

Aplicación de imágenes Landsat (tm y etm+) en estudios geoestructurales en el NO del Macizo Ibérico

Application of Landsat images (TM and ETM+) in geostructural studies in the NW Iberian Massif

MARTÍN-GONZÁLEZ, F. ¹, CARREÑO CONDE, F. ¹, & DE PABLO, M.A. ²

Abstract

In this study we have checked and contrasted the contribution that Thematic Mapper sensors from Landsat 5 and Landsat 7 can provide to geostructural studies of Mesozoic and Cenozoic tectonics in variscan basements. To do that we have compiled the common image processing methods from bibliography and we have essayed suitable techniques to emphasise geological features in this type of basement. We have selected a region in the NW Iberian Massif with good geological cartographies to contrast with the results from the satellite images interpretation. The processing methods applied have permitted us to bring out mainly lithologies as quartzite, schist formations and granites from the Palaeozoic and detritic sediments from the Tertiary. Our lineament analysis on Landsat images reveals that the main fracture directions of the studied region are NE-SW and E-W. This study shows that the analysis on Landsat satellite images is a useful, widely available and inexpensive tool for detecting Mesozoic and Cenozoic tectonic structures in variscan basement as the NW Iberian Massif is.

Key Words: Lineament analysis; Landsat TM data; Geological mapping; Iberian Massif; NW Spain.

(1) Área de Geología -ESCET-, Universidad Rey Juan Carlos, C/Tulipán s/n, 28933, Móstoles (Madrid) e-mail: fidel.martin@urjc.es

(2) Departamento de Geología. Universidad de Alcalá. 28871, Alcalá de Henares (Madrid).

INTRODUCCIÓN

Las técnicas de teledetección y, más concretamente, de imágenes de satélite multiespectrales han sido utilizadas en numerosos trabajos geológicos y estructurales en el Macizo Ibérico (BLANCHARD Y COTARD, 1979; CROUSILLES, 1978; GUTIÉRREZ CLAVEROL *et al.*, 1987, 1988; MARTÍNEZ ALONSO Y SOLÉ SUGRAÑES, 1989; GUMIEL *et al.*, 1991; MARTÍN SERRANO, 1994), siendo una de las técnicas clásicas para el estudio estructural y el reconocimiento de lineamientos en este tipo de terrenos. Las principales ventajas que aportan estas técnicas en geología son: 1.- la posibilidad de cubrir amplias zonas y por tanto caracterizar grandes estructuras, 2.- estos sensores trabajan en regiones del espectro electromagnético más amplias, sin limitarse a las regiones visibles de espectro, 3.- El formato digital de la información permite realizar tratamientos matemáticos y estadísticos, 4.- la información georreferenciada se integra con rapidez en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y, finalmente, 5.- la posibilidad de utilizar sensores con diferente resolución espacial y trabajar a distintas escalas.

El objetivo de este trabajo es comprobar las aportaciones que ofrecen los datos obtenidos por los sensores *Thematic Mapper* de los satélites Landsat 5 y Landsat 7 (TM y ETM+, respectivamente) en estudios de tectónica cenozoica y mesozoica en basamentos variscos. Para ello se han recopilado y aplicado a una zona del NO del Macizo Ibérico los tratamientos más comunes propuestos por diferentes autores y se han ensayado otros nuevos acordes con las necesidades del estudio de la tectónica mesozoica y cenozoica en el NO peninsular. Los estudios de esta actividad en el NO del Macizo Ibérico presentan dificultades debido a la ausencia de sedimentos mesozoicos y la escasez y difícil datación de los sedimentos terciarios (MARTÍN SERRANO *et al.*, 1996). Por tanto, se hace necesario el uso de otras técnicas y el desarrollo de metodologías que faciliten este tipo de estudios.

Para ello se ha seleccionado un sector del Macizo Ibérico con una importante deformación varisca y con terrenos de esquistos, gneises y granitos paleozoicos, cubiertos por pequeñas cuencas y afloramientos detríticos terciarios (Figura 1). Este sector cuenta con un buen conocimiento geológico y numerosas cartografías, lo que permite considerarlo un buen ejemplo para contrastar los resultados que se obtengan. El estudio geoestructural ha tenido dos objetivos. Por un lado, como estudio previo, reconocimiento inicial y apoyo de la cartografía geológica a pequeña escala. Por otro, como criterio para establecer los principales lineamientos de la zona que serán posteriormente analizados para reconocer posibles fallas o zonas de fracturación mesozoicas y cenozoicas.

La utilización de imágenes Landsat se debe a las importantes ventajas que presentan frente a otros sensores remotos. Por un lado, se trata de unos sensores ampliamente acreditados y contrastados, cuyas especificaciones son conocidas por los profesionales de las geociencias. Por otro lado, sus datos empiezan a estar disponibles en acceso libre para toda la comunidad científica, lo que abarata el coste de los estudios. Este es el caso, por ejemplo, de las imágenes que se suministran a través de los proyectos Image 2000 (Comisión Europea) y Geocover Landsat (NASA). Image2000 (<http://image2000.jrc.it/index.htm>) es parte del proyecto I&CLC2000 Project (Image 2000 and CORINE Land Cover 2000) y consiste en un servidor de imágenes y mosaicos Landsat gestionado por la Land Management Unit (LMU) perteneciente a la European Commission's Joint Research Centre con base en Ispra, Italy. Geocover Landsat (<https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>) es un proyecto gestionado por la agencia aeroespacial NASA como parte del proyecto Global Land Cover Facility desarrollado por el USGS (United States Geological Survey) a través del United Nations Environment Programme, para la distribución de mosaicos de imágenes Landsat con cobertura global.

