

Trabajo Fin de Grado

Cartografía de las zonas susceptibles al inicio de aludes en la cuenca del Barranco de Trigoniero (Pirineo central aragonés) mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica.

Avalanche susceptibility mapping in the Trigoniero basin (Central Aragonese Pyrenees) using Geographic Information Systems.

Autor

Jesús Ramo Fuertes

Director

Javier Chueca Cía

CARTOGRAFÍA DE LAS ZONAS SUSCEPTIBLES AL INICIO DE ALUDES EN LA CUENCA DEL BARRANCO DE TRIGONIERO (PIRINEO CENTRAL ARAGONÉS) MEDIANTE EL EMPLEO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

J. RAMO FUERTES

Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio

Línea TFG: Áreas de montaña, cartografía de riesgos mediante SIG

Tutor: J. CHUECA CÍA

Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Zaragoza. 2018

RESUMEN. *En el presente Trabajo Fin de Grado (TFG) se realiza una cartografía de las zonas susceptibles al inicio de aludes en la cuenca del Barranco de Trigoniero (Pirineo central aragonés) a partir del empleo de Sistemas de Información Geográfica (SIG).*

Los factores condicionantes utilizados han sido la altitud mensual de la isoterma regional 0°C (noviembre-mayo), las pendientes y la cubierta del terreno. Además, se ha realizado la cartografía de la radiación solar sobre la cuenca durante los meses estudiados previendo así su importancia sobre la dinámica de la nieve en los meses de abril y mayo.

ABSTRACT. *This work presents the cartography of probable avalanche starting zones in the Trigoniero Basin (Central Aragonese Pyrenees) using Geographic Information Systems (GIS) tools.*

The controlling factors used in the analysis have been: altitude of the monthly regional 0°C isotherm (November- May), slope and terrain land cover. The additional cartography of the monthly solar radiation has allowed to foresee its role on the snow cover dynamics in the spring months of April and May.

Palabras clave: aludes, zona de comienzo o arranque, cartografía, Sistemas de Información Geográfica, Pirineo central aragonés.

Key words: avalanche, starting zone, cartography, Geographic Information Systems, Central Aragonese Pyrenees.



Panorámica del Barranco de Trigoniero en su curso medio (Foto: Jesús Ramo)

Índice.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	pág.7
2. ÁREA DE ESTUDIO	pág.7
2.1. LOCALIZACIÓN.....	pág.7
2.2. CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO	pág.9
2.2.1. Litología y geomorfología	pág.9
2.2.2. Climatología e hidrología	pág.10
2.2.3. Vegetación	pág.12
2.2.4. Actividad y presencia antrópica.....	pág.13
3. MATERIAL Y MÉTODOS	pág.13
3.1. MARCO TEÓRICO	pág.13
3.2. VARIABLES E INFORMACIÓN EMPLEADA.....	pág.15
3.3. PROCESO DE ELABORACIÓN	pág.16
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	pág. 18
5. CONCLUSIONES.....	pág. 25
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	pág.25
ANEXO FOTOGRÁFICO.....	pág. 27

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La investigación e instituciones específicas dedicadas al estudio de aludes tienen larga historia en los países nórdicos, Austria, Francia, Italia o Suiza, pues hay una gran masa de población expuesta a estos. En España, el número de víctimas y pérdidas materiales por aludes, cada vez son mayores dado el auge del turismo y el deporte de montaña. Por lo tanto, ante la creciente exposición, el riesgo de aludes también debería convertirse en un elemento fundamental en la ordenación del territorio en nuestro país.

En este contexto, los aludes tienen lugar fundamentalmente en la Cordillera Pirenaica, donde las características topográficas y climáticas son más favorables para la acumulación de nieve y el desencadenamiento de este proceso. No obstante, todos los años se producen aludes en otras zonas montañosas del país como en La Cordillera Cantábrica, Sierra Nevada, Sistema Central o incluso en el Sistema Ibérico (MELCHOR, 2016).

Es por eso, que el Pirineo es el área que más se ha estudiado, especialmente el sector catalán (desde el *Institut Geològic de Catalunya*, la Universidad de Barcelona y el *Institut Cartogràfic de Catalunya*). Por su parte, el sector aragonés -el tramo de la cadena pirenaica con mayores elevaciones y más escarpada topografía- ha sido estudiado por el IGME y el Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza. En cambio, la cartografía todavía es escasa, solo se puede encontrar la probabilidad de ocurrencia para algunas zonas, o trabajos puntuales en los que se caracterizan zonas de riesgo y tipología de aludes.

En materia de riesgo de aludes, las líneas de actuación pasan por la predicción, prevención y detección de avalanchas, todas ellas buscando la reducción de su posible impacto. En el presente trabajo se analizará la susceptibilidad a la formación de avalanchas a escala de detalle en una pequeña cuenca de montaña típica ubicada en el Pirineo central mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica. Para ello, será necesario identificar los factores que propician el desencadenamiento de aludes y emplear las herramientas SIG que ayudan a caracterizar el área de estudio, y a analizar y representar la información espacial. De este modo, se busca contribuir al estudio de los aludes en el Pirineo Aragonés y dar continuidad a la metodología que se viene usando en los últimos años de cara a disponer de unos resultados homogéneos.

2. ÁREA DE ESTUDIO

2.1. LOCALIZACIÓN

La cuenca seleccionada es la correspondiente al Barranco de Trigoniero, localizada en el Pirineo central aragonés y enmarcada a nivel administrativo en el término municipal de Bielsa (comarca del Sobrarbe), haciendo frontera con Francia (Figura 1).



Figura 1. Localización del área de estudio. Fuente: IGN, elaboración propia.

Se trata de una cuenca de 13 km² comprendida entre los picos de Marty Caberrou, l'Ibonet, la Espada y Mener, y la desembocadura del barranco de Trigoniero en el río Barrosa (cabecera del río Cinca). Presenta un fuerte desnivel comprendido entre los 2.866 m (Pico de l'Ibonet/Arriouère) y los 1.270 m en la desembocadura (Figura 2).

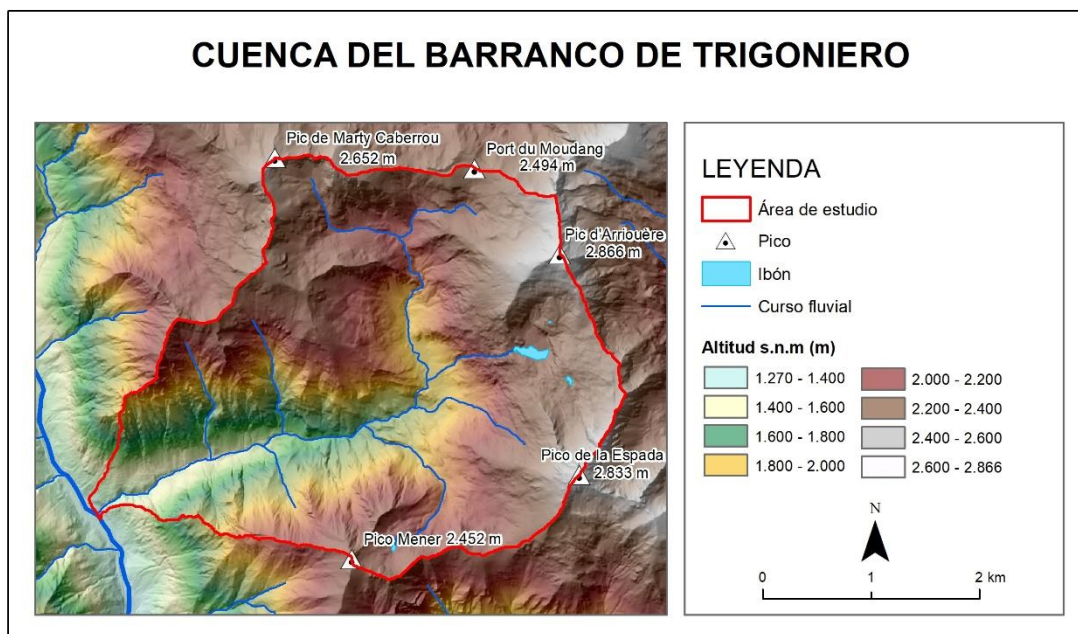


Figura 2. Características topográficas del área de estudio. Fuente: IGN, elaboración propia.

La actividad humana sobre este lugar ha estado vinculada al sector agrario y al comercio, dado que el puerto de Trigoniero (2.494 m) fue un importante nexo de comunicación e intercambio de mercancías entre el valle de Bielsa y el francés de Moudang a lo largo de la historia reciente. En la actualidad, cabe a destacar la práctica de deportes típicos de montaña como senderismo y barranquismo. En sus inmediaciones se localiza, siguiendo el curso del Barrosa y junto a la antigua aduana hispanofrancesa, el paso de la carretera convencional A-138 que conecta Barbastro con Francia a través del Túnel d'Aragnouet.

Desde el punto de vista ambiental y de ordenación territorial, al igual que buena parte del Pirineo, señalar su pertenencia a la Red Natura 2000. Se trata de un Lugar de Importancia Comunitaria (*LIC del Alto Valle del Cinca*) y Zona de Especial Protección para las Aves (*ZEPA del Alto Cinca*).

