



2022  
Lleida

27 · 1  
junio · juny  
juliol · juliol

Cataluña  
Catalunya

## 8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a  
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

**Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022**

**ISBN 978-84-941695-6-4**

© Sociedad Española de Ciencias Forestales



Organiza

## Estudio de la evolución del manto nival en diferentes zonas del Pirineo Central a través de imágenes satelitales Sentinel-2

MONTILLA-PRIETO, V.<sup>1</sup>, MATEO-MARÍN, N., MONTILLA-PRIETO, J.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento Forestal. AKIS Research.

<sup>2</sup> Departamento de Geología y Medio Ambiente. E-STRATOS Geosystems.

### Resumen

El actual trabajo se desarrolló a raíz de la necesidad de conocer y analizar la evolución del manto nival en unas zonas concretas del Pirineo Central con importante valor recreativo. Se usaron imágenes satelitales Sentinel-2 como fuente de información principal, para después poder realizar el cálculo del Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDVI), generando una cartografía con la distribución del manto nival. La metodología utilizada se basa en el uso de datos abiertos para generar esta cartografía, contrastándola a través de salidas de campo en diferentes lugares del Pirineo, comprobando así la utilidad de la información generada. A su vez, se presentan los resultados obtenidos, y se plantea como viable la incorporación de esta cartografía en una plataforma web para que sea accesible y utilizada por el público general.

### Palabras clave

Capas, imágenes satelitales, manto nival, metodología, NDSI, nieve, Pirineo, Sentinel-2.

### 1. Introducción

La nieve no es un fenómeno meteorológico como tal, sino que es el resultado de la precipitación de pequeños cristales de hielo. Unos cristales con formas fractales que se unen y forman copos, con una estructura abierta y móvil excepto cuando se comprimen a causa de una presión externa.

Esta nieve tiene una influencia directa sobre los procesos geomorfológicos, sobre la fauna y la flora que adaptan y cambian su fenología para poder sobrevivir a nevadas recurrentes, y sobre un gran número de actividades económicas que se ven influenciadas por la presencia o no de ésta en zonas de montaña. Además, en latitudes y condiciones climáticas como las presentes en la Península Ibérica, la nieve tiene un papel clave en los procesos hidrológicos en cordilleras como el Pirineo, hecho que representa la aportación hídrica más grande a los ríos en los meses de primavera.

El sector del turismo de nieve ha cambiado el Pirineo. Un ejemplo son los valles del río Gállego y Aragón, en la provincia de Huesca, donde la población de los municipios más próximos a las zonas de esquí se incrementó en más de un 60% entre 1970 y 2008, con cerca del 82% de ésta ocupada en el sector servicios (Lasanta, 2010). Sin embargo, este sector y lo que comporta se verá influenciado por el calentamiento global y sus efectos, hecho por el cual las áreas de montaña han estado consideradas como regiones especialmente vulnerables (Pons et al., 2014). Dicha vulnerabilidad queda reflejada en los datos que nos aportan estudios que demuestran que las masas nivales permanentes, los glaciares, están sufriendo un retroceso en el Pirineo; por ejemplo, el glaciar de la Maladeta en los años 1820 y 1830 presentaba una extensión de 152,3 hectáreas, superficie que se redujo hasta las 54,5 hectáreas en el año 2000, disminución próxima al 36% (Chueva et al., 2005). Pero no solo se puede relacionar la nieve con el esquí; estos últimos años, las primaveras con temperaturas más bajas y con nevadas tardías, ha provocado que, en rutas circulares tan turísticas como “Carros de Foc”, en el Parque Nacional de Aigüestores i Estany de Sant Maurici, se

recomendase llevar material técnico como crampones hasta finales del mes de julio debido a la presencia de placas de nieve que en muchas situaciones pueden llegar a ser peligrosas.

Esta serie de factores hace que la oportunidad de conocer la distribución y variación del manto nival, incluso de algunos glaciares del Pirineo, pueda suponer una nueva fuente de información para una tipología de usuarios muy variada.

Ahora bien, la cordillera pirenaica tiene una longitud de más de 400 kilómetros, con desniveles muy importantes y unos inviernos que dificultan el acceso a zonas elevadas cuando éstas se encuentran cubiertas de nieve. Y pese a la importancia comentada anteriormente a escala ecológica y económica, la información continúa proporcionándose a través de la lectura puntual mediante 110 pértigas y 11 telenivómetros repartidos por el sistema pirenaico.

A partir de esta problemática, en los últimos años se han introducido nuevas herramientas relacionadas con la teledetección para obtener esta información, como por ejemplo la tecnología LIDAR para medir los cambios en algunos glaciares (Revuelto et al., 2013) o el uso de imágenes de satélite.

El actual trabajo analiza la distribución del manto nival en diversas zonas del Pirineo y la representa en una cartografía accesible, fácil y abierta, a partir de las imágenes proporcionadas por satélites del programa Copernicus, una iniciativa liderada por la Comisión Europea en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA), para luego ser procesadas a través de software libre y así obtener la evolución espacial y temporal del manto nival en estas zonas.