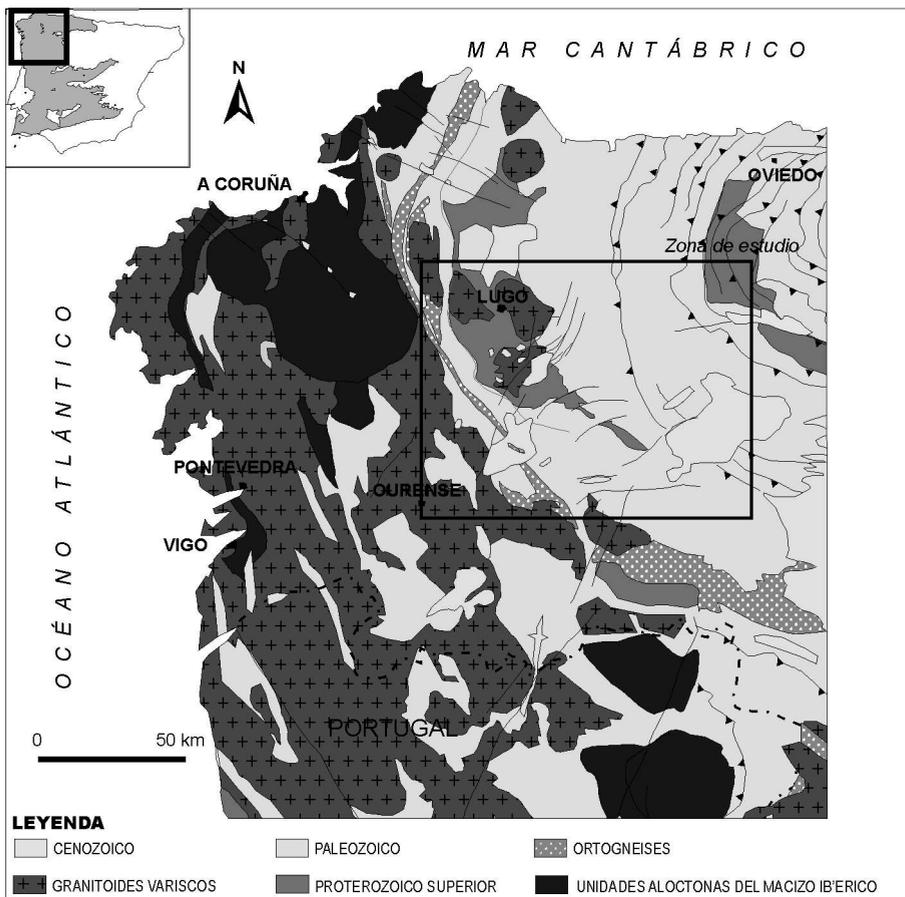


Figura 1.- Esquema geológico del NO peninsular con la localización de la zona de estudio.

CONTEXTO GEOLÓGICO

La zona de estudio se encuentra en la terminación occidental de los relieves de la Cordillera Cantábrica (Sierra de Ancares) y su enlace con los relieves de Los Montes Galaico-Leoneses y Orensanos, donde se ubica la Sierra del Caurel. Todos estos relieves obliteran los relieves apalachianos de rumbos variscos, lo que nos indica una actividad tectónica cenozoica importante cuyo análisis es el objetivo de

este trabajo. Por otro lado, estos relieves dejan depresiones en sus articulaciones con las Llanuras Lucenses donde se encuentran las cuencas terciarias. Además de estas grandes depresiones, encontramos las depresiones del Sil y la cuenca de El Bierzo que separan los principales relieves antes mencionados.

La zona de estudio está constituida esencialmente por materiales precámbricos y paleozoicos del denominado Macizo Ibérico. Estos materiales fueron deformados principal-

mente durante la Orogenia Varisca, e intruidos por diferentes tipos de granitoides antes del Pérmico (Figura 2). Sobre los materiales poli-

deformados y los granitoides, se encuentran discordantes pequeños restos de sedimentos terciarios y cuaternarios.

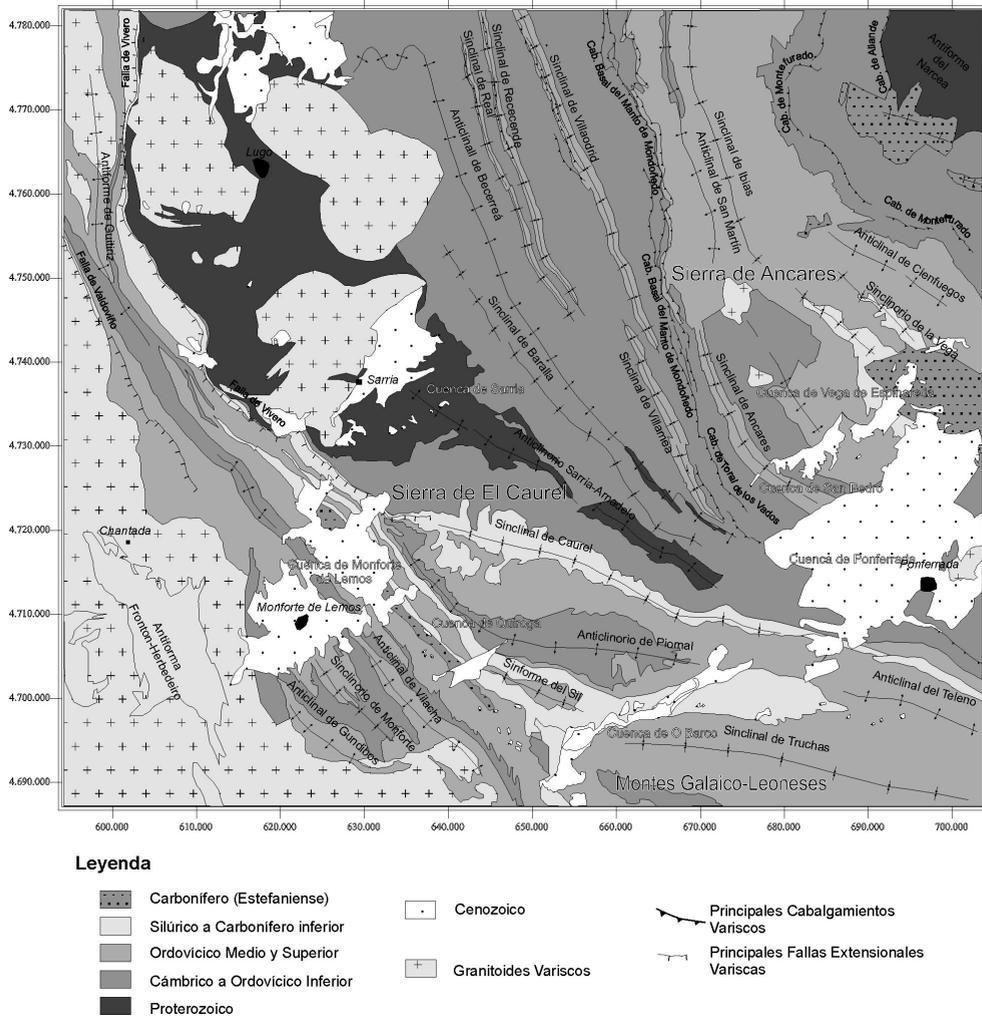


Figura 2.-Mapa geológico de síntesis de la zona de estudio en el que se indican las principales estructuras Variscas. Síntesis realizada principalmente a partir de la cartografía MAGNA a escalas 1:50.000 y 1:200.000.

Las deformaciones variscas son responsables de la deformación principal de las rocas de la zona (MARTÍNEZ CATALÁN, 1981; GONZÁLEZ LODEIRO *et al.*, 1982; BARRERA *et al.*, 1989). Primeramente se producen las etapas de generación del orógeno responsables de la generación de pliegues acostados con vergencia al E, de amplitud kilométrica con el desarrollo de esquistosidades y pliegues menores asociados, así como grandes mantos de cabalgamiento (como por ejemplo el manto de Mondoñedo). Y finalmente, las etapas de desmantelamiento del orógeno que se caracterizan por una etapa extensional con sistemas de fallas normales como la falla de Vivero y San Clodio, y replegamiento de las estructuras anteriores (Figura 2).

Con estas etapas se generan las principales estructuras variscas que están condicionadas por la deformación originada en la colisión que emplazó de Oeste a Este los complejos alóctonos, y todo esto modificado por estructuras extensionales que laminaron las estructuras iniciales. Por este motivo las estructuras variarán según las zonas en las que se encuentren dentro del Macizo Ibérico y de su división (LOTZE, 1945). Así, dentro de la zona de estudio se distinguen, en la parte más occidental, dentro del dominio del Olló de Sapo, un anticlinorio que en su parte septentrional, aparece limitado por dos fallas normales la de Valdoviño y la de Vivero (Figura 2). En la Zona Asturoccidental-Leonesa, las estructuras más destacables son pliegues de dirección NO-SE, que en ocasiones tienen flancos invertidos que pasan a cabalgamientos y que facilitan así el transporte tectónico hacia el E. (MARTÍNEZ CATALÁN, 1981; MARTÍNEZ CATALÁN *et al.*, 1990; ARENAS Y MARTÍNEZ CATALÁN, 2003).