2.2. CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO

2.2.1. Litología y geomorfología

En el contexto pirenaico, el área de estudio se localiza en la Zona Axial, una zona de materiales paleozoicos plegados en la orogenia hercínica que, por su alta resistencia, se convirtieron en los relieves más destacados del Pirineo aragonés (PEÑA y LOZANO, 2004).

La litología del área estudiada se compone principalmente de la alternancia de pizarra-cuarcita, tramos de pizarra, cuarcitas y cuarzo-esquistos del Cámbrico-Ordovícico cuyo metamorfismo está vinculado al macizo granítico de Bielsa. Por otro lado, vinculados a la actividad del Cuaternario, encontramos materiales más jóvenes que se presentan principalmente en forma de derrubios de ladera (cartografía 1:50.000, hoja 147 del IGME).

El comportamiento de estas litologías ante la acción erosiva se puede agrupar en tres grandes conjuntos de modelado: glaciar, periglacial y nival, y modelado de laderas (CHUECA y JULIÁN, 2002b).

Modelado glaciar

Se encuentran morfologías ligadas a la intensa acción de los hielos glaciares. Entre ellas, destacan la propia configuración del valle estudiado y circos -con divisorias suavizadas- sobre materiales pizarrosos y esquistosos. Precisamente, ocupando el fondo de algunos circos -a veces de forma escalonada-, se localizan cubetas sobreexcavadas por la acción del hielo. Sobre éstas, se encuentran los ibones de Trigoniero, Caset (o Ibonet) y de Mener.

Por otro lado, en las rocas, se puede identificar micromodelado erosivo (pulimiento, estrías y muescas), indicativo del efecto abrasivo de la acción glaciar. Y en cuanto a las formas de acumulación, predominan en sectores de altura los arcos morrénicos y materiales tipo till.

Modelado periglacial y nival, y modelado de laderas

Con el retroceso de las masas glaciares, fue cuando los mecanismos periglaciares y nivales pasaron a cobrar protagonismo en la configuración del relieve. Entre estos, los procesos de crioclastia se manifiestan en la elaboración de derrubios de gravedad o canchales, regularizando las zonas de contacto entre zonas de cabecera y fondos de valle. Asimismo, muchas de las paredes de las zonas de cabecera, se encuentran disectadas por canales de aludes por donde se desplazan masas de nieve desde las zonas de alimentación hasta las de acumulación (modelado de cono de aludes).

Por último, destacar los procesos desencadenados sobre vertientes. Estos retocan el modelado estructural y glaciar y, en este contexto, están especialmente favorecidos por la fácil alteración y plasticidad de las pizarras. Se diferencian dos tipos de movimiento: los movimientos en masa lentos (geli-solifluxión y reptación) y movimientos en masa rápidos (desprendimientos, coladas y flujos).

2.2.2. Climatología e hidrología

Según la clasificación climática de Köppen, estamos ante un clima templado oceánico (con verano fresco) en el que temperaturas y precipitaciones estarán fuertemente condicionadas por el gradiente topográfico.

Las temperaturas son las típicas de un clima de montaña, con bajas temperaturas medias, mínimas bajas, máximas moderadas y amplitud térmica anual considerable (PALOMO, 2007; en NAVARRI, 2010). Por su parte, las precipitaciones son abundantes durante todo el año con máximos en primavera y otoño.

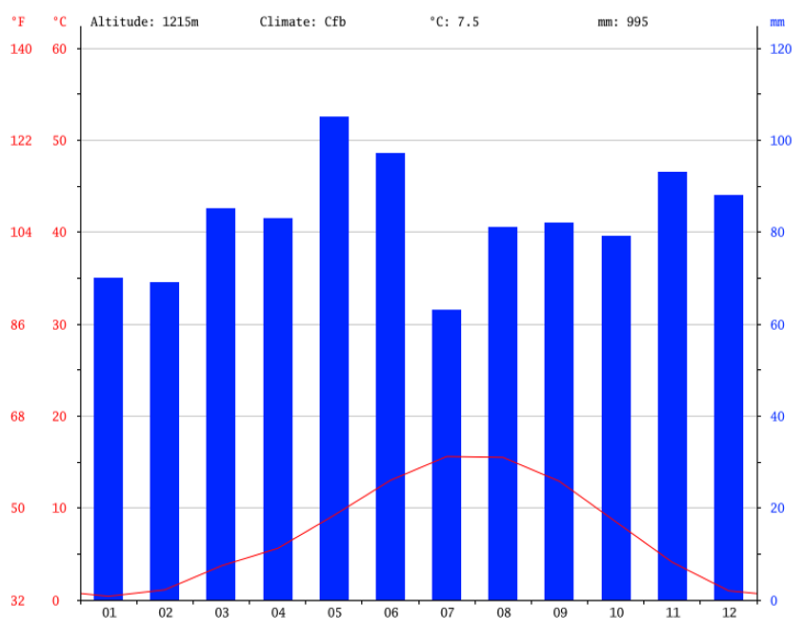


Figura 3. Climograma de Bielsa. Fuente: climate- data.org.

En cuanto a las precipitaciones en forma de nieve, señalar que tienen lugar fundamentalmente entre diciembre y marzo, si bien pueden producirse con menor intensidad desde noviembre hasta mayo (CHUECA y JULIÁN, 2002a; NAVARRI, 2010).

Tomando como referencia los gradientes térmicos y pluviométricos (-0,48°C/100 m y 81,3 mm/100 m) obtenidos por CHUECA y JULIÁN (2002a) en el Macizo de la Maladeta -zona

próxima a la cuenca de Trigoniero-, se han calculado los valores de las isotermas e isoyetas teóricas a partir de los datos promedio de temperatura y precipitación total anual en la localidad de Bielsa. Por otro lado, se han estimado los días de nieve teniendo en cuenta el gradiente del número de días con precipitaciones sólidas (3,3 días/100 m) y los 15 días de precipitaciones sólidas a 1.000 m de altitud.

Tabla 1. Valores teóricos de temperatura media anual, precipitación total anual y días de nieve cada 100 metros. Elaboración propia.

Altitud (m)	Tª media (°C)	P total (mm)	Promedio días nieve
1.215	7,50	995,0	22,0
1.315	7,02	1.076,3	25,3
1.415	6,54	1.157,6	28,6
1.515	6,06	1.238,9	31,9
1.615	5,58	1.320,2	35,2
1.715	5,10	1.401,5	38,5
1.815	4,62	1.482,8	41,8
1.915	4,14	1.564,1	45,1
2.015	3,66	1.645,4	48,4
2.115	3,18	1.726,7	51,7
2.215	2,70	1.808,0	55,0
2.315	2,22	1.889,3	58,3
2.415	1,74	1.970,6	61,6
2.515	1,26	2.051,9	64,9
2.615	0,78	2.133,2	68,2
2.715	0,30	2.214,5	71,5
2.815	-0,18	2.295,8	74,8
2.915	-0,66	2.377,1	78,1

Asimismo, también adquiere gran importancia el número de días que se mantienen la nieve en la superficie. Para ello, CHUECA (1993) realizó una estimación basada en los tres estratos de los geocomplejos morfodinámicos observados en la Alta Ribagorza aragonesa:

- Geocomplejo morfodinámico subnival (por encima de los 2.400 m de altitud): la cobertera nival es del orden de 190- 200 días al año, presente hasta bien entrado el verano.
- Geocomplejo morfodinámico alpino (cotas entre los 1.750-1.900 y los 2.400 m de altitud): la superficie innivada se reduce tanto espacial como temporalmente, estando presente unos 150 días al año y tendiendo a desaparecer hacia el mes de mayo.
- Geocomplejo morfodinámico subalpino (por encima de los 1.400 m de altitud y el piso inmediatamente superior): el manto nivoso no se prolonga más allá de los 80-100 días anuales.

No obstante, cabe señalar que las consecuencias de la innivación, particularmente en la génesis de aludes, son igualmente parejas en los tres pisos, donde el desencadenamiento del proceso no muestra diferencias sustanciales en altitud (CHUECA, 1993).

Sobre la hidrología de la cuenca, destacar el curso del barranco de Trigoniero como cauce principal en el que desembocan otros menores como el barranco del Ibonet o el de la Espada. Su carácter es fluvio-nival, presentando los caudales más altos en primavera -coincidiendo con la

época de deshielo y lluvias primaverales-, mientras que, en invierno, la nieve actúa como reserva natural de agua.

2.2.3. Vegetación

La vegetación se enmarca en la región Eurosiberiana, provincia Pirenaica, subprovincia Pirenaica central, sector Altopirenaico (IBARRA y PÉREZ, 2002; según RIVAS MARTÍNEZ y LOIDI, 1999).

El fuerte desnivel da lugar a condiciones de humedad y sobre todo térmicas muy contrastadas que van variando en función de la altitud. Por ello, se diferencian varios pisos bioclimáticos que se escalonan altitudinalmente y a los que se asocian las distintas comunidades vegetales (IBARRA y PÉREZ, 2002).

Piso alpino (a partir de los 2.300 m)

Por encima de los 2.700 m se encuentra el piso alpino superior. Las condiciones geomorfológicas y climáticas, prácticamente limitan el desarrollo de vegetación a comunidades permanentes o edafófilas.