La discriminación de la cubierta nival se efectúa a través del Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI), desarrollado por Dozier (1989) y continuado por Riggs et al. (1994), utilizando las diferencias entre las dos bandas espectrales, la banda verde y la banda del infrarrojo de onda corta (SWIR) a partir de la expresión:

$$NDSI = \frac{\text{Verde} - \text{SWIR}}{\text{Verde} + \text{SWIR}}$$

resultando una de las metodologías más utilizadas en la determinación del manto nival a través de datos de teledetección que distingue la nieve gracias a la respuesta tan diferente entre ambas bandas, muy reflexiva en el visible y absorbente en el infrarrojo de onda corta (Riihelä et al, 2011), y que clasifica la nieve o hielo como cualquier píxel que presente un valor superior a 0,4 (Hall et al, 2002).

## 2. Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es la elaboración de una cartografía dinámica mediante el tratamiento digital de imágenes adquiridas a través de satélites para poder determinar la distribución del manto nival en determinadas zonas del Pirineo aragonés y catalán. Actualmente son accesibles prácticamente de forma semanal imágenes provenientes de la misión Sentinel-2, con una resolución que puede variar de 10 a 60 metros por píxel según la banda espectral utilizada, hecho que sumado a su tratamiento y procesado promueve una fuente de información en diversos ámbitos, como el agronómico, forestal o medioambiental entre otros.

Así, con el objetivo de proporcionar una fuente de información útil para varios sectores y usuarios, este se ha complementado con una serie de puntos que son:

- Establecer un proceso sencillo a la vez que completo para poder determinar el cálculo del Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI).

- Determinar la posibilidad de introducir nuevos índices o combinaciones de bandas espectrales y mejorar la calidad del resultado final.
- Generar una cartografía de forma recurrente de las zonas estudiadas.
- Comprobar a partir de salidas de campo la validez del índice calculado, cómo se ajusta este a la realidad en cada momento y comprobar su utilidad en determinadas situaciones.
- Combinar la cartografía generada con modelos de pendiente que puedan ser utilizados en situaciones de riesgo.

### 3. Metodología

#### *Región de estudio*

Los Pirineos son una cordillera formada por un conjunto de mantos de corrimientos alpinos que generaron un apilamiento antiformal asimétrico de orientación E-W. Los materiales fueron deformados a lo largo de dos etapas. La primera, la orogenia Herciniana, se produjo a finales del Carbonífero, afectando a los materiales paleozoicos. Posteriormente se dio la orogenia Alpina, desde finales del Cretácico hasta el Mioceno, afectando los materiales presentes. A lo largo del Neógeno y hasta la actualidad, gran parte de los materiales han estado erosionados por dinámicas glaciales y/o fluviales, dando lugar a los relieves que se observan a día de hoy (Muñoz, 1992; Berástegui et al., 1993; Capellà y Carreras, 1996; Teixell, 1996).

La cadena de cimas se alarga a través de 430 kilómetros desde el Atlántico hasta el Mediterráneo y es en el centro de ésta donde encontramos las zonas más elevadas, con los 3.404 metros de la Tuca d'Aneto. Las vertientes a banda y banda son totalmente diferentes, la septentrional cae de forma abrupta, mientras que la meridional lo hace de forma gradual hasta llegar a la depresión del río Ebro. Además, como consecuencia del levantamiento producido por la orogenia Alpina, hacia la cuenca del Ebro afloran importantes acumulaciones de rocas calcáreas, entre otros materiales.

El área de estudio se localiza en la parte central de la cordillera, entre dos provincias, Huesca y Lleida, y dentro de éstas se engloban diferentes comarcas que, ordenadas de oeste a este, son Jacetania, Alto Gállego, Sobrarbe y Ribagorza en Aragón, y siguiendo por la Vall d'Aran, la Alta Ribagorça y el Pallars Sobirà en Catalunya. En la otra banda, también se han incluido una zona de la región francesa de Midi-Pyrénées, en el departamento de Hautes-Pyrénées.

El autor Juan Buyse, a través de su libro “Los tresmiles del Pirineo, un estudio enciclopédico” (1993) recoge 212 cimas de más de tres mil metros en la cordillera, de los cuales 129 son cimas principales, y 83 secundarias repartidas en 11 grandes macizos. El presente trabajo los engloba prácticamente todos a excepción del Massís d'Estats en la zona del Pallars Sobirà, y así, empezando por el extremo más occidental, Balaitus, Vignemale, Monte Perdido, Néouvielle, La Munia, Bachimala, Posets, Perdiguero, Maladeta y Besiberri están representados, y a su vez se añaden las zonas del Cotiella en la Ribagorza, y la Vall Fosca comprendida entre la Alta Ribagorza y el Pallars Sobirà.

El área de estudio se divide en 11 zonas (Figura 1), la más occidental es el Valle de Tena, y la más oriental la Vall Fosca, y entre estas, zonas que recogen el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido, el Macizo de las Maladetas o parte del Parc Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici como ejemplos.

Estas zonas, a diferencia del resto del país, donde las precipitaciones en forma de nieve son poco abundantes o inexistentes a lo largo del año, registran más de 30 días de nieve al año por encima de los 1.500 metros de altura (Instituto Geográfico Nacional y Ministerio de Fomento, 2018).

