



Facultad de Ciencias

**DESARROLLO DE MODELOS
GEOMORFOLÓGICOS DE ALTA
RESOLUCIÓN ESPACIAL
MEDIANTE TÉCNICAS DE
TELEDETECCIÓN
“EL MACIZO DE ÁNDARA”**

Development of high resolution spatial geomorphical
models using remote sensing techniques
“The Ándara Massif”

Trabajo de Fin de Máster
para acceder al

**MÁSTER EN FÍSICA, INSTRUMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE**

Autor: Sergio Ruiz García
Director: Alberto González Díez
Octubre de 2016

ÍNDICE DEL DOCUMENTO

1.	AGRADECIMIENTOS	2
2.	RESUMEN / ABSTRACT	3
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
3.1.	Introducción	4
3.2.	Bases para la formulación de la hipótesis	4
4.	OBJETIVOS	9
5.	ÁREA DE ESTUDIO	10
5.1.	Definición geográfica de la zona	10
5.2.	Definición del área de estudio	12
5.3.	Descripción geológica	13
5.4.	Descripción geomorfológica	15
6.	METODOLOGÍA	20
6.1.	Descripción general del procedimiento	20
6.2.	Material utilizado	24
7.	RESULTADOS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS	27
7.1.	Construcción de mapa litológico simplificado	27
7.2.	Construcción de mapa con las principales estructuras geológicas simplificado	29
7.3.	Construcción de un modelo simplificado de formas de la superficie	30
7.4.	Obtención de mapa de unidades litológicas por técnicas de teledetección	31
7.5.	Obtención de mapa de lineamientos estructurales por técnicas de teledetección	37
7.6.	Obtención de mapa de geo-formas por técnicas de teledetección	39
8.	VALIDACIÓN	43
8.1.	Validación experimento 1, discusión	43
8.2.	Validación experimento 2, discusión	44
8.3.	Validación experimento 3, discusión	44
9.	CONCLUSIONES	46
10.	BIBLIOGRAFÍA	47
11.	CONSULTAS WEB	50

1. AGRADECIMIENTOS

Son varias las personas, a las que por razones obvias me gustaría expresar mi gratitud por el apoyo y la confianza que han prestado a lo largo de estos meses en los que debido a mis inquietudes personales, he querido desarrollar y profundizar en una formación académica específica con la que busco mayor especialización profesional y científica dentro de la rama de las Ciencias de la Tierra.

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia y a mi pareja por la paciencia y apoyo en mis idas y venidas profesionales y académicas. Sin ellos nunca hubiera llegado a poder desarrollarme tanto intelectual como profesionalmente, y junto a ellos quiero seguir avanzando y aprendiendo.

Por otro lado, también me gustaría expresar mi gratitud a Gema y Luismi por su ayuda en los años que he compartido estudiando en la Escuela de Minas y los años compartidos a nivel profesional. No olvido el agradecimiento a los profesores del máster con los que he tenido el placer de aprender a lo largo de estos meses de estudio, en especial a José Ramón Díaz.

Por último, mi más sincero agradecimiento a mi profesor, tutor y director de este Trabajo Fin de Máster, Alberto González, por su paciencia y ayuda académica durante el desarrollo del curso, así como en la orientación y consejo en el trabajo que a continuación expongo.

A todos, gracias.

2. RESUMEN / ABSTRACT

Las imágenes de alta resolución capturadas por los sensores puestos en funcionamiento recientemente, permite plantear la construcción de inventarios medioambientales de alta resolución, como los relativos a la geomorfología. El tratamiento de la seña registrada mediante técnicas de teledetección no solo mejora la identificación de los elementos cartografiados, si no que permite una mejor caracterización espacial de los mismos. La elaboración de inventarios en áreas del territorio complejas, con fuertes pendientes y con contrastes muy marcados de radiación permite medir la capacidad de la señal registrada a la hora de la confección de dichos inventarios. La hipótesis implícita en este trabajo es que es posible mejorar los inventarios geomorfológicos existentes mediante el empleo de imágenes usando técnicas de teledetección. En el presente trabajo se llevará a cabo la construcción de una cartografía geomorfológica de alta precisión mediante técnicas de teledetección en el Macizo de Ándara, Picos de Europa (Cantabria). Se analizará la bibliografía para disponer de todos los datos geomorfológicos existentes de la zona, así como de propuestas de nuevos indicios de imagen aplicables a las imágenes seleccionadas. A continuación se realizará un levantamiento topográfico para la búsqueda de puntos de apoyo para el control de las imágenes recogidas, con técnicas GPS; a continuación se trabajará con las imágenes de alta resolución existentes en los fondos del Plan Nacional de Teledetección, así como los repositorios del Gobierno de Cantabria. Mediante los puntos de control antes mencionados, se llevará a cabo una corrección geométrica de las imágenes empleadas para la posterior construcción de modelos digitales del terreno (MDT). Se espera que los modelos obtenidos no sólo permitan identificar la áreas de predominio de los procesos existentes, sus rasgos geomorfológicos internos, si no que aporten información relevante de su dinámica durante el Antropoceno.

High resolution images captured by sensors recently started-up, allow the possibility to consider the construction of high resolution environmental inventories, such as those related to geomorphology. The signal processing recorded by means of using remote sensing technique does not only improve the identification of the mapping elements, but it also allows a better spatial characterization of these very same elements. Inventory development in complex territory areas, with steep slopes and with very noticeable radiation contrasts, allows for measuring the capacity of the signal recorded at the time of the preparation of such inventories. The implicit hypothesis in this work is that it is possible to improve existing geomorphological inventories through the use of images employing remote sensing techniques. In this paper the construction of a high-precision geomorphological mapping is carried out through remote sensing techniques in the Massif of Ándara, Picos de Europa (Cantabria). Related bibliography will be analysed in order to collect all the available information as far as the geomorphological data in the area is concerned, as well as a series of proposals of new image rates which can be applied to the selected/chosen images. Afterwards, a topographical survey will be conducted to search supporting points that could control the images collected with GPS techniques; then, we will work with the high-resolution images existing in the funds of the National Remote Sensing Plan, as well as with the repositories of the Government of Cantabria. Through the use of the abovementioned control points, a geometric correction of the images used will be performed, will be considered as groundwork for the subsequent construction of digital terrain models (DTM). It is expected that the models achieved allow not only the identification of the areas of dominance of the on-going processes, its internal geomorphological features, but also the delivery of relevant information about dynamics during the Anthropocene.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. Introducción

Las técnicas de teledetección (tratamiento de imagen *s.l.*) son herramientas potentes para realizar inventarios en el ámbito geodésico, geológico y geomorfológico; que ofrecen una importante ayuda a la detección, caracterización y predicción de determinados procesos, así como de sus factores condicionantes. Además, permiten analizar geográficamente los procesos naturales, facilitando el estudio de su dinámica, su interacción con las actividades humanas y por lo tanto, un análisis de los riesgos e impactos ocasionados.

El estudio de estos procesos, así como la elaboración de cartografía geocientífica, se ve limitada en muchos casos por la extensión de las zonas de estudio, ocasionando reducciones en la precisión de la documentación generada. Estas carencias, han sido reducidas por el uso de herramientas de tratamiento de imagen-teledetección, apoyadas con Sistemas de Información Geográfica, S.I.G. Se han diseñado diferentes aplicaciones de tratamiento de imagen para casi todas las áreas de las Ciencias de la Tierra (Fabregat, 1999) debido a las grandes posibilidades y ventajas que presentan estas herramientas, como por ejemplo: la localización de espacios geográficos y su observación; así como el estudio de fenómenos temporales e integración de todos estos resultados en un SIG, reduciéndose en muchos casos el tiempo empleado y el dinero invertido en los estudios sobre el terreno (Baker et al., 2006; Shanmugan, 2006). Su objetivo esencial se centra en la identificación de los materiales de la superficie terrestre y los fenómenos que en ella se operan a través de su firma espectral (Sacristán, 2006). Su aplicación en estudios geológicos, se fundamenta en que tanto los materiales como las formas producidas por los procesos tienen una respuesta espectral propia, al igual que otros elementos terrestres. De esta forma, estudiando las variaciones espectrales, espaciales y temporales de señal electromagnética reflejada y capturada por un sensor, se ponen de manifiesto las correlaciones existentes entre las diferentes variables ambientales, las características de los diferentes materiales terrestres y los diferentes procesos geológicos. Por lo tanto, resulta de interés evaluar las posibilidades que ofrecen estas herramientas para cartografiar automáticamente y masivamente el territorio.

La meta de este Trabajo de Fin de Master, es la aplicación de diferentes técnicas de análisis de imagen (teledetección *s.l.*), para la caracterización geológica y geomorfológica en una zona concreta de territorio. De este modo, se muestra la utilidad de esta herramienta, que asistida por un Sistema de Información Geográfica (SIG), permite mejorar la gestión de los procesos geológicos que tienen lugar en el terreno a estudiar. La metodología de trabajo propuesta, plantea la validación estadística de los resultados obtenidos tras el procesado de las imágenes satelitales, pudiendo obtener productos científicos interesantes y de calidad.

3.2. Bases para la formulación de la hipótesis

La teledetección es el sistema integral de captura de información territorial, a partir de sensores que registran la radiación electromagnética. Esta radiación puede proceder de diferentes fuentes, como por ejemplo: materiales, especies vegetales, especies animales, formas, procesos, relieve. Todo ello ha sido posible gracias al desarrollo que han experimentado, por un lado, las técnicas de tratamiento de Imagen, las cuales han facilitado la obtención de datos

significativos del territorio, el acceso a la exhaustiva información digital proporcionada por sensores, en su aspecto espacial, radiométrico, espectral y temporal.

La radiación emitida o reflejada desde la superficie terrestre es un fenómeno continuo en 4 dimensiones (espacio, tiempo, longitud de onda y radiancia). Un sensor debe muestrear este continuo discretizándolo (Figura 1). El modo en que esta discretización se lleva a cabo define los cuatro tipos de resolución con los que se trabaja en teledetección:

- Resolución espacial, tamaño de pixel. Es el elemento de menor superficie del terreno contenido en la imagen.
- Resolución espectral, indica el número y anchura de las regiones del espectro electromagnético para las cuales capta datos el sensor.
- Resolución radiométrica, número de intervalos de intensidad que pueden captarse en una determinada banda. Estos se expresan en niveles digitales que varían desde 0 a 255.
- Resolución temporal, tiempo que transcurre entre dos imágenes que capta el mismo lugar geográfico.

La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor, genera una serie de datos que son procesados posteriormente para obtener información interpretable de la Tierra. Los sensores que viajan a bordo de los satélites o aviones suelen ser multispectrales e, incluso, hiperspectrales (la diferencia radica en número de bandas en las que queda registrado el espectro electromagnético, de 3 a 20 o de decenas a centenares, respectivamente). Ello significa que son capaces de registrar el comportamiento de los objetos de la superficie terrestre en diversas longitudes de onda o bandas del espectro electromagnético, desde la región del visible hasta las distintas bandas del infrarrojo (próximo, medio y térmico) e incluso las microondas.

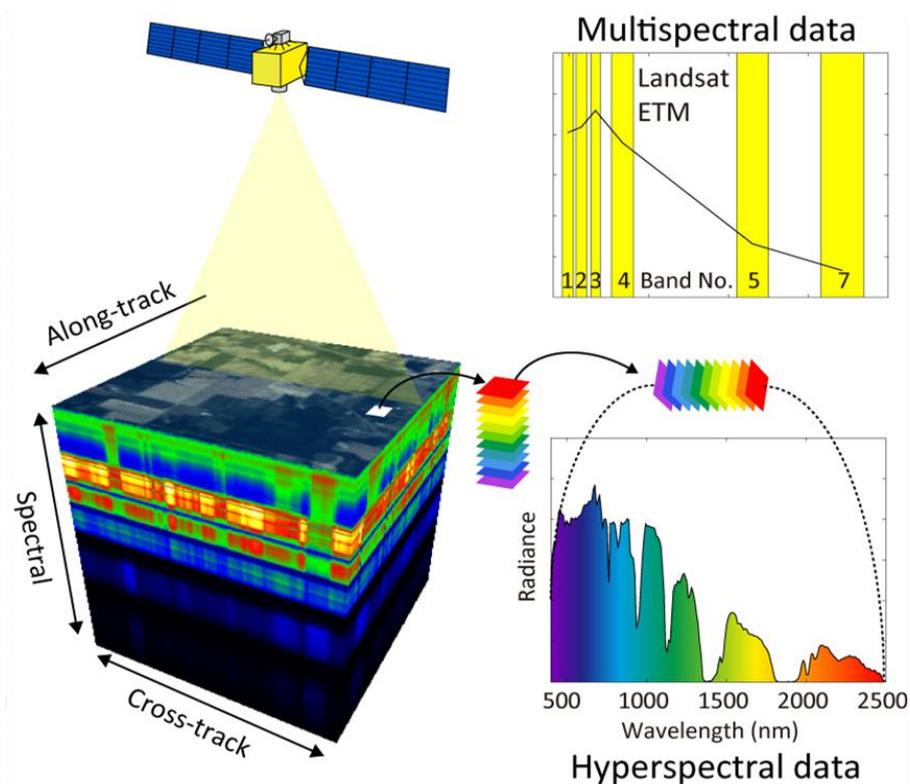


Figura 1. Representación del espectro electromagnético captado por los sensores del satélite Landsat 7 ETM+

El primer componente de este sistema es la fuente que emite energía. La más habitual es el sol, en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, ya que los sensores dependen de su capacidad para captar esta fuente de energía externa. El segundo componente del sistema es la cubierta terrestre (Figura 1). Cada grupo de objetos de la cubierta (masas de vegetación, mantos de nieve, cuerpos de agua, suelos, superficies urbanas, rocas, etc.), dependiendo de sus características y naturaleza reaccionan de forma distinta ante el flujo de energía incidente. Una parte de este flujo es absorbido por los objetos, otra es transmitida a los objetos vecinos y finalmente, otra parte del flujo es reflejada. Esta energía reflejada es captada por el sensor (tercer componente del sistema) y codificada digitalmente en un rango cuyos valores dependientes de la resolución radiométrica del sensor (256 niveles para el Landsat ETM+, 1.024 niveles -AVHRR-NOAA-, 2.048 niveles -KONOS, Quickbird y hasta 65.536 valores en algunos sensores, como MODIS y los radares de ERS y Radarsat). Lógicamente, si los cuerpos absorben o transmiten mucha energía, reflejarán poca; entonces, los valores registrados por el sensor serán bajos. Este es el caso de las masas de agua en algunas regiones espectrales del visible (verde y rojo) y del infrarrojo cercano y medio. Por el contrario, si los cuerpos son muy reflectivos el sensor registrará valores elevados. Es el caso de las masas vegetales en el infrarrojo cercano, de los mantos nivales o de los terrenos descubiertos de origen calizo, en la región espectral del visible (Figura 2). En ocasiones, la energía emitida por los objetos de la superficie terrestre (un volcán) es la fuente de energía captada por el sensor, especialmente en algunas regiones del espectro electromagnético como el infrarrojo o el térmico. En la misma línea, algunos sistemas activos de teledetección, como el radar, no dependen de una fuente de energía externa como la solar; e incorporan sus propias fuentes de energía. Es decir, emiten un haz de energía que incide en la superficie observada, rebotando en ella, y posteriormente es registrado en el sensor.

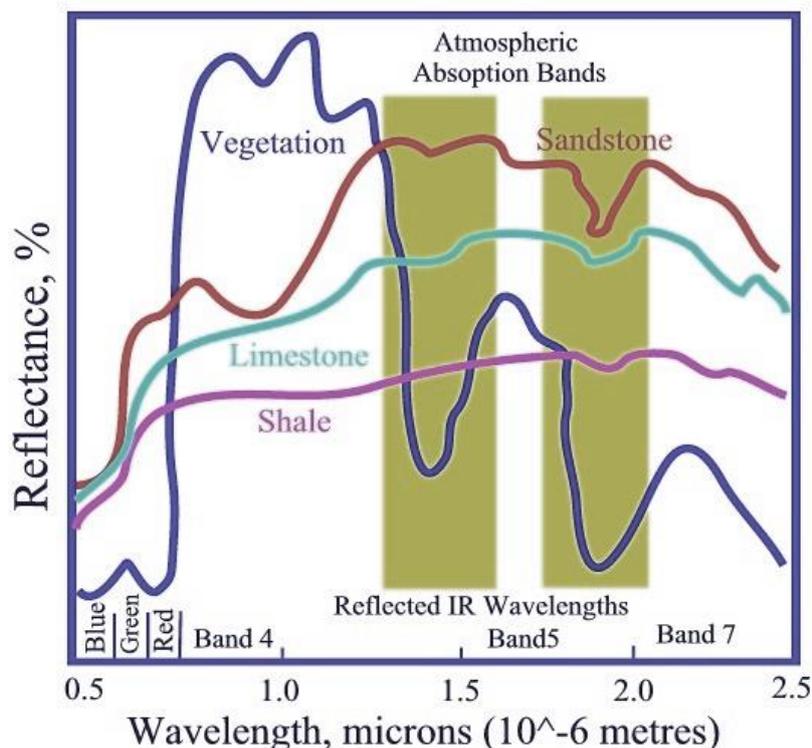


Figura 2. Firmas espectrales de diferentes superficies. La reflectividad responde a la relación entre la energía reflejada y la superficie y la energía que ha incidido en ella.

Entre las ventajas proporcionadas por los sistemas destacan, la cobertura global y exhaustiva, del territorio, perspectiva panorámica del mismo, observación multiescala, información sobre las regiones del espectro no recogidas en el visible, multitemporalidad de las observaciones, transmisión a tiempo real del registro digital de la información (Chuvienco, 2002). Por todo ello, la teledetección en general, pero especialmente el sector espacial, está siendo empleada como complemento y no como un sustituto, a estudios sobre el terreno. Y por lo tanto, también puede ser eficaz para la caracterización geológica- geomorfológica del territorio.

La caracterización geomorfológica del territorio, especialmente la geomorfológica ha sido objeto de análisis en multitud de trabajos geológicos como por ejemplo los recopilados por Gutiérrez (2008). Una geo forma es una unidad de terreno formada por procesos naturales o antrópicos de tal forma que puedan ser reconocidas y descritas en términos morfométricos (Lobeck, 1939; Weaver, 1965; Hammond, 1965; Pike, 2000). Una herramienta muy útil para el estudio de las geo formas son los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE). Estos modelos contienen dos tipos de información: una implícita, recogida en los datos concretos del elemento espacial (altitud, área, profundidad, etc.), y la información explícita relativa a la correlación entre los datos espaciales (distancia, vecindad). Ambos tipos de información tienen una relación directa, permitiendo obtener información precisa del relieve (Felicísimo, 2004). Siguiendo este concepto, la caracterización de un macizo rocoso, puede realizarse de dos maneras. Por un lado, mediante descriptores globales, que generan información estadística sintética no representable espacialmente, como son las medias de los valores, modas, medidas de dispersión, índices de correlación e histogramas; o por otro lado, utilizando descriptores locales, que generan información de la naturaleza espacial representada, (las propias formas del terreno); éstos son representables a nivel cartográfico, y corresponden a la morfometría específica del terreno (Felicísimo, 2004). Así, la descripción del relieve a partir del MDE se realiza mediante el proceso denominado parametrización, que busca generar un conjunto de medidas que describen las formas topográficas permitiendo distinguir diferentes tipos de ellas. Existen varias propuestas sobre las variables que deben incluirse en la parametrización del relieve. Las más importantes son las basadas en la elevación del terreno como por ejemplo: la pendiente, la orientación, la convexidad del relieve y rugosidad (variabilidad de la superficie del terreno). Todas estas variables pueden ser representadas como Modelos Digitales del Terreno (MDT) derivados de un MDE.

Según Moreno (2010) si tomamos a la elevación como un campo escalar, podemos estimar fácilmente el vector gradiente, del cual se pueden obtener sus dos propiedades geométricas principales como son la longitud (o módulo) y la dirección, que morfométricamente, corresponden con dos de los parámetros principales de la superficie terrestre: pendiente y orientación. La pendiente en un punto del terreno se define como el ángulo existente entre el vector normal a la superficie en ese punto y la vertical. La orientación en un punto puede definirse como el ángulo existente entre el vector que señala el Norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en ese punto. Otro tipo de variables a tener en cuenta son las que se derivan de las segundas derivadas parciales de la función gradiente. Estas aportan información de la concavidad y convexidad del terreno, por lo que dentro de la morfometría expresan la curvatura de la superficie. Pueden estimarse diferentes curvaturas en función de la dirección que se tome en consideración, utilizando la curvatura plana, o curvatura de perfil (Hammond, 1965, De Pedraza, 1996). Por último, la rugosidad, un concepto intuitivamente sencillo pero del que se han propuesto múltiples definiciones matemáticas. La más sencilla indica la variabilidad de la curvatura de la superficie terrestre (De Pedraza, 1996). Pero también el rango,

la desviación típica, el coeficiente de variación de la altitud o la varianza de la pendiente en la vecindad de una celdilla estudiada (Felicísimo, 1995).

