



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Análisis espacio-temporal del manto de nieve en
el Pirineo occidental aragonés mediante
imágenes Landsat

Autora

Estela Pérez Cardiel

Director

Juan de la Riva Fernández

Facultad de Filosofía y Letras
2015

RESUMEN

El trabajo tiene por objeto la obtención de cartografía de la superficie de nieve en el sector occidental del Pirineo Aragonés a partir de las imágenes de los satélites Landsat y mediante el cálculo del Índice de Diferencia Normalizada de Nieve. La metodología aplicada contempla la doble dimensión espacio-temporal en el análisis de las imágenes satélite e incorpora información auxiliar en un contexto de análisis SIG. Todo ello permite i) hacer una aproximación a las variaciones espaciales de la distribución intra-anual; ii) caracterizar la influencia de algunos factores estructurales que afectan a su distribución, como son la altitud, las pendientes, la orientación y la ocupación del suelo; iii) establecer una tipología de situaciones en función del momento del año y los factores estructurales; y iv) analizar con mayor detalle el sector del flysch.

Palabras clave: *Manto nival, Landsat, Factores estructurales, Índice de Diferencia Normalizada de la Nieve, Pirineo Aragonés occidental*

ABSTRACT

The present study aims obtaining the mapping the snow surface in the western sector of the Central Pyrenees of Aragón, using Landast imagery and performing the Normalized Difference Snow Index. The applied methodology implies the double satellite image analysis spatio-temporal dimension, and it also considers ancillary information in a GIS context. It allows i) making a first approach to the spatial variations of intra-annual distribution; ii) characterizing the influence of structural factors which affect the snow distribution, as elevation, slope, aspect and land cover; iii) establishing a typology according the time and the structural factors; and iv) analysing more in deep the flysch area.

Key words: *Snow cover, Landsat, Structural factors, Normalized Difference Snow Index, Western Pyrenees of Aragón.*

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	1
3.	ÁREA DE ESTUDIO	2
4.	METODOLOGÍA.....	4
4.1	PROCESO METODOLÓGICO	4
4.2	FUENTES Y OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN	5
4.3	TRATAMIENTO DE LAS IMÁGENES	7
4.3.1	Pre-proceso de las imágenes.....	8
4.3.2	Proceso de las imágenes	17
4.4	TRATAMIENTO DE LAS VARIABLES PARA EL ANÁLISIS	22
4.4.1	Tratamiento del modelo digital del terreno.....	22
4.4.2	Elaboración de los mapas de altitud, pendiente y orientaciones.	24
4.4.3	Elaboración del mapa de ocupación del suelo.....	28
5.	RESULTADOS	30
5.1	Evolución intra-anual del manto nival.....	30
5.2	Factores estructurales de la distribución espacial del manto nival	32
5.2.1	Distribución de la nieve según su rango altitudinal	32
5.2.2	Distribución de la nieve según pendientes	34
5.2.3	Distribución de la nieve según orientaciones	35
5.2.4	Distribución de la nieve según la ocupación del suelo.....	37
5.3	Extensión del manto nival en situaciones tipo a lo largo del año	39
5.3.1	Tipo A.....	40
5.3.2	Tipo B.....	43
5.3.3	Tipo C.....	46
5.3.4	Tipo D	49
5.4	Distribución espacial del manto nival en el sector del flysch.....	51
6.	CONCLUSIONES	54
7.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	56
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	56
	ANEXO I VALORES DE CUERPO OSCURO DE LAS IMÁGENES SELECCIONADAS.....	58
	ANEXO II DISTRIBUCIÓN DEL MANTO NIVAL EN LOS DÍAS SELECCIONADOS	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Localización del área de estudio	3
Figura 2 Zona de estudio	3
Figura 3 Esquema del proceso metodológico	5
Figura 4 Esquema del procesado de las imágenes para conseguir la información del manto nival.....	7
Figura 5 Imagen original con composición de color 4/5/3 Imagen de fecha 24 de abril de 2002	9
Figura 6 Imagen de la zona de estudio. Composición de color 4/5/3. Imagen de fecha 24 de abril de 2002	9
Figura 7 Efecto atmosférico sobre el cálculo de la reflectividad.(Fuente: Chuvieco 2010).....	9
Figura 8 Parámetros para calcular los ND mínimos en DIMPLE.....	10
Figura 9 Modelo para realizar la corrección de la dispersión atmosférica	12
Figura 10 Efecto del relieve sobre la radiancia detectada por el sensor(Fuente: Chuvieco 2010)	12
Figura 11 Imagen Landsat ETM+ de 20/01/2000 sin la normalización topográfica.....	15
Figura 12 Imagen Landsat ETM+ de 20/01/2000 con la normalización topográfica	16
Figura 13 Gráficos Cross Plot para comparar los diferentes Índices de Diferencia Normalizada de la nieve.....	18
Figura 14 Signaturas espectrales típicas para distintas cubiertas. Fuente: Chuvieco (1996)	19
Figura 15 Imágenes con los diferentes índices con corrección de la dispersión atmosférica y con la normalización topográfica	19
Figura 16 Gráficos Cross Plot para comparar los diferentes Índices de Diferencia Normalizada de la nieve con corrección de la dispersión atmosférica y con la normalización topográfica.	20
Figura 17 Secuencia del procesado de la imagen para obtener la superficie de nieve	21
Figura 18 Esquema del procesado MDT y Corine Land Cover para calcular las variables estructurales.	22
Figura 19 Corrección de la deficiencia de MDT.....	23
Figura 20 MDT original	24
Figura 21 MDT de la zona de estudio.....	24
Figura 22 Mapa hipsométrico del área de estudio. Elaboración propia	25
Figura 23 Mapa de pendientes del área de estudio. Elaboración propia	26
Figura 24 Mapa de orientaciones del área de estudio. Elaboración propia	27
Figura 25 Mapa de ocupaciones de suelo en el área de estudio	29
Figura 26 Ejemplos de superficies innivadas para el tipo A	40
Figura 27 Ejemplos de superficies innivadas para el tipo B	43
Figura 28 Ejemplos de superficies innivadas para el tipo C	46
Figura 29 Ejemplos de superficies innivadas para el tipo D.....	49

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Valores de cuerpo oscuro para la imagen de 20 de enero de 2000 y comparación con diferentes ocupaciones de suelo	11
Gráfica 2 Evolución de la cubierta de nieve en la secuencia de meses de estudio	31
Gráfica 3. Evolución de la cubierta de nieve de los años hidrológicos 2001-2002 y 2013-2014	31
Gráfica 4. Porcentaje de la distribución de nieve según el rango altitudinal	32
Gráfica 5 Porcentaje de la distribución de la nieve relativa a la superficie de cada rango altitudinal	33
Gráfica 6 Porcentaje de la distribución de la nieve según la pendiente	34
Gráfica 7 Porcentaje de la distribución de la nieve relativa a la superficie de cada rango de pendiente	35
Gráfica 8 Porcentaje de la distribución de la nieve según la orientación de sus vertientes.....	36
Gráfica 9 Porcentaje de la distribución de la nieve según la orientación de sus vertientes.....	36
Gráfica 10 Porcentaje de la distribución de la nieve según las ocupaciones de suelo	37
Gráfica 11 Porcentaje de la distribución de la nieve según las ocupaciones de suelo	38
TIPO A. Gráfica 12 Porcentaje relativo a la superficie innivada en función de la superficie de cada altitud, pendiente, orientación y ocupación del suelo.....	41
TIPO B. Gráfica 13 Porcentaje relativo a la superficie innivada en función de la superficie de cada altitud, pendiente, orientación y ocupación del suelo.....	44
TIPO C Gráfica 14 Porcentaje relativo a la superficie innivada en función de la superficie de cada altitud, pendiente, orientación y ocupación del suelo.....	47
Tipo D Gráfica 15 Porcentaje relativo a la superficie innivada en función de la superficie de cada altitud, pendiente, orientación y ocupación del suelo.....	50
Gráfica 16 Distribución de la nieve según la altitud en el sector del flysch.....	52
Gráfica 17 Distribución de la nieve según la pendiente en el sector del flysch.....	52
Gráfica 18 Distribución de la nieve según la orientación en el sector del flysch	53
Gráfica 19 Distribución de la nieve según ocupación de suelo en el sector del flysch	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Disponibilidad de imágenes Landsat	6
Tabla 2 Imágenes seleccionadas	7
Tabla 3 Valores de cuerpo oscuro en imágenes de L7 ETM+	10
Tabla 4 Valores de cuerpo oscuro en imágenes de L5 TM.....	10
Tabla 5 Valores de cuerpo oscuro en imágenes de L8 OLI.....	11
Tabla 6 Porcentaje de superficie en cada uno de los rangos de altitudinales	25
Tabla 7 Porcentaje de superficie en cada uno de los rangos de pendiente	27
Tabla 8 Porcentaje de superficie en cada uno de los rangos de orientación.....	28
Tabla 9 Porcentaje de superficie en cada uno de las ocupaciones de suelo	30

1. INTRODUCCIÓN

La nieve es un fenómeno meteorológico que influye en procesos geomorfológicos, en algunos aspectos de la fauna y fenología de las plantas, y en una amplia gama de actividades económicas en las zonas de montaña (López-Moreno *et al.*, 2013). En particular, la nieve controla los procesos hidrológicos en las zonas de montaña de latitudes templadas, ya que representa la mayor aportación al caudal de los ríos en primavera (López-Moreno y García-Ruiz, 2004). Además el estudio del retroceso de glaciares y heleros, y la disminución del manto nivales en el Pirineo constituyen unos indicadores de los cambios climatológicos que se están produciendo en la actualidad. (Chueca *et al.*, 2005).

Por todo ello resulta interesante avanzar en el conocimiento de los procesos que afectan a las variaciones de la cubierta de nieve y masas heladas en el Pirineo.

Sin embargo, a pesar de la importancia en términos tanto económicos como ecológicos, la información existente sobre la nieve es escasa. La razón principal es la dificultad de acceso a las zonas de montaña, especialmente cuando estas se encuentran nevadas (Cuadrat *et al.*, 2007). Desde hace unos años la Dirección General del Agua, dentro del programa ERHIN, está estudiando la cuantificación del volumen de agua almacenada en forma de nieve, así como en la previsión de su evolución. Su objetivo es conocer la disponibilidad de recursos hídricos, para poder realizar una gestión óptima y así poder asegurar el abastecimiento y los caudales ecológicos de los ríos.

Debido a la complejidad de acceso y recepción de datos se han incorporado otras técnicas para la recopilación de información como son las técnicas de teledetección mediante imágenes satélite, LIDAR o RADAR.

El siguiente trabajo se centra en la obtención de la cartografía de la superficie de nieve en el sector occidental del Pirineo Aragonés a partir de las imágenes de los satélites Landsat. Mediante análisis espacio-temporal de las imágenes satélite se pueden determinar las variaciones en la superficie ocupada por la nieve. Además se han tenido en cuenta las diferentes ocupaciones de suelo, así como factores topográficos que puedan afectar a su distribución como son la altitud, las pendientes y la orientación.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

El objetivo principal de este trabajo es el análisis espacio-temporal –mediante tratamiento digital de imágenes de teledetección y análisis espacial SIG– de la superficie ocupada por el manto de nieve en el Pirineo aragonés occidental. Se parte de la hipótesis de que las imágenes Landsat constituyen, mediante su tratamiento digital, una excelente fuente de información,

que permite tanto la cartografía de la superficie innivada como, en función de su resolución espacial, su análisis combinado con distintos factores estructurales del medio.

El proceso metodológico se orienta a la consecución de los siguientes objetivos secundarios:

- Determinar el proceso más ágil y riguroso para el cálculo del Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI), atendiendo a la aplicación de diversos pretratamientos y formulaciones.
- Cartografiar las variaciones espaciales de la distribución intra-anual del manto de nieve.
- Caracterizar la influencia de algunos factores estructurales que afectan a su distribución, como son la altitud, las pendientes, la orientación y la ocupación del suelo.
- Establecer una tipología de situaciones en función del momento del año y los factores estructurales.
- Analizar con mayor detalle el sector del flysch, en cuanto espacio de presencia más efímera de la nieve.

3. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en la Comarca de la Jacetania y parte de la Comarca del Alto Gallego en la provincia de Huesca. Se localiza entre la depresión Interior en el Sur y la frontera con Francia en el Norte. Al Oeste limita con la Comunidad de Navarra y la provincia de Zaragoza, y al Este con la cuenca del Río Gallego y del río Aurín.

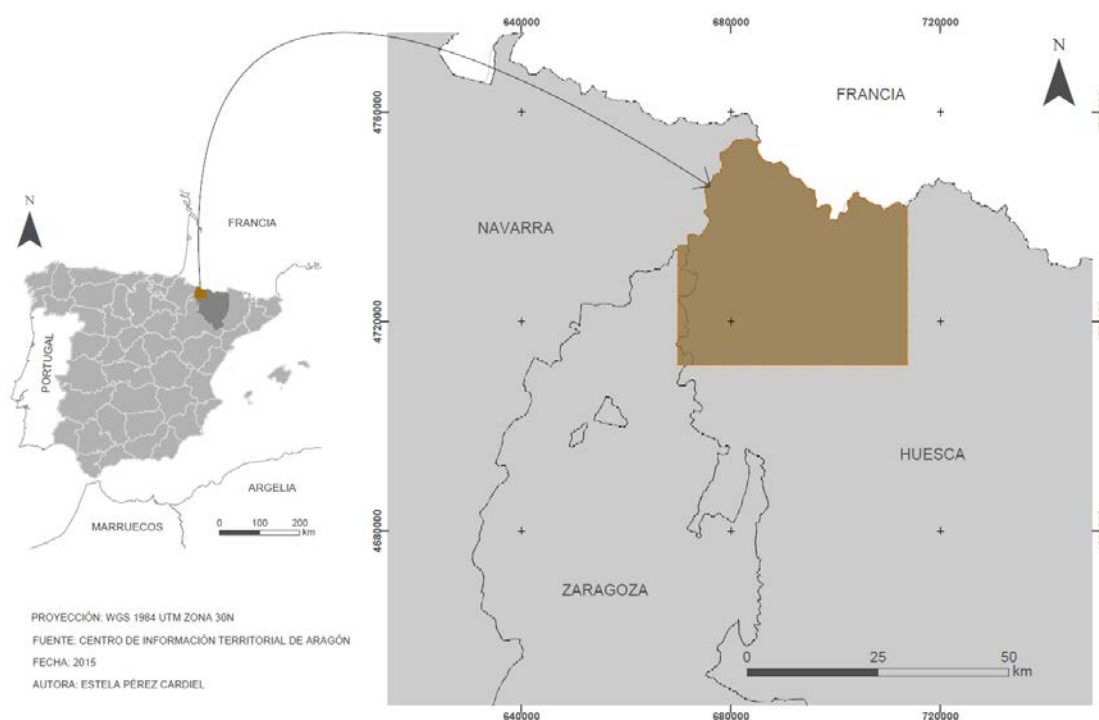


Figura 1 Localización del área de estudio

El área de estudio presenta un carácter montañoso con un fuerte gradiente altitudinal, la elevación media en la zona es de 1183 msnm, alcanza los 2366 m de desnivel entre el punto más alto, en el pico de Collarada (2886 m) y la zona más baja en la llanura de inundación del río Aragón en su parte más occidental (518 m).

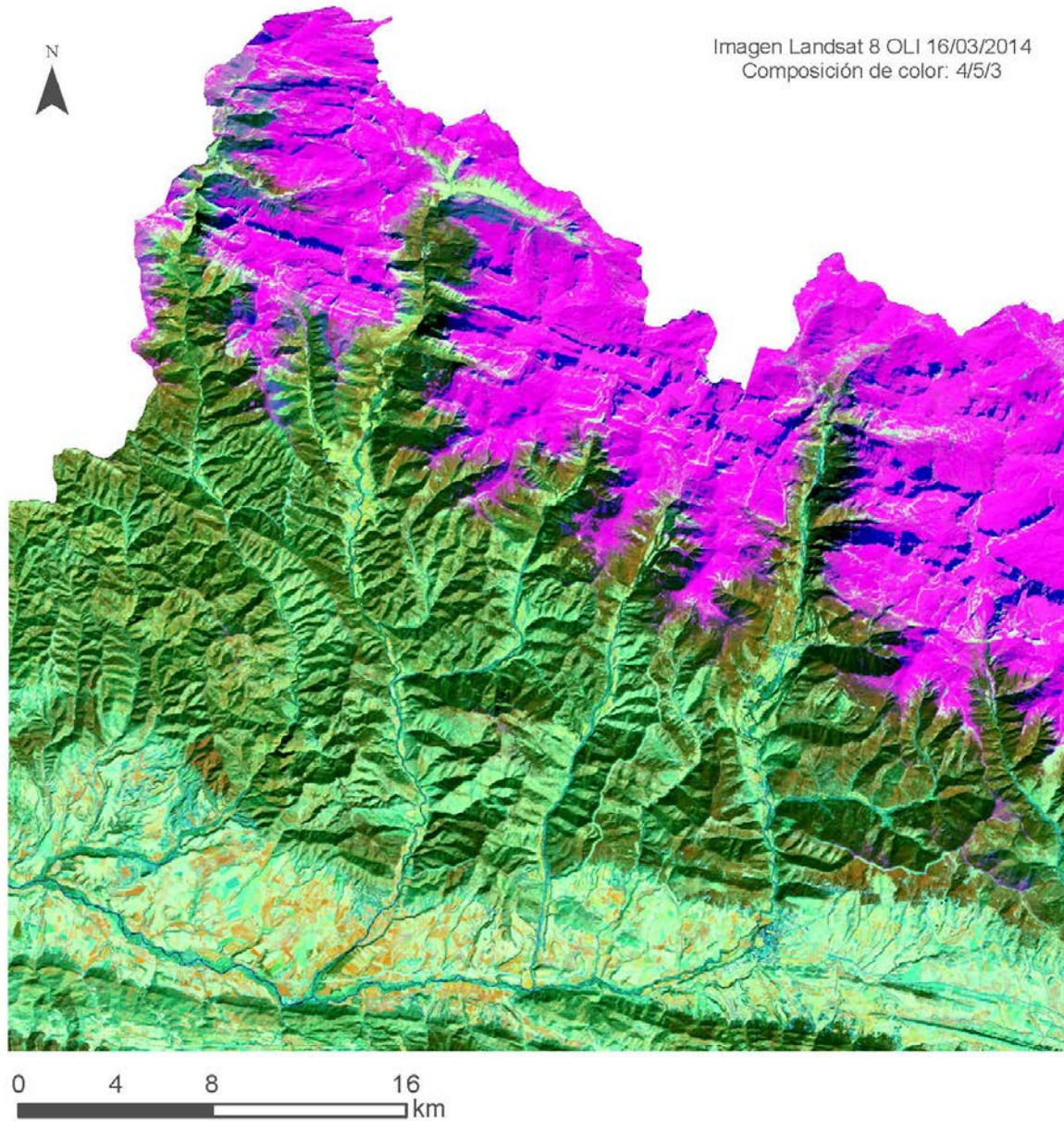


Figura 2 Zona de estudio

El relieve presenta un gradiente Norte -Sur con las principales alineaciones montañosas orientadas de W-E a NW-SE, ligadas a la geología y litología. Las zonas de mayor complejidad topográfica se encuentran en las Sierras Interiores. Allí se localizan los macizos de Collarada, Pala de Ip y Anayet al este del río Aragón; la Sierra Bernera y Bisaurín en la cabecera del río Osía; y los Alanos entre Ansó y Hecho (Beguiría, 2005). Esta complejidad topográfica hace que sea un área idónea para realizar el análisis de la distribución espacial de la nieve con distintos factores topográficos.

El área de estudio presenta un clima húmedo con influencia atlántica, pero no en toda la zona de estudio por igual. Existen dos zonas diferenciadas (de la Riva, 1995), áreas frescas y con precipitación abundante e influencia atlántica al norte de las Sierras interiores y áreas con características intermedias de influencia atlántica pero con veranos cálidos y secos. Es por ello que la zona donde existe mayor superficie ocupada por la nieve es el área norte de las Sierras interiores. El efecto barrera de las Sierras Interiores produce el efecto *föhn* que de no ser por la influencia oceánica del Oeste produciría un clima continental acusado. Por lo tanto en el Norte de Sierras Interiores la precipitación es superior a los 1500 mm anuales y en el Sur de estas sierras y la Depresión Intrapirenaica las precipitaciones son de 1500 mm a 800 mm (de la Riva, 1995).

Dentro del área de estudio Figura 2 se distinguen varias unidades geoestructurales de Norte a Sur se atraviesa el Pirineo Axial formado por materiales paleozoicos intensamente plegados y afectados por la acción glaciaria cuaternaria; las Sierras Interiores, formando un gran anticlinal cabalgante compuesto por calizas cretácicas y eocenas con areniscas y calizas margosas intercaladas. En el área de estudio se puede observar una karstificación intensa con numerosos circos glaciares, derrubios y canales de avalancha todavía activos.

El sector del Flysch Eoceno está muy plegado pero su homogeneidad litológica origina un relieve uniforme que desciende gradualmente hacia el Sur y por último la depresión Interior Altoaragonesa, desarrollada sobre margas del eoceno y forma un amplio valle de depósitos cuaternarios (terrazas y glaciares) (García Ruiz y Valero, 1997). Estas unidades son fácilmente diferenciables debido a las diferencias litológicas y estructurales, que han dado lugar a relieves bien diferenciados (Beguiría, 2005).

4. METODOLOGÍA

4.1 PROCESO METODOLÓGICO

El proceso metodológico seguido para el análisis espacio-temporal del manto de nieve en el Pirineo occidental aragonés mediante imágenes Landsat se fundamenta en la utilización de imágenes Landsat (USGS, 2015), el modelo digital del terreno (CNIG, 2015) y las cartografías Corine Land Cover 2006, también obtenida del CNIG, de Dominios del paisaje, facilitada por el Departamento de Geografía de la Universidad de Zaragoza (IDE-Aragón, 2015).

Las imágenes Landsat son preprocesadas, obteniéndose después el NDSI de ellas, derivándose la cartografía del manto nival para cada una. A partir de operaciones de análisis espacial en SIG se combinan los mapas de manto nival con la cartografía de los factores estructurales (topográficos y de ocupación del suelo); se presta atención particular a la zona del flysch. Con todo ello se obtienen los cuatro productos finales que son objeto de análisis.

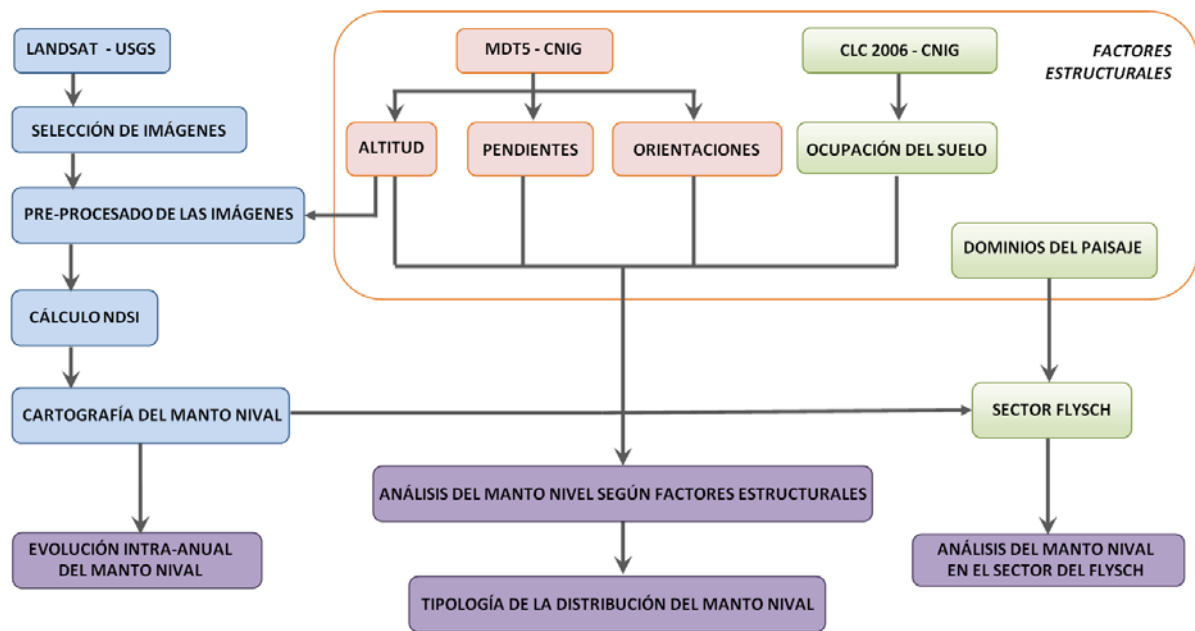


Figura 3 Esquema del proceso metodológico

4.2 FUENTES Y OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Modelo digital del terreno

El modelo digital del terreno (MDT) se ha obtenido del Centro de Nacional de Información Geográfica. El MDT tiene paso de malla de 5 m, con la misma distribución de las hojas que el MTN50. El archivo de descarga se encuentra en formato ASCII matriz ESRI (asc). El sistema geodésico en el que se encuentra es ETRS89 y proyección en el huso correspondiente de cada hoja, en este estudio el huso es el 30. La obtención del MDT ha sido por medio de la interpolación a partir la clase terreno de vuelos LIDAR del PNOA(CNIG).

Hojas utilizadas para formar el modelo digital del terreno							
177	118 (B)	143	144	145	175	176	177

Imágenes de Satélite

Paradelimitar la superficie ocupada por la nieve se han seleccionado varias imágenes de diferentes épocas del año donde la nieve estaba presente. Las imágenes seleccionadas proceden de los satélites Landsat, que tienen una frecuencia de 16 días. (Pasan por la misma región de la superficie de la tierra)

Los satélites Landsat han proporcionado al mundo información sin precedentes sobre los cambios de la cubierta terrestre y sus efectos residuales desde 1972. En la actualidad de los 8 satélites que se han enviado únicamente se encuentran activos Landsat7 y Landsat 8.

Los satélites landsat llevan consigo sensores que van evolucionando proporcionando mejor discriminación espectral de la superficie terrestre, mayor fidelidad geométrica y mayor precisión radiométrica. Los satélites Landsat 1 Landsat 2 Landsat 3 llevaban sensor *Multispectral Scanner Sensor (MSS)*, a continuación en Landsat 4 y 5 se envió con sensor *ThematicMapper (TM)* marcó un avance significativo en la teledetección a través de la adición de un sensor más sofisticado. Los siguientes fueron Landsat 6 y Landsat 7, que incluyen los sensores *EnhancedThematicMapper (ETM)* y el *EnhancedThematicMapper Plus (ETM +)* respectivamente. Landsat 7 incorporó una banda espectral (pancromática) con resolución de 15 metros y por último el satélite Landsat 8 que cuenta con dos sensores *OperationalLandImager (OLI)* y *ThermalInfrared Sensor (TIRS)*, está formado por 11 bandas, 9 tomadas por OLI y 2 por TIRS. Se han incluido dos bandas espectrales, banda 1 en el azul, diseñado específicamente para los recursos hídricos y banda 9, nuevo canal infrarrojo para la detección de cirrus (Chander, 2009).

Para realizar el siguiente estudio se han tomado imágenes de los satélites Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8, estas imágenes están disponibles en la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Únicamente se han seleccionados las imágenes en las que la zona de estudio estaba libre de nubes.

	<i>ago</i>	<i>sep</i>	<i>oct</i>	<i>nov</i>	<i>dic</i>	<i>ene</i>	<i>feb</i>	<i>mar</i>	<i>abr</i>	<i>may</i>	<i>jun</i>	<i>jul</i>
1999-00				26-11		20-1		9-3				
2000-01									28-4	30-5		1-7
2001-02					24-12	25-1			24-4		11-6	
2002-03							6-2	10-3				
2003-04												
2004-05												
2005-06												
2006-07					14-12			13-3				
2007-08												
2008-09											13-6	
2009-10												18-7
2010-11							4-2		9-4			
2011-12												
2012-13									14-4			
2013-14					10-12		12-2	16-3	17-4			22-7
2014-15					29-12	5-1						

Tabla 1 Disponibilidad de imágenes Landsat

Fecha	Sensor	Path	Row	Fecha	Sensor	Path	Row
26/11/1999	ETM+	199	30	13/03/2007	TM	199	30
20/01/2000	ETM+	200	30	10/12/2013	OLI	199	30
09/03/2000	ETM+	200	30	12/02/2014	OLI	199	30
24/12/2001	ETM+	200	30	16/03/2014	OLI	199	30
25/01/2002	ETM+	200	30	17/04/2014	OLI	199	30
24/04/2002	ETM+	199	30	22/07/2014	OLI	199	30
11/06/2002	ETM+	199	30	29/12/2014	OLI	199	30
14/12/2006	TM	200	30	05/01/2015	OLI	200	30

Tabla 2 Imágenes seleccionadas

CorineLandCover y Dominios del Paisaje

El archivo *shape* con la información la ocupación de usos de suelo del proyecto CorineLandCover y la información de los grandes dominios del paisaje fue facilitado por el Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza.

4.3 TRATAMIENTO DE LAS IMÁGENES

Para lograr identificar el manto de nieve en las imágenes se ha seguido el siguiente esquema.

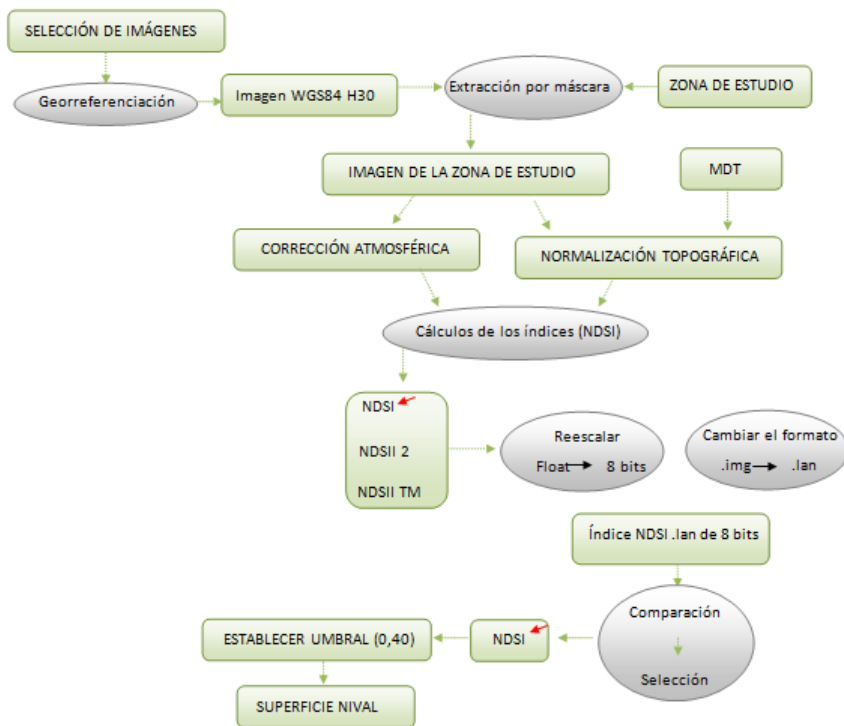


Figura 4 Esquema del procesado de las imágenes para conseguir la información del manto nival.

4.3.1 Pre-proceso de las imágenes

El cálculo de la cubierta de nieve en las imágenes de los satélites Landsat 5 (L5) TM, Landsat 7 (L7) ETM+ y Landsat 8 (L8) OLI se han procesado mediante los software ERDAS 2013, ARCGIS 10.2 y DIMPLE y cuya metodología ha sido la siguiente:.

Georreferenciación

Las imágenes se encuentran georreferenciadas en WGS 1984, las imágenes de la órbita 200 se encuentran en la UTM zona 31 y las imágenes de la órbita 199 se encuentran en la UTM zona 30. La zona de estudio se localiza en la UTM zona 30 por lo que se ha cambiado la UTM zona de las imágenes de la órbita 199, utilizando el software ARCGIS.



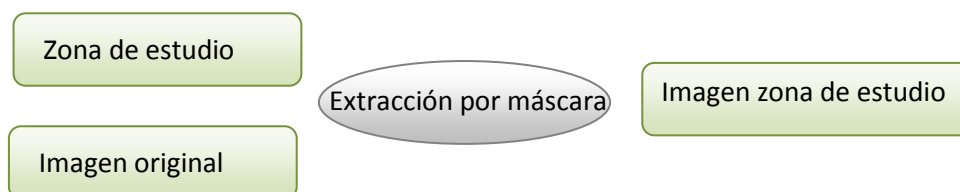
La imagen se transforma desde ARCGIS a formato .img (formato imagen de ERDAS)



Recorte de la imagen de la zona de estudio

Para manejar mejor las imágenes se han transformado de formato TIFF a una imagen multibanda en formato .img, creando un *layerstack*, incluyendo en este último las bandas necesarias. En el caso de las imágenes de los satélites L5 y L7 se han utilizado las bandas 1,2,3,4,5 y 7, y el caso de L8 se han utilizado las bandas 2,3,4,5,6 y 7, en ambos casos las bandas se corresponden con las tres primeras del espectro visible, la cuarta del infrarrojo cercano o fotográfico y las dos últimas al infrarrojo medio o SWIR.

Las imágenes se han recortado con la máscara de la zona de estudio, quedando únicamente la imagen de la zona de estudio.



