

CUARTA ÉPOCA

## GEOGRAPHICALIA

1977 - 1988 - 2000 - 2023



## EDITORIAL:

**Monográfico geomorfología**  
Desde la Geografía a  
la Geomorfología global  
en Aragón  
Dr. José María García Ruiz

## ARTÍCULOS:

**Monográfico geomorfología**  
Cartografía biogeomor-  
fológica | Erosión por piping  
| Zonificación de aludes  
**Sección general**  
Patrones asentamiento  
culturas Calima | Dinámica  
territorial Grados Geografía

## MAPAS:

**Monográfico geomorfología**  
Mapa geomorfológico de la  
Bárdena Blanca (Navarra,  
España) | Mapa geoarque-  
ológico de El Pichao  
(Tucumán, Argentina)

NOTAS DE INVESTIGACION  
Y RESEÑAS:

**Monográfico geomorfología**  
Análisis hidromorfológico  
de ríos efímeros | VOLTUR-  
MAC: volcans-turismo  
**Sección general**  
Estrategias de recuperación  
de cubierta vegetal



1542

Departamento de  
Geografía y  
Ordenación del Territorio  
Universidad Zaragoza





**Zonificación de la susceptibilidad a aludes en sistemas montañosos mediante SIG: El caso de Sierra Nevada (España)**

Ignacio Castro-Melgar



# Zonificación de la susceptibilidad a aludes en sistemas montañosos mediante SIG: El caso de Sierra Nevada (España)

**Ignacio Castro-Melgar**

Department of Geography, Harokopio University of Athens, 17676, Athens, Greece  
Institute of Geophysics, Czech Academy of Sciences, 14100, Prague, Czech Republic  
icastromelgar@ig.cas.cz

**Resumen:** Las avalanchas de nieve, o aludes, representan un riesgo significativo en entornos montañosos con alta afluencia turística, como Sierra Nevada (España). Este estudio desarrolla una metodología basada en el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y análisis multicriterio para identificar áreas susceptibles al desencadenamiento de aludes. Se analizaron variables clave, como altitud, pendiente, cubierta del terreno, morfología y zonas de acumulación, para generar mapas de susceptibilidad clasificados en cuatro niveles. Los resultados revelan que las zonas con mayor susceptibilidad se concentran en las laderas de los principales picos y áreas con intensa actividad recreativa asociada a los deportes de invierno. Este trabajo ofrece una contribución novedosa al conocimiento sobre aludes en Sierra Nevada y constituye una herramienta clave para la gestión del territorio y la reducción de riesgos naturales.

**Palabras clave:**

Aludes, avalanchas, SIG, Sierra Nevada, riesgos naturales.

**Zoning avalanche susceptibility in mountain regions using GIS: The case of Sierra Nevada (Spain)**

**Abstract:** Snow avalanches, represent a significant risk in mountainous environments with high tourist influx, such as Sierra Nevada (Spain). This study develops a methodology based on Geographic Information Systems (GIS) and multi-criteria analysis to identify areas susceptible to avalanche occurrence. Key variables such as altitude, slope, land cover, morphology, and accumulation zones were analysed to generate susceptibility maps classified into four levels. The results reveal that areas with the highest susceptibility are concentrated on the slopes of major peaks and regions with intense recreational activity associated with winter sports. This work provides a novel contribution to avalanche knowledge in Sierra Nevada and constitutes a key tool for land management and natural hazard risk reduction.

**Keywords:**

Avalanches, snow avalanches, GIS, Sierra Nevada, natural hazards.

## 1. Introducción

LAS ZONAS DE MONTAÑA han ido experimentando una gran transformación desde mediados del siglo XX, pasando del aprovechamiento forestal y agrario a una explotación de los recursos para favorecer el turismo y deportes de invierno, lo que ha traído consigo la construcción de numerosas infraestructuras que han convertido las zonas y rutas de montaña en entornos más accesibles y de mayor interés para la población (Chueca y Julián, 2010). No obstante, el desarrollo humano en estas áreas ha incrementado su exposición frente a riesgos naturales, incluyendo el desencadenamiento de aludes. Esta situación requiere un análisis de mayor profundidad respecto a los procesos y dinámicas de estos eventos para identificar y evaluar los riesgos asociados a la ocupación humana en estos entornos.

Es necesario resaltar que los aludes son un fenómeno que se produce en los ejes espacial y temporal, al ser un evento recurrente, por lo que ha de ser abordado desde ambos ángulos. Resulta fundamental llevar a cabo una predicción en el espacio que permita determinar no solo el origen del alud, sino también la extensión total del área que puede llegar a cubrir, prestando especial atención a aquellos eventos de magnitud elevada. También es importante atender a otras variables como la frecuencia con la cual se producen o con qué energía lo hacen. En relación a este riesgo potencial para las poblaciones existen diferentes demandas sociales. Por un lado, resulta de gran importancia la transmisión de información hacia los usuarios de la montaña con la finalidad de que estos puedan evaluar el riesgo al que se enfrentan en sus actividades con el máximo nivel de fiabilidad. De este modo, tendrán la capacidad de decidir con la información obtenida si salir a practicar algún deporte o actividad de ocio en la montaña. En segundo lugar, y de manera complementaria, la sociedad demanda una identificación de aquellas zonas que sean susceptibles de ser afectadas por aludes de magnitudes mayores, de forma que su uso quede racionalizado y en caso de ser necesario, conlleve la limitación y prohibición del uso para la edificación y construcción de infraestructuras. Esto permite ofrecer una mayor protección a toda la sociedad, evitando situaciones de indefensión.