Las formas del relieve poseen características específicas que permiten que sean reconocidas mediante los valores de las variables topográficas mencionadas. Así un pico presenta convexidad en todas las direcciones; una cresta presenta convexidad en una dirección ortogonal a una línea sin curvatura; un collado presenta convexidad en una dirección ortogonal a una concavidad; una ladera no tiene curvatura y la pendiente no es nula; una planicie no tiene curvatura y la pendiente es nula; un canal tiene concavidad en una dirección ortogonal a una línea sin curvatura; un pozo presenta concavidad en todas las direcciones.

En resumen, la caracterización de los elementos morfológicos básicos del relieve se puede llevar a cabo en función de la pendiente, orientación y curvaturas longitudinal y transversal (máxima y mínima).

Un SIG (en Inglés, *Geographical Information System GIS*) puede definirse como un programa que contiene un conjunto de herramientas que permiten la captura, el tratamiento, la representación y análisis de información espacial recogida en una bases de datos (Wolf y Dewitt, 2000). Esta información puede ser de carácter vectorial o matricial. Mediante esta Herramienta es posible llevar a cabo análisis de datos con referencia geográfica como los geomórficos anteriormente descritos, pero también evaluar otras matrices de datos producto como las obtenidas de tratamientos digitales de imagen. En él también es posible establecer correlaciones entre ambas con el fin de evaluar la mayor o menor dependencia de las variables a estudio.

Por lo tanto, la hipótesis fundamental del presente trabajo es que es posible llevar a cabo cartografías automáticas de tipo geológico-geomorfológico del territorio utilizando las técnicas descritas. Esta cartografía debería permitir la regionalización del espacio; y así como poder caracterizar, analizar y discretizar sus principales componentes. Para validar dicha hipótesis se emplearán de manera conjunta herramientas de teledetección con herramientas SIG; la señal electromagnética contenida en diferentes soportes de imagen, captada tanto por sensores satelitales (Landsat ETM+, SPOT 5) como aéreos (cámaras digitales aéreas, LIDAR), será procesada de manera que pueda permitir un tratamiento automático de la información registrada; la cual facilitará la caracterización de una serie de formas procedentes de procesos geológicos.

4. OBJETIVOS

El objetivo general de este Trabajo de Fin de Master, es la aplicación de diferentes técnicas de tratamiento de imagen (teledetección s.l.), para la caracterización de algunos elementos geológicos presentes en una zona. De este modo se intentará conocer la utilidad de estas técnicas en la caracterización automática del espacio. Los elementos geológicos que se intentará cartografiar son de dos tipos: espaciales y lineales. Los primeros corresponden a superficies de predominio de una cualidad geológica como por ejemplo la litología, o diferentes formas que caracterizan el modelado del territorio. Los segundos hacen referencia a elementos lineales como es la estructura geológica. Para caracterizar estos elementos se precisan de los siguientes objetivos específicos:

- Construcción de un mapa litológico simplificado a partir de la información geológica existente que permita su utilización como elemento diana de referencia, en la evaluación de áreas recubiertas por materiales.

- Obtener por técnicas de tratamiento de imagen un mapa de unidades litológicas del territorio.

- construcción de un mapa de las principales estructuras geológicas presentes a partir de la información existente que permita su utilización en la evaluación de elementos lineales y que sea empleado como referencia en los test de validación.

- Obtener por técnicas de tratamiento de imagen un mapa de lineaciones geológicas de tipo estructural.

- Construcción de un modelo simplificado de formas de la superficie terrestre a partir de la información geológica existente que permita su utilización en la evaluación de las principales geo formas de deposición-erosión y que sea empleado como elemento diana.

- obtener por técnicas de teledetección-SIG un modelo de geo formas.

Para llevar a cabo estos objetivos se ha seleccionado un área de estudio dentro de la Comunidad Autónoma de Cantabria, que permita una gran diversidad litológica, escaso recubrimiento vegetal (que clarifique el verdadero papel jugado en la reflectancia de los materiales expuestos), amplio contrastes espectrales y diversidad geomorfológica. Por estos criterios el área elegida ha sido el Macizo Oriental de Picos de Europa.

5. ÁREA DE ESTUDIO

5.1. Definición geográfica de la zona

Los Picos de Europa son un macizo montañoso localizado en el norte de España que pertenece a la parte central de la cordillera Cantábrica (Figura 3). Aunque no muy extenso, su cercanía al mar hace que sea pródigo en accidentes geográficos y geológicos de gran interés. Esta formación calcárea se extiende por Cantabria, León y el Principado de Asturias. Destaca la elevación de sus montañas, en muchos casos por encima de los 2500 m y la cercanía con la franja costera del Mar Cantábrico, pues en su punto más septentrional apenas dista 15 kilómetros. Geográficamente los Picos de Europa se encuentran en la línea de la Cordillera Cantábrica, si bien son considerados como una unidad independiente de ésta por su formación más reciente. Ocupan una superficie total de 67.455 hectáreas repartidas entre las tres provincias. Los Picos de Europa están divididos en tres macizos: el Macizo Occidental o Cornión, el Macizo Central o de los Urrieles, y el Macizo Oriental o de Ándara.

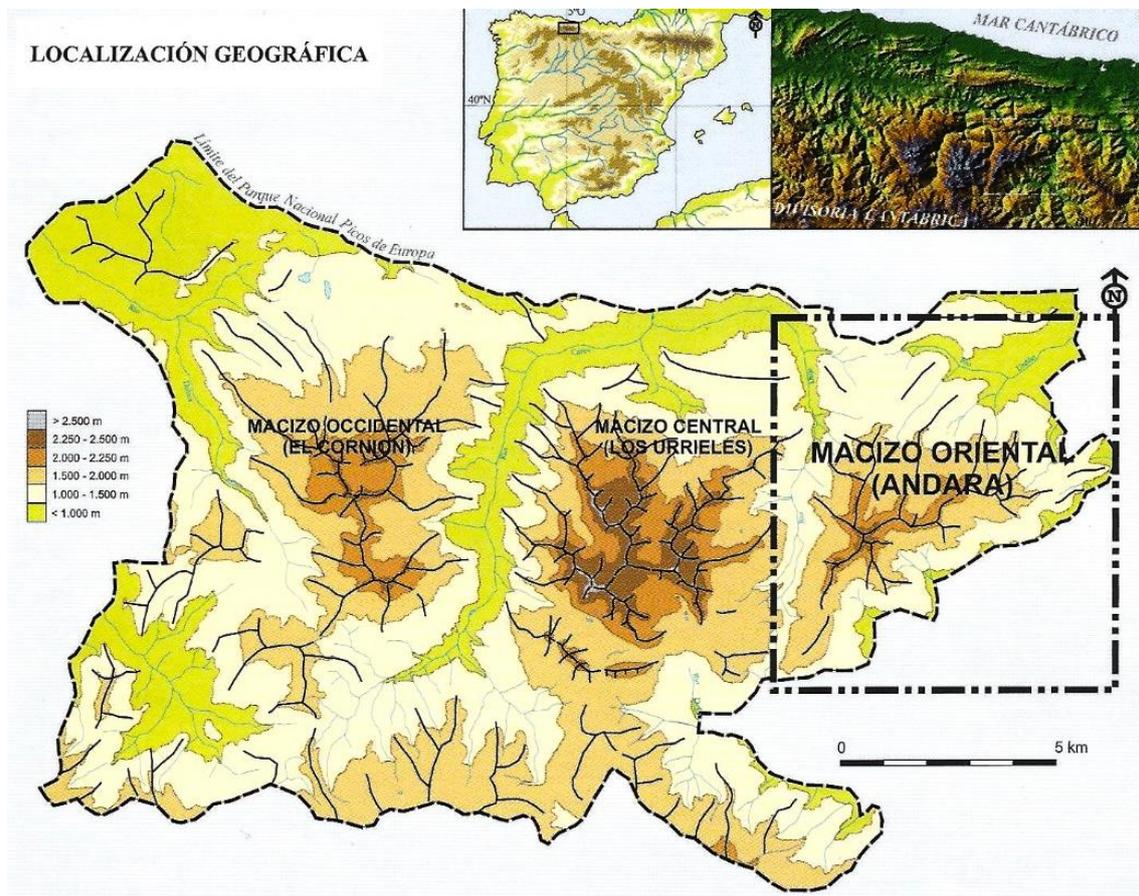


Figura 3. Situación geográfica del Macizo Oriental de Picos de Europa (Extraído de "Geomorfología del Macizo Oriental del Parque Nacional de Picos de Europa", González, J.J. y Serrano, E. 2010)

El Macizo de Ándara es el de menor altitud y extensión del conjunto, con una extensión en tomo a los 11 km de desarrollo latitudinal por 8 km de distancia longitudinal. Ándara se divide administrativamente entre las Comunidades Autónomas de Asturias Cantabria. A Asturias

pertenece una pequeña porción de su extremo noroccidental donde se sitúa el pueblo de Sotres, mientras que a Cantabria pertenece la mayor parte del Macizo, localizándose en esta zona los pueblos de Tresviso y Beges. El Macizo de Ándara constituye un elevado cordal disimétrico que se yergue sobre Liébana y Valdebaró; presentando un desnivel importante entre los valles y las cumbres que superan los 1.800 metros (Figura 4). Esta es la imagen más común del macizo, donde el contraste entre las praderas onduladas, y la roca blanca y vertical, muestra un relieve accidentado de alta montaña, de procesos enérgicos y de intercambio constante entre las cumbres y los valles bajos, a pesar de su moderada altitud.

En la vertiente opuesta, al norte, los desniveles son menores, las cimas son menos esbeltas, pero es el dominio de la roca desnuda, del relieve anfractuoso donde la sucesión de hoyos, valles encajados y gargantas confieren riqueza y diversidad al conjunto. El macizo posee unos límites hidrográficos precisos. Al sur, el río Deva; al norte otra sucesión de ríos de dirección NE-SE, que drenan al Río Sobra para formar el Río Urdón, alimentados por los aportes de aguas subterráneas. Al Oeste el Macizo vierte sus aguas al río Duje.



Figura 4. Paisaje del Macizo Oriental o de Ándara desde los valles de Liébana (Extraído de: www.picoseuropa.net)

El clima del macizo es de montaña hiperhúmedo, caracterizado por las elevadas precipitaciones derivadas de su posición geográfica. Con un cordal principal alineado de SW a NE, generan importantes contrastes en las vertientes y en los gradientes altitudinales, tanto pluviométricos como térmicos. En conjunto, las temperaturas medias anuales del Macizo son menores de 6°C. Desde los 1.200 metros las temperaturas medias de los meses de invierno son negativas y a partir de los 1800-2000 metros el mes más cálido no supera los 10°C. Las precipitaciones medias anuales superan los 1.900 mm.

El relieve es el elemento definitorio de Ándara; disimétrico, abrupto, dominado por la verticalidad de las cumbres, las canales y los desfiladeros; y condicionado por los materiales en los que se esculpe y su estructura geológica; dando lugar a un paisaje kárstico tanto en superficie como en profundidad. Pero además, el relieve es determinante para el clima y la hidrología del macizo; condicionando el desarrollo de diferentes paisajes, ecosistemas, comunidades vegetales o animales. Pero además, el relieve aporta información de los procesos y de las formas actuales activas o heredadas, de la evolución geológica, o los cambios climáticos que han ocurrido a lo largo del tiempo.

5.2. Situación y delimitación de la zona de estudio

Se establece como lugar de estudio dentro del Macizo de Ándara el paraje denominado "Majada del Redondal", al Sur del Cueto de Ramazosa, en el corazón del Macizo de Ándara. Como lugar singular del área de trabajo y centro de los análisis realizados, se establece la cubeta galiolacustre de la laguna de Ándara (Figura 5). El área en el que se va a realizar el estudio viene definida por un Área de Interés, (en Inglés *Area of Interest, AOI*) con las coordenadas UTM (ETRS89) que aparecen en la esquina superior izquierda de la Figura 5.

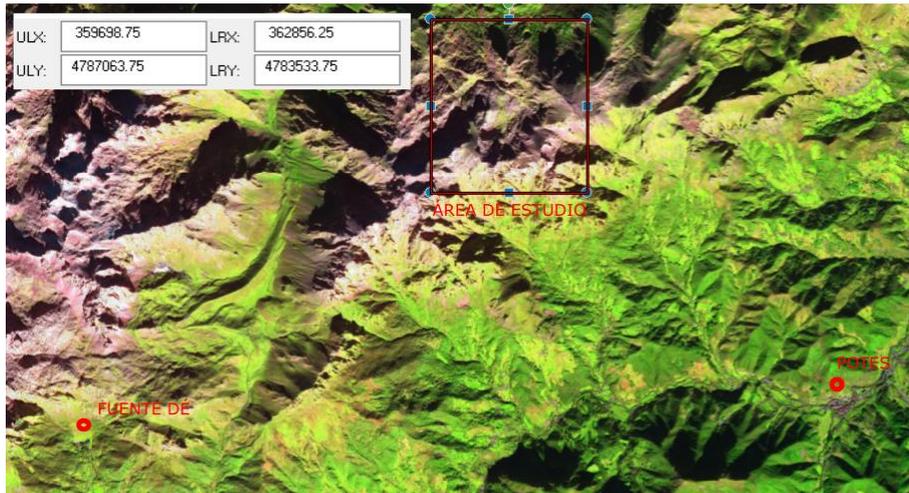


Figura 5. Coordenadas UTM DATUM ETRS 89 de la delimitación para la zona de estudio. La coordenada superior izquierda tiene coordenadas: X 359.698,75 m; Y 4.787.063,75 m. La esquina inferior derecha tiene coordenadas: X 362.856,25; Y 4.783.533,75 m.

El acceso hasta esta zona se puede realizar a través de la pista que une el Hito (*Jito*) de Escarandi con el Casetón de Ándara, y desde ese punto por un sendero que lleva hasta la Majada del Redondal. Este sendero también da acceso a las principales labores de las Minas de Mazarrasa y la Providencia (Figura 6) que se encuentran dentro del ámbito a estudio. También existe acceso desde el pueblo de Bejes, a través de una pista que desemboca en el Casetón de Ándara bordeando la Pica del Mancondiu.

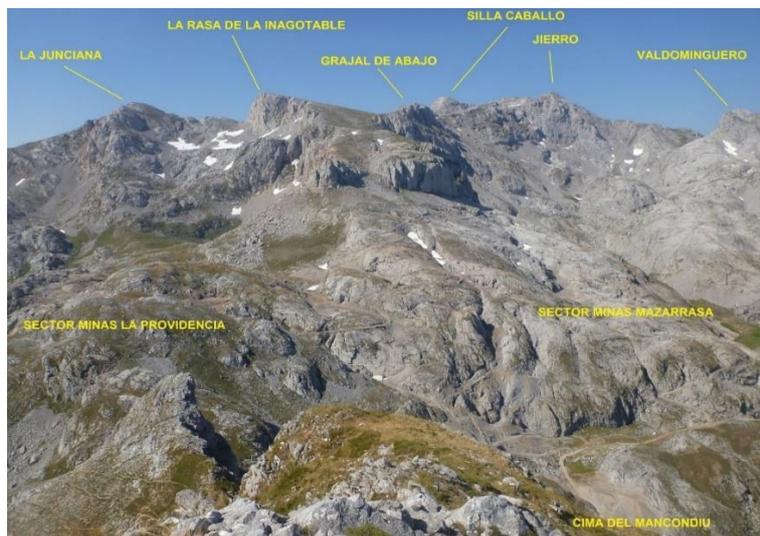


Figura 6. Vista panorámica de la zona de estudio en el Macizo de Ándara

5.3. Descripción geológica

La zona de estudio se encuentra en el extremo oriental de la Cordillera Cantábrica, dentro de la Unidad de los Picos de Europa (Julivert, 1971a, Figura 7). Esta unidad limita al norte y al oeste con la unidad del Ponga-Cuera y al sur con la unidad del Pisuerga-Carrión (Marquínez y Adrados, 2004). Al este, los materiales mesozoicos de la Cuenca Vasco-Cantábrica se sitúan discordantemente sobre las unidades anteriores (Catillo, F. 2013).

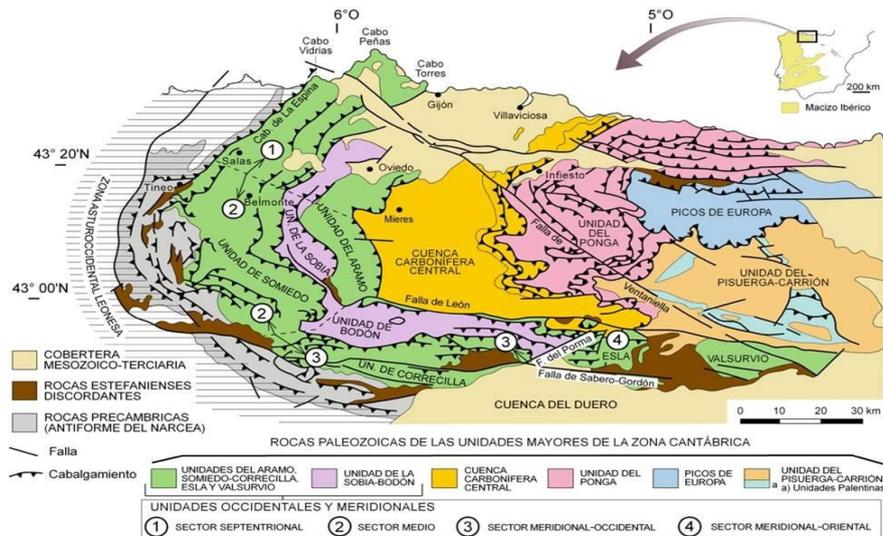


Figura 7. Esquema geológico de la zona Cantábrica (tomado de Julivert, 1971 y Pérez-Estaún et al., 1988).

Estructuralmente, la unidad de Picos de Europa está conformada por un conjunto de cabalgamientos con dirección E-O, que se emplazaron durante la Orogenia Varisca, produciendo la repetición de la secuencia sedimentaria Paleozoica. Estos cabalgamientos convergen hacia un cabalgamiento basal, poco inclinado, que tiene su despegue en la base de la secuencia (Marquínez y Adrados, 2004). Sobre este sistema imbricado se emplazó con anterioridad a la deformación la Unidad del Cuera (constituida por materiales Cámbrico-Ordovícicos) mediante un cabalgamiento. Estos materiales están afectados por escamas de cabalgamientos con dirección NO-SE, y por otros cabalgamientos menores posteriores de materiales pertenecientes al imbricado de Picos de Europa. Asimismo, al oeste, esta unidad se pone en contacto con el manto del Ponga siendo una zona tectónicamente complicada, donde los cabalgamientos de Picos de Europa se superponen tanto a las escamas del Ponga, como a los sedimentos sinorogénicos asociados a estas. Este contacto se presenta como una zona muy tectonizada con evidencias de cizalla dextral (Marquínez y Adrados, 2004). La unidad Picos de Europa se superpone tectónicamente hacia el sur sobre los materiales de la Unidad Pisuerga-Carrión los cuales representan la cuenca de antepaís del orógeno Varisco. Posteriormente, durante la deformación Alpina, se desarrollaron fallas con dirección E-O, produciendo movimientos verticales, y fallas NO-SE, afectando a los cabalgamientos Variscos, que producen movimientos horizontales dextros (Marquínez y Adrados, 2004). Según Marquínez (1989), en la unidad de Picos de Europa se diferencian tres sub- unidades, siendo de norte a sur: las Láminas de Gamonedo-Panes, el Imbricado Principal de los Picos de Europa y las Láminas Frontales, como se observa en el esquema siguiente (Figura 8) (Catillo, F. 2013).

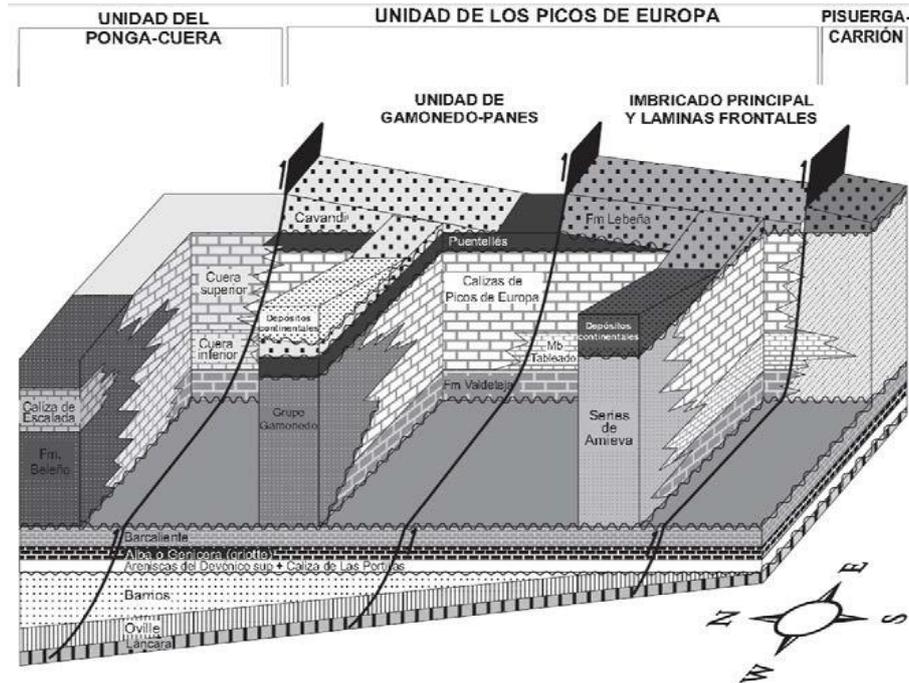


Figura 8. Esquema de las Unidades de Picos de Europa, Ponga-Cuera y Pisuerga-Carrión. (Tomado de Marquínez y Adrados, 2000).