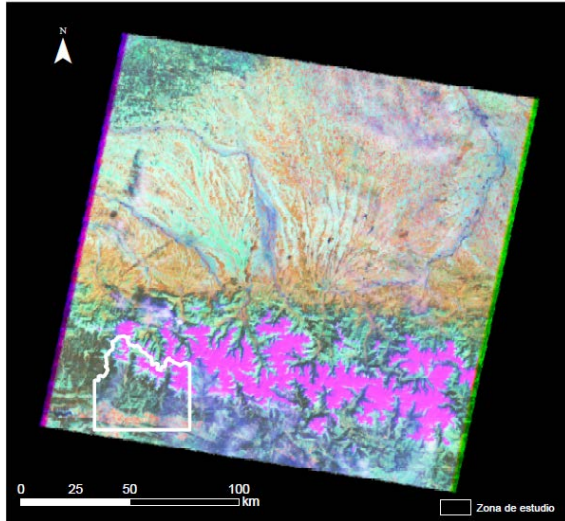


Figura 5 Imagen original con composición de color 4/5/3
Imagen de fecha 24 de abril de 2002

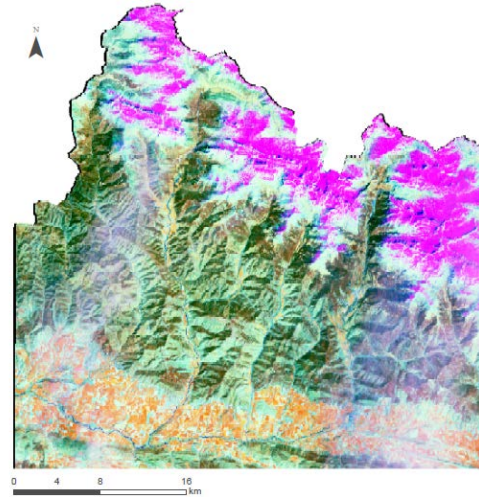


Figura 6 Imagen de la zona de estudio. Composición de color 4/5/3. Imagen de fecha 24 de abril de 2002

Corrección de la dispersión atmosférica.

La radiación del sol recorre dos veces la atmosfera hasta llegar al sensor ubicado en el satélite. El vapor de agua y los aerosoles presentes en la atmosfera absorben y dispersan parte de esa radiación solar. La radiación que llega al sensor será por tanto la suma de la radiancia aportada por la dispersión de la atmósfera y la radiancia reflejada por la superficie terrestre.

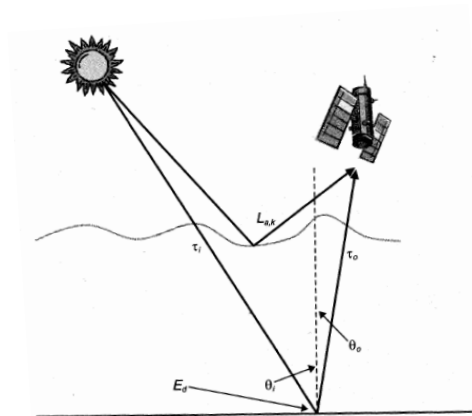


Figura 7 Efecto atmosférico sobre el cálculo de la reflectividad.(Fuente: Chuvieco, 2010)

La corrección de la dispersión atmosférica se realizó a partir de los métodos basados en el objeto oscuro, realizada por Chavez en 1975 y con sucesivas mejoras en 1988 y 1996 (Chavez 1975, 1988,1996). En las que se ha asumido que las áreas con fuerte absortividad, deberían presentar una radiancia espectral muy próxima a cero. El histograma de los niveles digitales (ND) de la imagen siempre presenta un mínimo superior a ese valor, atribuible a la dispersión

atmosférica, es por ello que se debe **restar a todos los ND de cada banda el mínimo de esa misma banda**. Este valor es mayor en las bandas cortas y va disminuyendo hacia el Infrarrojo próximo y el SWIR. Este método es correcto siempre que existan zonas en sombra o con agua profunda. (Chuvieco 2010).

Este cálculo se ha realizado con el software DIMPLE, visualizando el histograma y buscando los valores de cuerpo oscuro o niveles digitales mínimos. Como se observa en la Figura 8.

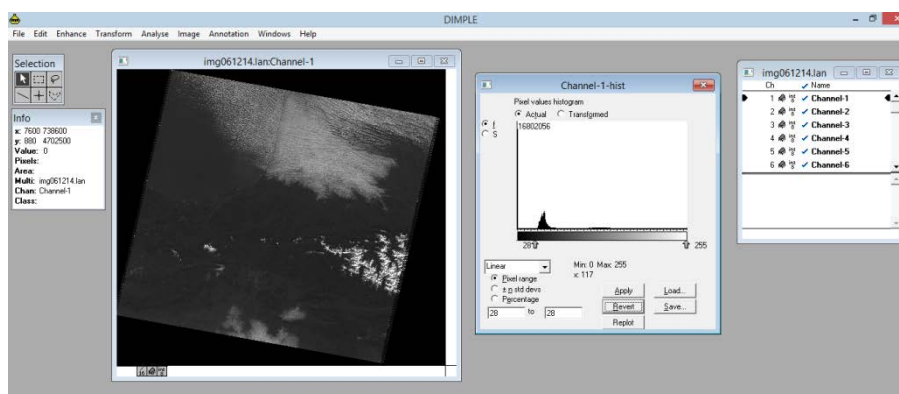


Figura 8 Parámetros para calcular los ND mínimos en DIMPLE

Los valores de cuerpo oscuro que se deben restar a cada una de las imágenes son los siguientes:

VALORES DE CUERPO OSCURO L7ETM+						
nº Banda	1	2	3	4	5	7
media λ μm	0,483	0,565	0,66	0,838	1,65	2,22
26/11/1999	39	24	17	13	8	8
20/01/2000	37	22	16	13	8	8
17/03/2000	47	27	21	17	10	8
24/12/2001	35	22	16	11	8	7
25/02/2002	42	27	22	19	12	11
24/04/2002	61	42	33	11	9	8
11/06/2002	39	28	20	12	7	6

Tabla 3 Valores de cuerpo oscuro en imágenes de L7 ETM+

VALORES DE CUERPO OSCURO L5 TM						
Nº banda	1	2	3	4	5	7
media λ μm	0,483	0,565	0,66	0,83	1,65	2,215
14/12/2006	28	9	6	3	2	1
13/03/2007	45	16	12	10	6	3

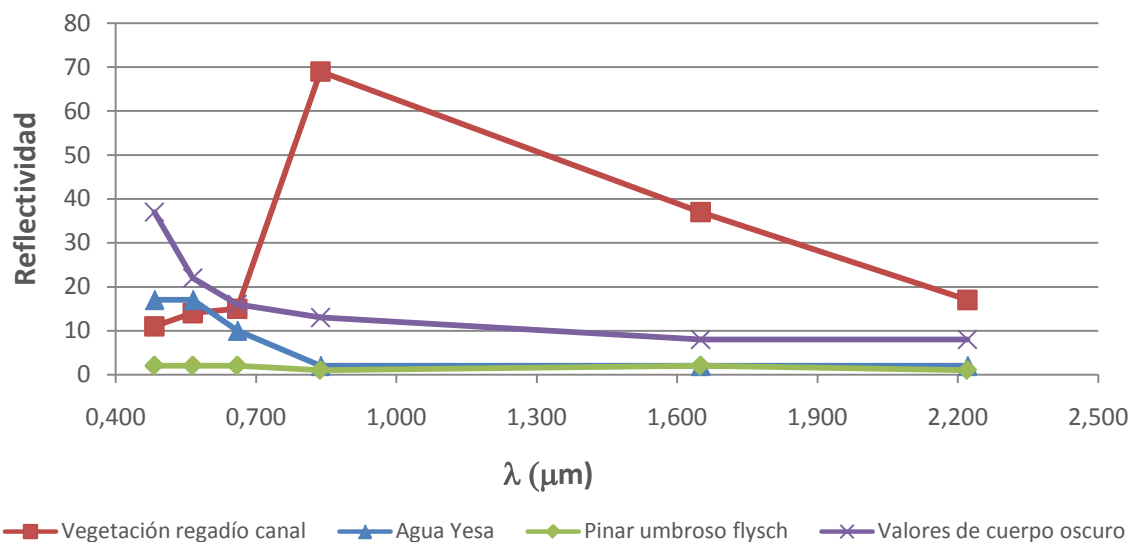
Tabla 4 Valores de cuerpo oscuro en imágenes de L5 TM

VALORES DE CUERPO OSCURO L8 OLI						
Nº banda	2	3	4	5	6	7
media λ μm	0,483	0,563	0,655	0,865	1,61	2,2
10/12/2013	6705	5937	5533	5236	5073	5058
12/02/2014	6890	6043	5609	5207	5021	5010
16/03/2014	7287	6290	5740	5470	5139	5137
17/04/2014	7794	6646	6049	5838	5207	5163
22/07/2014	7732	6612	5943	5583	5207	5186
29/12/2014	6578	5802	5439	5180	4985	4963
05/01/2015	6706	5936	5605	5326	5072	5068

Tabla 5 Valores de cuerpo oscuro en imágenes de L8 OLI

Para comprobar que estos ND son los correctos se ha contrastado con las diferentes cubiertas en la zona de estudio. Estas cubiertas han sido agua profunda (embalse de Yesa), zonas de pinares de umbría y zona de regadíos. A continuación se muestra un ejemplo para la imagen del día 20 de enero de 2000 con la comparación de las distintas cubiertas. (En el ANEXO I se pueden ver las gráficas valores de cuerpo oscuro).

Valores de cuerpo oscuro y comparación con las ocupaciones de suelo



Gráfica 1 Valores de cuerpo oscuro para la imagen de 20 de enero de 2000 y comparación con diferentes ocupaciones de suelo

Una vez que se han obtenido los valores de cuerpo oscuro, se restarán a la imagen por medio de un modelo desarrollado con la herramienta *ModelMaker* del software ERDAS, para eliminar la dispersión atmosférica de las imágenes. El modelo es el siguiente:

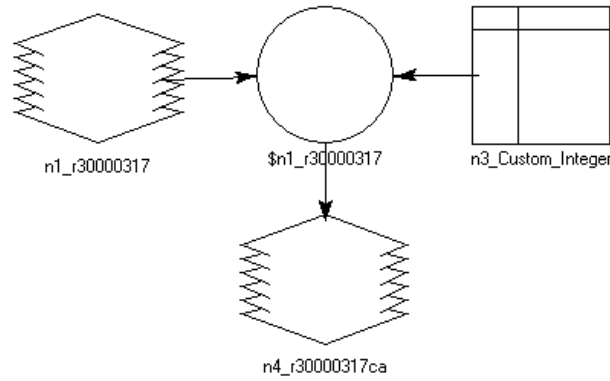


Figura 9 Modelo para realizar la corrección de la dispersión atmosférica

Corrección topográfica

La elevación solar a la hora que pasa el satélite (entre 10:31 y 10:45GMT, dependiendo del sensor y del año de adquisición) es baja en otoño e invierno, periodos en los que la nieve está presente e importantes para este estudio. Además hay que tener en cuenta que el área de estudio es una zona abrupta con relieves muy contrastados. Por lo que habrá algunas zonas, sobre todo en las laderas con orientación Norte en las que aparecerá completamente en sombra.

Para reducir estas áreas sombreadas se ha planteado la posibilidad de realizar la corrección topográfica y así intentar compensar las diferencias de iluminación que se producen en las zonas donde el terreno presenta estas formas irregulares. Se ha realizado en una de las imágenes (20 de enero de 2000) y se comprobará mediante la comparación con la misma imagen sin la normalización topográfica, pero si con la eliminación de la dispersión atmosférica. En este punto se decidirá si compensa realizarla o por el contrario reduce mínimamente las sombras y en cambio modifica el resto de la imagen

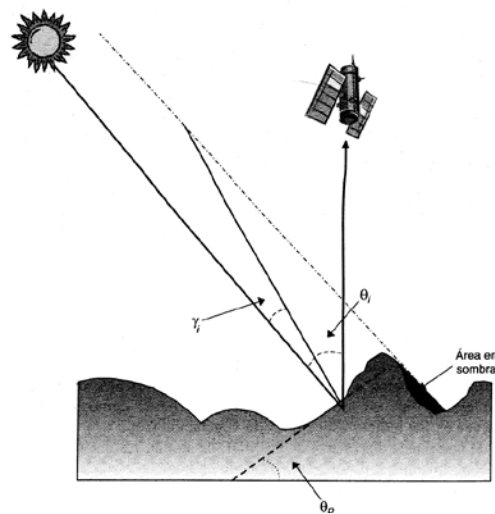


Figura 10 Efecto del relieve sobre la radiancia detectada por el sensor(Fuente: Chuvieco, 2010)

Para realizar la corrección topográfica es necesario un modelo digital de elevaciones (MDE). En el siguiente estudio se utilizará el MDE disponible en el Centro de Nacional de Información Geográfica, cuyo paso de malla es de 5 metros obtenido a partir de vuelos LIDAR del PNOA. La resolución espacial del MDE se debe ajustar a la imagen, y modelar las condiciones de iluminación en el momento que se adquiere la imagen, así se obtendrá las variaciones de la reflectividad resultado del efecto topográfico. Para ello en primer lugar se calcula el ángulo entre el ángulo solar incidente y la superficie, que dependen de los ángulos solares y de pendiente.

$$\cos \gamma_i = \cos \theta_i \cos \theta_p + \sin \theta_i \sin \theta_p \cos(\phi_a \phi_o)$$

$\cos \gamma_i$: coseno del ángulo entre el ángulo solar incidente y la superficie.

$\cos \theta_i$: ángulo cenital solar

$\cos \theta_p$: ángulo de orientación de la pendiente,

ϕ_a : ángulo de acimut solar

ϕ_o : ángulo de orientación de la pendiente

A partir del cálculo del ángulo entre el ángulo solar incidente y la superficie, se puede utilizar el método propuesto por Teillet (1982)

$$\rho_{h,i} = \rho_i \left(\frac{\cos \theta_i}{\cos \gamma_i} \right)$$

$\rho_{h,i}$: reflectividad de un pixel i en terreno horizontal

ρ_i : pendiente

θ_i : ángulo cenital solar

γ_i : ángulo de incidencia correspondiente a ese pixel.

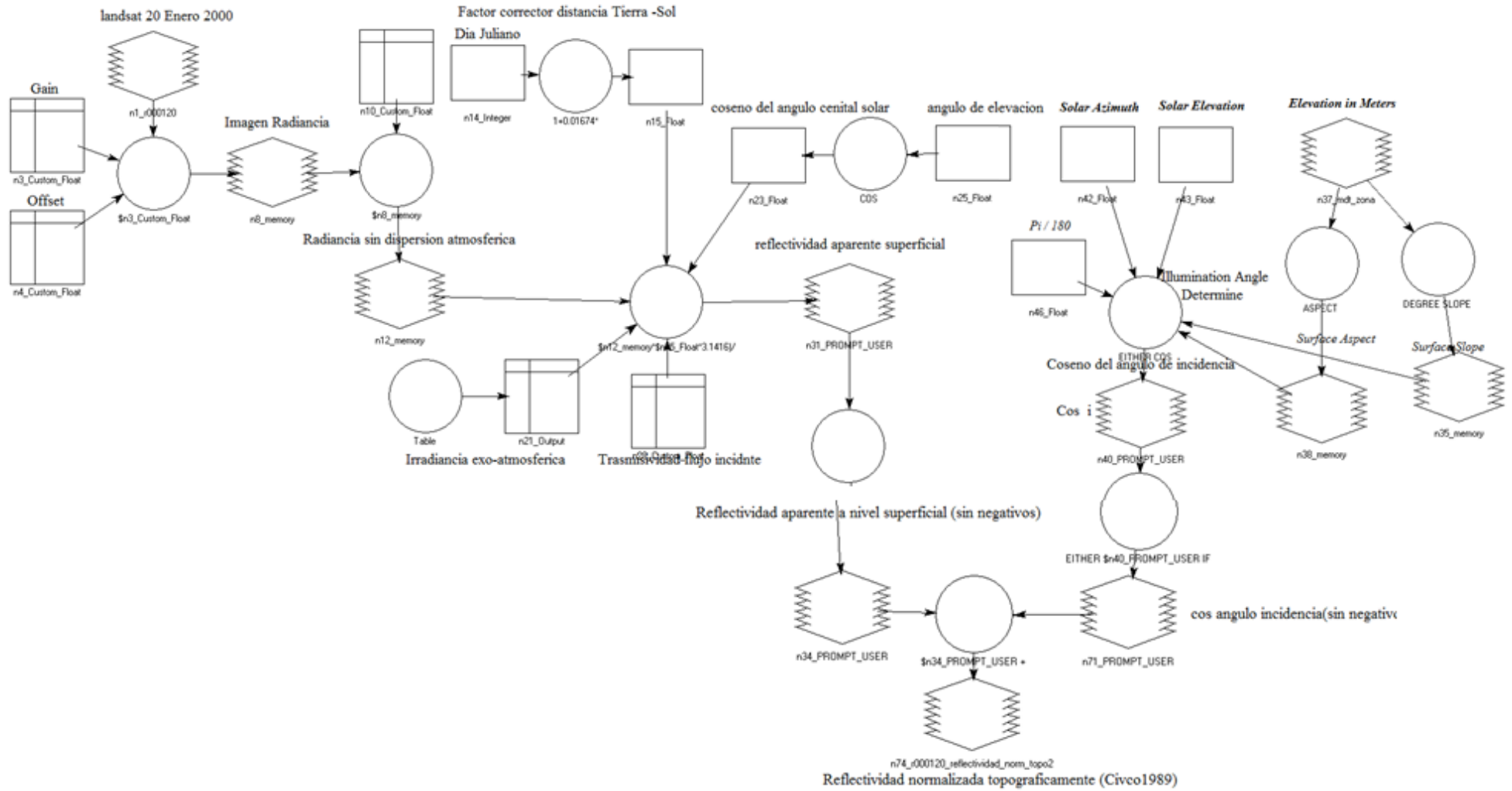
Este método se ha comprobado que hace una sobre-corrección de la imagen en las zonas de muy baja iluminación, por lo que se ha propuesto ponderar la imagen de la iluminación en función de las condiciones medias de la iluminación de la imagen (Civco, 1989).

$$\rho_{h,i} = \rho_i + \rho_i \frac{(\cos \gamma_m - \cos \gamma_i)}{(\cos \gamma_m)}$$

El subíndice m indica el valor promedio de la iluminación. Este modelo reduce el efecto de la topografía, aunque no todo lo que debiera, sobre todo en las zonas donde hay relieves muy contrastados.

Este modelo teórico se procesa mediante un modelo desarrollado con la herramienta *ModelMaker* del software ERDAS, que se expone a continuación:

Modelmaker (ERDAS) Corrección Radiométrica



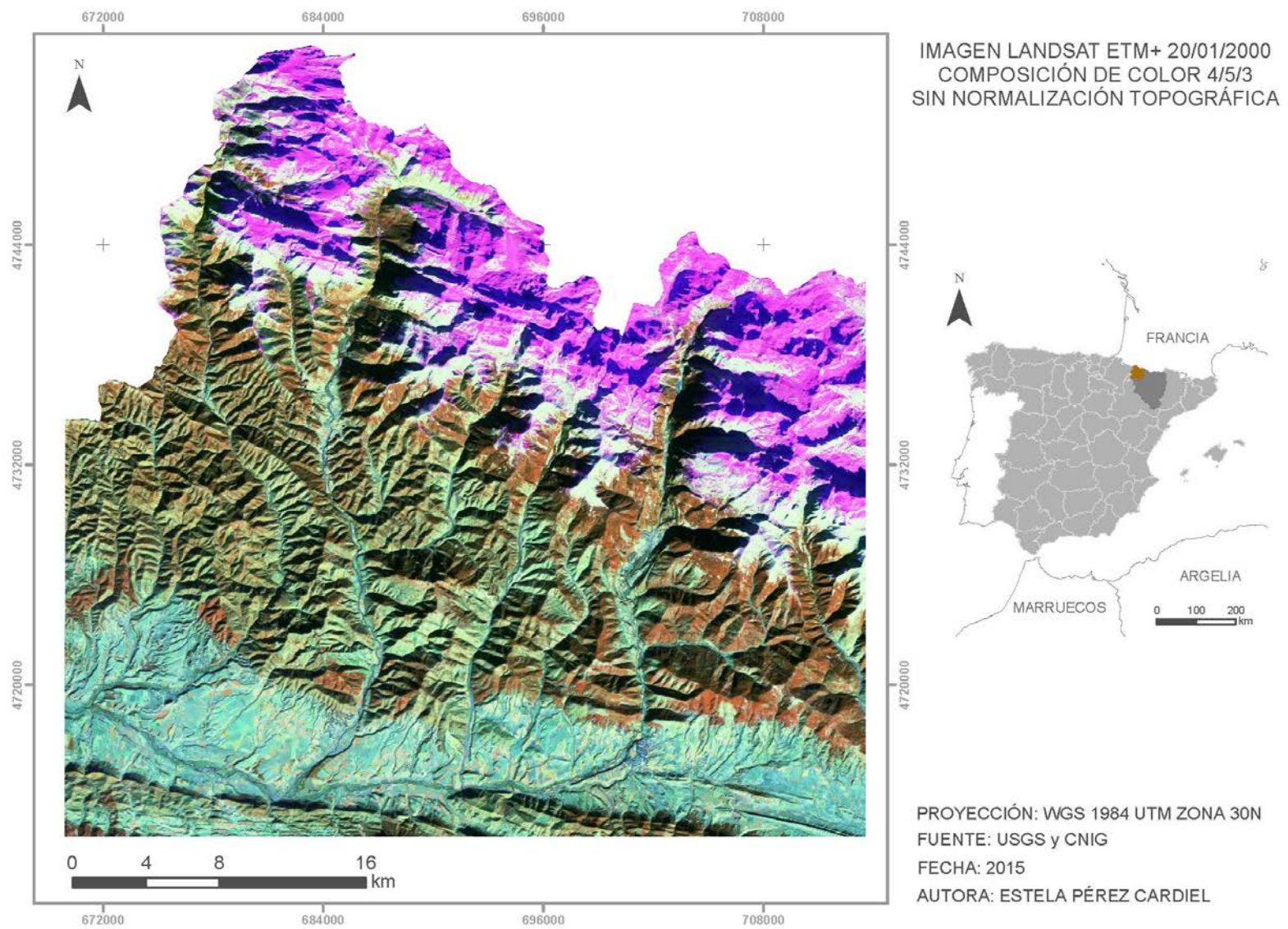


Figura 11 Imagen LandsatETM+ de 20/01/2000 sin la normalización topográfica

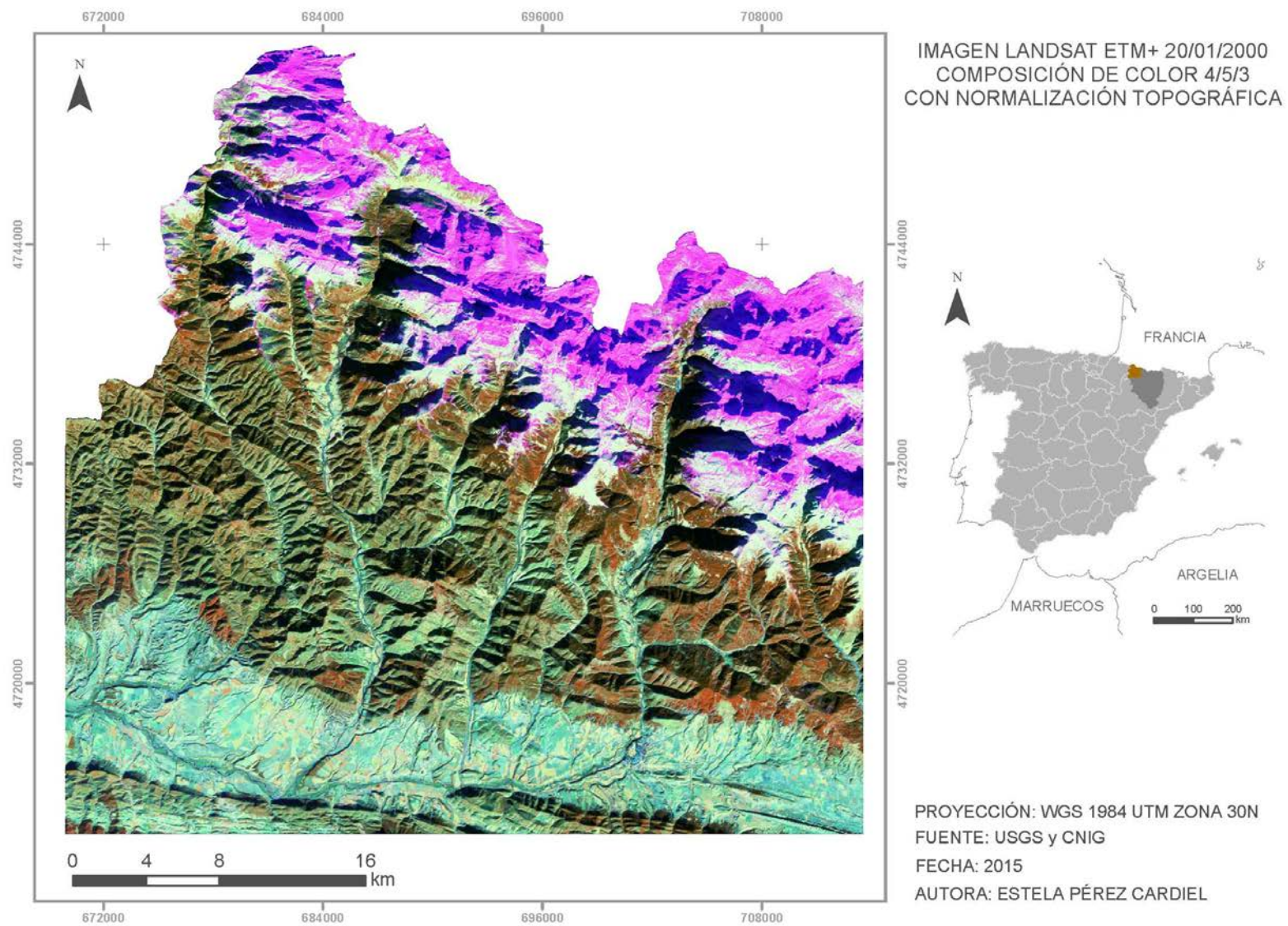


Figura 12 Imagen LandsatETM+ de 20/01/2000 con la normalización topográfica

En las imágenes anteriores se observa una misma zona en la fecha 20 de enero de 2000, antes y después del procedimiento de corrección radiométrica. A simple vista se observa el efecto del aplanamiento del terreno.

4.3.2 Proceso de las imágenes

Cálculo y selección del Índice de Diferencia Normalizada de la nieve

Para realizar la detección de la nieve se ha utilizada la metodología utilizada por (Dozier, 1989, Cea López, C., & Pons Fernández, X. 2007) y se basa en el *Normalized Difference Snow Index* (NDSI). En el momento en que se va a utilizar el software para realizar el índice, se observa que existen varios índices para distinguir los píxeles de nieve. Es por ello y a pesar de haber leído en diferentes fuentes bibliográficas que para calcular el Índice de Diferencia Normalizada de la nieve se utilizaba el algoritmo que se expone a continuación y es el primero de los índices que se han llevado a cabo:

$$\text{NDSI: } \frac{\text{banda } 2 (0,56 \mu\text{m}) - \text{banda } 5 (1,65 \mu\text{m})}{\text{banda } 2 (0,56 \mu\text{m}) + \text{banda } 5 (1,65 \mu\text{m})}$$

También se ha comprobado si los demás índices eran válidos para llevar a cabo los objetivos propuestos en el trabajo. Al igual que en el caso de la normalización topográfica, la comprobación de los índices se ha realizado en la imagen elegida anteriormente (imagen de 20 de enero de 2000).

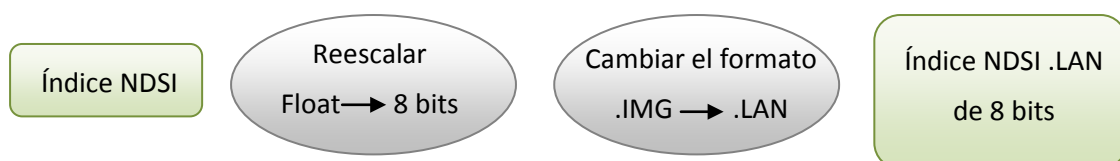
El siguiente índice es el NDSII 2 *Normalized Difference Snow/Ice Index 2*, en el que utiliza el algoritmo:

$$\text{NDSII 2: } \frac{\text{banda } 2 (0,56 \mu\text{m}) - \text{banda } 4 (0,83 \mu\text{m})}{\text{banda } 2 (0,56 \mu\text{m}) + \text{banda } 4 (0,83 \mu\text{m})}$$

Y por último se ha realizado el NDSII (TM) *Normalized Difference Snow and Ice Index*, cuyo algoritmo es:

$$\text{NDSII TM: } \frac{\text{banda } 3 (0,66 \mu\text{m}) - \text{banda } 5 (1,65 \mu\text{m})}{\text{banda } 3 (0,66 \mu\text{m}) + \text{banda } 5 (1,65 \mu\text{m})}$$

Una vez que tenemos calculados los Índices de Diferencia Normalizada de la nieve. La comparación de la imagen se ha realizado con el software DIMPLE por lo que se ha tenido que reescalar la imagen a 8 bits y cambiar el formato a de .img a .lan.



Para comparar cada uno de ellos se ha realizado varios gráficos crossplot (o cluster) con el software DIMPLE, para contrastar y tomar decisiones.

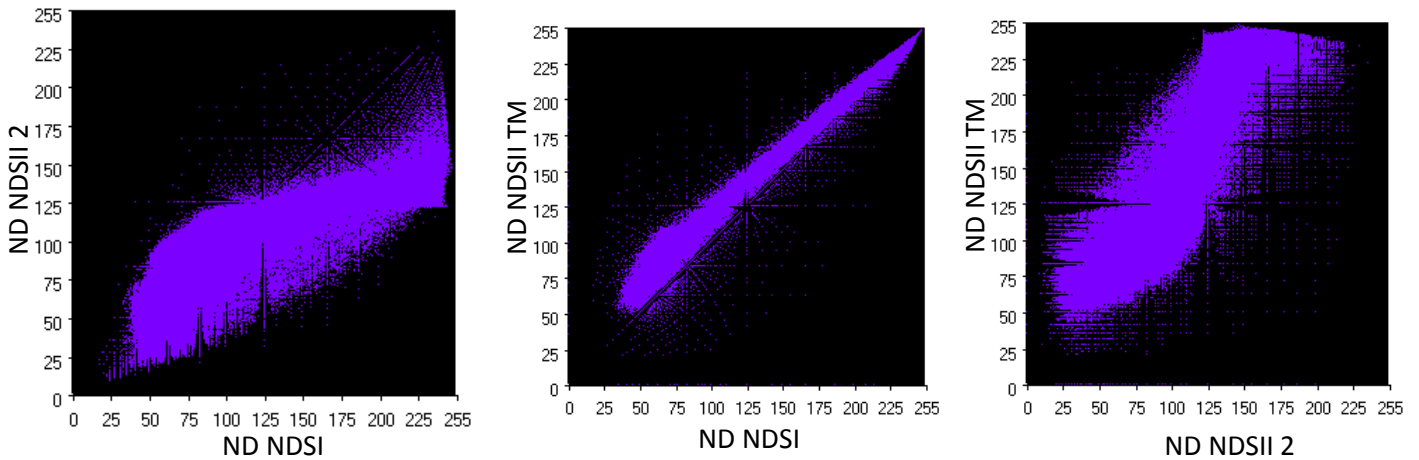


Figura 13 Gráficos Cross Plot para comparar los diferentes Índices de Diferencia Normalizada de la nieve

Tal y como reflejan los gráficos existen diferencias significativas entre cada uno de los índices. Son mayores las diferencias cuando se compara el NDSII 2 con los otros dos, puesto que este índice realiza el cociente entre una banda del espectro óptico y otra del infrarrojo próximo. Éste no es válido para nuestros objetivos, pero si se podría utilizar en un futuro para diferenciar los tipos de nieve.

Las diferencias son menores cuando se compara el NDSI con el NDSII TM, puesto que ambos utilizan las bandas de espectro óptico y el infrarrojo medio, así pues los valores son similares. Sin embargo, los valores del NDSII TM son más altos que el NDSI, entonces el umbral se debe poner alto para delimitar toda la nieve. Si se pone el umbral muy alto no se delimita por completo la nieve, y si el umbral disminuye además de delimitar la nieve se recogen zonas de sombra y otras zonas que carecen de superficie nevada.

En conclusión el índice NDSI es el que mejor representa la superficie cubierta por la nieve, a este índice hay que fijarle el umbral en 0,4 (Dozier, 1989) este criterio ayuda a distinguir la nieve de los suelos brillantes, rocas y nubes. El algoritmo utilizado es el siguiente:

$$\text{NDSI: } \frac{\text{banda } 2 - \text{banda } 5}{\text{banda } 2 + \text{banda } 5} > 0,4$$

Este índice incluye la banda 2, que es la banda donde la nieve tiene mayor reflectividad que cualquier otra superficie terrestre y la banda 5 donde la nieve es una de las cubiertas con menor reflectividad, a excepción del agua. Esto se observa en la Figura 14.

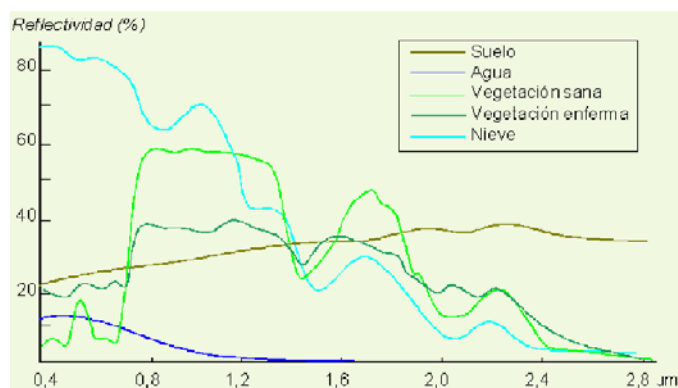


Figura14 Signaturas espectrales típicas para distintas cubiertas.
Fuente: Chuvieco (2010)

Comparación de la imagen de fecha 20 de enero 2000 con corrección radiométrica y sin ella

La comparación de las imágenes con corrección radiométrica y sin ella, se ha realizado una vez que se ha aplicado los diferentes índices para comprobar que no había diferencias significativas en cada uno de los índices y las imágenes con y sin corrección.