El piso alpino inferior constituye el límite de la vegetación forestal, pues las temperaturas son extremadamente bajas para el desarrollo de especies arbóreas, mientras que el manto nevoso protege a las especies herbáceas y arbustivas de heladas (IBARRA y PÉREZ, 2002). Son característicos los pastizales climáticos, que más o menos evolucionados -en función de la orientación, altitud y disponibilidad de suelo-, se alternan con el roquedo desnudo.

Piso subalpino (franja altitudinal entre los 2.300 m y los 1.600 m)

Las condiciones térmicas son algo más favorables para la vida vegetal permitiendo el crecimiento de especies arbóreas y arbustivas (IBARRA y PÉREZ, 2002). Predomina el pinar abierto de pino negro (*Pinus uncinata*) con un sotobosque en el que destacan el rododendro (*Rhododendron ferrugineum*), el enebro rastrero (*Juniperus communis*), el arándano (*Vaccinium myrtillus*), la brechina (*Calluna vulgaris*) y los serbales (*Sorbus chamaemespilus*). En la transición con el piso altimontano, estos bosques se enriquecen con la presencia de abetos (*Abies alba*), abedules (*Betula celtiberica*) y avellanos (*Corylus avellana*).

Piso altimontano (por debajo de los 1.600 m)

El ombroclima hiperhúmedo que se observa desde el piso alpino, junto a unas temperaturas que se han suavizado considerablemente, hacen posible el crecimiento de masas boscosas densas entre las que predominan el haya (*Fagus sylvatica*) y el abeto (*Abies alba*). También aparecen otras especies como las mencionadas anteriormente en la transición al piso altimontano, robles carballos (*Quercus robur*) y álamos temblones (*Populus tremula*). Asimismo, entre las especies de sotobosque encontramos las del piso anterior y otras como el boj (*Buxus sempervirens*) y helechos (*Pteridium aquilinum*).

2.2.4. Actividad y presencia antrópica

El principal atractivo de la zona reside en el senderismo y, especialmente, en el barranquismo. Por un lado, son de interés para senderistas el acceso al Puerto de Trigoniero o a los ibones de Mener y Trigoniero; y por otro, el descenso del barranco de Trigoniero, que suele citarse como uno de los mejores de todo el Pirineo Aragonés.

Vinculadas a estas actividades y al sector agrario, hoy prácticamente testimonial, hay algunas evidencias de la presencia humana actual e histórica. En la parte baja del valle se puede encontrar una pequeña presa a partir de la cual comienzan los descensos deportivos, una canalización de agua abandonada, una borda, evidencias de antiguos bancales y cercamientos para el ganado a base de troncos. Más arriba, ya en la Plana del Cabo, se encuentra el puente que cruza el curso principal del Trigoniero y el Refugio de Trigoniero.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

A continuación, se explicará brevemente en qué consiste el fenómeno geomorfológico estudiado, se repasará el trabajo sobre aludes desarrollado en nuestro país y se expondrá la metodología seguida para cartografiar zonas susceptibles al inicio de aludes en la cuenca del Barranco de Trigoniero mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica.

3.1 MARCO TEÓRICO

Un alud es una masa de nieve que se desplaza pendiente abajo por la ruptura de equilibrio entre la resistencia del manto nivoso y los esfuerzos a los que está sometido (BOSCH y VILAPLANA, 1998). Se trata de un desplazamiento repentino a gran velocidad que, en ocasiones, va acompañado de derrubios, rocas y otros elementos que encuentra a su paso, por lo que lo convierte en uno de los procesos geomorfológicos más destructivos de la alta montaña. Su velocidad de desplazamiento oscila entre los 50 y 300 km/h en función de la cantidad de la masa involucrada, tipo de nieve y de flujo, y características de la pendiente, llegando a producir impactos de hasta 145t/m³ (MELCHOR, 2016).

Existen numerosas clasificaciones de aludes que atienden a diferentes factores como el tipo de nieve movilizada, su forma o espesor de salida u otras características como la capacidad destructiva, el tipo de flujo, etc. La clasificación más extendida -basada en la establecida por la Comisión Internacional de Nieve y Hielo (1981, UNESCO), que los clasifica según sus aspectos morfológicos y sus factores genéticos-, diferencia entre aludes en placa, aludes de nieve reciente y aludes de fusión o nieve húmeda (FERNANDEZ-CAÑADAS et al., 2014). Por otro lado, también conviene distinguir tres zonas en el desarrollo espacial de los aludes: de comienzo o arranque, recorrido y llegada (MCCLUNG y SCHAERER, 1996).

Tipos de aludes

- Aludes de placa

Presentan una zona de salida en la que la nieve forma una placa que suele ser compacta y seca. La salida es lineal y depende de la topografía del terreno. Son comunes después de fuertes ventiscas, por rotura de placas de nieve venteada que se ha almacenado a sotavento de crestas. También pueden producirse espontáneamente o por sobrecargas debidas al paso de esquiadores, montañeros o fauna silvestre.

- **Aludes de nieve reciente**

La nieve que se pone en movimiento suele ser de baja densidad, seca, fría y presenta una cohesión muy débil. La salida suele ser puntual, se suelen desencadenar durante o poco después de las nevadas y forman aerosoles de enormes velocidades. Son temidos por su onda de presión y su facilidad para remontar las laderas que se encuentran en su camino.

- **Aludes de fusión o de nieve húmeda**

Suelen ocurrir en primavera, se desencadenan en mantos de nieve con un alto contenido en agua líquida ya sea por la presencia de precipitaciones o altas temperaturas que funden el paquete nival. La salida puede ser lineal o puntual y la elevada densidad de la nieve que se pone en movimiento hace que se puedan producir en bajas pendientes, en torno a 25 grados. Son característicos por su baja velocidad y la formación de típicas bolas o ruedas.

Zonas de aludes

- **Zona de comienzo o arranque**

Lugar donde la nieve inestable falla y comienza a moverse. Se habla de corona, línea de fractura o cicatriz de coronación en las avalanchas en placa, y punto de inicio en las de nieve suelta. Suele estar mal definida, aunque a veces es muy obvia.

- **Zona de recorrido**

Ladera situada bajo la zona de comienzo o arranque que conecta dicha zona con la zona donde se acumulan los restos del alud (zona de llegada). Mientras que el tramo de recorrido representa el rasgo principal del terreno en zonas de grandes avalanchas, cuando las distancias recorridas son muy cortas este tramo aparece poco definido. La velocidad de las avalanchas alcanza aquí su máximo y es el lugar donde las variaciones de velocidad son más pequeñas. La deposición de nieve detrás de árboles o rocas es mínima.

- **Zona de llegada**

Lugar de rápida desaceleración, los restos se depositan y la avalancha se detiene.

El estudio de aludes en España, especialmente en Aragón y Cataluña, se inicia en la década de los años 80 del pasado siglo, cuando se empieza a considerar su riesgo (se construyen las primeras obras de protección en las áreas de esquí). No obstante, es a partir de la segunda mitad de la década cuando el número de proyectos relacionados con la dinámica nival crece de forma significativa. La Comunidad Autónoma de Cataluña, a través del *Servei Geològic de Catalunya* y la Universidad de Barcelona, inicia sus primeros estudios orientados a la predicción espacial (cartografía de aludes) y temporal (emisión de boletines de peligro de avalanchas). Mientras tanto, el Pirineo Aragonés ha carecido de una institución que coordine oficialmente el estudio de estos eventos, limitándose al trabajo de los servicios forestales del Estado en los valles del Aragón y del Gállego y la tesis de Pablo Muñiz de 1988, "*Prevención y defensa contra aludes. Aplicación práctica al Pirineo Aragonés*".

Ya a comienzos la década de los años 90, surgen algunas iniciativas sobre el estudio de aludes en Aragón, no obstante, provienen de organismos diferentes careciendo así de la cohesión necesaria para trasladarlos a un proyecto integrador (NAVARRI, 2010). Entre 1990 y 1994, el Instituto Geológico y Minero de España (IMGE), junto al Gobierno de Aragón, inician el "*Estudio del medio físico y sus riesgos naturales en un sector del Pirineo Central*" cartografiando los valles

de Canfranc, Sallent y Panticosa. Por otro lado, la Federación Aragonesa de Montaña (FAM), elabora el “*Índice y evaluación del riesgo de aludes y zonas de influencia en las rutas y actividades montaÑeras en el Pirineo aragonés*”. Más tarde, a partir de 1995, tras múltiples víctimas mortales en el Pirineo aragonés, la empresa Naturaleza y Tecnología Aplicada S.L. del Gobierno de Aragón, redacta “*Los aludes en el Pirineo aragonés. Planificación de la prevención y defensa*” y se programa el reconocimiento del valle de Benasque del que se dispone una cartografía borrador de las zonas de alud a escala 1/25.000 (NAVARRI, 2010).

