que el histograma de valores de la imagen resultante del Rationing presenta un comportamiento casi normal. Se estableció como primer umbral de abundancia los valores que se encontraran por encima de la suma de la media y la desviación estándar (valores por encima del 68% de la muestra), y como segundo umbral la suma de la media + dos veces la desviación estándar (valores por encima del 95% de la muestra)

El siguiente método empleado fue el Análisis de Componentes Principales (PCA). Este método está basado en una técnica estadística multivariante desarrollada por Hotelling (1933), que consiste en elegir combinaciones no correlacionadas linealmente de las variables en las que cada combinación lineal extraída sucesivamente, llamada componente principal,

presenta una varianza menor. Los componentes se ordenan por la cantidad de varianza original que describen, por lo que la técnica es útil para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos. Si las variables tienen una intercorrelación lineal significativa, los primeros componentes serán representativos de una gran parte de la varianza total (Singh y Harrison, 1985).

En el PCA, las relaciones entre las variables se estudian a partir de correlaciones, busca hallar combinaciones lineales de las variables originales que expliquen la mayor parte de la variación total; en este, el primer factor o componente sería aquel que explica la mayor parte de la varianza total, el segundo factor sería aquel que explica la mayor parte de la varianza restante, es decir, de la que no explica el primero y así sucesivamente.

Una de las principales ventajas de esta metodología es que no parte de ninguna distribución de probabilidad para su análisis. Dentro de los objetivos del análisis están:

- Generar nuevas variables que expresen información acerca del conjunto de datos
- Reducir la dimensión del espacio en el que están contenidos los datos
- Eliminar (si es posible) las variables que aportan poca información al estudio del problema
- Facilitar la interpretación de la información contenida en los datos
- Determinación de unos pocos factores (componentes principales) que retengan la mayor variabilidad contenida en los datos. Las nuevas variables generadas cumplen con las características de independencia (bajo el supuesto de normalidad) y no correlación.

En términos matemáticos los componentes principales son autovectores o vectores propios de la matriz de correlación y la técnica para encontrar estos autovectores se llama análisis propio. A cada componente le corresponde un autovalor que proporciona la cantidad de varianza total explicada por la componente. Cuando se trabaja con datos estandarizados, cada variable estandarizada tendrá una varianza igual a 1 y por lo tanto la varianza total será igual al número de variables p . La suma de los autovalores de la matriz de varianzas y covarianzas de las variables estandarizadas o de la matriz R de las variables originales también será igual a p .

Se considera una serie de variables (x_1, x_2, \dots, x_p) sobre un grupo de objetos o individuos y se trata de calcular, a partir de ellas, un nuevo conjunto de variables (y_1, y_2, \dots, y_p) , no correlacionadas entre sí, cuyas varianzas vayan decreciendo progresivamente.

Cada y_j ($j = 1, \dots, p$) es una combinación lineal de las x_j (x_1, x_2, \dots, x_p) originales, es decir:

$$y_j = a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + \dots + a_{jp}x_p = a_j^o x$$

siendo $a_j^o = (a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jp})$ un vector de constantes, y x un vector unidimensional que va desde x_1 hasta x_p .

Obviamente, si lo que queremos es maximizar la varianza, como veremos luego, una forma simple podría ser aumentar los coeficientes a_{ij} . Por ello, para mantener la ortogonalidad de la transformación se impone que el módulo del vector $a_j^0=(a_{1j},a_{2j},\dots,a_{pj})$ o sea 1.

El primer componente se calcula eligiendo a_1 de modo que y_1 tenga la mayor varianza posible, sujeta a la restricción $a_j^0 * a_j = 1$. El segundo componente principal se calcula obteniendo a_2 de modo que la variable obtenida, y_2 esté incorrelacionada con y_1 . Del mismo modo se eligen (y_1, y_2, \dots, y_p) , incorrelacionados entre sí, de manera que las variables aleatorias obtenidas vayan teniendo cada vez menor varianza.

El Análisis de Componentes Principales (PCA) ha sido utilizado en muchos trabajos de teledetección, funcionando como alternativa y punto de comparación al rationing en muchos casos, sobre todo en la cartografía geológica y en la delimitación de zonas de alteración en la búsqueda de depósitos minerales relacionados con hidrotermalismo (Crósta *et al.*, 2003; Sícoli Seoane *et al.*, 2009) tomando en consideración todas o parte de las bandas espectrales disponibles. Cuando se emplea una selección de bandas se habla de la técnica denominada Análisis de Componentes Principales Orientado a Objetos (FPCS) (Crósta *et al.*, 2003). Concretamente, consiste en el cálculo de imágenes de componentes principales a partir de un subconjunto de cuatro bandas, que son seleccionadas de acuerdo con la posición de los rasgos espectrales más característicos de los minerales a buscar (Sícoli Seoane *et al.*, 2009). Una vez realizado el análisis de PCA, el componente que contiene la información espectral buscada será aquel con mayor carga de los vectores principales, que coincidirá con la característica más representativa del mineral buscado, pero con signo diferente (Loughlin, 1991).

También se utilizarán modelos de color de tipo RGB (Red-Green-Blue) el cual está basado en la síntesis aditiva, donde se combinan estos colores en un solo color, el cual será reflejo de los valores de cada banda (figura 5).

El espacio de color RGB puede ser representado como un cubo con valores normalizados RGB en el rango $[0,1]$ con valores grises en la diagonal principal de los valores negros $(0,0,0)$ y en la esquina opuesta los valores blancos $(1,1,1)$. Este es considerado como el modelo de colores base para la mayoría de las aplicaciones de imágenes sobre todo por el hecho de que las imágenes no necesitan ninguna transformación (Ibraheem *et al.*, 2012).

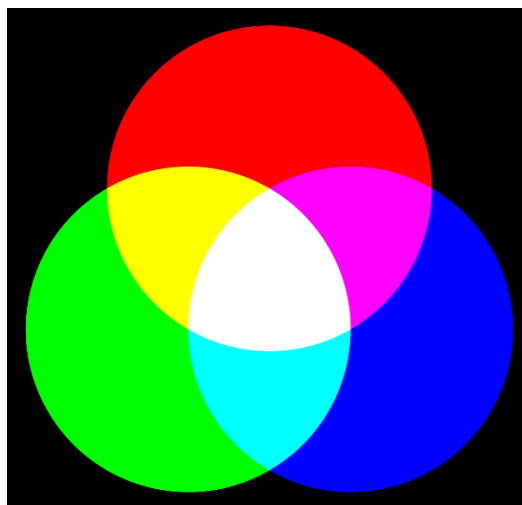


Figura 5. Diagrama de Venn para el modelo de colores RGB, donde se observan los colores resultantes de la superposición.

Por otra parte, también se realizó el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Este se basa en la característica de la vegetación de presentar un mínimo de reflectancia en la longitud de banda del rojo y un máximo en el infrarrojo cercano, debido a la alta capacidad refractiva de la clorofila. Los valores posibles de este índice pueden oscilar entre -1 y 1, aunque generalmente se encuentran entre 0 y 1. Este método ha sido aplicado con varios objetivos como comprobar cambios en el terreno producto de la actividad humana, aunque sin duda su empleo más amplio se relaciona con el estudio de cambios espacio-temporales de la cubierta vegetal (Hashim, Abd Latif, y Adnan 2019). La fórmula de NDVI aplicada para Sentinel-2 fue:

$$NDVI = \frac{Banda\ 8 - Banda\ 4}{Banda\ 8 + Banda\ 4}$$

Para comprobar la posible relación de las anomalías detectadas con zonas de acumulación de sedimentos de origen fluvial se incluyó en el análisis la red fluvial obtenida a partir del Modelo Digital de Elevación de Andalucía (Consejería de Transformación Económica, Industrial, no date) La red de drenaje posee una resolución espacial de 10 m/píxel.

3. Capítulo 2

3.1. Análisis de la vegetación y la red de drenaje

Inicialmente se realizó una imagen de color verdadero mediante las bandas rojo, verde y azul en una imagen RGB para el Sentinel-2 (figura 6). Esta imagen servirá como complemento en el estudio de la vegetación.

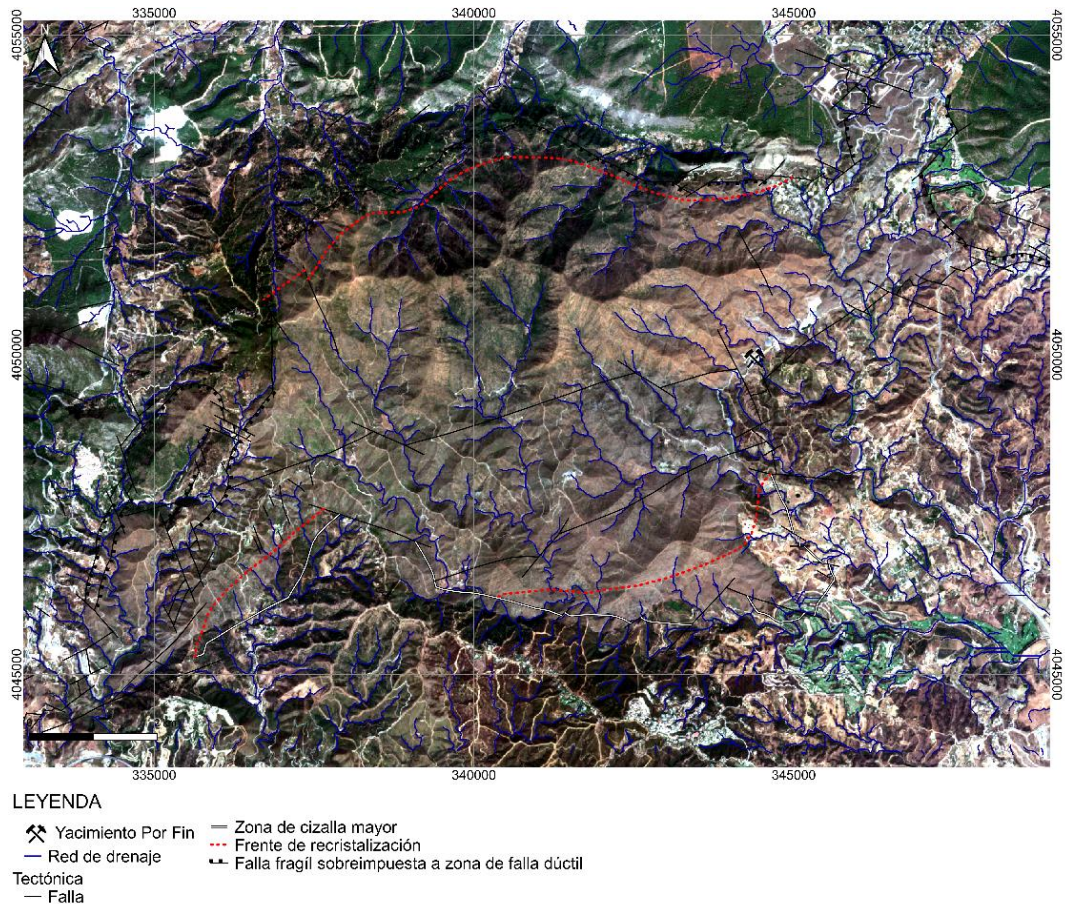


Figura 6. Imagen de color verdadero para el Sentinel-2.