El volumen de actividades invernales en estas zonas va en aumento, y parajes como todo el entorno del Pico del Anayet, Panticosa o la Sierra de Partacua en el Valle de Tena, tienen un gran número de visitantes en los meses fríos. La zona de Ordesa recibe una gran cantidad de personas, y un ejemplo es el año de su centenario, con más de 600.000 visitas. De igual modo, la zona del Parque Natural de Posets-Maladeta, recibe de forma anual más de 9.000 visitantes, y durante la temporada de invierno, la cabecera del río Ésera se llena de esquiadores y personas que realizan actividades relacionadas directamente con la presencia de la nieve (Gobierno de Aragón, 2017). Siguiendo en dirección este, la Vall Fosca está aún virgen, siendo una de los pocos valles del Pirineo sin estaciones de esquí, y esto provoca que muchos aficionados a los deportes de invierno visiten esta zona.

#### *Procedimiento*

La base del proceso metodológico es la utilización de imágenes Sentinel-2, sobre una base del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:25.000, y también el modelo digital del terreno con un paso de malla de 5 metros que se utilizará para elaborar mapas de pendientes en determinadas zonas.

El procesamiento de las imágenes Sentinel-2 permite obtener el NDSI con una resolución espacial de 20 metros en cada una de las imágenes, para así generar la cartografía con la distribución del manto nival en los diferentes momentos temporales. Una vez generada, se compara con las observaciones realizadas en las salidas de campo.

#### *Obtención de la información*

En este punto se pretende remarcar que la información utilizada en todo momento proviene de fuentes abiertas, y por ese motivo se citan a continuación.

Las imágenes de satélite son la base de este trabajo, y gracias al avance en términos de calidad y frecuencia, resulta posible determinar la distribución del manto nival de una forma relativamente regular a nivel de temporalidad y con una resolución que permite incorporar el uso de estas por personas del sector servicios en las zonas de montaña.

El proyecto Sentinel tiene un carácter multisatélital, desarrollado por la ESA en el marco del Programa Copernicus. Este proyecto dispone de varias misiones, que incluyen diferentes satélites y posibilidades como son los radares en algunos casos, e imágenes espectrales con el objetivo de supervisar el medio terrestre, oceánico y atmosférico del planeta. En este caso, la misión Sentinel-2 proporciona la información necesaria para poder realizar los objetivos del trabajo. Es una misión de tipo multiespectral con una alta resolución en la órbita polar, con el propósito de monitorizar la superficie terrestre analizando la cubierta vegetal, los usos del terreno y de las aguas, los cursos de los ríos y las zonas de costa. Así, el primer satélite (Sentinel-2A) se puso en órbita el 23 de junio de 2015, y el segundo (Sentinel-2B) lo hizo el 7 de marzo de 2017. Sus imágenes aportan dos tipos de producto final, siendo el Nivel 2A el utilizado en este trabajo a causa de sus características:

- Sentinel-2 Nivel 1C: imágenes corregidas atmosféricamente por debajo de la atmósfera (Top-of-atmosphere, TOA).
- Sentinel-2 Nivel 2A: imágenes corregidas atmosféricamente a nivel de tierra (Bottom-of-atmosphere, BOA). Estas mejoran el aspecto visual de una banda, y de otro proporcionan valores que no están influidos por la atmósfera.

#### *Procesado de imágenes*

La determinación de la distribución del manto nival a partir de las imágenes de los satélites Sentinel 2A y 2B se han procesado mediante el software libre QGIS. Una vez validada la imagen, especialmente en lo que se refiere a la presencia de nubosidad, se descargan las bandas 3 y 11 de cada una de las imágenes, con una resolución de 20 metros por píxel.

La metodología propuesta para la detección de la nieve, como ya se ha comentado anteriormente, está ya contrastada y estudiada (Dozier, 1989; Riggs et al., 1994; Cea et al., 2007), basada en el Normalized Difference Snow Index (NDSI), y utilizando la banda 3 (verde; 560 nm) y la banda 11 (infrarrojo de onda corta; 1.610 nm).

$$\text{NDSI} = \frac{\text{Banda 3} - \text{Banda 11}}{\text{Banda 3} + \text{Banda 11}}$$

En la figura 2 se establece un umbral del índice, que será el superior a 0,4 (Hall et al., 2002) para la diferenciación de la cubierta de nieve. En caso de trabajar con valores inferiores hace que superficies como pavimentos artificiales, rocas, suelo desnudo o vegetación queden seleccionados, según autores como Kulkarni et al. (2002), los pavimentos artificiales, las rocas y los suelos naturales tiene un valor entre 0,1 y -0,3 aproximadamente, mientras que la vegetación lo hace entorno de -0,5. Así, el índice NDSI clasifica el manto nival por encima del valor 0,4.

#### 4. Resultados

Se expone la cartografía elaborada para la zona Aneto – Maladeta en cuatro momentos (Figura 3), ya que ésta dispone de la cima más alta de la cordillera y de algunos de sus glaciares.

Mediante salidas de campo se corrobora la correlación de las manchas de nieve con la capa NDSI creada (Figura 4). Aunque se puede observar que, a partir de determinada orografía del terreno, como zonas escarpadas, el hecho de incrementar los umbrales de NDSI por encima de 0,4, permite ajustar mejor los límites del manto nival.

#### 5. Discusión

La metodología utilizada no pretende en ningún momento validar un método o un índice, pero si intentar generar una cartografía de la distribución del manto nival en unas zonas concretas del Pirineo, a partir de imágenes con una resolución y frecuencia superiores a estudios anteriores (Pineda et al., 2005; Cea López et al., 2007), generando series temporales de una información que es totalmente complementaria a la ya existente lo cual se consiguió durante este estudio.