Debido al crecimiento de la exposición a estos eventos, los proyectos se intensifican a finales de los 90. NAVARRI (2010) diferencia entre aportaciones de estudios de áreas concretas como LÓPEZ *et al.* (1997), LAMPRE (1998) o CHUECA (1999); y aportaciones sobre aspectos teóricos y experimentales (NAAIM y MARTÍNEZ, 1996). Pero será a partir del 2000, con la expansión de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), cuando verdaderamente se avance cualitativa y cuantitativamente en el estudio de los aludes del Pirineo aragonés. CHUECA y JULIÁN (2010), CHUECA *et al.* (2014) y MELCHOR (2016), son la referencia metodológica seguida en este trabajo y buenos ejemplos de la aplicación de los SIG a la cartografía de este tipo de procesos naturales desarrollados en zonas de alta montaña.

3.2. VARIABLES E INFORMACIÓN EMPLEADA

Para identificar y delimitar las zonas probables de aludes, FURDADA (1996) y MCCLUNG y SCHAEERER (1996) diferencian entre criterios directos e indirectos. Los primeros hacen referencia a factores intrínsecos a las vertientes, mientras que los segundos aluden a las condiciones nivo-meteorológicas. En nuestro trabajo, las variables que se han tenido en cuenta para la elaboración de la cartografía se engloban en el primer grupo y han sido: el límite altitudinal que establece la isoterma de 0°C, el valor de las pendientes y los tipos de cubiertas del terreno. Adicionalmente, se ha considerado la radiación solar como elemento de referencia para matizar el posible desencadenamiento de aludes en los meses del final de primavera (CHUECA y JULIÁN, 2010).

La información utilizada para analizar las variables expuestas procede de varias fuentes del Instituto Geográfico Nacional (IGN):

- 1) Altimetría digital: Modelo Digital del Terreno (MDT) con paso de malla de 5 m (MDT05).
- 2) Información climática regional: localización altitudinal mensual de la isoterma de 0°C (utilizada en MELCHOR, 2016, para el valle de Vallibierna).
- 3) Ortofotogramas: Plan Nacional de Ortografía Aérea (PNOA) del año 2015 (resolución de píxel de 50 cm, color).
- 4) Ocupación del suelo: Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo en España (SIOSE) del año 2011.

La unidad de descarga de esta información ha sido la hoja 147 del Mapa Topográfico Nacional (1:50.000), excepto para el SIOSE (unidad autonómica a escala 1:25.000).

3.3. PROCESO DE ELABORACIÓN

Para el tratamiento de la información geográfica y su representación en un entorno SIG, se ha utilizado el software *ArcGIS 10.5*. El proceso se ha dividido en dos fases: delimitación y caracterización del área de estudio según las variables expuestas; y análisis multicriterio para la representación de zonas susceptibles al inicio de aludes.

Delimitación y caracterización del área de estudio según las variables expuestas

En primer lugar, se ha delimitado el área de estudio mediante *Arc Hydro Tools* y el MDT. Una vez delimitado, a partir del MDT, se han derivado las capas de curvas de nivel (*Contour*) con resolución de 10 m, pendientes (*Slope*) y de radiación solar (*Area Solar Radiation*).

Por otro lado, se han identificado los tipos de cubierta del terreno a través de fotointerpretación complementada por la información del SIOSE, y posteriormente, el trabajo de campo.

Análisis multicriterio para la representación de zonas susceptibles al inicio de aludes

La segunda fase ha consistido en la reclasificación (*Reclassify*) de las capas -en formato ráster con resolución de 5x5 m-, asignando valores directamente proporcionales a la susceptibilidad que presenta cada factor según los criterios expuestos a continuación y, posteriormente, combinándolos (*Raster Calculator*).

- **Límite altitudinal**

La altitud mensual de la isoterma regional de 0°C marca la cota inferior teórica a partir de la cual las precipitaciones se producen en forma de nieve y las bajas temperaturas favorecen su conservación (CHUECA y JULIÁN, 2010). Ésta, entre los meses de noviembre y mayo -meses en los que tienen lugar en mayor cantidad las precipitaciones en forma de nieve en la zona de estudio-, varía de la siguiente forma.

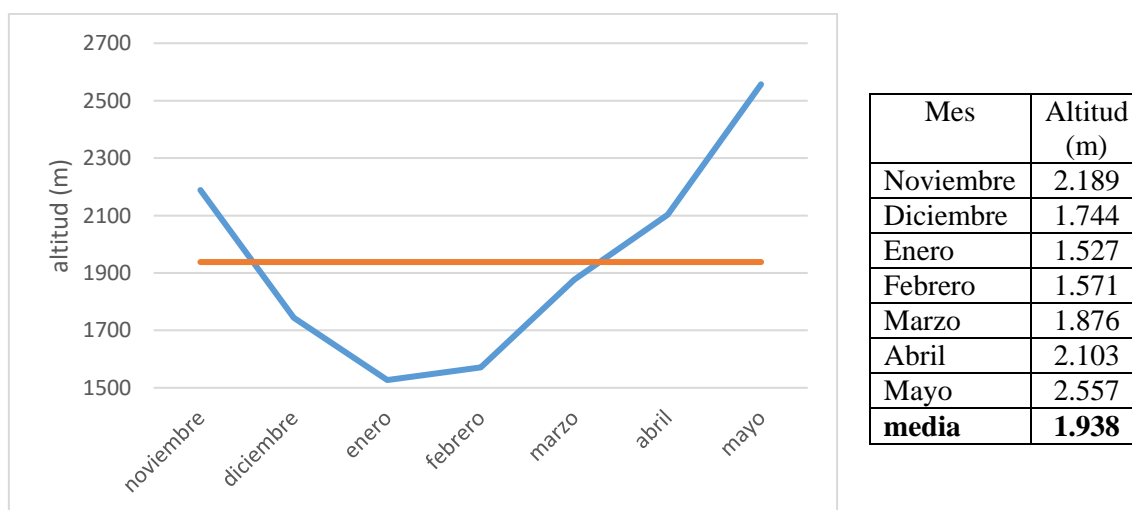


Figura 4. Variación de la altitud mensual de la isoterma regional de 0°. Fuente: Melchor (2016).

Se ha generado una capa de polígonos para cada mes -y la media del periodo estudiado- clasificando el área de estudio en función del valor de la curva de nivel que establece el límite altitudinal de cada isoterma. Las zonas por debajo de la cota mensual correspondiente se excluyen asignándoles un valor “0”. Por lo contrario, a las situadas por encima de la cota se les asigna un valor “1”.

- **Valor de las pendientes**

Los aludes se originan en zonas con pendientes que oscilan entre los 25° y los 45° (MCCLUNG y SCHAERER, 1996; CHUECA et al., 2014), especialmente entre los 30° y 40°, mientras que por debajo de los 25° el manto permanece estático (salvo nevadas extraordinarias) y por encima de los 45° la nieve caída no se ancla al suelo o al manto subyacente, depositándose en niveles inferiores en purgas repetidas de alta frecuencia y pequeñas dimensiones (CHUECA y JULIÁN, 2010).

Tabla 2. Valores de la reclasificación de pendientes. Fuente: Chueca, Julián y Montañés (2014), adaptado.

Pendiente (°)	Valor
<25	0
25-30	100
30- 40	150
40- 45	100
>45	0

- **Tipos de cubiertas del terreno**

El tipo de cubiertas del terreno depende fundamentalmente de factores litológicos, geomorfológicos y de la cubierta vegetal (CHUECA y JULIÁN, 2010), y se valora según la cubierta limita (mayor rugosidad) o favorece (menor rugosidad) el arranque de la masa nival.

Tabla 3. Valores de la reclasificación de la cubierta del terreno. Fuente: Chueca, Julián y Montañés (2014), adaptado.

Tipo de cubierta	Valor
Bosque denso, masa de agua	0
Bosque abierto- matorral	50
Roca desnuda	150
Roquedo y pastizal	175
Pastizal	200

También se podría tener en cuenta la curvatura del terreno (MAGGIONI y GRUBER, 2003), no obstante, la resolución del MDT (Modelo Digital del Terreno) utilizado debería ser mayor que el que hemos podido manejar para que el uso de esta variable reflejara correctamente la realidad.

Tras haber reclasificado las capas (formato ráster), se aplica un análisis multicriterio (*Raster Calculator*) para cada mes mediante la operación de multiplicación (*). Así pues, se excluirán las zonas en las que alguna de sus variables contenga el valor “0” y las zonas con mayor susceptibilidad al inicio de aludes obtendrán un valor más alto.

Por otro lado, se ha elaborado la cartografía de radiación solar en el área de trabajo como complemento a los resultados obtenidos, pues condiciona la temperatura del manto nival en los meses primaverales alterando su evolución y su metamorfosis, provocando su fusión y reduciendo su estabilidad (CHUECA y JULIÁN, 2010).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se representan las variables estudiadas para conocer sus características a lo largo de la cuenca del Barranco de Trigonero.