Se aplicó el índice NDVI para comprobar la abundancia de vegetación en la zona que potencialmente pudiera enmascarar la respuesta geológica. Este índice fue reclasificado a las clases propuestas por (Hashim et al. 2019) el cual plantea 3 clases donde los valores mayores de 0.5 serían de intensa vegetación, los que estén entre 0.2 y 0.5 a poca vegetación, y menores de 0.2 serían zonas sin vegetación (figura 7).

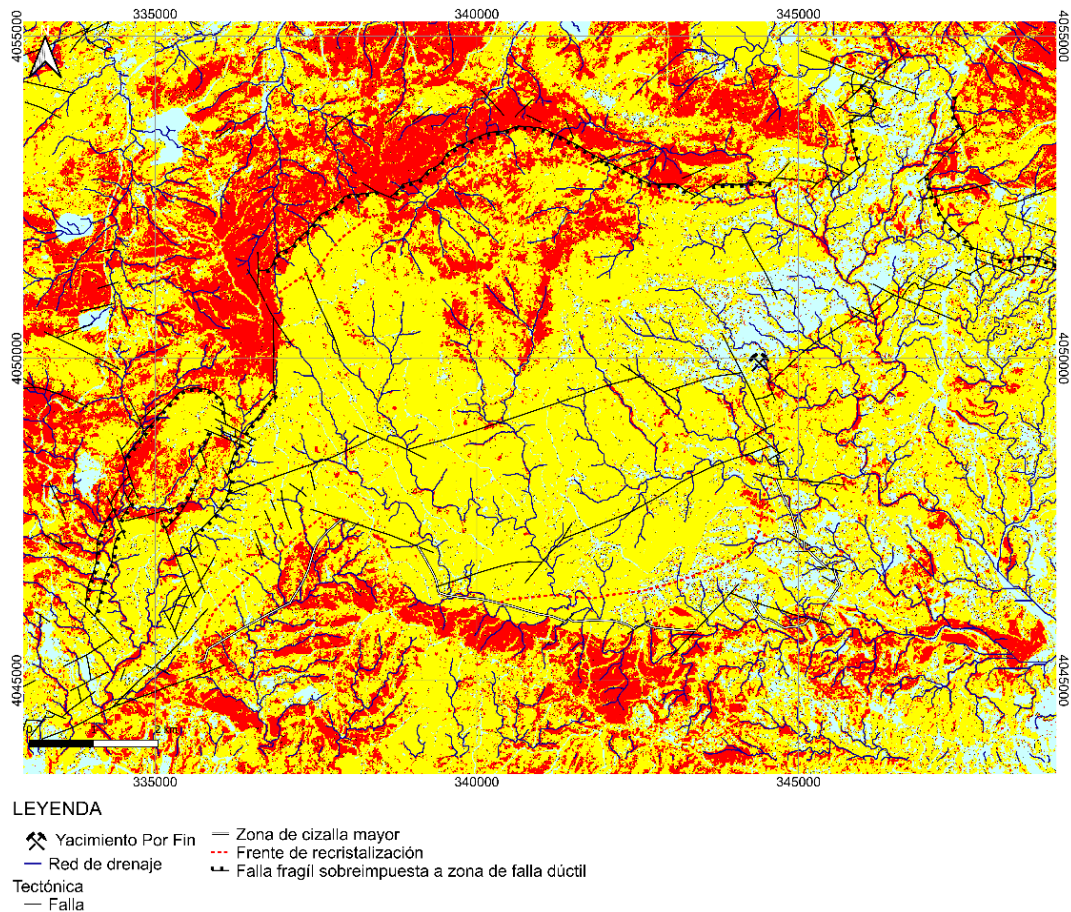


Figura 7. NDVI para la zona de estudio donde el color rojo representa áreas de intensa vegetación (>0.5), el amarillo indica zonas que poseen poca vegetación ($0.2-0.5$) y el azul claro zonas no vegetadas (<0.2).

En la figura 7 vemos que para toda el área es poca la vegetación excepto en la zona Norte central donde aparecen zonas de intensa vegetación presentando dos direcciones preferenciales E-O y SO-NE, en la imagen de color verdadero (figura 6) estas zonas son delimitadas por colores verde fuertes. Solo habría dos lugares sin vegetación, el extremo Este y el SO, ambas pardas en la imagen de color verdadero. En general las zonas de abundante vegetación se encuentran asociadas a la red de drenaje puesto que serían zonas donde existiría una mayor abundancia de agua.

3.2 Análisis de curvas espectrales de minerales mayoritarios

En virtud de la litología y alteración descritas para el área de estudio, los minerales mayoritarios estarían relacionados con los procesos de alteración del olivino, tanto por su metamorfismo (serpentinita, talco, clorita y magnetita), así como por su meteorización (goetita y hematita).

Dada la resolución espacial con la que cuentan los satélites de este estudio y el grado de detalle al que se quiere llegar, se priorizará la resolución espacial, que irá desde 10m en el Sentinel-2 hasta 30m en el ASTER.

El estudio del espectro de longitudes de ondas para estos minerales permitirá seleccionar el procesamiento correcto, a fin de poder utilizar las bandas más útiles en la discriminación litológica. Estos espectros fueron obtenidos a partir de la Librería Espectral del Servicio Geológico de Estados Unidos (Kokaly *et al.*, 2017a, 2017b), y fueron remuestreados para las bandas de los satélites Sentinel-2 y ASTER (figura 8 y 9).

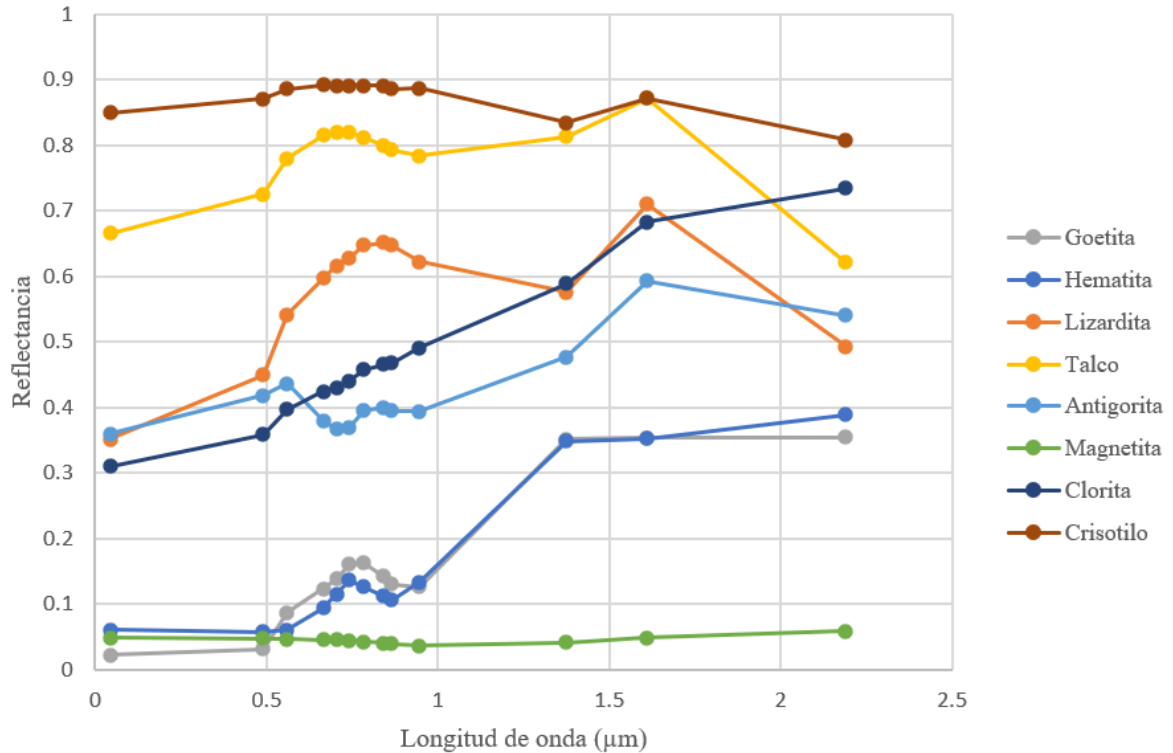


Figura 8. Curvas espectrales remuestreadas a las bandas del satélite Sentinel-2 de los minerales mayoritarios descritos en el macizo de Ojén.

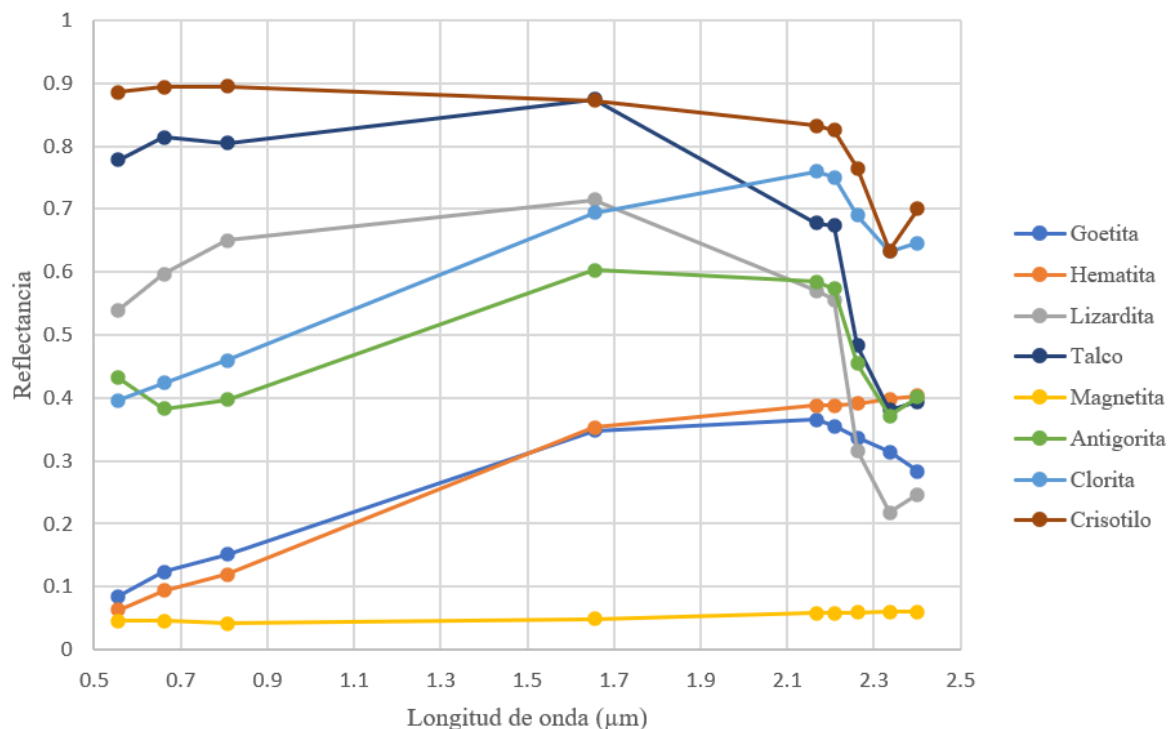


Figura 9. Curvas espectrales remuestreadas a las bandas del satélite ASTER de los minerales mayoritarios descritos en el macizo de Ojén.

