



universidad  
de león



**FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES**

**ANÁLISIS ESPECTRAL DE ÓXIDOS  
DE HIERRO MEDIANTE IMÁGENES  
SATELITALES DEL SENTINEL 2.**

**SPECTRAL ANALYSIS OF IRON  
OXIDES USING SENTINEL 2  
SATELLITE IMAGES.**

Inés Pereira Rodríguez

**DOBLE GRADO EN CIENCIAS  
AMBIENTALES E INGENIERÍA FORESTAL Y  
DEL MEDIO NATURAL**

**JULIO, 2020**

Fdo: Inés Pereira Rodríguez

## ÍNDICE

<b>1.- INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Óxidos de hierro .....	3
1.2 Objetivos .....	5
<b>2.- ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>5</b>
2.1 Climatología .....	6
2.2 Vegetación.....	7
2.3 Geología y edafología .....	7
<b>3.- MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>9</b>
<b>4.- RESULTADOS .....</b>	<b>14</b>
4.1 Índice para óxidos de hierro .....	14
4.2 Índice para óxidos de hierro III.....	16
4.3 Índice para óxidos de hierro II .....	17
4.4 Validación con cartografía geomorfológica.....	18
4.4.1 Índice para óxidos de hierro .....	18
4.4.2 Índice para óxidos de hierro III.....	20
<b>5.-DISCUSIÓN .....</b>	<b>23</b>
5.1 Formaciones con mayor contenido en óxidos de hierro.....	23
5.2 Origen de los óxidos de hierro .....	23
<b>6.- CONCLUSIONES.....</b>	<b>25</b>
<b>7.-BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>26</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>29</b>
<b>ANEXO II .....</b>	<b>30</b>

**Resumen:**

Los óxidos de hierro tienen una gran importancia para la fertilidad del suelo, conocer el contenido en hierro de un área es decisivo a la hora de establecer los cultivos. Desde los años 70, para generar cartografía de minerales se utilizan imágenes de satélite. En el caso del hierro mediante su curva espectral, en la que se observa un pico de reflectancia en la zona del rojo y dos zonas de absorción, en el verde y el infrarrojo cercano, se pueden localizar mediante teledetección. Concretamente el estudio se realizó utilizando las imágenes del satélite Sentinel 2, la imagen seleccionada fue previamente georreferenciada, y se le enmascaró la vegetación y zonas urbanas. Posteriormente, se aplicaron diferentes índices o cocientes para conocer qué tipos de óxidos se encontraban y en que zonas del Valle de Almanzora había mayores contenidos. Una vez aplicados los índices se establecieron, mediante análisis visual, los umbrales a partir de los cuales se considera que un píxel tiene contenido en hierro. Obtenidos estos resultados se contrastaron mediante validación cartográfica con mapas geomorfológicos de la zona. Finalmente, se pudo comprobar la presencia de óxidos de hierro III en la zona de estudio, así mismo se establecieron las unidades del relieve que tenían mayores contenidos y los posibles fenómenos que los habían originado.

Palabras Clave: Hierro III, Mineralogía, Satélites, Teledetección.

**Abstract:**

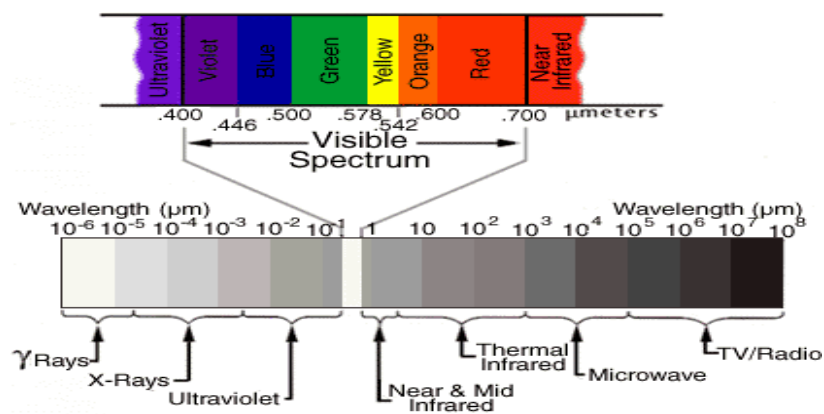
Iron oxides are a key factor for soil fertility, so knowing the iron content of an area is decisive to establish crops. Since the 70s, satellites images have been used in order to generate mineral mapping. So, the spectral curve is analysed to identify iron, in which a peak of reflectance is observed in the area of red and two absorption zones, in the green and near infrared. The current study was carried out using images from the Sentinel 2 satellite. The selected image was previously georeferenced and masks were applied for vegetation and urban areas. Next, different indices were applied to know what types of oxides would be the most common in the region and in which areas of the Almanzora Valley higher contents could be detected. Once the indices were applied, the thresholds for a pixel to have iron content were established by visual analysis. These results were contrasted by cartographic validation with geomorphological maps of the area. Finally, it was possible to verify the presence of iron III oxides in the study area, likewise the geomorphological units with higher contents and the possible phenomena that had originated them.

Keywords: Iron III, Mineralogy, Remote sensing, Satellites.

## 1.- INTRODUCCIÓN

La teledetección es la medición de la radiación solar electromagnética reflejada o la radiación electromagnética emitida por los materiales de la superficie de la Tierra, en unas longitudes de onda determinadas que capta un sensor. Actualmente, la teledetección moderna emplea sensores electroópticos, que convierten la radiación que reciben en señales eléctricas y mediante funciones de transformación predeterminadas crean matrices de números que dan lugar a las imágenes (Porwal y González-Álvarez, 2019).

La energía que captan los sensores, se puede clasificar en función de su longitud de onda a lo largo del espectro electromagnético (**Figura 1**), que va desde los rayos Gamma hasta las ondas de Radio. En concreto, para aplicaciones geológicas las principales longitudes de onda son las correspondientes al ultravioleta, visible y la radiación infrarroja, que se encuentran entre los 0.1 y 10 micrómetros (Gupta, 2017).



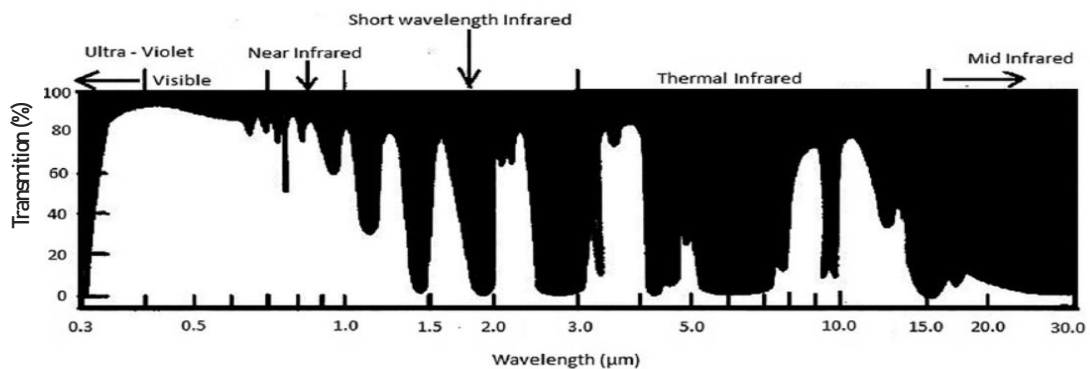
**Figura 1: Espectro electromagnético (Fuente: Universidad de Murcia, 2015).**

El comienzo de la teledetección para uso geológico en la Tierra, se puede fijar en 1972 con el lanzamiento del ETRS-1 (primer satélite para información de recursos naturales), que posteriormente pasó a llamarse LANDSAT 1, marcando el inicio de la serie LANDSAT. Esta colección de satélites continúa en activo, conteniendo el registro de datos satelitales más antiguo de la superficie terrestre (Yamaguchi *et al.*, 1999; Abrams, 2000).

Cada material geológico tiene una reflectancia y emisión únicas, y por tanto, en principio, debería ser posible caracterizar todos los materiales geológicos mediante sensores remotos ópticos o de emisión (Hunt, 1977; Cooper *et al.*, 2002). Sin embargo, solo es posible identificar aquellos minerales cuya emitancia en las regiones del VNIR-SWIR (visible e infrarrojo cercano) es suficientemente alta, pues sino la mezcla de minerales puede enmascarar su respuesta espectral (Porwal y González-Álvarez, 2019). Las transiciones en los estados de

energía electrónica frecuentemente involucran alta energía y, por lo tanto, las características de absorción espectral causadas por los cambios en los estados de energía electrónica aparecen en la región de longitud de onda más corta, es decir VNIR-SWIR (Burns, 1997).

Por otra parte, no todos los materiales emiten a lo largo de la atmósfera en la zona del visible e infrarrojo cercano, dando como resultado pocas ventanas atmosféricas en las cuales se puedan caracterizar los diferentes materiales geológicos (Elachi y Zyl, 2006). En aquellas zonas con longitud de onda superior al infrarrojo cercano hay una gran absorción, por parte de la atmósfera, de la energía procedente del sol (**Figura 2**).



**Figura 2: Ventanas atmosféricas para la teledetección. En blanco se observan las longitudes de onda con transmisión en la atmósfera, mientras que en negro aquellas absorbidas (Fuente: Porwal y González-Álvarez, 2019).**

Las características espectrales que se observan en un espectro de reflectancia en la región VNIR-SWIR, registran la interacción de un material sólido con la energía electromagnética incidente. En el contexto geológico, los principales mecanismos de interacción son excitaciones electrónicas y vibracionales, que conducen a transiciones en los niveles de energía de vibración electrónica y molecular, respectivamente (Elachi y Zyl, 2006). Debido a que todos los niveles de energía en la naturaleza están cuantificados, cada transición a un nivel de energía más alto nos permite conocer la absorción de una cantidad específica de energía, que es característica de la configuración electrónica y molecular del material. Como resultado, cada mineral tiene un conjunto único de características de absorción en función de su composición química y/o estructura molecular y cristalina (Gaffey *et al.*, 1997). De modo que los diferentes tipos de óxidos de hierro son identificables debido a las diferencias en su composición y estructura química que se refleja en la respuesta espectral.

## 1.1 Óxidos de hierro

Los óxidos de hierro son los óxidos metálicos más frecuentes en el suelo (Schwertmann y Taylor, 1989). Además, los minerales de hierro son el segundo indicador de rocas alteradas por condiciones climáticas de meteorización (Floyd, 1996). Estos minerales se presentan en cristales pequeños y pueden a través del suelo agregarse o dispersarse, incluso revestir a otros minerales. Estos óxidos son empleados como indicadores de la evolución del suelo, es decir, se utilizan para conocer la pedogénesis (Schwertmann, 1985), debido a que son minerales secundarios que surgen por alteración química o recristalización de los minerales primarios (Ormeño, 2006). Asimismo, los óxidos de hierro son utilizados para determinar las propiedades inherentes de los minerales en los que se encuentran, como son la cristalinidad, el hábito de cristalización y la sustitución isomórfica (Heck y Mermut, 1999; Torrent y Barrón, 2003).

Una de las formas más sencillas para determinar la presencia de óxidos de hierro se basa en el color, por ello muchos científicos han creado formas de clasificar el suelo en función del mismo (**Tabla 1**). Algunos de los estudios más destacados son los realizados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) o por la USDA (United States Department of Agriculture). El color rojizo de los suelos, en muchas ocasiones se asocia con los óxidos férricos, mientras que los colores verde-grisáceos suelen ir asociados a óxidos ferrosos (Schwertmann y Taylor, 1989). Los minerales oxidados de hierro en España superan un producción de 10000 toneladas anuales, que son destinadas tanto a industrias siderúrgicas como no siderúrgicas. Actualmente el 48% de los óxidos naturales se destinan a la construcción, el 24% para revestimientos, un 21% para usos diversos y el 7% restante se emplea en pinturas, papel, vidrio, plásticos y cerámica (IGME, 2011).