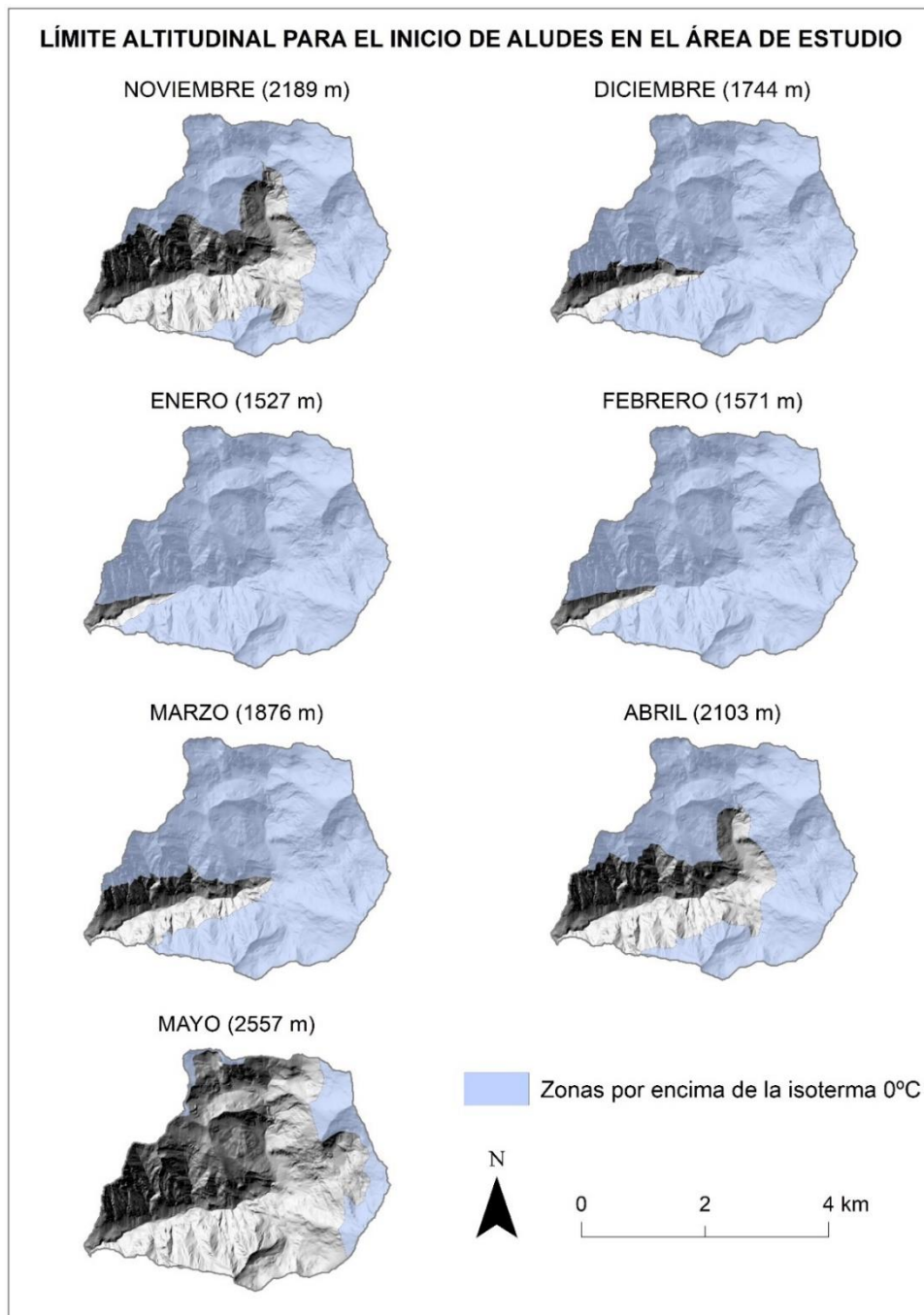


Figura 5. Mapas del límite altitudinal mensual para el inicio de aludes. Fuente: IGN, elaboración propia.

Se observa para cada mes la cota teórica a partir de la cual podría haber precipitación y acumulación de nieve. Enero es el mes cuya cota es menor y, por lo tanto, atendiendo únicamente a este factor podrían iniciarse aludes casi en el 97% de la cuenca (Tabla 4). En cambio, en mayo el porcentaje se limita a apenas al 11,29% del espacio analizado.

Tabla 4. Superficie de la cuenca bajo la isoterma regional de 0°C.

Mes	Superficie (%)
Noviembre	55,33
Diciembre	89,89
Enero	96,87
Febrero	95,38
Marzo	82,99
Abril	63,17
Mayo	11,29

No obstante, el límite altitudinal que constituye la isoterma de 0°C no es el único factor a tener en cuenta, pues las pendientes y la cubierta del terreno también ejercen, como ya hemos mencionado, un papel limitante. En la Figura 6 se representan en verde y rojo áreas no propicias, pues el modelado erosivo ha esculpido un relieve muy llano o con pendientes moderadas (cubetas de sobreexcavación, Plana del Cabo o Planas de Marcatiecho), o en su contra, demasiado abrupto. Las zonas susceptibles (en amarillo) suman el 62,4% del área de estudio.

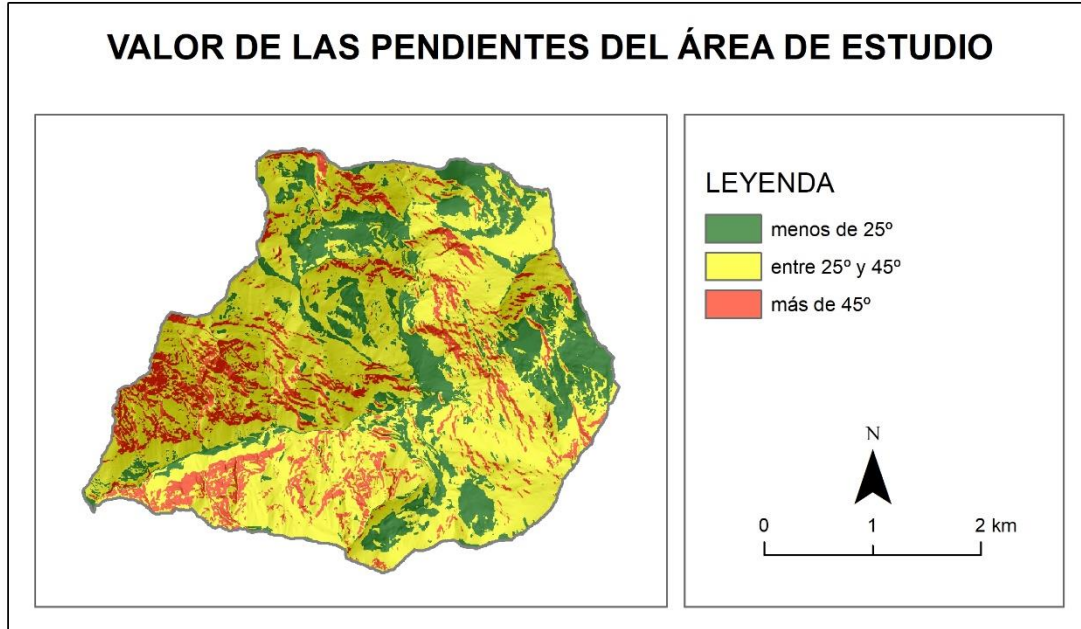


Figura 6. Mapa de pendientes. Fuente: IGN, elaboración propia.

En cuanto a la cubierta del terreno, el factor rugosidad hace que elementos como el bosque denso impidan el inicio de aludes por su efecto de anclaje. Sin embargo, estos ocupan un espacio muy reducido en la cuenca de Trigoniero y, en casi el 96% de la misma, su arranque sería factible.

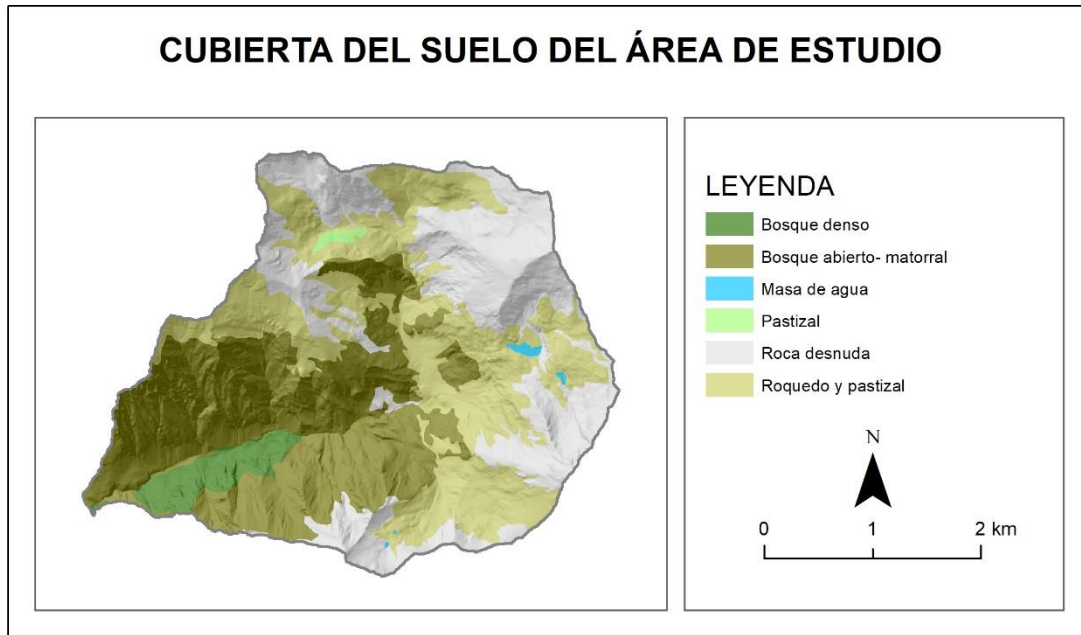


Figura 7. Mapa de la cubierta del terreno. Fuente: IGN, elaboración propia.