Teniendo en cuenta estos gráficos podemos observar la diferencia de respuesta espectral que existe entre los óxidos de hierro y los minerales silicatados. La baja respuesta espectral de la magnetita hará imposible su estudio debido a que no existen contrastes en su espectro para ninguno de los satélites utilizados.

En el caso de la hematita y la goethita su respuesta puede ser aislada tanto para ASTER donde presentan el cambio más brusco de la banda 3 a la 4, como para el Sentinel-2 donde presenta la mayor diferencia entre la banda 12 y las primeras. En el caso de la antigorita, el crisotilo, la lizardita y el talco también pueden ser diferenciadas sus respuestas pues para Sentinel-2 presentan los máximos valores en la banda 11 y un mínimo en la 12. En ASTER su respuesta es más variada, con picos en las bandas 4 y 6, además de mínimos en la 8 y 9. Estas diferencias tan marcadas entre bandas para un mismo material permiten el aislamiento de la respuesta mediante Rationing.

La respuesta de los minerales mayoritarios resulta más contrastante en el satélite ASTER que en el Sentinel-2, por lo que a la hora de establecer los Rationing es más efectivo el uso del primero.

En la Tabla 3 podemos observar las relaciones que han sido planteadas en la bibliografía para algunos materiales presentes en este estudio. Además de estas y teniendo en cuenta los minerales del grupo de la serpentinita (antigorita, crisotilo y lizardita) se puede separar su comportamiento mediante su respuesta para ASTER con la relación 6/8 (figura 8). De todos los ratios testados es este el que ha aportado los mejores resultados dada la diferencia de valores entre ambas bandas (6 y 8), una característica peculiar de estos minerales. Una limitación que impone la búsqueda de minerales del grupo de la serpentina con estas dos bandas es la imposibilidad de buscar selectivamente talco, dado que talco, antigorita, crisotilo y lizardita poseen un comportamiento espectral muy parecido para este rango de longitudes de onda.

Tabla 3. Rationing utilizados. Tomado de (Van der Meer, van der Werff, y van Ruitenbeek 2014)

Característica	ASTER
Hierro férrico, Fe ³⁺	2/1
Hierro ferroso, Fe ²⁺	5/3+1/2
Silicato ferroso (biot,clor,anfi)	5/4

3.3 Resultados y discusión

3.3.1. Resultados del Rationing

A la hora de realizar el Rationing fueron escogidas las bandas del satélite ASTER pues los contrastes entre los minerales de la zona son mayores. Aplicándose para serpentinita y talco, Fe³⁺, Fe²⁺ y silicatos ferrosos (figura 11, 13, 15 y 17).

Después se analizaron los datos estadísticos de cada imagen realizando un histograma con sus valores, comprobando su normalidad y trabajando con sus estadígrafos para la selección del valor de fondo.

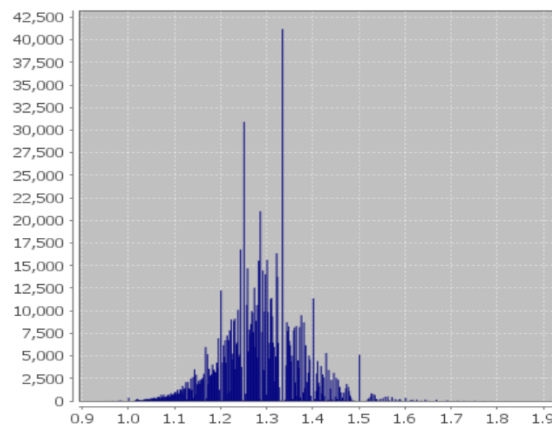


Figura 10. Histograma de los valores de la relación 6/8, eje X y número de píxeles, eje Y.

Para esta relación se pudo observar que los resultados presentan un comportamiento casi normal (figura 10) donde se utilizaría la media y la desviación estándar para estimar los valores de corte aproximados, estableciendo como valor de primer umbral 1.37 y de segundo umbral 1.45.

En la figura 11 se puede observar que en general la zona Sur del macizo se encuentra más serpentizada que la Norte. El mayor grado de serpentización se hallaría al el Suroeste del macizo donde son más abundantes los valores del segundo umbral, coincidiendo con las fallas que delimitan el contacto del macizo. El depósito de talco de Por Fin se encuentra bien marcado dentro del segundo umbral anómalo. En la zona Norte se encuentran algunos valores altos, alineándose en la zona central SO-NE.

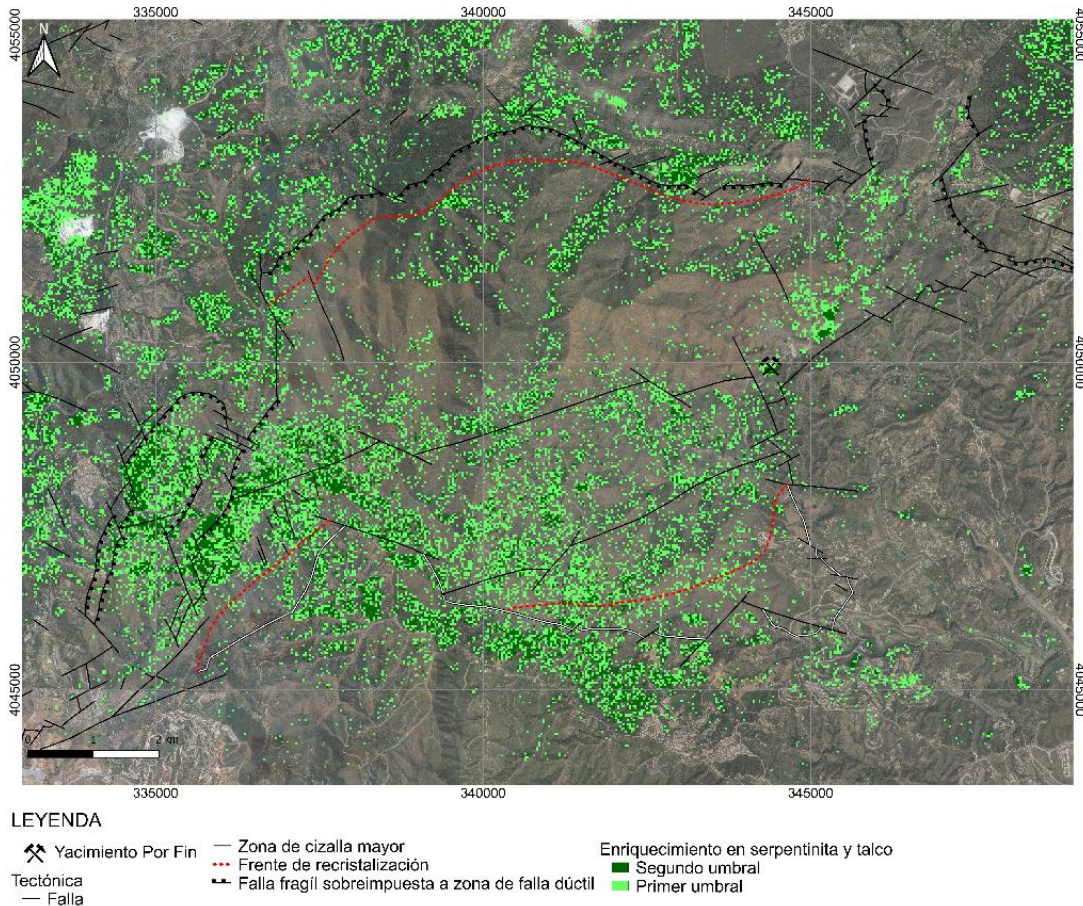


Figura 11. Zonas con enriquecimiento de serpentinita y/o talco a partir de la relación de bandas 6/8 para Aster.

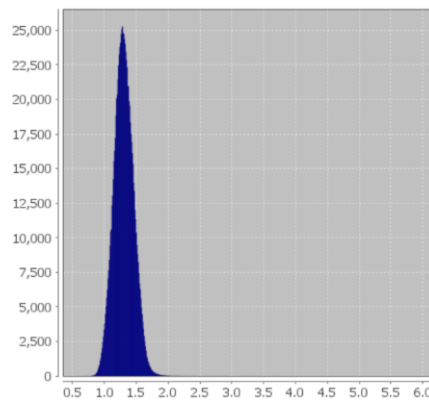


Figura 12 Histograma de los valores de la relación $5/3+1/2$, eje X y número de píxeles, eje Y.

Para la relación $5/3+1/2$ se pudo observar que los resultados presentan un comportamiento casi completamente gaussiano (figura 12) donde se utilizaría la media y la desviación estándar para estimar los valores de corte aproximados, estableciendo como primer umbral 1.46 y de segundo umbral 1.61.