La superposición de la información nival frecuente que nos proporcionan los satélites sobre los modelos digitales del terreno puede ser una variable de seguridad a incorporar en los mapas de aludes que parten prácticamente de información altitudinal marcada por la isoterma 0°C (Gracia et al., 1985) y de pendientes favorables comprendidas entre los 28 y 45° de inclinación. Sin embargo, la correlación entre el estado/tipo de la nieve y los valores obtenidos de NDSI sigue necesitando más estudio para asegurar una correcta interpretación.

#### 6. Conclusiones

Las imágenes Sentinel-2, con su resolución y frecuencia de paso por las zonas de estudio, a través de su procesamiento resultan una buena fuente de información para poder determinar la distribución del manto nival, pero hay que puntualizar que las imágenes con presencia de nubes son un problema, y más en una zona como el Pirineo. Ahora bien, gracias a la elevada disponibilidad temporal de imágenes a diferencia otros satélites, este problema se minimiza, pero es importante hacer una buena selección de las imágenes en su origen y aprovechar la distribución de las zonas de estudio. Es decir, la división en áreas más pequeñas permite elegir o descartar imágenes en función de la presencia de nubosidad.

El uso del índice NDSI para diferenciar aquellas superficies donde está presente nieve o hielo genera unos resultados que se ajustan muy bien a la realidad, pero en las primeras nieves de la



temporada, el índice puede dar lugar a confusiones, debido sobre todo a la carencia de espesura de nieve que no cubre las rocas. En consecuencia, aquellas zonas con la presencia de rocas hacen disminuir ligeramente el valor final del NDSI, pero resulta muy difícil concretar la presencia o no en estas situaciones. Es un problema que surge a causa de la medida del píxel, con una medida más reducida se podría solucionar, pero en este momento es una cuestión que dependerá de la interpretación del usuario final. Con todo, estos tipos de inconvenientes son presentes en otros ámbitos como la agricultura, por ejemplo, donde la interpretación de la información es tanto o más importante que esta.

## 7. Agradecimientos

-

## 8. Bibliografía

BERÁSTEGUI, X.; LOSANTOS, M.; MUÑOZ, J. A.; PUIGDEFÀBREGAS, C.; 1993. Tall geològic del Pirineu central 1:200.000. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Departament de Política Territorial i Obres Públiques. 62.

BUYSE, J.; 1993. Los tresmiles del Pirineo, un estudio enciclopédico (3ª edición revisada y ampliada).

CAPELLÀ, I.; CARRERAS, J.; 1996. La zonación estructural del Hercínico del Pirineo central en el anticlinorio de la Pallaresa. *Estudios Geológicos*, 52, 51-61.

CEA LÓPEZ, C.; CRISTÓBAL ROSSELLÓ, J.; PONS FERNÁNDEZ, X.; 2007. Determinación de la superficie nival del Pirineo Catalán mediante imágenes Landsat y Modis, a: XII Congreso Nacional de Tecnologías de La Información Geográfica. Granada, Septiembre 19-22.

CHUECA CÍA, J.; JULIÁN ANDRÉS, A.; SAZ SÁNCHEZ, M.A.; CREU NOVAU, J.; LÓPEZ-MORENO, J.I.; 2005. Responses to climatic changes since the Little Ice Age on Maladeta Glacier (Central Pyrenees). *Geomorphology* 68, 167-182.

DOZIER, J.; 1989. Spectral signature of alpine snow cover from the landsat thematic mapper. *Remote Sens. Environ.* 28, 9-22.

GARCÍA RUIZ, J.M.; PUIGDEFABREGAS, J.; MARTÍ BONO, C.E.; 1985. Los recursos hídricos superficiales del Alto Aragón. Huesca.

GOBIERNO DE ARAGÓN; 2017. Memoria de anual de gestión 2017 del Parque Natural Posets - Maladeta. Departamento de Desarrollo Rural y Sostenibilidad.

HALL, D.K.; RIGGS, G.G.; SALOMONSON, V.V.; DIGIROLAMO, N.E.; BAYR, K.J.; 2002. MODIS snow-cover products. *Remote Sens. Environ.*, 83 (1): 181-194.

INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL, MINISTERIO DE FOMENTO, 2018. Atlas Nacional de España.

KULKARNI, A. V.; SRINIVASULU, J.; MANJUL, S.S.; MATHUR, P.; 2002. Field based spectral reflectance studies to develop NDSI method for snow cover monitoring. J. Indian Soc. Remote Sens. 30, 73–80.

LASANTA, T.; 2010. El turismo de nieve como estrategia de desarrollo en el Pirineo Aragonés. Cuad. Investig. Geogr. 36, 145–163.

MUÑOZ, J.A.; 1992. Evolution of a continental collision belt: ECORS-Pyrenees crustal balanced cross-section. A: McClay, K.R. (ed.) Thrust tectonics. Chapman and Hall ed., p. 235-246.

PONS, M.; LÓPEZ MORENO, J.I.; ESTEBAN, P.; MACIÀ, S.; GAVALDÀ, J.; GARCÍA, C.; ROSAS-CASALS, M.; JOVER, E.; 2014. Influencia del cambio climático en el turismo de nieve del Pirineo. Experiencia del proyecto de investigación NIVOPYR. Pirineos. Rev. Ecol. Montaña 169.