**Tabla 1: Óxidos de hierro más frecuentes en el suelo (Fuente: Besoain, 1985).**

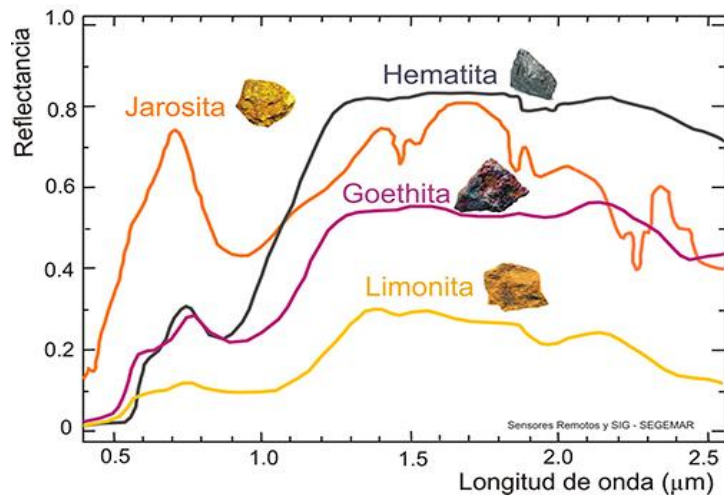
Mineral	Fórmula	Color	Presencia/abundancia en suelos
Hematites	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Rojo	Producto de la meteorización en suelos de latitudes medias y bajas
Goethita	$\alpha\text{-FeOOH}$	Amarillo/Ocre	Es el óxido más abundante, se encuentra en casi todos los suelos producto de la meteorización.
Lepidocrocita	$\gamma\text{-FeOOH}$	Anaranjado	Presente en algunos suelos mal drenados
Ferrihidrita	$\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Pardo rojizo	Abundante en suelos de latitudes medias y altas
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	Negro	Presente en pequeña proporción en muchos suelos, heredado de la roca parental
Maghemita	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Pardo oscuro	Presente en pequeñas proporciones en muchos suelos

En casi todos los suelos se encuentran óxidos de hierro, aunque sea en pequeñas cantidades (Besoain, 1985). El contenido de hierro en el suelo varía entre un 0.5% y un 5% y la media estimada es de 3.8%. Este contenido depende de la roca madre y del tipo de suelo (Bodek *et al.*, 1988).

Por otra parte, el hierro es uno de los nutrientes más problemáticos. En suelos aireados la concentración de los iones  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{2+}$  en ocasiones no alcanza  $10^{-15}$  M, por lo que es insuficiente para cubrir las necesidades nutritivas de las plantas (Juárez *et al.*, 2012). El hierro es, por tanto, uno de los indicadores de fertilidad más importantes junto con el fósforo, el nitrógeno o la materia orgánica, y por ello conocer su contenido es uno de los factores decisivos para establecer un cultivo (Van der Werff y Van der Meer, 2015).

También es muy importante conocer el estado de oxireducción de estos óxidos de hierro. La forma más habitual del hierro en los minerales primarios es  $\text{Fe}^{2+}$ , es decir la forma reducida, sin embargo, en los suelos es más común su forma oxidada,  $\text{Fe}^{3+}$  (Sumner, 1999). En función del estado del hierro tendrán lugar diferentes reacciones redox. En la forma reducida se observa un mayor contenido en agua pudiéndose alcanzar la saturación, adoptando tonalidades grises o azuladas, mientras que en la forma oxidada, hay un menor contenido en agua y el color se torna rojizo (Navarro *et al.*, 2006).

En cuanto a la curva espectral de los minerales de hierro, se observa un pico de reflectancia en las longitudes de onda de 600 a 700 nm, que se corresponde con la zona del rojo del visible y por dos rasgos de absorción (**Figura 3**). El primero se localiza en el intervalo entre los 450 y 550 nm (zona del verde), donde la reflectancia es inversamente proporcional al contenido en hierro (Obukhov y Orlov, 1964). En este caso, el rasgo de absorción de los óxidos de hierro se superpone al rasgo de absorción de la vegetación del suelo, originado por la clorofila, dificultando la diferenciación entre la contribución individual de cada uno de ellos (Richter, 2010). El segundo rasgo de absorción característico de los óxidos de hierro se encuentra alrededor de los 900 nm, siendo un rasgo amplio que se extiende a ambos lados del espectro radiométrico.



**Figura 3: Curvas espectrales de minerales de hierro (Fuente: Servicio Geológico Minero Argentino, 2012).**

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal del presente estudio es la creación de cartografía de los óxidos de hierro en la zona de estudio, basándose en su curva espectral que se expresa en las imágenes de satélite. De este objetivo se pueden derivar los siguientes:

- 1.- Análisis de diferentes índices o cocientes de bandas para la discriminación de los tipos de óxidos de hierro en el área de estudio.
- 2.- Caracterización de los distintos tipos de óxidos de hierro en el área de estudio.
- 3.- Identificación de las formaciones con mayores contenidos en óxidos de hierro y los posibles fenómenos que los han originado, generando así una cartografía de óxidos de hierro.

## 2.- ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se localiza en una superficie de aproximadamente 150 km<sup>2</sup>, en el Valle de Almanzora, comarca española de la provincia de Almería. Concretamente en Albox, municipio situado en la zona nororiental del Valle de Almanzora, encontrándose a 120 km de Almería, capital de la provincia (**Figura 4**).



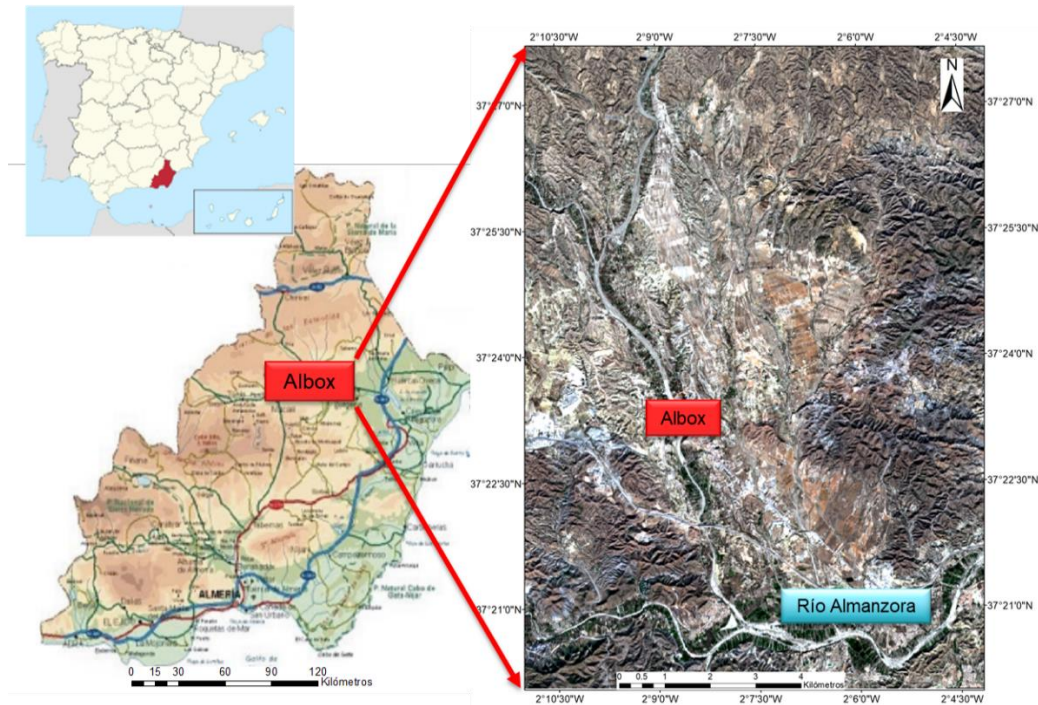


Figura 4: Localización del área de estudio (Fuente del mapa de Almería: Diputación de Almería, 2013).

## 2.1 Climatología

El área de trabajo se corresponde con una zona árida con escasas precipitaciones, de media se observan 8.5 meses de periodo de sequía, siendo éste extremadamente seco de junio a agosto (Figura 5). Se registra una media de 273.5 mm de precipitación anual, con una temperatura anual media de 17.3°C. Su clima por tanto, se puede clasificar como semiárido extremo (Observatorio Meteorológico y Astronómico de Albox, 2009).

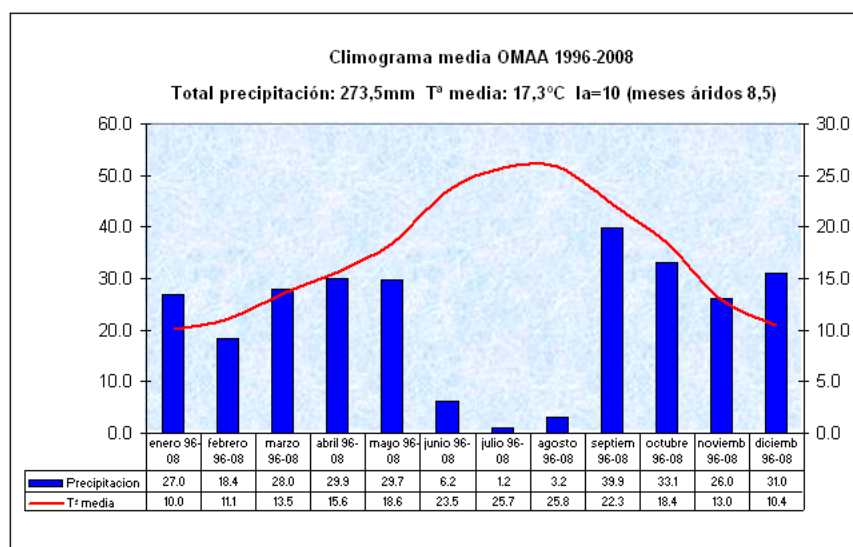


Figura 5: Climograma de Albox de los años 1996-2008 (Fuente: Observatorio Meteorológico y Astronómico de Albox, 2009).

## 2.2 Vegetación

La zona destaca por la presencia de cítricos en los abanicos aluviales y en las llanuras de inundación, además de cultivos de secano, almendros y olivos en zonas de poca o media pendiente. En cuanto a la vegetación natural se observa poca presencia, pero aquella que aparece en la zona es de tipo xerófilo, destacando el herbazal o matorral de tomillar (Simon *et al.*, 2005).

## 2.3 Geología y edafología

Desde un punto de vista geológico la provincia de Almería, tiene una gran variedad y complejidad de unidades geológicas. Dentro de los cuatro grandes conjuntos de unidades geológicas, litológicas y estructurales de Almería, se encuentran las grandes Cuencas Neógenas. Estas cuencas pueden clasificarse en aquellas formadas en el Neógeno Antiguo, que comprende del Mioceno inferior al medio, y el Neógeno Reciente que tuvo lugar entre el Mioceno superior y el Plioceno, conservándose en ellas el registro histórico de la tectónica y sedimentación de los últimos 25 millones de años (Simon *et al.*, 2005).

La Cuenca del Huércal-Overa Corredor del Almanzora, en la cual se encuadra el estudio, está formada por sedimentos del Neógeno Reciente, tanto marinos como continentales (**Anexo I**) que por la presencia de minerales de hierro en forma de película alrededor de la arcilla, dan lugar a conglomerados de tonos rojizos, que se localizan en los abanicos aluviales del relieve que emergió durante el Mioceno inferior (Barragán-Bazán, 1997).

Siguiendo la clasificación del proyecto LUCDEME (Lucha Contra la Desertificación en el Mediterráneo) en Albox se pueden encontrar varios grupos de suelos (**Figura 6**). En general, son suelos de una profundidad variable, situados en zonas de moderada a baja pendiente, con valores de pedregosidad altos, de textura media a gruesa y con contenido variable en materia orgánica. Además, estos suelos tienen una baja capacidad de intercambio, encontrándose saturados en calcio principalmente. Presentan escasa retención de agua generando bajos rendimientos en las tierras, por lo que se están abandonando como zonas de cultivo (Proyecto LUCDEME, 2004).