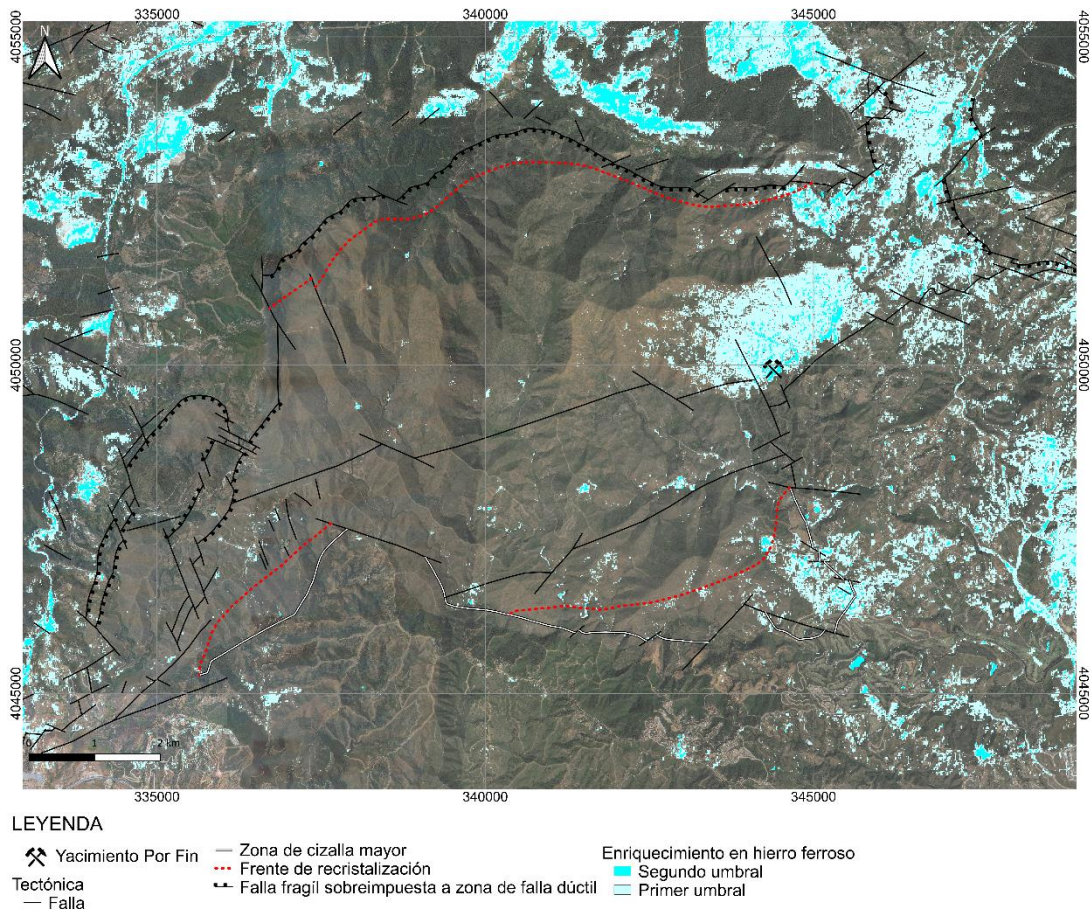


Figura 13. Zonas con enriquecimiento en hierro ferroso a partir de la relación de bandas 5/3+1/2 para Aster.

En la figura 13 se puede observar que las zonas más enriquecidas en hierro ferroso se encuentran en la zona NE y extremo SE. Dentro de la zona NE se encuentra el yacimiento de talco Por Fin, apareciendo dentro del segundo umbral anómalo. Este depósito presenta talco serpentina y clorita como minerales mayoritarios.

Para la relación 4/3 se pudo observar que los resultados presentan un comportamiento casi normal (figura 14) donde se utilizaría la media y la desviación estándar para estimar los valores de corte aproximados, estableciendo como primer umbral 0.73 y de segundo umbral 0.79.

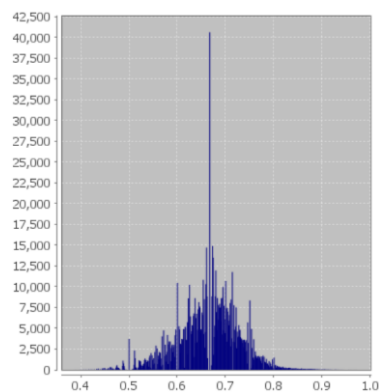


Figura 14. Histograma de los valores de la relación 4/3, eje X y número de píxeles, eje Y.

La relación utilizada para silicatos ferrosos presenta un comportamiento muy similar al del hierro ferroso (figura 15). Las zonas más enriquecidas en estos minerales se encuentran en el extremo NE (casi en su totalidad) y el SE. En la zona central aparece cierta lineación en dirección E-O. Cabe recordar que esta relación mostraría principalmente la presencia de biotita, anfíbol y clorita, siendo este último uno de los minerales presentes en el yacimiento Por Fin (indicado en la figura 13).

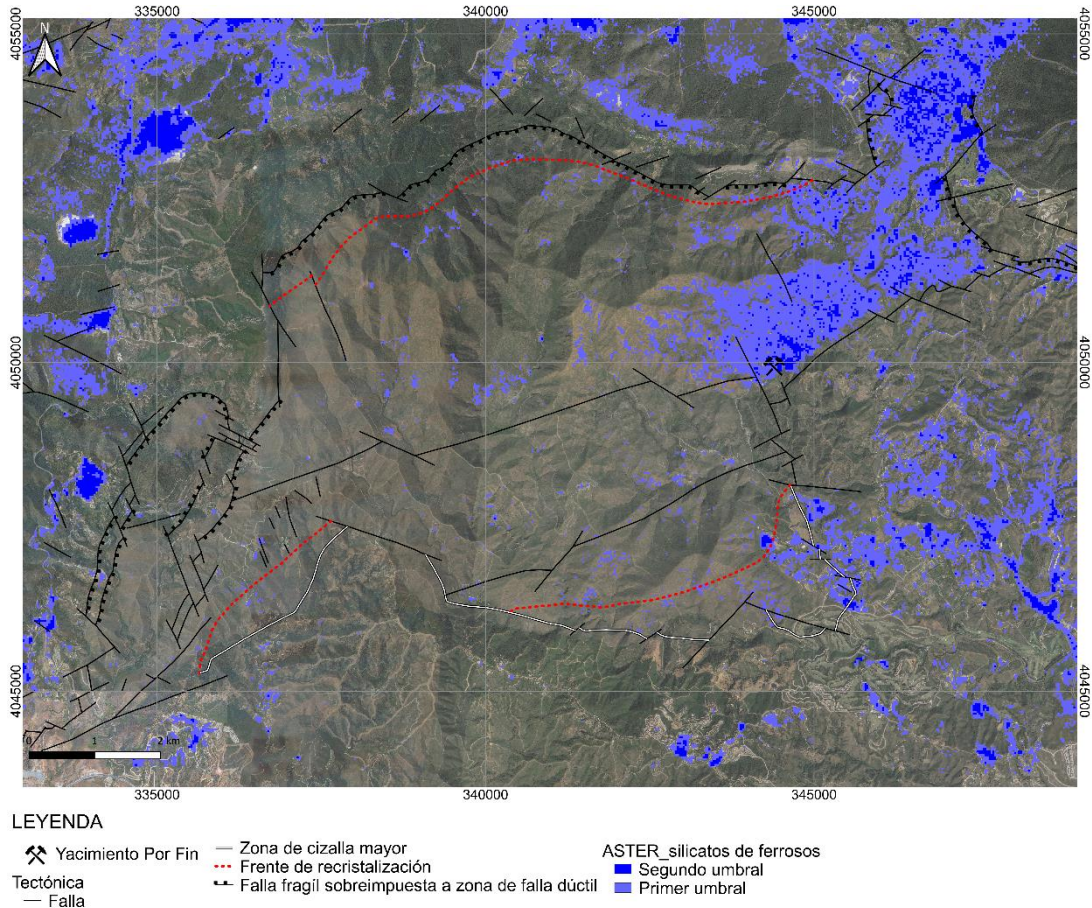


Figura 15. Zonas con enriquecimiento en silicatos ferrosos a partir de la relación de bandas 5/4 para Aster.

Para la relación 2/1 se pudo observar (figura 16) que los resultados presentan un comportamiento casi normal donde se utilizaría la media y la desviación estándar para estimar los valores de corte aproximados, estableciendo como primer umbral 1.55 y de segundo umbral 1.68.

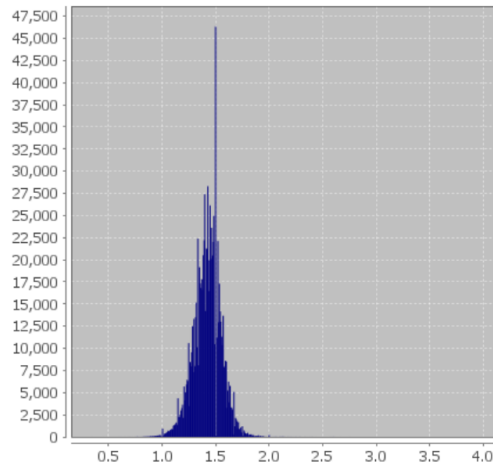


Figura 16. Histograma de los valores de la relación 2/1, eje X y número de píxeles, eje Y.

El enriquecimiento en minerales ricos en hierro férrico (figura 17) se encuentra más concentrado hacia la zona Norte, concentrándose sobre todo en la zona septentrional central donde evidencia lineamientos en dirección N-S y SO-NE. Estos lineamientos coinciden en dirección con fallas normales tardías. La zona Sur del macizo aparece bien diferenciada pues toda la roca que la limita presenta valores mayores para este elemento.

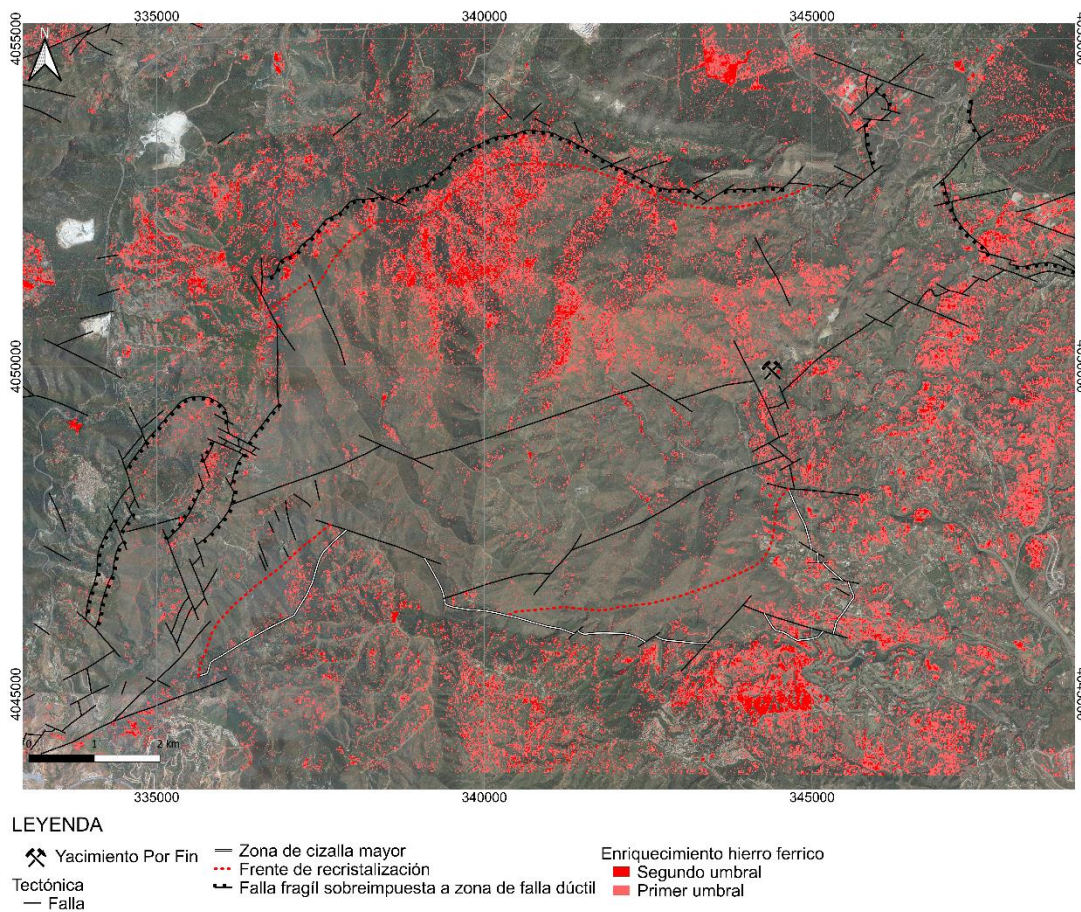


Figura 17. Zonas con enriquecimiento de hierro férrico, a partir de la relación de bandas 2/1 para Aster.