Del mismo modo que en el apartado anterior, los índices se han rescalado y se les ha cambiado el formato a .lan, para poder visualizarlos en el software DIMPLE. Para la imagen con la corrección de la dispersión atmosférica se ha denominado (**índice CA**) y para la imagen con la normalización topográfica se ha denominado (**índice NT**).

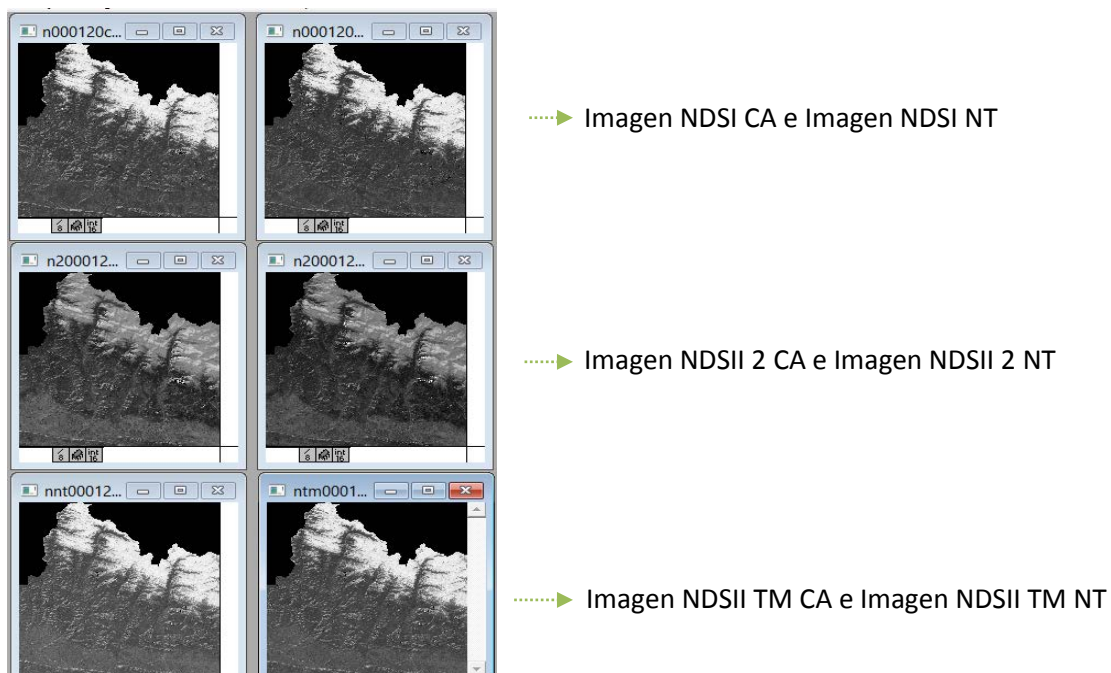


Figura 15 Imágenes con los diferentes índices con corrección de la dispersión atmosférica y con la normalización topográfica

Para comparar cada uno de ellos se ha realizado varios gráficos crossplot, al igual que en el caso anterior. Pero en este apartado se compararán los índices NDSI con corrección de la dispersión atmosférica y los índices con la normalización topográfica.

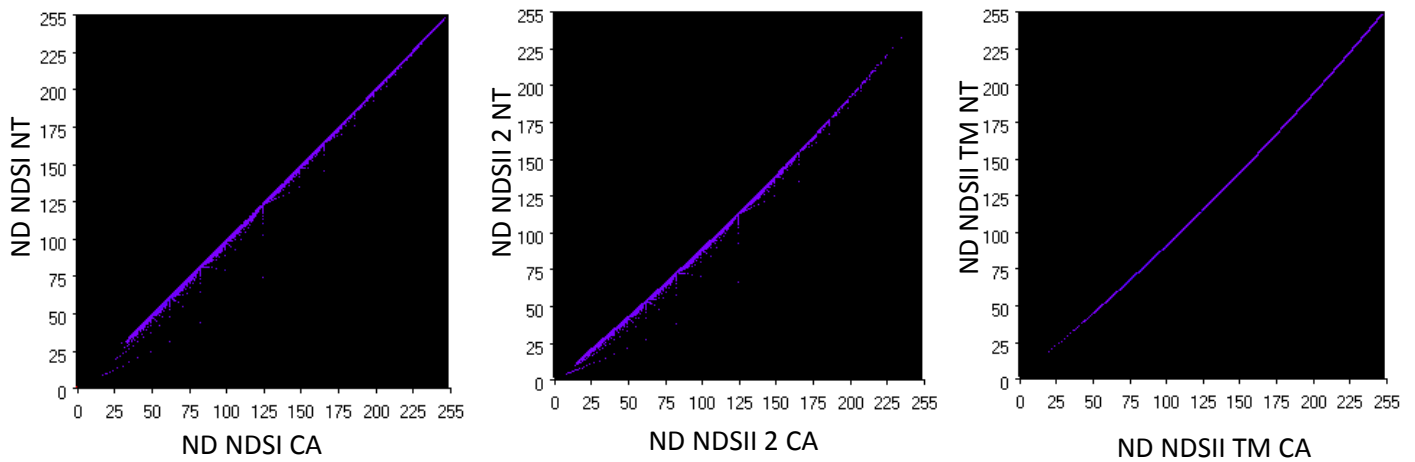


Figura 16 Gráficos Cross Plot para comparar los diferentes Índices de Diferencia Normalizada de la nieve con corrección de la dispersión atmosférica y con la normalización topográfica.

Como se observa en los gráficos entre los índices con corrección de la dispersión atmosférica y con la normalización topográfica, tienen una buena correlación, sobretodo el índice NDSI -que es el que se va a utilizar-, en los otros dos se observa como ligeramente curvado pero aun así la correlación es buena.

En el NDSI que vamos a utilizar a pesar de ser el mejor correlacionado, se observa como la correlación es menor en la parte baja de la gráfica, y en la parte alta la correlación es mayor. En este estudio la parte que nos interesa son los valores altos, que se encuentran en la parte superior de la gráfica.

Al observar esta la correlación entre las imágenes se decidió que no era necesario realizar la normalización topográfica, puesto que no difiere significativamente de los valores de la imagen con la corrección de la dispersión atmosférica.

A si pues una vez que se ha seleccionado el pre-tratamiento de la imagen sobre la que se va a realizar el índice. Se procede utilizará el software de ARCGIS para realizar el umbral y poder discretizar la nieve. En primer lugar se hace una reclasificación con el umbral a 0,4 obteniendo un archivo binario (nieve > de 0,4= 2 y no nieve < 0,4= 1). A continuación para utilizar solo la información de la nieve se realiza una extracción por el atributo, que en este caso seria 2 y así se obtiene la superficie innivada.



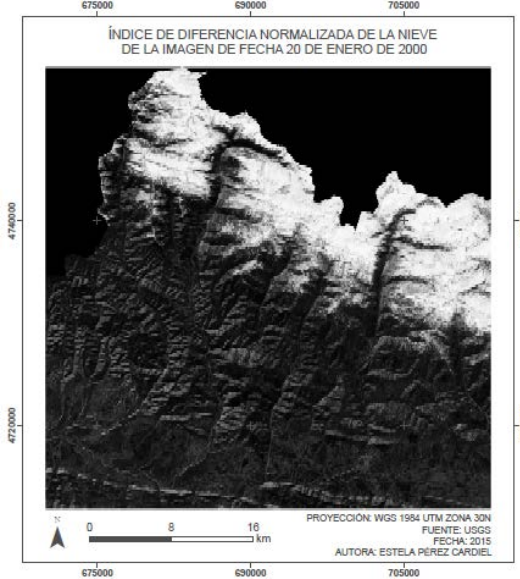
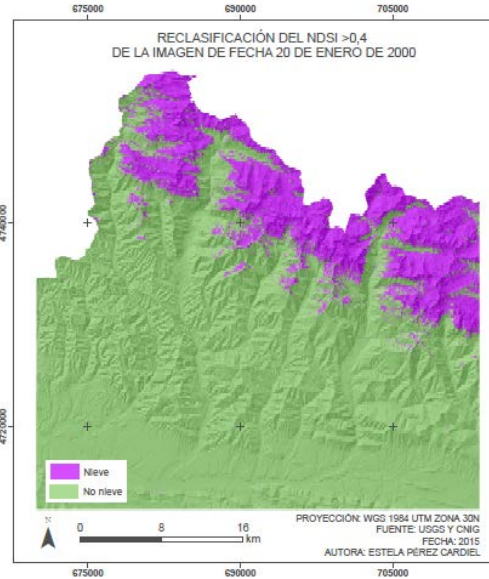
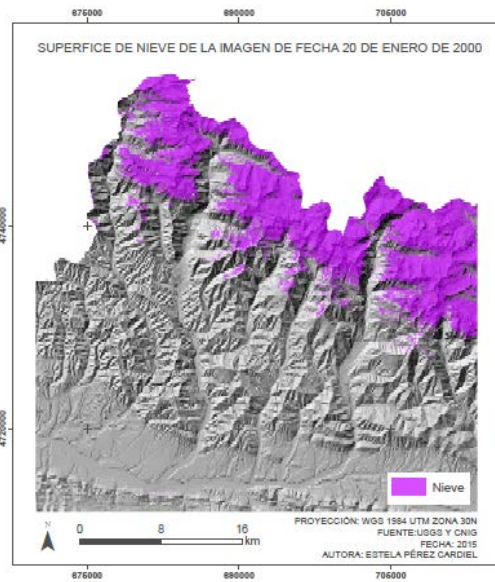
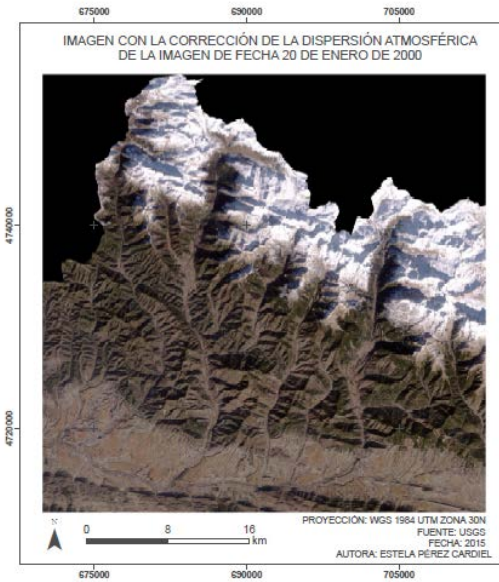
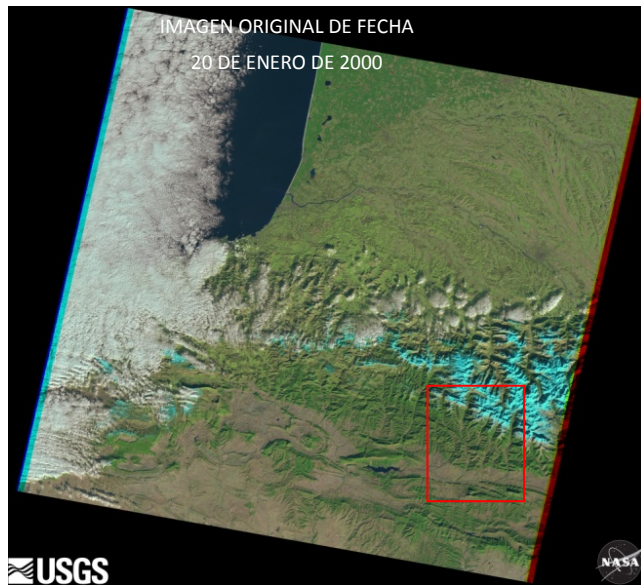


Figura 17 Secuencia del procesado de la imagen para obtener la superficie de nieve

4.4 TRATAMIENTO DE LAS VARIABLES PARA EL ANÁLISIS

Para calcular las variables estructurales para llevar a cabo el análisis se ha seguido el siguiente esquema.

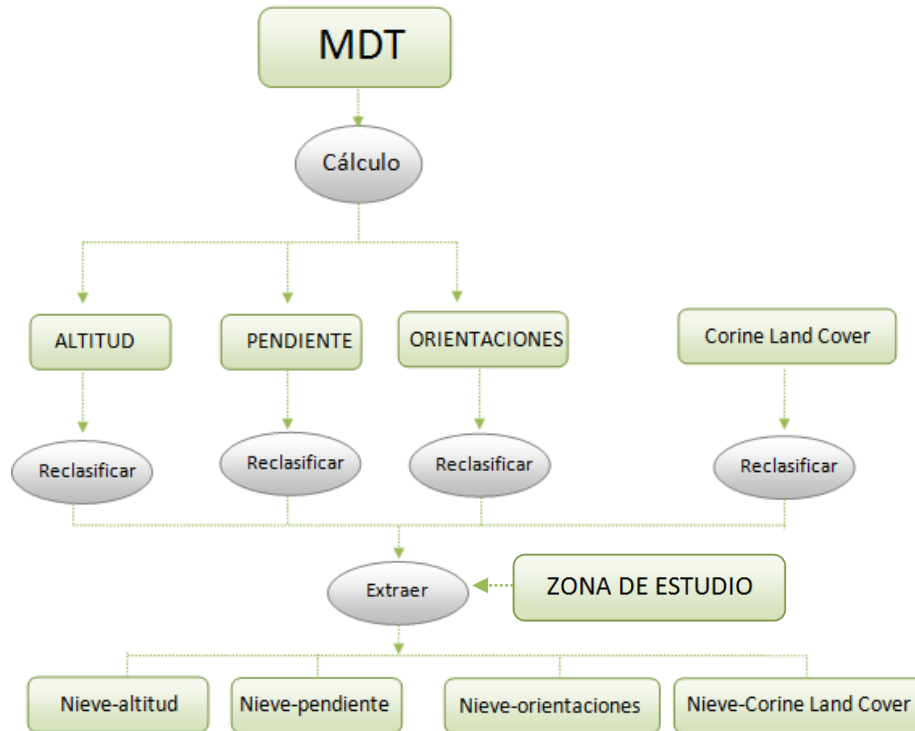


Figura 18 Esquema del procesado MDT y Corine Land Cover para calcular las variables estructurales.

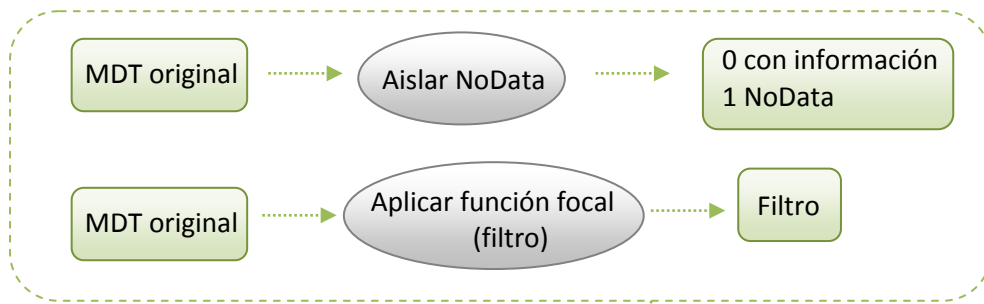
4.4.1 Tratamiento del modelo digital del terreno

El modelo digital del terreno (MDT) se obtuvo del Centro Nacional de Información Geográfica, cuyo paso de malla son 5 m y ha sido por medio de la interpolación a partir de la clase terreno de vuelos LIDAR del PNOA.

El MDT tiene formato ASCII matriz ESRI (asc), además tienen las mismas dimensiones y distribución que las hojas MTN50, por lo que para completar la zona de estudio han sido necesarias varias hojas (9). Mediante la función *Mosaic* de ARCGIS se han unido todos los archivos para formar un solo archivo.

Corrección del MDT y recorte de la zona de estudio.

El MDT descargado carece de un área de píxeles dentro de nuestra zona de estudio, por lo que en primer lugar se ha de corregir esta deficiencia. Se aplica un filtro (función focal) en el que la falta de píxeles se completará con la media del valor del valor de sus píxeles vecinos. Se realiza con el software ARCGIS.



Realiza operación Condicional: Con (IsNull, MDT original, (int(filtro)), >value 0)

IsNull: Determina qué valores del ráster de entrada son NoData a través de cada celda individual. Devuelve un valor de 1 si el valor de entrada es NoData y 0 para las celdas que no lo son.

La función condicional expresa: Incluir el MDT original en valores igual a 0 e incluir el filtro en los valores mayores a 0. El resultado que se obtiene es que incluye el filtro para la zona donde no hay datos.

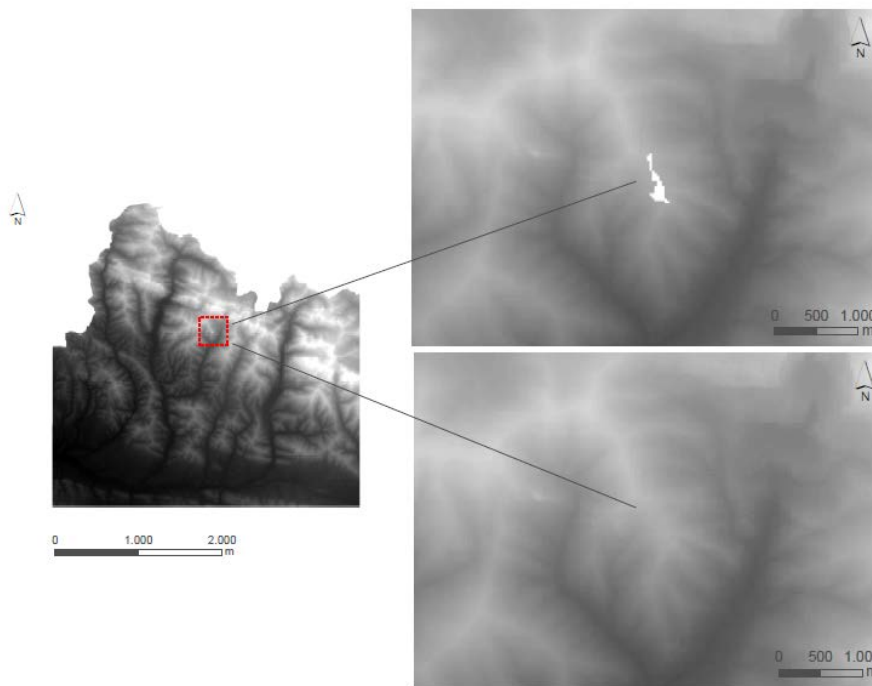
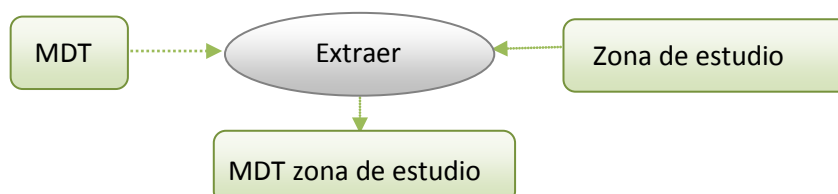


Figura 19 Corrección de la deficiencia de MDT

Como en el caso de las imágenes con el MDT se ha realizado en recorte de la zona de estudio, utilizando el software ARCGIS.



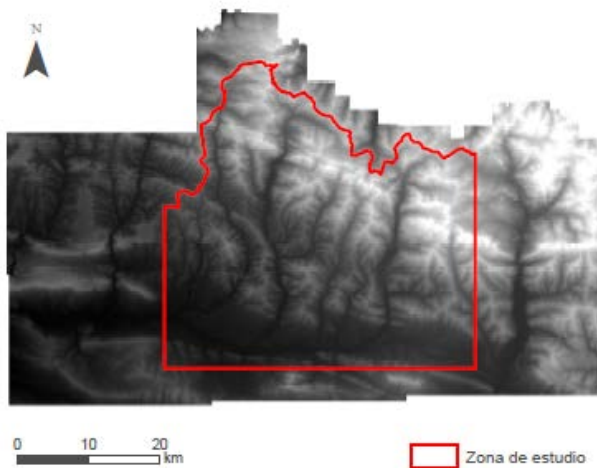


Figura 20 MDT original

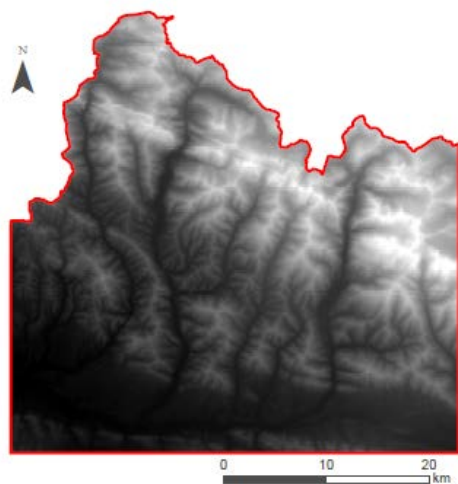


Figura 21 MDT de la zona de estudio

Georreferenciación

El MDT se encuentra georreferenciado en coordenadas ETRS 89 Huso 30 y 31. Para poder trabajar con las imágenes Landsat, cuya georreferenciación es WGS 84 zona 30, se ha proyectado el MDT con las mismas coordenadas que las imágenes Landsat.



4.4.2 Elaboración de los mapas de altitud, pendiente y orientaciones.

La información de la altitud, pendiente y orientación se ha obtenido a través del MDT descargado del CNIG. Se ha calculado mediante el proceso realizado con el módulo *SpatialAnalyst Tools-Surface-* de ARCGIS sobre el archivo raster MDT. Los resultados obtenidos del paso anterior se han reclasificado para poder realizar comparaciones de los diferentes archivos de distribución de nieve.

A continuación se muestran los mapas resultantes de altitud, pendiente y orientación reclasificados.

Altitud

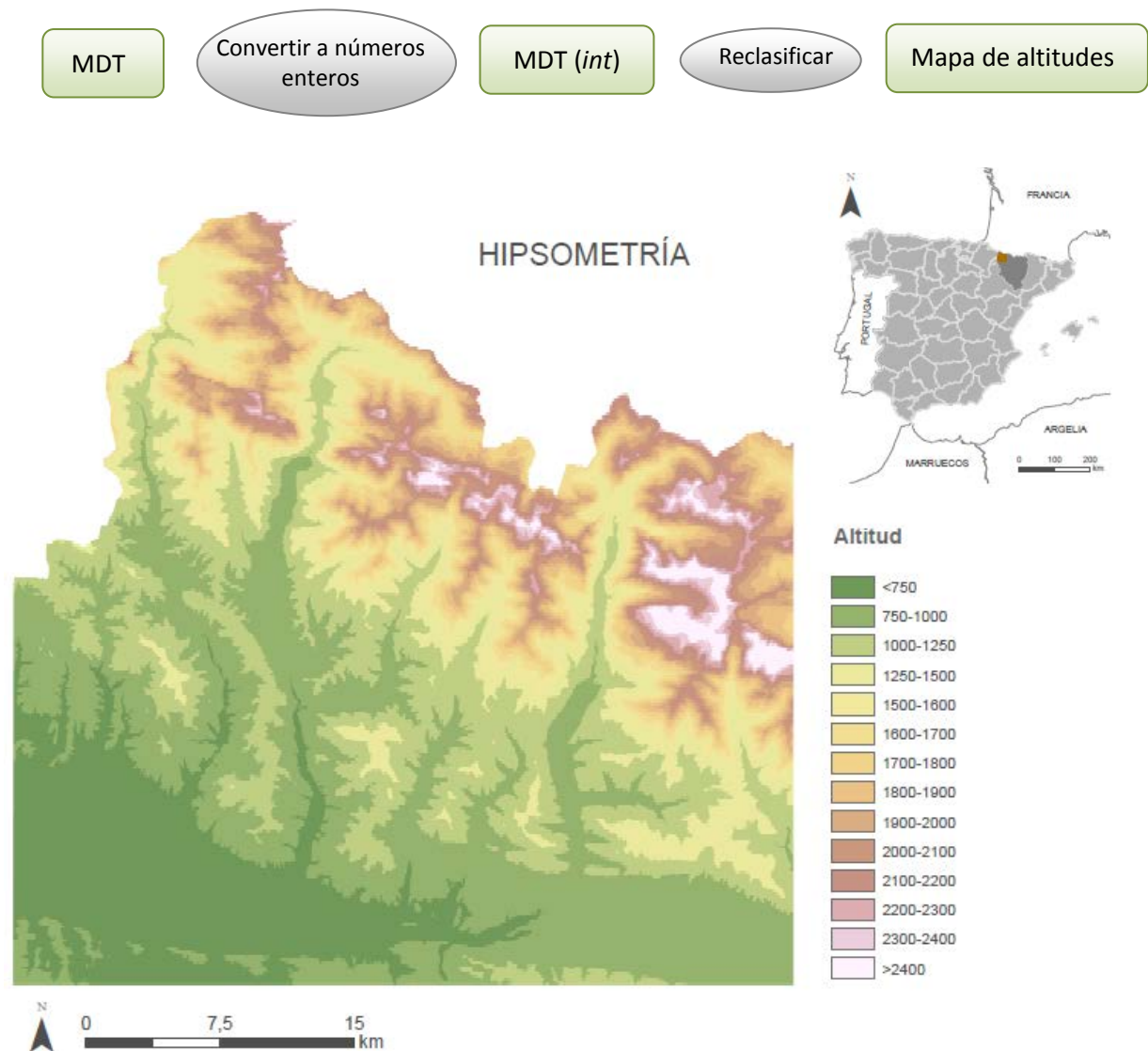


Figura 22 Mapa hipsométrico del área de estudio. Elaboración propia

	<750	750-1000	1000-1250	1250-1500	1500-1600	1600-1700	1700-1800
% de superficie	15,01	25,70	18,93	10,70	3,48	3,85	4,19
	1800-1900	1900-2000	2000-2100	2100-2200	2200-2300	2300-2400	>2400
% de superficie	4,42	4,19	3,43	2,48	1,54	0,94	1,14

Tabla 6 Porcentaje de superficie en cada uno de los rangos de altitudinales

El rango altitudinal está comprendido entre 518 y 2885 m, se han dividido en clases iguales a excepción del extremo inferior, donde la nieve no esta tan presente y las divisiones abarcan mayor rango y el extremo superior donde la superficie cuya altitud es superior a 2400m es menor y se ha recogido en una sola clase. De esta manera el rango altitudinal se ha

dividido en 9 clases iguales, 4 desiguales en el extremo inferior y 1 desigual en el extremo superior.

En el área de estudio el mayor porcentaje pertenece a la altitud desde el mínimo hasta los 1250 msnm, pero esta zona es la que menos interesa puesto que la superficie de nieve es muy escasa y permanece poco tiempo en esta zona. El área de interés es la comprendida entre los 1250 m de altitud hasta el máximo. En esta zona el mayor porcentaje le corresponde al rango altitudinal de 1900 a 2000 m y conforme se aumenta en altitud el porcentaje de superficie va disminuyendo.

Pendientes

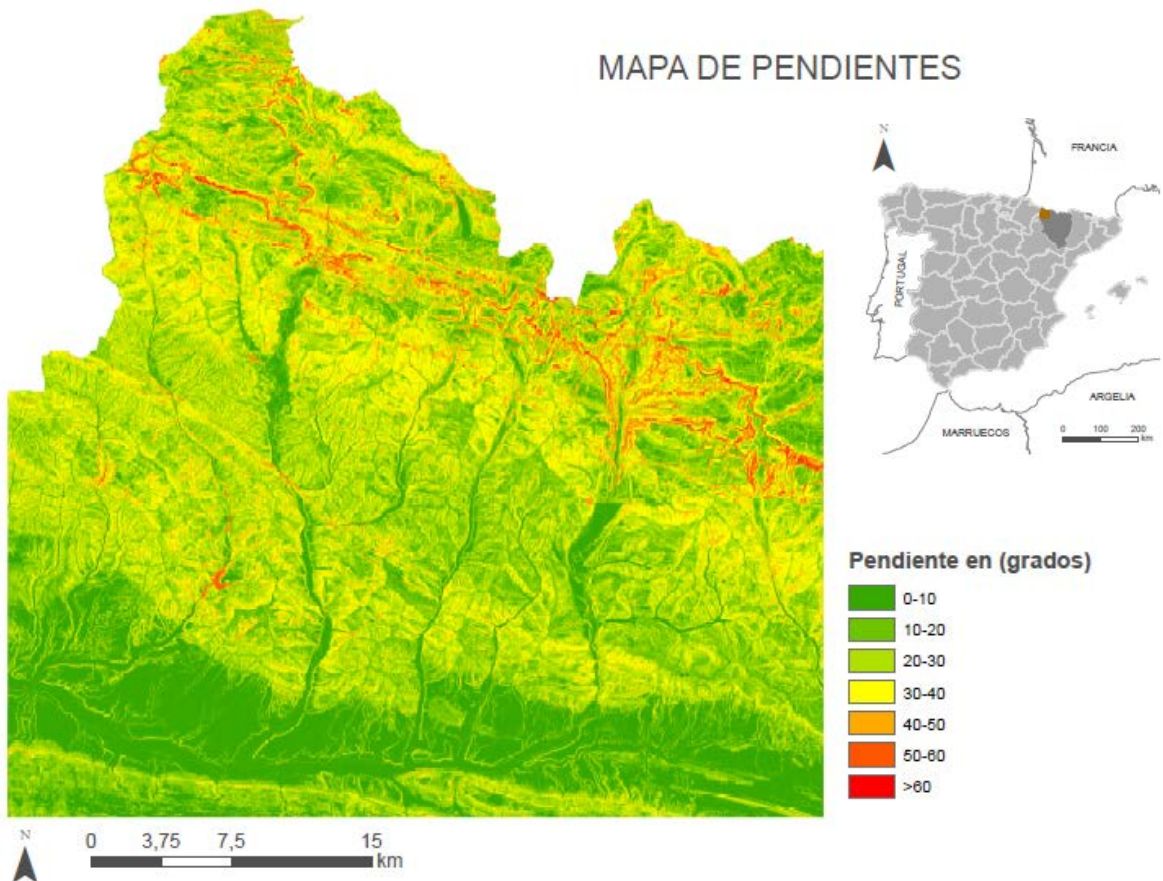


Figura 23 Mapa de pendientes del área de estudio. Elaboración propia

Pendiente	0-10°	10-20°	20-30°	30-40°	40-50°	50-60°	>60°
% de superficie	20,25	20,83	30,24	22,61	4,20	1,15	0,71

Tabla 7 Porcentaje de superficie en cada uno de los rangos de pendiente

Tal y como se observa en el mapa y tabla anterior, los porcentajes de la distribución de la pendiente en el terreno son similares, siendo algo mayor en de 20 a 30° ya que se trata de un relieve contrastado.

Los menores porcentajes son de las pendientes más abruptas superiores a 40° y se localizan en la zona Norte, correspondiéndose con las Sierras Interiores.

Las pendientes menores del 0 a 20° se sitúan en la depresión Intrapirenaica y en los fondos de los valles de los ríos, ocupando un total superior entre ambas de más del 40%.

Orientaciones

MDT *Analyst Tools-Surface-Aspect* Orientaciones Reclasificar Mapa de orientaciones

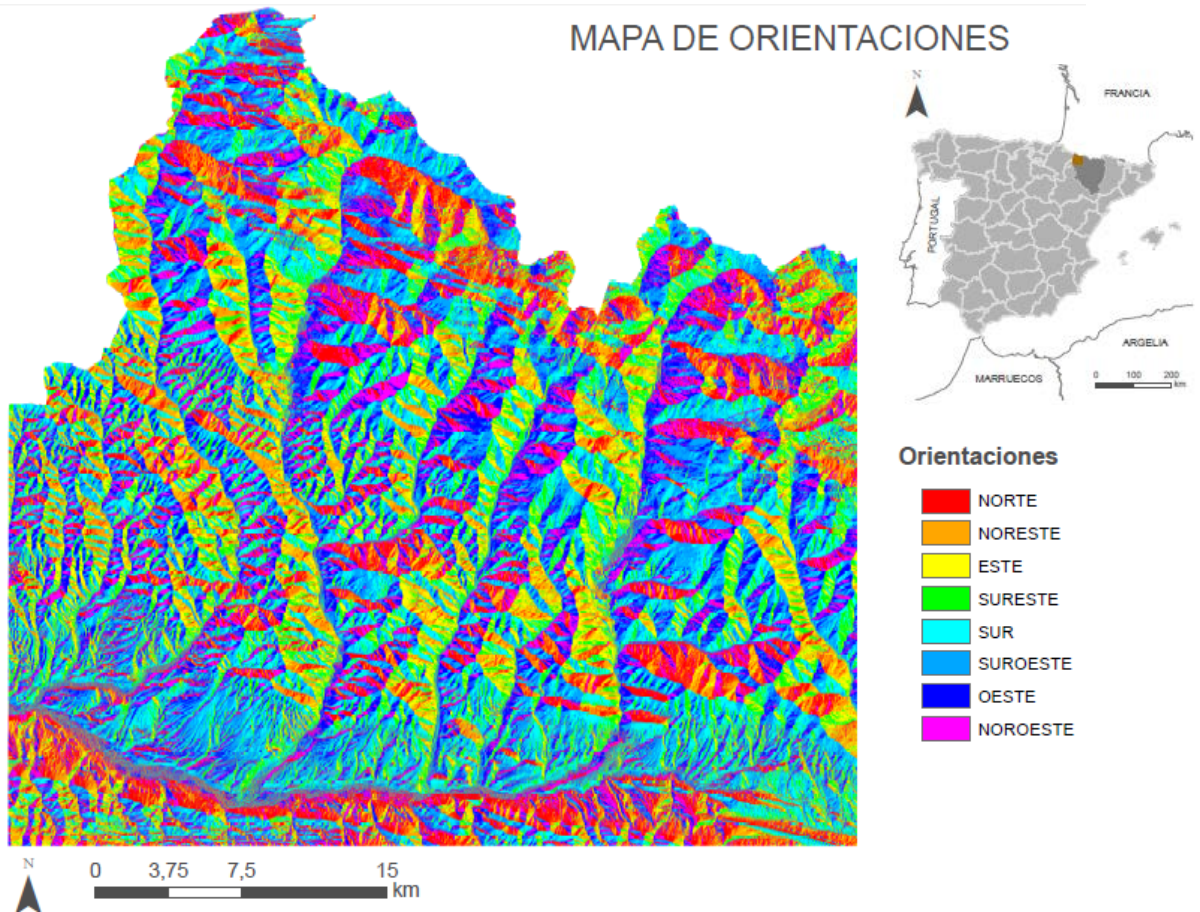


Figura 24 Mapa de orientaciones del área de estudio. Elaboración propia

Orientación	NORTE	NORESTE	ESTE	SURESTE	SUR	SUROESTE	OESTE	NOROESTE
% de superficie	11,58	10,52	9,96	11,89	16,16	16,34	12,59	10,95

Tabla 8 Porcentaje de superficie en cada uno de los rangos de orientación

En cuanto a las orientaciones se han distribuido en 8 clases de 45° cada una. En el mapa y en la tabla se puede observar que prácticamente se sitúan en un porcentaje similar cada una de ellas, siendo algo mayor las orientaciones Sur-Suroeste.