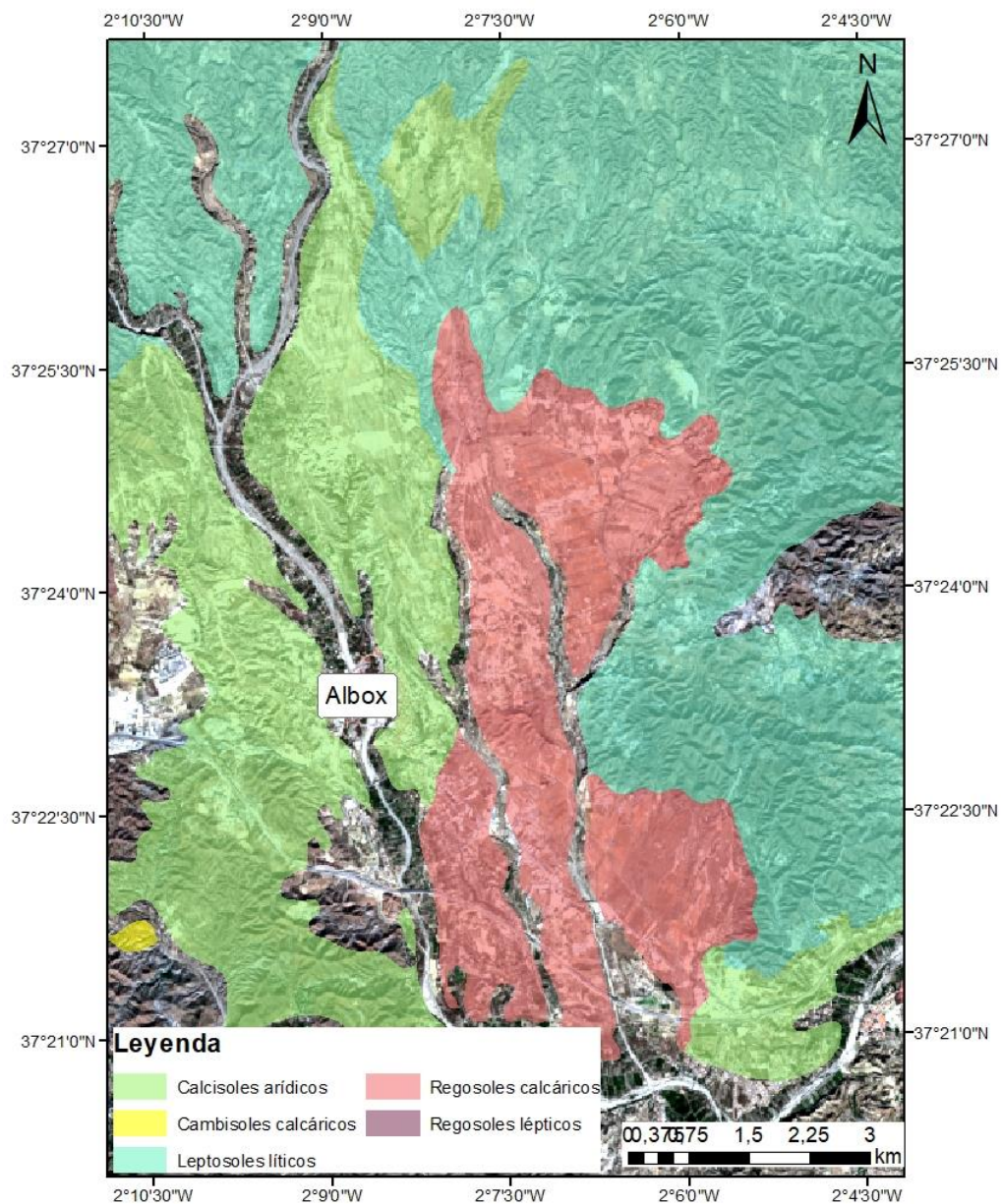
En la zona norte del área se encuentran los Leptosoles líticos, asociados a zonas de roca continua y de gran dureza en los primeros 10 cm del suelo. Por otra parte, en el suroeste del área se observan dos pequeñas zonas correspondientes a Regosoles lépticos y Cambisoles calcáricos. Los Regosoles se localizan en terrenos con grandes pendientes y suelos pedregosos,

teniendo bajo contenido en materia orgánica pero con alto contenido en carbonato cálcico, mientras que los Cambisoles calcáricos se presentan sobre coluvios de naturaleza variable, desde calizo-dolomítico a esquistoso-cuarcíticos y se caracterizan por sus profundos suelos de texturas francas y con buen drenaje.

En la zona central oeste se encuentran los Calcisoles arídicos, que son suelos que se caracterizan por tener un horizonte cálcico o petrocálcico. Aparecen en las zonas más secas de la provincia, son poco pedregosos, con poca materia orgánica, de textura franca y frecuentemente profundos (Simon *et al.*, 2005).

En la zona central este se presenta un suelo de tipo Regosol calcárico. Es decir, se trata de un suelo formado a partir de materiales no consolidados, conglomerados, margas, margocalizas, derrubios y materiales metamórficos de naturaleza calcárea, formando todos ellos relieves moderadamente escarpados e inclinados que configuran paisajes tipo “badland”.

Dentro de estos Regosoles calcáricos se pueden diferenciar varios tipos. En primer lugar aquellos con grandes depósitos rojos, con clastos homogéneos, descarbonatados y arcillosos que se pueden clasificar como crómicos-ferrálicos. Por otra parte, si hay arrastre y movimientos a grandes distancias, se crean suelos con tonalidades pardas, ricos en materia orgánica, descritos como Regosoles húmicos-calcáricos y cálcicos. Por último, encontramos los Regosoles háplicos, que son generados por el efecto de lluvias torrenciales y labores de arado, que dan lugar a suelos con gran desarrollo, de color pardo y con horizontes óricos en la superficie, sin embargo si estos suelos tienen un área madre exclusivamente de arcillas de descalcificación y tienen un intenso color rojo se clasifican como Regosoles crómicos (Torres y Recio, 1996).

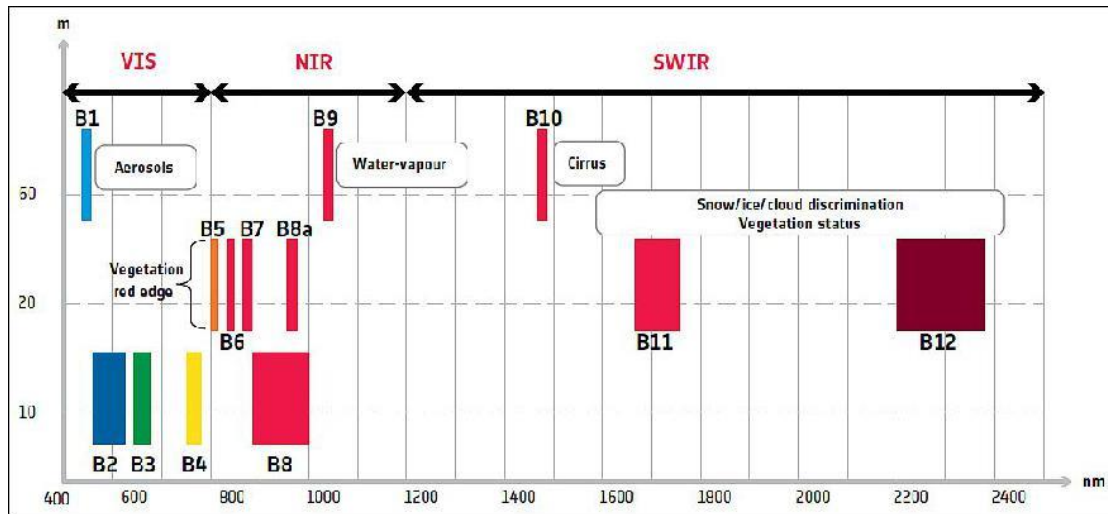


**Figura 6:** Mapa de unidades de suelos clasificación FAO (Fuente: Modificado del proyecto LUCDEME, 2004).

### 3.- MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar el trabajo se eligió una imagen del Sentinel 2A, del 26 de octubre de 2017, en concreto se utilizó un sensor MSI (Multispectral Instrument). Este sensor incluye una cámara multiespectral de alta resolución, formada por 13 bandas espectrales. El satélite puede abarcar una visión de hasta 290 km de ancho, con una resolución temporal de 10 días, que combinándolo con su satélite gemelo, Sentinel 2B, disminuye a 5 días. Posee una resolución mínima espacial de hasta 10 m, aunque varía en función de cada banda, teniendo así

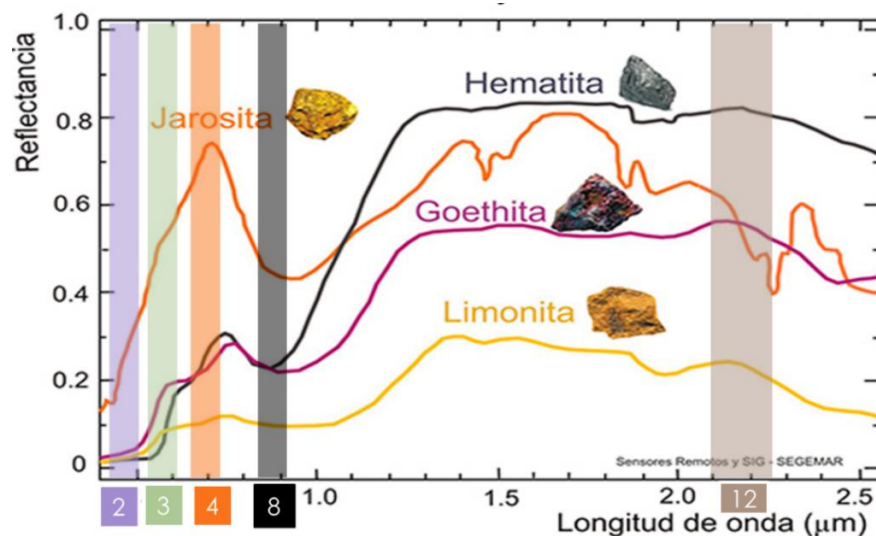
resoluciones de 10, 20 y 60 metros. Las 13 bandas del sensor tienen las características espectrales y espaciales mostradas en la **Figura 7** (European Space Agency, 2019).



**Figura 7:** Bandas con resolución espacial de 10, 20 y 60 m del Sentinel 2 (Fuente: European Space Agency, 2019).

La resolución radiométrica es de 12 BIT, por lo que hay desde 0 hasta 4095 posibles valores de intensidad de luz.

La configuración de sus bandas según Mielke *et al.*, (2014) hace que Sentinel 2 sea actualmente el sensor más adecuado para la observación de óxidos de hierro, pues sus bandas se sitúan en las principales zonas de absorción y reflexión de estos óxidos (**Figura 8**). De esta forma se convierte en un satélite más eficaz para estas tareas, que el ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), que solo tiene una banda en la longitud de onda del rojo y que hasta ahora era el más utilizado para la identificación de hierro.



**Figura 8:** Bandas de Sentinel 2 para la identificación de óxidos de hierro superpuestas con las curvas espectrales de minerales de hierro (Fuente: Modificado del Servicio Geológico Minero Argentino, 2012).

Para el estudio la imagen elegida tiene un nivel de procesado 2A, lo que significa que presenta corrección atmosférica y ortorectificación, con valores de reflectancia en la parte baja de la atmósfera (BOA). Esta imagen fue descargada del Sentinel Data Hub, servidor correspondiente a la Agencia Espacial Europea. La imagen elegida contiene un 0% de cobertura de nubes.

Mediante esta imagen se pasó a realizar un análisis espectral para la determinación de óxidos de hierro. El primer paso consistió en realizar una corrección geométrica de la imagen, pues aunque el producto está georreferenciado, existía un desplazamiento de sus píxeles superior a 25 metros. Para la corrección se utilizó la ortoimagen más actualizada del proyecto Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), obteniéndose un error final de 0.6 píxeles.

Posteriormente se realizó un *resampling* de la imagen, para así tener todas las bandas con la misma resolución. La resolución final escogida fue de 20 metros pues es una resolución óptima para estudios de suelos, en concreto se realizó un *resampling* por agregación (Kruse y Perry, 2013). De esta forma el valor final del píxel se corresponde con la media de los combinados.

A continuación, se procedió a eliminar la vegetación. En estudios espectrales de formaciones superficiales y mineralogía de suelos, esta información debe ocultarse pues sino los rasgos de absorción del hierro se enmascaran con el comportamiento espectral de la vegetación (Koch, 2000; Kariuki y Van der Meer, 2003). Para este proceso se utilizó un cociente o índice, que es una imagen generada por la división píxel por píxel de los niveles de radiancia entre dos o más bandas de una imagen. Para el estudio se generó un índice normalizado de vegetación, NDVI (1), que utiliza las longitudes de onda del rojo ( $\lambda_R$ ) e infrarrojo cercano ( $\lambda_{NIR}$ ), que se corresponden con la banda 4 y 8 respectivamente. Una vez elaborado el NDVI, como valor de ruptura entre aquellos píxeles con y sin vegetación se estableció 0.3, pues según Barret *et al.* (2011) con este umbral se enmascara la vegetación más frondosa. Aunque quedaran sin excluir zonas de vegetación de secano no interferirían con el análisis. Como resultado, se generó una máscara de vegetación, es decir, una nueva imagen con valores 0 para los píxeles con vegetación y valor 1 para el resto, que seguidamente se aplicaría a la imagen de la zona de estudio.