Finalmente, conviene volver a destacar que, pese a que el límite altitudinal sea una variable booleana –excluye o posibilita el inicio de aludes–, las características de las pendientes y cubierta del terreno ofrecen diferentes niveles de susceptibilidad reflejados en las Tablas 2 y 3.



Figura 8. Esquema del proceso de elaboración de la cartografía. Elaboración propia.

Una vez combinados los factores que propician el inicio de aludes se ha procedido a su representación a través de:

- 1) Mapa general a partir de la media estacional del límite altitudinal de la isoterma de 0°C (1.938 m), Figura 9.
- 2) Mapas mensuales teniendo en cuenta la variación del límite altitudinal, Figura 10.

CUENCA DEL BARRANCO DE TRIGONIERO MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD AL INICIO DE ALUDES

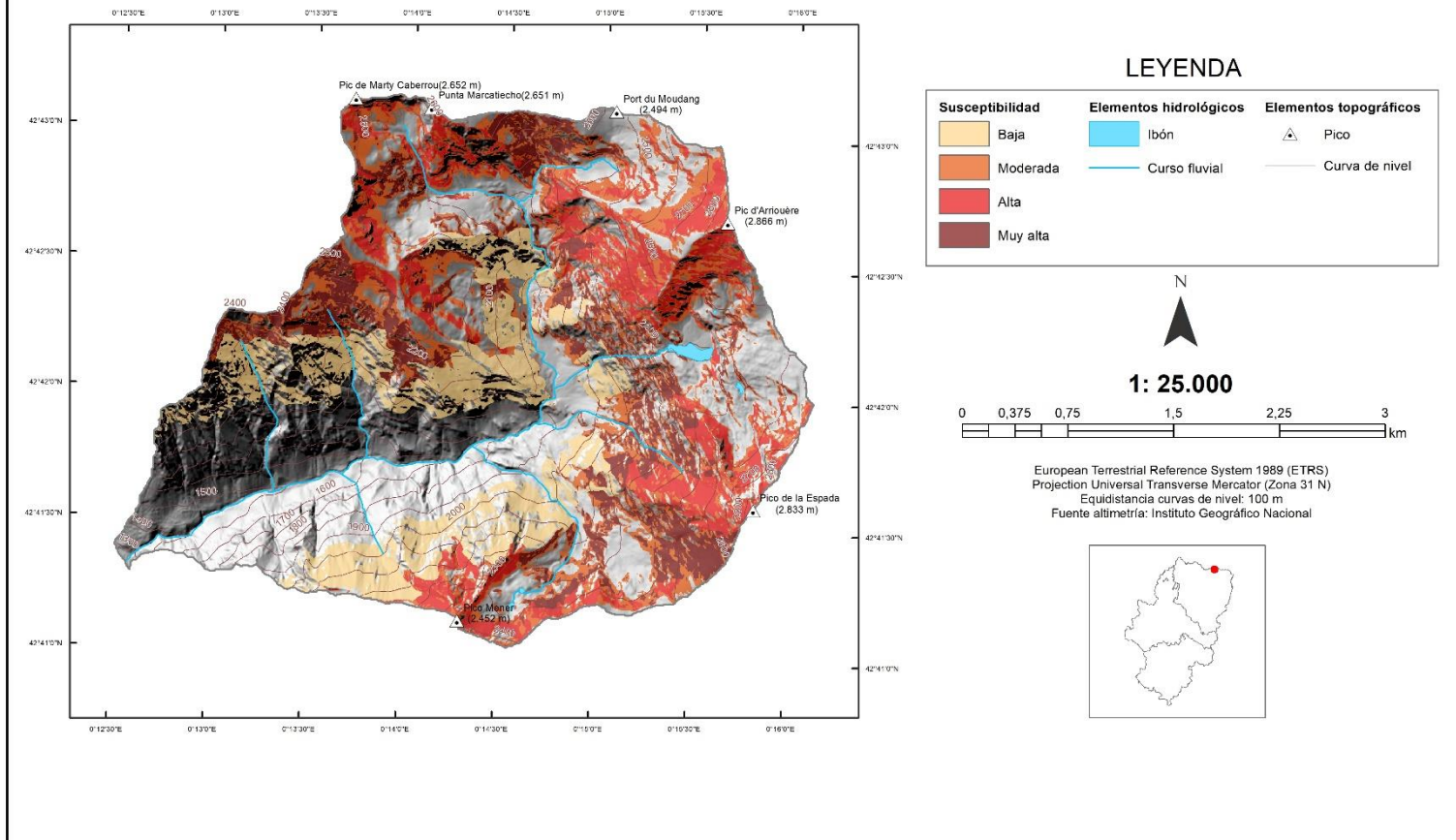


Figura 9. Mapa general de la susceptibilidad al inicio de aludes.

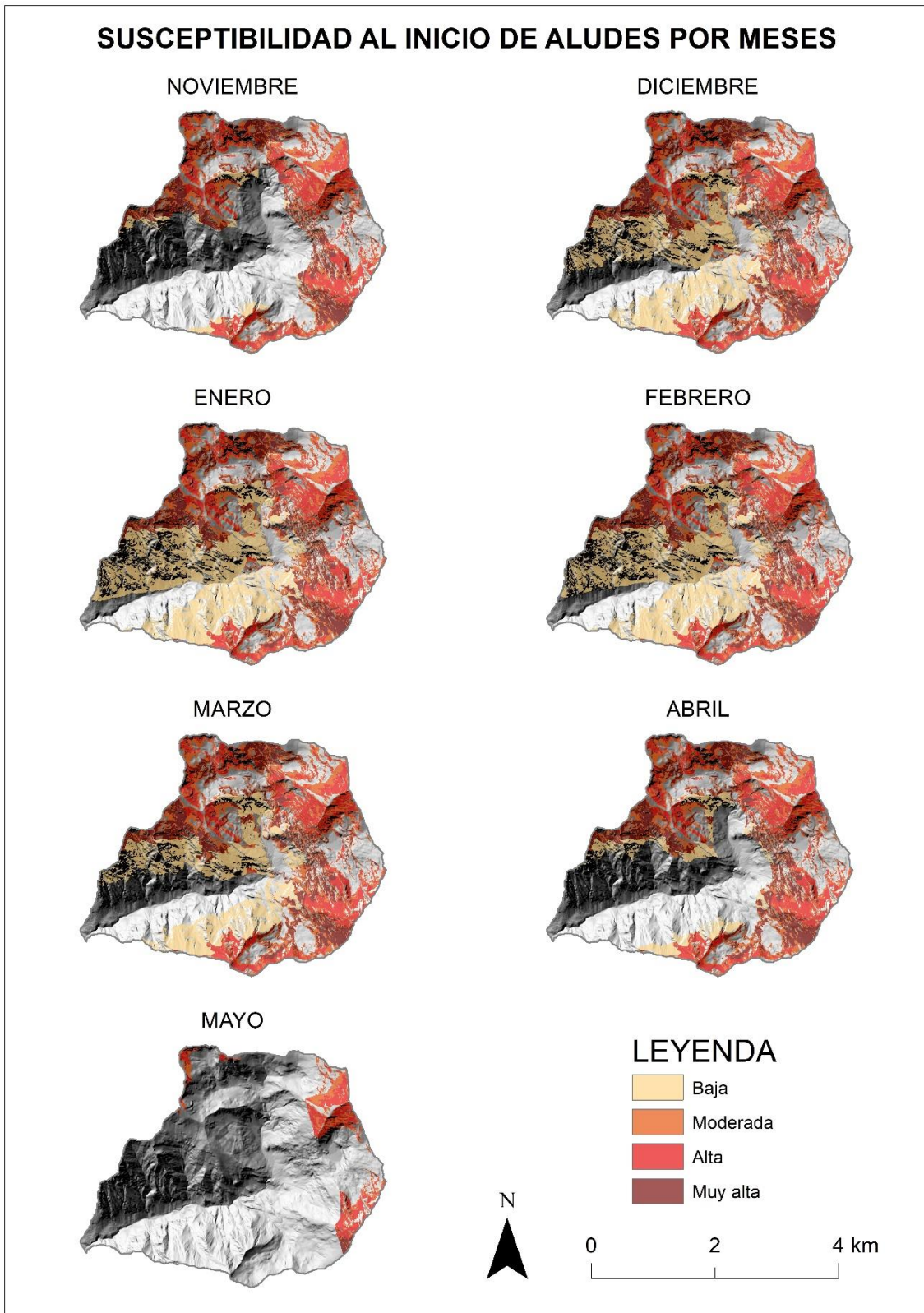


Figura 10. Mapas mensuales de susceptibilidad al inicio de aludes. Fuente: IGN, elaboración propia.

Antes de comentar los resultados conviene volver a la clasificación de zonas de aludes, en las que se diferencian los sectores de comienzo o arranque, recorrido y llegada.