Teniendo en cuenta los resultados de los Rationing y de la correlación de las zonas enriquecidas en silicatos ferrosos (figura 15) e hierro ferroso (figura 13), se decidió realizar una imagen RGB a partir de la relación utilizada para la serpentinita-talco (banda roja), hierro férrico (banda verde) y silicatos ferrosos (banda azul).

En la figura 18, el macizo de Ojén aparece perfectamente diferenciado de todas las unidades que lo rodean, a excepción de la zona SE donde este análisis parece indicar que el contacto con la Unidad de Los Reales se localiza algo más al Oeste. La figura muestra las diferencias litológicas y de alteración reportadas para este macizo ultramáfico. La serpentinitación marcada por el color verde sería más abundante hacia la zona Sur, que quedaría limitada por un lineamiento de dirección E-O hacia la zona central que pudiera estar relacionado con las grandes fallas reportadas en esta dirección. En el área septentrional habría una mayor abundancia de serpentinita hacia el Oeste.

El depósito de talco Por Fin aparece de color cian debido a que aparece como un máximo en los Rationing de la serpentinita-talco y de silicatos ferrosos. Además del yacimiento Por Fin, aparecen otras zonas de esta coloración, sobre todo en la zona Sur, más enriquecida en serpentinita, y otras en la zona del NE.

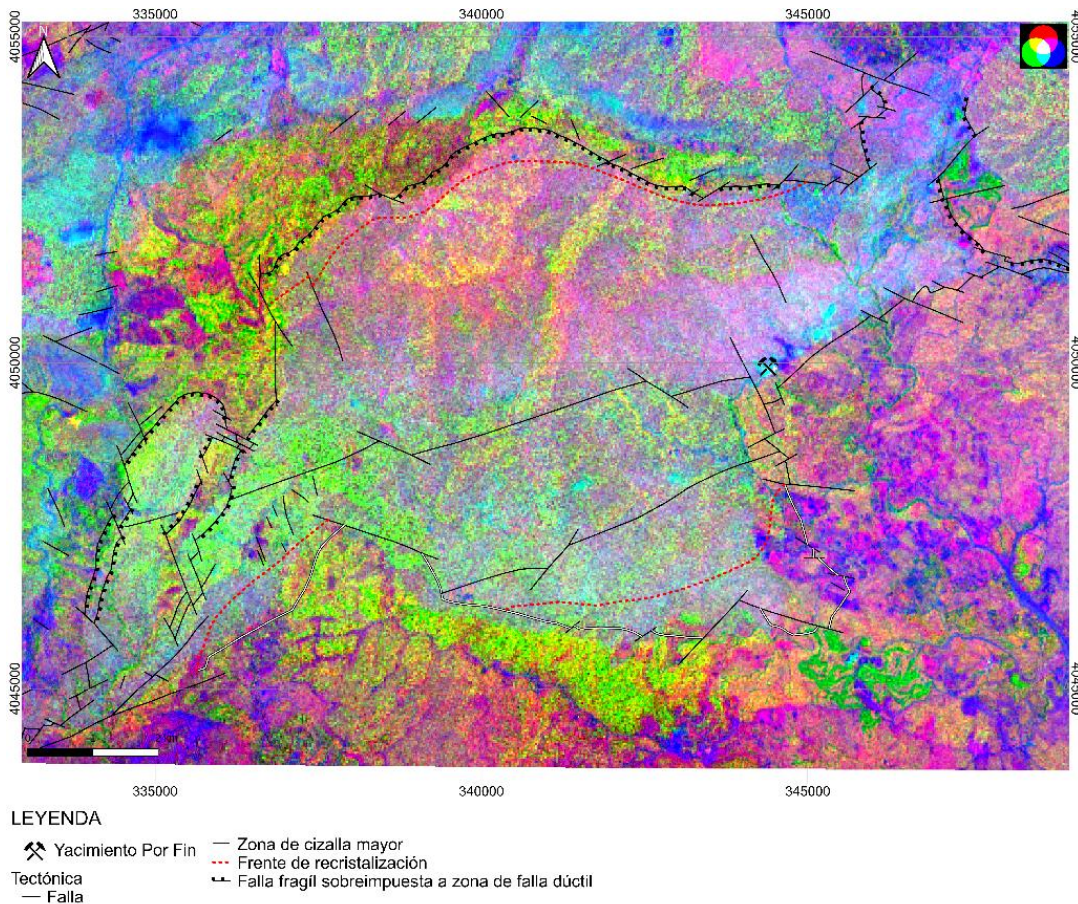


Figura 18. Modelos de color RGB para el macizo de Ojén, R: Hierro Férrico, G: serpentinita y talco, B: silicatos ferrosos.

La coloración azul indicaría zonas más enriquecidas en silicatos ferrosos, como el extremo NE, única región del macizo enriquecida en este tipo de minerales. En el centro tenemos una

banda con dirección E-O de coloración magenta que presentaría enriquecimiento en arcillas y Fe^{3+} .

En la zona del Norte, más específicamente en la zona central y occidental del macizo, aparecen bandas de dirección NE-SO dominada por minerales ricos en Fe^{3+} . Tal y como indica la figura 18, estas bandas se encuentran bordeando a la red de drenaje en esta región.

La zonación del macizo que dibuja este análisis tiene una buena correlación con la geología del área, puesto que la zona Sur, al tener mayor grado de serpentinización, presentaría menor cantidad de olivino y por tanto más resistencia a los procesos de meteorización. En la zona Norte ocurriría lo contrario, puesto que el bajo nivel de serpentinización explicaría una mayor abundancia de olivino, y está un mayor efecto de la meteorización, dando lugar a la generación de óxidos de hierro como goethita y hematita, ambos ricos en Fe^{3+} .

3.3.2. Resultados del Análisis de Componentes Principales

Teniendo en cuenta que el satélite ASTER permite reconocer los principales contrastes en los espectros de longitudes de onda de los minerales objeto de estudio, se decidió realizar el Análisis de Componentes Principales de la imagen obtenida con este satélite. Para que los resultados fuesen más exactos y presentaran una mejor visualización se recortaron las imágenes satelitales justo a las dimensiones del macizo ultramáfico de Ojén.

El primer análisis fue realizado con todas las bandas del VNIR y SWIR a fin de abarcar la mayor cantidad de respuestas. En este análisis la primera componente explica el 98.14% de los datos (tabla 4), siendo la representatividad de los últimos componentes muy baja. Teniendo esto en cuenta, se puede observar que las 3 primeras componentes en conjunto explican el 99.91%, de la información aportada por las imágenes y los 3 últimos el 0.02%, lo que provocará que estos se encuentren muy afectados por el ruido.

Tabla 4. Relación de los componentes principales y varianza.

Componente	Varianza(%)	Varianza acumulada (%)
1	98.1432	98.1432
2	1.1997	99.3429
3	0.5704	99.9133
4	0.0318	99.9451
5	0.0252	99.9703
6	0.0112	99.9815
7	0.0082	99.9897
8	0.0058	99.9956
9	0.0044	100

Tabla 5. Relación de los vectores propios para cada componente.

	Componente								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Banda 1	0.26	-0.47	0.38	-0.19	-0.69	-0.20	0.08	0.01	0.02
Banda 2	0.37	-0.58	0.31	0.20	0.61	0.13	-0.02	-0.01	-0.01
Banda 3	0.48	0.64	0.56	-0.18	0.06	0.09	-0.05	-0.02	-0.01
Banda 4	0.42	0.16	-0.22	0.66	-0.08	-0.47	0.26	0.12	0.00
Banda 5	0.29	-0.03	-0.27	0.03	-0.19	0.45	-0.24	0.51	-0.53
Banda 6	0.34	-0.01	-0.32	0.04	-0.18	0.53	0.27	-0.61	0.15
Banda 7	0.27	-0.03	-0.26	-0.11	-0.03	-0.02	-0.51	0.23	0.73
Banda 8	0.26	-0.04	-0.28	-0.31	0.12	-0.45	-0.41	-0.44	-0.40
Banda 9	0.21	-0.03	-0.27	-0.59	0.23	-0.14	0.60	0.32	0.05

En la tabla 5 podemos observar que para el segundo componente los valores altos (en azul) estarán más influenciados por la banda 3 y los bajos (en rojo) por la banda 1 y 2. En el caso de la tercera componente hay una mayor distribución de los valores bajos entre las bandas de la 4 a la 9, siendo los valores altos causado por la banda 3 y en menor medida por la 1 y la 2. En el caso del primer componente la banda de mayor peso es la tercera, pero en general todas aportan a este componente. Los menores valores a partir de la cuarta banda para los 3 primeros componentes dificultan el estudio de los minerales de la zona puesto que las últimas bandas son las que más información aportan en la cartografía geológica, ya que en las primeras bandas no se presenta contraste entre los minerales estudiados.

El primer componente que presenta un contraste positivo en todas las bandas agrupara las características más generales para este macizo sin generar contrastes entre las distintas bandas, generalmente reflejando los usos del suelo.

Al poner las 3 primeras componentes en un modelo RGB (figura 19), observamos que el depósito de talco Por Fin se encuentra marcado por un color rojo fuerte, esto se puede deber a que las bandas de mayores contrastes para este mineral son la 4, 5 y 6, de las cuales solo la 4 queda representada por valores altos en los dos primeros componentes, el resto de estas bandas presentan solo altos valores en el primer componente provocando que solo sea rojo su representación. Las zonas de coloración azul parecen estar relacionada con el enriquecimiento en serpentinita específicamente en la lizardita, el vector propio de la componente 3 presentaría mayor peso para la banda 3, la cual presenta el mayor contraste respecto al resto de los minerales. Esta imagen refleja varios límites para el macizo de dirección E-O, misma dirección que presentan las grandes fallas que ponen en contacto las distintas facies del macizo. Marcando además la zonación litológica.