La zona del presente trabajo se emplaza sobre el Imbricado Principal de los Picos de Europa, que a su vez se compone de una serie de escamas de cabalgamiento que producen la repetición de la serie calcárea carbonífera compuesta por las formaciones Alba, Barcaliente, Valdeteja, Picos de Europa y Puentellés (Marquínez y Adrados, 2004, Figura 8).

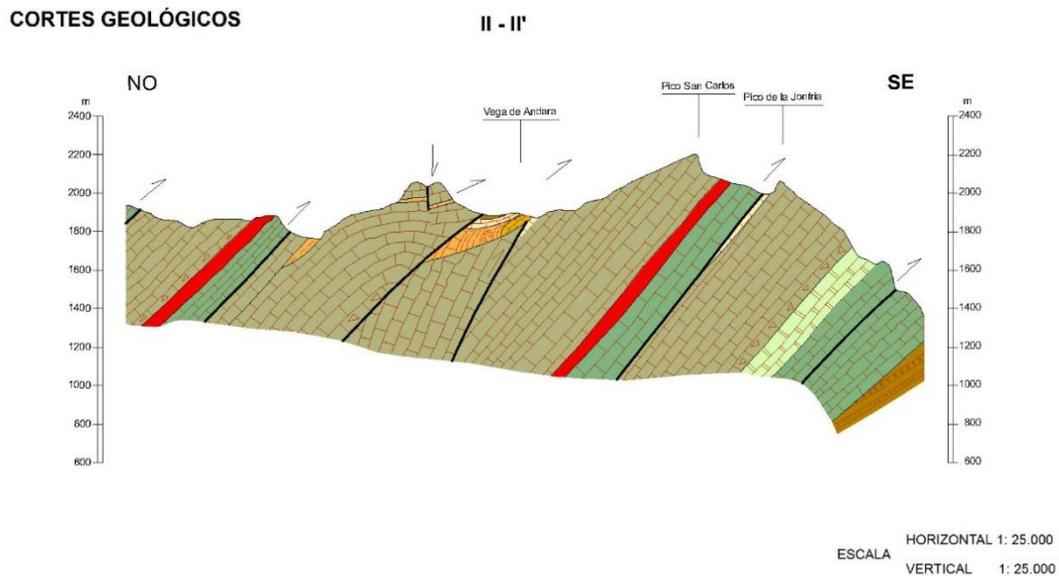


Figura 9. Perfil morfoestructural de Ándara en la zona central. Tomado de (Mapa Geológico de la Comunidad Autónoma de Cantabria a escala 1:25.000)

En detalle, la geología de la depresión de Ándara (Figura 9) está formada por calizas masivas (Carbonífero Superior) y sobre ellas alternancias de pizarras y lutitas, y delgados niveles

de areniscas y bancos de calizas brechoides y bioclásticas, que forman la Formación Áliva. Estas capas de pizarras tienen un rumbo SO-NE y buzamientos entre 50° y 90° al NO. Sobre estas pizarras y en el fondo del valle se depositaron los sedimentos arcillosos mencionados. Los materiales pizarrosos, se ponen en contacto discordante con las calizas de edad Carbonífero Superior de la Formación Picos de Europa (como puede apreciarse en la ladera sureste del valle).

5.4. Descripción geomorfológica

Ándara es un macizo kárstico de alta montaña, donde el predominio del sustrato calcáreo hace que la karstificación sea uno de los procesos fundamentales para comprender el relieve del macizo. El dominio de los materiales calcáreos, y la elevada tectonización, derivada de su apilamiento en escamas cabalgantes y plegamientos, han configurado un paisaje kárstico elaborado por la disolución de las calizas que domina prácticamente en todo el macizo (Figura 10).



Figura 10. Principales rasgos Geológicos y geomorfológicos de la depresión glaciokárstica de la Laguna de Ándara. (Extraído de : " Guía Geológica, Parque Natural de Picos de Europa" Varios autores, 2010)

La disolución de las calizas es el principal agente de modelado en este paraje, iniciándose desde el momento de su emplazamiento hasta la actualidad, por lo que su acción comprende largos periodos de tiempo. Procesos enérgicos y rápidos, como los glaciares o la tectónica, modifican profundamente el modelado kárstico e interactúan con él para dar lugar a formas mixtas que definen los paisajes de montaña calcárea, pero la karstificación determina la dinámica actual, pues dirige la hidrogeología, la ausencia de agua corriente en superficie, la génesis de depósitos finos y la adaptación a las condiciones estructurales. Se trata, en la actualidad, de un holokarst, esto es, un macizo calcáreo exógeno-endógeno, en el que todas las aguas de precipitación y fusión nival se infiltran y no existe escorrentía superficial.



Figura 11. Paisaje Kárstico. Depresión Glaciokárstica de la Laguna de Ándara, donde se observa la geología y morfología típica de un macizo calizo. En la imagen se aprecian labores mineras, producto de la minería de extracción de sulfuros de principios del siglo XX.

A menudo, la topografía adquiere un aspecto caótico, casi incomprensible, sin drenaje superficial y con un amplio cortejo de formas individualizadas y fuertemente interrelacionadas entre sí, representadas a distintas escalas. Se suceden umbrales y depresiones con escasa organización, aunque en detalle están controladas conforme a la disposición morfoestructural descrita con anterioridad. Podemos encontrar depresiones a gran escala como valles secos, poljes, y depresiones capturadas (Figura 11). Por otro lado, son comunes las depresiones glaciokársticas, siendo una de las más singulares la cubeta glaciokárstica del Lago de Ándara. Otras depresiones de menor entidad salpican el territorio de forma abundante, siendo comunes las dolinas de disolución, úvalas, simas y pozos. Por último, en el área aparecen numerosos ejemplos de micro formas kársticas como son pasillos estructurales de disolución o bogaces y las zonas de lapiares de disolución.

Las grandes formas de modelado glaciar constituyen otro de los elementos esenciales del relieve en el Macizo. Durante el cuaternario, el macizo estuvo ocupado por glaciares, alcanzando su máxima extensión durante el máximo glaciar de la última glaciación denominado (*Last Glacial Maximun*, LGM), ocurrido a finales del Pleistoceno. A partir de este momento se inicia una etapa de retroceso generalizado de los glaciares de montaña, aunque hay momentos de equilibrio y otros de avance relativo, pero siempre menores al límite marcado por el LGM. En el macizo de Ándara se diferencian dos sectores (González y Serrano, 2010): las zonas altas, donde predomina un relieve generado por procesos erosivos (circos, cubetas, umbrales, etc.); y las más bajas, caracterizada por valles más amplios, en artesa, que poseen complejos morrénicos de mayores dimensiones (Figura 12).

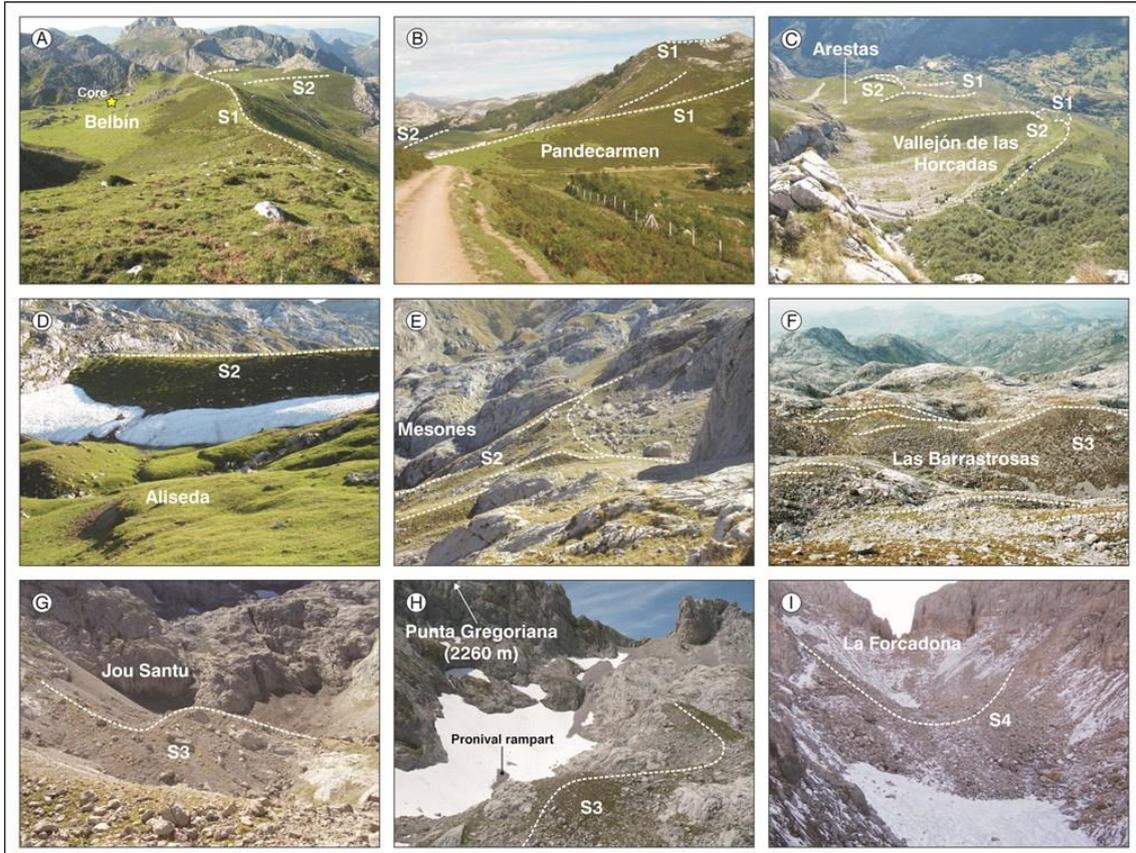


Figura 12. Ejemplos de diferentes depósitos y acumulaciones de la acción de los glaciares en los Picos de Europa.

Los complejos morrénicos constituyen el mejor exponente de las formas de acumulación glaciár. Aunque están presentes en todo el macizo, y son dominantes en las zonas bajas de los valles glaciares; existen también en las depresiones con forma de artesa situadas en altura, así como en los circos más altos. Estas formas de acumulación están generadas por la sedimentación glaciár. Éste es un proceso complejo en el que intervienen varios factores, tanto el cese del arrastre de los materiales subglaciares, como el abandono de material transportado en la superficie del glaciár (materiales supraglaciares), o la sedimentación de los materiales transportados en el interior del hielo por su fusión. Estos materiales se depositan prioritariamente sin intervención del agua corriente, denominándose till.

En función de la posición donde se generan reciben diferentes denominaciones, morrenas laterales, morrenas frontales, morrenas de fondo. Estas formas son muy claras y el mejor indicador para reconstruir la superficie que ocupó un glaciár, por lo que son un testigo privilegiado para la reconstrucción de los glaciares cuaternarios.

El tercer proceso geomorfológico a gran escala, que determina el paisaje son los procesos de ladera o movimientos en masa. Las laderas del Macizo de Ándara están condicionadas por una disimetría marcada entre las vertientes norte y sur, consecuencia de las condicionantes estructurales y litológicas. Otra parte importante de los procesos de ladera debe su origen al periglaciarrismo y a la nivación. Existen muchos ejemplos de conos de derrubios, que dan lugar a pedreras heredadas o activas (Figura 13). Éstas tapizan las laderas de la montaña, tanto en las porciones superiores de las canales, meridionales y septentrionales, como en los circos altos de la vertiente norte. Su localización sitúa los puntos en donde estos procesos actúan de manera

más activa, por la conjunción de los factores mencionados. También se presentan un conjunto de grandes movimientos en masa cuya dinámica está directamente relacionada con la evolución morfodinámica ocurrida a lo largo del Cuaternario.

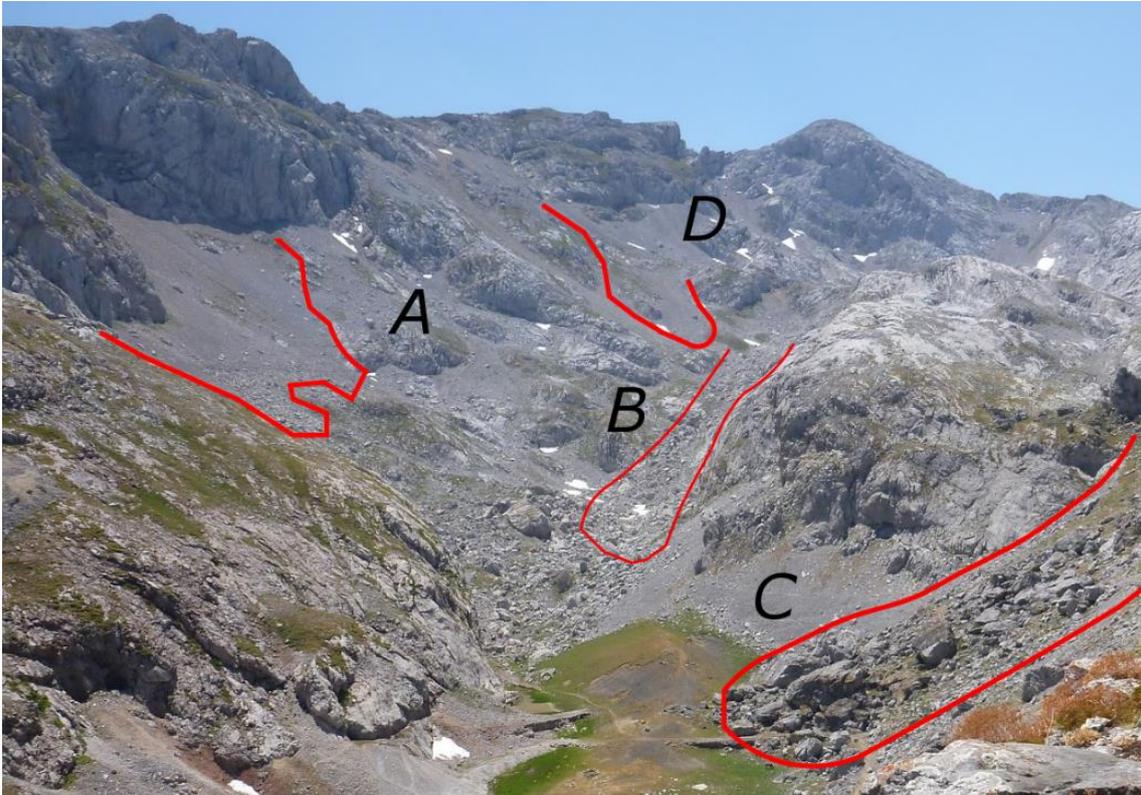


Figura 13. Diferentes tipos de dinámica de ladera en el Circo del Redondal, Macizo de Ándara. Los depósitos A, B y D corresponden a canchales y conos de derrubio. El depósito correspondiente a C pertenece a un desprendimiento o caída de bloques.

Son, desplazamientos (traslacionales, rotacionales), desprendimientos, extensiones laterales, vuelcos, etc.; generalmente afectan al substrato rocoso, aunque también existen flojos de derrubios o avalanchas de roca que se desarrollan sobre la cobertera anteriormente descrita. Su distribución en el macizo de Ándara está condicionada por la estructura geológica, pues el 76% de los grandes movimientos en masa están asociados al escarpe frontal generado por el cabalgamiento de las formaciones calcáreas sobre las unidades turbidíticas de Liébana (González y Serrano, 2010). Su existencia y reparto espacial deriva de dos hechos fundamentales, la características litoestratigráficas y la incisión paulatina de los valles, que desequilibra las laderas y propicia su puesta en marcha a partir de las debilidades litoestructurales.

Otros procesos de ladera que se desarrollan a menor escala, son debidos a las condiciones climáticas existentes en el ambiente de alta montaña. Las amplias diferencias de temperatura que registran en las cumbres ocasionan en los materiales ocasionan roturas por fatiga mecánica, termoclastia, crioclastia o cristalización de sales disueltas, dando lugar a muchos de los desprendimientos descritos anteriormente (Figura 13). La acumulación inestable del manto nival durante el invierno y primavera (principalmente) genera otro tipo de procesos de ladera como son las avalanchas de nieve, que también dejan una impronta en el relieve. El régimen térmico del suelo, condicionado por la altitud y el manto nival, dirigen los procesos edáficos de reptación, localizados ya sea sobre el escaso substrato rocoso o en los depósitos superficiales. De este modo se generan un conjunto de formas, activas en su mayor parte, indicadoras del

ambiente, de baja energía y alta frecuencia, con movimientos lentos, pero constantes, de centímetros a metros al año, con una fenología asociada a su funcionalidad durante los periodos de primavera y verano. El cortejo de formas es amplio, asociadas a la gravedad, el hielo-deshielo, la termoclastia, la reptación, la saturación de formaciones superficiales o la nivación, y ocasionan una amplia riqueza de formas que se describen a continuación. A menudo están imbricadas entre sí o en estrecha relación con la vegetación, lo que enriquece la alta montaña, con hábitats definidos prioritariamente por elementos geomorfológicos y su dinámica.

6. METODOLOGÍA

6.1. Descripción general del procedimiento

Para la ejecución de la propuesta metodológica se ha estructurado el trabajo en diferentes fases. La primera fase es de búsqueda de información y estudio. Una vez establecidos los objetivos generales y específicos de la investigación, se ha procedido a una búsqueda bibliográfica y estudio de la documentación existente. La segunda fase consistió en la construcción de los mapas diana. Las unidades a utilizar como diana o referencia se han construido a partir de la información existente, verificado sus contactos en el campo. Estos mapas se han digitalizado e introducido dentro de un SIG, construyendo su correspondiente geodatabase. La tercera fase, de tratamiento de la señal, es eminentemente de teledetección. Las diferentes imágenes de satélite y aéreas (Landsat ETM+, SPOT 5, LIDAR, imágenes aéreas del Gobierno de Cantabria) elegidas, fueron tratadas con los programas de teledetección empleados (ERDAS), aportando los productos a validar. La fase cuarta y última es la de validación de los resultados. Los mapas obtenidos en la fase anterior de manera automática, fueron posteriormente incorporados a un SIG en el que se realizaron las validaciones de los resultados comparando los mismos con los mapas diana. En esta fase se emplean toda una serie de herramientas estadísticas para conocer el grado de éxito de las validaciones efectuadas.

Como se ha indicado en el apartado Planteamiento del Problema se han seleccionado tres tipos de elementos geológicos a validar, cada uno de los cuales ha sido ubicado en un experimento que seguidamente se describe.

El experimento 1, titulado Determinación de litología predominante, pretende conocer la capacidad de las imágenes para identificar cambios o tipos de unidades del territorio. Esta determinación se realizará a partir de la señal recogida en la imagen. Se buscan grandes unidades de territorio, por lo que la resolución espacial de la imagen no es un factor limitante. El experimento se repetirá nuevamente con imágenes de mayor resolución espacial para analizar los cambios. Como se ha comentado anteriormente la señal recogida por el sensor y capturada en forma digital es el fruto de la energía electromagnética reflejada por los materiales que componen la superficie del territorio. En la zona elegida existen fundamentalmente rocas carbonatadas, rocas detríticas y depósitos superficiales. Para llevar a cabo dicho experimento se ha procedido al tratamiento de la señal registrada empleando herramientas radiométricas de ecualización de los histogramas; herramientas de filtros espaciales espacial (convoluciones del tipo summary y sharpen); herramientas tratamiento espectral de la señal (Tasseled Cap, índices de imagen como el NDVI y Mineral Composite).

En detalle, las imágenes empleadas se han sometido a una serie de mejoras con el fin de mejorar su visualización y obtener la información relevante. En primer lugar, se han aplicado los filtros de convolución 3x3 Summary y Sharpen (Erdas Imagine Field Guide, Intergraph, 2013). Son filtros de paso alto, que atenúan la aparición de las componentes de baja frecuencia pero no las de alta frecuencia, que incluso pueden amplificarse. Sirven para mejorar la nitidez de la señal capturada. Estos filtros tienen un kernel en forma de matriz de 3x3 como los presentados en la Figura 14. Con el primero se puede separar mejor los elementos lineales, que quedan mal definidos en las imágenes originales, de este modo, se busca una separación más eficiente entre los distintos elementos superficiales buscados (litologías, formas, etc.). Este filtro, al sumar la

respuesta digital cada 9 píxeles (3x3). El filtro Sharpen se obtiene una imagen en la que se acentúan los contrastes y cambios de tonalidades, facilitando la identificación de los límites litológicos y lo correspondientes a los depósitos superficiales.