Por otro lado, la zona de estudio se encuentra en la región de transición entre los metasedimentos de edad precámbrica y paleozoica característicos de la Zona Asturoccidental Leonesa y la gran intrusión de cuerpos graníticos que abunda al Oeste de las cuencas de Sarria y Monforte de Lemos

(Figura 2). Las rocas graníticas variscas se clasifican en función de su relación con la deformación varisca (GONZÁLEZ LODEIRO *et al.*, 1982; BARRERA *et al.*, 1989). De esta forma se distinguen tres grupos: granitoides precoces, granitos sincinemáticos, y granitos tardíos.

La tectónica de edades Mesozoicas y Cenozoicas, del sector estudiado, debido a la ausencia de sedimentos mesozoicos y la escasez y dificultad de datación de los sedimentos terciarios, ha sido agrupada generalmente en un amplio conjunto denominado Tectónica Tardivarisca. En este contexto, sólo algunas fallas que tenían relación con los sedimentos terciarios, se han considerado como rejugadas con posterioridad, siendo, por tanto, de edad alpina (ej. PARGA, 1969; ARTHAUD Y MATTE, 1975). Así, el estudio de la tectónica alpina se ha centrado en las estructuras que limitan o controlan las cuencas y afloramientos terciarios (ej. SLUITER Y PANNEKOEK, 1964; MARTÍN-SERRANO, 1982; GONZÁLEZ LODEIRO *et al.*, 1982; HERAIL, 1984; OLMO, 1985; VERGNOLLE, 1990; SANTANACH, 1994; MARTÍN-GONZÁLEZ *et al.*, 2003; YEPES Y VIDAL ROMANÍ, 2003; HEREDIA *et al.*, 2004).

DATOS Y MÉTODOS

Para este trabajo se han utilizado datos de los satélites Landsat 5 y Landsat 7, analizando sus sensores *Thematic Mapper* (TM y ETM+, respectivamente). El tratamiento y análisis multispectral se ha realizado con las 7 bandas del TM que permiten un estudio en rango del espectro que comprende desde el visible hasta el infrarrojo lejano. La resolución espacial es de 30x30 m en las siete bandas correspondientes al infrarrojo térmico, excepto en la banda 6, que es de 120x120 m. En las imágenes ETM+ con características diferentes, la resolución espacial es de 15x15 m en pancromático. Las imágenes fueron suministradas de forma gratuita de los servidores de la NASA (<https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>) y de la

European Commission's Joint Research Centre (<http://image2000.jrc.it/index.html>) (Image 2000, 2004; MDA FEDERAL, 2004)..

Para contrastar la información obtenida se ha elaborado una cartografía de síntesis (Figura 2) basada principalmente en la cartografía MAGNA publicada a escalas 1:50.000 y 1:200.000, y datos de campo propios (ABRIL HURTADO Y PLIEGO, 1974; APALATEGUI *et al.*, 1981; GONZÁLEZ LODEIRO *et al.*, 1982; BARRERA *et al.*, 1989; MARTÍN-GONZÁLEZ, 2005).

El tratamiento de las imágenes ha consistido en: 1.- correcciones geométricas y de proyección, 2.- mejora visual de las imágenes por aumento de contraste, 3.- estudio de los espectros de las diferentes formaciones para la mejor elección de las bandas a combinar, 4.- composición de imágenes RGB por combinación de bandas, 5.- estudio de Componentes Principales (CP), 6.- aplicación de la técnica de *Decorrelation Stretch* (DS), 7.- generación de imágenes de cocientes, y 8.- superposición con otras bandas de información como Modelos Digitales del Terreno (MDT).

La *corrección geométrica* consiste en tratar los errores geométricos que tienen los datos que envía el satélite (variaciones en velocidad y altura de la órbita del satélite, distorsiones panorámicas, irregularidades en la curvatura de la Tierra, topografía, etc) de forma que la imagen pueda ser proyectada en un sistema de coordenadas cartográficas y, por tanto, integrable en un SIG que facilite su interpretación y análisis. Se ha utilizado un método mixto de corrección por parámetros orbitales y por puntos de control. La corrección por parámetros orbitales modeliza el error por medio de información de la geometría orbital del satélite y se utiliza como corrección inicial. La corrección por medio de puntos de control consiste en indicar puntos de coordenadas conocidas en la imagen y, posteriormente, por medio de una función que relaciona estos puntos con todos los píxeles de la imagen, se corrigen sus errores de posición.

También se han realizado diferentes procesos de *mejora de contraste* que permiten adaptar la resolución de la información radiométrica a la capacidad de visualización del monitor. De esta forma, se ajustan los valores que tienen un rango de 0 a 256, a unos valores que resalten en los monitores por medio de la predistribución de los valores del histograma de frecuencias de la imagen (CHUVIECO, 2000).

Las imágenes de *falso color o RGB* (*Red, Green and Blue*), consisten en la combinación de tres bandas de información para formar una imagen en color. Con este tipo de combinaciones se pretende extraer y resaltar la información en función de los colores resultantes. Esta técnica suele emplearse para resaltar vegetación sana, ya que se combinan las bandas del infrarrojo cercano donde la vegetación tiene una respuesta muy alta. Otra de las combinaciones más usada es la denominada "color verdadero" en la que se simula una fotografía con color real, para ello se combinan las bandas del espectro visible del sensor TM, generalmente R=3, G=2 y B=1, cuya notación en adelante será TM 321.

Para reconocer cuáles son las bandas más aconsejables a combinar, se ha realizado un estudio de los espectros y contrastes espectrales de las diferentes formaciones. Para ello se ha realizado primeramente la identificación de los píxeles con menor cubierta vegetal por medio de índices de vegetación normalizados o NDVI (CHUVIECO, 2000). Este tratamiento está especialmente indicado en una zona como el NO peninsular con una importante cubierta vegetal. El análisis de los espectros se ha realizado en las zonas con menor NDVI mediante una máscara. Posteriormente, se realizaron los perfiles espectrales sobre el apilamiento de las 7 bandas del sensor TM. Con estos datos, se planificaron las combinaciones que más información proporcionan, tanto en imágenes RGB como en imágenes de cocientes, teniendo en cuenta los parámetros que destacan en cada canal. Por otro lado, se han usado también combinaciones obtenidas de

otros trabajos de zonas similares del Macizo Ibérico (MARTÍNEZ ALONSO y SOLÉ SUGRAÑES, 1989; ANTÓN PACHECO, 1989; GUTIÉRREZ CLAVEROL, 1987 y 1988; GUMIEL *et al.*, 1991; RIAZA, 1994). Se han realizado y analizado 20 combinaciones RGB con diferentes resultados, de entre las que se destacan en este trabajo por su mayor utilidad en los objetivos planteados, las siguientes. TM 745 (GUMIEL *et al.*, 1991, RIAZA, 1994), TM 741 y TM 742 son las combinaciones donde mejor se observan los afloramientos y las formaciones de esquistos y areniscas frente a granitos y granitoides. La combinación TM 457 (ANTÓN PACHECO, 1989) destaca los granitos sin alterar, las formaciones detríticas y los esquistos. TM 354 destaca las formaciones detríticas terciarias y los contactos entre granitos. TM 234 y TM 432 resaltan las distintas litologías, especialmente, formaciones detríticas de los terciarios. TM 573 resalta las formaciones litológicas como esquistos, diferenciándolas de litologías más cuarcíticas, y una excelente diferenciación de niveles detríticos terciarios. Y finalmente, composiciones de color verdadero TM 321 en las que la vegetación tiene mucha influencia, pero en las que las interpretaciones se facilitan por la similitud con otro tipo de imágenes fotográficas del espectro visible.