REVUELTO, J.; ARGUEDAS, G.; SERRETA, A.; 2013. Terrestre En La Monitorización De Procesos Geomorfológicos Dinámicos: El Manto De Nieve. Cuad. Investig. Geográfica 39, 335–357.

RIGGS, G.A.; HALL, D.K.; SALOMONSON, V.V.; 1994. A snow index for Landsat thematic mapper and moderate resolution imaging spectroradiometer. Proceedings of IGARSS '94 - 1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Pasadena, CA, USA, 1994, pp. 1942-1944 vol.4.

RIIHELÄ, A.; LAHTINEN, P.; HAKALA, T.; 2011. The Radiation, Snow Characteristics and Albedo at Summit (RASCALS) expedition report.

TEIXELL, A.; 1996. The Ansó transect of the Southern Pyrenees: basement and cover thrust geometries. Journal of the Geological Society, 153, 301-310.



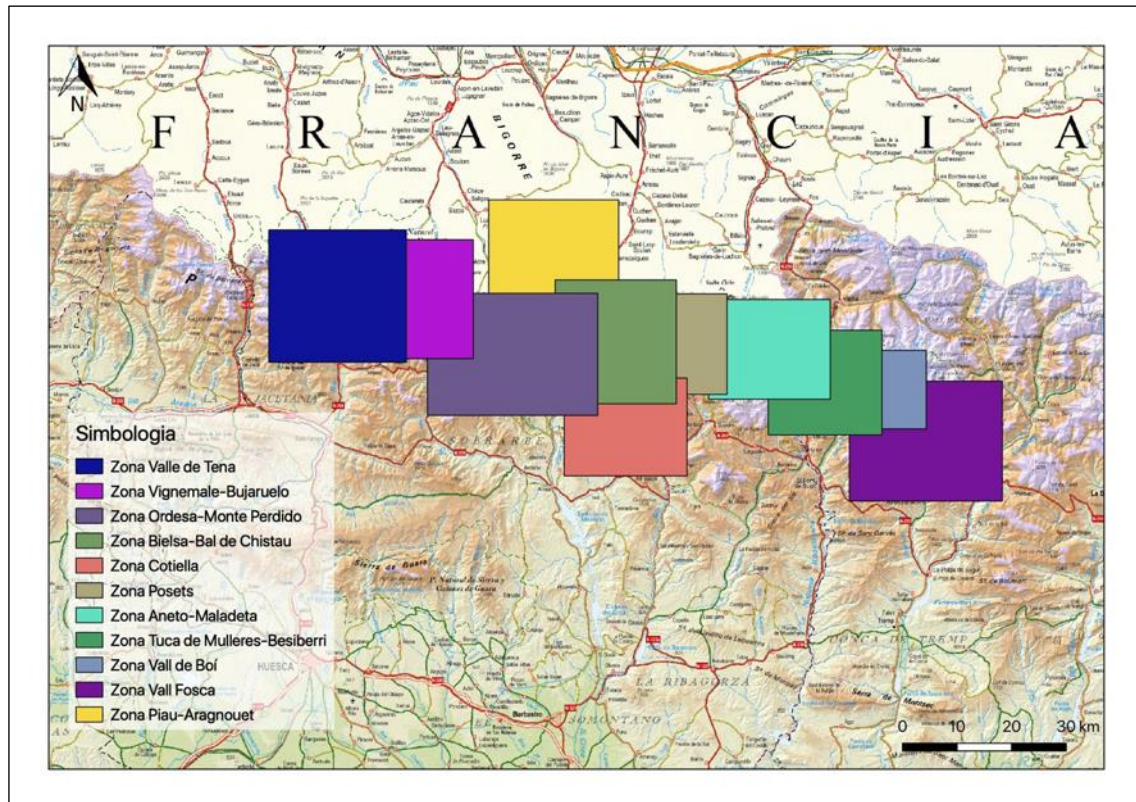
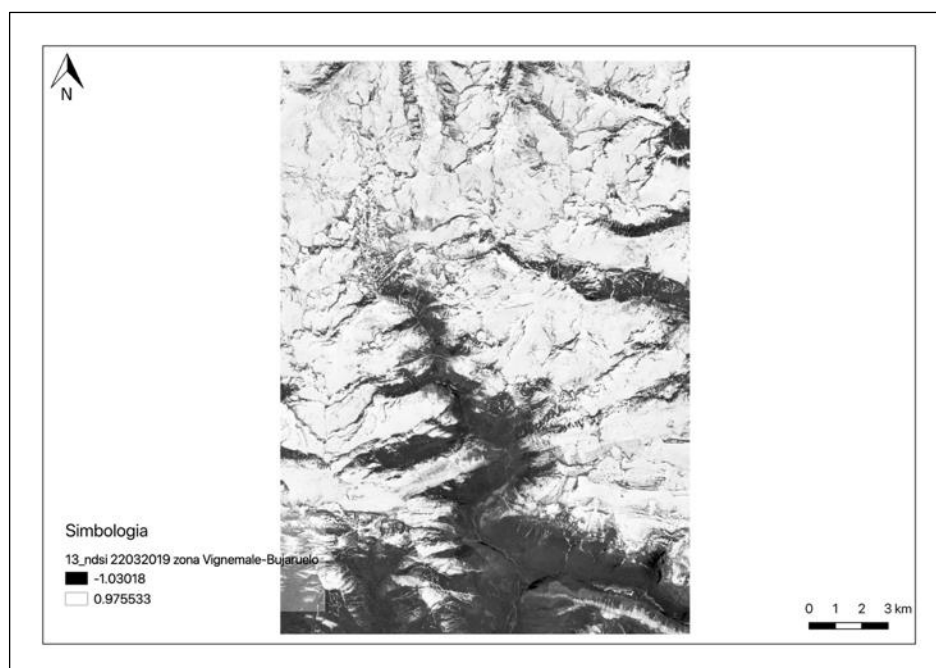