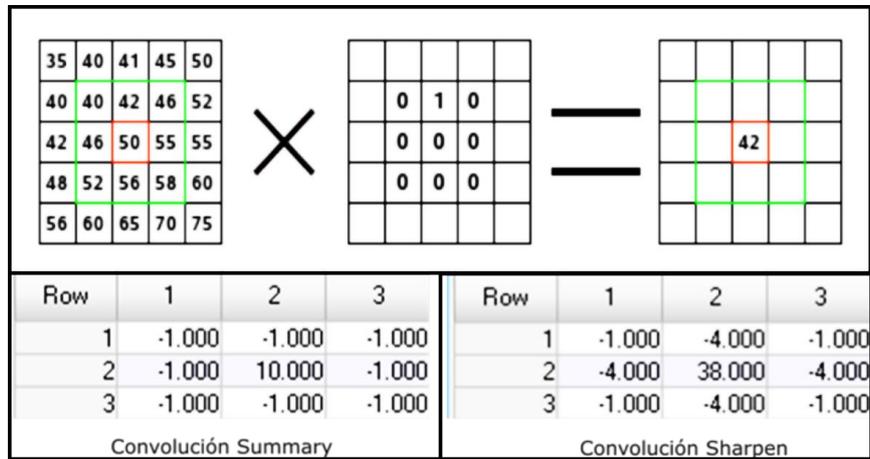


Figura 14. Ejemplo de funcionamiento de filtro espacial; tipos de filtros summary y sharpen. Superior, a la izquierda se presenta una matriz que es descrita por sus niveles digitales; ésta se multiplicada por una nueva matriz llamada kernel, de tamaño 3x3 (centro) dando una nueva en la que los valores centrales quedan resaltados (derecha). Inferior, kernels aplicados en los filtros summary y sharpen de este trabajo.

Las mejoras espectrales se basan en combinar distintas porciones del espectro electromagnético mediante mezcla de canales u operaciones matemáticas. La mejora espectral que se ha efectuado en el experimento propuesto ha sido *Tasseled Cap*, e índices *NDVI* y *Mineral Composites*.

La función *Tasseled Cap* consiste en reducir las bandas del sensor a tres nuevas bandas que representan el brillo o albedo (indica áreas de baja vegetación y alta reflectancia), el verdor (se calcula mediante una relación entre canales visibles e infrarrojo próximo en indica vegetación) y la humedad (indica agua o humedad del terreno). Estos índice permite discretizar entre los materiales con mayor reflectividad (litologías calizas), materiales detríticos (mayor acumulación de vegetación), y depósitos superficiales (mayor contenido en agua).

Los índices son operaciones matemáticas entre las bandas de diferente longitud de onda del espectro electromagnético; realizados con el fin de obtener una imagen que permita discriminar alguna característica específica: vegetación, arcillas, óxidos de hierro, etc. Los índices de imagen son clasificaciones basadas en algoritmos que intentan resaltar alguna propiedad específica. En este experimento se ha utilizado el índice, *MC (Mineral Composite)*, e índice *NDVI (Normalice Difference Vegetation Index)*. En el índice *MC* se utiliza para determinar mediante los valores digitales, las distintas composiciones minerales. Este índice ofrece cierta incertidumbre en la interpretación, salvo que la litología sea homogénea. Con él se genera una imagen en falso color (*RVA*) correspondiente a óxidos de hierro, minerales de la arcilla y minerales ferrosos. En nuestro caso, se busca determinar las zonas con mayor acumulación de arcillas y materiales detríticos, en los que la acumulación de óxidos de hierro es mayor debido a los procesos de meteorización. Por otro lado, el índice *NDVI* se basa en la ejecución de algoritmos que evalúan la relación entre el rojo e infrarrojo cercano, indicativa del estado de la vegetación. Los índices mayores muestran la vegetación más vigorosa, es decir más agua en el subsuelo. La imagen se clasifica en color rojo donde apenas ofrece reflectancia y verde mucha reflectancia. Esto permite realizar una clasificación del macizo buscando la zona con mejor vigor vegetal. La plantas se

desarrollan de manera más vigorosa con suelos que aportan oligoelementos y humedad, es decir depósitos superficiales preferentemente, y rocas detríticas en segundo orden de escala, en comparación a las zonas calizas.

El experimento 2, titulado identificación de elementos lineales (facturas s.l., grietas, cantiles), planos mecánicos (fallas, diaclasas, etc.) y otros elementos estructurales (contactos concordantes, discordantes), pretende conocer la capacidad de las imágenes para identificar estos rasgos. Se buscan lineaciones, por lo que la resolución espacial de la imagen es un factor limitante. El experimento se repetirá con imágenes de mayor a menor resolución espacial para analizar los cambios. En este tipo de rasgos geológicos el agua es un elemento fundamental, el cual favorece el crecimiento de la vegetación. El agua emite en el infrarrojo cercano mientras que la vegetación los hace en el infrarrojo cercano y en el térmico. En la zona elegida hay una amplia variedad de contactos como los descritos anteriormente que permiten identificar claramente dichos rasgos. Para llevar a cabo dicho experimento se ha procedido al tratamiento de la señal registrada empleando herramientas radiométricas de ecualización de los histogramas; herramientas de filtros espaciales espacial (convoluciones summary y sharpen, filtros direccionales en ocho componentes del espacio); herramientas tratamiento espectral de la señal (Análisis de Componentes Principales, ACP).

En este experimento se han analizado las posibilidades que ofrece la imagen procedente del satélite SPOT 5 (alta resolución espacial) pero con sólo una banda de señal infrarroja, frente a la proporcionada por el satélite Landsat 7 ETM+ que ofrece dos bandas en el infrarrojo, además de la señal de la banda térmica. Es importante esta última banda porque los lineamientos se detectan bien en el térmico (Ninomiya et al., 2004). Posteriormente, estas imágenes se analizan aplicando filtros direccionales sobre las bandas del infrarrojo anteriormente descritas. Tomando como referencia las imágenes pre tratadas con los filtros summary y sharpen del experimento 1, se aplican los diferentes filtros de convolución direccionales de carácter espacial. Se utilizan ocho orientaciones para aplicar el filtrado (N-S, NE-SW, E-W, SE-NW, S-N, SW-NE, W-E, NW-SE, Figura 15) las cuales acentúan los rasgos perpendiculares al sentido del gradiente, de la siguiente manera: en las zonas donde la frecuencia espacial de los niveles digitales es baja, el *kernel* transforma los niveles digitales a valor cero (se ven negros) y, en las zonas de alta frecuencia espacial los valores se hacen más extremos y los niveles digitales tienden a ser blancos, (Rodríguez Mangas, 2013).

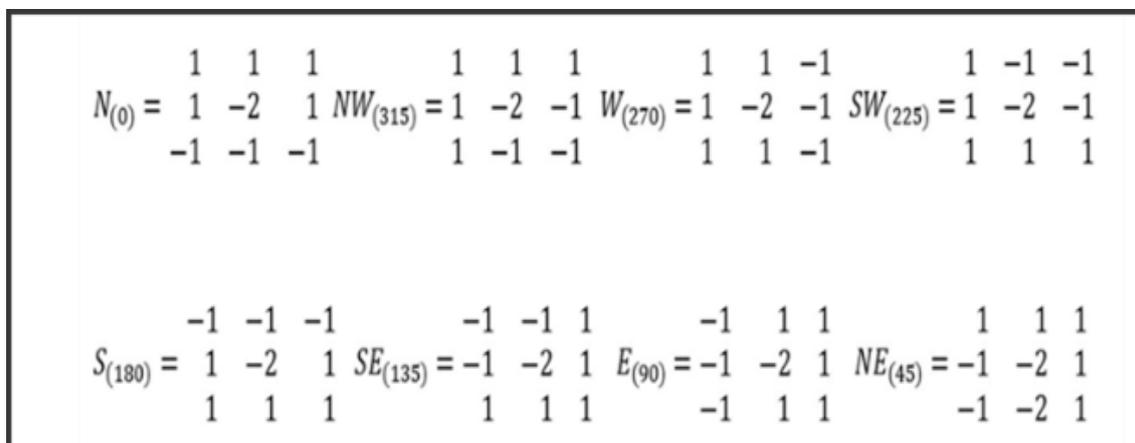


Figura 15. Filtros direccionales escogidos para el desarrollo del presente trabajo. Para cubrir al máximo el espacio de aplicación, se escogen ocho zero-sum kernel definidos por Jensen (1996), que cubren las cuatro direcciones principales del espacio.

El análisis de componentes principales ACP se basa en resumir un gran número de variables en un grupo más pequeño, sin perder apenas información, teniendo en cuenta la matriz de varianza (Erdas Imagine Field Guide, Intergraph, 2013). Las variables van a ser las distintas bandas del sensor o señales tratadas, que se presentan en una banda de información. Mediante este análisis se va a obtener una nueva imagen en la que los primeros componentes van a recoger casi toda la variabilidad muestral. Para su representación se asigna a cada uno de los principales componentes los tres cañones de color, de forma que tengamos la información de todas las bandas, en una sola imagen. Por lo descrito anteriormente, los filtros obtenidos en cada orientación se presentan en una banda. El orden en que se agrupan las bandas es crucial pues condiciona por completo la interpretación de los resultados del ACP. El producto obtenido de este experimento, es una imagen ráster, para cada una de las imágenes de satélite seleccionada. La primera imagen corresponde a la señal de SPOT-5, con una resolución espacial de 5 m. La segunda imagen corresponde a Landsat 7 ETM+ con resolución 30 m. Se utiliza la banda 4 (SWIR, Satélite SPOT 5) y la banda 5 (SWIR, Satélite Landsat 7 ETM+).

El experimento 3, titulado caracterización de geo-formas (formas erosivas cóncavas, formas deposicionales convexas, formas planas), pretende conocer la capacidad de las imágenes para identificar diferentes tipos de modelado. Se buscan morfologías típicas de la acción de los procesos superficiales (tanto erosivos como deposicionales), por lo que la resolución espacial de la imagen es también un factor limitante. En este tipo de rasgos geológicos la geometría del relieve es fundamental. Ésta ha sido captada por un sensor LIDAR (Light Detection and Ranging) obtenido del plan PNOA 2010, con precisión 5 m /px. Con los datos aportados por dicho sensor se ha elaborado un (MDE) y a partir del mismo los correspondientes MDT (pendiente, orientación, curvatura, etc). En la zona elegida hay una amplia variedad de formas como las descritas que permiten identificar claramente dichos elementos. Para llevar a cabo dicho experimento se ha utilizado la capacidad del SIG y los programas de teledetección para desarrollar las superficies a partir de datos puntuales obtenidos con LIDAR, y de éstos construir otros modelos ráster derivados de los mismos.

6.2. Material utilizado

Las imágenes satelitales empleadas son multispectrales de media y alta resolución espacial (30 m/px, y 2,5/5 m/px), corresponden a los satélites Landsat 7 ETM+ y SPOT 5, sus principales características se muestran en la Figura 16. Dichas imágenes han sido obtenidas del servidor de imágenes del U.S. Geological Survey (USGS, <http://earthexplorer.usgs.gov/>), gracias al Plan Nacional de Teledetección del IGN y de la aplicación *Earth Science Data Interface* (ESDI) de la Web *Global Land Cover Facility* (www.glcf.umd.edu). La selección de las imágenes satelitales de la zona de estudio, se ha realizado bajo el criterio de máxima visibilidad, sin nubosidad, evitando épocas con acumulaciones de nieve debido a que estos factores pueden aportar falsos positivos e inducir a errores si se consideran de manera inapropiada. El rango temporal utilizado para la selección de las imágenes de satélite se ha establecido en la época estival, o meses próximos.

SATÉLITE	SUBSISTEMA	BANDA No.	RANGO ESPECTRAL	RESOLUCIÓN ESPACIAL	RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA
Landsat 7 ETM+	VNIR	1	0,45 - 0,515 μm	30 m	8 bits
		2	0,525 - 0,605	30 m	8 bits
		3	0,63 - 0,69 μm	30 m	8 bits
		4	0,75 - 0,90 μm	30 m	8 bits
	SWIR	5	1,55 - 1,75 μm	30 m	8 bits
		7	2,09 - 2,35 μm	30 m	8 bits
	TIR	6	10,4 - 12,5 μm	30 m	8 bits
	PAN	8	0,50 - 0,90 μm	15 m	8 bits
SPOT 5	GREEN	1	0,500 - 0,590 μm	10 m	8 bits
	RED	2	0,610 - 0,680 μm	10 m	8 bits
	NIR	3	0,780 - 0,890 μm	10 m	8 bits
	SWIR1	4	1,518 - 1,750 μm	20 m	8 bits
	PAN	A	0,480 - 0,720 μm	5 m	8 bits
	PAN	B	0,480 - 0,720 μm	5 m	8 bits
	PAN - RES	T	0,480 - 0,720 μm	2,5 m	8 bits

Figura 16. Tabla de características de los satélites utilizados, donde se representan los sensores y bandas que ofrece cada satélite, su rango espectral, resolución espacial y radiométrica.

También se han utilizado ortoimágenes del Gobierno de Cantabria con un GSD 25 cm (en tres bandas: azul, verde y Rojo, correspondientes a longitudes de onda del espectro visible entre 360 y 650 nm) y nubes de puntos LIDAR con una resolución espacial de 5 m, procedentes ambos Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA).

Para el tratamiento de las imágenes se ha empleado el software comercial de *Leica Geosystem Geospatial Imaging*, ERDAS IMAGINE 2014, así como el software comercial de ESRI ArcGIS 10.3, y el libre QGIS los cuales disponen de diferentes módulos y herramientas de procesado de las imágenes digitales.

Todas las imágenes utilizadas en este trabajo están georreferenciadas con el sistema de referencia ETRS 89, USO 30. Se les ha aplicado un recorte con las dimensiones definidas en el apartado 5.2, con el objetivo de que toda la documentación generada disponga de las mismas dimensiones espaciales para realizar la comparación y validación.

Las imágenes *diana* empleadas en la validación se han generado mediante el software

ARCGIS 10.3., a partir de la geología y geomorfología continua, a escala 1:25000 del Gobierno de Cantabria. Estos documentos se encuentran disponibles en el servidor de Información cartográfica del Gobierno de Cantabria (Mapas Cantabria, <http://mapas.cantabria.es/>). Los archivos correspondientes a dichos documentos están en formato shape (.shp). Estos elementos también han sido recortados utilizando el mismo marco de referencia descrito anteriormente.

La validación de los datos se lleva a cabo por medio de herramientas de análisis estadístico. La base de la validación de los datos obtenidos en el experimento se realiza buscando la correlación existente entre las diferentes variables obtenidas. Para el análisis se ha utilizado los programas de análisis GeoDa TM, y Cran R. La herramienta estadística utilizada (análisis de regresión múltiple), permite modelar, examinar y explorar relaciones espaciales entre la variable diana (target) en cada experimento y las variables correspondientes a los resultados obtenidos. El método de regresión es un procedimiento mediante el cual se determina la existencia de una relación, o no de dependencia entre dos o más variables. Los valores importantes del análisis son el coeficiente de regresión, el valor de la probabilidad, y el valor de R^2 . Con estos valores se pueden obtener conclusiones acerca del resultado de los experimentos. El análisis sobre los datos obtenidos busca detectar si la variación de una de las variables tiene conexión con la variación de las otras comparadas, esperando que, si una variable se desvía de la media de la distribución, la otra variable se desvíe de la media de manera similar. Una relación lineal positiva entre dos variables indica que los valores de las dos variables varían de forma parecida. Así, las observaciones que puntúan alto en una variable tienden a puntuar alto en la otra y las que puntúan bajo en la primera tienden a puntuar bajo en la segunda, existiendo, por tanto, una relación directa entre ambas variables. Una relación lineal negativa significa que los valores de las dos variables tienen una relación inversa: valores pequeños de una variable van asociados a valores grandes de la otra y, viceversa.

Para llevar a cabo la validación, se ha generado un archivo ráster que combina, en diferentes bandas los resultados de cada experimento, así como la imagen diana. Para ello, se ha utilizado la herramienta Layer Stak de Erdas 2014. El archivo generado en formato image (.img), se ha cargado en una sesión de trabajo de ArcMap. Debido a que es un archivo en formato image (.img), no es posible leer la información de cada banda desde el programa de análisis estadístico. Por ello, se ha empleado la herramienta Extraction/Subset, ubicada en la paleta Spatial Analyst Tools, que se genera una tabla con los datos contenidos en el archivo, para luego convertirla en un archivo con extensión Dbase (.dbf). Este archivo contiene toda la información del ráster en forma de matriz, siendo la base con la que se trabaja para realizar el estudio con el software específico de análisis.

Las validaciones se han presentado en tres grupos. Por un lado, el grupo de los experimentos obtenidos en base a imágenes procedentes del satélite Landsat 7 ETM + de media resolución espacial. Por otro lado, los obtenidos en base a imágenes procedentes del satélite SPOT 5, de alta resolución espacial. Y en último los archivos derivados del LIDAR. Para el primer grupo (Imagen Landsat 7 ETM +), las matrices de cada experimento a validar tienen una dimensión de 11 variables por 12.614 observaciones (experimento 1), y de 8 variables por 12.614 observaciones (experimento 2). La matriz de datos del experimento 1 se estructura, en primer término, con la variable X e Y (coordenadas UTM USO 30, con DATUM ETRS89) que definen la posición espacial de cada celda o píxel. Seguido van las variables que corresponden las bandas B1, B2, B3, del ensayo Tasseled Cap, con sus respectivos niveles digitales. Las siguientes variables corresponden a la banda del ensayo NDVI, B4, y a la banda correspondiente al ensayo de Mineral

Composite, B5. La última variable B6, corresponde a los niveles digitales de la imagen diana del experimento 1.

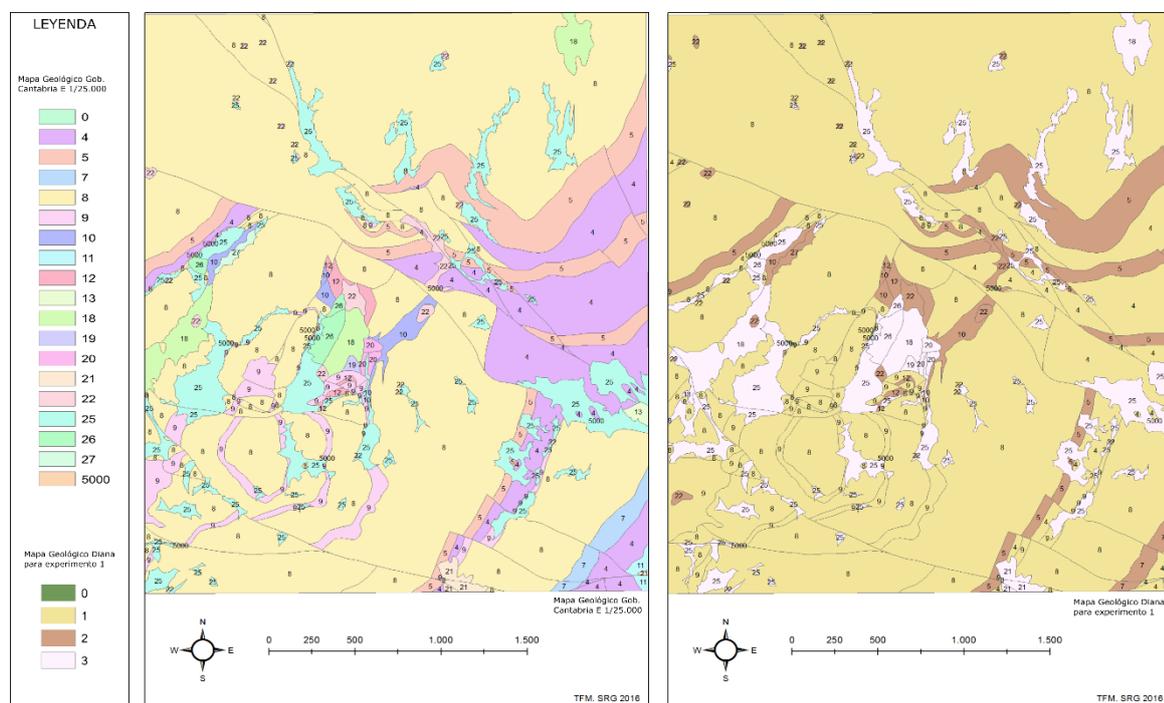
El segundo grupo de validación está compuesto por las matrices de datos correspondientes a los resultados obtenidos trabajando con imágenes de alta resolución espacial (SPOT 5). En este caso, se dispone de un tamaño de pixel de 2,5 m x 2,5 m, con lo que las matrices de datos, disponen del mismo número de variables que el primer grupo descrito (11 variables para experimento 1 y 9 variables para experimento 2) pero un número exponencialmente superior de observaciones. En total, cada variable dispone de 1.816.416 observaciones, generando una matriz de datos muy pesada (19.980.576 datos), y con una computación compleja.

El tercer y último grupo de validación corresponde al experimento 3. El análisis que se aplica en este caso busca una correlación entre las diferentes componentes morfológicas de carácter espacial, con la imagen diana (target). La matriz generada para el análisis, tiene 454.104 observaciones por variable, con un total de 8 variables. El número de datos para la computación es de 3.632.832 observaciones.

7. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS

7.1 *Construcción de un mapa litológico simplificado a partir de la información geológica existente que permita su utilización como elemento diana de referencia, en la evaluación de áreas recubiertas por materiales.*

Se han construido los mapas de referencia de litología para la validación de los modelos de imagen a partir de la información cartográfica del Gobierno de Cantabria. Las unidades litológicas del área de estudio han sido reclasificadas en 4 elementos: rocas carbonatadas, rocas detríticas, depósitos superficiales y agua. Para ello, se ha utilizado como criterio la dominancia de la litología principal de la unidad descrita en la leyenda (Figura 17). El modelo de referencia para la litología (Figura 17. Superior izquierda.) muestra una abundancia de carbonatos, frente a rocas detríticas y de depósitos superficiales, como se observa en la distribución de superficies de la Figura 18; estos grupos



DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES

0	Acumulaciones heterogéneas diversas, Hormigones, bloques, cantos, otros materiales	0	Unidad litológica sin clasificar
4	Arcillas de descalcificación, depósitos mixtos	1	Unidad de rocas carbonatadas
5	Arcillas, limos, arenas con fragmentos rocosos	2	Unidad de rocas detríticas
7	Arcillas, limos, arenas, gravas	3	Unidad de depósitos superficiales
8	Arenas, gravas		
9	Arenas, gravas sin matriz		
10	Areniscas cuarcíticas, conglomerados calcáreos, limolitas, lutitas		
11	Bloques, cantos en matriz arenosa y limosa		
12	Brechas calcáreas, calizas bindstone microbiales, calizas grainstone-packstone oolíticas, bioclásticas, calizas wakestone y baffestone (fc de talud y plataforma)		
13	Calizas bioclásticas grises oscuras, negras, margas, brechas calcáreas y calcilitas		
18	Calizas bioclásticas negras finamente laminadas, fétidas		
19	Cantos, bloques, arenas		
20	Conglomerados calcáreos, areniscas, limolitas, lutitas		
22	Espiculitas, calizas mudstone finamente laminadas, calizas grainstone-packstone, calizas rudstone (facies de base de talud y cuenca)		
25	Luticas oscuras, calcilitas, calizas grainstone-packstone (calcuturbitas), brechas calcáreas		
26	Lutitas, espiculitas, calizas mudstone finamente laminadas, Calizas grainstone-packstone, calizas rudstone (facies de talud y cuenca)		
27	Masa de agua		
5000	Melange, megabrechas calcáreas, orto, parabrechas calcáreas		

Figura 17. Izquierda. Mapa Geológico escala 1:25.000 del Gobierno de Cantabria. Derecha. Mapa geológico generado en base a la clasificación creada para el experimento 1, que selecciona los materiales litológicos en carbonatados, detríticos y en depósitos superficiales.

son claramente identificables en la clasificación realizada (Figura 17, derecha) y en el terreno.

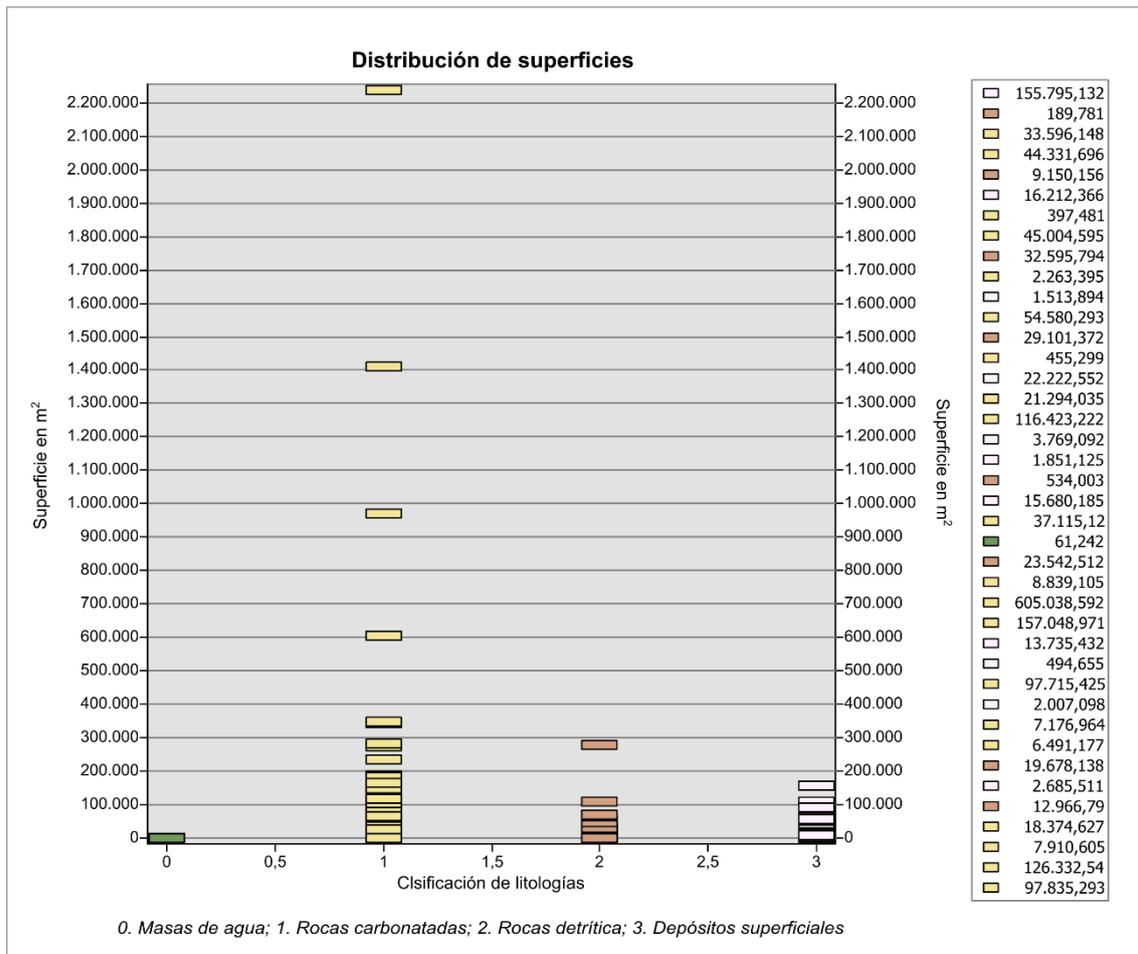
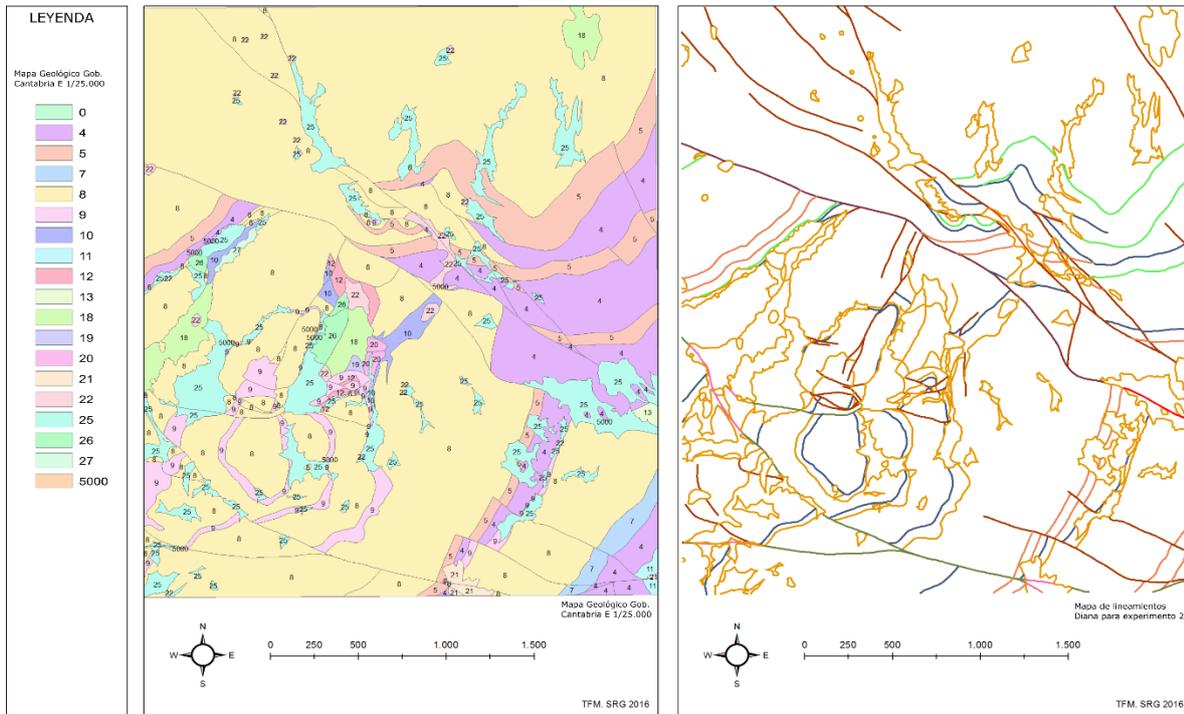


Figura 18. Distribución de superficies del área de estudio. Se aprecia la abundancia de rocas carbonatadas, frente a los materiales detríticos, y depósitos superficiales. La superficie que ocupa las masas de agua, es casi inexistente, debido al paisaje kárstico predominante en todo el macizo.

7.2 Construcción de un mapa de las principales estructuras geológicas presentes a partir de la información existente que permita su utilización en la evaluación de elementos lineales y que sea empleado como referencia en los test de validación.

Se ha construido los mapas de referencia de estructura para la validación de los modelos de imagen a partir de la información cartográfica del Gobierno de Cantabria. Las lineaciones estructurales presentes en el área de estudio han sido reclasificadas y agrupadas de manera continua. Así los contactos (concordantes, discordantes) se han agrupado en una clase; las fallas y cabalgamientos, en otra. Para ello, se ha utilizado como criterio la denominación que establece el mapa Geológico a escala 1:25.000 para estas unidades estructurales (leyenda Figura 19). Los modelos de referencia para la distribución de estructuras y lineamientos (Figura 19. Arriba derecha) muestra una abundancia lineamientos correspondientes a contactos entre litologías frente a elementos estructurales tipo fallas y cabalgamientos como se aprecia en la Figura 20. Los metros lineales de éstos son mayores.



DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES Y PRINCIPALES ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> 0 Acumulaciones heterogéneas diversas, Hormigones, bloques, cantos, otros materiales 4 Arcillas de descalcificación, depósitos mixtos 5 Arcillas, limos, arenas con fragmentos rocosos 7 Arcillas, limos, arenas, gravas 8 Arenas, gravas 9 Arenas, gravas sin matriz 10 Areniscas cuarcíticas, conglomerados calcáreos, limolitas, lutitas 11 Bloques, cantos en matriz arenosa y limosa 12 Brechas calcáreas, calizas bindstone microbiales, calizas grainstone-packstone oolíticas, bioclásticas, calizas wackestone y bafflestone (fc de talud y plataforma) 13 Calizas bioclásticas grises oscuras, negras, margas, brechas calcáreas y calcilitas 18 Calizas negras finamente laminadas, lépidas 19 Cantos, bloques, arenas 20 Conglomerados calcáreos, areniscas, limolitas, lutitas 22 Espiculitas, calizas mudstone finamente laminadas, calizas grainstone-packstone, calizas rudstone (facies de base de talud y cuenca) 25 Lutitas oscuras, calcilitas, calizas grainstone-packstone (calcliturbiditas), brechas calcáreas 26 Lutitas, espiculitas, calizas mudstone finamente laminadas, Calizas grainstone-packstone, calizas rudstone (facies de talud y cuenca) 27 Masa de agua 5000 Melange, megabrechas calcáreas, orto, parabrechas calcáreas | <ul style="list-style-type: none"> — Cabalgamiento conocido — Contacto concordante — Contacto concordante supuesto — Contacto discordante — Falla — Falla con indicación de hundimiento — Falla con indicación de hundimiento sup. — Falla normal invertida — Falla normal invertida supuesta — Falla supuesta |
|---|--|

Figura 19. Izquierda. Mapa Geológico escala 1:25.000 del Gobierno de Cantabria. Derecha. Mapa geológico de principales lineamientos estructurales, generado en base a la clasificación creada para el experimento 2, que corresponde a los principales lineamientos de macizo.

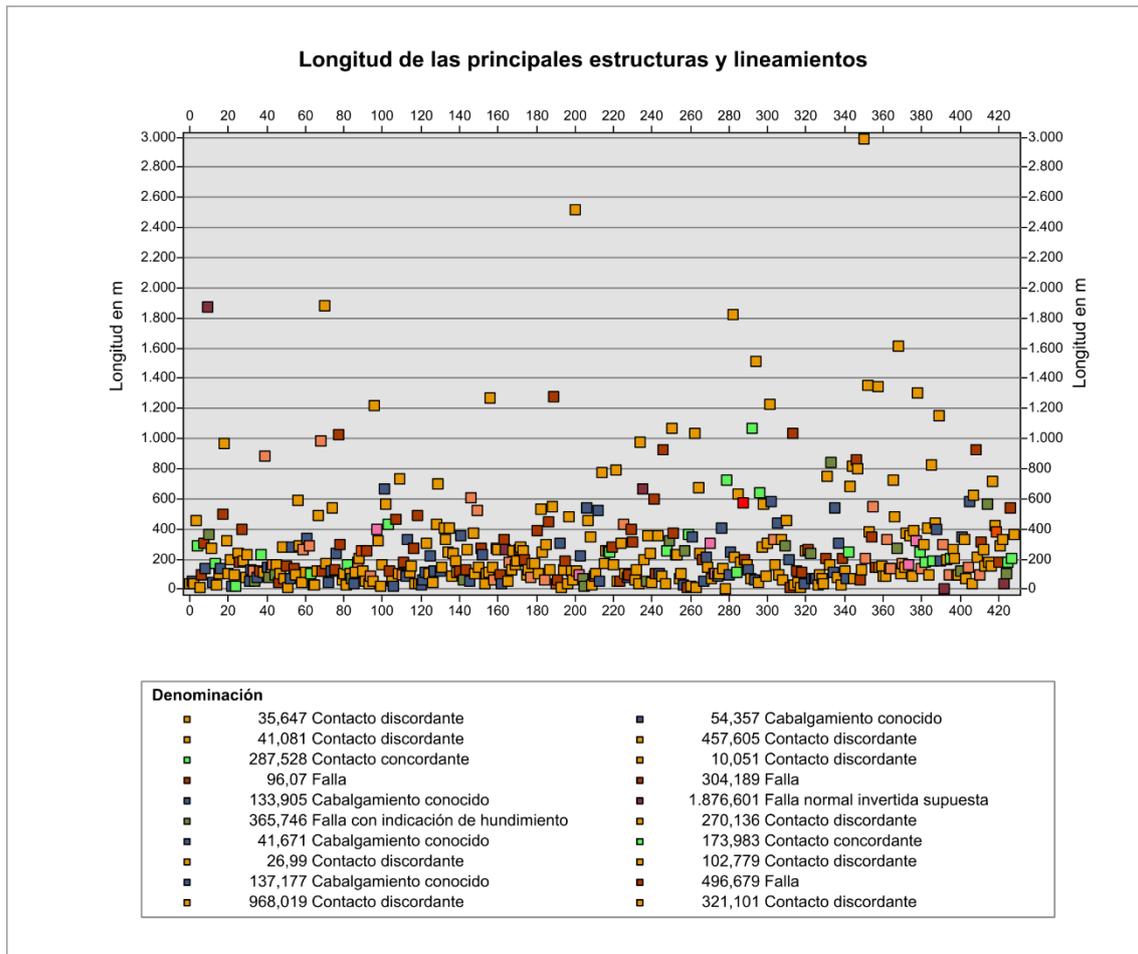


Figura 20. Gráfico con el número de elementos estructurales en el eje de abscisas, y su longitud en el eje de ordenadas. Se aprecia la abundancia contacto freta a las lineaciones correspondientes a fracturas (fallas, cabalgamientos).

7.3 Construcción de un modelo simplificado de formas de la superficie terrestre a partir de la información geológica existente que permita su utilización en la evaluación de las principales geo formas de deposición-erosión y que sea empleado como elemento diana.

Se han construido los mapas de referencia para las geo-formas, en base al mapa geomorfológico a escala 1:25.000, del Gobierno de Cantabria. Este mapa presenta serias dificultades para ser usado como mapa de formas pues básicamente es un mapa de recubrimiento superficial. Es decir, un mapa de litologías de superficie. Las unidades del relieve han sido reclasificadas en dos elementos: roca consolidada (formación de calizas y rocas detríticas), depósitos superficiales procedentes de la alteración de la roca consolidada. Para ello, se ha utilizado como criterio las unidades litológicas, de sustrato y de formas de alteración incluidas en la leyenda de la unidad descrita en la Figura 21. El modelo de referencia para las geo-formas muestra una abundancia de roca consolidada, principalmente roca caliza. Los depósitos superficiales y de alteración procedentes de los diferentes procesos geomorfológicos, ocupan una extensión menor, principalmente distribuyéndose por zonas bajas, llanuras y fondos de depresiones.

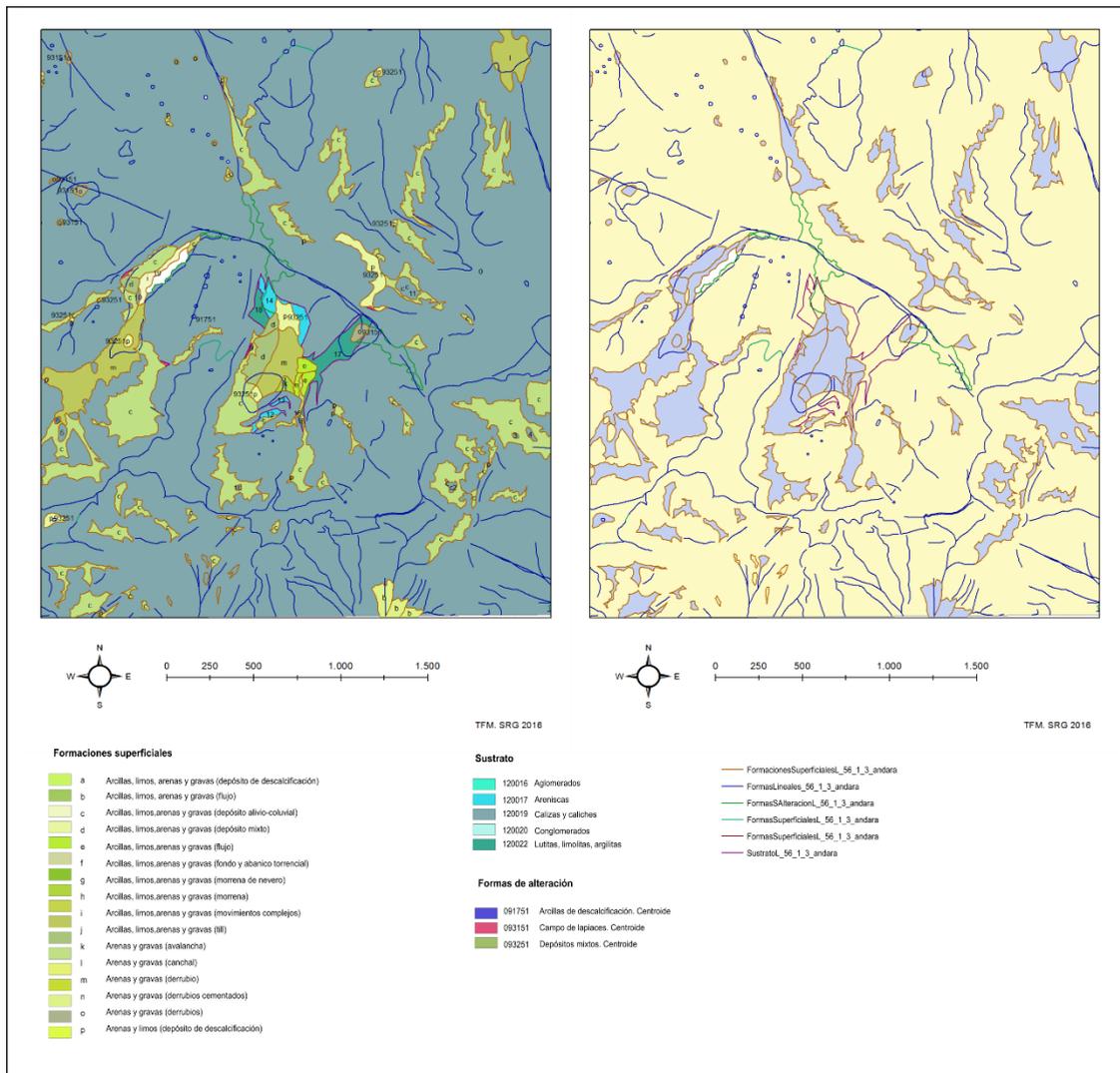


Figura 21. Mapa geomorfológico del área de estudio (arriba derecha), y mapa geomorfológico simplificado (arriba izquierda). En la parte inferior leyenda de los materiales líticos, mapa geomorfológico general (arriba izquierda). El mapa simplificado, cuenta con dos unidades, En gris, depósitos de alteración y formas superficiales, y en amarillo, rocas consolidadas.

7.4 Obtener por técnicas de tratamiento de imagen un mapa de unidades litológicas del territorio.

En un análisis preliminar de la reflectancia producida por las tres unidades descritas se observa variaciones en la respuesta espectral. La mayoría de los afloramientos de roca caliza están totalmente desprovistos de cubierta vegetal, por lo que las firmas de estos materiales dan niveles digitales altos, especialmente en la banda 5 (SWIR) del infrarrojo cercano para el satélite Landsat 7 ETM+, y banda 4 (SWIR), como se aprecia en la Figura 22. La Figura 23 muestra el espectro para el satélite SPOT - 5. Habitualmente, el uso de los canales espectrales correspondientes al azul e infrarrojos medio permite destacar los suelos calizos, debido a la baja humedad de estas litologías y la inexistencia de corrientes de aguas superficiales. Este hecho se hace patente en las firmas obtenidas. Los materiales carbonatados ofrecen colores claros, con bastante reflectancia en las imágenes. Son materiales que aparecen dentro de espectro visible,

con claridad. Por otro lado, la formación litológica compuesta por rocas detríticas ofrece una respuesta espectral más reducida en todas las bandas. Esto se debe al tono oscuro del material geológico, a la influencia del relieve topográfico y a su orientación. El valor más alto del nivel digital que se observa en la banda 6 (TIR) del térmico para el satélite Landsat 7 ETM+ respecto al satélite SPOT, es probablemente debido a su peor resolución espectral.