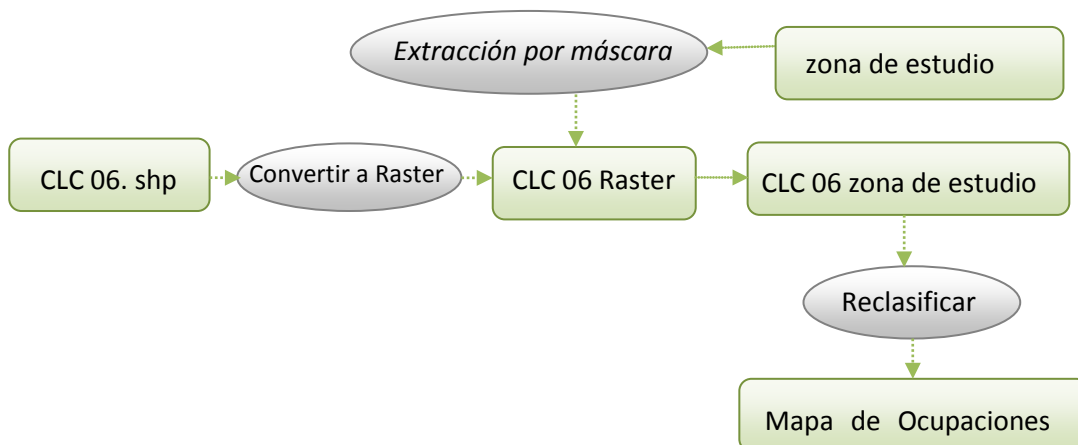
4.4.3 Elaboración del mapa de ocupación del suelo

La cubierta de nieve es uno de los factores que determina las ocupaciones de suelo, sobretodo en el caso de la vegetación alpina y a su vez las ocupaciones de suelo hacen que la cubierta nival permanezca más o menos en la superficie. Es por ello que se ha tenido en cuenta a la hora de realizar este estudio.

El mapa de las ocupaciones de suelo de la zona de estudio se ha elaborado a partir del mapa de ocupación de suelo en España, correspondiente al proyecto europeo CorineLandCover. Incluye las versiones de 1990, 2000 y 2006, así como los mapas de cambios de ocupación del suelo entre los años 1990-2000 y 2000-2006. Los cambios entre 1990-2000 se recogieron mediante la imagen de referencia Landsat 7. Sin embargo, los cambios entre 2000-2006 se realizaron con la imagen de referencia Spot 5. (CNIG)

La clasificación se ha ampliado a 5 niveles de jerarquía, pero en este estudio únicamente se han utilizado 3, ya que el resultado era suficiente para completar los objetivos.

Como en los casos anteriores el mapa de ocupaciones de suelo se encontraba en formato .shp con un sistema geodésico ETRS89 y proyección UTM huso 30. Así que se procedió a cambiar el sistema geodésico a WGS 1984 y a realizar el recorte de la imagen con el área de estudio.



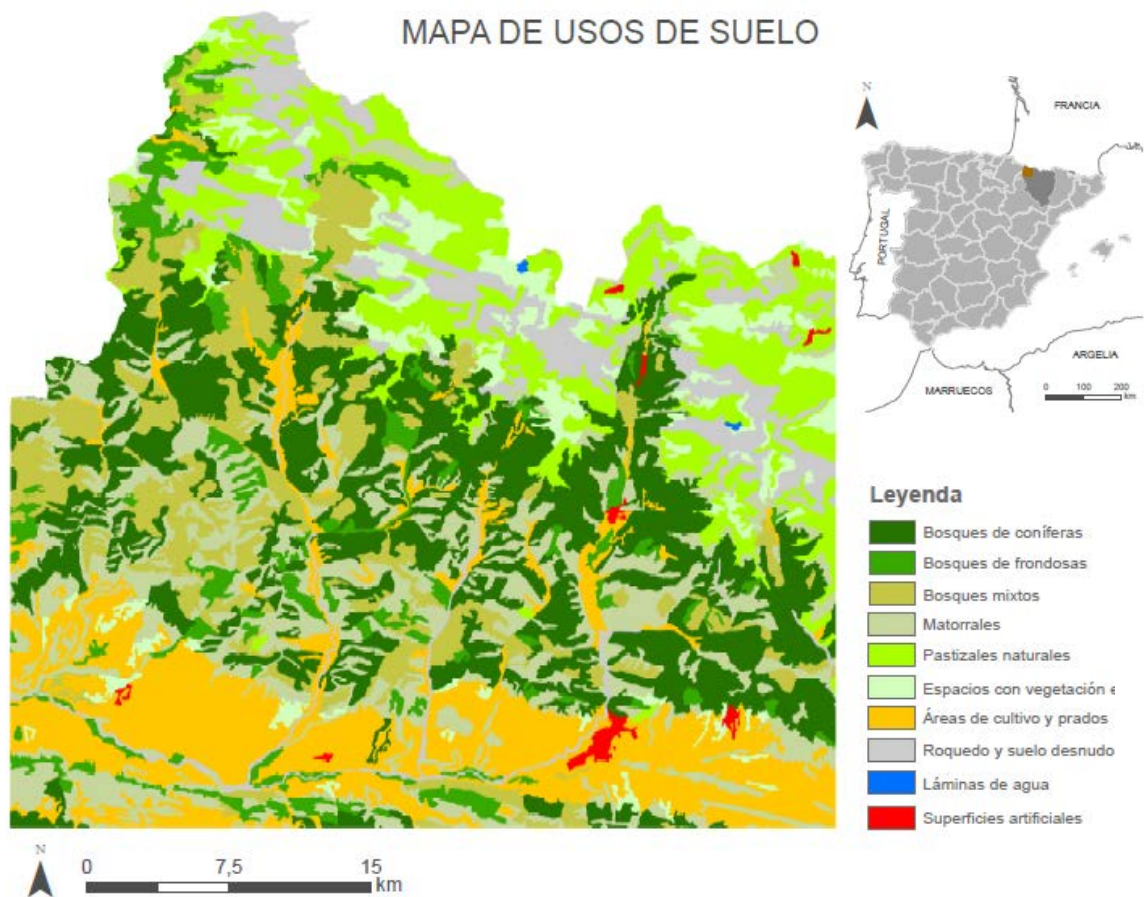


Figura 25 Mapa de ocupaciones de suelo en el área de estudio

Para realizar mejor el análisis se ha reclasificado las ocupaciones de suelo y se han agrupado siguiendo el criterio de la similitud entre clases reduciendo a 10 clases. Las clases han quedado reducidas de la siguiente forma:

- Matorrales: agrupa matorrales en transición, matorrales húmedos y matorrales esclerófilos.
- Pastizales naturales: agrupa pastizales naturales y turberas y prados húmedos.
- Áreas de cultivo y prados: agrupa superficies agrícolas con vegetación natural, cultivos de regadío, cultivos secano, mosaico de cultivos, y prados y praderas
- Roquedo y suelo desnudo: agrupa roquedos y playas, dunas y arenales (que se corresponde con los cauces de los ríos).
- Superficies artificiales: agrupa zonas urbanas dispersas, zonas urbanas, aeropuerto, zona industrial, carreteras y ferrocarril.

Por último, las clases que no se han agrupado han sido bosque de coníferas, bosque de frondosas, bosque mixto, espacios con vegetación escasa y láminas de agua. (Las láminas de agua no se tendrán en cuenta a la hora de realizar el análisis).

Clases de ocupación de suelo	% de Superficie
Bosques de coníferas	22,46
Bosques de frondosas	5,97
Bosques mixtos	11,2
Matorrales	17,21
Pastizales naturales	12,76
Espacios con vegetación escasa	5,46
Áreas de cultivo y prado	16,79
Roquedo y suelo desnudo	7,68
Superficies artificiales	0,47

Tabla 9 Porcentaje de superficie en cada uno de las ocupaciones de suelo

5. RESULTADOS

De la metodología aplicada se han obtenido una serie de archivos en formato raster que han sido analizados mediante una serie de gráficas que ayudan a interpretar los resultados.

Los resultados se muestran siguiendo una secuencia, pero sin pretender que ésta sea un modelo, puesto que los resultados pertenecen a una serie de corta de años.

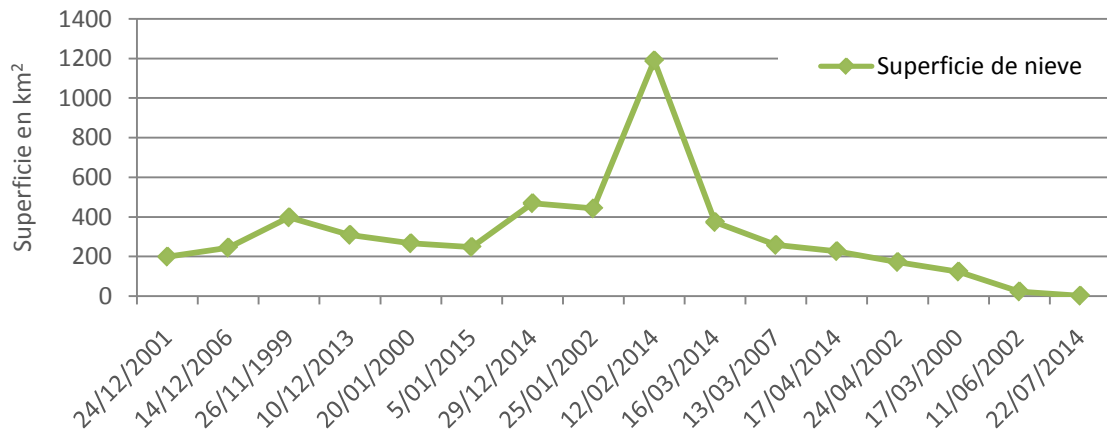
Los resultados se han analizado desde varios puntos de vista. Se ha realizado un análisis del porcentaje de extensión de nieve general y para cada una de las variables estudiadas. El análisis de las gráficas ha permitido identificar cuatro situaciones tipo que se describen e interpretan a continuación. También se analiza las situaciones extremas espacialmente, para ello se ha seleccionado el área correspondiente al flysch, donde la nieve se distribuye de forma más reducida.

5.1 Evolución intra-anual del manto nival

A continuación se muestra una grafica con la distribución de la nieve según la secuencia "modelo", tal y como queda reflejado sin tener en cuenta factores como la altitud, pendiente u orientación.

La secuencia se ha realizado según la probabilidad de acumulación de nieve descrita en Atlas Climático de Aragón (Cuadrat, 2007). Donde la probabilidad de nieve va aumentando de otoño a invierno y decrece de invierno a primavera, teniendo sus máximos en los meses de enero y febrero. Los mínimos tienen lugar en los meses de primavera y en alguna ocasión puede perdurar hasta las primeras semanas de verano bajo circunstancias favorables.

Evolución de la cubierta de nieve en la secuencia de meses de estudio

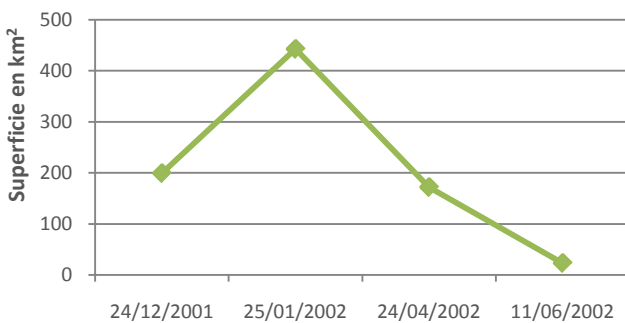


Gráfica 2 Evolución de la cubierta de nieve en la secuencia de meses de estudio

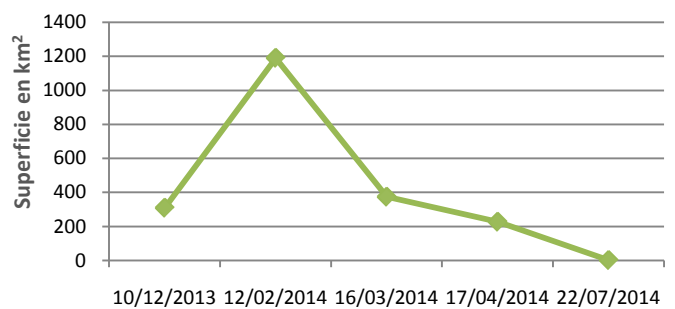
Como se puede apreciar en la Gráfica 2 se sigue la tendencia que se detalla en el Atlas climático de Aragón. En el mes de diciembre se observa como poco a poco el manto nival va aumentando hasta el mes de febrero que llega a su máximo, para disminuir en los meses de primavera. En la gráfica se observa como el año hidrológico 2013-2014 fue un año en el que las precipitaciones de nieve fueron abundantes.

Con las imágenes obtenidas se ha podido realizar dos secuencias que marcan las tendencias descritas anteriormente, aunque no hay suficientes imágenes para completar todo el año hidrológico, si van a servir para ver la tendencia.

Evolución de la cubierta de nieve del año hidrológico 2001-2002



Evolución de la cubierta de nieve del año hidrológico 2013-2014



Gráfica 3. Evolución de la cubierta de nieve de los años hidrológicos 2001-2002 y 2013-2014

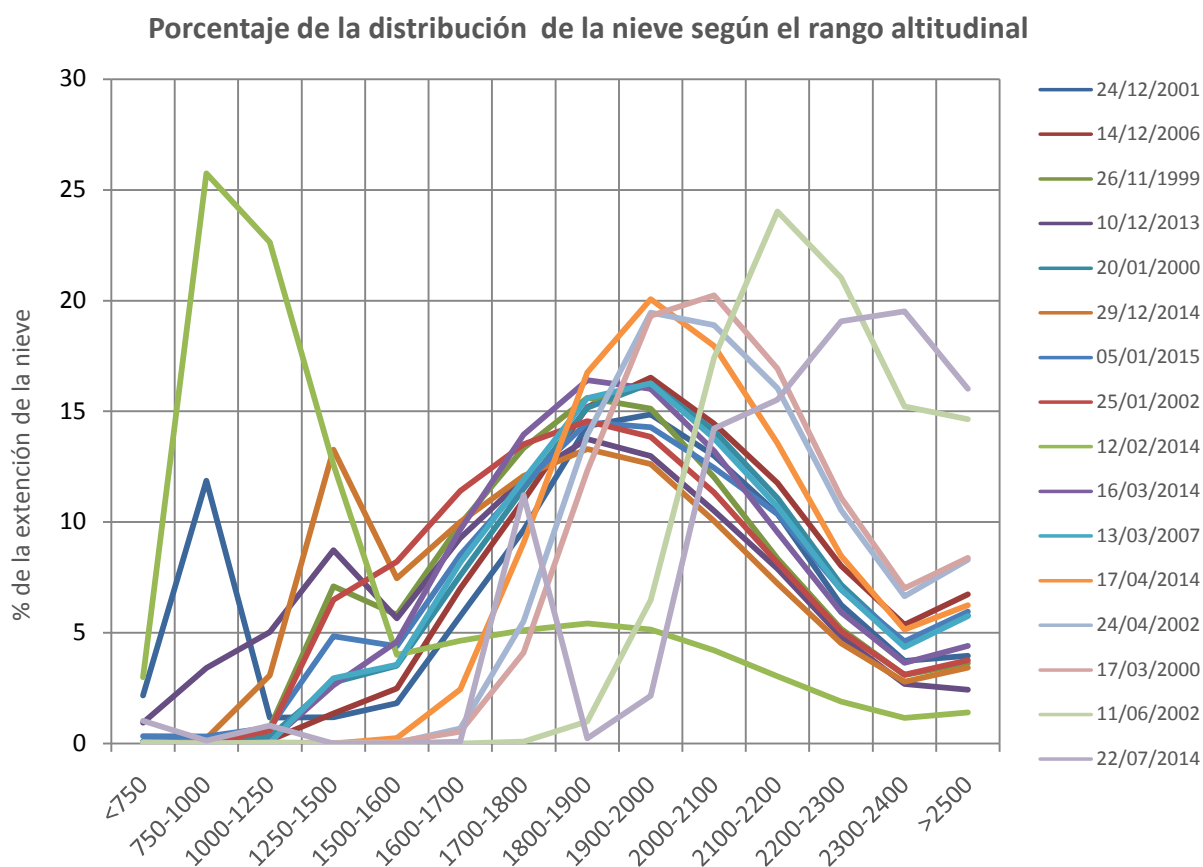
Al analizar las gráficas se debe tener en cuenta que se está analizando un momento concreto, no se tiene una secuencia en el tiempo de imágenes.

En las graficas se observa como el año hidrológico 2013-2014 la superficie cubierta por la nieve fue muy superior al año hidrológico 2001-2002. Sobre todo en el periodo de invierno, donde la nieve casi triplica su extensión. El manto de nieve del periodo 2013-2014 consigue perdurar hasta bien entrado el verano, esto indica que durante el periodo de invierno las precipitaciones en forma de nieve fueron abundantes y que además las temperaturas en primavera no fueron muy elevadas.

5.2 Factores estructurales de la distribución espacial del manto nival

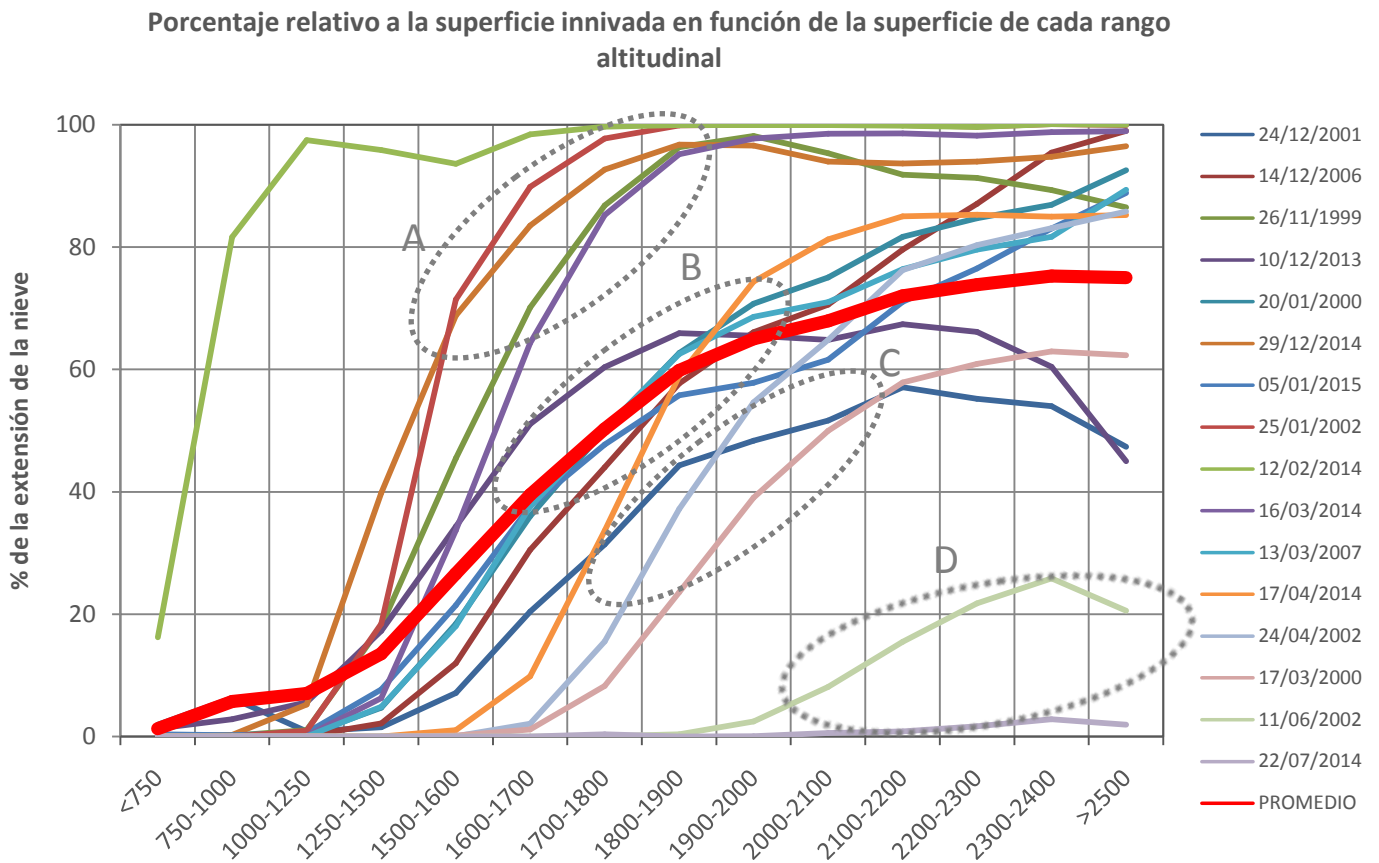
5.2.1 Distribución de la nieve según su rango altitudinal

Los resultados de esta gráfica indican donde se localiza la nieve espacialmente según la altitud. En primer lugar se muestra la gráfica del porcentaje de nieve en función del total de la superficie total cubierta por la nieve. A continuación se ha realizado una gráfica relativizando la superficie innivada en función de la superficie de cada rango altitudinal.



Gráfica 4. Porcentaje de la distribución de nieve según el rango altitudinal

En la Gráfica 4 se observa que no todos los días analizados siguen un mismo patrón, pero si la mayoría de ellos. Los días en que la superficie de nieve es mayor, ésta se localiza tanto en zonas altas como en zonas de menor altitud. En cambio los días analizados con menor superficie de nieve se encuentra en las zonas más altas.



Gráfica 5 Porcentaje de la distribución de la nieve relativa a la superficie de cada rango altitudinal

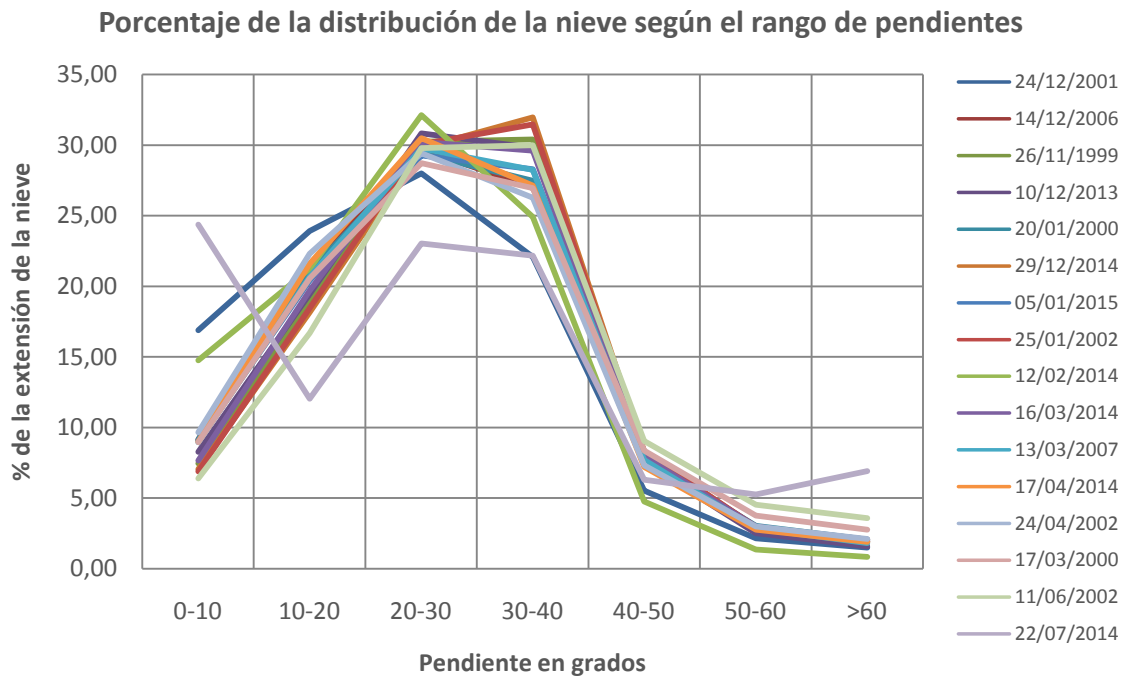
La Gráfica 5 muestra el porcentaje relativo a la superficie con nieve de cada rango altitudinal. En esta gráfica se puede observar como la distribución de la nieve tiene cuatro patrones diferenciados:

- Existe un periodo en el que la superficie de nieve es abundante tanto en cotas bajas como en cotas altas.
- Periodo donde la superficie de nieve va en aumento progresivo desde las cotas bajas hasta las cotas altas
- Periodo intermedio donde la superficie de nieve es menor y el aumento es repentino ya en cotas altas.
- Periodo donde la nieve únicamente se encuentra en cotas altas.

También se observa una gran nevada que prácticamente cubre todo el rango altitudinal con más del 80%, a excepción de las cotas más bajas.

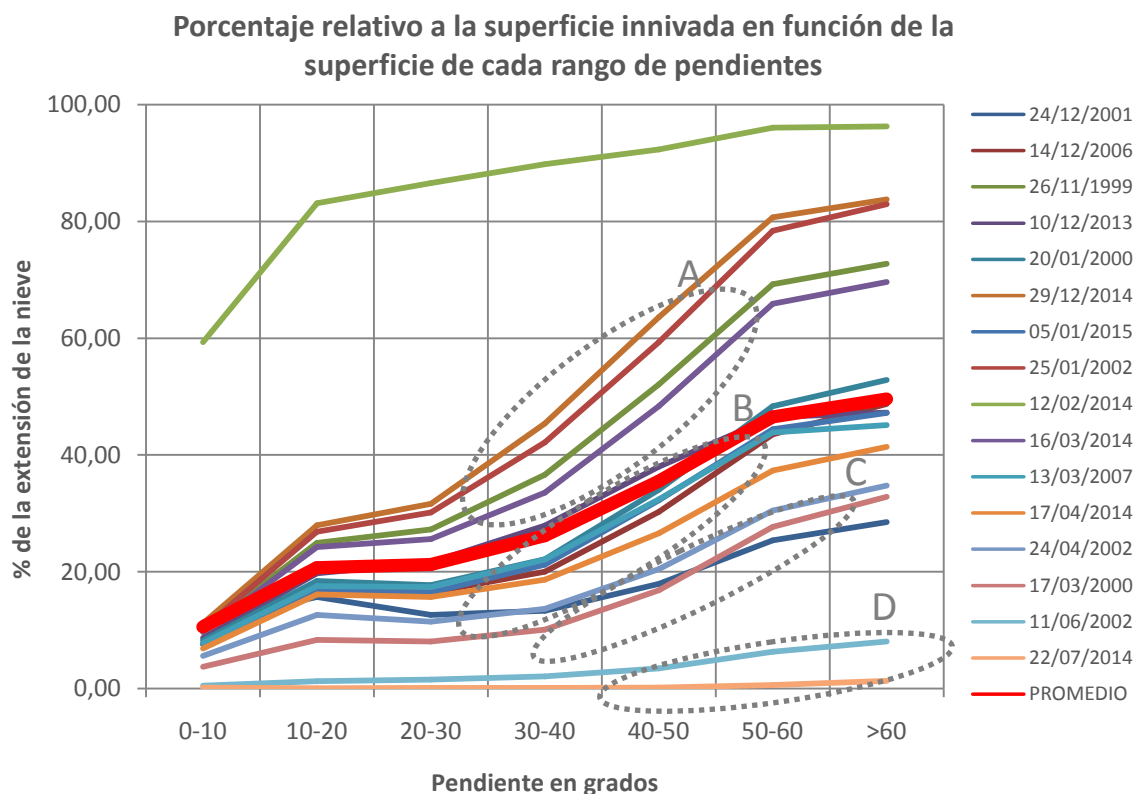
5.2.2 Distribución de la nieve según pendientes

En la siguiente gráfica se puede observar en que pendientes hay una distribución mayor de la superficies de nieve.



Gráfica 6 Porcentaje de la distribución de la nieve según la pendiente

En este caso la superficie con mayor porcentaje de nieve se corresponde con las pendientes de entre 20° y 40° grados, esta situación se explica porque en la zona de estudio estas pendientes son las más abundantes. Como en el caso anterior se ha realizado un gráfica con el porcentaje de nieve de cada rango de pendiente en función de la superficie de cada uno de estos rangos. Para ver de forma más eficaz en que pendientes permanece más la cobertura de nieve.



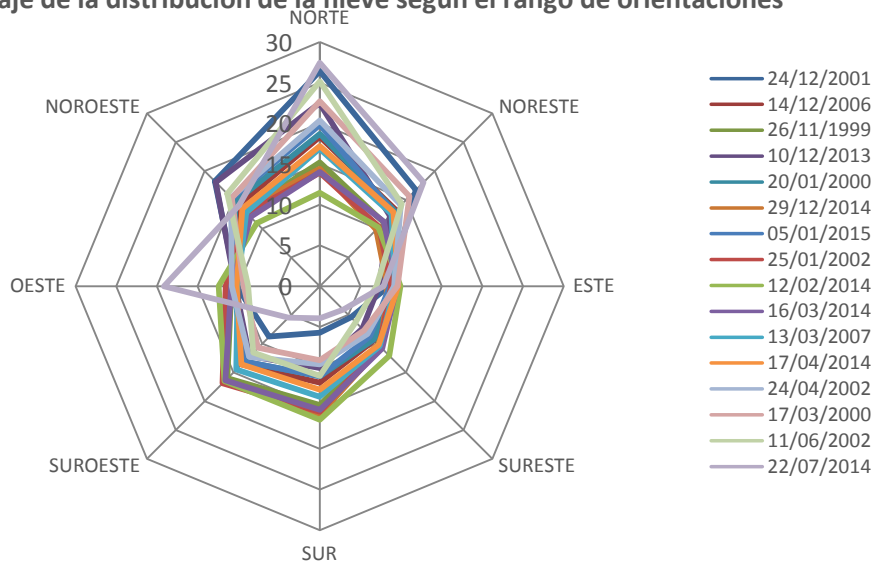
Gráfica 7 Porcentaje de la distribución de la nieve relativa a la superficie de cada rango de pendiente

Como vemos en esta gráfica la cobertura de nieve según la pendiente sigue un mismo patrón. Ascende progresivamente conforme aumenta de pendiente, está tendencia se relaciona con la altitud, ya que las máximas pendientes se encuentran en las zonas con mayor altitud. Como en el caso anterior también se observa los cuatro patrones diferenciados. El primero de ellos por encima de las media, el segundo aproximado a la media, un tercero por debajo de la media y el último cercano a valores mínimos. En este caso también es visible de forma destacada la nevada de febrero de 2014.

5.2.3 Distribución de la nieve según orientaciones

La grafica de orientaciones muestra la información sobre la superficie de nieve en las distintas orientaciones de las vertientes.

Porcentaje de la distribución de la nieve según el rango de orientaciones

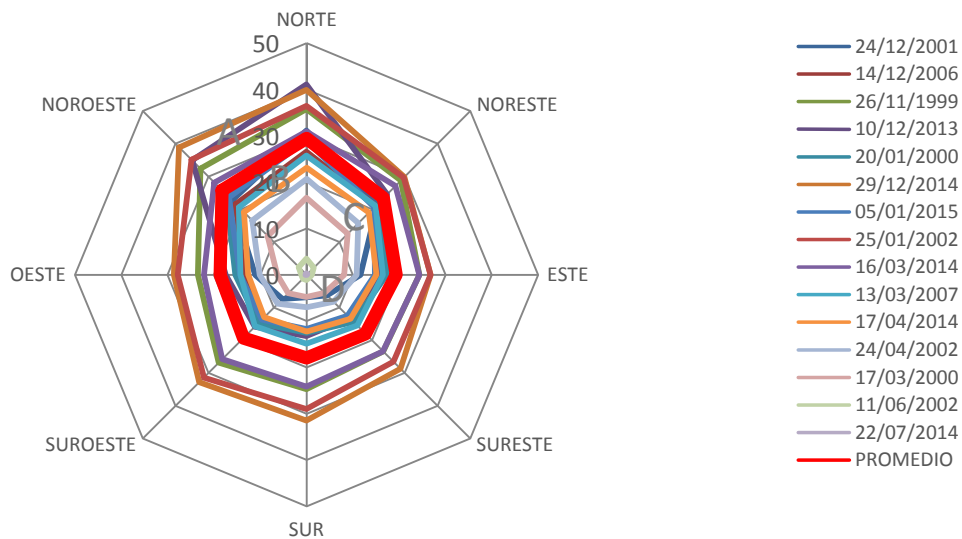


Gráfica 8 Porcentaje de la distribución de la nieve según la orientación de sus vertientes

Las vertientes en las que predomina la superficie nevada son las vertientes Norte Noroeste, Noreste y también abundante pero en menor medida la Suroeste. En este caso, a pesar de tener menor superficie de terrero estas vertientes destacan en permanencia de nieve frente al resto.

En la siguiente grafica se puede observar en que orientaciones permanece más la cobertura de nieve en función la superficie de cada orientación

Porcentaje relativo a la superficie innivada en función de la superficie de cada orientación



Gráfica 9 Porcentaje de la distribución de la nieve según la orientación de sus vertientes

En los datos de febrero de 2014 buena parte de la superficie de estudio se encuentra cubierta por nieve. Se han excluido de la gráfica ya que prácticamente todas las orientaciones de las vertientes están cubiertas al 80%, y hacen que el resto de datos se vean con dificultad.