Figura 1. Representación de las zonas de estudio (Fuente: elaboración propia)



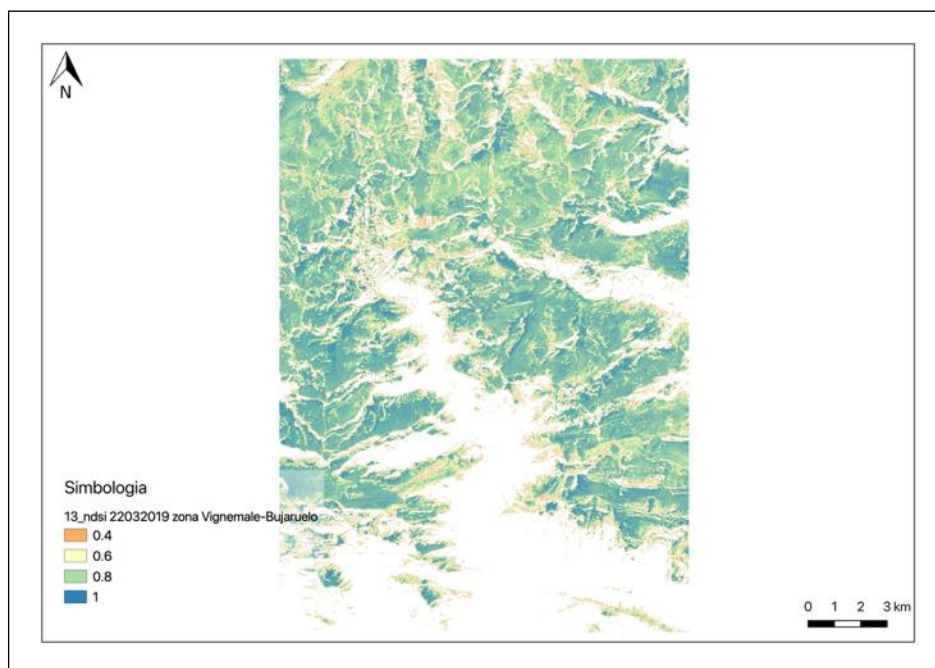
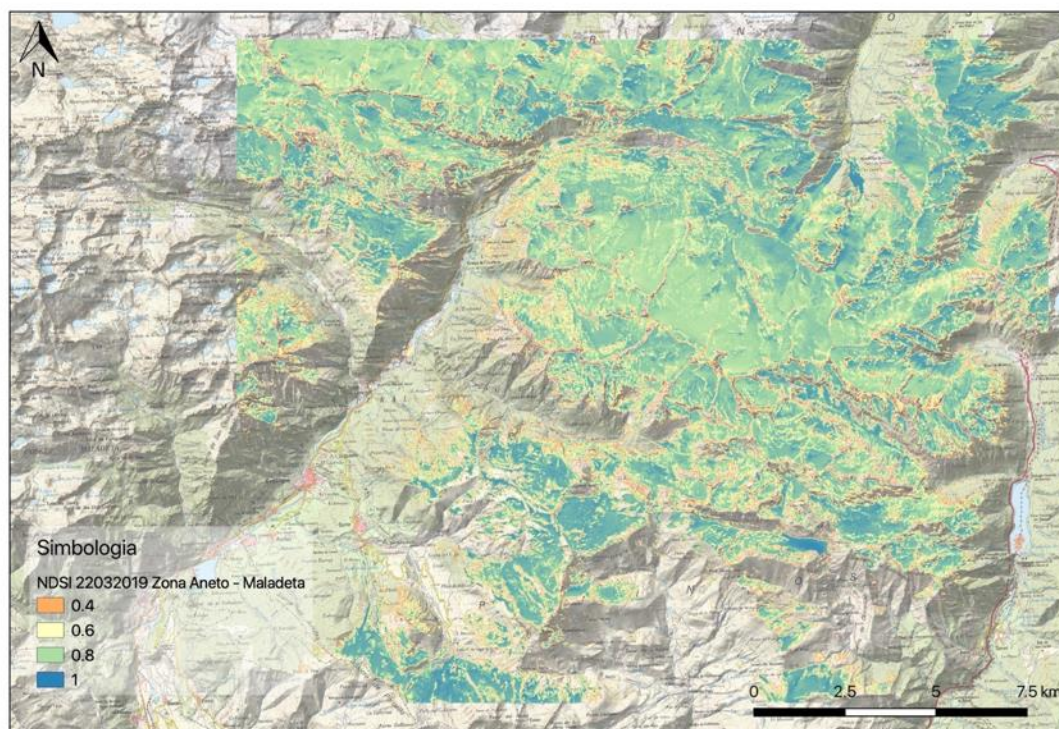
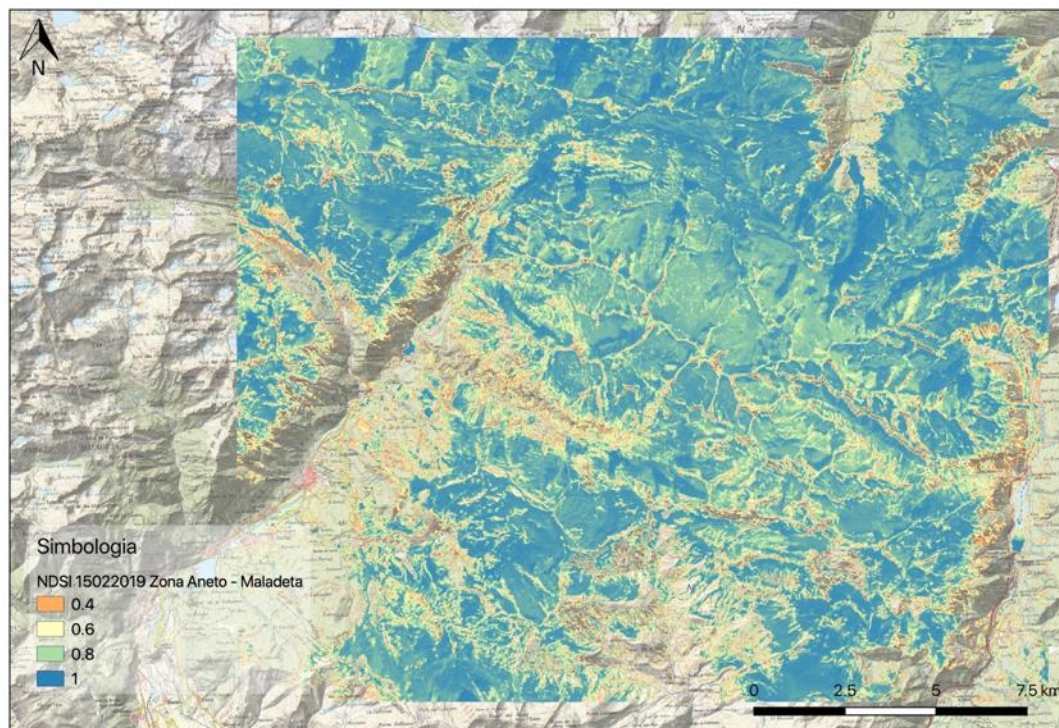