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4} \quad (1)$$

Además, se aplicó otra máscara para eliminar las zonas urbanas, para ello se utilizó el Normalized Difference Built-up Index (NDBI) (2), cociente propuesto por Zha *et al.*, (2003). Este índice se basa en el aumento de la reflectividad de las zonas urbanas en el infrarrojo medio ( $\lambda_{MIR}$ ), mientras que en el infrarrojo cercano ( $\lambda_{NIR}$ ) se encuentra una zona de absorción de las áreas urbanas. Para el satélite Sentinel 2 la banda correspondiente a la  $\lambda_{NIR}$  coincide con la banda 11, mientras que la correspondiente a la  $\lambda_{MIR}$  es la banda 12. Como valor de ruptura, mediante observación visual, se establece que aquellos que superen -0.095 serán considerados como zonas urbanas.

$$NDBI = \frac{B12 - B11}{B12 + B11} \quad (2)$$

Una vez acabado el preprocesamiento se pasó al análisis de la imagen mediante cocientes específicos para la identificación de los distintos tipos de óxidos de hierro en la zona de estudio (Mielke *et al.*, 2014; Van der Werff y Van der Meer, 2016).

Los índices para discriminar los óxidos de hierro se basan en su peculiar comportamiento radiométrico. Como se explicó en el apartado 1.2, los óxidos de hierro tienen un pico de reflectancia en las longitudes de onda de 600 a 700 nm, zona del rojo y unos picos de absorción entre 400 y 550 nm y 850 y 900 nm, respectivamente las zonas del azul e infrarrojo cercano. Se aplicaron los diferentes índices para conocer el contenido en óxidos de hierro, óxidos de hierro III y óxidos de hierro II. Los índices fueron seleccionados en la revisión de literatura como fase preliminar a la identificación.

➤ Índice para óxidos de hierro

Para obtener una visión de todos los óxidos de hierro de la zona, se aplicó un índice (3) que tenía en cuenta la alta reflectancia en la zona del rojo (600-700 nm), de los minerales de hierro y la reflectancia en la zona del azul (400-500 nm) que por el contrario es baja (Floyd, 1996).

$$\text{Óxidos de hierro} = \frac{B4}{B2} \quad (3)$$

Donde  $\lambda_R$  se corresponde con la banda 4 de Sentinel y  $\lambda_A$  con la banda 2.

➤ Índice para óxidos de hierro III

Para la identificación de los minerales de hierro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ), hay que tener en cuenta el aumento de la reflectividad en la zona del rojo (600-700 nm), puesto que los suelos con estos óxidos tienen unas tonalidades rojizas. A su vez disminuye la reflectividad en la zona del verde y hay un aumento de absorción en la zona de los 850-900 nm (Jensen, 2000). Debido a estas características se ha propuesto el siguiente cociente (4) por varios autores (Rowan y Mars, 2003, Rowan *et al.*, 2005).

$$\text{Hierro (III)} = \frac{B4}{B3} \quad (4)$$

Donde  $\lambda_R$  corresponde la banda 4 de Sentinel y  $\lambda_V$  con la banda 3.

Tras aplicar este índice se eliminaron todos aquellos píxeles cuyos valores fueron mayores de 2, pues visualmente se pudo comprobar que eran valores extremos que inducían a errores, ya que se encontraban en las zonas urbanas que no fueron enmascaradas mediante el NDBI.

➤ Índice para óxidos de hierro II

En el caso de la identificación de minerales de óxido ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ), se tuvo en cuenta el aumento de reflectancia de estos minerales en las longitudes de onda del infrarrojo cercano y medio ( $\lambda_{\text{NIR}}$  y  $\lambda_{\text{MIR}}$ ), que en Sentinel 2 se corresponde con las bandas 12 y 8. Sin embargo, hay una reducción de reflectancia en la zona del visible ( $\lambda_A$  y  $\lambda_R$ ), que se representa en las bandas 3 y 4 (Hovis, 1965). El índice (5) fue propuesto por Kalinowski y Oliver (2004). En la zona de estudio no es esperable la presencia de este tipo de minerales, pero se comprobará el funcionamiento del cociente propuesto para el satélite Sentinel 2 en la zona de Albox.

$$\text{Hierro (II)} = \frac{B12 + B8}{B3 + B4} \quad (5)$$

Finalmente, para conocer aquellas morfologías que albergaban mayores contenidos en óxidos de hierro se cruzaron los índices que indicaban la presencia de óxidos de hierro y óxidos de hierro III, junto con el Mapa Geomorfológico y Geológico del Cuaternario de la Cuenca de Huércal-Overa de García-Meléndez (2000) (ANEXO II). No obstante, el índice para óxidos de hierro II no se cruzó con el mapa, puesto que no se encontraba en el área de estudio.

El proceso realizado con la imagen está recogido en la **Figura 9**.



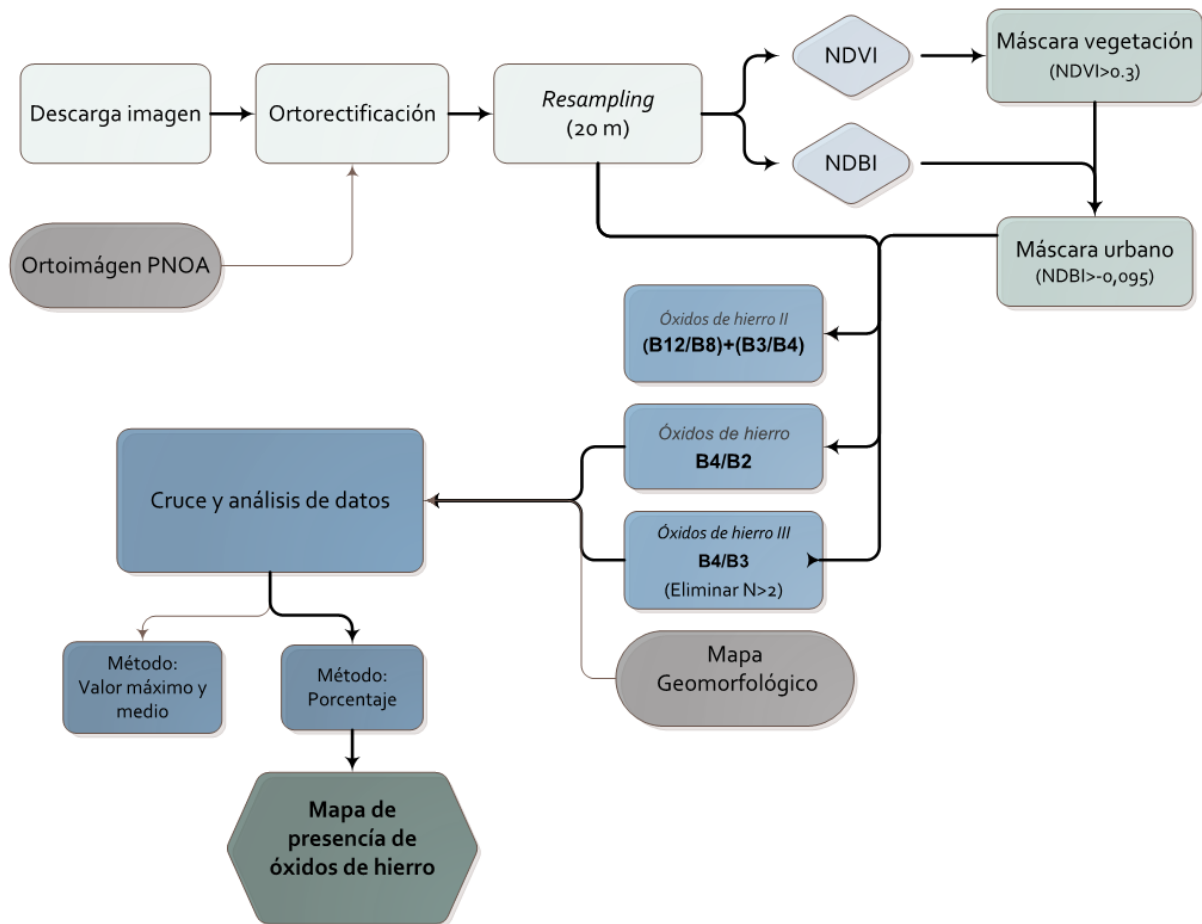


Figura 9: Diagrama de la metodología utilizada en el estudio.

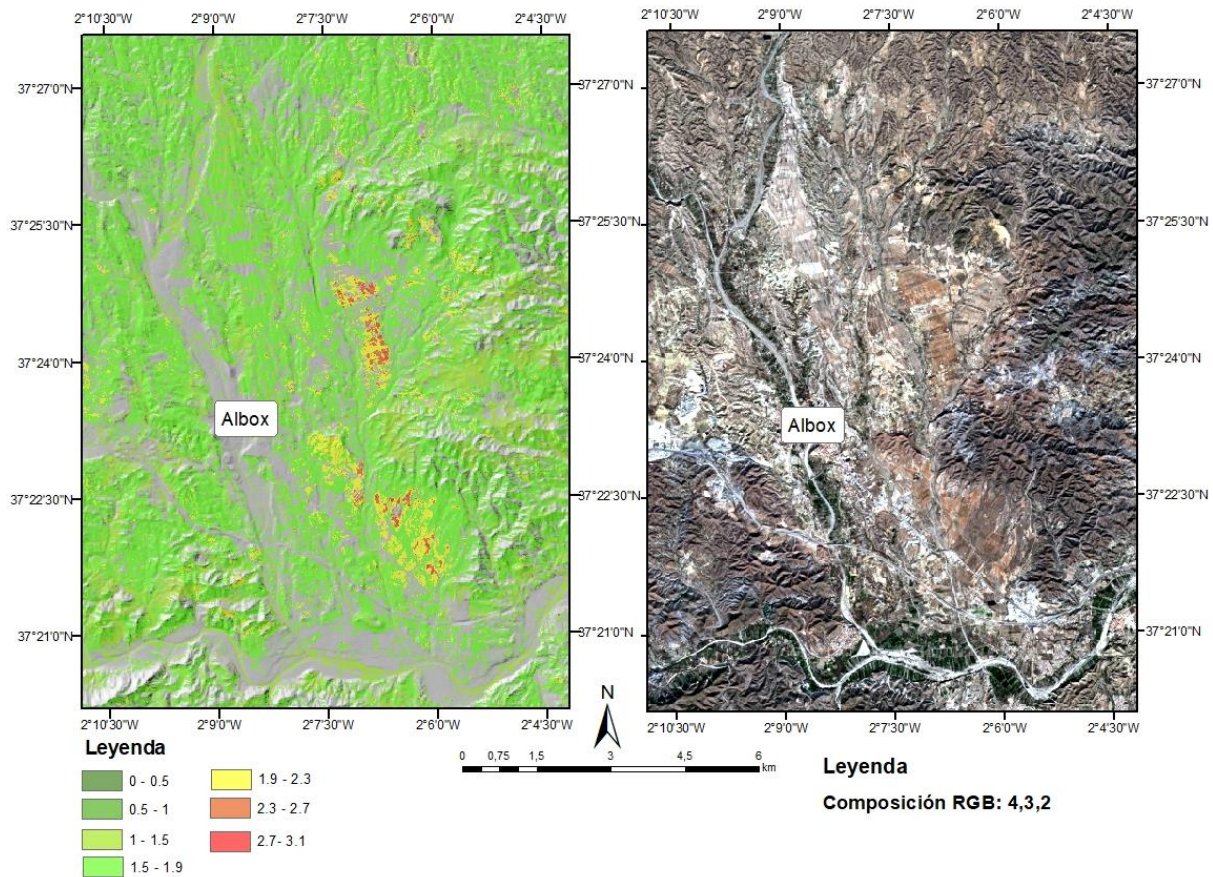
## 4.- RESULTADOS

Los cocientes de bandas tienen como función resaltar aquellas zonas que presentan la característica estudiada, en este caso el contenido en óxidos de hierro. Ello, se debe a que en los índices seleccionados se utilizan como numerador aquellas bandas donde hay una mayor reflectividad de los óxidos, mientras que como denominador se utilizan las bandas del espectro en las cuales hay picos de absorción de estos materiales. De esta forma, los valores que son superiores en las imágenes se corresponden con píxeles que tienen óxidos de hierro.