En este trabajo también se han interpretado bandas de forma individual. De entre estas bandas destacan las Bandas TM 4, 5 y 7. La Banda 4 infrarrojo cercano (0,76-0,90 μ m) y Banda 5 infrarrojo cercano (1,55-1,75 μ m) resaltan las rocas alteradas y zonas con humedad relacionadas con zonas y corredores de fracturación. La Banda 7 infrarrojo lejano (2,08-2,35 μ m) se muestra útil para destacar contrastes litológicos.

Las imágenes de cocientes consisten en la división de los valores espectrales de dos bandas. De esta forma se obtienen relaciones que destacan los materiales que más se parecen. Una de las ventajas que tiene este proceso es que las relaciones son constantes, independientemente de la iluminación, con lo que la

influencia de la topografía desaparece. Además, la combinación de cocientes en imágenes RGB permite recoger información de 6 bandas en una sola imagen. En este trabajo se han realizado cocientes y combinación de cocientes, entre los que destacan por su aplicación en la zona los TM 5/7 y 4/5, así como la combinación de cocientes TM 3/1-3/7-5/4. El cociente TM 5/7 remarca en valores altos las rocas alteradas y ha sido utilizado para distinguir rocas carbonatadas e hidroxilados. El cociente TM 4/5 destaca los crestones de cuarcita aflorantes. Por último, la combinación de cocientes TM 3/1-3/7-5/4 disminuye los efectos de la vegetación y pone de relieve la alteración de elementos ferruginosos (RIAZA, 1994).

Las imágenes de *componentes principales* (CP) se fundamentan en la fuerte correlación que puede existir entre las diferentes bandas y, por tanto, en que parte de la información se repite. De esta forma, se resume un grupo de variables en un nuevo conjunto más pequeño sin perder una parte significativa de la información (CHUVIECO, 2000). Las CP ordenan esta información, separando el ruido de la información más repetida. Los datos recogidos en las 7 bandas se sintetizan, creando unas nuevas bandas en función de su correlación, siendo las CP similares a variables-resumen. Estas nuevas bandas son independientes entre sí y no correlacionadas. Así, en este trabajo se han realizado las componentes principales de las 7 bandas del sensor TM de Landsat 5.

La técnica *Decorrelation Stretch* (DS) consiste en obtener los componentes principales de tres bandas, posteriormente se contrastan las bandas resultantes y después se realiza la transformación inversa para volver a las bandas principales. Esta técnica tiene la ventaja frente a las CP de que las imágenes resultantes se pueden comparar e interpretar como las de falso color.

Finalmente, se han realizado estudios de imágenes que combinan las bandas de información del sensor TM con modelos digitales

del terreno, de esta forma se ha obtenido un modelo 3D realista.

• *Lineamientos*

Los lineamientos cartografiados a partir del análisis de la información de sensores TM y ETM+ de Landsat, y obtenidos por medio de todas las técnicas descritas, han sido tratados por medio del análisis estructural y por métodos estadísticos. Han consistido principalmente en la realización del mapa de lineamientos, diagramas en rosa por longitudes y frecuencias, mapas de frecuencia y densidad en función de distintas cuadrículas, y filtrados direccionales.

Debido a que el significado y naturaleza de las observaciones geoestructurales y su interpretación es motivo de controversia, como sucede por ejemplo con la identificación directa de los lineamientos como fallas y/o fracturas, en este trabajo no se aborda su interpretación final como fallas, sino como un modo de aproximación inicial a una zona, que luego ha de contrastarse con reconocimientos de campo, foto aérea, etc.

RESULTADOS E INTERPRETACIÓN DE ESTRUCTURAS Y LINEAMIENTOS

El análisis de imágenes Landsat se ha mostrado muy útil incluso en zonas con una importante cubierta vegetal como es el Noroeste peninsular. Por un lado, como estudio previo, reconocimiento inicial y apoyo de la cartografía geológica a pequeña escala (1:100.000 y 1:200.000), y por otro, como instrumento para reconocer los principales lineamientos de la zona.

Se ha realizado un inventario de lineamientos que pudieran ser asimilables a fallas o zonas de fracturación. El inventario y análisis de estos lineamientos ha sido uno de los principales objetos de este estudio, ya que estos lineamientos son la base, en muchos casos, del reconocimiento de posibles fallas que podrán ser verificadas por medio de estudios complementarios (estudios geofísicos,

análisis geomorfológico, reconocimiento sobre el terreno, etc.).

Las litologías que más han resaltado, después del tratamiento de los datos han sido formaciones con grandes contrastes en su respuesta espectral. Estos grupos o formaciones han sido, principalmente, esquistos y metasedimentos, terciarios arenosos, granitos y gneises. La distinta respuesta espectral ha servido para seleccionar las técnicas de extracción de la información más efectivas. De esta forma, para la identificación de esquistos se han utilizado combinaciones de bandas TM 741, TM 354, TM 432, TM 573, TM 457, TM 745 (Figura 3 A y E; Figura 5 A y C). Por otro lado, han dado buenos resultados la banda TM 5 (Figura 3 B) y la composición RGB de las tres primeras CP (Figura 5 B). Los materiales terciarios arenosos respondieron mejor a las combinaciones TM 457, TM 354, TM 573 (Figura 4 C, D y E; Figura 5 C), y también hubo buena respuesta en la banda 5 (Figura 3 B), en la composición RGB de las tres primeras CP (Figura 5 B), y con la técnica de DS de las bandas 741 (Figura 5 D). De esta forma se pueden identificar con claridad las cuencas de Monforte de Lemos, El Bierzo y Vega de Espinareda y San Pedro de Olleros (Figura 4 C y D; Figura 5 B, C, y D). Las estructuras de sinclinales y anticlinales de Baralla y Becerreá (Figura 3 B.; Figura 5 A y D) y las estructuras de deformación de las litologías del Dominio del Olló de Sapo (Figura 3 A; Figura 5 C y D).