Figura 2. Ejemplo con la imagen en bruto de una de las zonas en la parte superior y la imagen después de realizar la clasificación de los valores.







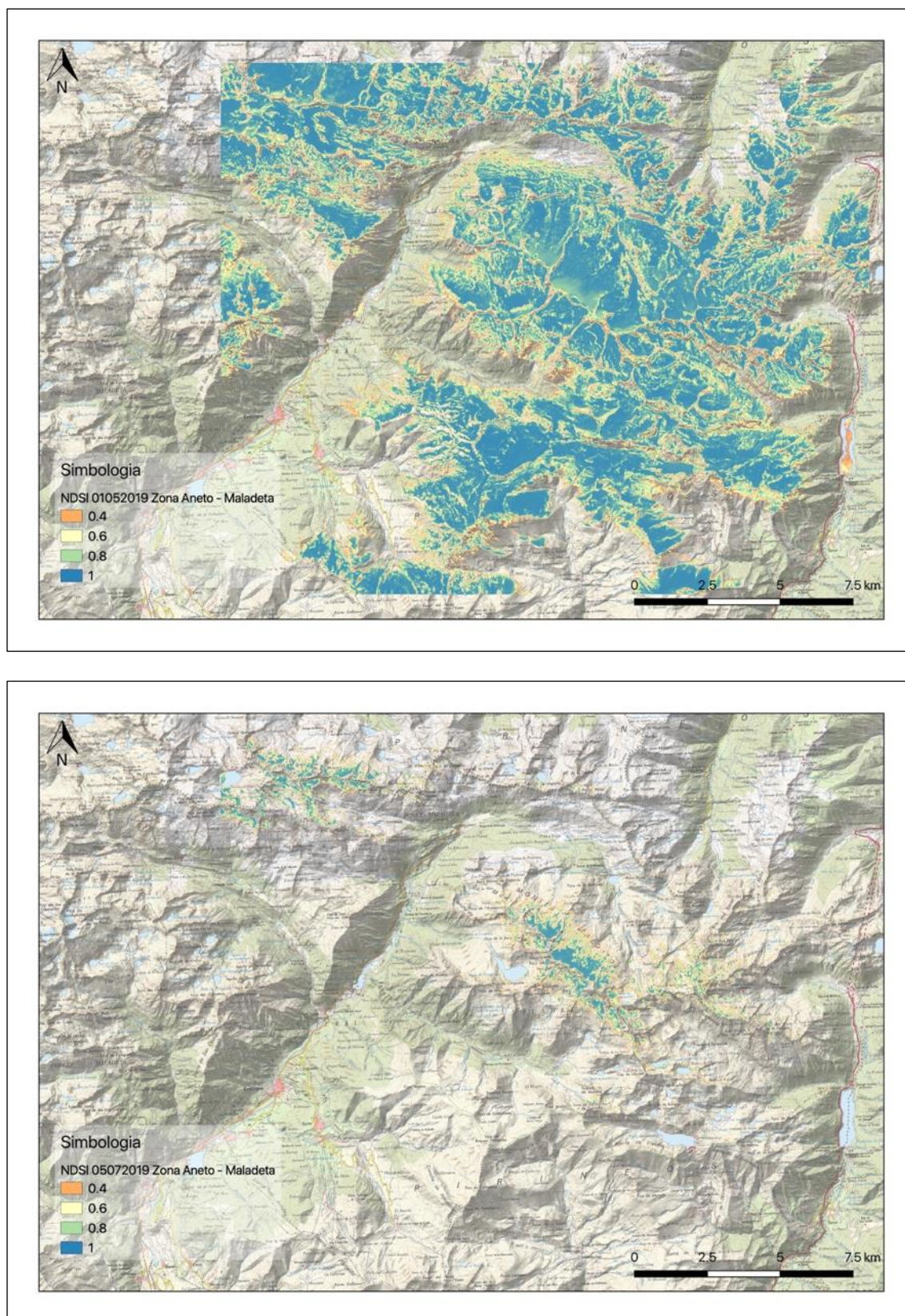


Figura 3. De arriba abajo representación de la zona de Aneto - Maladeta del 15 de febrero de 2019, 22 