### 4.1 Índice para óxidos de hierro

Como se observa en la **Figura 10**, el cociente tiene un rango de valores comprendidos entre 0 y 3.1, que por ser elevado sugiere la presencia de óxidos de hierro. Sin embargo, una de las tareas que más incertidumbre genera es establecer cuál es el valor de ruptura o umbral en el cual se diferencian las zonas con o sin óxidos de hierro. Una de las formas más comunes

para establecer este punto de corte es el análisis visual de las imágenes y ajuste del valor de ruptura por discriminación intuitiva-empírica (Navarro *et al.*, 2006). Para este índice, se estableció el umbral de ruptura en el valor de píxel 1.9, por lo que todos aquellos píxeles que lo superen se considerará que tienen contenido en óxidos de hierro, mientras, que aquellos que sean inferiores carecerán de óxidos de hierro. El valor fue seleccionado tras realizar un muestreo de los píxeles situados en los abanicos aluviales que se observan en la zona central



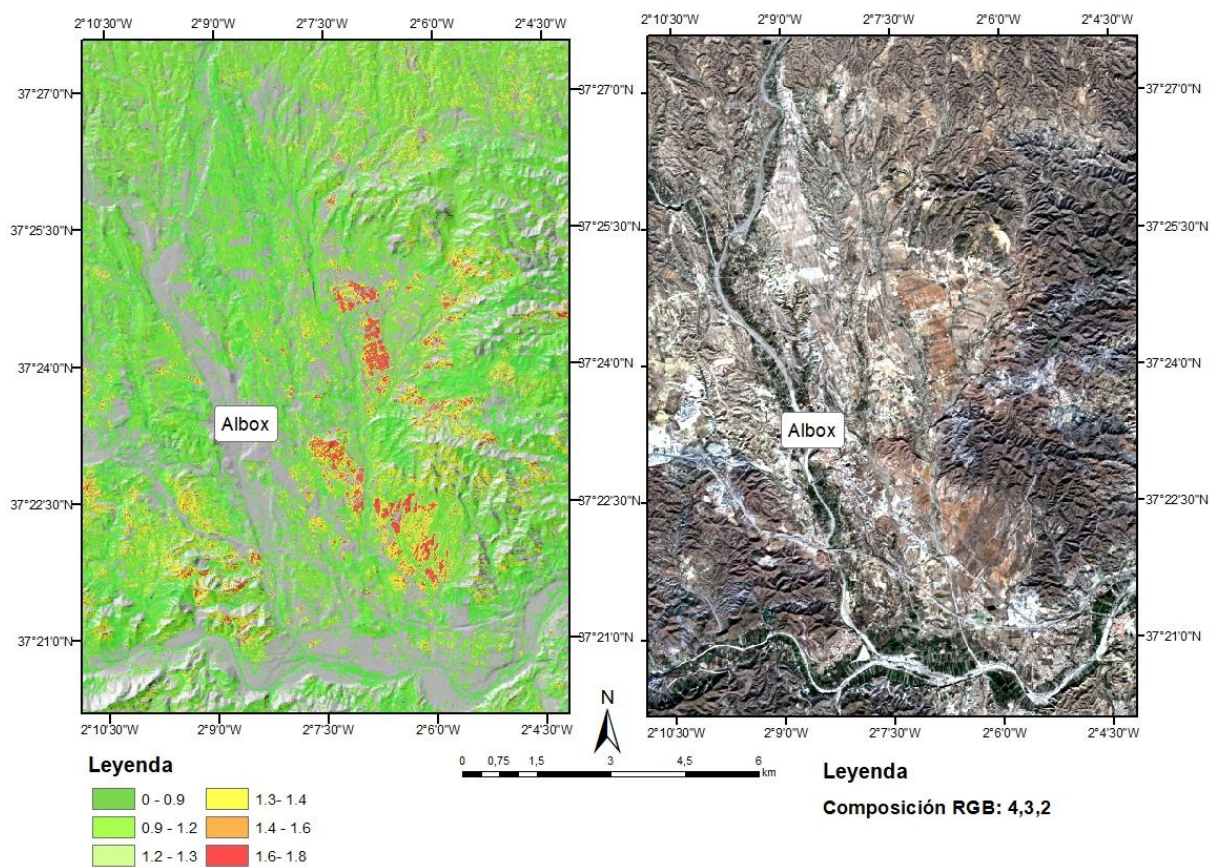
**Figura 10: Índice para la identificación de óxidos de hierros sobre Modelo Digital de Elevación (MDT) y composición en color del área de estudio. (Fuente del MDT: Centro Nacional de Información Geográfica, 2014).**

de la imagen, puesto que mediante datos de campo se conocía previamente la presencia de óxidos de hierro en ellos.

En esta identificación generalizada de los óxidos de hierro, aquellas zonas de colores pardo rojizo que se observan en la composición en color, es decir los dos abanicos aluviales que se encuentran en la zona central de la imagen, son aquellos en los que en el índice realizado poseen valores superiores al umbral establecido en 1.9, y que toman colores amarillentos, anaranjados y rojizos.

## 4.2 Índice para óxidos de hierro III

En el caso del cociente de identificación de óxidos de hierro III se observan valores comprendidos entre 0 y 1.9, es decir algo menores que en el caso anterior, pero suficientemente elevados para indicar la presencia de minerales de óxidos de hierro III. Al igual que en el caso anterior tras un muestreo visual de los abanicos aluviales se pudo establecer el umbral desde el que se considera la presencia de óxidos de hierro III en 1.3. Observándose en las zonas centrales de la **Figura 11** la presencia de estos minerales en las gamas de colores amarillo, naranja o rojo.



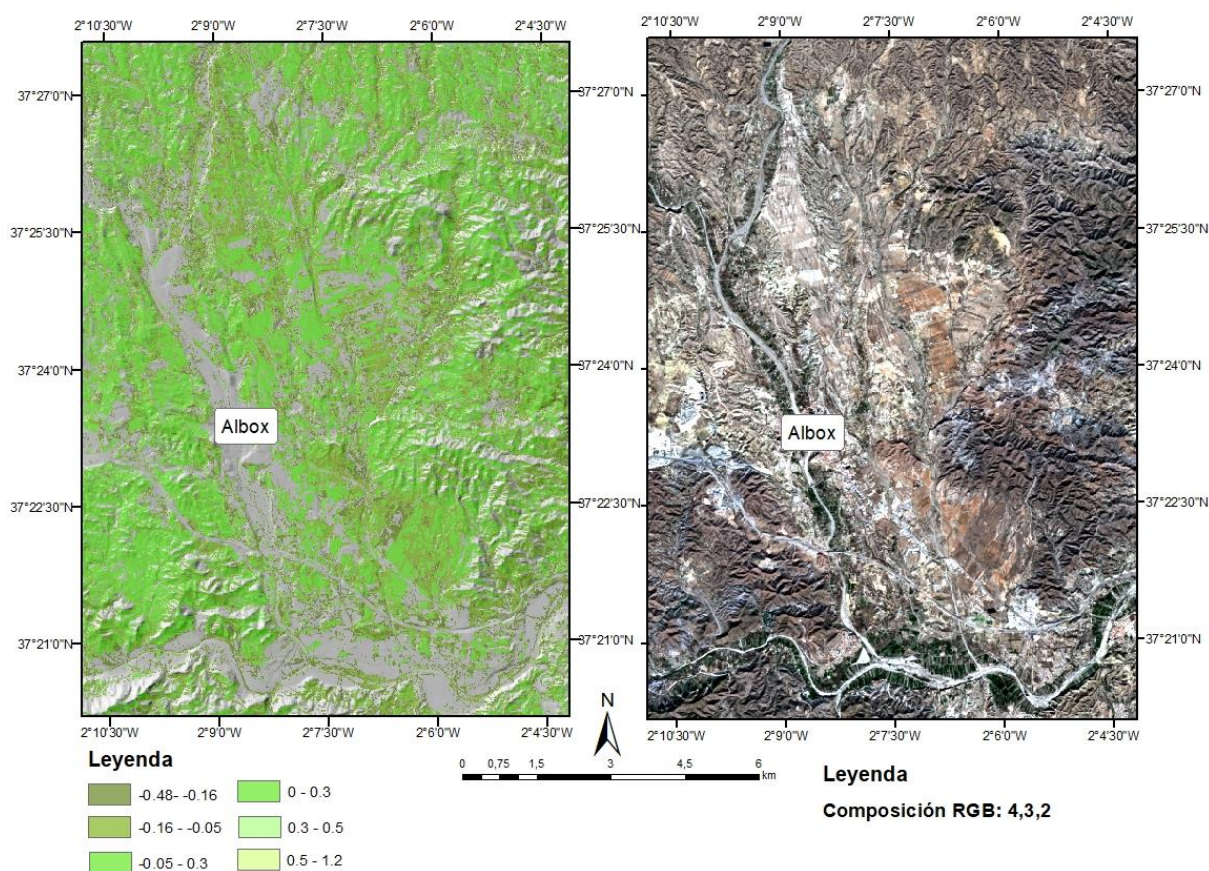
**Figura 11: Índice para la identificación de óxidos de hierro III sobre MDT y composición en color del área de estudio. (Fuente del MDT: Centro Nacional de Información Geográfica, 2014).**

Se puede ver que las zonas con presencia de óxidos de hierro III en el índice, se corresponden con los abanicos aluviales en la imagen de color, que toman el característico color rojo de estos óxidos (Navarro *et al.*, 2006).

Además, el área que ocupa tanto el índice para la observación de óxidos de hierro en general, como para óxidos de hierro III, es muy parecida. Por ello se puede decir que la mayoría de los óxidos presentes en la zona de estudio son minerales de óxidos de hierro III

### 4.3 Índice para óxidos de hierro II

En la **Figura 12**, el rango del índice va desde -0.48 hasta 1.2, es decir un rango de valores bajo que indica la ausencia de óxidos de hierro II en la zona de estudio. Autores como Rowan *et al.*, (2006) sitúan el umbral de óxidos de hierro II a partir de 1.3, con lo que se corrobora la inexistencia de óxidos de hierro II para el área de estudio.



**Figura 12: Índice para la identificación de óxidos de fierros II sobre MDT y composición en color del área de estudio. (Fuente del MDT: Centro Nacional de Información Geográfica, 2014).**

Igualmente, en la imagen en color tampoco se observa ninguna zona que tenga tonalidades azuladas o grisáceo-azuladas, que indican la presencia del minerales de hierro II. Además, el área de estudio se caracteriza por tener épocas de sequía (Observatorio de Meteorología y Astronomía de Albox, 2019) y por ser una zona con suelos en los que hay escasa retención de agua (Proyecto LUCDEME, 2004), lo cual es congruente con las necesidades de zonas saturadas o con altos contenidos en agua, para la formación del hierro en su forma reducida.

Por tanto, se puede concluir que el índice propuesto para minerales de hierro II si puede utilizarse en zonas similares a la del estudio, pues como era esperable se ha confirmado espectralmete la ausencia de estos minerales.

#### 4.4 Validación con cartografía geomorfológica

Los índices anteriores, exceptuando el de hierro II puesto que se descartó su presencia, fueron cruzados con el mapa de unidades geomorfológicas (García-Meléndez, 2000) (**Anexo II**). Este mapa indica las diferentes morfologías que se encuentran en la zona y sus respectivas edades junto con el código numérico identificador (**Tabla 2**).

**Tabla 2: Indicadores temáticos utilizados para el etiquetado de los polígonos del Mapa Geomorfológico y Geológico del Cuaternario de la Cuenca de Huércal-Overa (Fuente: García-Meléndez, 2000).**

Edad	Terraza (1)	Abanico aluvial (2)	Glacis (3)	Derrame (4)	Coluvión (5)	Déposito de pie de monte (6)	Fondo de valle (7)
(10) Actual	101	102	103	104	105	106	107
(9) Holoceno	91	92	93	94	95	96	97
(8) Pleistoceno superior-Holoceno	81	82	83	84	85	86	87
(7) Pleistoceno superior	71	72	73	74	75	76	77
(6) Pleistoceno medio-superior	61	62	63	64	65	66	67
(5) Pleistoceno medio	51	52	53	54	55	56	57
(4) Pleistoceno inferior-medio	41	42	43	44	45	46	-
(3) Pleistoceno inferior	31	32	33	34	35	36	-
(2) Plioceno superior-Pleisceno inferior	20				21		
(1) Sustrato neógeno	1						
(0) Sustrato bético	0						

##### 4.4.1 Índice para óxidos de hierro

En la **Tabla 3**, en gris claro se encuentran todas las formaciones que no contienen ningún píxel con óxidos de hierro, es decir aquellas en las que el valor máximo de píxel no supera el umbral de 1.9. Sin embargo, en gris más oscuro se encuentran las que contienen al menos un píxel con contenido de óxidos de hierro.