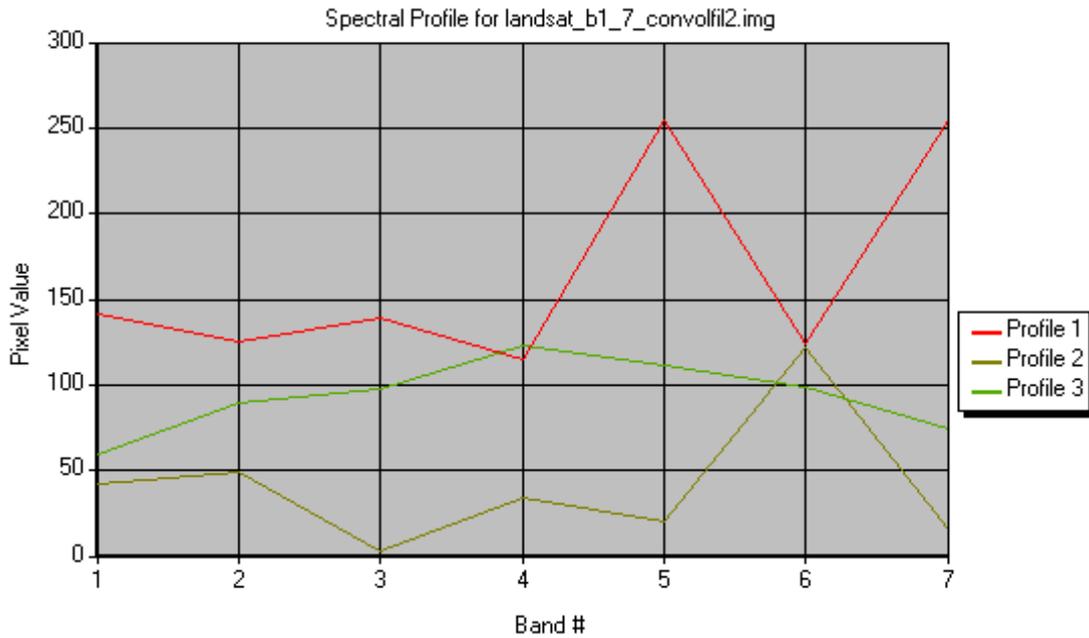


Figura 22. Firma espectral de materiales para imagen Landsat 7 ETM+. Profile 1 corresponde a materiales carbonatados; Profile 2 corresponde a materiales detríticos; Profile 3 corresponde a depósitos superficiales

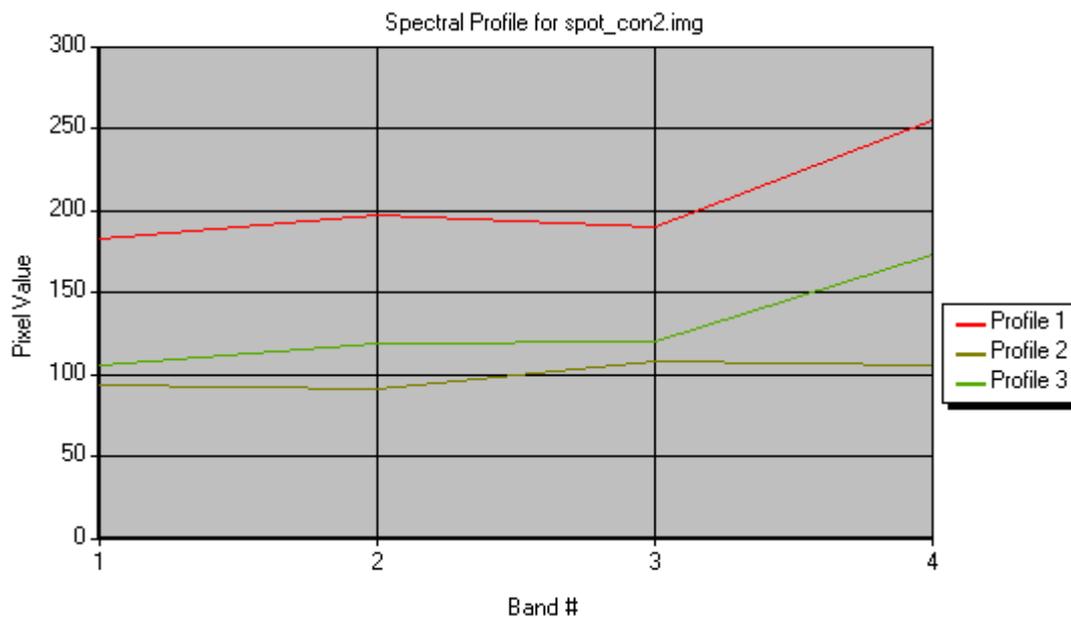


Figura 23. Firma espectral de materiales para imagen SPOT 5.. Profile 1 corresponde a materiales carbonatados, Profile 2 materiales detríticos y Profile 3 a depósitos superficiales

Tal y como se describe en la metodología, los filtros de convolución aplicados, han optimizado las imágenes de satélite para el ulterior tratamiento espectral. Se aprecia una mejora considerable en su contraste, acentuando diferencias entre las unidades presentes en el relieve.

El primer producto derivado de esta transformación, ha sido el análisis espectral por el método de Tasseled Cap. Las imágenes que se han obtenido, en tres canales (rojo, verde, azul), corresponden a la componente brillo, la componente verdor, y la componente humedad del terreno. Observando la transformación realizada sobre la imagen Landsat 7 ETM+ (Figura 24, izquierda), se aprecia, en primer término, su baja resolución espacial, debido a que el tamaño de pixel que ofrece Landsat es de 30 m x 30 m. De todos modos, se ha realizado una comparación visual con la ortofoto PNOA, y se aprecia cierta relación con los elementos físicos analizados como la vegetación, y las zonas con agua, aunque esta interpretación ofrece un resultado grosero en el resto. La imagen tratada que proviene del satélite SPOT 5 (Figura 24, derecha), ha generado un mapa de alta resolución espacial. En un primer análisis visual, se aprecian claramente las diferencias entre las zonas con vegetación, las zonas con alta humedad, y las zonas con mucha reflectancia y brillo espectral, correspondientes a las rocas calizas. La comparación de ambos modelos con la imagen diana (target) del plano geológico (Figura 25), permite identificar muchas semejanzas. Se identifican bien las zonas de roca desprovista de cubierta vegetal y sin humedad, así como las zonas con vegetación y acumulación de agua en el terreno, aunque la transición entre estos dos elementos, no queda del todo definida. No es posible observar las diferencias litológicas más acentuadas entre las rocas detríticas y las carbonatadas. Por otro lado, quedan bien definidas, las zonas con depósitos superficiales, debido a su mayor contenido en agua y vegetación.

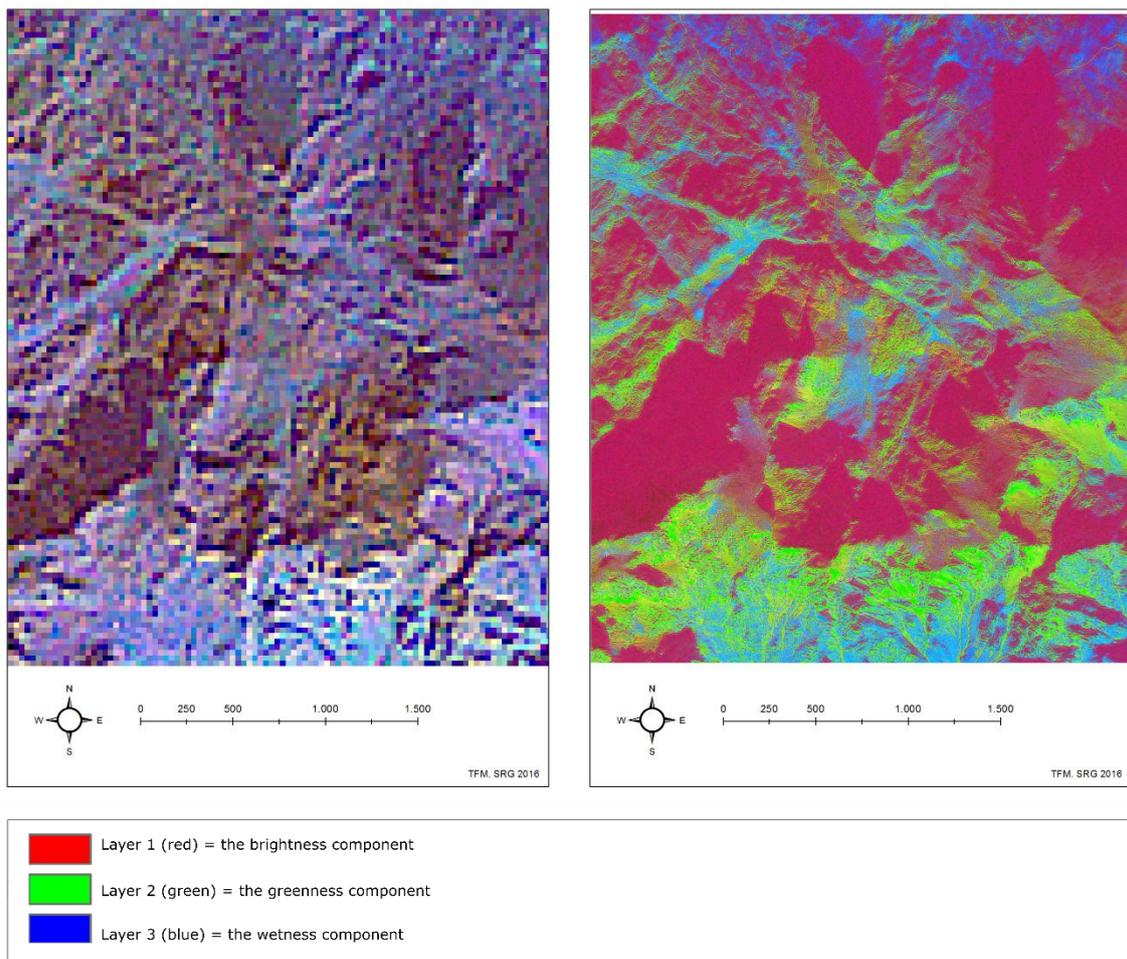


Figura 24. Procesado Tasseled Cap sobre IMAGENS Landsat 7 ETM+ (izquierda) y sobre imagen SPOT 5 (derecha). El canal rojo muestra la componente brillo, el canal verde muestra la componente verdor. La componente azul corresponde a la humedad, con lo que es un buen indicador de las zonas que acumulan agua.

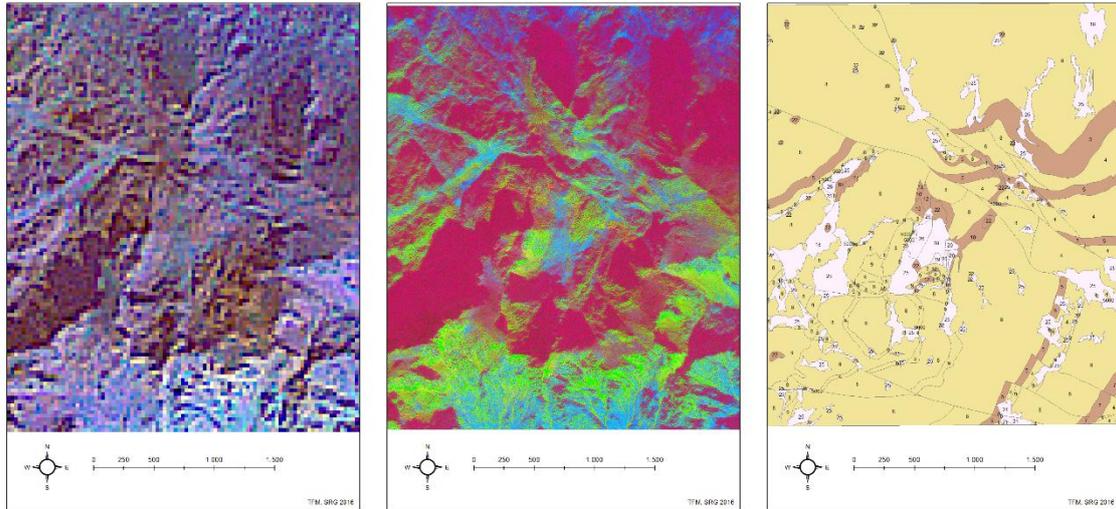


Figura 25. Comparación de los resultados obtenidos mediante el análisis espectral Tasseled Cap, para las dos resoluciones espaciales del trabajo (Landsat 7 ETM + y SPOT 5), con la imagen diana (target) del plano geológico de litologías predominantes (derecha).

El segundo producto derivado de la transformación espectral de las imágenes, ha sido el análisis por el método de índice NDVI. Las imágenes que se han obtenido, disponen de una banda con los niveles digitales correspondientes a los índices de vegetación existentes en el macizo. Cada imagen se ha clasificado en 5 niveles (Figura 26), que corresponden a los índices NDVI verde (índice muy alto) y rojo (índices muy bajos), los amarillos son valores intermedios. En el modelo obtenido de la imagen Landsat 7 ETM+ (Figura 26, izquierda), se aprecia la baja resolución espacial ya descrita en el anterior caso. Realizando una comparación visual con la ortofoto PNOA, la distribución alta de píxeles verde, guardan relación con las zonas donde abunda la vegetación en el macizo. En las zonas donde los índices son bajos, (vegetación inexistente) se observa algo similar. Los píxeles con color rojo, indican zonas sin apenas vegetación. Por otra parte, la imagen tratada que proviene del satélite SPOT 5 (Figura 26, derecha), ha creado un mapa de alta resolución espacial. Tras el primer análisis visual, se aprecia una mejor delimitación de las zonas con vegetación. La transición existente entre las zonas verdes y amarillas, es un buen indicador de pérdida de humedad del suelo, y por consiguiente de vegetación.

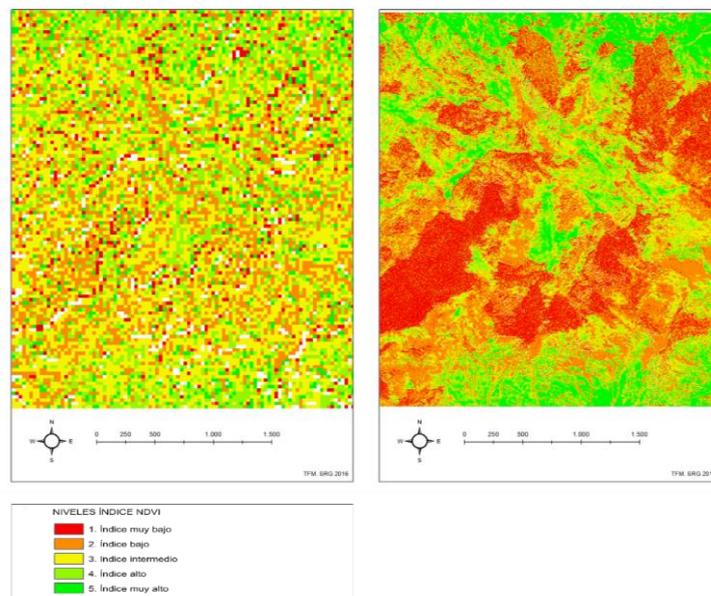


Figura 26. Procesado con índices NDVI sobre imagen LANDSAT 7 ETM (izquierda)+, y SPOT 5 (derecha).

Al igual que en los casos anteriores, la comparación de los resultados de esta imagen con la imagen diana (target) del plano geológico (Figura 27), ofrece un resultado similar al obtenido con el ensayo Tasseled Cap. Se puede constatar que este método describe bien las zonas de roca desprovista de cubierta vegetal y sin humedad, de las que poseen vegetación y acumulación de agua en el terreno.

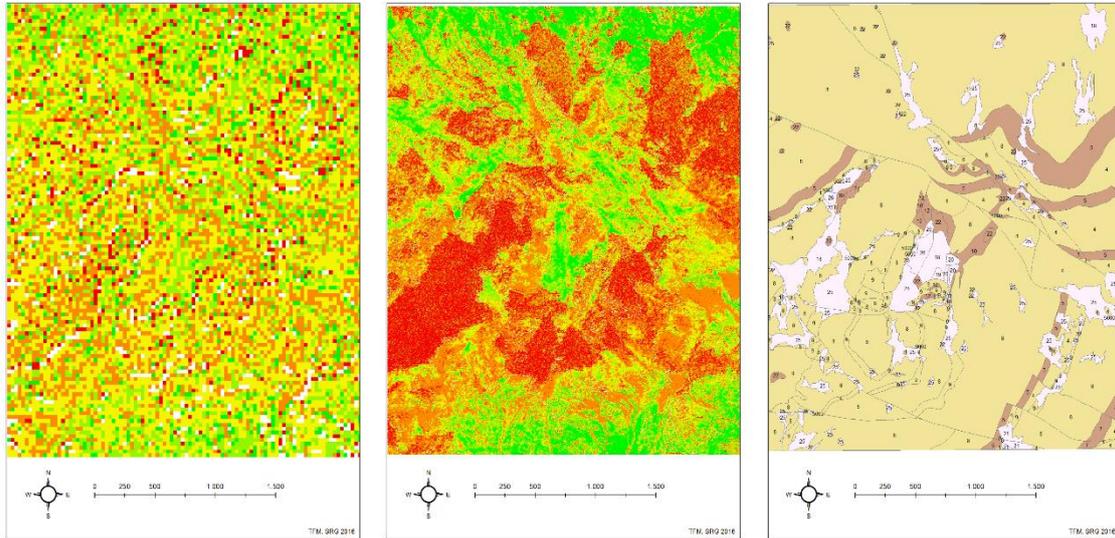


Figura 27. Comparación de los resultados obtenidos mediante el análisis de índices NDVI, para las dos resoluciones espaciales del trabajo (Landsat 7 ETM + y SPOT 5), con la imagen diana (target) del plano geológico de litologías predominantes (derecha).

El tercer producto derivado de la transformación espectral de las imágenes, ha sido el análisis por el método de índice MC (Mineral Composite). Las imágenes que se han obtenido, disponen de una banda con los diferentes niveles digitales, de los índices de composición mineral existentes en el macizo. Se ha clasificado cada imagen en 5 niveles (Figura 28) en la que los extremos indican en azul los índices altos y en rojo los índices bajos. De esta forma se obtiene una clasificación entre las zonas con acumulación de diferentes óxidos, compuestos minerales, etc., y las que no los poseen. Este índice es difícil de interpretar, pero se aprecian ciertas diferencias interesantes. El análisis sobre la imagen Landsat 7 ETM+ (Figura 28, izquierda), muestra su baja resolución espacial. En este caso es difícil apreciar correlación, ya que no es posible realizar una interpretación acertada de forma visual con los referentes del PNOA, como en las imágenes anteriores. La imagen tratada que proviene del satélite SPOT 5 (Figura 28, derecha), ha creado un mapa de alta resolución espacial, más interpretable. Tras un primer análisis visual, se aprecian las zonas en las que el índice indica existencia de compuestos minerales. El color azul aparece distribuido a lo largo de bandas, que coinciden con las escombreras minerales. Los lugares, en los que los experimentos anteriores, muestran zonas susceptibles a la presencia de vegetación están en amarillo. En las zonas con niveles altos de compuesto mineral, distribuidas a lo largo de área de estudio, aparecen mineralización de sulfuros metálicos, principalmente meteorizados en minerales secundarios, que se acumulan en zonas de depósitos superficiales de ladera, y en las fracturas y diaclasas del karts. Se debe recordar que el área de estudio ha sido una zona de extracción de mineral durante el pasado siglo, por lo que existen numerosos depósitos superficiales de origen antrópico repartidos por todo el macizo. Estos depósitos contienen escombros de las extracciones mineras existentes en aquella época, que lógicamente poseen un alto contenido en compuestos minerales metálicos

en las escombreras de ganga. De esta forma se explica la distribución desordenada, de las zonas con mayor índice MC.