de marzo de 2019, 1 de mayo de 2019 y día 5 de julio de 2019.



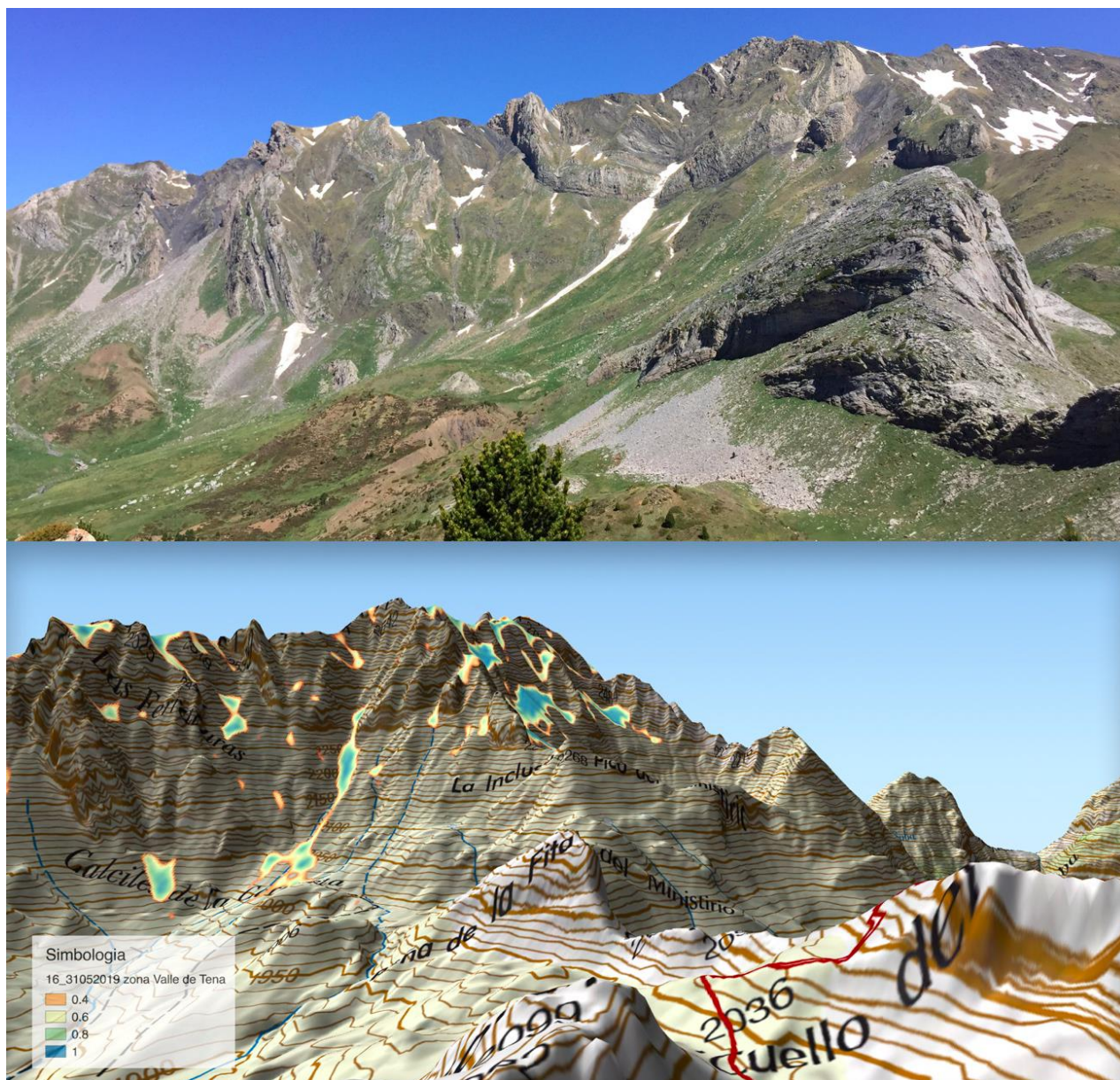


Figura 4. Fotografía desde el Coll del Forato en dirección a la zona de las Ferratura el día 16 de junio de 2019 y representación en un modelo de tres dimensiones los valores de la capa NDSI.