Las formaciones con los números más elevados, en su mayoría se corresponden con abanicos aluviales cuyas edades se encuentran entre el Pleistoceno inferior y superior, siendo

las formaciones: 72, 62, 52, 32 y 42. Por otra parte encontramos las formaciones 1, 73 y 31, cuyos valores medios son elevados, y corresponden al sustrato neógeno, glacis del Pleistoceno superior y terraza del Pleistoceno inferior respectivamente.

**Tabla 3: Método de valor máximo y media para los píxeles por cada morfología, para el índice de óxidos de hierro. En rojo se señalan aquellos con medias más altas, lo que indicaría unos mayores contenidos en óxidos de hierro.**

Identificador temático	Máximo	Media
92	1.60	0.15
96	1.87	0.54
76	1.89	1.07
93	1.88	1.35
75	1.87	1.54
91	2.31	0.38
85	2.02	0.55
81	2.50	0.60
95	2.36	0.60
61	3.05	0.71
86	2.39	0.77
97	2.35	0.86
87	2.46	0.93
71	2.42	0.93
22	2.02	0.95
82	2.90	0.99
107	2.52	1.00
0	2.54	1.04
51	2.33	1.04
83	2.81	1.06
84	2.34	1.09
21	2.32	1.14
52	<b>2.66</b>	<b>1.17</b>
1	<b>3.08</b>	<b>1.17</b>
72	<b>3.03</b>	<b>1.19</b>
62	<b>3.03</b>	<b>1.20</b>
32	<b>2.38</b>	<b>1.20</b>
73	<b>2.26</b>	<b>1.29</b>
42	<b>2.23</b>	<b>1.29</b>
31	<b>2.36</b>	<b>1.40</b>

Al observar el porcentaje de hierro que tiene cada zona, respecto al total, en las cuatro formaciones con mayor contenido en óxidos de hierro (**Tabla 4**), se pueden diferenciar 2 grupos:

1. Por una parte, se observa un derrame (84) que es una zona de pequeño tamaño en el área de estudio.
2. Por otra, sobresalen tres abanicos aluviales (62, 72 y 82), que son áreas de tamaño medio en el mapa, localizándose en la zona central del estudio.

**Tabla 4: Método de porcentajes. Número de píxeles con o sin presencia de hierro y porcentaje de píxeles con hierro por cada morfología, para el índice de óxidos de hierro. En rojo se señalan aquellos con un mayor porcentaje de píxeles con óxidos de hierro.**

Identificador temático	Número de píxeles	Contenido en hierro	% de píxeles con hierro
75	228	Sin hierro	
76	660	Sin hierro	
92	58	Sin hierro	
93	106	Sin hierro	
96	385	Sin hierro	
91	11460	Sin hierro	
	35	Con hierro	0.30
85	605	Sin hierro	
	3	Con hierro	0.49
42	4268	Sin hierro	
	27	Con hierro	0.63
32	625	Sin hierro	
	5	Con hierro	0.79
97	4170	Sin hierro	
	66	Con hierro	1.56
0	46938	Sin hierro	
	757	Con hierro	1.59
81	15508	Sin hierro	
	322	Con hierro	2.03
71	12651	Sin hierro	
	303	Con hierro	2.34
107	30075	Sin hierro	
	721	Con hierro	2.34
61	1883	Sin hierro	
	53	Con hierro	2.74
52	24182	Sin hierro	
	730	Con hierro	2.93
1	179882	Sin hierro	
	6869	Con hierro	3.68

Identificador temático	Número de píxeles	Contenido en hierro	% de píxeles con hierro
51	247	Sin hierro	
	10	Con hierro	3.89
95	341	Sin hierro	
	15	Con hierro	4.21
87	1721	Sin hierro	
	100	Con hierro	5.49
73	634	Sin hierro	
	39	Con hierro	5.79
31	481	Sin hierro	
	34	Con hierro	6.60
86	1989	Sin hierro	
	163	Con hierro	7.57
83	1021	Sin hierro	
	131	Con hierro	11.37
22	55	Sin hierro	
	9	Con hierro	14.06
21	1350	Sin hierro	
	252	Con hierro	15.73
72	9633	Sin hierro	
	<b>2138</b>	<b>Con hierro</b>	<b>18.16</b>
62	12666	Sin hierro	
	<b>3030</b>	<b>Con hierro</b>	<b>19.30</b>
82	2085	Sin hierro	
	<b>563</b>	<b>Con hierro</b>	<b>21.26</b>
84	25	Sin hierro	
	<b>37</b>	<b>Con hierro</b>	<b>59.68</b>

#### 4.4.2 Índice para óxidos de hierro III

En la **Tabla 5**, podemos observar que aquellas morfologías con unas medias más altas, son las mismas que en el caso anterior, es decir las formaciones: 72, 62, 52, 32, 42, 1, 73 y 31.

Con lo que se deduce que la mayor parte de óxidos de hierro de la zona son óxidos de hierro III, puesto que ambas coinciden en las formaciones con mayores contenidos en óxidos de hierro.

**Tabla 5: Método de valor máximo y media para los píxeles por cada morfología, para el índice de óxidos de hierro III. En rojo se señalan aquellos con medias más altas, lo que indicaría unos mayores contenidos en óxidos de hierro III.**

Identificador temático	Máximo	Media
92	1.26	0.12
85	1.42	0.42
96	1.30	0.42
76	1.39	0.85
93	1.43	1.02
75	1.30	1.12
91	1.53	0.30
95	1.46	0.44
81	1.56	0.45
61	1.77	0.53
86	1.61	0.57
97	1.63	0.64
87	1.55	0.68
71	1.64	0.69
82	1.79	0.70
22	1.49	0.73
107	1.76	0.76
84	1.51	0.76
51	1.66	0.79
83	1.68	0.79
21	1.46	0.81
0	1.63	0.82
62	1.76	0.86
72	1.77	0.87
1	1.78	0.88
52	1.69	0.88
32	1.52	0.91
73	1.58	0.95
42	1.47	0.97
31	1.50	1.05

Al igual que en el caso del índice para óxidos de hierro, las cuatro formaciones mayoritarias en cuanto a niveles de óxidos de hierro son: 84, 62, 72 y 82 (**Tabla 6**). Lo que reafirma que la mayoría de los óxidos presentes en la zona de estudio son óxidos de hierro III.



**Tabla 6: Método de porcentajes. Número de píxeles con o sin presencia de hierro y porcentaje de píxeles con hierro por cada morfología, para el índice de óxidos de hierro III. En rojo se señalan aquellos con un mayor porcentaje de píxeles con óxidos de hierro III.**

Identificador temático	Número de píxeles	Contenido en hierro	% de píxeles con hierro
75	228	Sin hierro	
76	660	Sin hierro	
92	58	Sin hierro	
96	385	Sin hierro	
42	4291	Sin hierro	
	4	Con hierro	0.09
91	11476	Sin hierro	
	19	Con hierro	0.17
85	606	Sin hierro	
	2	Con hierro	0.33
32	627	Sin hierro	
	3	Con hierro	0.48
95	354	Sin hierro	
	2	Con hierro	0.56
97	4211	Sin hierro	
	25	Con hierro	0.59
71	12859	Sin hierro	
	95	Con hierro	0.73
107	30527	Sin hierro	
	269	Con hierro	0.87
31	510	Sin hierro	
	5	Con hierro	0.97
81	15668	Sin hierro	
	162	Con hierro	1.02
0	47200	Sin hierro	
	495	Con hierro	1.04
52	24651	Sin hierro	
	261	Con hierro	1.05

Identificador temático	Número de píxeles	Contenido en hierro	% de píxeles con hierro
21	1585	Sin hierro	
	17	Con hierro	1.06
61	1906	Sin hierro	
	30	Con hierro	1.55
93	104	Sin hierro	
	2	Con hierro	1.89
51	252	Sin hierro	
	5	Con hierro	1.95
1	182488	Sin hierro	
	4263	Con hierro	2.28
87	1763	Sin hierro	
	58	Con hierro	3.19
73	650	Sin hierro	
	23	Con hierro	3.42
86	2049	Sin hierro	
	103	Con hierro	4.79
22	55	Sin hierro	
	4	Con hierro	6.78
83	1068	Sin hierro	
	84	Con hierro	7.29
72	10478	Sin hierro	
	<b>1293</b>	<b>Con hierro</b>	<b>10.98</b>
62	13657	Sin hierro	
	<b>2039</b>	<b>Con hierro</b>	<b>12.99</b>
82	2195	Sin hierro	
	<b>453</b>	<b>Con hierro</b>	<b>17.11</b>
84	51	Sin hierro	
	<b>11</b>	<b>Con hierro</b>	<b>17.74</b>

## **5.-DISCUSIÓN**

### **5.1 Formaciones con mayor contenido en óxidos de hierro**

Al comparar los resultados obtenidos tanto para el índice de óxidos de hierro como para el de óxidos de hierro III, se verifica que aquellas formaciones con mayores contenidos en hierro son las mismas. Todas ellas se han formado desde el Pleistoceno medio-superior hasta el Pleistoceno superior-Holoceno. De esta forma se puede determinar que los óxidos mayoritarios en el área de estudio son los óxidos de hierro III. Además, al comparar los porcentajes entre los cocientes de las formaciones con mayores contenidos en hierro (72, 62, 82 y 84) se puede afirmar la presencia de otros tipos de óxidos de hierro, pues en el cociente de óxidos de hierro el porcentaje de píxeles que tienen hierro es superior en todos los casos que en el cociente para hierro III.

Por otra parte, al comparar para los cocientes de óxidos de hierro y óxidos de hierro III las tablas referidas al máximo y media de los píxeles de cada morfología (**Tablas 3 y 5**) con las referentes al porcentaje del área con presencia de hierro (**Tablas 4 y 6**), se comprueba que no hay correlación entre las morfologías con las medias superiores y las de mayores porcentajes. Explicación de ello es que las medias de cada formación pueden ser elevadas si muchos de los píxeles tienen valores cercanos al umbral, aunque sin superarlo y por tanto sin presencia de hierro. Igualmente, se pueden obtener medias bajas por la presencia de píxeles con valores muy inferiores al umbral, con lo que generan una disminución de la media aunque estas morfologías tengan píxeles con hierro. Sin embargo, los porcentajes de hierro siempre vienen determinados por aquellos píxeles con óxidos de hierro, de ello se concluye que las medias no son adecuadas para la determinación de zonas con contenidos en hierro, siendo los porcentajes un método más exacto.

### **5.2 Origen de los óxidos de hierro**

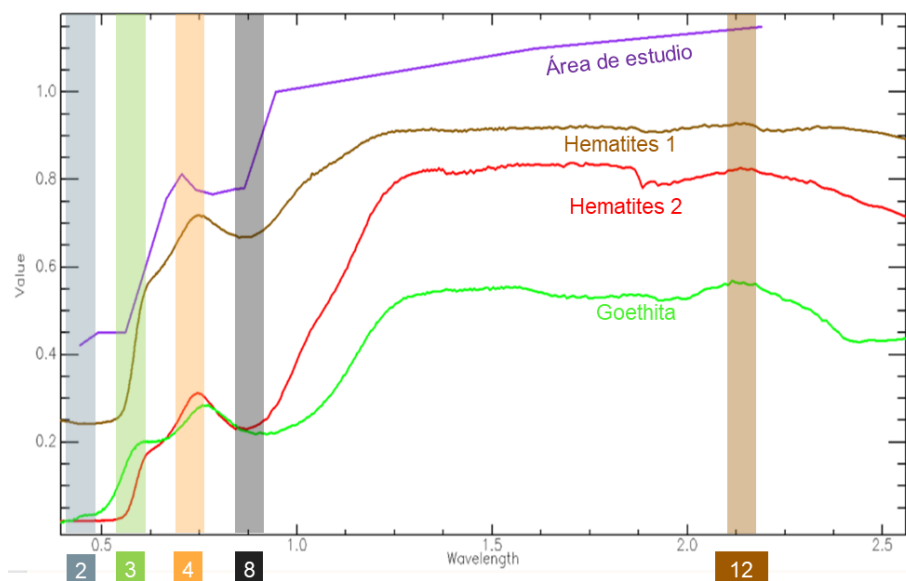
Para conocer los fenómenos que han dado lugar a los depósitos de óxidos de hierro es muy importante analizar el área fuente de las formaciones con mayores porcentajes. Si se comparan los resultados con el MAGNA, (Instituto Geográfico y Minero de España, 1969) (**Anexo I**) se encuentra que las formaciones 82 y 84, es decir los abanicos aluviales y los derrames del Pleistoceno superior-Holoceno, son aquellas que según los datos obtenidos tienen mayores contenidos en óxidos de hierro, estando formadas por sedimentos que provienen de conglomerados, gravas, arenas y arcillas. Según Olmedo (1971) en suelos bien drenados y aireados, como el área de estudio, hay una gran relación entre las arcillas y los óxidos de hierro.