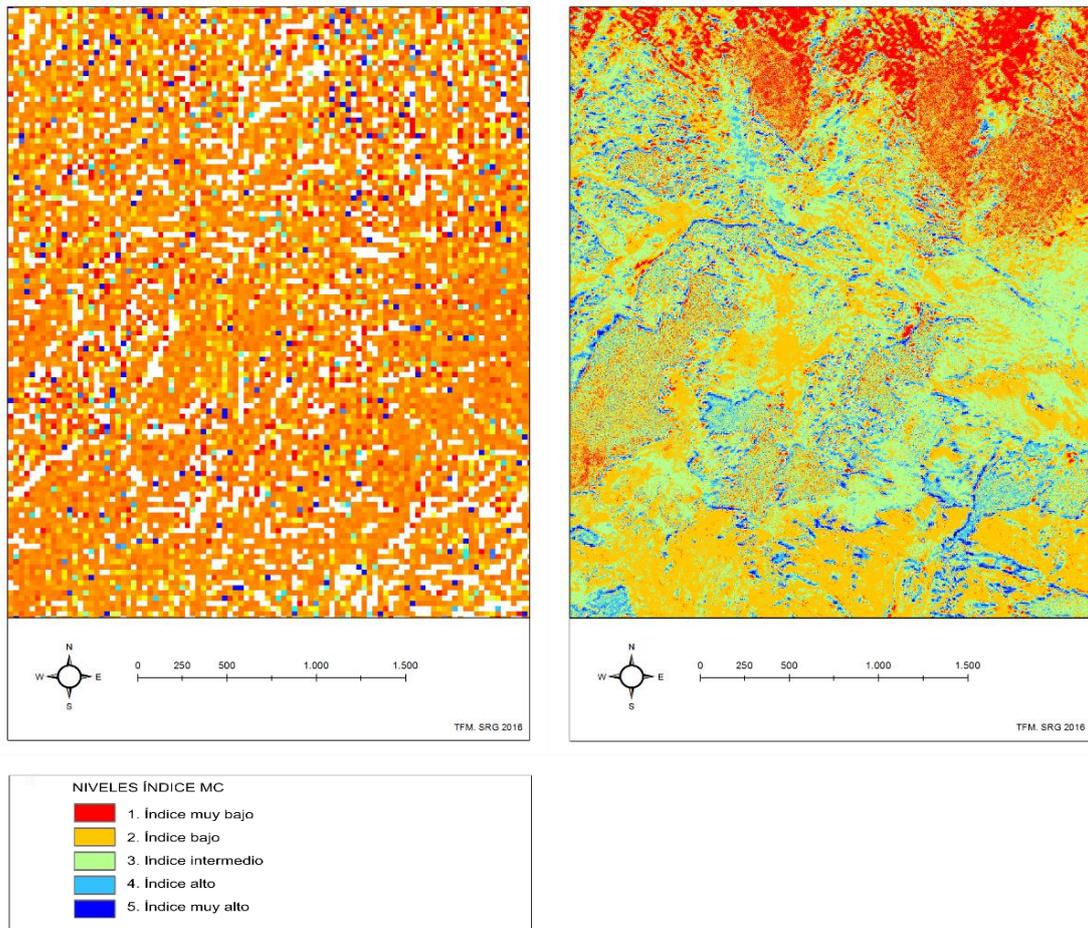


Figura 28. Procesado con índices MC sobre imagen LANDSAT 7 ETM (izquierda)+, y SPOT 5 (derecha). En color rojo y anaranjado aparecen las zonas con respuestas bajas al índice de composición mineral. Las zonas azuladas corresponden a los índices más altos.

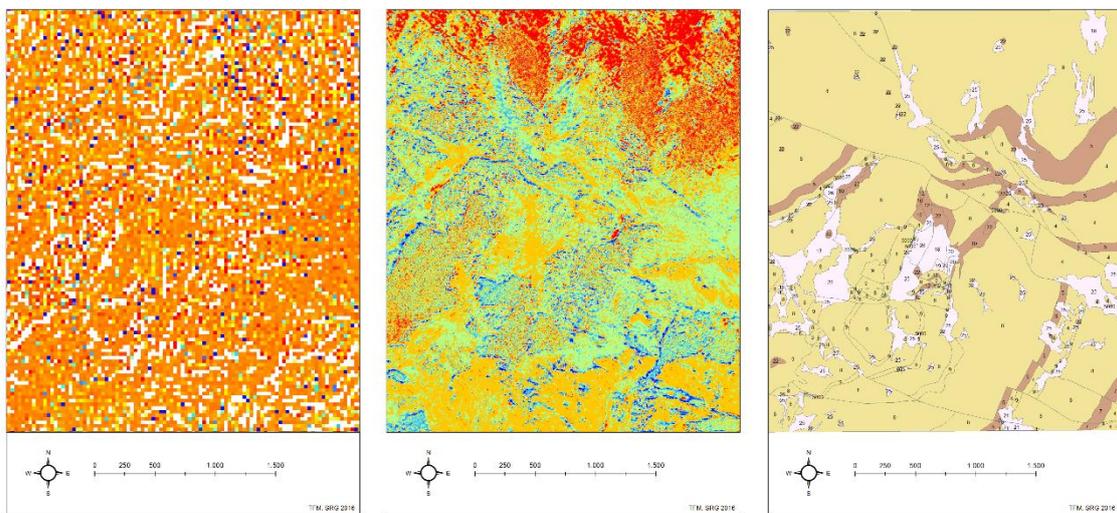


Figura 29. Comparación de los resultados obtenidos mediante el análisis de índice MC, (para las dos resoluciones espaciales del trabajo, Landsat 7 ETM + y SPOT 5), con la imagen diana (target) del plano geológico de litologías predominantes

7.5 Obtener por técnicas de tratamiento de imagen un mapa de lineaciones geológicas de tipo estructural.

En un análisis preliminar, la aplicación de los filtros de convolución direccionales, sobre las dos imágenes de trabajo (satélite Landsat 7 ETM +, e imagen satélite SPOT 5) ofrece una buena idea de las principales fracturas estructurales existentes en el área de estudio. Acorde a lo descrito en la metodología, se ha aplicado un análisis de componentes principales, para obtener las direcciones predominantes. Este análisis permite una interpretación de los datos y un análisis numérico de los mismos. La aplicación del ACP, ha devuelto dos imágenes de 8 bandas cada una, ordenadas de mayor a menor importancia de la componente principal, atendiendo a la varianza muestra explicada. Las lineaciones con las componentes que mejor explican las lineaciones, ofrecen una primera interpretación de los modelos generados.

Analizando la primera imagen obtenida (Figura 30 superior izquierda) se observa que los rasgos que siguen una dirección predominante correspondiente con los lineamientos dirección S-N, (obtenidos a través del filtro de convolución perpendicular W-E). La segunda componente ofrece lineamientos en la dirección NW-SE (obtenidos a través del filtro NE-SW). La componente tres, es más difusa, pero se intuyen ciertos lineamientos menores en dirección SW-NE.

La Tabla 1, muestra los valores propios (*eigenvalues*) obtenidos para las ocho componentes consideradas en el análisis de la imagen, así como el tanto por ciento de varianza muestral explicada. Se puede afirmar que con las tres primeras componentes, se explica la orientación de los principales lineamientos presentes en la imagen, ya que las varianzas acumulada en cada uno de los casos superan el 76% de la varianza muestral. Por otra parte, se aprecia como la lectura de los valores propios permite una identificación más plausible de la tercera, e incluso cuarta componente (esta última explicaría el 11 %) frente a la utilización de la interpretación visual. De este modo, queda demostrada la eficiencia del análisis tanto visual como numérico, que ofrece un porcentaje alto de acierto.

Tabla 1. Valores propios del análisis ACP para la imagen Landsat ETM 7 +

	<i>PC1</i>	<i>PC2</i>	<i>PC3</i>	<i>PC4</i>	<i>PC5</i>	<i>PC6</i>	<i>PC7</i>	<i>PC8</i>
Eigen	20007,9	15516,4	11760,8	6997,54	3329,09	1840,17	1639,83	1265,33
%	32,156	24,859	18,840	11,270	5,333	2,947	2,627	2.027

En la Figura 30 (inferior izquierda), aparecen representados las fracturas estructurales más significativas que del área de estudio junto con los resultados de la ACP. El análisis visual de la misma ofrece un resultado, con un acierto alto. Es importante comentar, que pueden identificarse lineaciones que no existen en la cartografía continua del Gobierno de Cantabria.

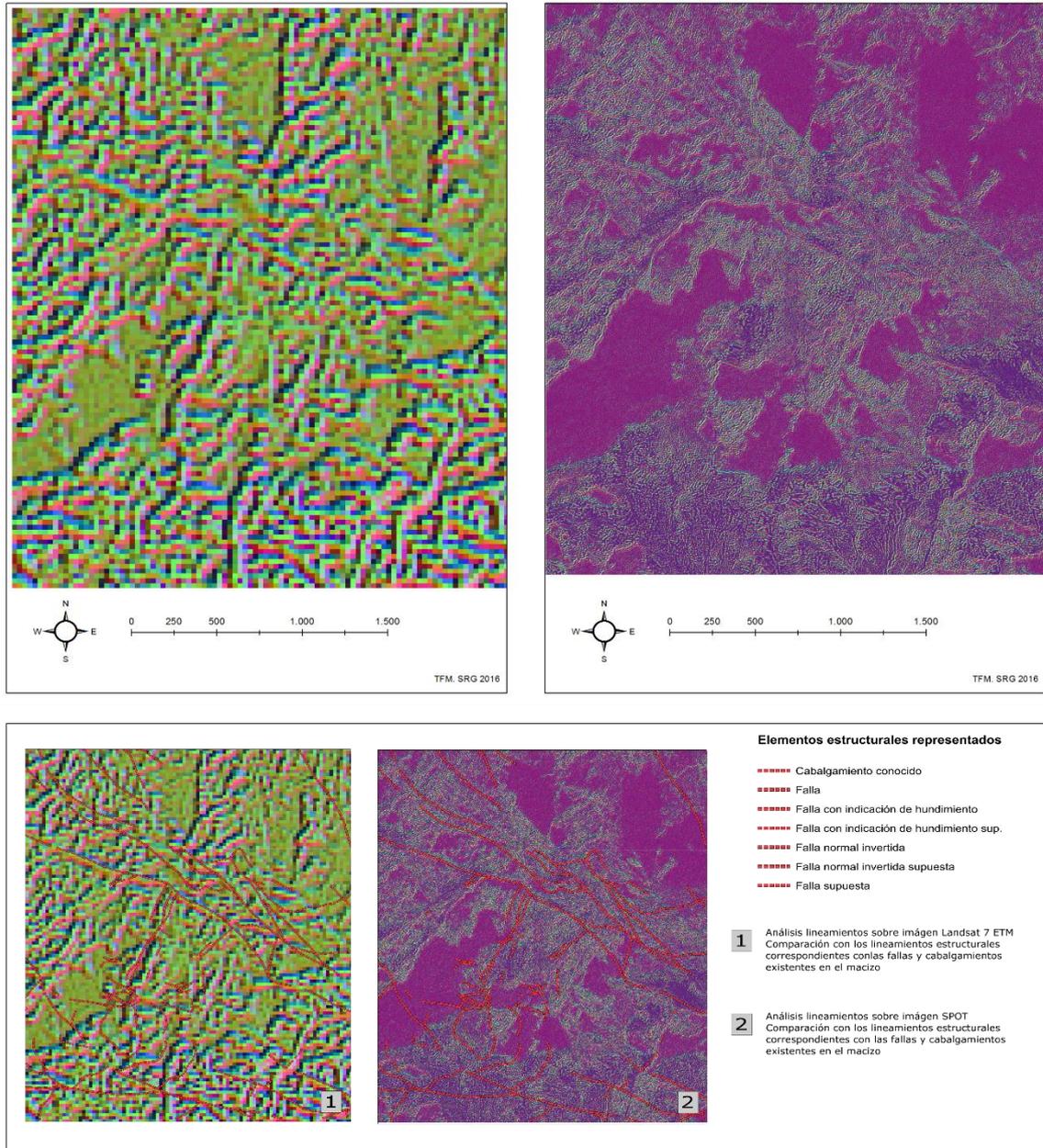


Figura 30 Comparación de las principales lineaciones con las imágenes ráster Landsat 7 ETM+ (izquierda) y SPOT-5 (derecha). En las imágenes se muestran las principales componentes 1, 2 y 3.

Analizando la segunda imagen (Figura 30, superior derecha) se observa que los rasgos que siguen una dirección predominante, se asemejan a los resultados obtenidos con la imagen de media resolución espacial. Predominan lineamientos con una componente N-S principalmente, y una componente NW-SE. Estas orientaciones explicarían un porcentaje alto en el modelo a grandes rasgos. La tercera componente corresponde con lineamientos de dirección SW-NE. La interpretación de la componente tres, es más clara que en modelo anterior. Analizando la imagen de manera detallada, aparecen lineamientos a pequeña escala repartidos por todo el macizo. Esto es debido a que al utilizar una imagen con una resolución espacial mayor de 2,5 m/px, se ofrece la posibilidad de identificar rasgos de mayor detalle, como se observa en la Figura 31, en la que estos rasgos coinciden perfectamente con las direcciones del lapiaz.

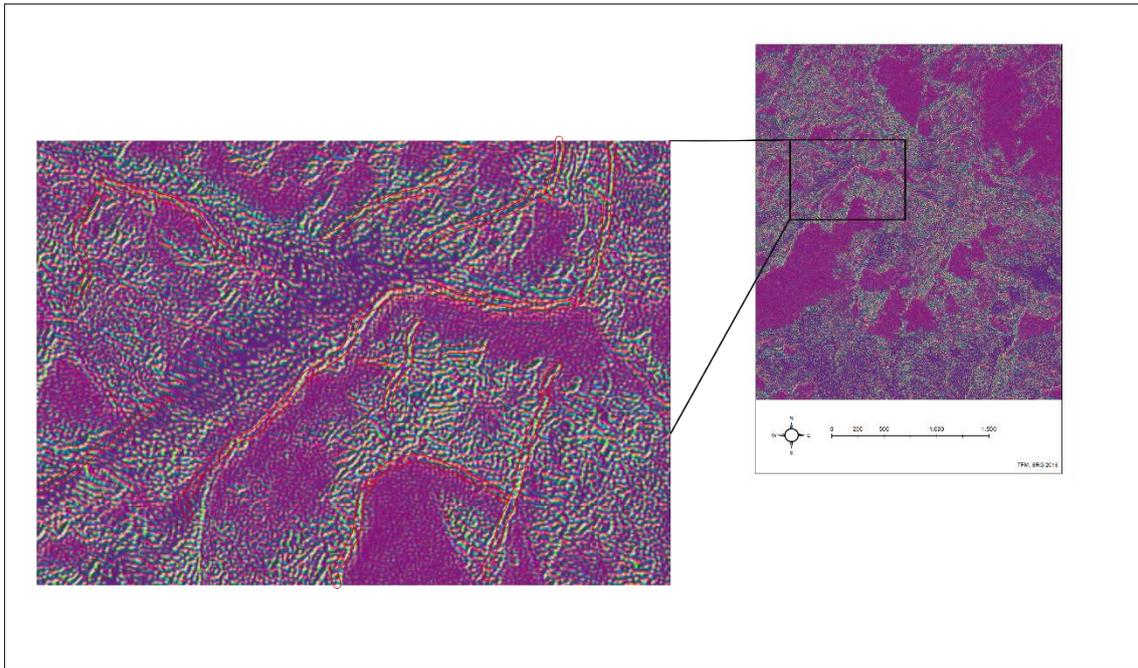


Figura 31. Lineaciones de una zona ampliada del plano obtenido, donde se observan las orientaciones principales de las fracturas existentes en ciertas partes del macizo. En la imagen aparece la depresión glaciolacustre del Lago de Ándara.

En la Tabla 2, se presentan los valores propios (eigenvalues) obtenidos para las ocho componentes consideradas en el análisis de la imagen, así como el tanto por ciento de varianza muestral explicada. Las componentes PC1, PC2 y PC3 explican el 74% de espectro muestral. En este caso la lectura de los valores propios permite una identificación más plausible de la tercera, y cuarta componente (esta última explicaría el 15,6 %)

Tabla 2. Valores propios del análisis ACP para la imagen SPOT 5

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Eigen	17983,30	13559,43	9992,29	8793,64	2694,01	1329,24	1014,81	769,98
%	32,03	24,15	17,79	15,66	4,79	2,36	1,80	1,37

La interpretación que se obtiene de este último resultado, es que realizando tanto el análisis visual, como numérico, ofrecen buenos resultados en la obtención de lineamientos del macizo. Una última prueba realizando una comparación gráfica de los resultados con las principales fracturas procedentes del plano diana, (Figura 30, inferior izquierda), ofrece resultados con un porcentaje de acierto elevado.

7.6 Obtener por técnicas de teledetección-SIG un modelo de geo-formas.

En un primer análisis del MDT, sintetizándolo en los tres modelos que mejor representan el relieve (pendientes, curvatura y orientación), se aprecia la estructura geométrica que existe en el Macizo (Figura 32). En primer lugar, el modelo de pendientes (Figura 32, nº 4), indica claramente las líneas de ruptura de las inclinaciones (escarpes) entre las zonas altas y bajas (niveles digitales cercanos al blanco), así como las zonas geométricas más planas (niveles cercanos al negro). Se observa con claridad las transiciones entre las zonas deprimidas y las zonas más elevadas,

dibujando las concavidades y convexidades existentes en el macizo a gran escala. Analizando, por otro lado, los mapas de curvaturas (Figura 32, nº 5 y nº 6) se puede observar cómo se define con bastante precisión, las diferentes formas relacionadas con cuencas de drenaje, y en el caso de este macizo (zona karstificada) las zonas de disolución. De este modo, se representan en niveles digitales cercanos al negro, las zonas correspondientes a formas cóncavas, con un marcado perfil en forma de "V", y zonas convexas, con un perfil en forma de "V" invertida, correspondiente con zonas escarpadas (Figura 32, nº5). La imagen correspondiente a la curvatura de plano (Figura 32, nº6), representa como se distribuyen las principales planicies, así como la transición entre zonas planas (niveles digitales cercanos al blanco, correspondientes con escarpes). Por último, la imagen que representa las principales orientaciones (Figura 32, nº 3) da una idea de cómo se reparten las principales cuencas de drenaje dentro del macizo.

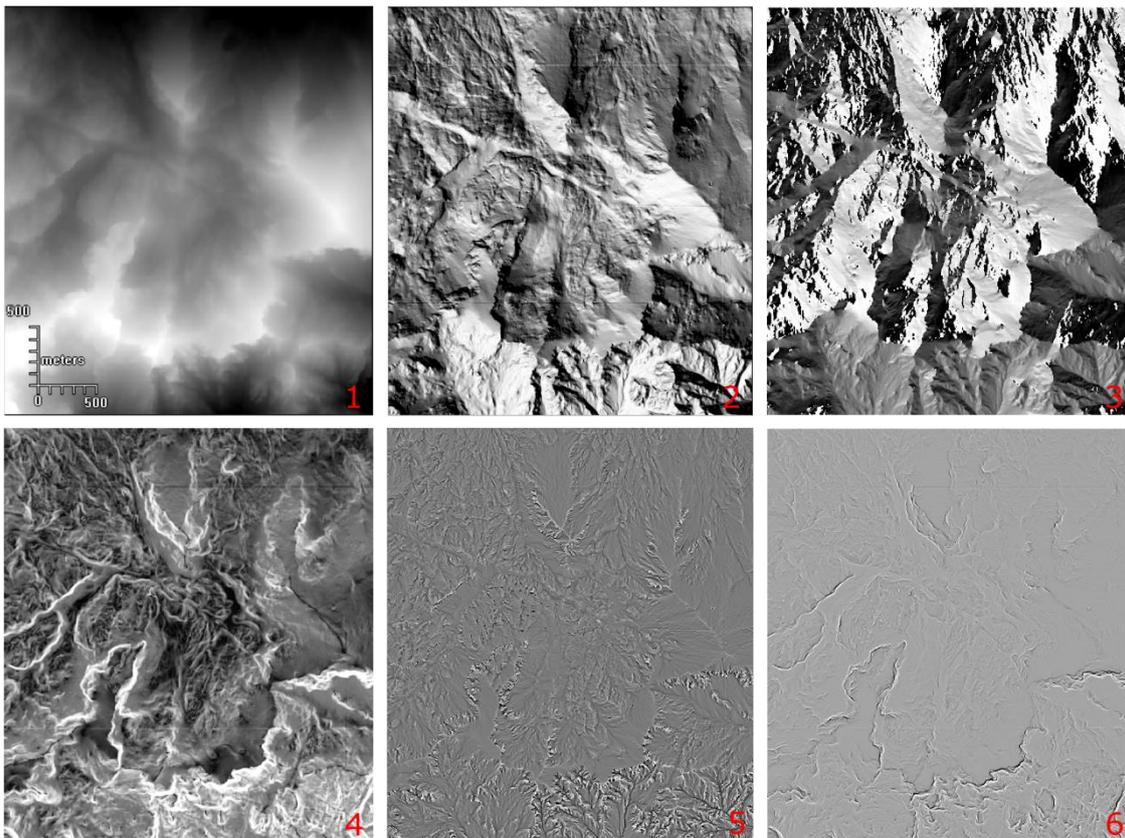


Figura 32. Modelos de análisis morfométrico generados en base a modelo digital de elevaciones (MDE). 1. Imagen ráster obtenida del modelo LIDAR en bruto (N1). 2. Tratamiento de sombras sobre N1 generado para resaltar la morfología del terreno. 3. Mapa de orientaciones del terreno. 4. Mapa de pendientes del terreno. 5. Mapa de curvatura de perfil. 6. Mapa de Curvatura de plano.

Cada mapa derivado del MDE permite describir, en escala de niveles digitales, las formas básicas de la geometría del macizo descritas en el Planteamiento del Problema: zonas planas, zonas convexas, zonas cóncavas y zonas con mucha o poca pendiente. Clasificándolos convenientemente, según los criterios anteriormente descritos, se pueden seleccionar estas formas por la combinación de dichos modelos. Así, por ejemplo, la Figura 33 muestra un primer intento de clasificación fruto de esta combinación. El resultado es un mapa de distribución de formas, muy parecido a las reales, que se puede confirmar mediante el patrón dejado por las curvas de nivel.