Se ha realizado un inventario de lineamientos que pudieran ser asimilables a fallas o zonas de fracturación. El inventario y análisis de estos lineamientos ha sido uno de los principales objetos de este estudio, ya que estos lineamientos son la base, en muchos casos, del reconocimiento de posibles fallas que podrán ser verificadas por medio de estudios complementarios (estudios geofísicos, análisis geomorfológico, reconocimiento sobre el terreno, etc.) (Figura 6). Para el análisis de los lineamientos se ha realizado un

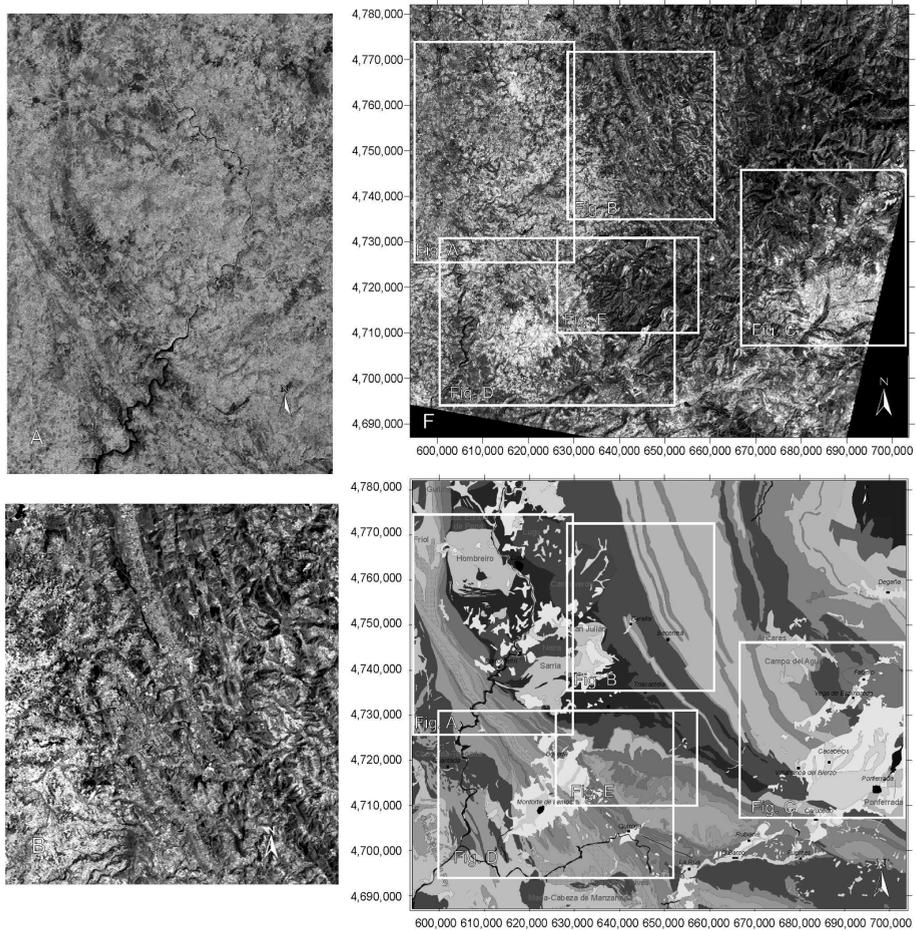


Figura 3.- Distintos aspectos destacados tras las combinaciones RGB de las 7 bandas del sensor *Thematic Mapper* (TM) del satélite Landsat 5. Mapa de localización sobre la síntesis geológica y sobre la Imagen de falso color real de la zona de estudio (TM 321) (F). A.- Antiforme del Ollito de Sapo (TM 741). B.- Sinclinal de Baralla y alternancia de esquistos y cuarcitas afectados por fallas NE-SO (TM 5).

estudio que consistió en la generación de un mapa de densidad de fracturación por longitudes, diagramas de rosas de vientos con las orientaciones, así como tratamientos estadísticos de los lineamientos (entre otros, histogramas de longitudes en función de la orientación, y de la longitud frente a la frecuencia)

(Figura 6 y Figura 7). Previamente a todos estos análisis, se han realizado filtrados de orientaciones de origen inequívocamente hercínicos que, en la zona de estudio, son esencialmente generados por los contactos litológicos de rumbos NO-SE. Del estudio de las orientaciones y la distribución espacial se

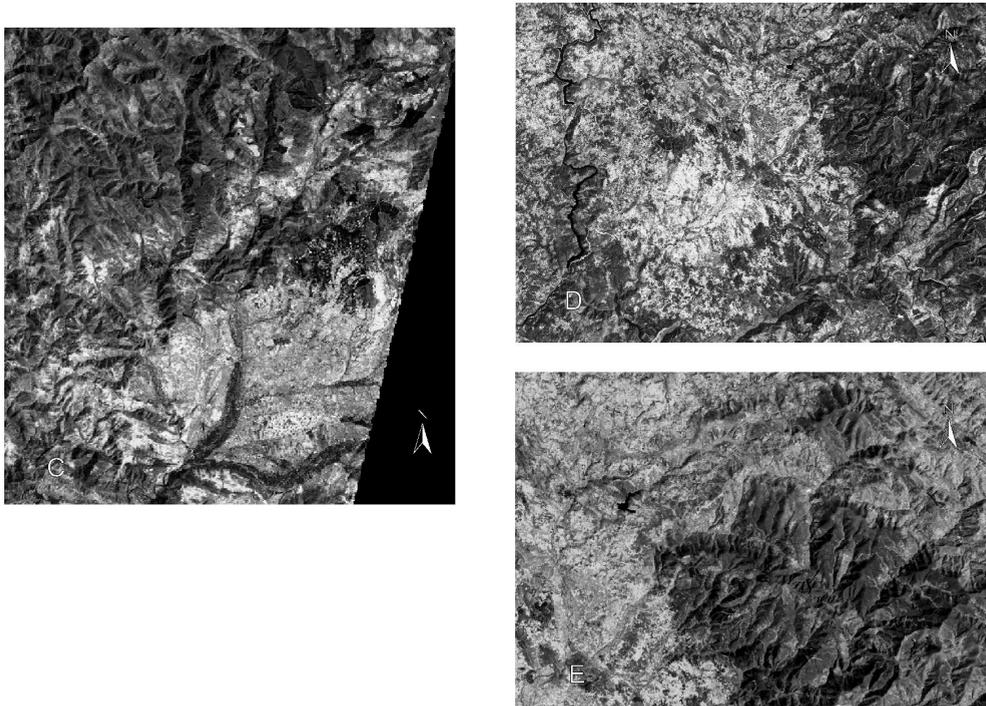


Figura 4.- Distintos aspectos destacados tras las combinaciones RGB de las 7 bandas del sensor *Thematic Mapper* (TM) del satélite Landsat 5. C.- Terciarios de la cuenca de El Bierzo afectados por fallas N70°-50° y N30° (TM 354). D.- Cuenca de Monforte de Lemos afectada por fallas N30° y N50° (TM 341). E.- Pizarras y cuarcitas del sinclinal del Caurel (TM 457). Localización en Figura 3.

deduce que los 244 lineamientos cartografiados, se agrupan en cuatro modas (N50°, N330°, N355° y N180°), aunque es el primer grupo el más representativo y el que cuenta con el 89.4% de la población. La media se halla por tanto en N56.8°. Esta media refleja claramente lo que se observa en el mapa de lineamientos, donde la dirección generalizada y dominante es NE-SO.