Se ha comprobado que las arcillas tienen grandes contenidos en óxidos de hierro, llegando a un 12%. El hierro en los minerales de arcilla pasa a formar parte de la red cristalina o es absorbido sobre la superficie, lo que explica que estos minerales alcancen mayores contenidos en hierro de lo que se esperaría por su composición y estructura (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2004).

La siguiente formación con mayor porcentaje en óxidos de hierro, son los abanicos aluviales del Pleistoceno medio-superior de la formación 62, cuya área fuente son arenas y lutitas con intercambios de conglomerados. Y por último, los abanicos aluviales del Pleistoceno superior correspondientes a la formación 72, que es la de menor porcentaje de las cuatro, tiene el mismo área fuente que las formaciones 82 y 84.

En cuanto al tipo de óxido de hierro en suelos de colores rojizos en condiciones secas y cálidas, por deshidratación de las arcillas el mineral de hierro que surge es la hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (Olmedo, 1971), siendo el área objeto de estudio un claro ejemplo de ello.

Asimismo, se ha comparado la curva espectral de algunos de los píxeles del área de estudio con las curvas de la hematita y de la goethita de la librería espectral del Servicio Geológico de los Estados Unidos, que serían las que podrían encontrarse en el Valle de Almanzora (García *et al.*, 2007). Se puede observar como la curva espectral de la zona de estudio se corresponde con el mineral hematita, pues ambas tienen el mismo comportamiento espectral. Sin embargo, al compararla con la curva de la goethita se pueden observar diferencias en la longitud de onda 0.6, en la cual tanto hematita como el píxel estudiado tienen una zona de gran reflexión, mientras que la goethita tiene una zona de absorción (**Figura 13**).



**Figura 13: Curvas espectrales de minerales de hierro.**

## 6.- CONCLUSIONES

Tras analizar los resultados se pudo concluir:

1.- Los tres índices seleccionados son concluyentes en la zona de estudio, puesto que tras un análisis visual y cruce con el Mapa Geomorfológico y Geológico del Cuaternario de la Cuenca de Huércal-Overa, se han corroborado los resultados obtenidos. De esta forma se ha verificado la presencia de óxidos de hierro III y la ausencia de los óxidos de hierro II, concretamente hematites, entre las que podrían encontrarse en el Valle de Almanzora.

2.- Los óxidos de hierro predominantes en el área de estudio corresponden al óxido de hierro III, puesto que ocupa la mayor extensión de los óxidos de hierro identificados en el Valle de Almanzora. En concreto, se encuentra en forma de hematites, debido a las arcillas que han sufrido deshidratación, por las condiciones climatológicas de la zona como resultado de la fuerte alteración mineral en este ambiente edáfico xérico.

3.- Las geomorfologías con mayor abundancia en óxidos de hierro son los abanicos aluviales que se formaron desde el Pleistoceno medio-superior hasta el Pleistoceno superior-Holoceno y las áreas de derrubio del Pleistoceno superior-Holoceno. Especialmente destacan en cuanto a contenidos en hierro las zonas cuyas áreas fuente contienen arcillas, debido a la estrecha relación que tienen éstas con los óxidos de hierro pudiendo relacionar su presencia en las formaciones superficiales con los factores de formación del suelo.

## 7.-BIBLIOGRAFÍA

Abrams, M. (2000) “The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) after fifteen years: Review of global products”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38, pp. 292–301. doi: 10.1016/j.jag.2015.01.013.

Acevedo-Sandoval, O., Ortiz-Hernández, E., Cruz-Sánchez, M. y Cruz-Chávez, E. (2004) “El papel de los óxidos de hierro en suelos” *Terra Latinoamericana*, 22 (4), pp. 485-497.

Barragán-Bazán, G. (1997) “Algunos datos sobre la actividad hidrotermal pliocena al oeste de Cuevas del Almanzora. Encuadre geológico y cronológico de las manifestaciones magmáticas e hidrotermales de la depresión de Vera (Provincia de Almería)”, *Recursos Naturales y Medio Ambiente en el Sureste Peninsular*, pp. 205-223.

Besoain, E. (1985) *Mineralogía de arcillas de suelos*. San José. Serie de libros y materiales educativos: *Bib. Orton IICA / CATIE*

Bodek, I., Lyman, W.J., Reehl, W.F. y Rosenblatt, D. (1988) “Environmental inorganic chemistry, properties, processes and estimation methods”. *New York, Pergamon Press*.

Burns, R. G. (1997) “Origin of electronic spectra of minerals in visible to near-infrared region” *C.M. Pieters, A.J. Englert (Eds.), Remote Geochemical Analysis: Elemental and Mineralogical Composition*, Cambridge University Press (1997), pp. 3-27

Centro Nacional de Información Geográfica (2014). *Modelo Digital de Elevación (MDT) 25*. Disponible en : <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/25mdt/index.jsp> (Accedido: 15 de febrero de 2020).

Cooper, B. L., Salisbury, J. W., Killen, R. M. y Potter, A. E. (2002) “Midinfrared spectral features of rocks and their powders”, *Journal of Geophysical Research*. doi: 10.1029/2000JE001462.

Diputación de Almería (2013) *Sistema Territorial de Información Geográfica de la Provincia de Almería* Disponible en: <https://www.dipalme.org/Servicios/cmsdipro/index.nsf/index.xsp?p=encuesta> (Accedido: 7 junio 2020).

Elachi, C. y Zyl, J. (2006) *Introduction to the physics and techniques of remote sensing*. 2.<sup>a</sup> ed. New York: John Wiley & Sons.

European Space Agency (2019) *GMES Sentinel-2 Mission Requirements Document; Technical Report Issue 2 Revision 1; European Space Agency, March, 2010*. Disponible en: [http://esamultimedia.esa.int/docs/GMES/Sentinel-2\\_MRD.pdf](http://esamultimedia.esa.int/docs/GMES/Sentinel-2_MRD.pdf) (Accedido: 25 de junio de 2019).

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2009) *Guía para la descripción de suelos*. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf> (Accedido: 2 de julio de 2019).

Floyd F. (1996) *Remote Sensing: Principles and Interpretation*, 3.<sup>a</sup> ed. New York: W.H. Freeman and Co.

Gaffey, S. J., McFadden, L. A., Nash, D. y Pieters, C. M. (1997) “Ultraviolet, Visible, and Near Infrared Reflectance Spectroscopy: Laboratory Spectra of Geologic Material” en C.M. Pieters, A.J. Englert (Eds.), *Remote Geochemical Analysis: Elemental and Mineralogical Composition*, Cambridge: University Press, pp. 43-77.

García, M. A., La Iglesia A., Benavente, D., Bernabéu A., Gozález Martín, J.A., (2007) “Mineralogía de los travertinos pleistocenos de albox (almería), importante recurso de materia prima de rocas ornamentales”, *XXVII Reunión de la sociedad española de mineralogía*.

García-Melendéz, E. (2000) *Geomorfología y Neotectónica del Cuaternario de la Cuenca de Huércal-Overa y Corredor del Almanzora (Coordilleras Béticas)*. *Ánisis y Cartografías mediante teledetección y SIG* Tesis doctoral. Universidad de Salamanca.

Gupta, R. P. (2017) *Remote sensing geology*. Disponible en: [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=IERADwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR9&dq=remote+sensing+geology&ots=p33luBpb16&sig=q\\_0zCoZFDf6b-IjiVugybFZs38#v=onepage&q=remote+sensing+geology&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=IERADwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR9&dq=remote+sensing+geology&ots=p33luBpb16&sig=q_0zCoZFDf6b-IjiVugybFZs38#v=onepage&q=remote+sensing+geology&f=false) (Accedido: 25 de junio de 2019).

Heck, R.J. y Mermut, A.R. (1999) "Mechanisms and rates of iron dissolution from Brazilian plinthustalfts by dilute hydrochloric and ascorbic acids", *Soil Sci.* 164(4), pp. 242-251.

Hovis, W. A. (1965) "Infrared reflectivity of iron oxide minerals", *Icarus, Academic Press*, 4(4), pp. 425-430. doi: 10.1016/0019-1035(65)90048-5.

Hunt, G. R. (1977) "Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared", *GeoScienceWorld*, 42(3), pp. 501-513. doi: 10.1190/1.1440721.

Instituto Geográfico y Minero de España (1974). *Portal de cartografía del IGME: MAGNA 50 - Hoja 996 (HUERCAL-OVERA)* Disponible en: <https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50Hoja.aspx?Id=996&language=es> (Accedido: 24 de junio 2019).

Instituto Geográfico y Minero de España (2011). *Óxidos de hierro naturales* Disponible en: <https://www.igme.es/PanoramaMinero/Historico/2011/OXHIER11.pdf> (Accedido: 6 de junio 2020).

Jensen, J. R., (2000) "Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective", *Prentice-Hall, Inc.: Upper Saddle River, NJ.*, pp. 592

Juárez, M., Cerdán, M. y Sánchez-Sánchez, A. (2012) "Hierro en el sistema Suelo-Planta". *Depto. Agroquímica y Bioquímica. Universidad de Alicante*, pp. 1-3.

Kalinowski, A. y Oliver, S. (2004) "ASTER Mineral Index Processing Manual". *Geosience Australia*, pp 37.

Kariuki, P.C. y Van der Meer, F.D. (2003) "Swelling Clay Mapping for characterizing expansive soils; results from laboratory spectroscopy and Hysens DAIS analysis", *3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Oberpfaffenhofen*.

Koch, M. (2000) "Geological controls of land degradation as detected by remote sensing: A case study in Los Monegros, north-east Spain". *International Journal of Remote Sensing*, 21(3), pp. 457-473. doi: 10.1080/014311600210687.

Kruse, F. y Perry, S. L. (2013) "Mineral Mapping Using Simulated Worldview-3 Short-Wave-Infrared Imagery", *Remote Sensing. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 5(6), pp. 2688-2703. doi: 10.3390/rs5062688.

Mielke, C., Boesche, N., Rogass, C., Kaufmann, H., Gauert, C. y de Wit, M. (2014) "Spaceborne Mine Waste Mineralogy Monitoring in South Africa, Applications for Modern Push-Broom Missions: Hyperion/OLI and EnMAP/Sentinel-2", *Remote Sensing. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 6(8), pp. 6790-6816. doi: 10.3390/rs6086790.

Navarro, J., Meléndez, I., Gómez, I. y Almendro, M. B. (2006) *Segmentación de imágenes mediante el empleo de índices de vegetación para la estimación de parámetros edáficos*. Disponible en: [http://www.agegeografia.es/tig/docs/XII\\_2/080 - Navarro Pedreno et al.pdf](http://www.agegeografia.es/tig/docs/XII_2/080 - Navarro Pedreno et al.pdf) (Accedido: 30 de junio de 2019).

Observatorio Meteorológico y Astronómico de Albox (2009) *Temperatura, Climograma y Tabla climática para Albox*. Disponible en: <https://es.climate-data.org/europe/espana/andalucia/albox-718199/> (Accedido: 9 de abril de 2019).

Obukhov, A.L. y Orlov, D.S (1964) "Spectral reflectivity of the major soil groups and possibility of using diffuse reflection in soil investigations". *Soviet Soil Sci*, pp. 174-184.