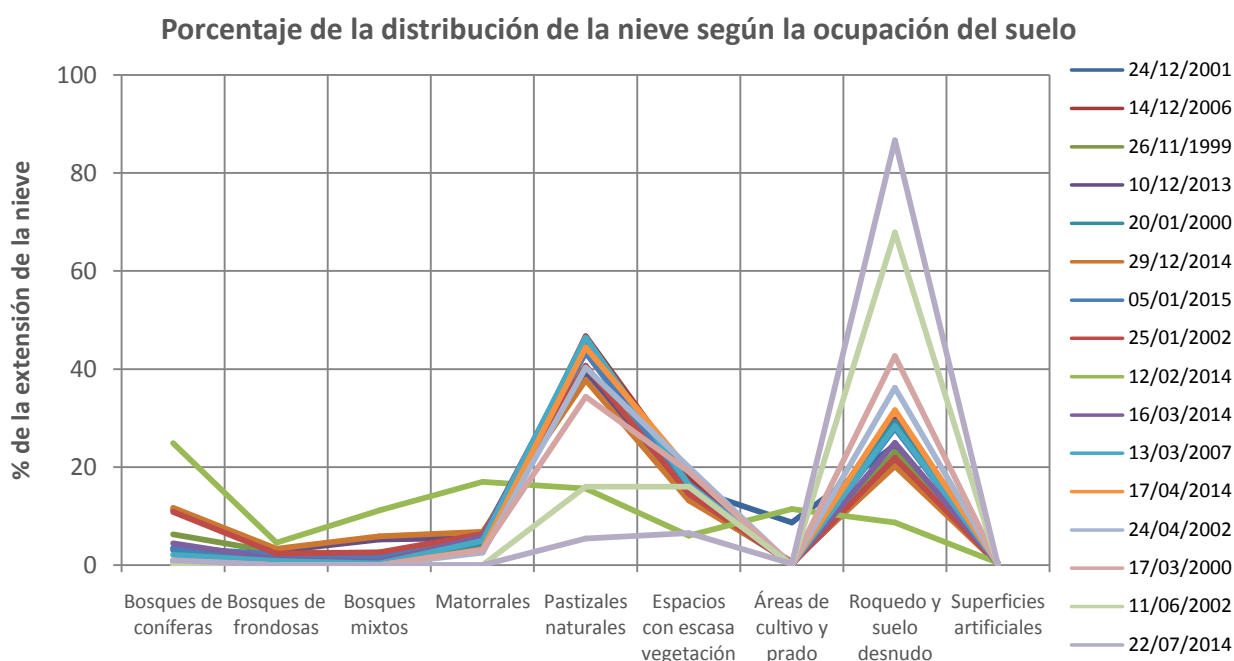
Como se observa en la Gráfica 9 el mayor porcentaje de la distribución de nieve se encuentra en las vertientes con orientación Norte, aunque también destacan las orientaciones Noroeste y Noreste. Los periodos en los que existe mayor superficie de nieve, la distribución de esta se encuentra más repartida por todas las orientaciones, aunque sigue dominando la orientación Norte.

En cambio, las vertientes Sur y Sureste a pesar de tener la mayor superficie en el área de estudio, son en las que menos nieve se localizada.

Como en el caso anterior también se observa los cuatro patrones diferenciados. El primero de ellos por encima de las media, el segundo aproximado a la media, un tercero por debajo de la medio y el último cercano a valores mínimos

5.2.4 Distribución de la nieve según la ocupación del suelo

Para observar lo distribución de la superficie de nieve en los diferentes ocupaciones de suelo, se ha realizado una gráfica para hacer el análisis de forma más clara.

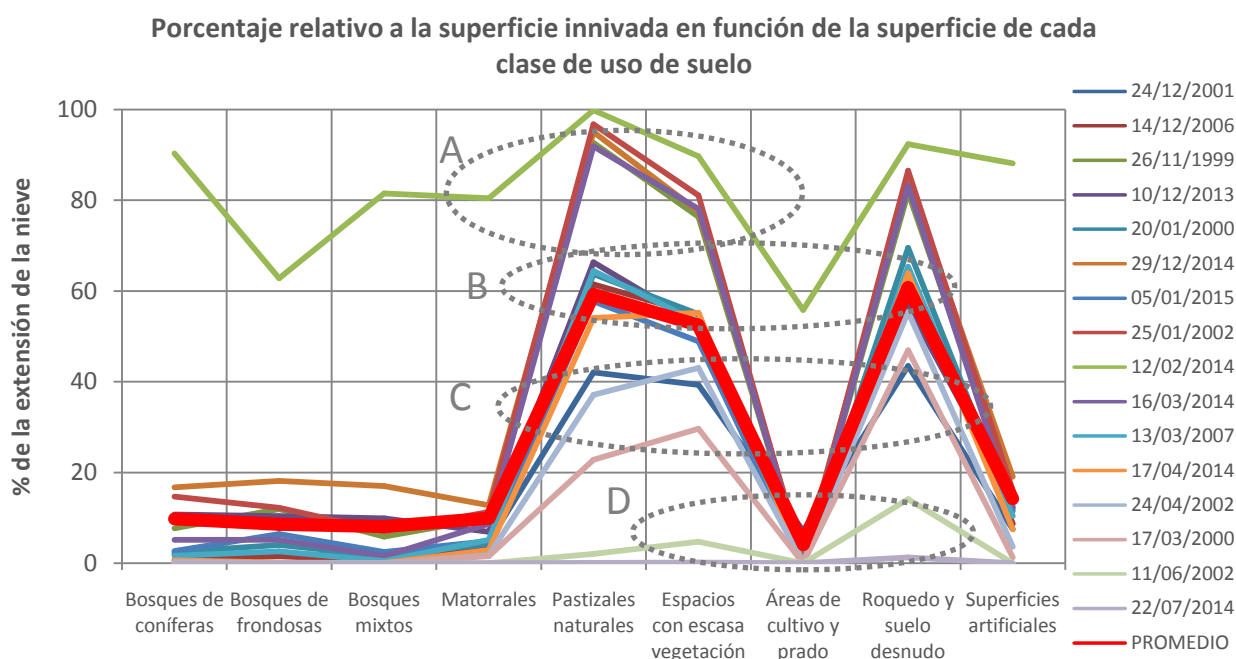


Gráfica10 Porcentaje de la distribución de la nieve según las ocupaciones de suelo

Según los resultados que se muestran en la Gráfica 10 la mayor parte de la superficie de nieve se encuentra sobre superficies de roquedo y suelo desnudo, en pastizales naturales y en menor medida en espacios con escasa vegetación. Estas ocupaciones de suelo se encuentran a una cota alta por lo que es más fácil observar el manto de nieve.

Por el contrario, a pesar de ser los bosques de coníferas la mayor superficie que encontramos en el área de estudio. La nieve no permanece mucho tiempo en estas zonas, puesto que cuentan con el impedimento de la vegetación, además que la infiltración es mayor en estas zonas que en las zonas con ausencia de vegetación.

En la siguiente gráfica se puede ver la superficie ocupada por la nieve en función de la superficie de cada clase de ocupación de suelo.



Gráfica 11 Porcentaje de la distribución de la nieve según los ocupaciones de suelo

Como vemos en esta gráfica el comportamiento de la nieve es similar a la anterior, esto nos indica la dificultad que presenta la nieve para instalarse en zonas ocupadas por vegetación de porte arbóreo. Al igual que en el caso de las pendientes, las ocupaciones de suelo se relacionan con la altitud. Es por ello que las zonas donde la altitud es mayor se encuentra roquedo y suelo desnudo, además de pastizales naturales y espacios con escasa vegetación. Es por ello, que en estas zonas es donde la distribución de nieve es mayor.

Como en el caso anterior también se observa los cuatro patrones diferenciados.

5.3 Extensión del manto nival en situaciones tipo a lo largo del año

Según los resultados obtenidos en las gráficas se ha observado situaciones tipo que se repiten en diferentes días. Estas situaciones nos indican el comportamiento similar de un número de días.

A continuación se describen las situaciones tipo apoyadas con dos mapas como ejemplos de situaciones y una serie de gráficas que ayudan a la hora de realizar el análisis. En cada una de las gráficas se ha añadido el promedio general de todos los días. A excepción de las gráficas del tipo D que debido a la escasa superficie de nieve en este tipo, hace que sea inapreciable si se añade el promedio, por lo que se ha determinado no incluirlo.

5.3.1 Tipo A

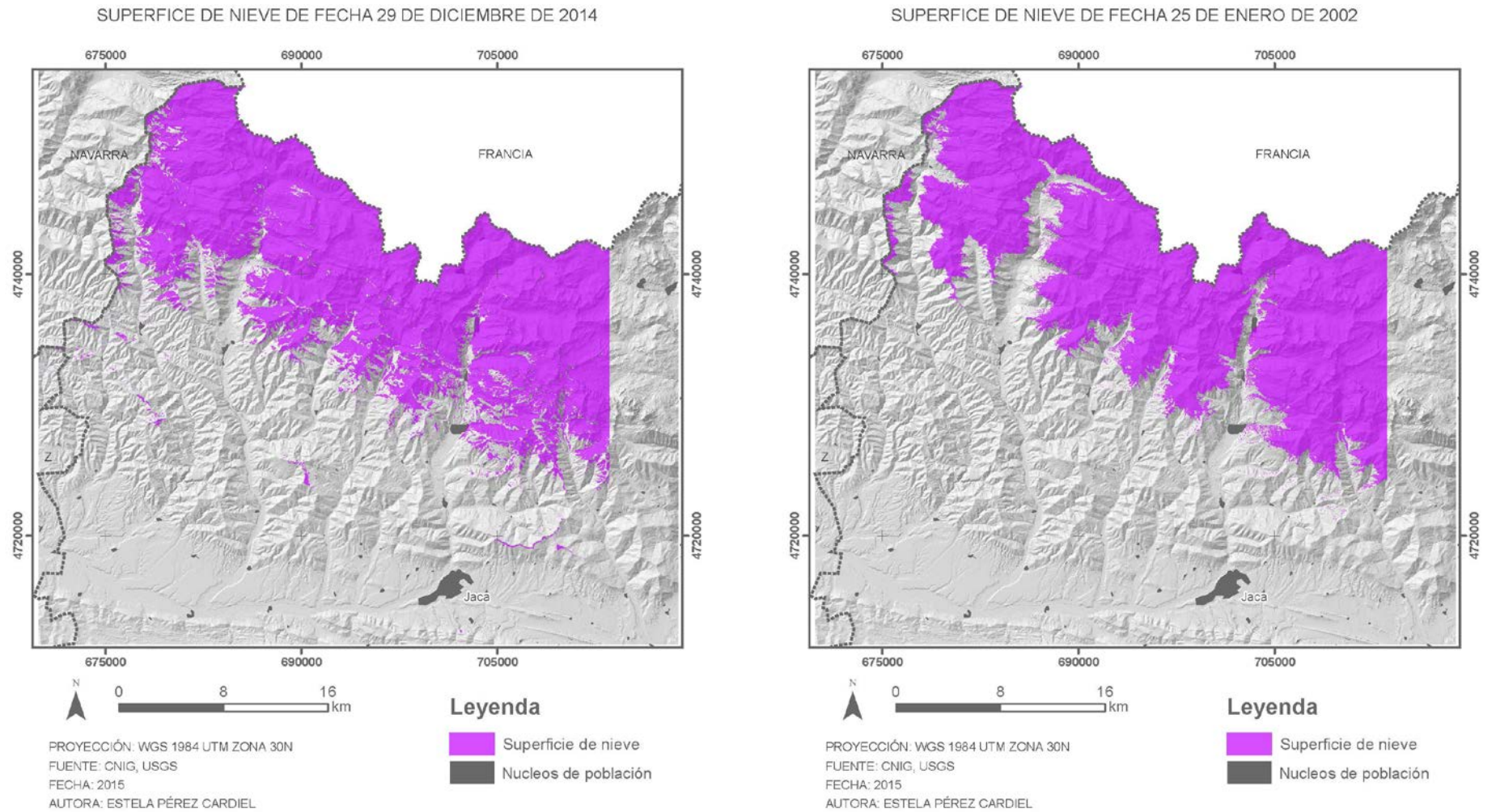
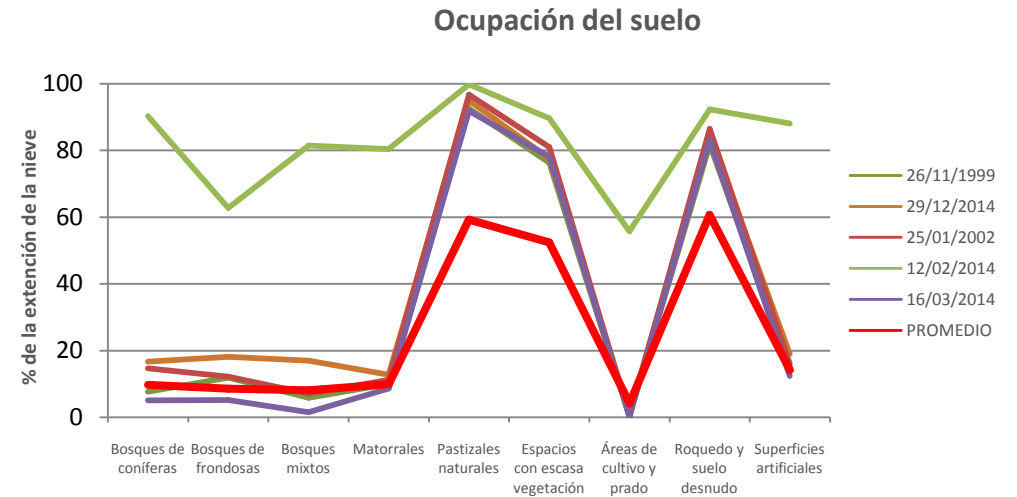
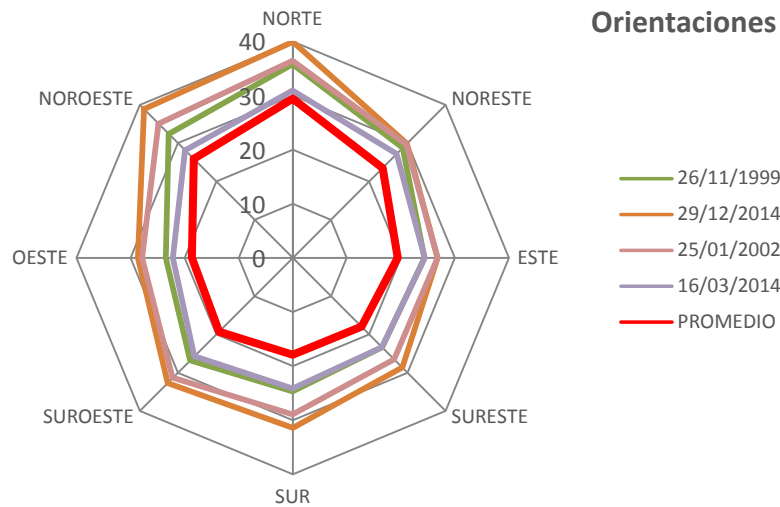
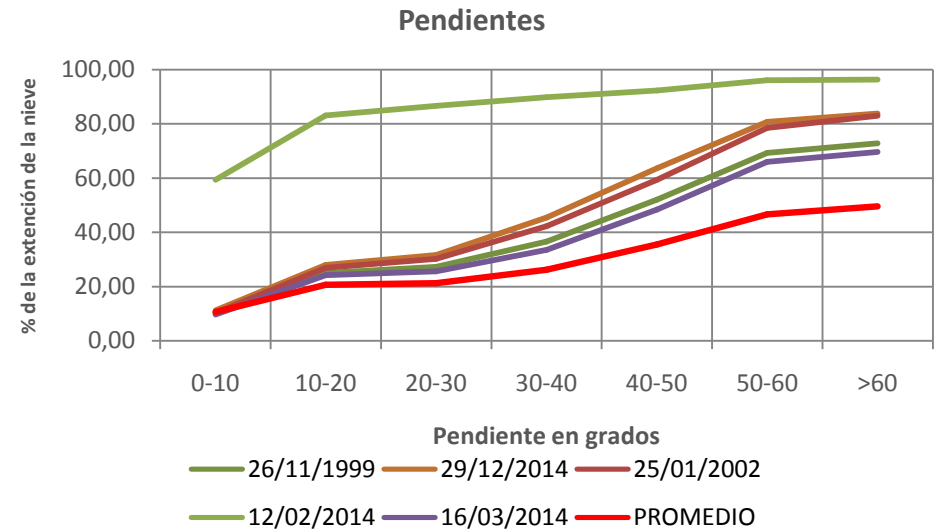
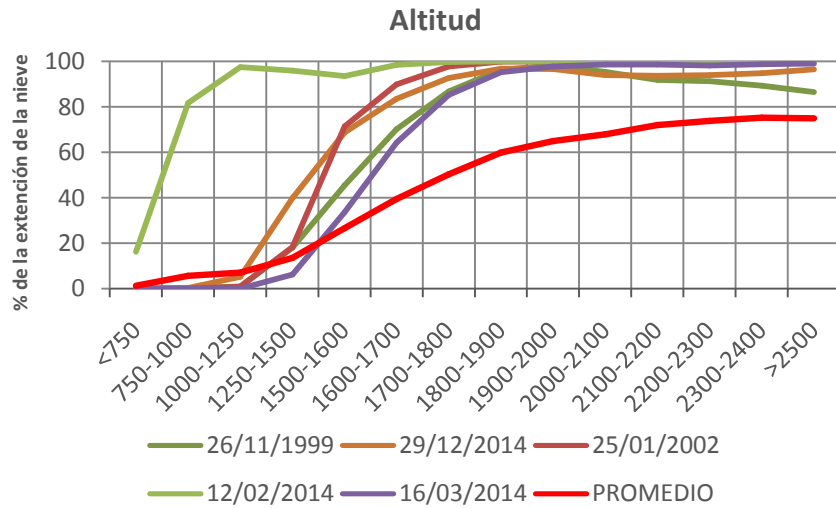


Figura 26 Ejemplos de superficies innivadas para el tipo A

TIPO A. Gráfica12 Porcentaje relativo a la superficie innivada en función de la superficie de cada altitud, pendiente, orientación y ocupación del suelo.

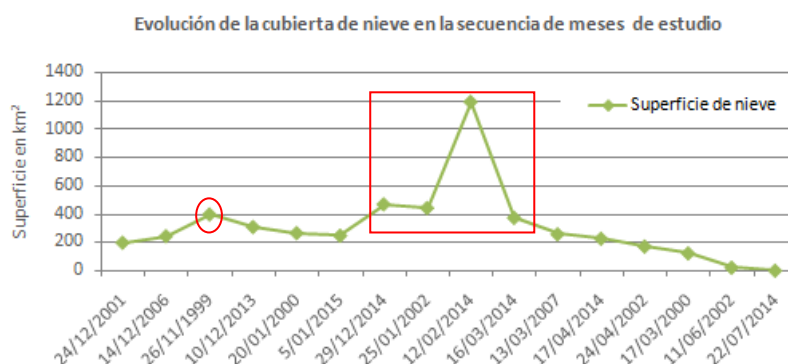


El tipo A refleja las situaciones en las que la superficie de nieve se localiza desde 750 metros hasta las cotas más elevadas. En las cotas más bajas de 750 a 1500 la superficie de nieve no es superior al 20%. Va aumentando de forma progresiva hasta alcanzar los 1800 metros donde el manto de nieve ocupa el casi el 100 % de la superficie y se queda estabilizado.

En cuanto a la pendiente el aumento es progresivo conforme se aumenta de pendiente, esto se debe principalmente a la influencia de la altitud. Las zonas donde las pendientes son mayores se sitúan en las zonas de mayor cota, es por ello que la superficie de nieve sea mayor en estas pendientes.

En el caso de la orientación se muestra un incremento en las vertientes con orientación Norte y Noroeste, llegando hasta el 40% en algún caso, aunque también se distribuyen en ladera Sur y Suroeste y en menor medida Sureste y Noroeste lo que indica que la superficie de nieve se puede encontrar en cualquier orientación, siempre con predominancia de la Norte.

Las ocupaciones de suelo ocupados por la nieve en este tipo se reparten sobretodo en roquedo y suelo desnudo, pastizal natural y espacios con escasa vegetación. Aunque es de destacar que hay aproximadamente un 10% en el que la nieve cubre la vegetación arbórea.



Gráfica 2 Evolución de la cubierta de nieve en la secuencia de meses de estudio

Tras analizar los factores, se pueden resumir indicando que el **Tipo A es una situación propia del invierno**. La superficie de nieve en el área es de aproximadamente de 400 km². Con manto de casi 100% en cotas altas y con presencia en las cotas más bajas. Relacionado con la altitud, la superficie innivada es mayor en laderas con fuertes pendientes y decrece según desciende la pendiente. Las ocupaciones de suelo cubierto por la nieve son principalmente roquedo y suelo desnudo, pastizal natural y espacios con escasa vegetación. El manto nival puede estar en cualquier exposición aunque existe un predominio ligeramente mayor en las vertientes con orientación Norte.

5.3.2 Tipo B

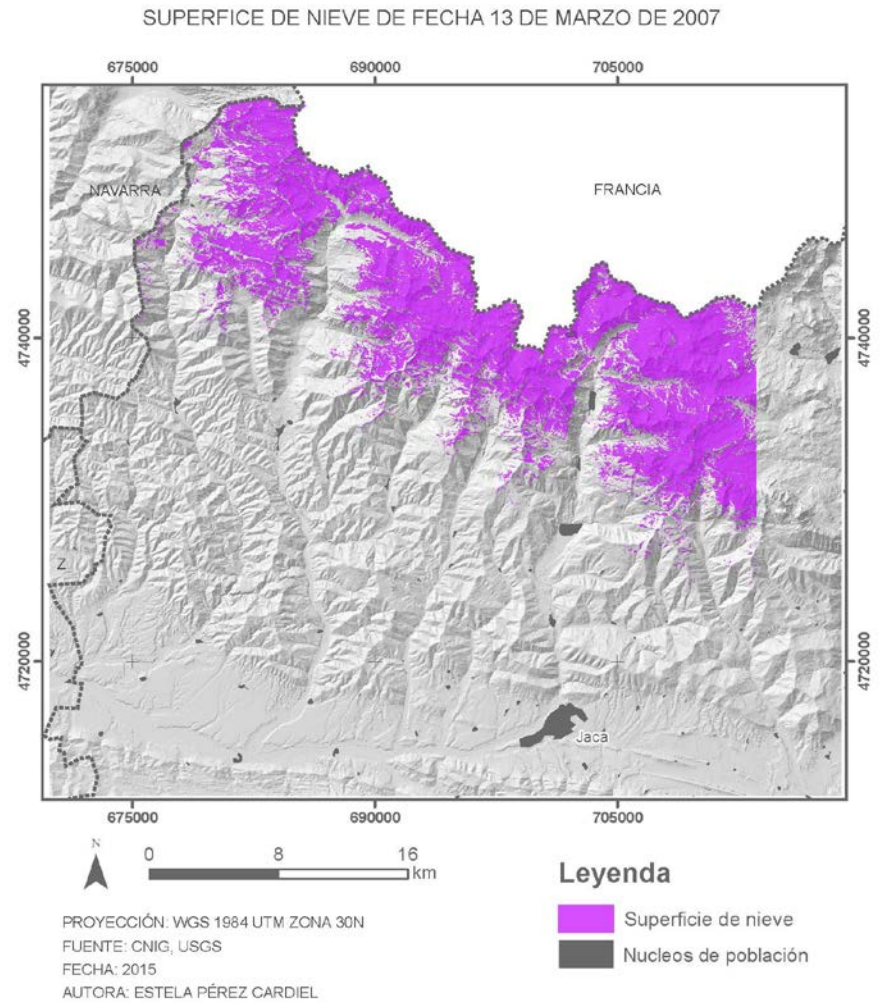
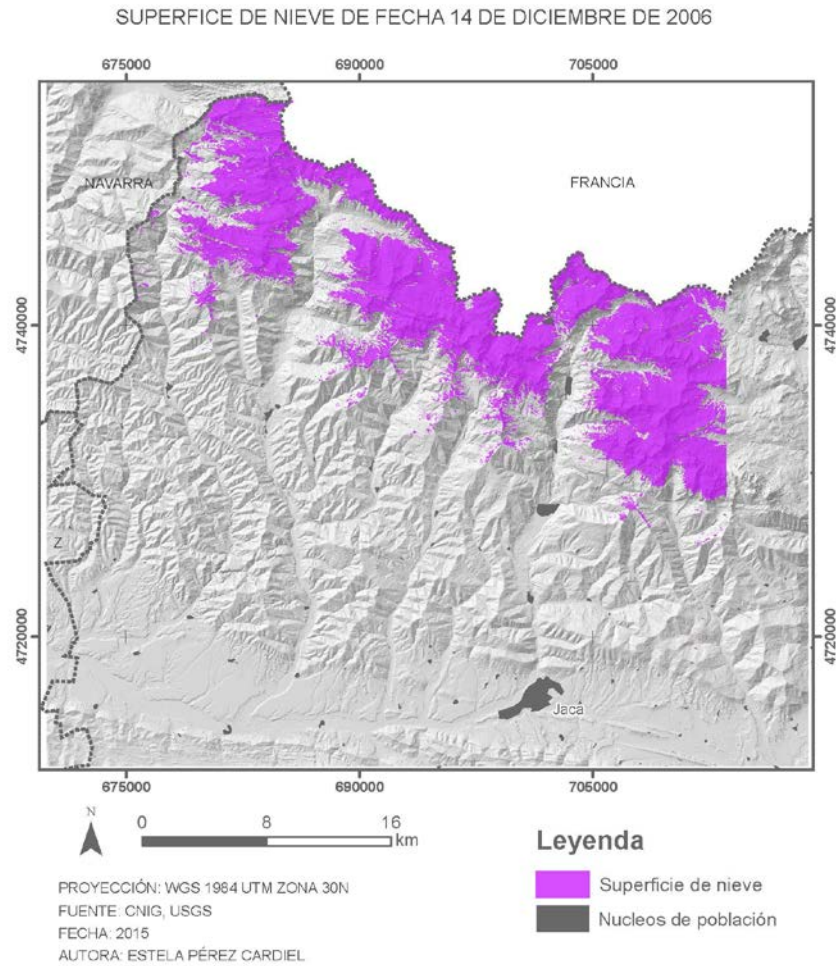
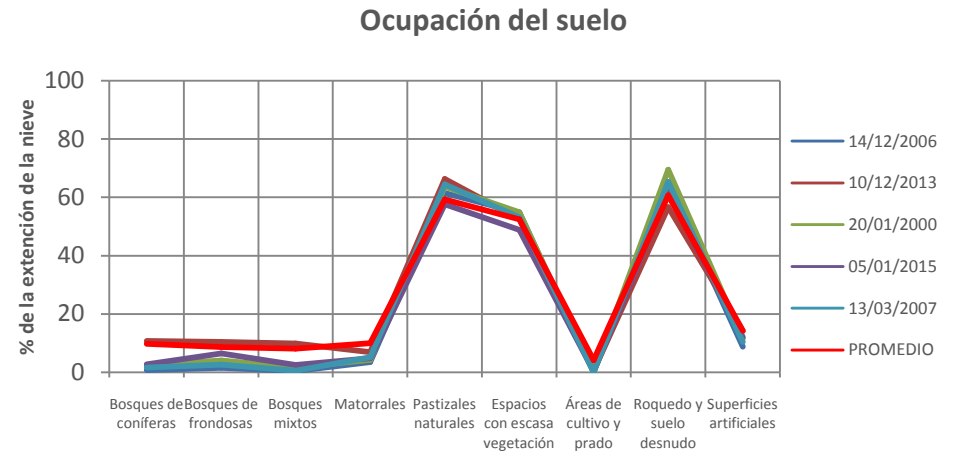
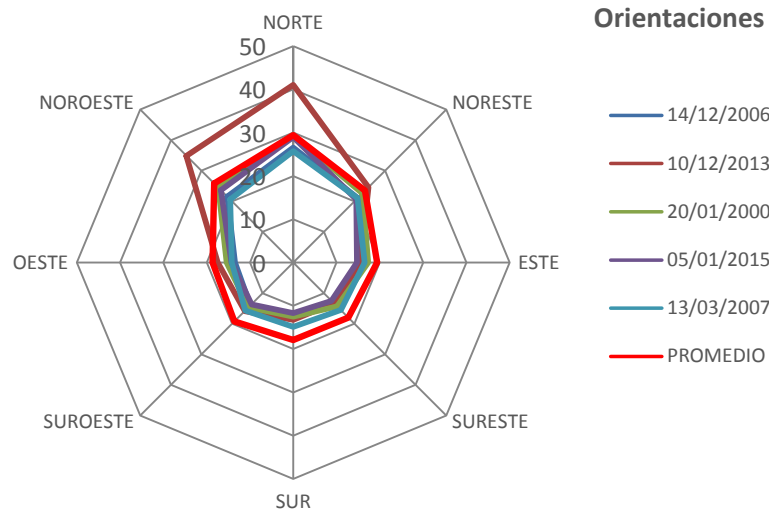
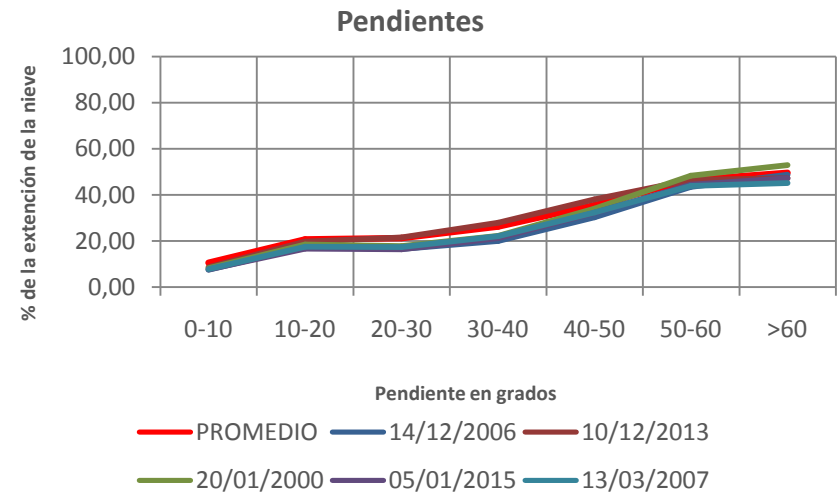
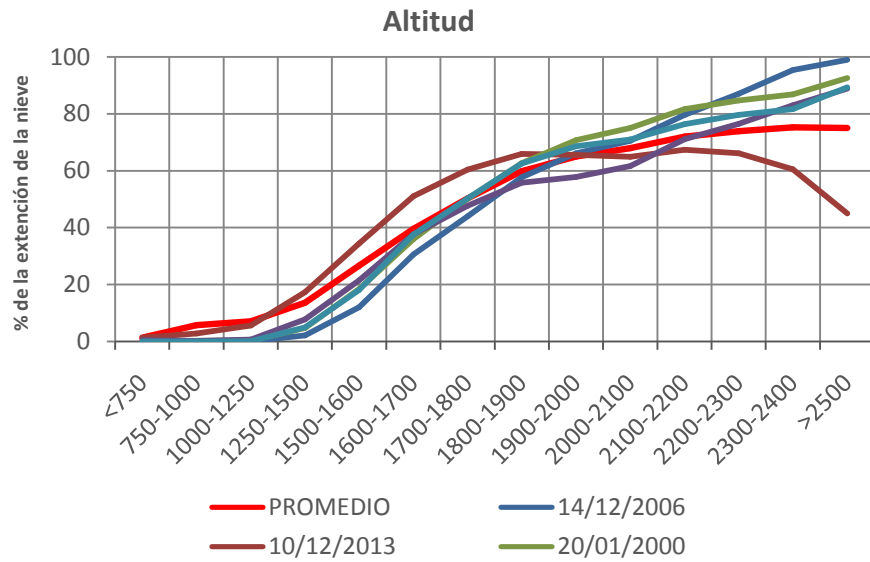


Figura 27 Ejemplos de superficies innivadas para el tipo B

TIPO B. Gráfica13 Porcentaje relativo a la superficie innivada en función de la superficie de cada altitud, pendiente, orientación y ocupación del suelo.

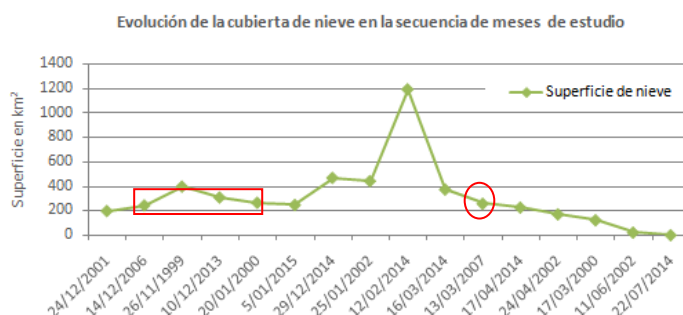


El tipo B la cobertura de nieve se sitúa en torno a 250 km², que supone un 18% aproximadamente del área de estudio. Comienza sobre los 1250 metros de altitud hasta las cotas más elevadas, el aumento es progresivo hasta los 1800 metros donde se estabiliza y el manto nival se sitúa entre el 60 y 80%. Es a partir de los 2200 cuando de nuevo comienza a ascender para llegar casi al 100% de superficie innivada. A excepción de diciembre de 2013 donde el manto de nieve comienza a 750 m y en cotas más altas desde los 2200 metros comienza a decrecer hasta tener una superficie de nieve en esa cota menor del 50%.