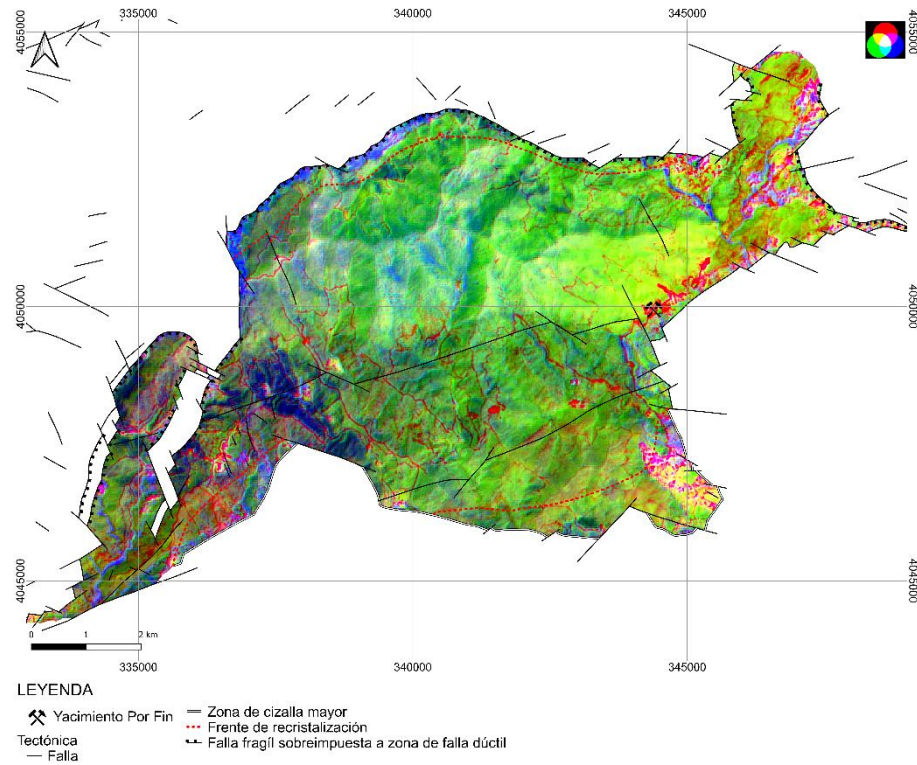


Figura 19. Modelos de color RGB para el macizo de Ojén, R: componente 1, G: componente 2, B: componente 3.

La componente 4 presenta un peso mayoritario para la banda 4, y la mayoría de los minerales analizados en este estudio presentan un pico espectral, además de que el peso para la última banda donde los óxidos serían dominantes presentaría los valores más bajos. Teniendo en cuenta esto y el criterio de Loughlin (1991) a la hora de escoger los componentes con la información, la banda 4 presentaría los valores mínimos en las zonas enriquecidas en óxidos.

Tomando esto en cuenta se realizó una imagen RGB (R:componente 4, G:componente 5, B:componente 6) para buscar el contraste marcado de las zonas enriquecidas en serpentinita e hierro férrico (figura 20).

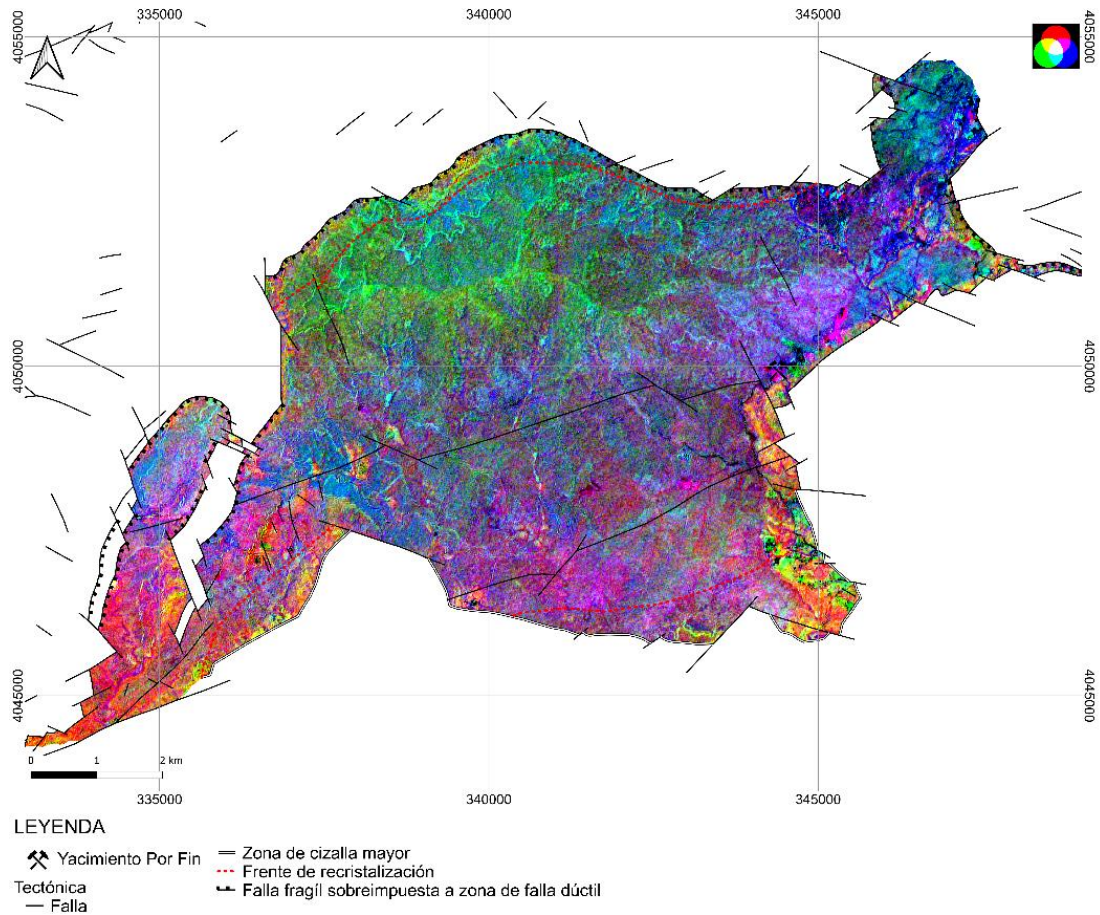


Figura 20. Modelos de color RGB para el macizo de Ojén, R: componente 4, G: componente 5, B: componente 6.

Los resultados marcaron las zonas en verde como las más enriquecidas en hierro férrico, debido a que es la componente 5 la que presenta mayor valor en banda 8 y 9 que es donde más contrasta positivamente respecto al resto de minerales. Las zonas rojizas representarían el enriquecimiento en minerales del grupo de la serpentina que se vería reflejada por valores positivos en el componente 4 pues son las que menor contraste presentan en esta banda comparada con los otros minerales.

Las zonas de gneises que aparece como una ventana hacia la zona Oeste se ve bien representada con colores naranjas. Al igual que la combinación de ratios de la Figura 18, esta imagen refleja muy bien el desplazamiento del límite SE del macizo hacia el Oeste.

Las zonas enriquecidas en talco aparecen de color magenta. Casi toda la zona NE del macizo se encuentra de color azul coincidiendo con las resaltadas por su abundancia de hierro ferroso y silicatos de hierro.

3.3.3. Resultados y discusión del análisis de Componentes Principales Orientado a Objetos

Fue realizado un análisis FPCS con las bandas que más contraste presentan para los minerales mayoritarios, banda 5, 7,8 y 9.

El resultado de este análisis indica que el primer componente acumula el 97% de la varianza (tabla 6), y que los tres primeros componentes acumulan el 99.6%.

Tabla 6. Relación de los componentes con su varianza.

Componente	Varianza(%)	Varianza acumulada (%)
1	97.6467	97.6467
2	1.342	98.9887
3	0.6392	99.6279
4	0.3721	100

Tabla 7. Relación de los vectores propios para cada componente.

	Componente			
	1	2	3	4
Banda 5	0.52705	0.56869	0.51521	-0.36519
Banda 7	0.50641	0.24211	-0.21971	0.79791
Banda 8	0.52138	-0.15994	-0.69204	-0.47293
Banda 9	0.44037	-0.76967	0.45537	0.07944

La tabla de resultados de los vectores propios muestra contrastes sobre todo para el segundo y cuarto componente (tabla 7). El segundo componente presenta los valores más altos relacionados directamente con la banda 5 y los más bajos con la 9. Ésta es la respuesta que mejor se puede separar, pues el peso para las otras bandas es muy bajo. Aplicando el criterio de Loughlin (1991) en el segundo componente tendríamos aislada la respuesta tanto para lizardita como para el talco.

En la figura 21 se puede ver la representación de la segunda banda donde tendríamos representada la serpentinita en las zonas más verdosas y el talco en las más blanquecinas, mostrando las mismas anomalías de talco en la dirección E-O en la zona sur del macizo.