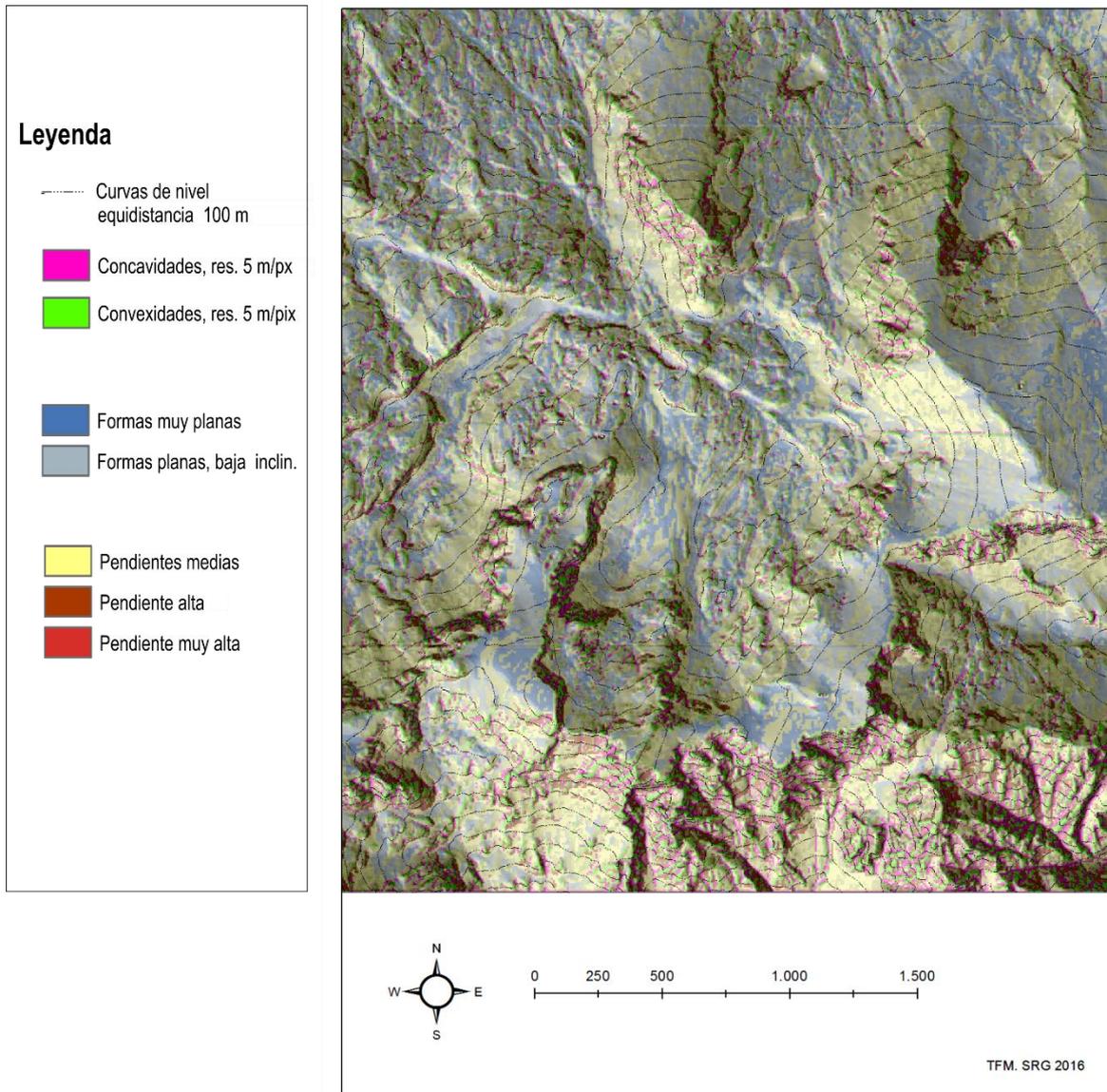


Figura 33. Distribución de las principales formas existentes en la zona de estudio junto con las curvas de nivel que representan la elevación del terreno.

El análisis del mapa resultante en el experimento anterior, da una idea de cómo se distribuyen las principales formas, las transiciones existentes entre estas, y su escala. El primer nivel representativo (Figura 33, color azul, formas muy planas), corresponde a los valores bajos de pendiente, bajos de rugosidad y formas ligeramente cóncavas, en una escala amplia. Interpretando las correlaciones existentes con la morfología del macizo, éste agrupa zonas de vega, fondos de valles abiertos y las zonas más bajas de las laderas, que están cubiertas frecuentemente por formaciones clásticas relativamente estables. Las zonas planas representadas en las zonas más elevadas del macizo, se pueden correlacionar con diferentes procesos glaciares. El siguiente nivel de transición (Figura 33, zonas planas, baja inclinación) se puede considerar como una transición al nivel previamente descrito. Éste se distribuye por las laderas con pendientes bajas-medias. La situación de este nivel y el siguiente (Figura 33, color amarillo, pendientes medias) determina una zona de convexidad (Figura 33, color azul, zonas planas, baja inclinación). Las transiciones entre estos tres niveles descritos, generan líneas con formas generalmente suaves. Este tipo de morfología que intercala zonas cóncavas y convexas a

macro escala, se puede atribuir a diferentes procesos de erosión y acumulación glacial. También, esta transición entre pendientes bajas, resulta propicia para establecer áreas de acumulación de depósitos superficiales.

El nivel representado por pendientes medias, es el que ocupa gran parte del territorio, representa claramente la transición entre las zonas bajas y las zonas donde se encuentran las roturas de pendiente y resaltes. Se observa una cierta correspondencia con zonas cubiertas por las formaciones clásticas sin matriz (canchales, conos de derrubio), afectadas por los procesos de gravedad (más activos) que en la clase anterior. La clase roja (Figura 33, pendiente alta, y muy alta), tiende a ser vertical, correspondería a zonas muy escarpadas y paredes.

Por último, los niveles representados en color fuxia (Figura 33, concavidades, resolución 5 m/px), y color verde (Figura 33, convexidades, resolución 5 m/px), representan, formas a micro escala, en comparación con las anteriores; ya que estos elementos se obtienen de mapas de mayor resolución espacial (Lidar). Los fondos de valle generados son muy angostos, con un marcado perfil en "V" (fuxia) y las crestas muy escarpadas, con perfil en "V" invertida (verde). Ambos representan con mucha claridad, las zonas con una actividad kárstica muy acusada, pudiendo observarse mediante los mismos las fracturas de disolución, pozos y simas existentes. En el fondo de estas fracturas o depresiones aparecen los colores fuxia. Por otro lado, son también representativas las zonas con una convexidad acusada, representando, las crestas, barrancos y redes de drenaje a pequeña escala.

8. VALIDACIÓN

8.1. Validación experimento 1, discusión

Para la validación del experimento 1, con la imagen Landsat 7 ETM +, se ha realizado un análisis de regresión múltiple como se ha detallado en la metodología. En la Tabla 3, se muestran los resultados del ajuste, así como el valor de R^2 , y la probabilidad $P(f)$. El valor de R^2 (coeficiente de determinación) indica la bondad del ajuste que se ha conseguido con el modelo lineal, expresado en tanto por ciento ($R^2 (\%) = R^2 * 100$), por lo que si este valor tiende índices elevados, equivale a una correlación alta entre los modelos generados en el experimento y la imagen diana. Dicho de otro modo, una proporción alta de las variaciones explicadas por el modelo de regresión equivale a un valor alto de R^2 .

Tabla 3. Datos validación experimento 1, imagen Landsat 7 ETM+

	<i>Tasseled</i>	<i>MC</i>	<i>NDVI</i>	<i>Combinado</i>
$R^2 (\%)$	19,5 %	1 %	3 %	22 %
$P(f)$	0,1	0.01	0.04	0.00

Los datos obtenidos del ensayo de regresión lineal, indican que los modelos creados con los métodos de ajustes radiométricos de media resolución espacial (Landsat 7 ETM+), son capaces de determinar las litologías en un 22 % de los casos. Se trata de una correlación lineal baja. No obstante, el bajo valor de las probabilidades obtenidas indica también que existe una correlación lineal significativa. El ensayo que mejor se comporta es el de Tasseled Cap. Por el contrario, el ensayo que peores resultados ofrece es el Mineral Composite. Esta misma impresión se extrae comparando las probabilidades obtenidas para el conjunto combinado de los índices,

Para la validación del experimento 1, con la imagen SPOT 5, los análisis de regresión múltiple indican que los modelos creados son capaces de determinar las litologías en un 8 % de los casos (Tabla 4). Nuevamente, todos muestran una correlación lineal muy baja.

Tabla 4. Datos validación experimento 1, imagen Landsat SPOT 5

	<i>Tasseled</i>	<i>MC</i>	<i>NDVI</i>	<i>Combinado</i>
$R^2 (\%)$	1 %	1,5 %	3 %	8 %
$P(f)$	0,1	0.2	0.51	0.62

Ninguno de los ensayos ofrece buenos resultados en su comparación con la imagen diana. Las probabilidades para el conjunto combinado de los datos, muestran un valor elevado, en el caso combinado de hasta el 0.62. Esto quiere decir que hay alta probabilidad de que no exista ninguna correlación. El valor de probabilidad que ofrece el ensayo de Tasseled Cap (0.1), indica una probabilidad alta de que exista una correlación lineal significativa entre los datos.

En resumen, se puede resaltar que la interpretación de los resultados obtenidos en el ensayo mediante imágenes Landsat, con baja resolución espacial, ofrece relaciones apreciables

entre el producto obtenido y el elemento diana. Por otro lado, los productos obtenidos por los tratamientos en imágenes de alta definición (SPOT 5), no ofrecen buenos resultados. Esta circunstancia puede ser debida a que los tratamientos de las imágenes, son capaces de ofrecer más información sobre las características del terreno (mayor definición espacial de los resultados), que la contenida en la imagen diana correspondiente el mapa geológico a escala 1:25.000.

8.2. Validación experimento 2, discusión

Para este experimento (correlación entre los principales lineamientos y filtros direccionales), como se ha mencionado la comparación visual arroja resultados bastante concluyentes. Se puede concluir que los modelos son capaces de interpretar los principales lineamientos existentes de forma automática. Los resultados obtenidos muestran valores que oscilan entre el 64 % para el caso de la imagen de media resolución espacial, y el 41 % para la imagen de alta resolución espacial (Tabla 5). La imagen que ofrece mayor exactitud es la de menor resolución espacial.

Tabla 5. Datos validación experimento 2, para imagen Landsat e imagen SPOT 5

	<i>Imagen Landsat</i>	<i>Imagen SPOT 5</i>
R^2 (%)	62 %	41 %
$P(f)$	0,1	0,02

La interpretación que se obtiene analizando los resultados para la imagen Landsat, es que esta metodología es capaz de predecir con una sensibilidad media/alta los diferentes lineamientos geológicos. El valor de exactitud obtenido para la imagen (SPOT 5), ofrece una sensibilidad más reducida, al igual que el caso del experimento 1. Esta diferencia se cree que es debida a la resolución espacial de la imagen. Nuevamente, el producto obtenido, y el modelo geológico a escala 1:25 000 que existe de la zona difieren. La capacidad de la imagen SPOT de extraer lineamientos es mayor que la información contenida en el mapa geológico a escala 1:25000 del Gobierno de Cantabria.

8.3. Validación experimento 3, discusión

Para el último experimento se ha utilizado una imagen ráster, que contiene las principales unidades de los modelos digitales del terreno y la imagen diana del plano geomorfológico a escala 1:25000. Los resultados obtenidos, indican, que para la resolución de la imagen diana, son capaces de determinar las principales formas según queda reflejado en la Tabla 6. Las probabilidades, por otro lado, ofrecen valores cercanos a 0, con lo que se entiende que existe una correlación lineal significativa entre las variables y el modelo (diana).

Tabla 6. Datos validación experimento 3, para los modelos digitales del terreno.

	<i>Rugosidad</i>	<i>Inclinación</i>	<i>Orienta.</i>	<i>Curvatura</i>	<i>MDE</i>	<i>Combinado</i>
<i>R² (%)</i>	1 %	14 %	1 %	12 %	8 %	27 %
<i>P(f)</i>	0,10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Este experimento se interpreta de una manera similar a los resultados obtenidos para los casos anteriores en los que se ha utilizado la imagen SPOT 5. Los MDT utilizados para este análisis, tienen más resolución, que la que aporta el plano geomorfológico a escala 1: 25.000, del Gobierno de Cantabria.

9. CONCLUSIONES

La metodología aplicada en los diferentes experimentos ha permitido realizar una comparación entre los resultados obtenidos con las imágenes de satélite de diferente resolución espacial, y los planos diana obtenidos del repositorio de información geológica del Gobierno de Cantabria. Los análisis comparativos entre las tres resoluciones espaciales utilizadas demuestran que, las diferencias en el valor de exactitud obtenido, son muy altas. Se corrobora, que para grandes extensiones de territorio, las imágenes procedentes de los satélites Landsat ofrecen los mejores resultados. Las imágenes SPOT 5 y LIDAR son adecuadas para realizar estudios de carácter geológico en áreas similares a la propuesta en este trabajo.

Los resultados obtenidos con la imagen Landsat, en el experimento 1, permiten identificar el 22 % de las superficies representadas en el mapa litológico reclasificado. El ensayo que mejor ha funcionado ha sido el Tasseled Cap. El índice Mineral Composite ha ofrecido una respuesta poco satisfactoria. Por el contrario, el índice de NDVI, aporta mejores correlaciones con la imagen de referencia (diana). Los productos ofrecidos por los tratamientos en imágenes SPOT 5) aparentemente no generan buenos resultados. Esta circunstancia puede ser debida a que los tratamientos de las imágenes, son capaces de brindar más información sobre las características del terreno, que la contenida en la imagen diana. Aunque esta técnica es capaz de clasificar el territorio, en función de sus condiciones físicas (humedad, vegetación, reflectancia), no es un buen método para predecir las principales litologías del área de estudio.

En el segundo experimento, los resultados ofrecidos por la imagen Landsat, indican que puede predecir con un porcentaje alto de acierto los diferentes lineamientos geológicos coincidentes con rasgos estructurales. Por otro lado, la imagen SPOT 5, ofrece una sensibilidad menor.

Por último, la clasificación de formas obtenidas en el tercer experimento mediante tratamiento GIS, ofrece un producto de alta resolución con mucha información obtenida de los MDT. Se observa que las formas asociadas a los cambios de pendiente, se clasifican de forma correcta, aunque el modelo generado no es capaz de discretizar su génesis. El modelo de curvatura es un buen predictor de las formas correspondientes a concavidades y convexidades a escala menor, siendo capaz de distinguir las zonas con un marcado carácter en forma de "V" y en forma de "V" invertida ligadas al paisaje kárstico. También son buenos predictores de la rugosidad general de la superficie, y de las formas existentes en las paredes y planos más verticales.

En conjunto, a grandes rasgos, los resultados obtenidos confirman la hipótesis de partida. Se puede elaborar cartografías automáticas de tipo geológico-geomorfológico del territorio utilizando las técnicas de tratamiento de imagen, siempre y cuando la resolución de la imagen sea adecuada al elemento a cartografiar. Por el momento, esta técnica es complementaria y no sustitutiva de la cartografía geológica tradicional.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Baker, C., Lawrence, R., Montagne, C. & Patten, D. (2006). Mapping wetlands and riparian areas using Landsat ETM+ imagery and decision-tree-based models. *Wetlands*, 26, pp. 465-474.
- Castillo, F. (2013) Técnicas de mejora del terreno: impermeabilización de las filtraciones del lago de Ándara. Trabajo fin de máster. Universidad de Oviedo.
- Chuvieco, E. (2002): Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio. Ed Ariel. Barcelona.
- De Pedraza, J.G.(1996). Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones. Madrid: Rueda. ISBN: 84-7207-087-5.
- Fabregat, V. (1999). Fundamentos teóricos del control de las extracciones mediante teledetección.
- Felicísimo, A.M. (1994). Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en ciencias ambientales pp.118 (<http://www.etsimo.uniovi.es/feli/pdf/libromdt.pdf>)
- Felicísimo, A. M. (1995). Error propagation analysis in slope estimation by means of digital elevation models. 17th International Cartographic Conference Proceedings, 1, pp. 94-98. Barcelona.
- Felicísimo, A.M. (1999). La utilización de los MDT en los estudios del medio físico, pp.16 (http://www.etsimo.uniovi.es/feli/pdf/ITGE_150a.pdf)
- Felicísimo, A.M. (2004). Comparison of statistical methods commonly used in predictive modeling. *Journal of Vegetation Science*. Volume 15, Issue 2. pp. 285–292
- González, J.J., Serrano, E.C. (2010). Geomorfología del Macizo Oriental del Parque Nacional Picos de Europa. Organismo Autónomo Parque Nacionales. ISBN:978-84-8014-775-0
- Gutiérrez, M.C. (2008). Procesos y productos de alteración de formaciones rocosas en Asturias y su repercusión socio-económica. *Boletín Geológico y Minero*, 2008 Abr-Jun; 119
- Hammond, E. H.(1965) What is a landform? Some further comments. *The Professional Geographer*, T. 17, pp. 12–13.
- Julivert, M (1971) Decollement tectonics in the Hercynian Cordillera of North West Spain. *American Journal of Science*, vol.270, pp. 1-29.

- Lobeck, AK (1939). Geomorphology, an introduction to the study of landscapes.
- Marquínez, J (1989): Mapa geológico de la región del Cuera y los Picos de Europa. Trabajos de Geología, Universidad de Oviedo, 18, pp. 137-144.
- Marquínez, J. y Adrados, L. (2000): La geología y el relieve de los Picos de Europa. *Naturalia Cantabricae* 1, pp. 3-19
- Marquínez, J y Adrados, L (2004): Itinerario geológico por los Picos de Europa. *Geocantabria: Itinerarios geológicos*, pp. 123-147.
- Moreno, J.B.(2010) Clasificación geomorfométrica a partir de datos lidar en un área minera degradada en: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Pp. 930-941. ISBN: 978-84-472-1294-1
- Ninomiya, Y. 2004. Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data. *Proceedings of SPIE SPIE (The International Society for Optical Engineering)*, 5234, 180- 1
- Pérez, M.O. (2011). Aplicaciones de la teledetección y sig en la caracterización de humedales en la reserva de la biosfera de la mancha húmeda. Trabajo fin de máster. Universidad Complutense de Madrid.
- Pérez-Estaún, A. (1998). Thin skinned tectonics in the Ponga region (Cantabrian Zone, NW Spain). *GR Geologische Rundschau*. Volume 77, Issue 2, pp 539–550.
- Rodríguez,V.M.(2013). Identificación y cartografía de lineamientos geológicos mediante técnicas de análisis de imagen. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Cantabria
- Sacristan, F. (2006). La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Revista AquaTIC*, 24, pp. 13-41.
- Shanmugam, P., Yu-Hwan, A. & Shanmugam, S. (2006). A comparison of the classification of wetland characteristics by linear spectral mixture modelling and traditional hard classifiers on multispectral remotely sensed imagery in southern India. *Ecol. Model*, 194, pp. 379-394.
- Villa, E.O.(2010). Guía geológica del Parque Nacional de Los Picos de Europa. Adrados Ediciones. Asturias. ISBN:978-84-8014-786-6

- Weaver, G. D.(1965), What is a landform? .The Professional Geographer, T. 17, pp. 11–13
- Wolf, P. R., Dewitt, B. A.(2000). Elements of photogrammetry with applications in GIS. Boston. EE.UU. McGraw Hil. ISBN:0072924543

11. CONSULTAS WEB

- Departamento de Ingeniería Cartográfica, Universidad de Jaén. 2016. Disponible en: <http://coello.ujaen.es/asignaturas/teledeteccion/lateledeteccion.htm>
- Fundación Wikipedia, Inc. 2016. Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/An%C3%A1lisis_de_componentes_principales
- GeoWebRum. 2016. Disponible en: <http://www.geowebrum.org/Ocontenidos/cursos/percepcion/023.html>
- IGME (Instituto Geológico y Minero de España). 2016. Disponible en: <http://www.igme.es/internet/cartografia/cartografia/magna50.asp?c=s>
- IGN (Instituto Geográfico Nacional). 2016. Disponible en: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/>
- LANDSAT Science. 2016. Disponible en: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- U.S. Department of the Interior. U.S Geological Survey. 2016. Disponible en: <http://earthexplorer.usgs.gov>
- Modelos digitales del terreno, Curso de Introducción. 2016. Disponible en: <http://www6.uniovi.es/~feli/CursoMDT/CursoMDT.html>
- Mapas Cantabria, repositorio del Gobierno de Cantabria. 2016. Disponible en: <http://mapas.cantabria.es/>
- Página personal de Gabriel Ortiz. Teledetección y SIG. 2016. Disponible en: <http://www.gabrielortiz.com/index.asp>
- Hexagon Geospatial, Erdas imagine guide. 2016. Disponible en: <http://community.hexagongeospatial.com/t5/ERDAS-IMAGINE/tkb-p/eTErdasImagine>
- Ayuda ArcGis online. 2016. Disponible: <http://doc.arcgis.com/es/arcgis-online/>