Las pendientes son similares al tipo A, van en aumento conforme la pendiente es mayor, debido a la relación con la altitud como se ha expuesto anteriormente. Aunque se observa menor cantidad que en el tipo A

En el caso de las orientaciones, se reparten de forma similar aunque hay un aumento en las vertientes con orientación Norte, Noroeste y Noreste. Se observa como en diciembre de 2013 la nieve se sitúa claramente en orientaciones Norte, esto es debido a que la superficie de nieve se localiza en altitudes más bajas

Las ocupaciones de suelo donde se encuentra el manto nival se reparten sobretodo en roquedo y suelo desnudo, pastizal natural y espacios con escasa vegetación, como lo hacían en el tipo A. Al igual que en las orientaciones en diciembre de 2013 la superficie de nieve también cubre parte de vegetación arbórea, ya que la distribución de la nieve se sitúa en un rango altitudinal más bajo



Gráfica 2 Evolución de la cubierta de nieve en la secuencia de meses de estudio

Después de analizar los datos se puede decir que el **Tipo B refiere a situaciones típicas de comienzo de invierno y final del mismo**. Cuando comienzan las primeras nevadas, que pueden extenderse desde cotas bajas, como ocurre en diciembre de 2013 hasta las más altas. Normalmente la superficie de nieve se encuentra en las cotas superiores a 1250 metros. La superficie innivada es mayor en laderas con fuertes pendientes, aunque se observa menor cantidad que en el tipo A y decrece según desciende la pendiente. El manto nival se distribuye en las vertientes con cualquier orientación, aunque predomina ligeramente la Norte. El manto nival se distribuye sobre roquedo y suelo desnudo, pastizal natural y espacios con escasa vegetación y muy escaso porcentaje en el resto de ocupaciones de suelo.

5.3.3 Tipo C

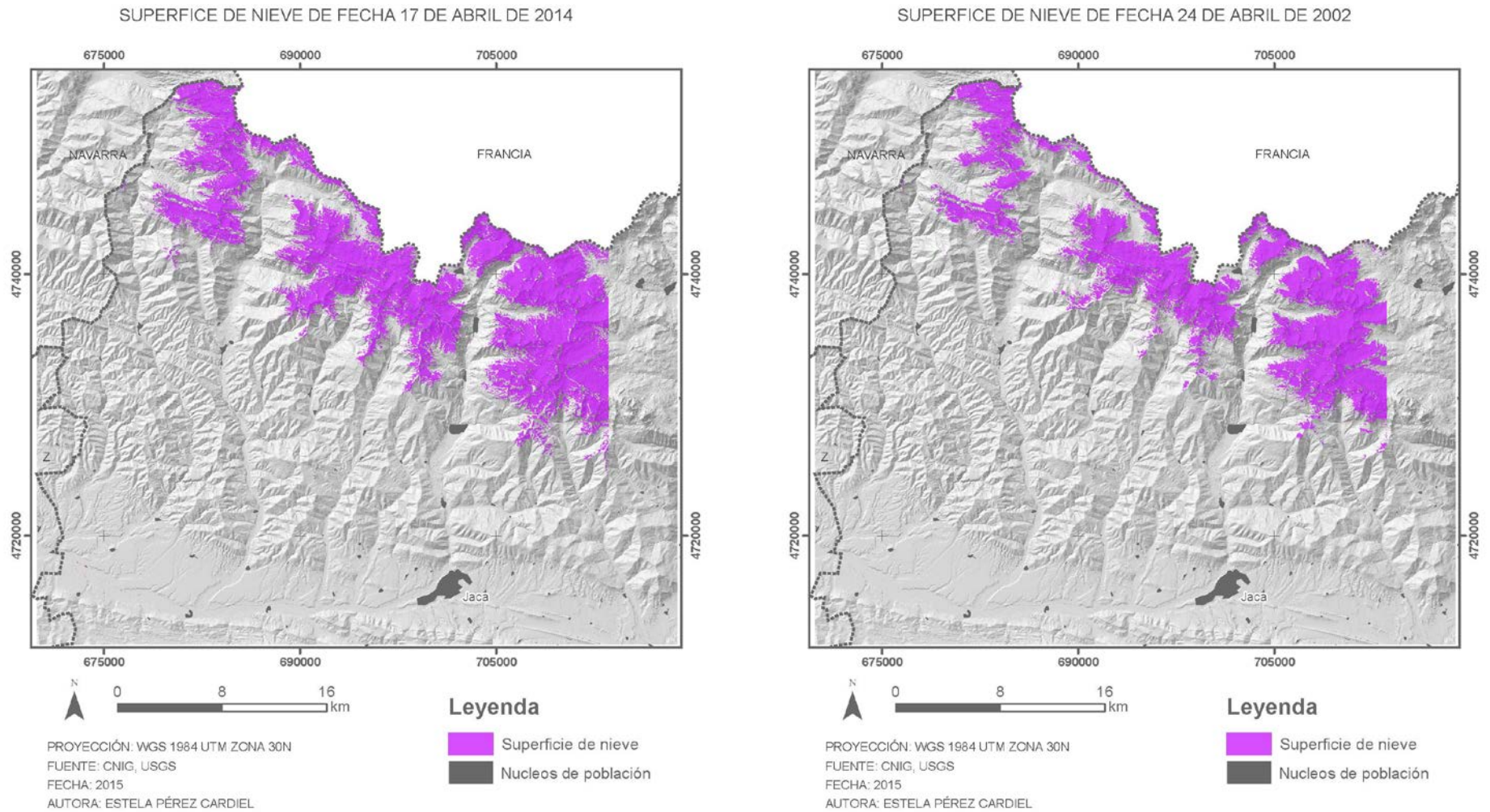
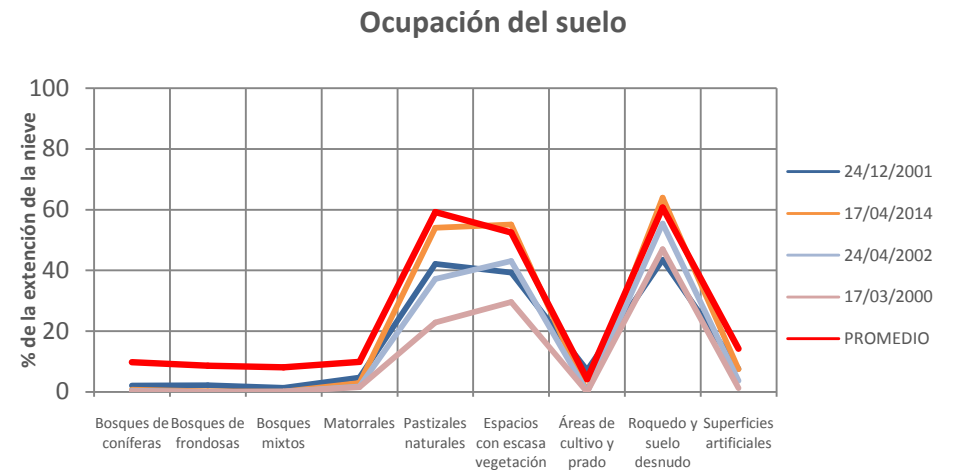
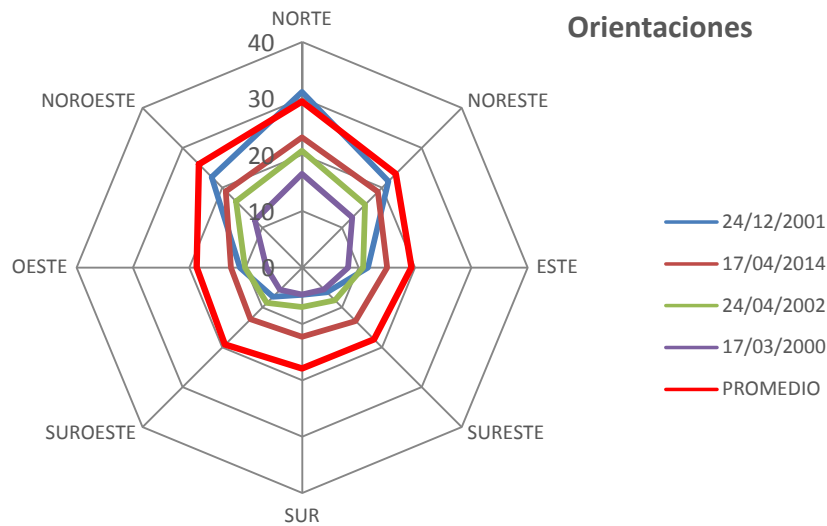
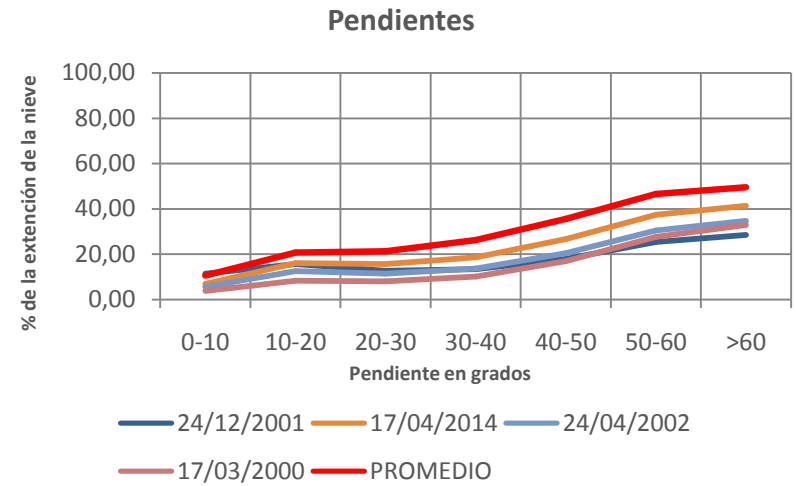
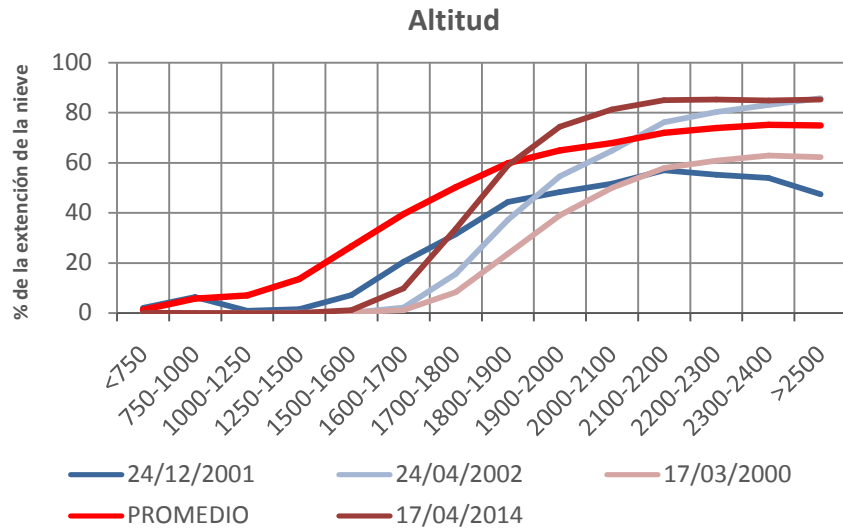


Figura 28 Ejemplos de superficies innivadas para el tipo C

TIPO C Gráfica 14 Porcentaje relativo a la superficie innivada en función de la superficie de cada altitud, pendiente, orientación y ocupación del suelo.

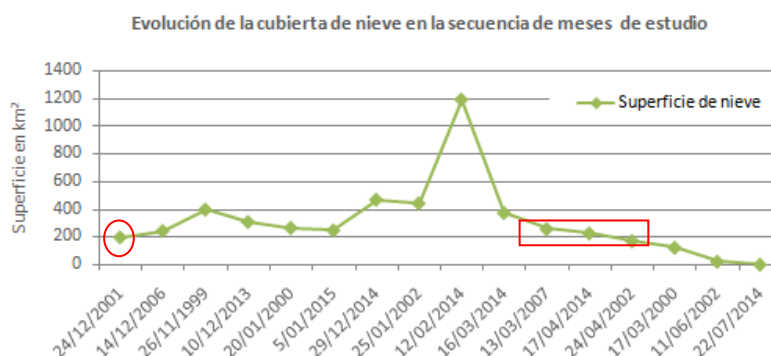


El tipo C refleja las situaciones en las que el manto de nieve se localiza desde los 1500 m con un porcentaje de cubrimiento inferior al 20% y aumenta de forma progresiva. En las cotas más altas sobre los 2000 y superiores, el porcentaje del cubrimiento es aproximadamente del 80%. La cobertura de nieve en este tipo se sitúa en torno a 180 km² que supone alrededor de 12% del área de estudio.

Las pendientes son similares a los tipos anteriores, van en aumento conforme la pendiente es mayor, debido a la relación con la altitud como se ha expuesto anteriormente. Aunque se observa menor cantidad que en el tipo A y B.

En el caso de las orientaciones, existen mayor porcentaje de manto de nieve en las vertientes con orientación Norte, Noroeste y Noreste. El manto nival en las vertientes con orientación Sur-Sureste es muy reducido.

Las ocupaciones de suelo ocupados por la nieve en este tipo se reparten sobretodo en roquedo y suelo desnudo, pastizal natural y espacios con escasa vegetación. Siendo escasamente existencial en el resto de las ocupaciones de suelo.



Gráfica 2 Evolución de la cubierta de nieve en la secuencia de meses de estudio

En general del **tipo C** se puede indicar que el manto nival sitúa en torno a 180 km² que supone alrededor de 12% del área de estudio, menor que en los tipos anteriores. Es una **situación típica de la primavera**, cuando las precipitaciones en forma de nieve se reducen y las temperaturas aumentan, es el proceso de deshielo. En este tipo la cota de nieve aumenta hasta los 1500 m donde el manto nival es inferior al 20% y en las cotas más altas es algo mayor del 80%, no llegando al 90% en ningún caso como si se veía en los anteriores tipos. Las pendientes tienen similar comportamiento al de los tipos anteriores. El manto nival se extiende sobre vertientes con orientación Norte y Noroeste, siendo muy reducido en las restantes orientaciones.

La superficie innivada se distribuye sobre roquedo y suelo desnudo, pastizal natural y espacios con escasa vegetación, En el resto de ocupaciones de suelo el manto de nieve tiene una representación muy reducida.

5.3.4 Tipo D

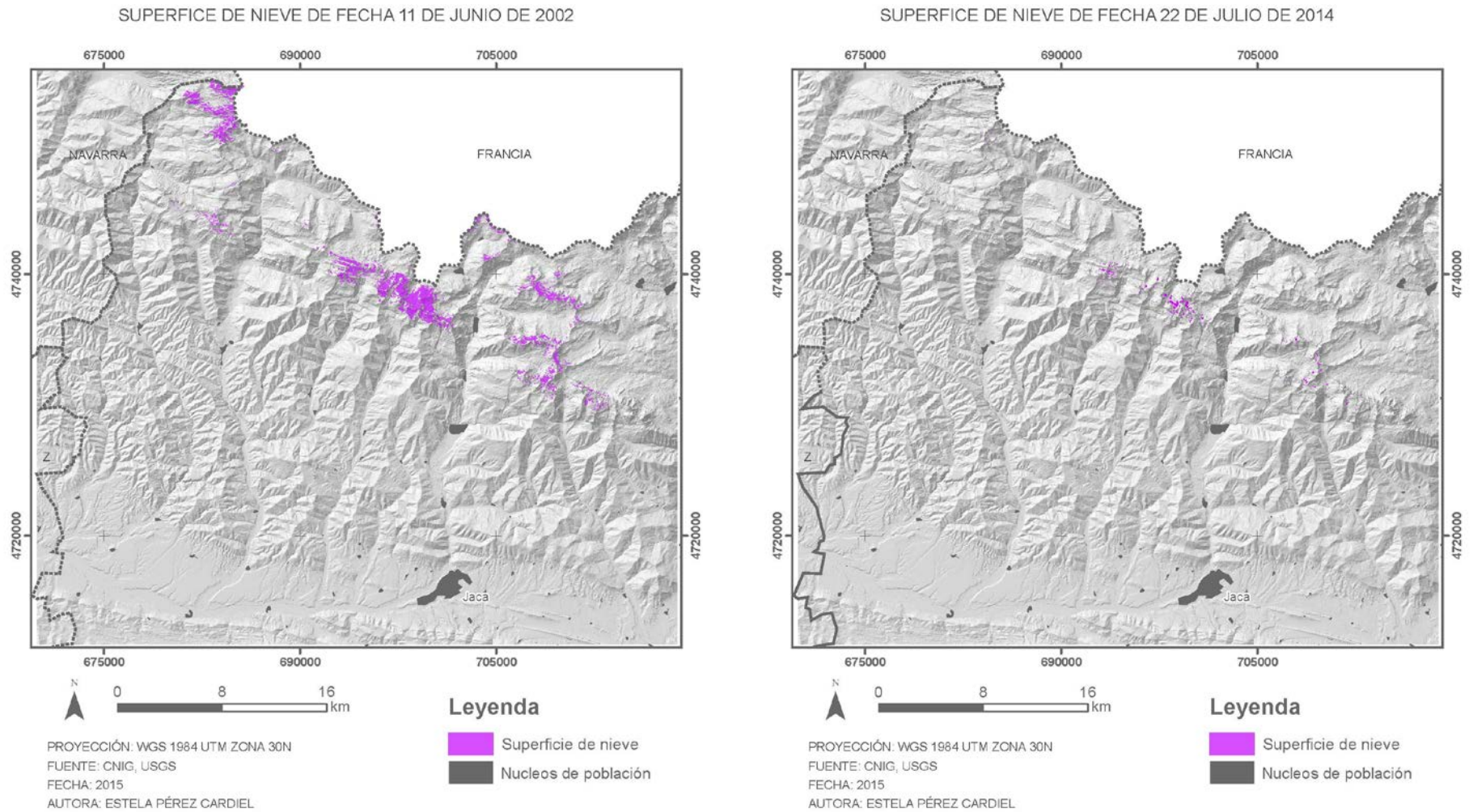
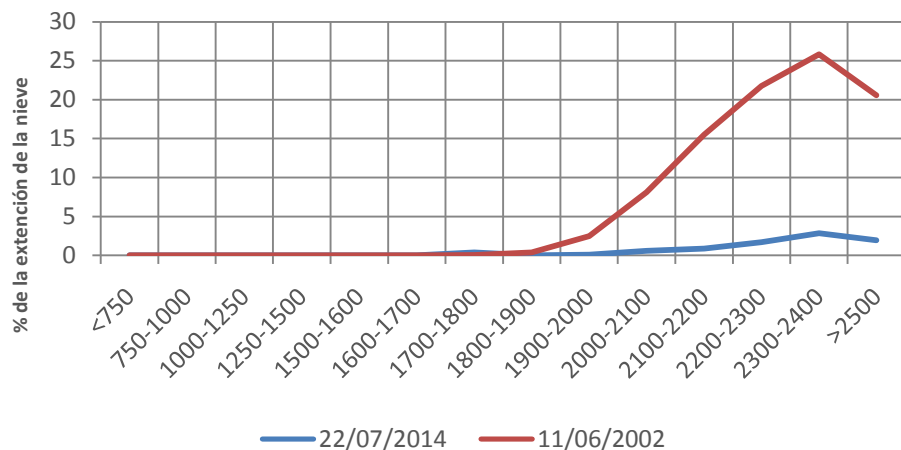


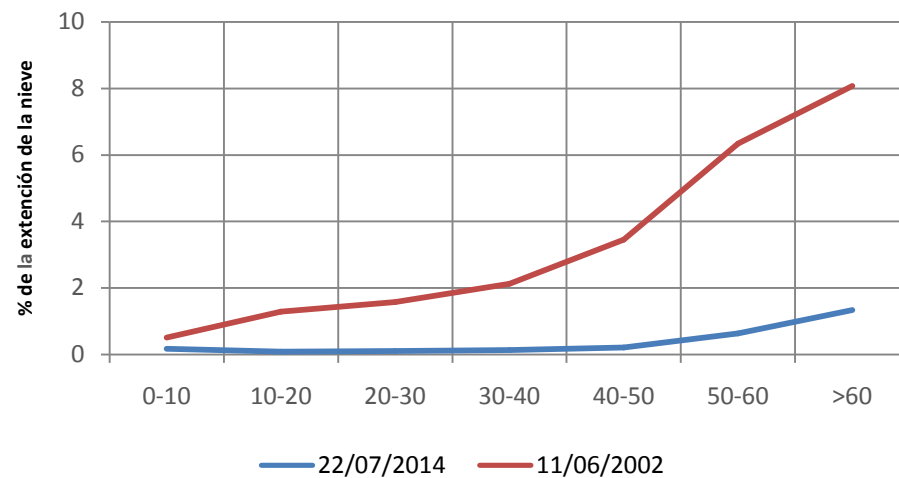
Figura 29 Ejemplos de superficies innivadas para el tipo D

Tipo D Gráfica15 Porcentaje relativo a la superficie innivada en función de la superficie de cada altitud, pendiente, orientación y ocupación del suelo.

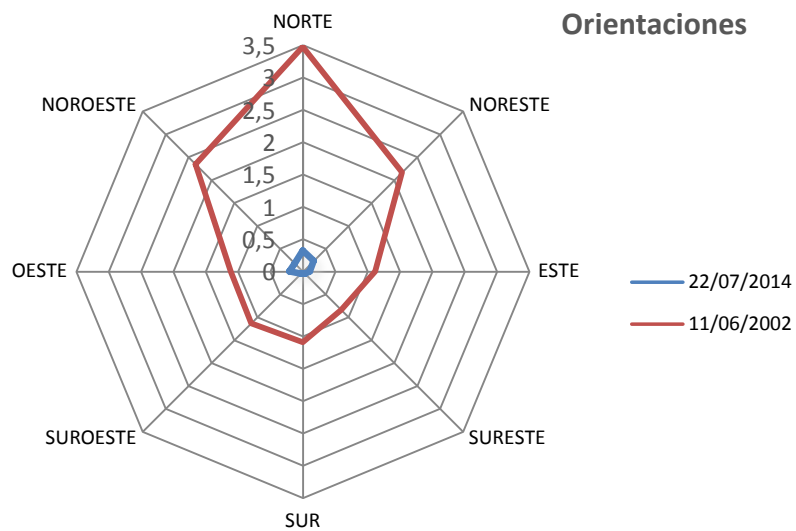
Altitud



Pendientes



Orientaciones



Ocupación del suelo

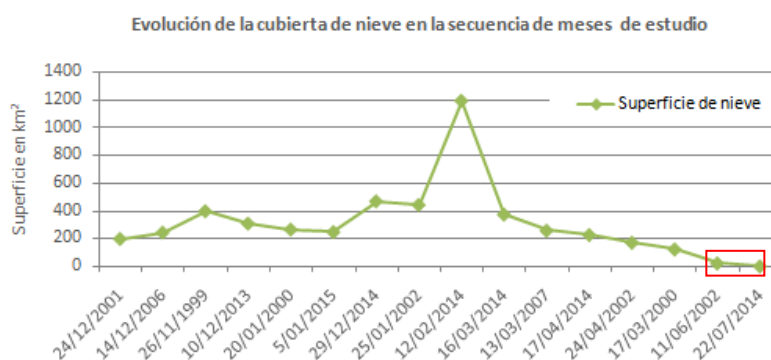


El tipoD la cobertura de nieve se sitúa en torno a 13 km², que supone un 0,87% aproximadamente del área de estudio. El manto nival se sitúa en cotas superiores al 1900 m. En el mes de julio apenas llega a cubrir el 4% en las cotas mayores de 2300 metros y en el mes de junio la cobertura en estas cotas es mayor pero no llega en ningún momento al 30%.

Las pendientes tienen la misma tendencia que la altitud, a medida que la pendiente es mayor existe un porcentaje creciente de superficie innivada.

Con relación a la exposición, el manto nival se extiende mayoritariamente por las vertientes con orientación Norte, aunque en el caso de julio también destaca la orientación Oeste.

Las ocupaciones de suelo con manto nival se reparten sobretodo en roquedo y suelo desnudo, pastizal natural y espacios con escasa vegetación



Gráfica 2 Evolución de la cubierta de nieve en la secuencia de meses de estudio

En general del **tipo D se puede indicar que es una situación típica de la primavera tardía y verano**. El manto nival se encuentra en cotas muy elevadas, donde predominan las laderas con fuerte pendiente. La exposición de las laderas cubiertas por nieve es Nortefundamentalmente, aunque también se observan las Noroeste(2,5%) y Noreste (2,3%)

El manto nival se distribuye sobre roquedo y suelo desnudo, pastizal natural y espacios con escasa vegetación.

5.4 Distribución espacial del manto nival en el sector del flysch

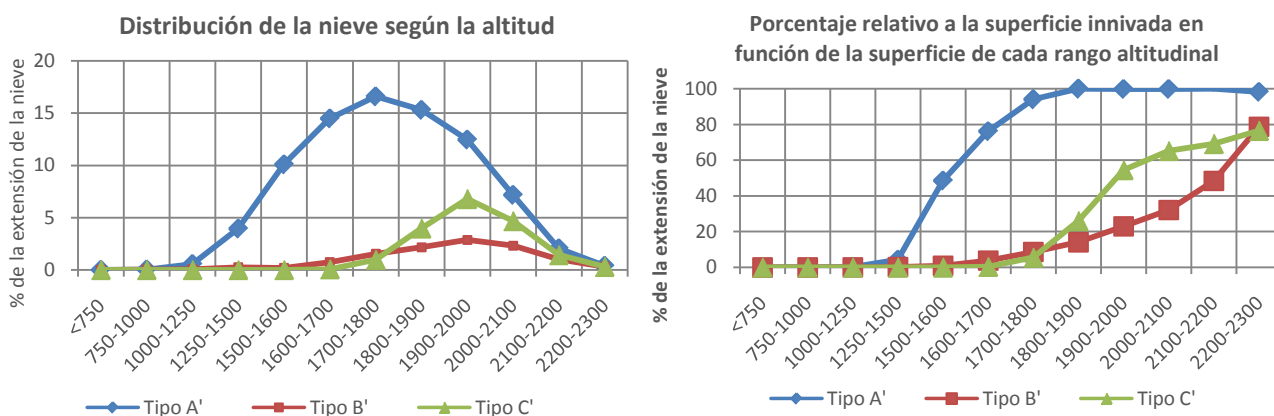
En este estudio se ha querido analizar las situaciones extremas tanto temporalmente, que queda reflejado en el tipo D y que se ha explicado anteriormente, como espacialmente en el que se va a realizar en este apartado.

Como se ha visto en los resultados, la altitud es un factor determinante para la aparición del manto nival. Es por ello que para realizar el análisis se ha optado por seleccionar el sector

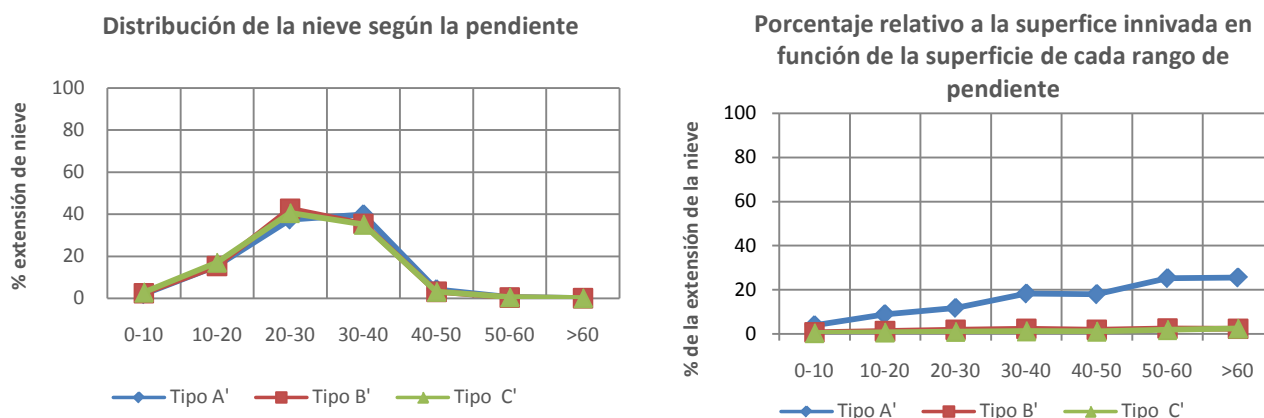
del flysch, cuya altitud va desde los 600 hasta los 2300 m. Esto nos permite observar donde se sitúa la nieve en condiciones desfavorables según altitudes y relacionarlo con los factores topográficos y de ocupaciones de suelo.

Para analizar la distribución de la nieve en el sector del flysch se ha realizado incorporando la tipificación elaborada anteriormente, seleccionado un día de cada situación tipo. Para el tipo A se ha seleccionado el 25 de enero de 2002, para el tipo B el 14 de diciembre de 2006, para el tipo C el 24 de abril de 2002 y para el tipo D no hay cobertura de nieve en esta zona.

Se han realizado una serie de gráficas para poder interpretar los resultados, y así comprobar que altitud, orientación, pendiente y ocupación de suelo predominan más en la superficie cubierta de nieve en el sector del flysch.

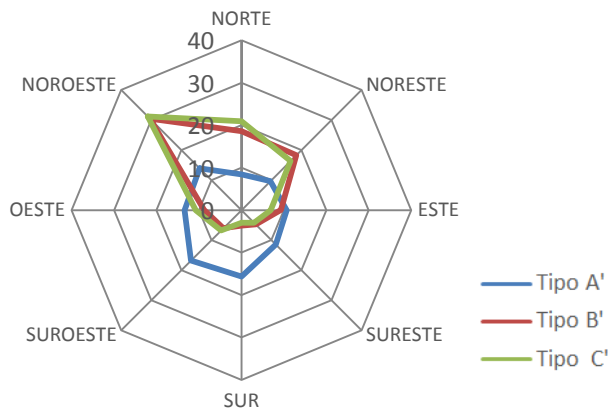


Gráfica 16 Distribución de la nieve según la altitud en el sector del flysch

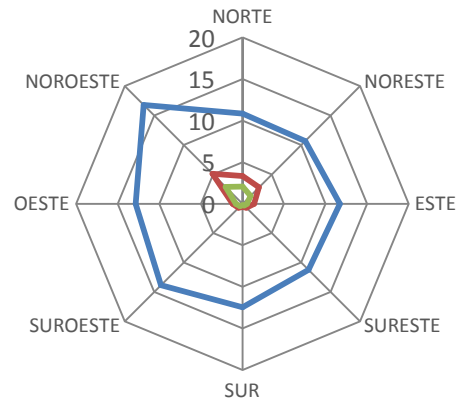


Gráfica 17 Distribución de la nieve según la pendiente en el sector del flysch

Distribución de la nieve según la orientación

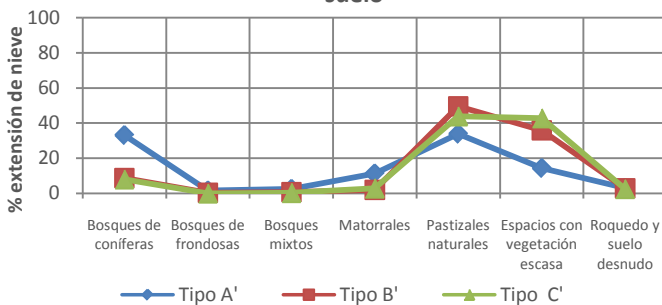


Porcentaje relativo a la superficie innivada en función de la superficie de cada rango de orientación

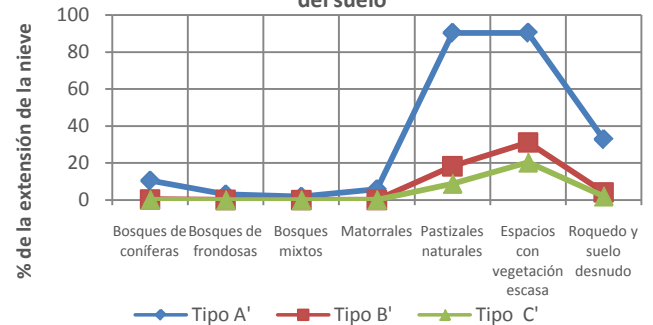


Gráfica18 Distribución de la nieve según la orientación en el sector del flysch

Distribución de la nieve según la ocupación del suelo



Porcentaje relativo a la superficie innivada en función de la superficie de cada rango de ocupación del suelo



Gráfica19 Distribución de la nieve según ocupación de suelo en el sector del flysch

Después de analizar cada uno de los tipos y los factores se puede decir que en el área del flysch la cota de nieve se sitúa principalmente desde los 1250 metros hasta su máxima cota.

El tipo A' en el flysch es similar al Tipo A, con mayor superficie de distribución de nieve en las cotas de entre 1500 y 2000, pero si el análisis se realiza relativizando la superficie innivada en función de la superficie de cada rango altitudinal, se observa como las superficies a mayor cota tienen un manto nival mayor.

Se aprecia el un predominio de superficie innivada en pendientes en torno al 30°-50°, puesto que son las más abundantes en esta zona. Como en el caso anterior si se relativiza en función de cada rango de pendiente, la superficie innivada aumenta en las pendientes mayores mostrando una relación con la altitud. En este aspecto el tipo es similar en el área de estudio y en el flysch.

Se aprecia un predominio del manto nival en las vertientes con orientaciones Noroeste, Oeste, Suroeste. Su tendencia es diferente a las de Tipo A de la zona de estudio, puesto que en esta última zona el manto nival se distribuye con mayor frecuencia por las vertientes con orientación Norte.

En cuanto a las ocupaciones de suelo, los predominantes son pastizal natural y espacios con escasa vegetación, seguidos de roquedo y suelo desnudo. Si se observa la gráfica de distribución de la nieve según la superficie, el bosque de coníferas es el que mayor superficie cuenta con un 0,8 km². En la zona del flysch tanto las áreas de cultivo y prado como las superficies artificiales no se encuentran ocupadas por manto nival.