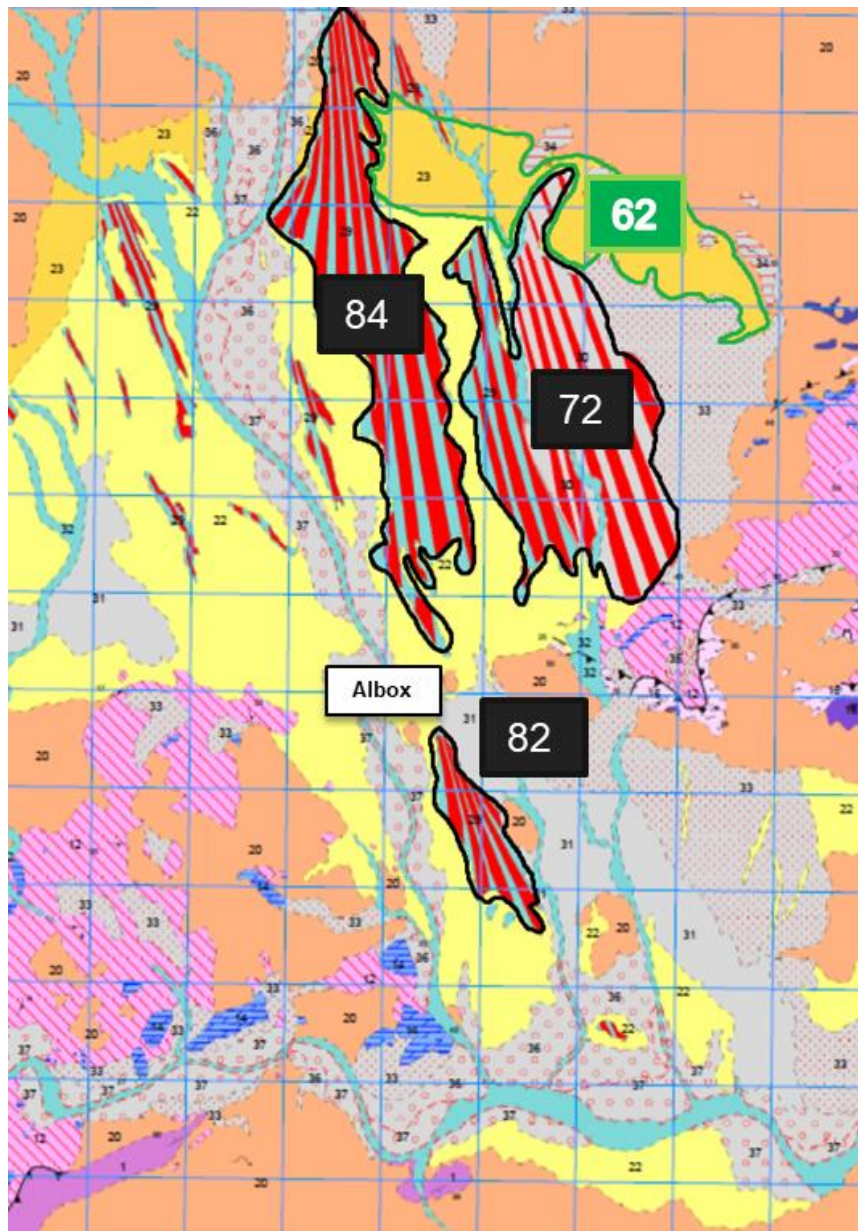
Olmedo, J. L. (1971) "Algunos aspectos de la distribución y formas del hierro en los suelos" en Instituto Nacional de Edafología y Agrobiología (eds.) (1971) *Anales de edafología y agrobiología*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, pp. 441-456.

Ormeño, S. (2006) *Teledetección fundamental*. 3.ª ed. Madrid: E.T.S.I en Topografía, Geodesia y Cartografía UPM.

Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (sin fecha). Disponible: <https://pnoa.ign.es/ortofotos> (Accedido: 30 de junio de 2019).

- Porwal, A. y González-Álvarez, I. (2019) “Reprint of: Introduction to special issue on geologic remote sensing”, *Ore Geology Reviews. Elsevier*, 108, pp. 1-7. doi: 10.1016/J.OREGEOREV.2019.05.004.
- Proyecto LUCDEME (2004). Disponible en: [https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/desertificacion-restauracion-forestal/lucha-contra-la-desertificacion/lch\\_lucdeme.aspx](https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/desertificacion-restauracion-forestal/lucha-contra-la-desertificacion/lch_lucdeme.aspx) (Accedido: 27 de junio de 2019).
- Richter, N. (2010) *Pedogenic iron oxide determination of soil surfaces from laboratory spectroscopy and HyMap image data. A case study in Cabo de Gata-Níjar Natural Park, SE Spain*. Tesis doctoral. Universidad Humboldt de Berlín.
- Rowan, L. C. y 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.
- Rowan, L. C., Mars, J. C. y Simpson, C. J. (2005) “Lithologic mapping of the Mordor, NT, Australia ultramafic complex by using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)”, *Remote Sensing of Environment*, 99(1-2), pp. 105-126. doi: 10.1016/j.rse.2004.11.021.
- Rowan, L. C., Schmidt, R. G. y 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(1), pp. 74–87. doi: 10.1016/j.rse.2006.05.014.
- Servicio Minero y Geológico Argentino- Cartografía Digital y SIG (2012). *Curva espectral de minerales de óxidos de hierro* Disponible: <http://www.segemar.gov.ar/igrm/sig/hierro> (Accedido : 15 de junio 2019).
- Schwertmann, U. (1985) “The effect of pedogenic environment on iron oxide minerals”, *Soil Sci*, pp. 172-200.
- Schwertmann, U. y Taylor, R.M. (1989) “Iron oxides”, *Soil Sci*, pp. 379-439.
- Simón, M., Asensio, C., Cantón, Y., García, I., Gómez, F., de Haro, S., Lozano, F., del Moral, F., Ortega, R., Oyonarte, C., Pardo, M., Salvador, M., Sánchez, J., Sánchez, S. y Soriano, M., (2005) “Factores Formadores y suelos” Ed. *Servicio de Publicaciones de la Universidad de Almería*, pp. 17-24.
- Sumner, M. E. (1999) *Handbook of soil sciences*. 2.<sup>a</sup> ed. New York.: CRC Press.
- Torrent, J. y Barrón, V. (1980). “Iron oxides in relation to the color of mediterranean soils”. *Applied study of cultural heritage and clays*, pp. 337-386.
- Torres, M. L. y Recio, J. M. (1996) *Suelos y Unidades Geomorfoedáficas 2.1. Reconocimiento de Recursos Edáficos*. Disponible en: [http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/documentos\\_tecnicos/subbeticas/2.pdf](http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/documentos_tecnicos/subbeticas/2.pdf) (Accedido: 3 de julio 2019).
- Van der Werff, H. y Van der Meer, F. (2015) “Sentinel-2 for Mapping Iron Absorption Feature Parameters”, *Remote Sensing. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 7(10), pp. 12635-12653. doi: 10.3390/rs71012635.
- Yamaguchi, Y., Fujisada, H., Kudoh, M., Kawakami, T., Tsu, H., Kahle, A.B., y Pniel, M. (1999) “ASTER instrument characterization and operation scenario”, *Advances in Space Research*, 23(8), pp. 1415-1424. doi: 10.1016/S0273-1177(99)00293-8.
- Zha, Y., Gao J., y Ni, S. (2003) “Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery”, *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), pp. 583-594.

# ANEXO I



## LEYENDA

		CUATERNARIO		31	32	33	34	35	36	37
TERCIARIO	NEOGENO	PLIOCENO								
		MIOCENO	ANDALUCIENSE							
	TORTONIENSE		SUP							
	BURDIGALIENSE									
	AQUITANIENSE									
		MALAGUIDE								
TER	PAL	EDC	MEDIO							
			DEVONICO	18						

37, 36	Conglomerados, gravas y arenas
35	Derrubios de ladera
34	Travertino
33	Coluvial
32	Aluvial
31	Cuaternario indiferenciado
30, 29	Conglomerados, gravas, arenas y arcilla
28	Conglomerados, gravas, arenas, arcillas, con intercalaciones carbonatadas
27	Yesos
26	Conglomerados
25	Calizas organógenas
24	Alternancia de calizas, areniscas y margas
23	Arenas y lutitas con intercalaciones de conglomerados
22	Margas y margocalizas con intercalaciones de arenas y areniscas
21	Calizas organógenas
20	Conglomerados, gravas, arenas y arcillas
19	Calizas organógenas, areniscas y margas

Figura 1: Recorte de la Hoja 996 Huércal-Óvera del MAGNA50, en negro destaca el área fuente de las formaciones 82, 84 y 72 y en verde el área fuente de la formación 62 (Fuente: Instituto Geológico y Minero de España, 1974).



## ANEXO II

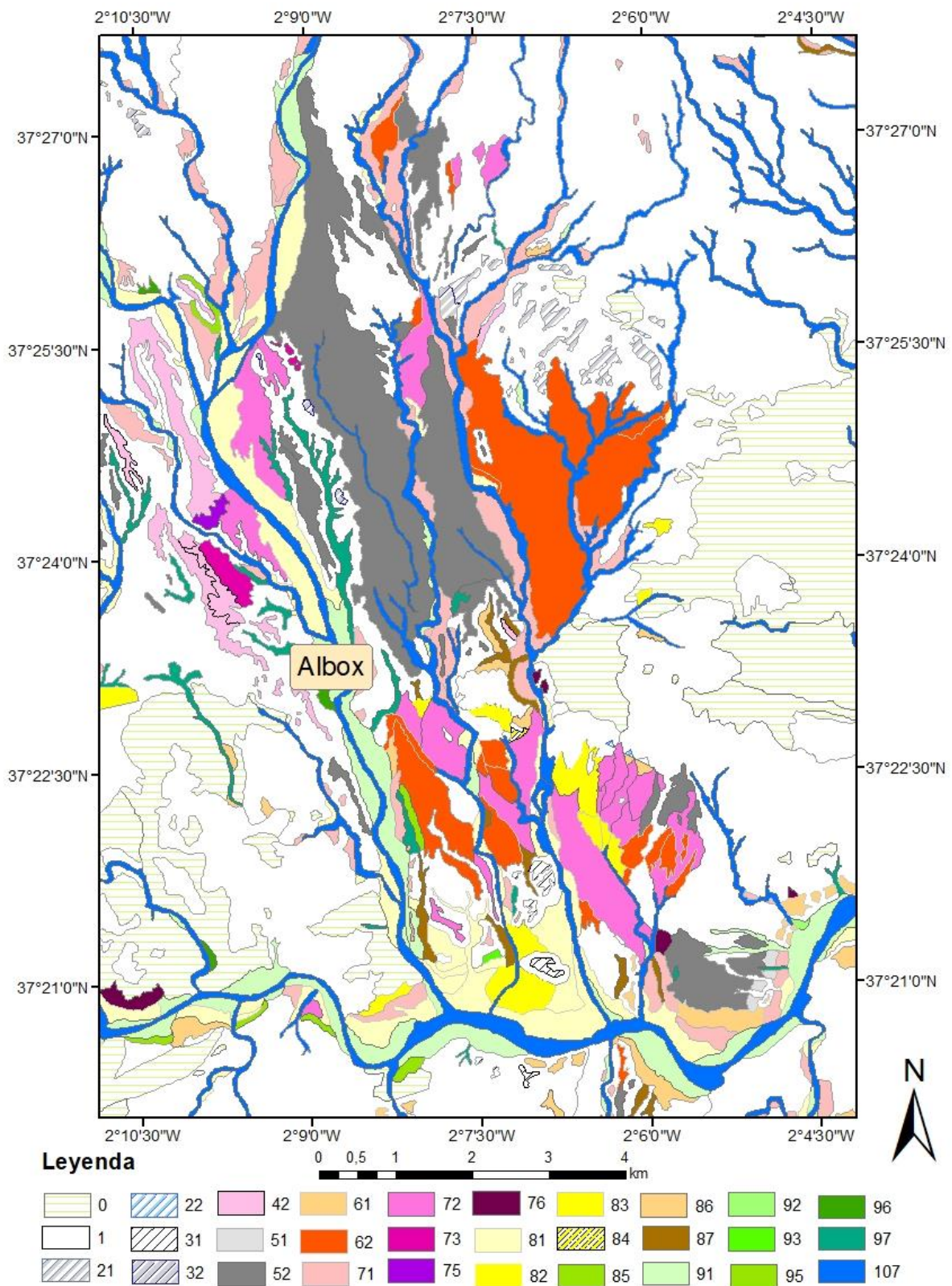


Figura 2: Mapa Geomorfológico y Geológico del Cuaternario de la Cuenca de Huércal-Overa (Fuente: García-Meléndez, 2000).