Las medidas dentro de la moda principal, se agrupan en tres subgrupos N20°-30°, N50°-60° y N70°. La distribución del primer subgrupo forma un corredor de igual dirección que limita occidentalmente las cuencas de Sarria y

Monforte, así como el contacto entre los afloramientos graníticos del Oeste gallego y los metasedimentos, esta orientación se encuentra de igual modo en la vertiente Sur de Ancares. El segundo subgrupo es el que más homogéneamente está distribuido en la zona, aunque aparece mejor representado en las Sierras de Ancares y Caurel. El tercer subgrupo apenas se encuentra representado en la mitad occidental de la zona, apareciendo principalmente en Ancares y Los Montes Galaico-Leoneses. Destacan los lineamientos E-O que se observan en el interior de las cuencas terciarias del Bierzo y O Barco.

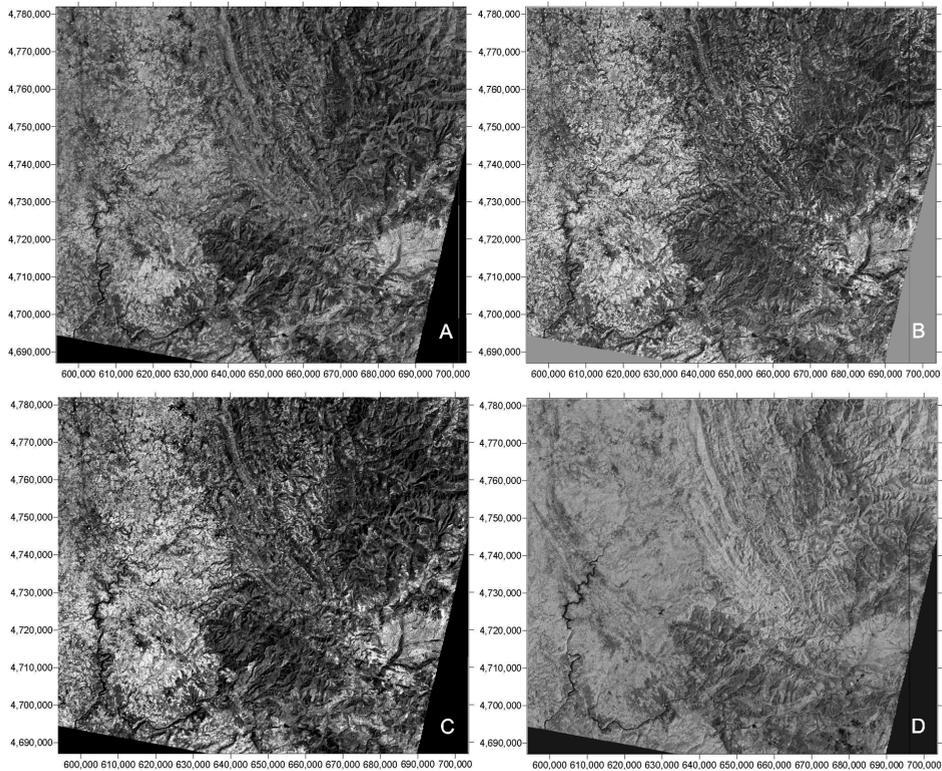


Figura 5.- Imágenes de la *zona de estudio*, tomadas del sensor *Thematic Mapper* (TM) del satélite Landsat 5. A.- Imagen de la combinación RGB de las bandas 432. B.- Imagen RGB de las tres primeras *componentes principales* de las 7 bandas del sensor TM. C.- Imagen de la combinación RGB de las bandas 573. D.- Imagen obtenida a partir de la técnica de *Decorrelation Stretch* con las bandas 741.

En líneas generales los lineamientos más destacables observados en las imágenes son NE-SO y NNE-SSO (Figura 6). Se observan con claridad lineamientos del primer grupo que desplazan las formaciones de esquistos y cuarcitas en la zona de Baralla y Becerreá, sus movimientos son sinestrales con saltos hectométricos. Los lineamientos N20°-30° limitan el borde noroeste de la cuenca de Monforte de Lemos y el borde oeste de la cuenca de Sarria, mientras que el otro subgrupo de lineamientos con dirección N50°-70° limitan los bordes norte de las cuencas de

Sarria, Quiroga y El Barco y los bordes meridionales de las cuencas de Monforte de Lemos y Sarria. Los lineamientos N70° limitan el borde norte de la cuenca de El Bierzo, mientras que lineamientos más E-O limitan el borde Sur y los interiores de la cuenca. Estos lineamientos coinciden en líneas generales con la fracturación regional cenozoica y mesozoica cartografiadas en la zona por otros autores (ej. BIROT Y SOLÉ, 1954; SLUITER Y PANNEKOEK, 1964; ABRIL HURTADO Y PLIEGO, 1974; APALATEGUI *et al.*, 1981; GONZÁLEZ LODEIRO *et*

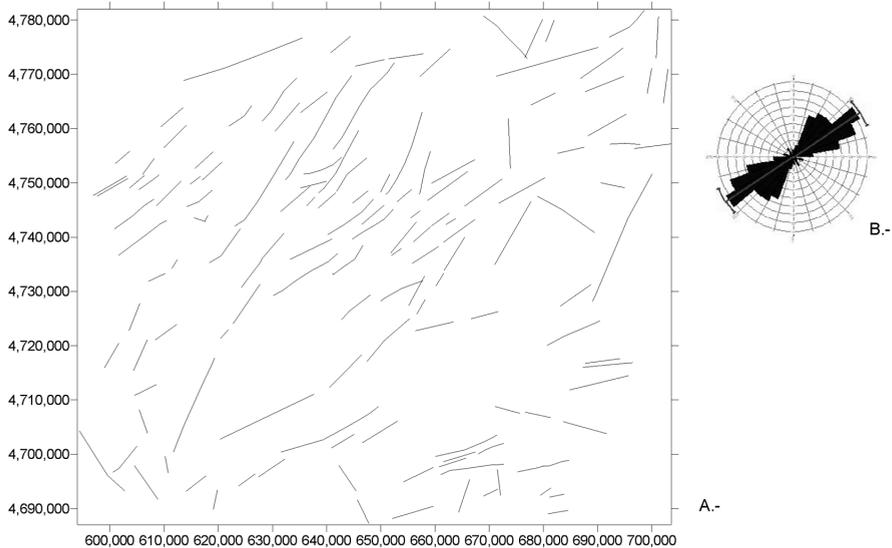


Figura 6.- a.-Mapa de lineamientos de la *zona de estudio*, obtenido a partir de la interpretación de imágenes multispectrales de satélite. b.-Rosa de orientaciones de los lineamientos medidos

al., 1982; HERAIL, 1984; OLMO, 1985; BARRERA *et al.*, 1989; VERGNOLLE, 1990; SANTANACH, 1994; MARTÍN-SERRANO, 1994; YEPES Y VIDAL ROMANÍ, 2003; MARTÍN-GONZÁLEZ *et al.*, 2003; HEREDIA *et al.*, 2004), lo que corroboraría la eficacia de esta metodología como una técnica rápida para cubrir grandes zonas de zócalos variscos, como es el caso del Macizo Ibérico.