La cartografía elaborada muestra posibles zonas de comienzo de aludes, y no zonas de aludes, pues ello implicaría representar también las zonas de recorrido y llegada. El interés de la elaboración de zonas de inicio de aludes radica en la facilidad de su construcción a partir de procedimientos automáticos integrados en el contexto de un Sistema de Información Geográfica. No obstante, además de indicar con precisión las zonas de inicio -de ahí la fragmentación de las zonas identificadas-, los SIG, especialmente a través de los Modelos Digitales del Terreno, permiten valorar de forma aproximada los sectores sujetos al paso y la llegada de éstos.

En las Figuras 9 y 10 se observa cómo la zona baja del valle es la menos susceptible al arranque de aludes, pues está condicionada por la escasa innivación potencial existente en cotas bajas (la isoterma de 0°C se emplaza a mayores alturas) y el piso bioclimático montano y subalpino permite el desarrollo de vegetación arbórea. En cambio, a medida que se asciende en altitud, aumenta la probabilidad de encontrar nieve, se deja atrás el piso bioclimático altimontano y subalpino y el relieve adquiere localmente morfologías más redondeadas sin pendientes extremas; por lo tanto, la posibilidad de que se inicien aludes -salvo en las zonas de cubetas de sobreexcavación por su llana topografía-, es mayor.

Teniendo en cuenta que la cuenca ocupa una superficie de 12,76 km², la extensión de los sectores dónde se podrían iniciar aludes durante los meses de nevadas son los siguientes.

Tabla 5. Extensión y superficie de la cuenca que representan las zonas susceptibles al inicio de aludes.

Mes	Km ²	% de la cuenca
Noviembre	4,39	34,4
Diciembre	7,13	55,9
Enero	7,54	59,1
Febrero	7,44	58,3
Marzo	6,62	51,9
Abril	5,07	39,7
Mayo	0,93	7,3
media	6,32	49,5

Pese a que abril (junto a noviembre) y mayo son los meses que menos exposición presentan frente al arranque de avalanchas de nieve, hay que tener en cuenta que son los meses estudiados con valores más altos de radiación solar incidente (Figura 11), y dos de los meses con mayores precipitaciones (Figura 3), por lo que es muy probable que, en las áreas cartografiadas en la Figura 10, se produzcan aludes de fusión o nieve húmeda.

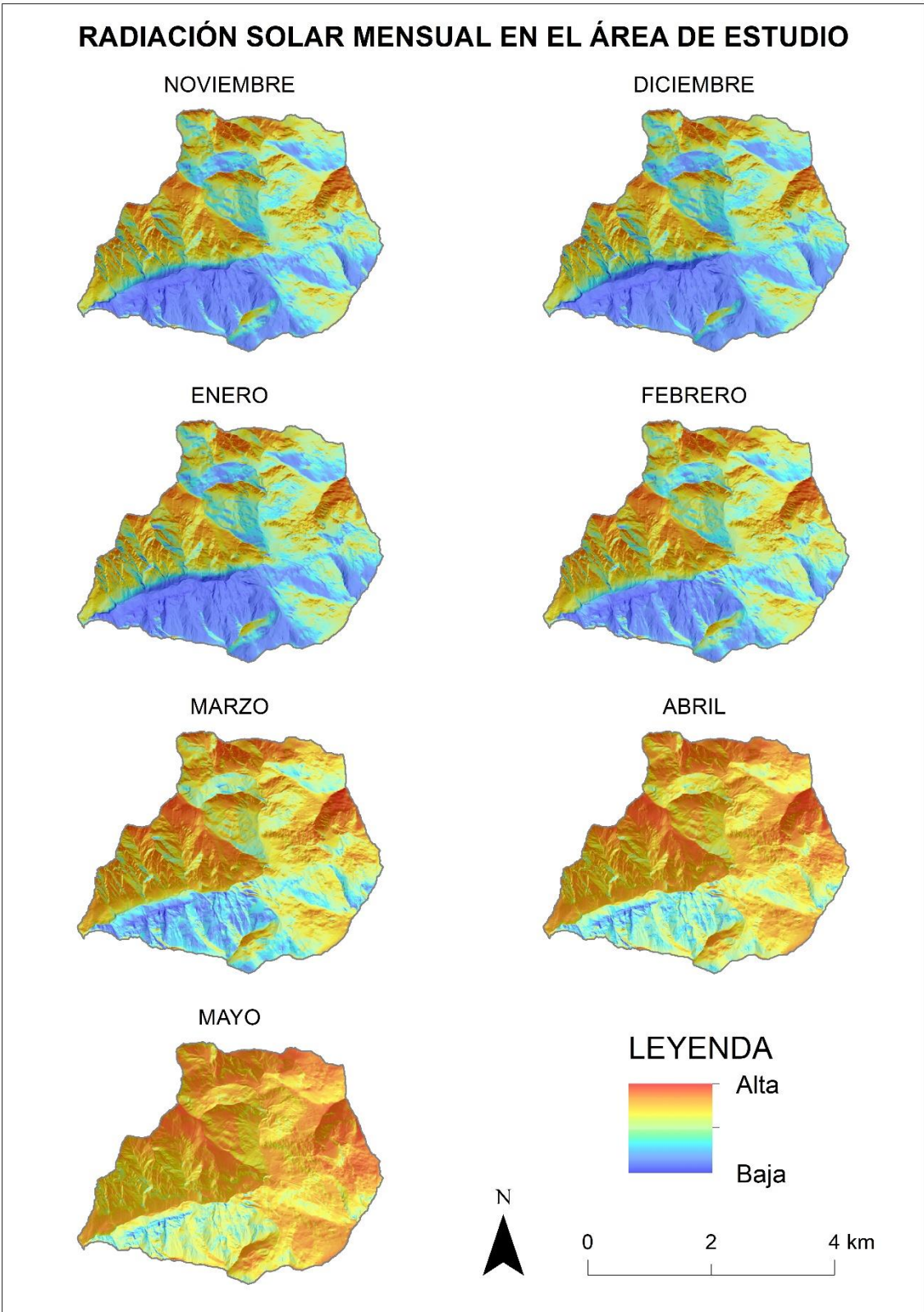


Figura 11. Mapas de radiación solar mensual. Fuente: IGN, elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

El análisis de riesgos naturales debe ser un importante instrumento de ordenación territorial. En el caso de los aludes, ante el crecimiento de la exposición queda aún mucho por hacer, especialmente en el Pirineo aragonés, y para ello, “es conveniente el desarrollo de un marco legal más completo en materia de aludes” (RAÏMAT *et al.*, 2009).

El trabajo realizado no pretende analizar el riesgo de aludes, puesto que no se ha incorporado el factor humano. No obstante, podría constituir la fase inicial de un hipotético estudio del riesgo de desarrollo de este fenómeno en la zona estudiada ayudando, ya desde esta etapa inicial, a decidir dónde adoptar medidas mitigadoras como estructuras de soporte y de defensa. Por otro lado, se puede utilizar simplemente como una herramienta, tanto para gestores como para usuarios del espacio analizado, para prever zonas de recorrido o llegada.

En cualquier caso, era una zona por analizar desde el punto de vista científico, por lo que ha sido interesante la aplicación de la metodología utilizada para contribuir a la cartografía de aludes en el Pirineo y mostrar la utilidad del análisis multicriterio que ofrecen los SIG. De todos modos, no hay que olvidar que los resultados son modelos generales que pueden verse alterados por circunstancias puntuales. En el caso estudiado, especialmente por la variabilidad temporal de la isoterma de 0°C o por cambios en la cubierta del terreno derivados de la propia actividad geomorfológica generada por los aludes (que puede ir abriendo espacios entre la masa forestal) o por las repercusiones del cambio climático en la distribución espacial de los pisos de vegetación.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHUECA, J. (1993). Definición, funcionamiento y estructuración de geocomplejos morfodinámicos en la Alta Ribagorza aragonesa”. *Geographicalia*, 30: 69-86.
- CHUECA, J. (1994). Características y distribución espacial de movimientos en masa rápidos en zonas de montaña (Alta Ribagorza, Pirineo central). *Geographicalia*, 31: 31-52.
- CHUECA, J. y JULIÁN, A. (1999). Cartografía de zonas probables de aludes en el valle de Ordesa (Pirineo aragonés). *Geographicalia*, 37: 73-86.
- CHUECA, J., LAPEÑA, A., LÓPEZ, I., JULIÁN, A., PEÑA, J.L., ZABALA, J. (2000). Cartografía de zonas probables de aludes en el Pirineo aragonés: Metodología y resultados. *Boletín de la A.G.E.*, 30: 119-134.
- CHUECA, J. y JULIÁN, A. (2002). Rasgos climáticos del Macizo de la Maladeta (Pirineo Central español). *Boletín Glaciológico Aragonés*, 3: 113-130.
- CHUECA, J. y JULIÁN, A. (2002). Relieve de la Alta Ribagorza (Pirineo central). *Boletín Glaciológico Aragonés*, 3: 45-113.
- CHUECA, J., JULIÁN, A., PALOMO, M (2008). Aplicación de un análisis multicriterio a la delimitación de zonas probables de aludes (valle del Aguas Limpias, Pirineo central español). *X Reunión Nacional de Geomorfología*, Cádiz, 4pp.
- CHUECA, J., JULIÁN, A (2008). Cartografía de las zonas de salida de aludes en el valle de Ordesa (Pirineo central español), factores condicionantes y evolución temporal. *X Reunión Nacional de Geomorfología*, Cádiz, 4pp.
- CHUECA, J. y JULIÁN, A. (2010). Cartografía de zonas probables de salida de aludes en el alto Gállego (Pirineo central aragonés) mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 36(1): 27- 41.