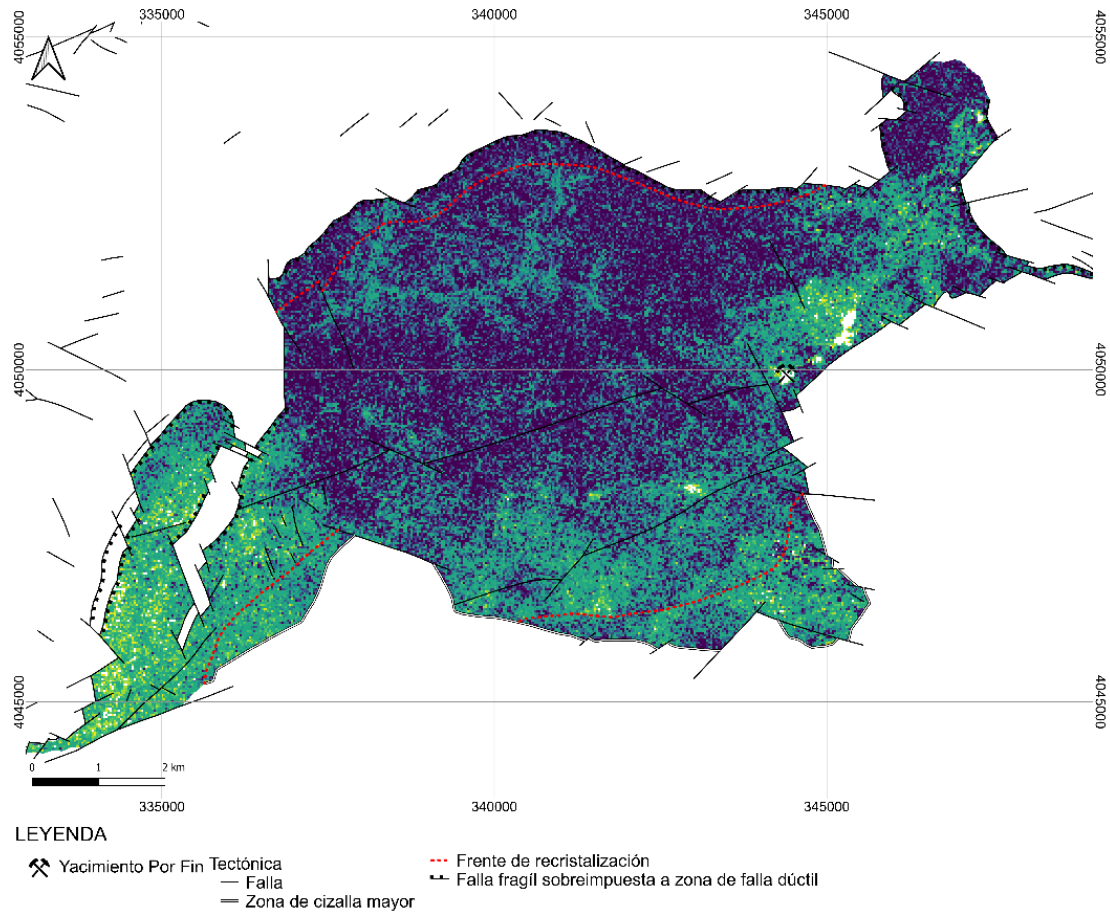


Figura 21. Mapa de la componente 2, donde los mayores valores estarían más representados por la banda 5 y los menores por la 9.

Con la respuesta de la serpentinita y el talco aisladas dentro de un mismo componente principal se decidió realizar una imagen RGB donde se tuviera en la primera banda la componente 1, en la segunda la 2 y en la tercera la 3 (figura 22).

Los resultados mostraron una zonación rojiza en la mitad Norte del macizo y más verdosa hacia el Sur sobre todo en la zona Oeste, marcando así el grado de serpentización de estas zonas. El depósito de talco Por Fin aparece de color blanquecino, al igual que otras zonas que sería interesante comprobar ya que podrían encontrarse enriquecidos en este mineral. El extremo SE aparece de coloración amarillenta a rojiza al igual que la ventana de gneises de la zona Oeste, lo que podría indicar una diferenciación al resto del macizo y más similar a las rocas que lo rodean pues se ha distinguido del resto en varios procesamientos.

Con todos los resultados obtenidos en este análisis se ha realizado un mapa actualizado para la zona de estudio donde se ponga en evidencia los resultados de esta investigación (figura 23).

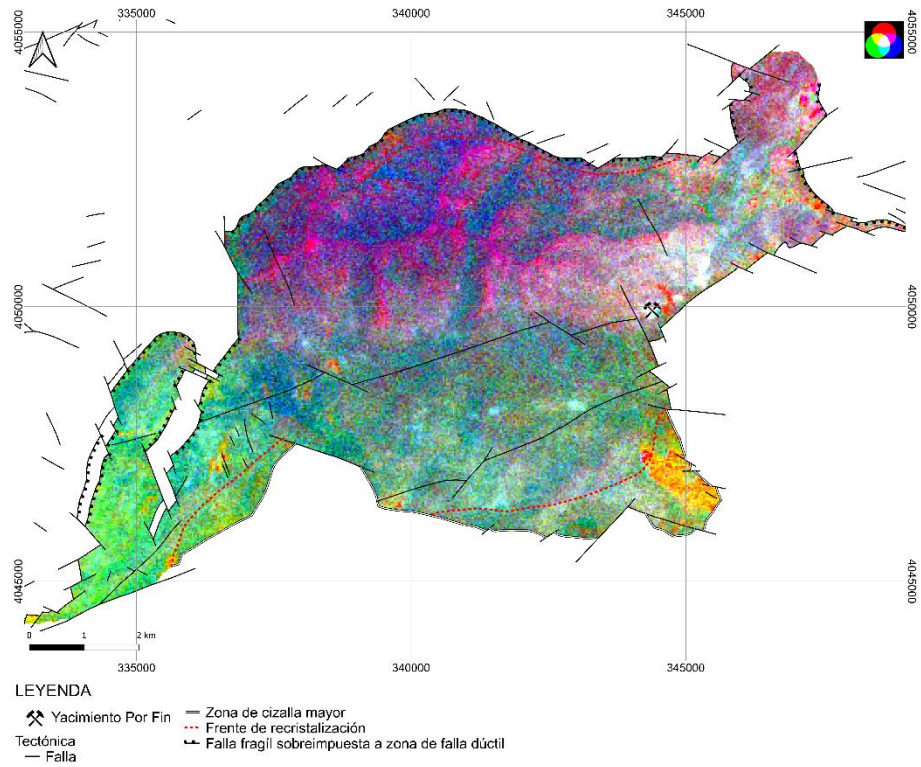


Figura 22. Modelos de color RGB para el macizo de Ojén, R: componente 1, G: componente 2, B: componente 3.

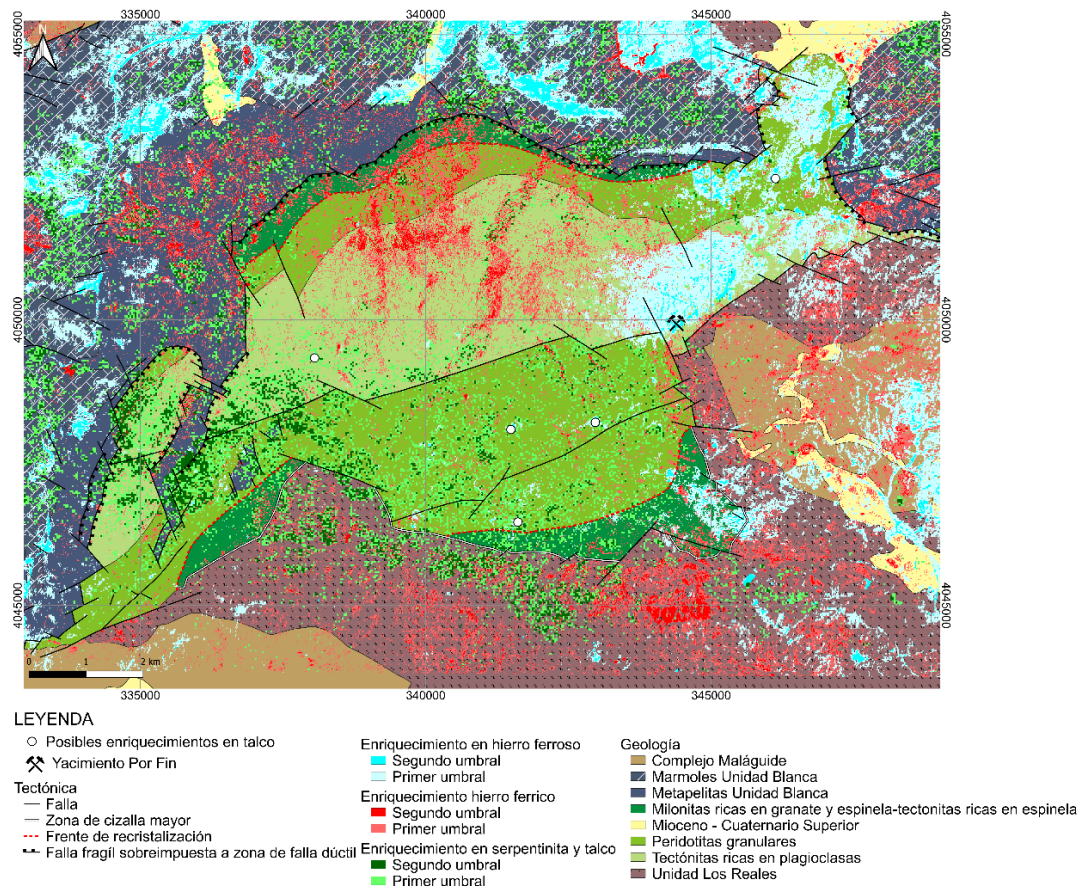


Figura 23. Mapa del Macizo de Ojén actualizado con la información aportada en este estudio.

4. Conclusiones

El análisis de teledetección multiespectral del Macizo de Ojén llevado a cabo con imágenes de los satélites ASTER y Sentinel-2 ha arrojado los siguientes resultados:

- La teledetección demostró ser una técnica eficaz en el estudio geológico de este macizo ultramáfico. Teniendo en cuenta los minerales mayoritarios presentes en el área investigada el satélite ASTER es el que ofrece una mejor capacidad de discriminación.
- Los procesamientos realizados Rationing y PCA, ofrecen capacidades resolutivas para la cartografía geológica del Macizo de Ojén. Dichas capacidades pueden ser exportables a otros macizos de ultramáficos de características análogas.
- La cartografía del Macizo de Ojén puede ser discriminada sobre todo empleando imágenes RGB que combinen productos de Rationng o PCA. Se han podido detectar los límites del macizo, una zona al SE que indica que el contacto del macizo con la Unidad de los Reales posiblemente se encuentre desplazado al Oeste y la ventana de gneises de la zona Oeste.
- La zona de alteración serpentinitica queda bien cartografiada. A pesar de que en ciertos procesamientos aparecían junto al talco al realizar combinaciones RGB, se diferenciaban ambos debido a que este último presentaba respuestas en otras bandas.
- Las zonas ricas en talco fueron definidas mediante varios procesamientos, principalmente mediante el análisis FPCS, al tiempo que se estimaron otras nuevas zonas que podrían ser objeto de exploración para este mineral.