La mayor densidad de lineamientos, se encuentra en las sierras de Ancares y Caurel

(con direcciones más E-O en la sierra de Ancares), aunque existen importantes máximos en los cursos del Sil y Miño, en concreto en los rosarios de cuencas que atraviesa el Sil (Figura 7). De la misma forma, se observan importantes alineaciones de máximos en corredores N30° y N50°. En cuanto a los tamaños de los lineamientos, los más largos llegan a tener 25 km y responden a las orientaciones N20°-30° y en menor medida a las N50°-60°.

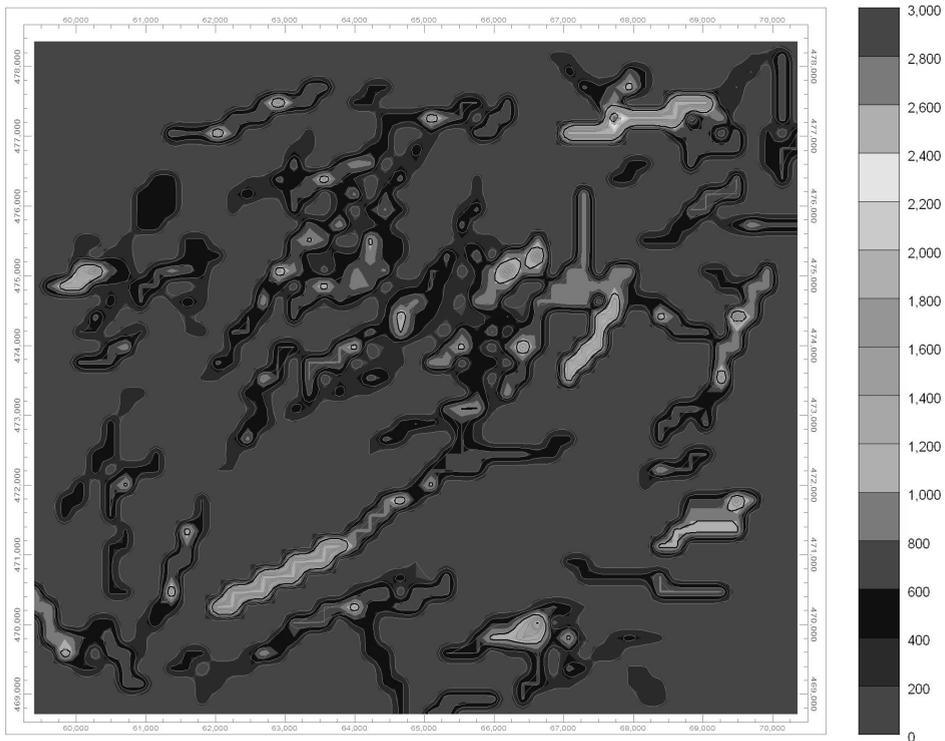


Figura 7.- Mapa de densidad de fracturación por longitudes obtenido del mapa de lineamientos. El valor de cada nodo es la longitud acumulada en metros de todas las longitudes que pasan a través de la celda unidad, isolíneas cada 200m.

CONCLUSIONES

La metodología empleada en este trabajo para el análisis de imágenes multiespectrales de satélites de los sensores Landsat TM y ETM+, se ha mostrado eficaz para el reconocimiento a pequeña escala de una amplia zona y para el reconocimiento de lineamientos en una zona de basamento varisco como la estudiada, incluso en el NO peninsular donde existe una importante cubierta vegetal. La eficacia de estos sensores radica principalmente en que se trata de unos sensores contrastados, cuyas especificaciones son ampliamente conocidas por los profesionales de las geociencias, y ade-

más, en que los datos empiezan a estar disponibles en acceso libre. Además, estas técnicas tienen las ventajas de los sensores de satélite de cubrir grandes áreas, grandes estructuras, de forma rápida, y con información numérica homogénea fácilmente integrable.

El objetivo de este trabajo es comprobar las aportaciones que ofrecen los sensores (TM y ETM+), y contrastarlos para la realización de un trabajo geoestructural de tectónica cenozoica y mesozoica en basamentos variscos. Para ello se recopilaron y aplicaron los tratamientos más comunes de diferentes autores y se ensayaron nuevos tratamientos acordes con las necesidades del estudio de esta tectónica

en el NO peninsular. Los tratamientos más útiles para resaltar las formaciones litológicas y estructuras en este tipo de terrenos han sido los que potenciaban los contrastes en la respuesta espectral. Las formaciones han sido, principalmente, esquistos cuarcíticos y meta-sedimentos, terciarios arenosos, granitos y gneises. Para la identificación de esquistos se han realizado las combinaciones de bandas TM 741, TM 354, TM 432, TM 573, TM 457, TM 745. Para materiales terciarios arenosos respondieron mejor a las combinaciones TM 457, TM 354, TM 573, y hubo buena respuesta en la banda 5, en la composición RGB de las tres primeras CP, y con la técnica de DS de las bandas 741.

De esta forma, se han podido cartografiar los lineamientos de la zona, que se agrupan principalmente en cuatro modas (N50°, N330°, N355° y N180°), aunque es el primer grupo el más representativo y el que cuenta con el 89.4% de la población. Las medidas dentro de la moda principal, se agrupan en tres subgrupos N20°-30°, N50°-60° y N70°.

La distribución del primer subgrupo forma un corredor de igual dirección que limita occidentalmente las cuencas de Sarria y Monforte, y los relieves de las Sierras de Ancares y Caurel de las llanuras Lucenses. Destacan los lineamientos E-O que limitan las cuencas terciarias del Bierzo y O Barco. En cuanto a los tamaños de los lineamientos, los más largos llegan a tener 25 km y responden a las orientaciones N20°-30° y en menor medida a las N50°-60°.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las facilidades prestadas para el acceso gratuito a las imágenes Landsat al programa Image 2000 del European Commission's Joint Research Centre (<http://image2000.jrc.it/index.html>) y a los programas Global Land Cover Facility (<http://www.landcover.org>) y el Geocover Landsat de las agencias USGS y NASA, de donde se han obtenido los datos necesarios para la realización de este trabajo.