En cambio el tipo B' se comporta de forma diferente en el flysch, la superficie innivada es muy reducida y únicamente se encuentra desde los 1500 m hasta las cotas más altas. Las pendientes también varían a pesar de que la mayor parte de superficie con nieve se localiza en pendiente entre 30°-50°, si se observa en la gráfica de porcentaje relativo, el porcentaje es similar en todas las pendientes y no es ascendente como se observaba en el Tipo B de la superficie de estudio. Las orientaciones tienen un claro predominio Noroeste, siendo menores en el Norte, situación diferente al Tipo B, donde predominaba el Norte. En cuanto a las ocupaciones de suelo, la situación es similar a la zona de estudio, puesto que como en el caso anterior la cobertura de nieve domina sobre pastizal natural y espacios con escasa vegetación.

El tipo C' también tiene un comportamiento equivalente al Tipo C del área de estudio. El manto de nieve se extiende desde los 1600 m hasta la cota más alta, el aumento en altitud es progresivo muy similar al de la zona de estudio. Las pendientes también adquieren la misma tendencia, pero el hecho de que existe menor manto nival hace que en la gráfica se vean atenuadas. En cambio en las orientaciones sí que se observan diferencias, ya que el tipo C de la zona de estudio tiene una tendencia muy marcada hacia las orientaciones Norte en cambio en el tipo C' en el flysch la orientación dominante es Noroeste. En cuanto a la distribución de la nieve según la ocupación de suelo es similar al de la zona de estudio.

6. CONCLUSIONES

Las imágenes Landsat utilizadas, mediante aplicación de técnicas de tratamiento digital, se han mostrado como una buena herramienta para poder delimitar el manto de nieve, si bien los resultados serían más adecuados en el caso de disponerse de una mayor cobertura de imágenes para completar todos los años hidrológicos. Esta deficiencia se ha intentado

solventar utilizando varias imágenes de años diferentes para completar el año hidrológico, si bien aplicando la debida cautela.

En el estudio se han realizado varios pre-tratamientos a las imágenes. Éstos han sido, por una parte, la sola corrección de la dispersión atmosférica y, por otra, junto a la anterior, la corrección radiométrica, que incluye la conversión a valores de reflectividad y la normalización topográfica. Se han comparado los resultados obtenidos tras la aplicación del Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI) y se han observado resultados prácticamente idénticos. Ello ha puesto de manifiesto la conveniencia de aplicar únicamente la corrección de la distorsión atmosférica causada por la dispersión, por cuanto la aplicación –más costosa en tiempo, aunque modelable– introduce necesariamente cambios innecesarios en los valores de la imagen.

A partir de la cartografía del manto nival y de su análisis combinado con los factores estructurales analizados ha sido posible definir cuatro patrones diferenciados o situaciones tipo: tipo A situación propia del invierno, tipo B situación del comienzo del invierno y final del mismo, tipo C situación de primavera y tipo D situación de primavera tardía y verano.

La mayor parte del manto nival se extiende en las cotas más altas, donde se encuentran las pendientes más elevadas y cuya orientación predominante es Norte o Noreste. En los supuestos de la cobertura de nieve de invierno y comienzos de invierno final de otoño, el manto nival se distribuye en las vertientes con cualquier orientación. Al encontrarse en cotas altas la nieve predomina sobre suelos ocupados por roquedos y suelos desnudos, pastizales naturales y espacios con escasa vegetación.

En las situaciones extremas, tanto temporal (tipo D) como espacialmente (sector del flysch), donde la nieve está presentada de forma residual, el manto nival se localiza en las cotas más altas: en cuanto a los días de primavera y verano se encuentra sobre pendientes fuertes, propias de las zonas con mayor altitud; en cambio, en las zonas del flysch el manto nival se encuentra sobre pendientes más atenuadas. También se observan cambios en la orientación: en el caso del tipo D la orientación de las vertientes es fundamentalmente Norte; en cambio, en la zona del flysch las orientaciones dominantes son Noroeste. Las categorías de ocupación del suelo predominantes son, para el tipo D, los roquedos y los suelos desnudos, mientras que para el sector del flysch son los pastizales naturales y los espacios con escasa vegetación.

El presente estudio pone de manifiesto que las técnicas de tratamiento digital de imágenes de teledetección Landsat, combinadas con técnicas SIG para la integración de información auxiliar, constituyen una óptima herramienta para obtener información relativa a la superficie ocupada por la nieve y suponen un importante ahorro económico y de tiempo, además de ser

un método fiable que permite, entre otras aplicaciones, la evaluación, previsión y gestión de los recursos hídricos.

7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

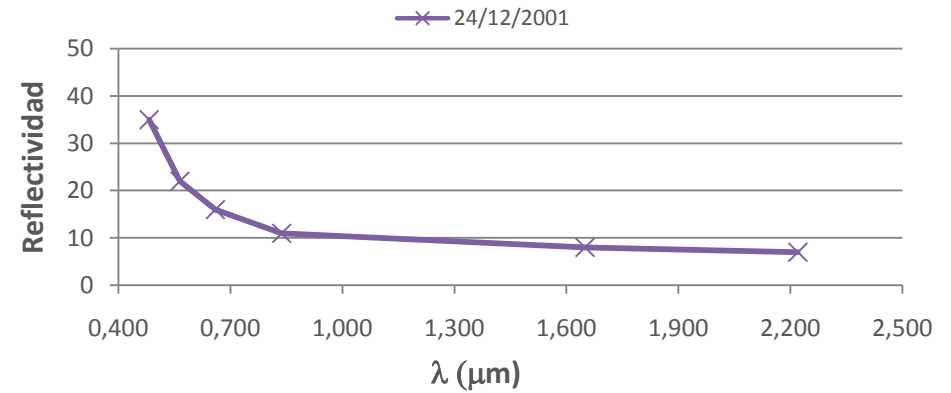
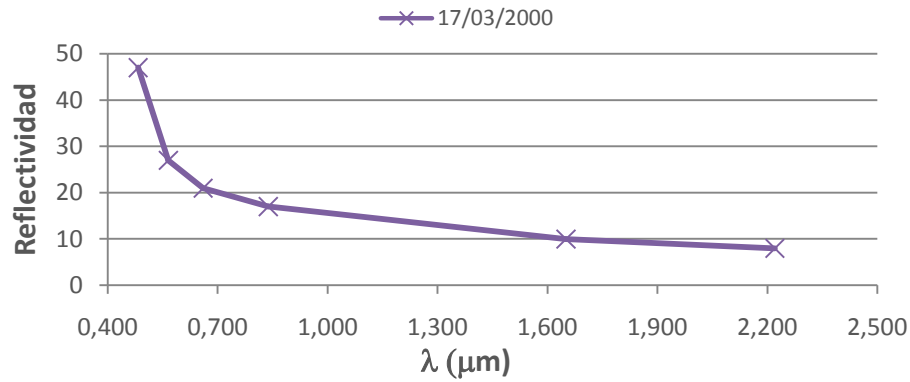
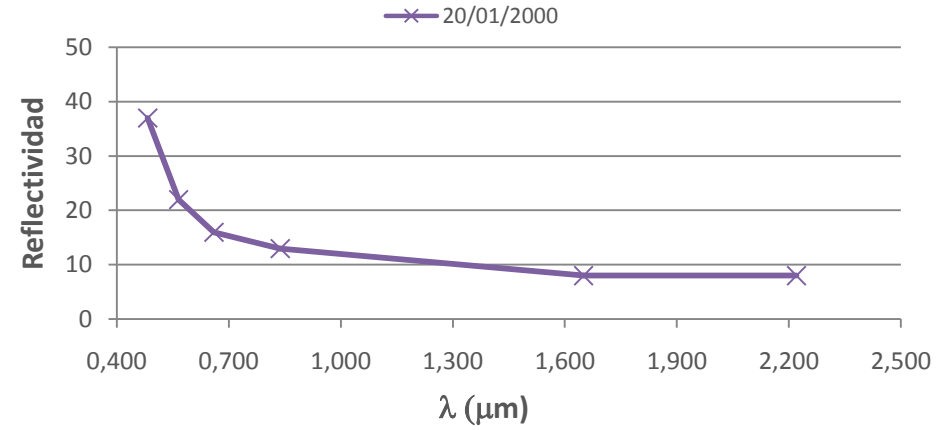
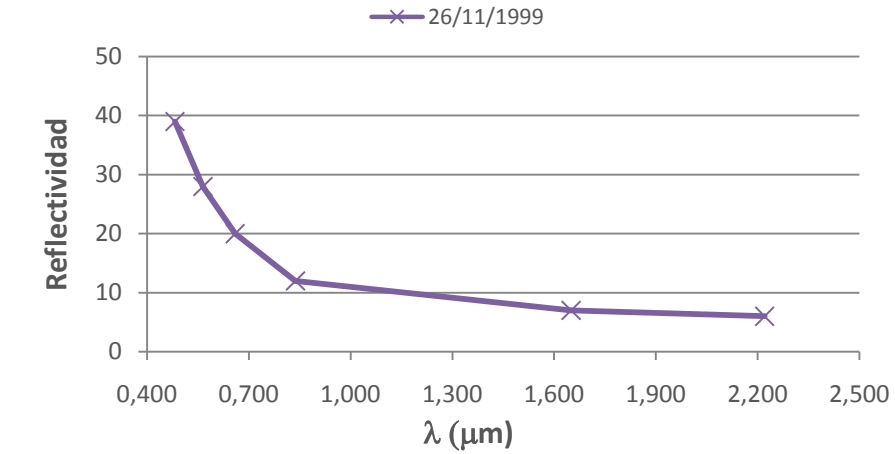
El uso de técnicas de teledetección para discriminar la nieve constituye un método fiable, como se ha comprobado. Una de las líneas de investigación futura es la incorporación –junto a las imágenes Landsat utilizadas– de imágenes MODIS, que, a pesar de su muy inferior resolución espacial, pueden ser útiles para garantizar un cubrimiento temporal más sistemático, dado su carácter diario. El trabajo futuro se orientará a la utilización combinada de ambas imágenes. Además de en esta línea, se va a profundizar en la aplicación de otros algoritmos que permitan establecer diferencias entre distintos tipos de nieve o, en esta misma línea, incorporar conjuntamente al NDSI el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Soy igualmente consciente de que sería posible, incluso deseable, ahondar en las relaciones establecidas entre el manto de nieve y los diversos factores estructurales desde una aproximación estadística más compleja, por ejemplo el análisis multifactorial, que permitiera modelar cuantitativamente el fenómeno analizado.

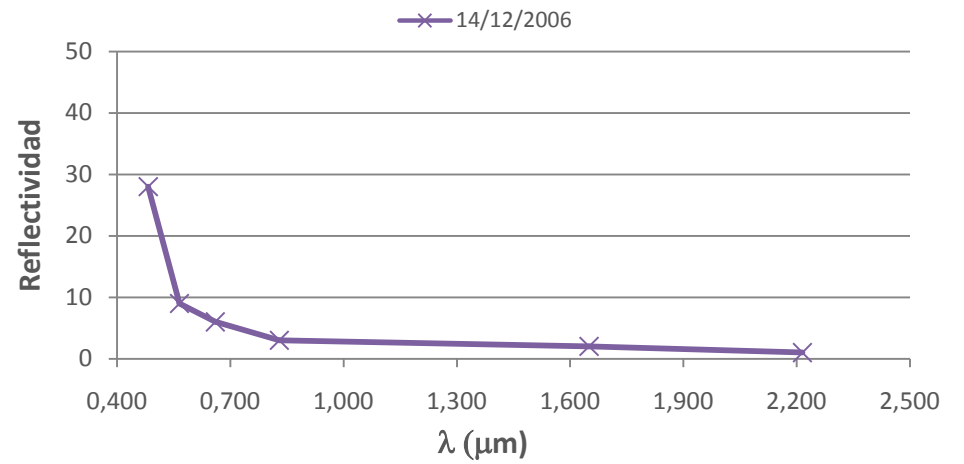
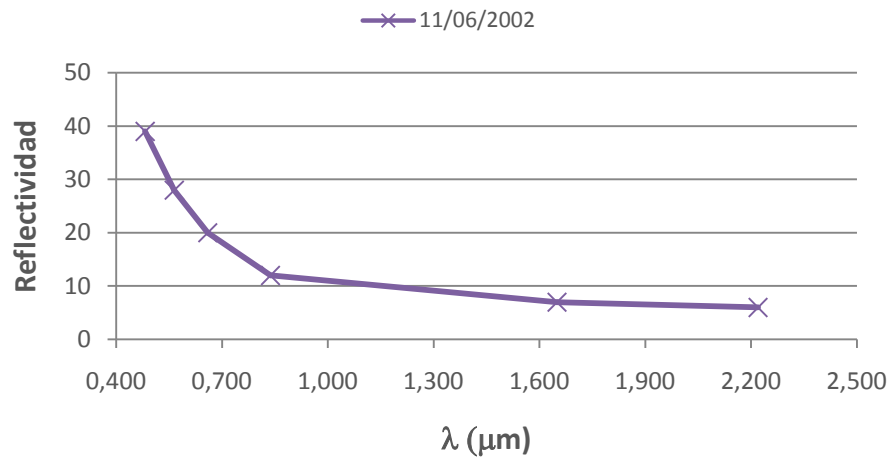
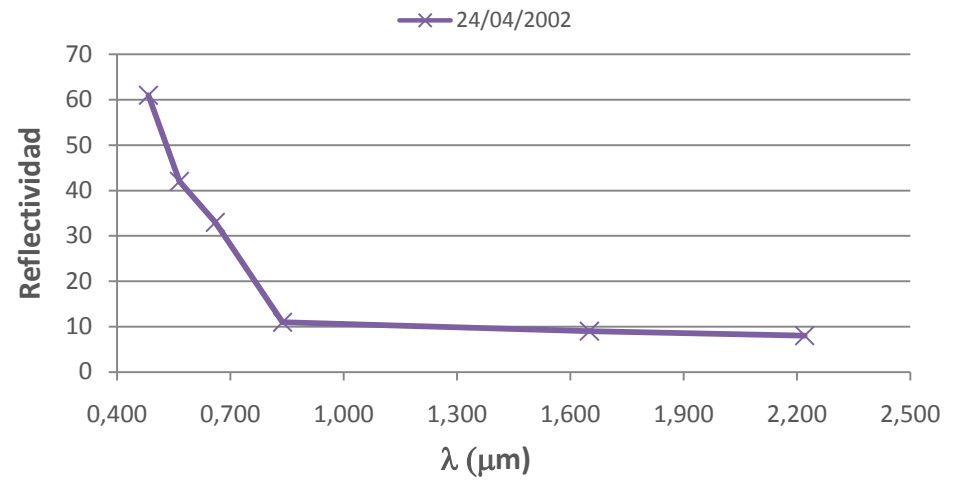
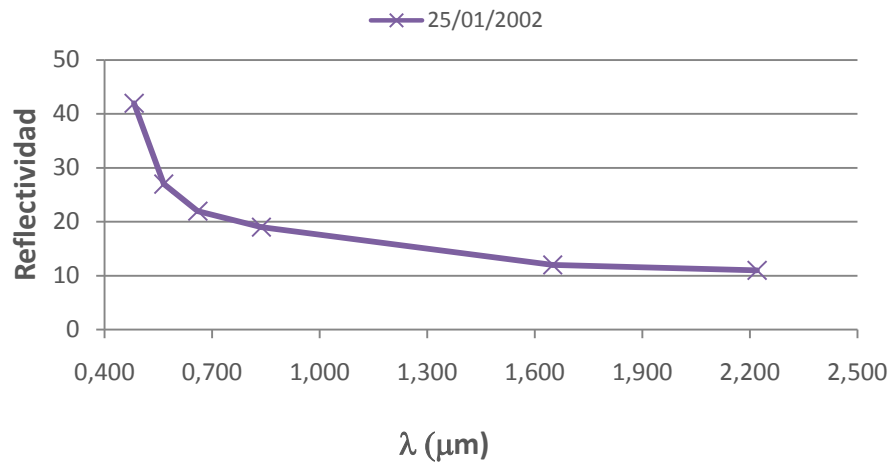
8. BIBLIOGRAFÍA

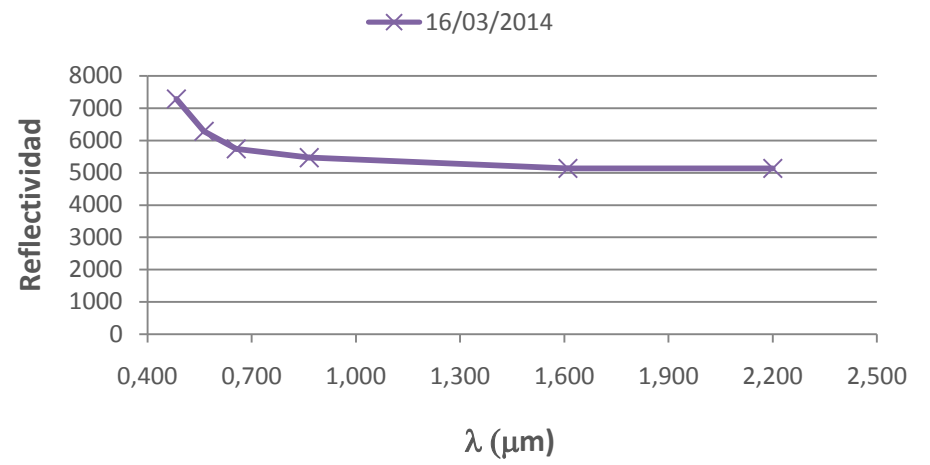
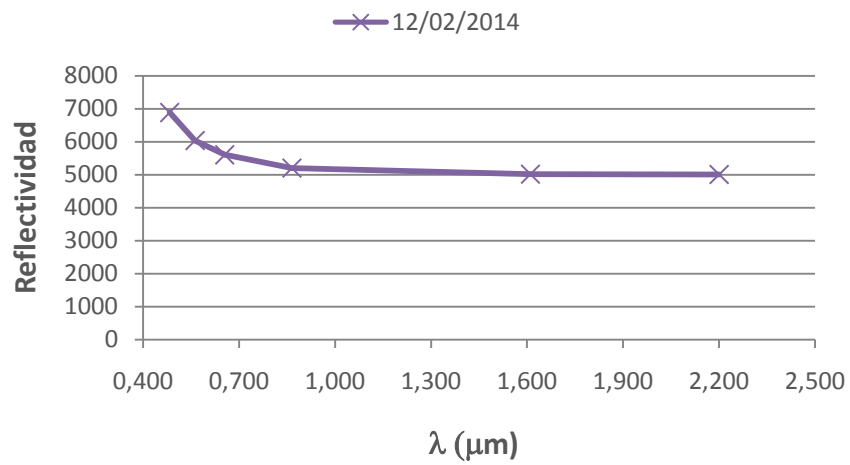
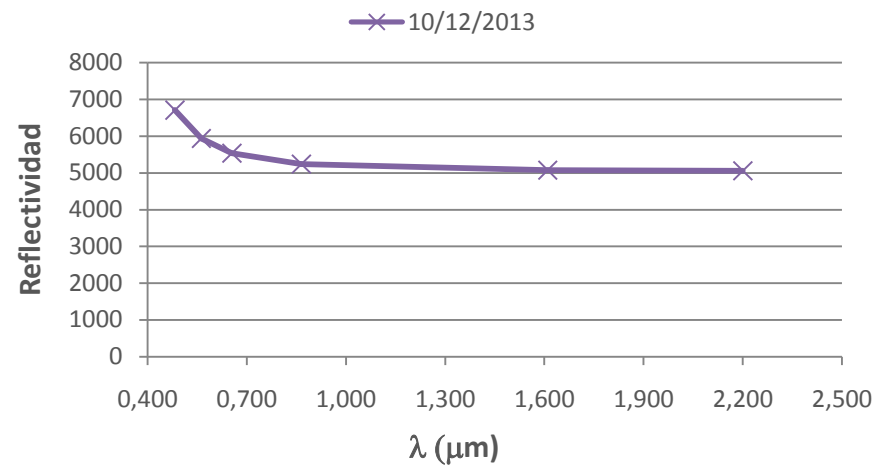
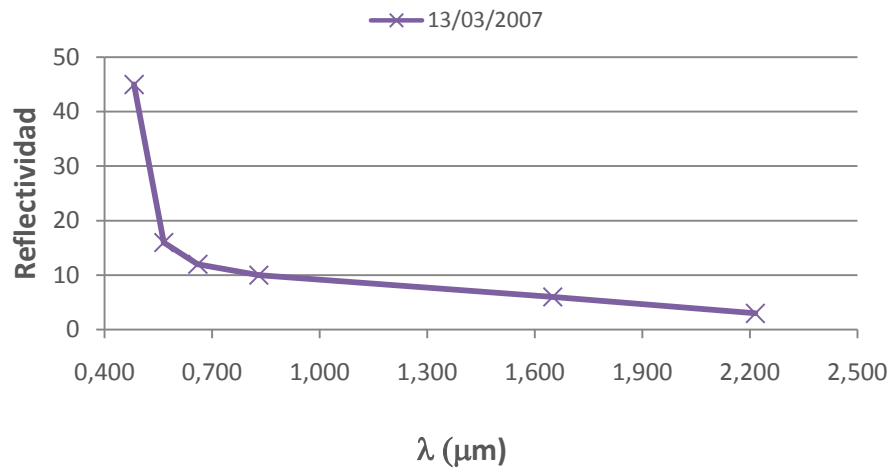
- Beguiría, S. (2011). *Erosión y fuentes de sedimento en la cuenca del embalse de Yesa (Pirineo occidental): ensayo de una metodología basada en teledetección y análisis SIG*. Tesis doctoral, Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Accesible en: <http://hdl.handle.net/10261/20915> [último acceso, mayo 2015].
- Cea López, C., & Pons Fernández, X. (2007). Determinación de la superficie nival del Pirineo Catalán mediante imágenes Landsat y MODIS. *7th Geomaticweek*, Barcelona, 20-23 February 2007. 10 pp.
- CNIG. Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica. <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/> [último acceso, mayo de 2015]
- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893-903.
- Chavez, P. S. (1996). Image-based atmospheric corrections-revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), 1025-1035.

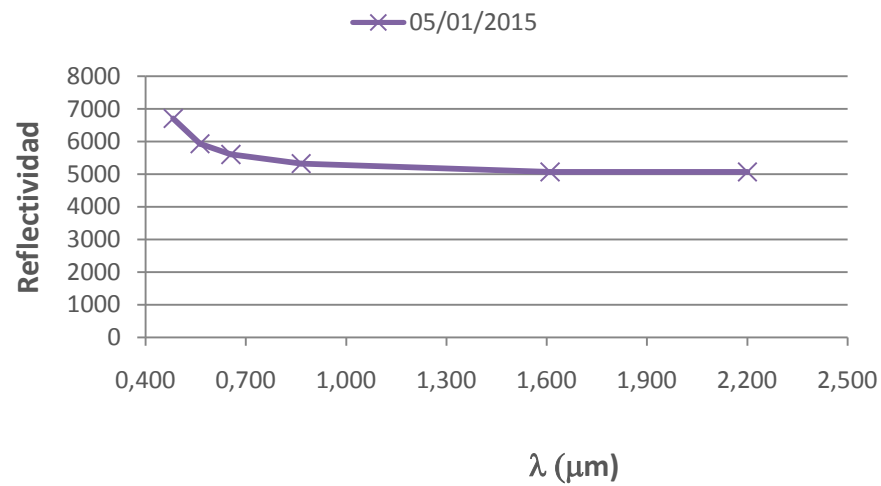
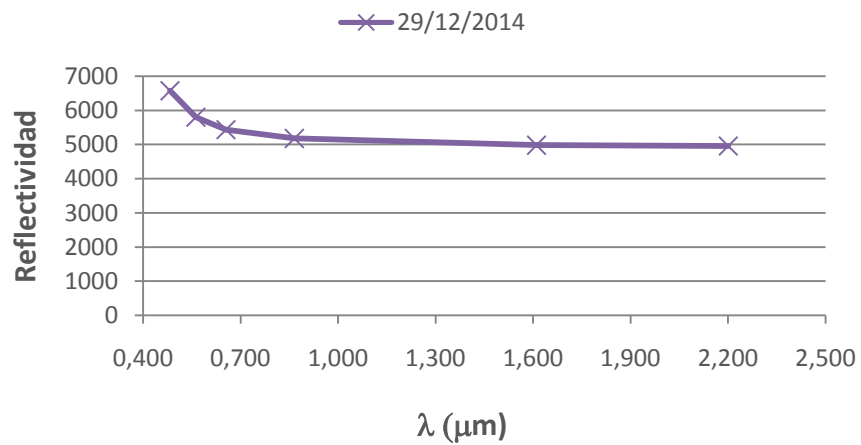
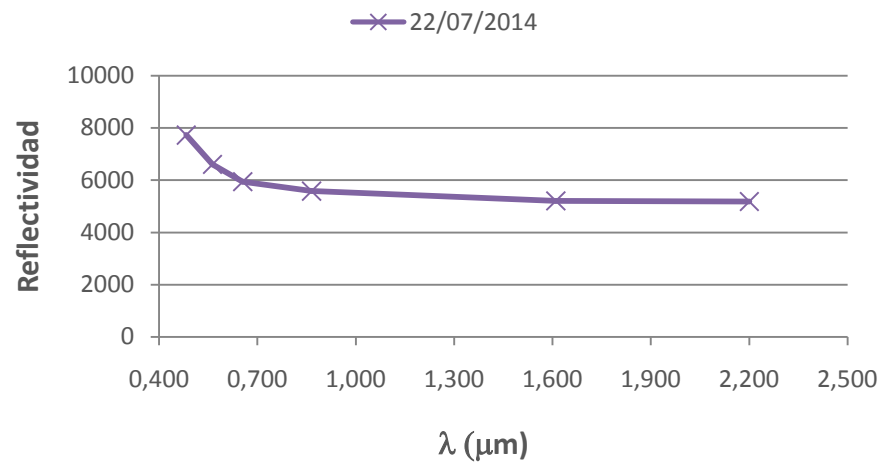
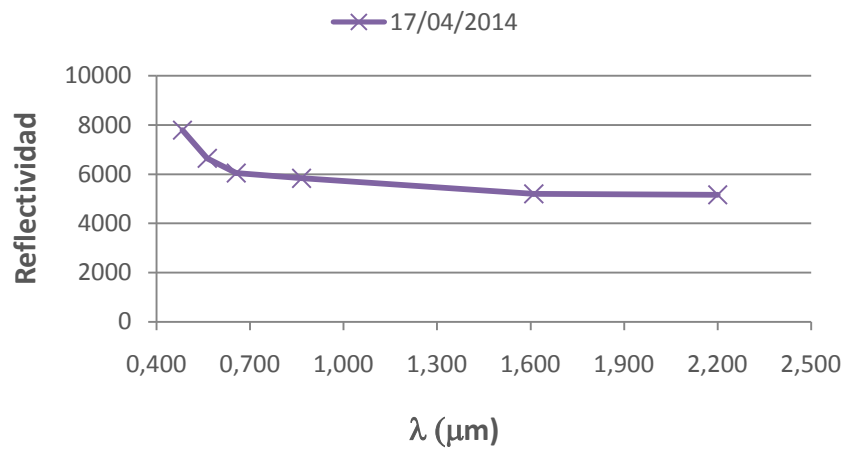
- Chueca, J., Andrés, A. J., Sánchez, M. S., Novau, J. C., & Moreno, J. L. (2005). Responses to climatic changes since the Little Ice Age on Maladeta Glacier (Central Pyrenees). *Geomorphology*, 68(3), 167-182.
- Civco, D. L. (1989). Topographic normalization of Landsat Thematic Mapper digital imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55(9), 1303-1309.
- Colby, J.D.(1991). Topographic Normalization in Rugged Terrain. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57, 531-537.
- Cuadrat, J. M., Saz, M. A., & Vicente-Serrano, S. M. (2007). *Atlas climático de Aragón*. Gobierno de Aragón.
- de la Riva Fernández, J. R. (1997). *Los montes de la Jacetania: caracterización física y explotación forestal*. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, Zaragoza.
- Dozier, J. (1989). Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*, 28, 9-22.
- García-Ruiz, J. M., & Valero, B. (1997). Procesos geomórficos históricos y su relación con la actividad humana en el Pirineo Central español. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 22-23, 33-56.
- GLOVIS. USGS Global Visualization Viewer. <http://glovis.usgs.gov/>[último acceso, mayo 2015].
- IDE-Aragón (2015). *Mapas de paisaje: La Jacetania y Alto Gállego* <http://idearagon.aragon.es/busqueda.jsp?q=paisaje>[último acceso, junio 2015].
- López-Moreno, J. I., & García-Ruiz, J. M. (2004). Influence of snow accumulation and snowmelt on streamflow in the central Spanish Pyrenees/ Influence de l'accumulation et de la fonte de la neige sur les écoulements dans les Pyrénées centrales espagnoles. *Hydrological Sciences Journal*, 49(5), 787-802.
- López-Moreno, J. I., Pomeroy, J. W., Revuelto, J., & Vicente-Serrano, S. M. (2013). Response of snow processes to climate change: spatial variability in a small basin in the Spanish Pyrenees. *Hydrological Processes*, 27(18), 2637-2650.
- NASA. *Landsat Science*. <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>[último acceso, mayo 2015].