Bibliografía

- Araña, V. and Vegas, R. (1974) 'Plate tectonics and volcanism in the gibraltar arc', *Tectonophysics*, 24(3), pp. 197–212. doi: 10.1016/0040-1951(74)90008-0.
- Arenas, R. (2016) *Aplicación de la teledetección en la exploración geominera y de recursos naturales*. Universidad de Oviedo. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1309.7609.pdf>.
- Bakardjiev, D. and Popov, K. (2014) 'ASTER spectral band ratios for detection of hydrothermal alterations and ore deposits in the Panagyurishte Ore Region , Central Srednogorie', 76, pp. 75–76.
- Barich, A. *et al.* (2014) 'Microstructures and petrology of melt inclusions in the anatectic sequence of Jubrique (Betic Cordillera, S Spain): Implications for crustal anatexis', *Lithos*, 206–207(1), pp. 303–320. doi: 10.1016/j.lithos.2014.08.003.
- Beygi, S. *et al.* (2021) 'Alteration and structural features mapping in Kacho-Mesqal zone, Central Iran using ASTER remote sensing data for porphyry copper exploration', *International Journal of Image and Data Fusion*, 12(2), pp. 155–175. doi: 10.1080/19479832.2020.1838628.
- Brizuela, A. B., Aguirre, C. and Velasco, I. (2007) 'Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal', *Remote Sensing of Environment*, pp. 207–214. Available at: <http://www.aet.org.es/congresos/xii/arg27.pdf>.
- Chavez, P. S. (1988) 'An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data', *Remote Sensing of Environment*, 24(3), pp. 459–479. doi: 10.1016/0034-4257(88)90019-3.
- Consejería de Transformación Económica, Industrial, C. y U. (no date) *Instituto de Estadística y Cartografía*. Available at: <https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/lineav2/web/> (Accessed: 22 November 2021).
- Crosta, A. and Moore, J. (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; International Proceedings of the Seventh Erim Thematic Conference: Remote Sensing for Explora', (February), pp. 1173–1187.
- Crosta, A. P. *et al.* (2003) 'Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis', *International Journal of Remote Sensing*, 24(21), pp. 4233–4240. doi: 10.1080/0143116031000152291.
- Eggleton, R. A. (1984) 'Formation of iddingsite rims on olivine: a transmission electron microscope study.', *Clays & Clay Minerals*, 32(1), pp. 1–11. doi: 10.1346/CCMN.1984.0320101.
- ESA (2015) *ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services*.
- Farah, A. *et al.* (2021) 'Lithological mapping and automatic lineament extraction using Aster and Gdem data in the Imini-Ounilla-Asfalou district, South High Atlas of Marrakech, Morocco', *E3S Web of Conferences*, 240(April). doi: 10.1051/e3sconf/202124004002.
- Gervilla, F. *et al.* (2019) *Geology and metallogeny of the upper mantle rocks from the*

- Serranía de Ronda, Evolution*. Edited by S. E. de Mineralogía. Editorial La Serranía, S. L.
- Gervilla, F., Gutiérrez-Narbona, R. and Fenoll Hach-Alí, P. (2002) ‘The origin of different types of magmatic mineralizations from small-volume melts in the lherzolite massifs of the Serranía de Ronda (Málaga, Spain).’, *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 25, pp. 79–96.
- Gervilla, F. and Leblanc, M. (1990) ‘Magmatic ores in high-temperature alpine-type lherzolite massifs (Ronda, Spain, y Beni Bousera, Morocco)’, *Economic Geology*, 85(1), pp. 112–132. doi: 10.2113/gsecongeo.85.1.112.
- Goldich, S. S. . (1938) ‘A Study in Rock-Weathering’, *Journal of Geology*, 46(1), pp. 17–58.
- Hashim, H., Abd Latif, Z. and Adnan, N. A. (2019) ‘Urban vegetation classification with NDVI threshold value method with very high resolution (VHR) Pleiades imagery’, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(4/W16), pp. 237–240. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W16-237-2019.
- Hidas, K. *et al.* (2013) ‘Backarc basin inversion and subcontinental mantle emplacement in the crust: Kilometre-scale folding and shearing at the base of the proto-alborán lithospheric mantle (Betic Cordillera, southern Spain)’, *Journal of the Geological Society*, 170(1), pp. 47–55. doi: 10.1144/jgs2011-151.
- Hotelling, H. (1933) ‘Analysis of a complex of statistical variables into Principal Components. Jour. Educ. Psych., 24, 417-441, 498-520’, *The Journal of Educational Psychology*, 24, pp. 417–441.
- Ibraheem, N. a *et al.* (2012) ‘Understanding Color Models : A Review’, *ARPN Journal of Science and Technology*, 2(3), pp. 265–275.
- Kalinowski, A. and Oliver, S. (2004) ‘ASTER Mineral Index Processing Manual’, in *Remote Sensing Applications*, p. 36.
- Klein, F. *et al.* (2009) ‘Iron partitioning and hydrogen generation during serpentinization of abyssal peridotites from 15°N on the Mid-Atlantic Ridge’, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(22), pp. 6868–6893. doi: 10.1016/j.gca.2009.08.021.
- Kokaly, R. F. *et al.* (2017a) *Resampled to ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) visible to shortwave infrared (SWIR) bands, USGS Spectral Library Version 7: U.S. Geological Survey Data Series 1035*. doi: <https://doi.org/10.3133/ds1035>.
- Kokaly, R. F. *et al.* (2017b) *Resampled to Sentinel-2 MSI (MultiSpectral Instrument) visible to SWIR, USGS Spectral Library Version 7: U.S. Geological Survey Data Series 1035*. doi: <https://doi.org/10.3133/ds1035>.
- Kuebler, K. E. *et al.* (2003) ‘A study of olivine alteration to iddingsite using Raman spectroscopy’, *Lunar and Planetary Science Conference*, 36, p. 1593. Available at: <https://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2003/pdf/1953.pdf>.
- Loughlin, W. P. (1991) ‘Principal component analysis for alteration mapping’, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57(9), pp. 1163–1169.
- Luque, F. J., Rodas, M. and Doval, M. (1985) ‘Mineralogía y génesis de los yacimientos

- de vermiculita del Macizo de Ojén (Serranía de Ronda, Málaga)', *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 8, pp. 229–238.
- Marín, G. and Ninci, C. (2010) 'Teledetección en las Ciencias de la Tierra', *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 66(4), pp. 17–33. doi: 10.18356/7bdf1f00-es.
- Martin-Rojas, I. *et al.* (2012) 'The Triassic platform of the Gador-Turon unit (Alpujarride complex, Betic Cordillera, southeast Spain): Climate versus tectonic factors controlling platform architecture', *Facies*, 58(2), pp. 297–323. doi: 10.1007/s10347-011-0275-z.
- Martínez-Martínez, J. M. and Azañón, J. M. (1997) 'Mode of extensional tectonics in the southeastern Betics (SE Spain): Implications for the tectonic evolution of the peri-Alborán orogenic system', *Tectonics*, 16(2), pp. 205–225.
- Mazhari, N., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Ghaderi, M. (2017) 'Detecting and mapping different types of iron mineralization in Sangan mining region, NE Iran, using satellite image and airborne geophysical data', *Geosciences Journal*, 21(1), pp. 137–148. doi: 10.1007/s12303-016-0018-9.
- Van der Meer, F. D., van der Werff, H. M. A. and van Ruitenbeek, F. J. A. (2014) 'Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications', *Remote Sensing of Environment*, 148, pp. 124–133. doi: 10.1016/j.rse.2014.03.022.
- Pérez, C. and Muñoz, Á. (2006) 'Teledetección nociones y aplicaciones'.
- Pilar Mateo, E., Estévez, C. and Borba, A. (1993) 'Memoria Magna 1066 COIN'. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España, p. 71.
- Pineda-Falcone, M. *et al.* (2017) 'Teledetección en la cartografía geológica de la Península de Azuero, (Panamá)', *Revista Científica Universitaria*, 7(1), pp. 0–6.
- Platt, J. P. *et al.* (2003) 'Exhumation of the Ronda peridotite and its crustal envelope: Constraints from thermal modelling of a P-T-time array', *Journal of the Geological Society*, 160(5), pp. 655–676. doi: 10.1144/0016-764902-108.
- Ramachandra, M. *et al.* (2020) 'Remote Sensing and GIS applications in Mineral Detection and Mapping using Band Rationing Technique .', 16(July), pp. 424–439.
- Rodas, M. (1978) *Estudio mineralógico y genético de los yacimientos de talco de la Serranía de Ronda (Málaga)*. Universidad Complutense de Madrid.
- Rodas, M., Galan, E. and La Iglesia, A. (1980) 'Mineralogía y Mineralogénesis de los depósitos de talco de la serranía de Ronda (Málaga), Parte I:Geología', *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 91(3), pp. 18–31.
- Rowan, L. C. (1998) 'Analysis of simulated advanced spaceborne thermal emission and reflection (ASTER) radiometer data of the Iron Hill, Colorado, study area for mapping lithologies', *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 103(D24), pp. 32291–32306. doi: 10.1029/98JD02118.
- Rowan, L. C. and Mars, J. C. (2003) 'Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data', *Remote Sensing of Environment*, 84(3), pp. 350–366. doi: 10.1016/S0034-4257(02)00127-X.
- Sabins, F. F. (no date) *Remote sensing for mineral exploration*, *Ore Geology Reviews*. Available at: www.cr.usgs.gov.

- Sícoli Seoane, J. C. *et al.* (2009) 'Multispectral imagery applied to nickel laterite exploration: The Conceição do Araguaia discovery', *Society of Economic Geologists: Reviews in Economic Geology*, 16(Chapter 9), pp. 109–122.
- Singh, A. and Harrison, A. (1985) 'Standardized principal components', *International Journal of Remote Sensing*, 6(6), pp. 883–896. doi: 10.1080/01431168508948511.
- SUHET (2013) 'Sentinel-2 User Handbook'. ESA Standard Document, p. 64.
- Testa, F. J. *et al.* (2018) 'Lithological and hydrothermal alteration mapping of epithermal, porphyry and tourmaline breccia districts in the argentine andes using ASTER imagery', *Remote Sensing*, 10(2), pp. 1–45. doi: 10.3390/rs10020203.
- Torné, M. *et al.* (1992) 'Mantle-lithosphere bodies in the Alboran crustal domain (Ronda peridotites, Betic-Rif orogenic belt)', *Earth and Planetary Science Letters*, 110(1–4), pp. 163–171. doi: 10.1016/0012-821X(92)90046-X.
- Tubía, J. M., Cuevas, J. and Gil Ibarguchi, J. I. (1997) 'Sequential development of the metamorphic aureole beneath the Ronda peridotites and its bearing on the tectonic evolution of the Betic Cordillera', *Tectonophysics*, 279(1–4), pp. 227–252. doi: 10.1016/S0040-1951(97)00124-8.
- USGS Landsat Program (2017) "*Comparison of #Landsat 7, 8, #Sentinel 2, #ASTER & #MODIS bands*". Available at: <https://twitter.com/usgslandsat/status/837696716417687553> (Accessed: 1 November 2021).
- Vera, J. A. (2004) *Geología de España*. Madrid: SGE-IGME.
- Van Der Wal, D. and Jean-Louis, B. (1996) 'Origin of the recrystallisation front in the Ronda peridotite by km-scale pervasive porous melt flow', *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 122(4), pp. 387–405. doi: 10.1007/s004100050135.
- Wilson, M. J. (2004) 'Weathering of the primary rock-forming minerals: processes, products and rates', *Clay Minerals*, 39(3), pp. 233–266. doi: 10.1180/0009855043930133.