CHUECA, J., JULIÁN, A., MONTAÑÉS, A. (2014). A proposal for avalanche susceptibility mapping in the Pyrenees using GIS: the Formigal-Peyreget area (Sheet 145-I; scale 1:25:000). *Journal of Maps*, 10 (2): 203- 210.

FÁBREGAS REIGOSA, S., MINTEGUI AGUIRRE, J.A., FÁBREGAS REIGOSA, J.I., HURTADO ROA, R., ROBREDO SÁNCHEZ, J.C. y HUELIN RUEDA, P. (2013). Criterios cuantificadores para evaluar los efectos de las restauraciones efectuadas en las cuencas de montaña del Pirineo Aragonés en la primera mitad del siglo XX. *6º Congreso Forestal Español*, Vitoria- Gasteiz, pp. 13 pp.

FERNÁNDEZ-CAÑADAS, J.A., PALOMO, M., PANTOJA, L. (2014). Delimitación espacial de las zonas probables de salida de aludes en el macizo de Peñalara mediante el uso de SIG. *Revistas Espacio, Tiempo y Forma. Serie VII*. UNED Madrid, 26pp.

GÓMEZ, A. y SANTOS, J. (2010). Los aludes de nieve en el Alto Sil (Oeste de la Cordillera Cantábrica, España). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 36(1): 7- 26.

IBARRA, P. Y PÉREZ CABELLO, F. (2002). La vegetación de los altos valles del Ésera y del Noguera Ribagorzana (Pirineo central). *Boletín Glaciológico Aragonés*, 3: 163- 182.

MCCLUNG, D., SCHAEERER, P. (1996). *Avalanchas*. Ediciones Desnivel, Madrid, 309pp.

MELCHOR, S. (2016). Estudio de la probabilidad de arranque de aludes en el valle de Vallibierna (Pirineo central Aragonés). Trabajo Fin de Grado en Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, 47pp (inédito).

LEO, E. y CUCHÍ, J.A. (2004). Los aludes en el Alto Aragón. *Lucas Mallada*, 11: 135- 161.

NAVARRI, H. (2010). Estudio de aludes en la cuenca de Ixeia (Pirineo central aragonés), El evento de febrero de 2010. Trabajo Fin de Máster en Ordenación Territorial y Medioambiental, Universidad de Zaragoza, 87 pp. (Inédito).

OLLER, P., JANERAS, M., COSTA, O., GARCÍA-SELLÉS, C., MUNTÁN, E., MARTÍ, G. y MARTINEZ, P. (2013). Plan de zonificación del terreno según la peligrosidad por aludes para el Pirineo de Catalunya”. *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, Palma de Mallorca, 12 pp.

PEÑA J.L., LOZANO, M.V. (2004). Las unidades del relieve aragonés. *Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza*, 12 pp.

RÍOS, S. (2004). Situación de la cartografía de aludes en el Pirineo Central. *I Jornada tècnica de neu i allaus*, Barcelona, 4 pp.

SURINÑACH, E. (2000). Los aludes. Actuaciones para la reducción de su peligrosidad. *V Congreso Geológico de España*, Alicante, 8 pp.

ANEXO FOTOGRAFICO



Foto 1. Cubeta de sobreexcavación en la base de un pequeño circo glaciar con divisorias redondeadas construido sobre pizarras. Foto: pirineos3000.com.

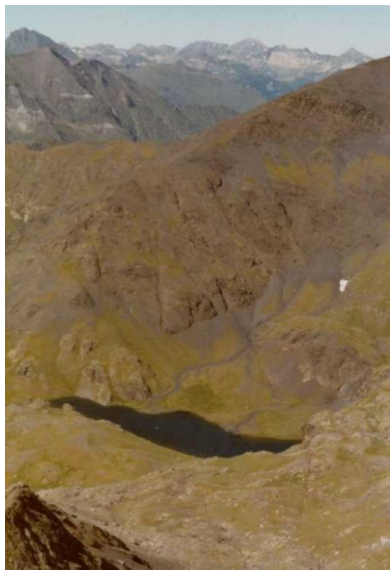


Foto 2. Ibón de Trigoniero sobre una cubeta de sobreexcavación labrada en materiales cuarzo esquistosos y esquisto cuarzosos; en tonos más oscuros, pizarras. Foto: IGME.



Foto 3. Modelado periglacial: la gelifracción genera canchales que regularizan el contacto entre zonas de cabecera y fondos de valle. Foto: Jesús Ramo.



Foto 4. Modelado nival: canales de aludes disectan laderas. Foto: Jesús Ramo.



Foto 5. Transición de pisos bioclimáticos desde la Plana del Cabo. Foto: pirineos3000.com.

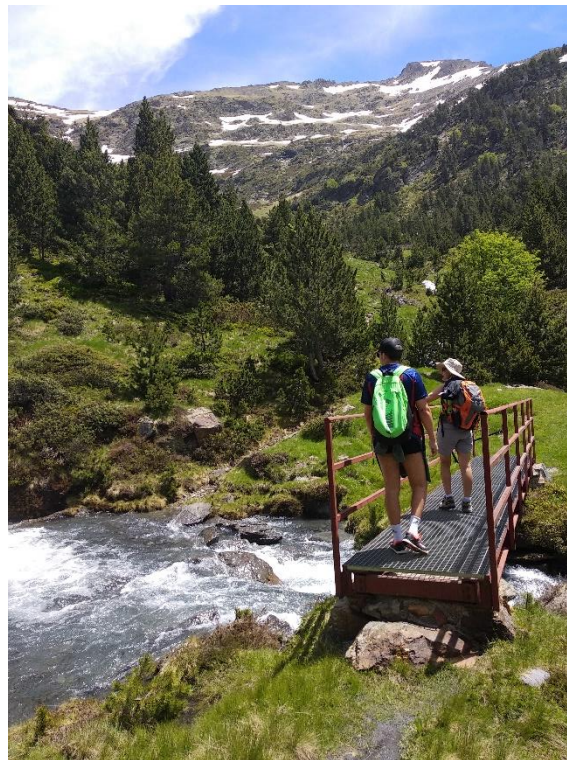


Foto 6. Puente sobre el Barranco de Trigoniero. En el horizonte puede observarse la transición del piso bioclimático subalpino-alpino y la presencia puntual en altura de nieve todavía en junio (18/06/18). Foto: Jesús Ramo.



Foto 7. Canal de alud en el que se distingue su zona de comienzo o arranque, recorrido y llegada. Foto: Jesús Ramo.



Foto 8. Resto de un alud en su zona de llegada al cauce del barranco de Trigoniero. Se observa la cantidad de sedimento arrastrado. Foto: Jesús Ramo.

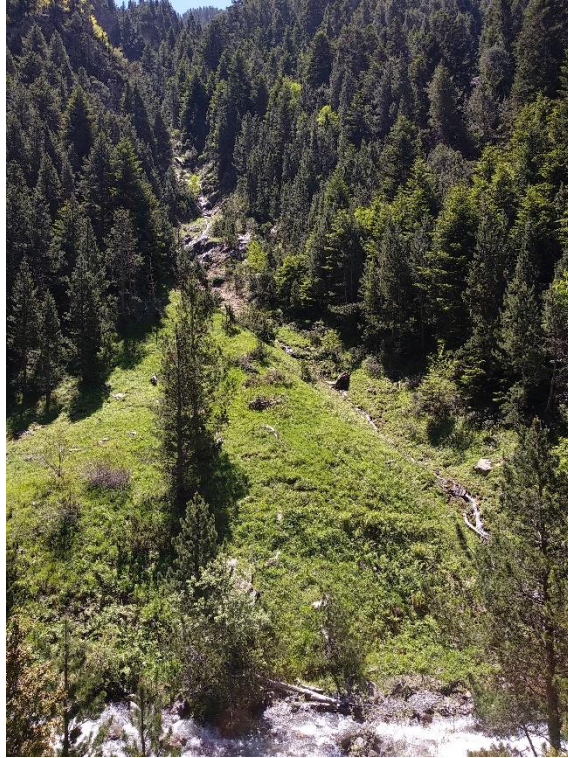


Foto 9. Zona de llegada de un alud en la que adquiere su forma de cono característica. Foto: Jesús Ramo.



Foto 10. Buen ejemplo de la capacidad devastadora de los aludes, en este caso sobre la vegetación arbórea (zona baja del valle, piso altimontano). Foto: Jesús Ramo.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, que, gracias a su apoyo, con el presente trabajo, esta etapa académica culmina.

A Javier Chueca, mi tutor del TFG, que, con su ayuda, he conseguido realizar un estudio del que estoy satisfecho. Y al resto de profesores del Grado, gracias a los que he adquirido una nueva visión del espacio geográfico, así como métodos y herramientas para analizarlo.