Recibido: 02 / 05 / 2007

Aceptado: 10 / 10 / 2007

BIBLIOGRAFÍA

- ABRIL HURTADO, J. y RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, L. R. (1981). *Mapa Geológico de España 1: 50.000. Hoja 157(Oencia)*. IGME, Madrid.
- ANTÓN PACHECO, C. (1989). Cartografía digital de rocas en el área de Albuquerque-La Codosera, Extremadura, utilizando imágenes Landsat Thematic-Mapper. En: *III Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección*, 157-168.
- APALATEGUI, O. y CORRETEGÉ, C. (1976). *Mapa Geológico de España 1:50.000 Hoja 98 (Baralla)*. I.G.M.E., Madrid.
- ARENAS, R. y MARTÍNEZ CATALÁN, J. R. (2003). Low-P metamorphism following a Barrovian-type evolution. Complex tectonic controls for a common transition, as deduced in the Mondoñedo thrust sheet (NW Iberian Massif). *Tectonophysics*, 365: 143-164.
- ARTHAUD F. y MATTE PH. (1975). Les décrochements tardi-hercyniens du sud-ouest de l'Europe. Geometrie et essai de reconstitution des conditions de la deformation. *Tectonophysics*, 25: 139-171.
- BARRERA MORATE, J. L., FARIAS ARQUER, P, GONZÁLEZ LODEIRO, F, MARQUÍNEZ GARCÍA, J, MARTÍN PARRA, L. M., MARTÍNEZ CATALÁN, J. R., DEL OLMO SANZ, A, DE PABLO MACIÁ, J. G., GALLASTEGUI, G, BEA, F y VILLASANTE PINTO, R. (1989). *Mapa geológico de España 1:200.000, hoja 17/27(Ourense/Verín)*, 284pp. ITGE, Madrid.
- BIROT, P. y SOLE SABARIS, L. (1954). Recherches morphologiques dans le NW de la Peninsule Iberique. *Mémoires et Documents C.N.R.S*, 4: 7-61.
- BLANCHARD, J. P. y COTTARD, F. (1979). Etude de la distribution des gites métallifères par l'interprétation photosatellite associée a l'autocorrelation optique. Application aux gisements d'étain-tungstène du Nord-Ouest de la Peninsule Iberique. *7e. Reun. An. Sc. Terre, Lyon*,
- CHUVIECO, E. (2000). *Fundamentos de teledetección espacial*. Rialp. Madrid. 568 p.
- CROUSILLES, M. (1978). Teledétection spatiale et fracturologie de la Chaîne Cantabrique (Espagne). Exemple d'une approche méthodologique. *Bull. B.R.G.M.*, 4-1: 3-58.
- GONZÁLEZ LODEIRO, F., HERNÁNDEZ URROZ, J., KLEIN, E., MARTÍNEZ CATALÁN, J. R. y PABLO MACIÁ, J. G. (1982). *Mapa Geológico de España 1: 200.000. Hoja 8 (Lugo)*. IGME, Madrid.
- GUMIEL, P, ANTÓN PACHECO, C y CAMPOS, R, (1991). *Development of new multidisciplinary techniques for mineral exploration in several areas of the western Iberian Peninsula*. Publ. esp. I.T.G.E. Madrid. 109 p.
- GUTIÉRREZ CLAVEROL, M, LUQUE, C y SUÁREZ, V. (1987). El lineamiento tectónico Nazaré (W de Portugal)-Luarca (NW de España) y su implicación metalogénica. *Geología de granitoides y rocas asociadas del Macizo Hespérico*, Ed. Rueda, 447-455.
- GUTIÉRREZ CLAVEROL, M, LUQUE, C, MARTÍNEZ GARCÍA, E, RUIZ, F y SUÁREZ, V (1988). Los lineamientos deducidos de imágenes de satélite de las Zonas Cantábrica y Asturoccidental Leonesa (NW de España). *Est.Geol.* 44 (3-4), 263-270.
- HERAIL, G. (1984). Géomorphologie et litologie de l'or détritique. Piémonts et bassins intramontagneux du NW de l'Espagne (Le Bierzo, León). *Editions du CNRS, Paris*, 456 p.
- HEREDIA, N., RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, L. R., VEGAS, R., DE VICENTE, G., CLOETINGH, S., GINER, J. y GONZÁLEZ CASADO, J. M. (2004). Cadenas Cenozoicas del Noroeste peninsular. En: *Geología de España*, (Vera J.A., Ed.). SGE-IGME, Madrid, 619-621.
- IMAGE 2000 (2004). *Image 2000 & Corine Land Cover 2000 Project*. <http://image2000.jrc.it/index.html> (acceso, Agosto 2005).
- LOTZE, F. (1945). Zur Gliederung der Varisziden der Iberischen Meseta. *Geotekt. Forsch.*, 6: 78-92.

- MARTÍN-GONZÁLEZ, F. (2005). *Tectónica Alpina, Neotectónica y Sismotectónica en la terminación occidental de los relieves cantábricos (Macizo Ibérico)*. Marco tectónico de las crisis sísmicas de Lugo. Tesis Doctoral. Universidad Complutense. Madrid. 313p.
- MARTÍN-GONZÁLEZ, F., INSUA, J. M., CAPOTE, R. y MARTÍNEZ-DÍAZ, J. J. (2003). Estudio gravimétrico de la cuenca terciaria de Sarria.(Lugo-España). *Cadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 28: 329-341.
- MARTÍN-SERRANO, A. (1994). El relieve del Macizo Hespérico; génesis y cronología de los principales elementos morfológicos. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*. 19: 37-55.
- MARTÍN-SERRANO, A. (1982). El Terciario de Galicia; Significado y posición cronoestratigráfica de sus yacimientos de lignito. *Tecniterrae*. 48: 19-41.
- MARTÍN-SERRANO, A., MEDIAVILLA R. y SANTISTEBAN J.I., (1996). North-western Cenozoic record: present knowledge and the correlation problem. En: *Tertiary basins of Spain: the stratigraphic record of crustal kinematics*, (Fried D. F. and Dabrio C. J., Ed.). Cambridge University Press, Cambridge, 237-246.
- MARTÍNEZ ALONSO, S. E. y SOLÉ SUGRAÑES, L. (1989). Análisis de la estructura geológica de Galicia occidental mediante imágenes Thematic Mapper. En: *III Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección*. ITGE, Resúmenes.
- MARTÍNEZ CATALÁN, J. R., (1981). *Estratigrafía y estructura del domo de Lugo. Sector Oeste de la zona Asturoccidental-Leonesa*. Tesis Doctoral. Universidad de Salamanca. Salamanca. 317 p.
- MARTÍNEZ CATALÁN, J. R., PÉREZ ESTAÚN, A., BASTIDA, F., PULGAR, J. A. y MARCOS, A., (1990). West Asturian-Leonese Zone: Structure. En: *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*, (Dallmeyer y Martínez-García, Ed.). Springer-Verlag, Berlín, 103-114.
- MDA FEDERAL, (2004), Landsat GeoCover ETM+ 2000 Edition Mosaics. Tile N-03-05. ETM-EarthSat-MrSID, 1.0, Sioux Falls, South Dakota: USGS. <http://www.landcover.org>.y <https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/> (acceso, Agosto 2005)
- OLMO SANZ, A. (1985). Estudio geológico-sedimentario de las cuencas terciario-cuaternarias de Monforte de Lemos, Maceda y Quiroga. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 10: 83-93.
- PARGA, J. R. (1969). Sistemas de fracturas tardihercínicas del Macizo Hespérico. *Trabajos del Laboratorio Geológico de Laxe*, 37: 3-15.
- RIAZA, A. (1994). *Reflectancia en rocas en función de su litología y fábrica interna*. ITGE, Madrid. 100 p.
- SANTANACH, P. (1994). Las cuencas terciarias gallegas en la terminación occidental de los relieves pirenaicos. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 19: 57-71.
- SLUITER, W. I. y PANNEKOEK, A. J. (1964). El Bierzo, etude sedimentologique et geomorphologique d'un bassin intramontagneux dans le NW de L'Espagne. *Leidse Geologische Mededelingen*, 30: 141-182.
- VERGNOLLE, C. (1990). *Morfogenese des reliefs cotieres associes a la marge continentale nord-espagnole. L'exemple du nord-est de la Galice*. Laboratorio Xeolóxico de Laxe. Serie Nova Terra. 1., O Castro. 315 p.
- YEPES TEMIÑO, J. y VIDAL ROMANÍ, J. R. (2003). Morphogenesis of the Orense Plains (NW of Spain). *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 28: 263-283.