ANEXO I VALORES DE CUERPO OSCURO DE LAS IMÁGENES SELECCIONADAS



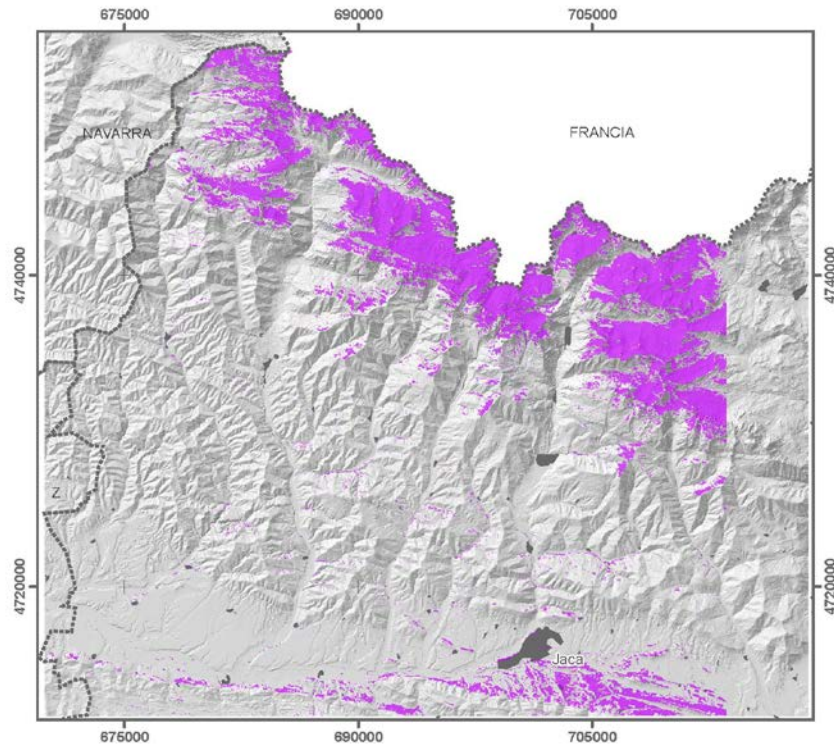






ANEXO II DISTRIBUCIÓN DEL MANTO NIVAL EN LOS DÍAS SELECCIONADOS

SUPERFICE DE NIEVE DE FECHA 24 DE DICIEMBRE DE 2001

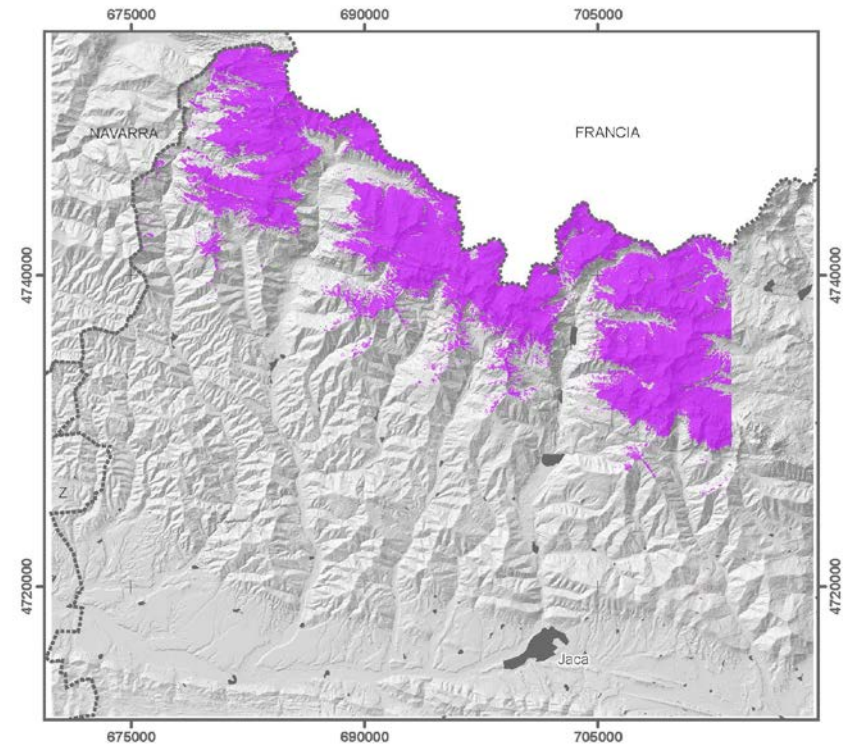


PROYECCIÓN: WGS 1984 UTM ZONA 30N
FUENTE: CNIG, USGS
FECHA: 2015
AUTORA: ESTELA PÉREZ CARDIEL

Leyenda

- Superficie de nieve
- Nucleos de población

SUPERFICE DE NIEVE DE FECHA 14 DE DICIEMBRE DE 2006

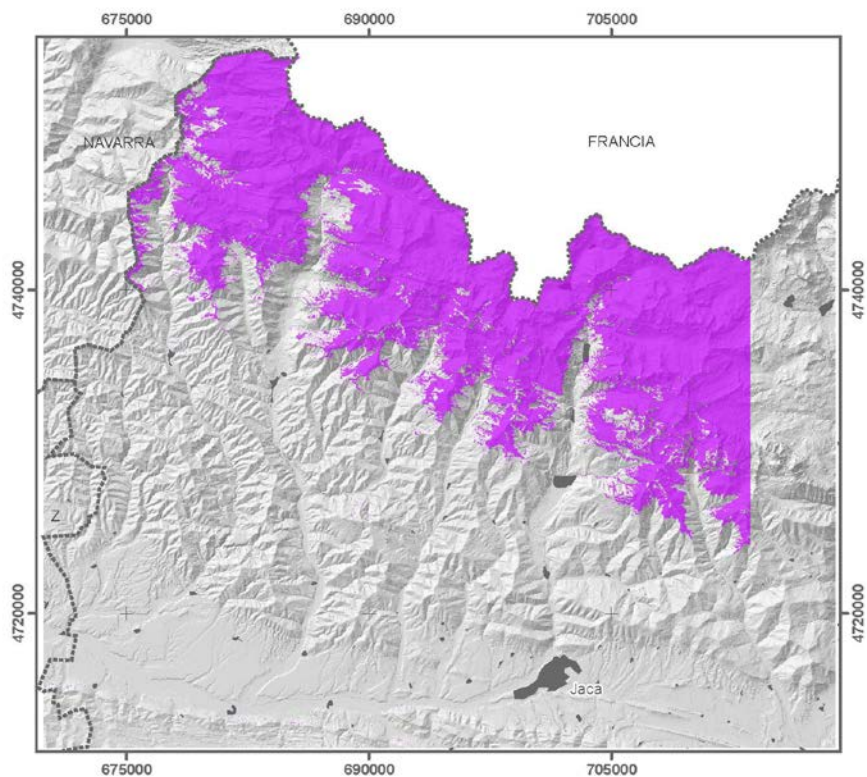


PROYECCIÓN: WGS 1984 UTM ZONA 30N
FUENTE: CNIG, USGS
FECHA: 2015
AUTORA: ESTELA PÉREZ CARDIEL

Leyenda

- Superficie de nieve
- Nucleos de población

SUPERFICIE DE NIEVE DE FECHA 26 DE NOVIEMBRE DE 1999

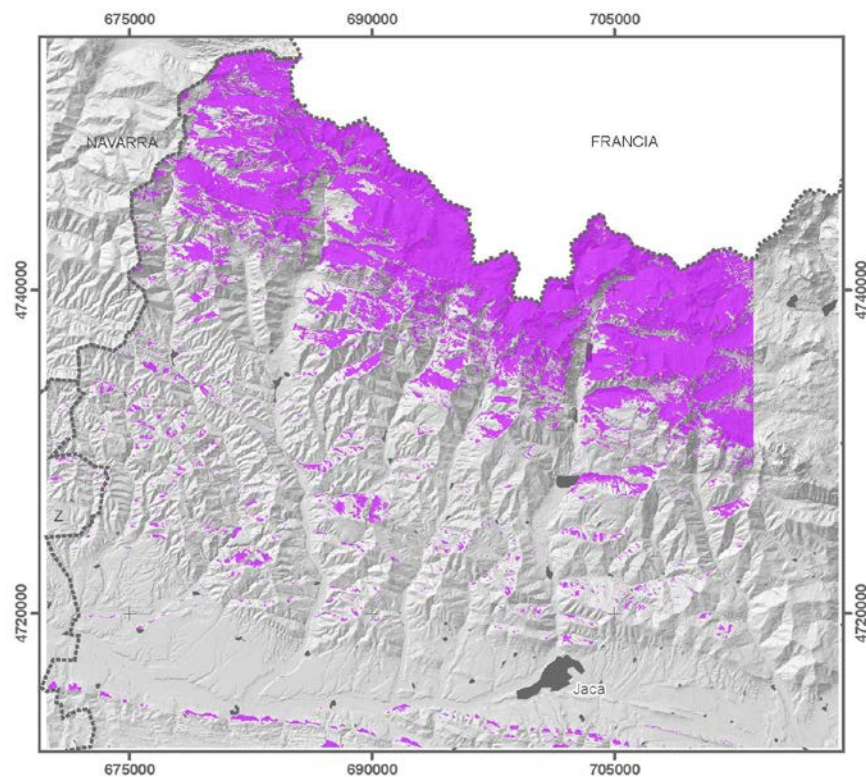


PROYECCIÓN: WGS 1984 UTM ZONA 30N
FUENTE: CNIG, USGS
FECHA: 2015
AUTORA: ESTELA PÉREZ GARDIEL

Leyenda

- Superficie de nieve
- Nucleos de población

SUPERFICIE DE NIEVE DE FECHA 10 DE DICIEMBRE DE 2013

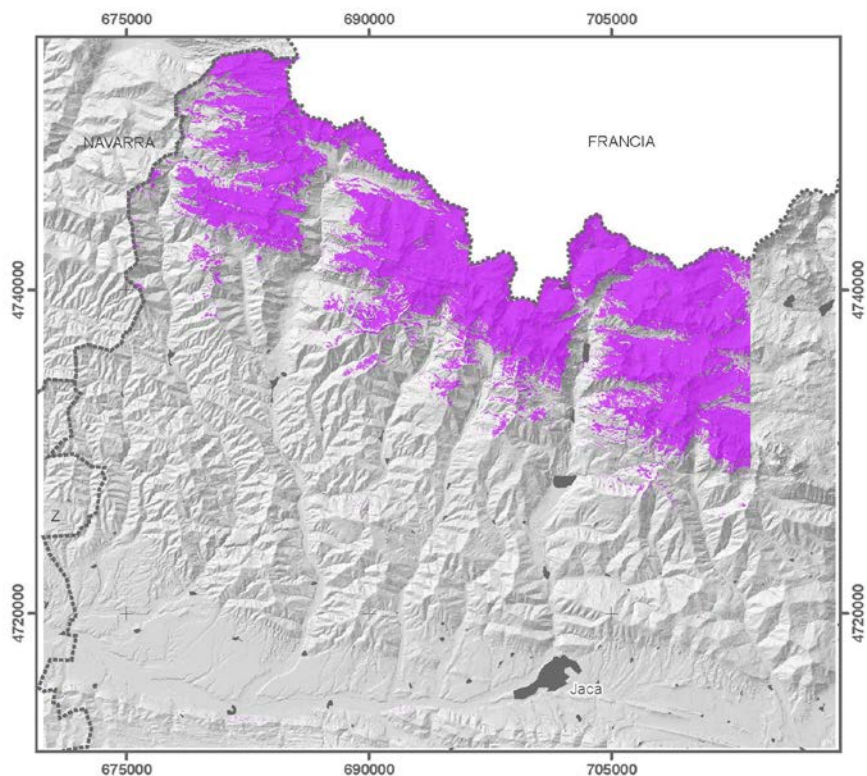


PROYECCIÓN: WGS 1984 UTM ZONA 30N
FUENTE: CNIG, USGS
FECHA: 2015
AUTORA: ESTELA PÉREZ GARDIEL

Leyenda

- Superficie de nieve
- Nucleos de población

SUPERFICIE DE NIEVE DE FECHA 20 DE ENERO DE 2000

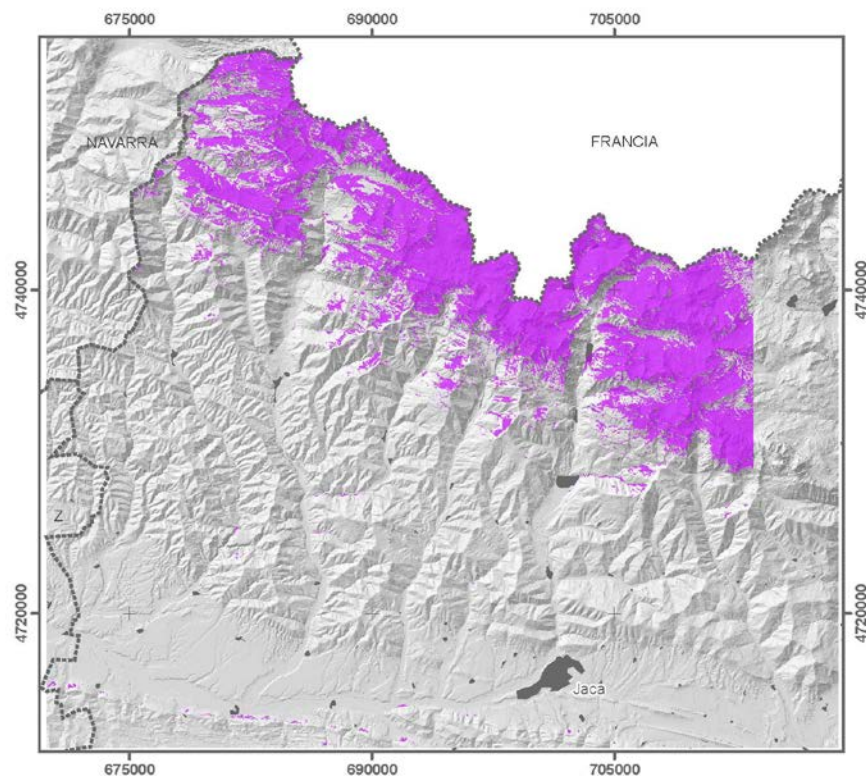


PROYECCIÓN: WGS 1984 UTM ZONA 30N
FUENTE: CNIG, USGS
FECHA: 2015
AUTORA: ESTELA PÉREZ CARDIEL

Leyenda

- Superficie de nieve
- Nucleos de población

SUPERFICIE DE NIEVE DE FECHA 5 DE ENERO DE 2015

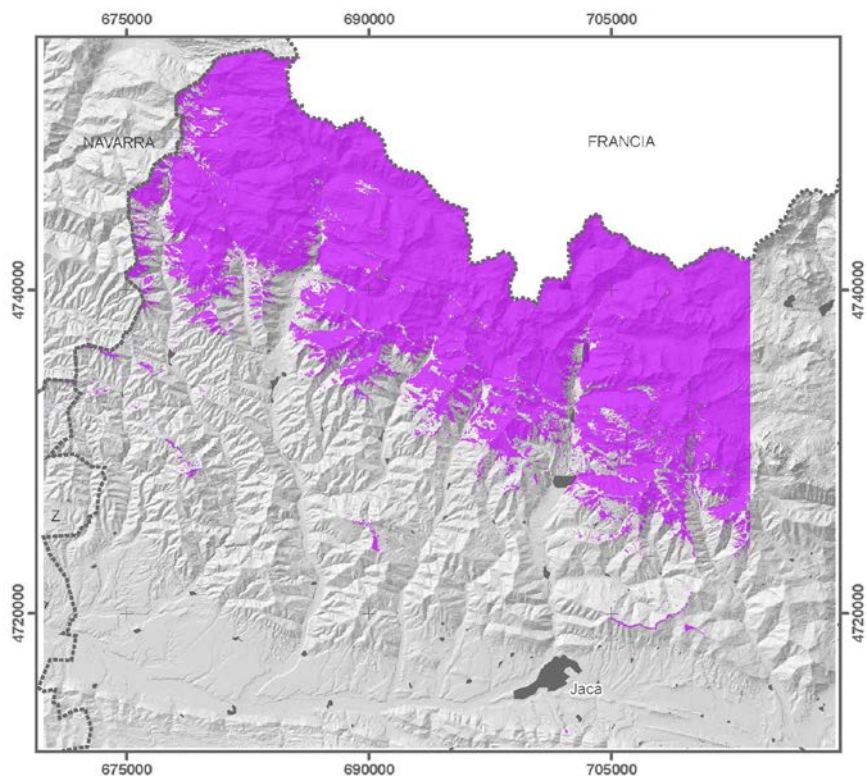


PROYECCIÓN: WGS 1984 UTM ZONA 30N
FUENTE: CNIG, USGS
FECHA: 2015
AUTORA: ESTELA PÉREZ CARDIEL

Leyenda

- Superficie de nieve
- Nucleos de población

SUPERFICIE DE NIEVE DE FECHA 29 DE DICIEMBRE DE 2014

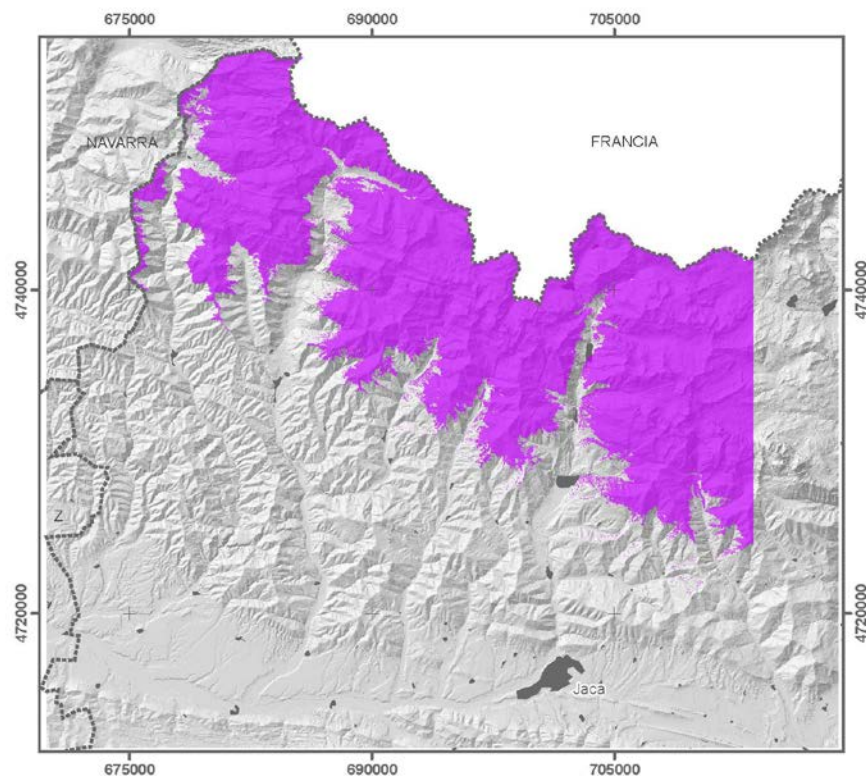


PROYECCIÓN: WGS 1984 UTM ZONA 30N
FUENTE: CNIG, USGS
FECHA: 2015
AUTORA: ESTELA PÉREZ CARDIEL

Leyenda

- Superficie de nieve
- Nucleos de población

SUPERFICIE DE NIEVE DE FECHA 25 DE ENERO DE 2002

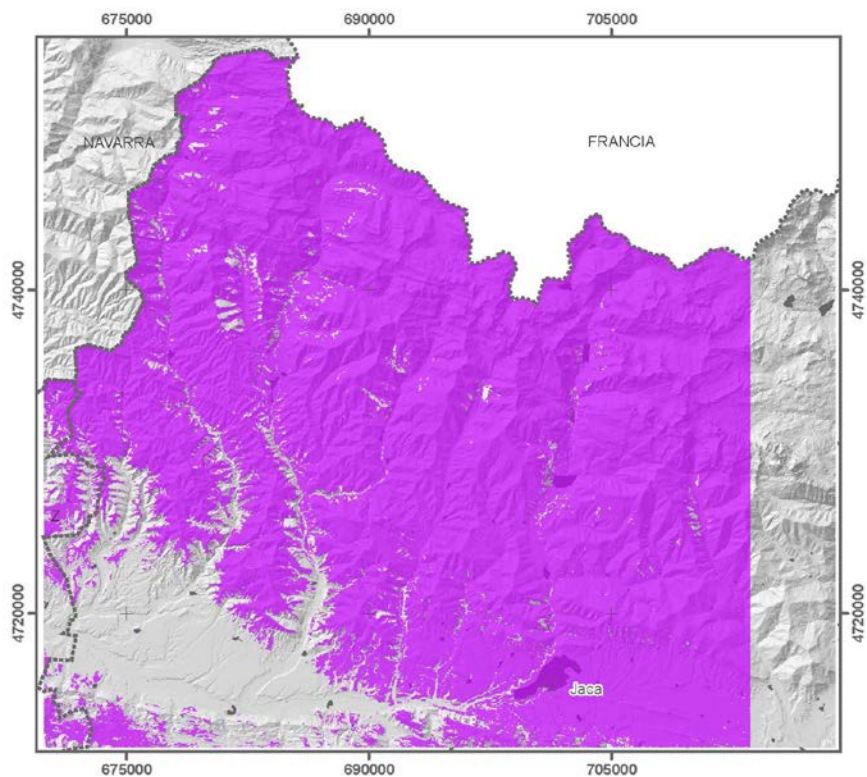


PROYECCIÓN: WGS 1984 UTM ZONA 30N
FUENTE: CNIG, USGS
FECHA: 2015
AUTORA: ESTELA PÉREZ CARDIEL

Leyenda

- Superficie de nieve
- Nucleos de población

SUPERFICIE DE NIEVE DE FECHA 12 DE FEBRERO DE 2014

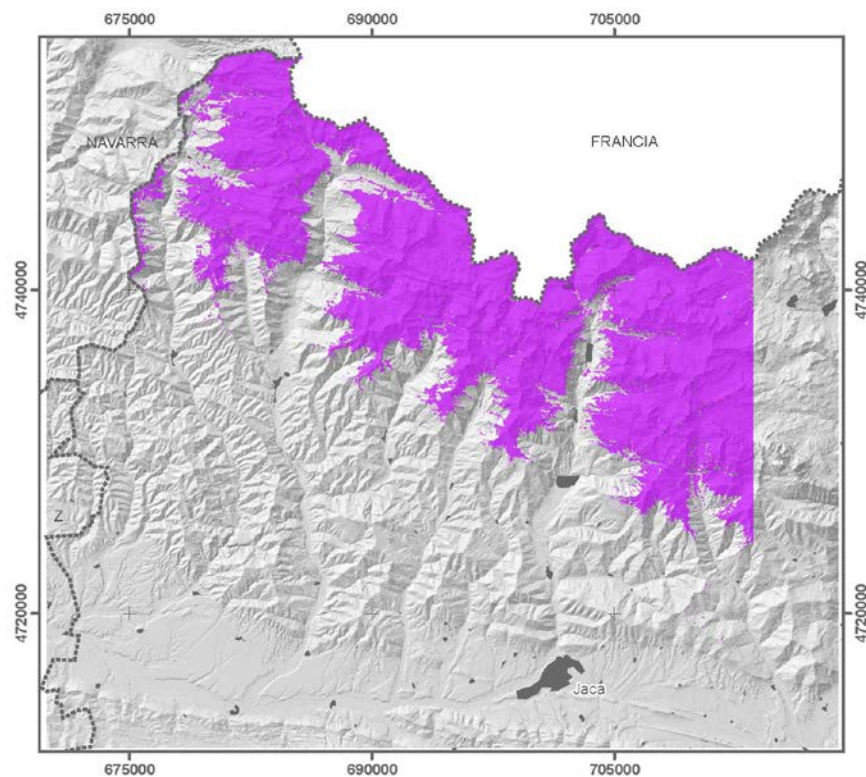


PROYECCIÓN: WGS 1984 UTM ZONA 30N
FUENTE: CNIG, USGS
FECHA: 2015
AUTORA: ESTELA PÉREZ CARDIEL

Leyenda

- Superficie de nieve
- Nucleos de población

SUPERFICIE DE NIEVE DE FECHA 16 DE MARZO DE 2014

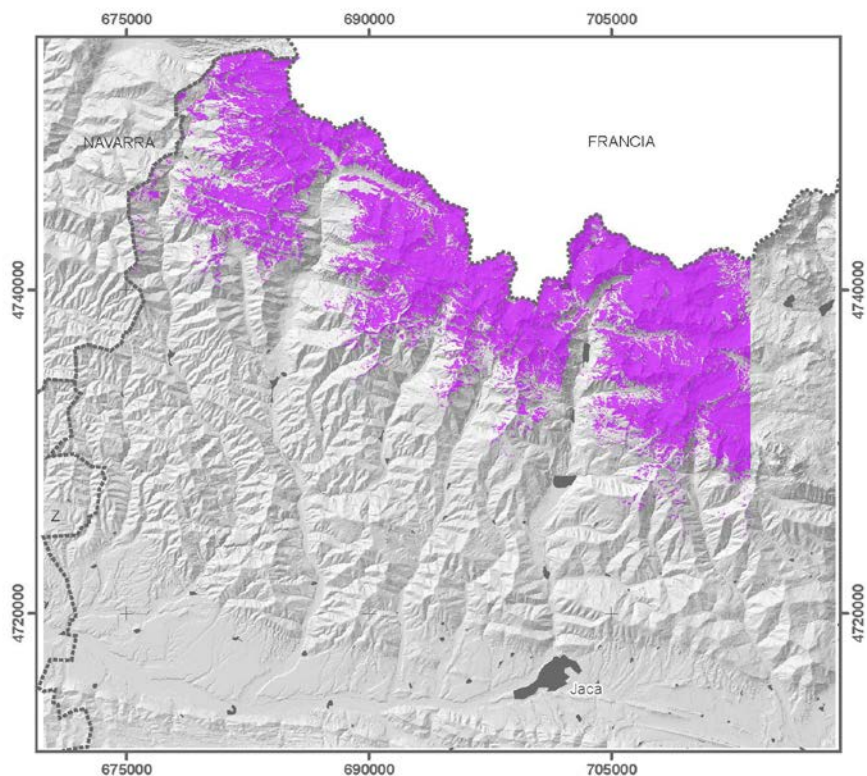


PROYECCIÓN: WGS 1984 UTM ZONA 30N
FUENTE: CNIG, USGS
FECHA: 2015
AUTORA: ESTELA PÉREZ CARDIEL

Leyenda

- Superficie de nieve
- Nucleos de población

SUPERFICIE DE NIEVE DE FECHA 13 DE MARZO DE 2007

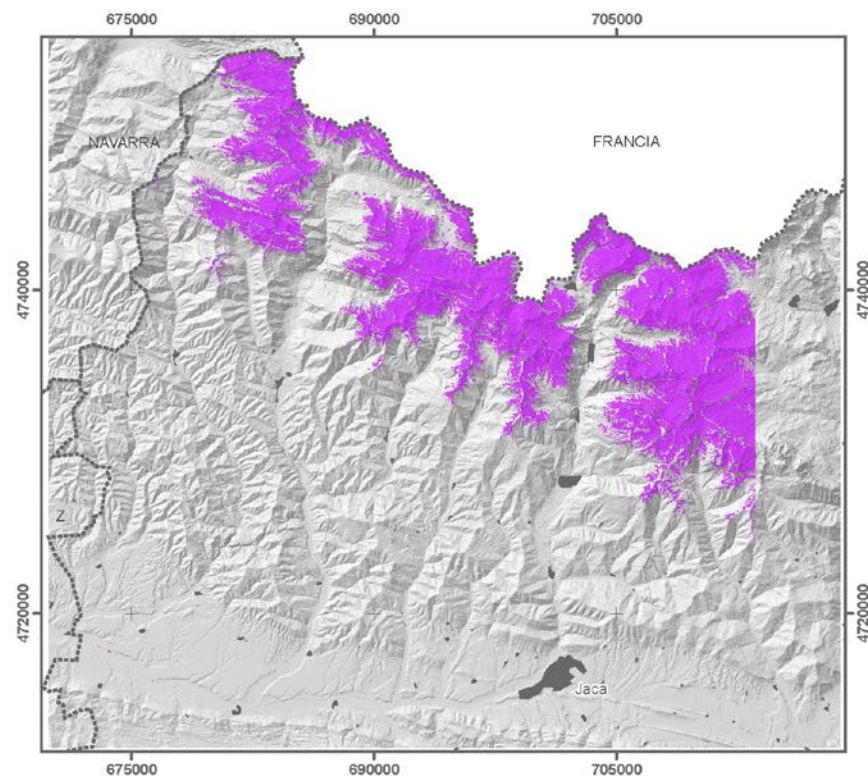


PROYECCIÓN: WGS 1984 UTM ZONA 30N
FUENTE: CNIG, USGS
FECHA: 2015
AUTORA: ESTELA PÉREZ CARDIEL

Leyenda

- Superficie de nieve
- Nucleos de población

SUPERFICIE DE NIEVE DE FECHA 17 DE ABRIL DE 2014

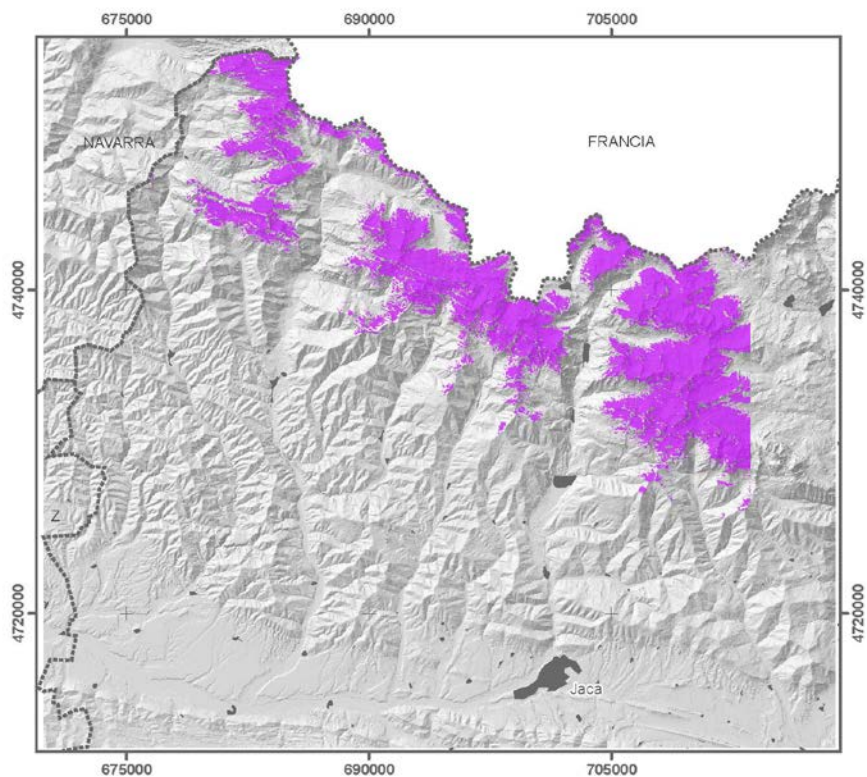


PROYECCIÓN: WGS 1984 UTM ZONA 30N
FUENTE: CNIG, USGS
FECHA: 2015
AUTORA: ESTELA PÉREZ CARDIEL

Leyenda

- Superficie de nieve
- Nucleos de población

SUPERFICIE DE NIEVE DE FECHA 24 DE ABRIL DE 2002

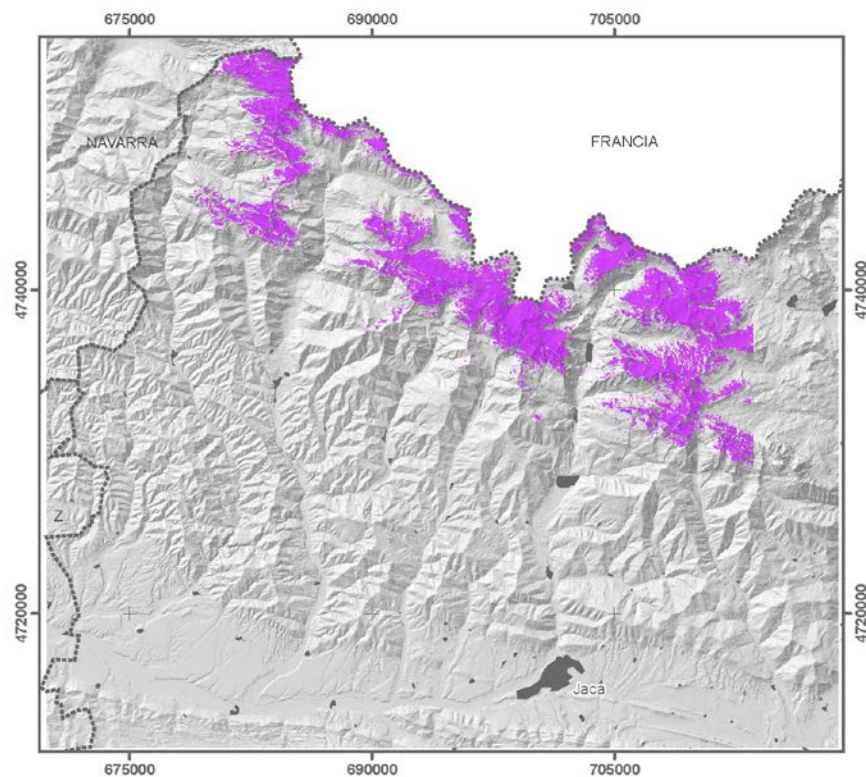


PROYECCIÓN: WGS 1984 UTM ZONA 30N
FUENTE: CNIG, USGS
FECHA: 2015
AUTORA: ESTELA PÉREZ GARDIEL

Leyenda

- Superficie de nieve
- Nucleos de población

SUPERFICIE DE NIEVE DE FECHA 17 DE MARZO DE 2000

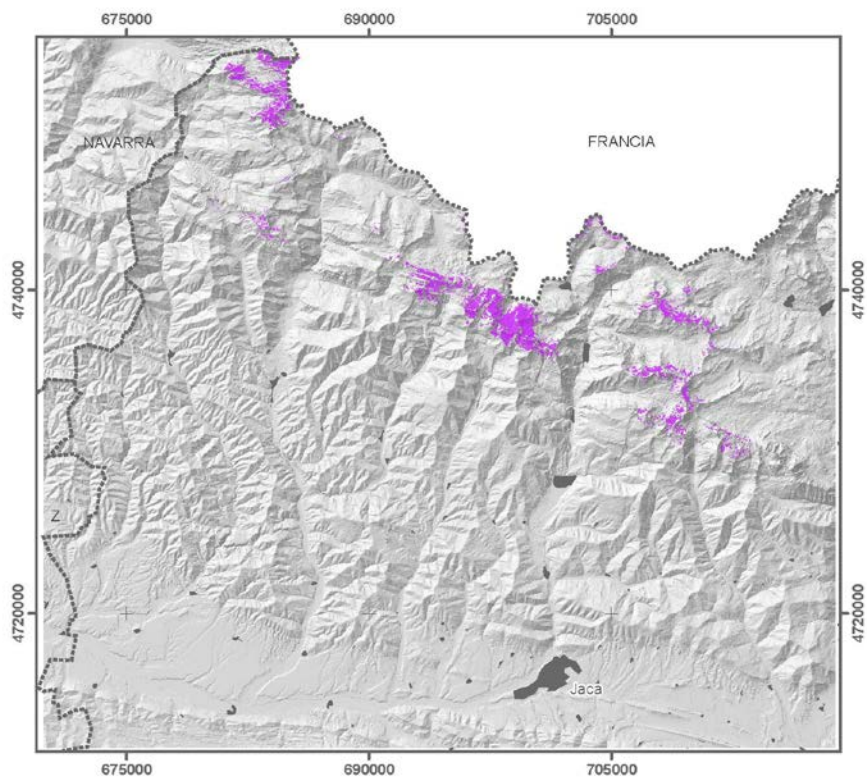


PROYECCIÓN: WGS 1984 UTM ZONA 30N
FUENTE: CNIG, USGS
FECHA: 2015
AUTORA: ESTELA PÉREZ GARDIEL

Leyenda

- Superficie de nieve
- Nucleos de población

SUPERFICIE DE NIEVE DE FECHA 11 DE JUNIO DE 2002

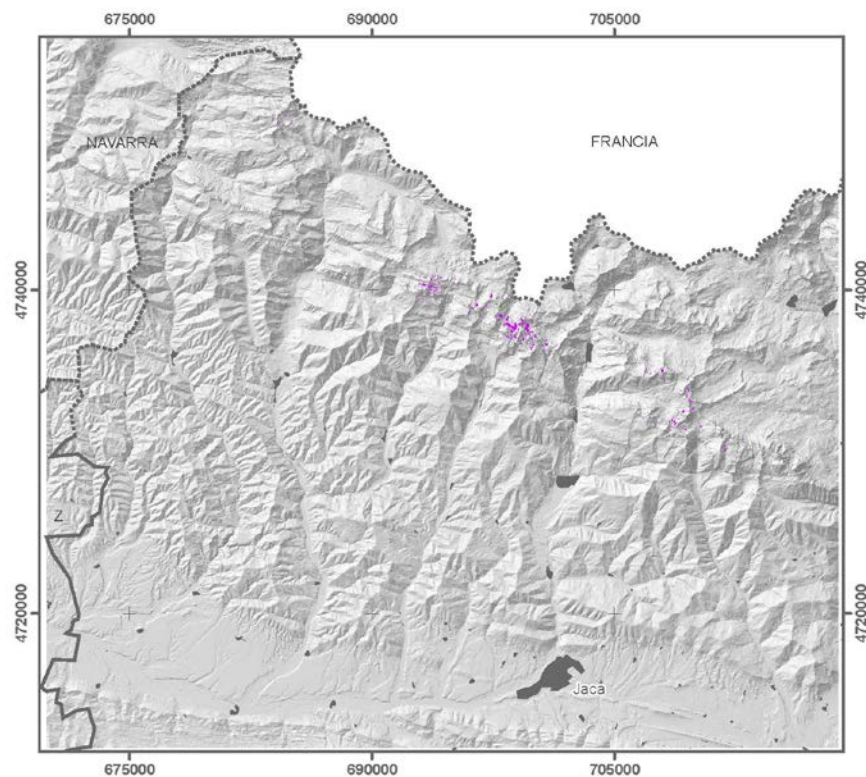


PROYECCIÓN: WGS 1984 UTM ZONA 30N
FUENTE: CNIG, USGS
FECHA: 2015
AUTORA: ESTELA PÉREZ GARDIEL

Leyenda

- Superficie de nieve
- Nucleos de población

SUPERFICIE DE NIEVE DE FECHA 22 DE JULIO DE 2014



PROYECCIÓN: WGS 1984 UTM ZONA 30N
FUENTE: CNIG, USGS
FECHA: 2015
AUTORA: ESTELA PÉREZ GARDIEL

Leyenda

- Superficie de nieve
- Nucleos de población