### 1.1. Los aludes como fenómeno natural y humano

LOS ALUDES son uno de los procesos nivoperiglaciares más importantes que influyen en la dinámica de las áreas montañosas (Luckman, 1978; Butler, 1985; Schweizer et al., 2003). Estos fenómenos desempeñan un papel crucial en la configuración del paisaje de montaña, desde áreas árticas hasta regiones de alta y media montaña en latitudes templadas, en pendientes de torno a 25° y 50° que permiten una notoria acumulación

de nieve que resulta susceptible de desplazamiento. Estos van a tener un efecto evidente en los pisos forestales y supraforestales (Rixen et al., 2007; Bebi et al., 2009), ya que la movilidad rápida y violenta de los aludes incrementa significativamente la capacidad morfogenética de las vertientes. Los aludes llegan a convertirse en canales capaces de transportar nieve desde las franjas alpinas, desplazándolas por las laderas medias hasta alcanzar la parte más baja de los valles, lo que supone una afectación directa a las principales vías de comunicación y de actividad humana (Butler et al., 1992).

Los aludes se generan cuando una porción del manto nivoso pierde su estabilidad y se desplaza por una vertiente, como resultado del desequilibrio entre las fuerzas resistentes al movimiento y las fuerzas motrices (Furdada, 2006). Para ser considerados como tales deben movilizar un volumen de al menos 100 m<sup>3</sup> de nieve con un desplazamiento de al menos 50 m, en los casos en los que esta distancia no se alcanza, se denominan purgas o coladas (Agencia Estatal de Meteorología, 2015). Los aludes cuentan con tres partes diferenciadas: la zona de salida, la de trayecto y la de depósito. Este estudio centrará el análisis sobre la primera, que se corresponde con la parte del terreno en la que se origina el alud, es decir, donde se produce la aceleración de la masa de nieve. Es habitual que se hable de múltiples zonas consideradas de salida cuando se hace referencia a las áreas concretas en las que se desencadenan diversos aludes, tengan estos o no un trayecto común.

Otro elemento que sirve para caracterizar los aludes son sus consecuencias, dado que pueden llegar a herir, sepultar y matar a una persona. De esta manera, resulta de gran importancia valorar los efectos que pueden llegar a tener principalmente en términos de vidas humanas, sin olvidar las pérdidas de bienes materiales, infraestructuras y del propio medio natural.

Desde hace décadas los investigadores trabajan en desarrollar metodologías de análisis sobre el riesgo de aludes y su peligrosidad en aquellas regiones montañosas en las que dichas avalanchas han producido históricamente importantes daños. Para ello la delimitación de zonas probables de aludes es uno de los principales recursos para cumplir este propósito. Gran parte de los trabajos realizados han ido encaminados en mayor medida a evaluar el riesgo en vías de comunicación (Vada et al., 2012).

La investigación científica sobre aludes resulta extensa fuera de nuestras fronteras y aborda distintos ámbitos como el análisis de las perturbaciones que producen los aludes en la composición y estructura de los ecosistemas de montaña, el incremento de la biodiversidad o la transformación de la estructura del bosque (Bebi et al., 2009; Rixen et al., 2007; Kulakowski et al., 2006). Pero también en lo que respecta al impacto humano,

como en los cambios de uso del suelo (Multán, 2016; Schläppy et al., 2016; Beato et al., 2019), el cambio climático o el desarrollo creciente de los aludes húmedos (Naaim et al., 2016; Ballesteros-Cánovas et al., 2018).

Por su parte, a pesar de que el desencadenamiento de aludes es una problemática que siempre ha estado presente en las montañas españolas, los estudios sobre aludes a nivel nacional son escasos y se han realizado principalmente en los Pirineos (Furdada et al., 2008; Muntán, 2012), así como algunos trabajos en el Sistema Central (Fernández-Cañadas et al., 2014). Cabe resaltar los primeros trabajos en los años 80 encaminados a desarrollar sistemas de predicción de peligro de aludes, como la tesis doctoral de Muñoz (1988) que propone un sistema práctico para la prevención y defensa contra aludes en el Pirineo aragonés. Unos años después, sería el Instituto Tecnológico Geominero de España (1994) el que pondría en marcha un estudio del medio físico y de riesgos con una serie de cartografías que consideraban el riesgo de aludes y su zonificación para la misma región. Por otro lado, resultaron de gran relevancia los mapas de aludes producidos por el Servicio Geológico de Cataluña en 1986, institución que lideró un proyecto para el estudio del riesgo de aludes en el Pirineo Catalán y que iniciaba una serie de cartografía sistemática de localización probable de aludes (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, 2000). Autores como Furdada et al. (1989) profundizaron en las líneas de investigación sobre aludes, aplicando nuevos enfoques y planteando las consecuencias socioeconómicas que tiene la falta de planificación territorial con respecto al peligro de aludes.

El uso de Sistemas de Información Geográfica supuso un cambio muy importante en las metodologías utilizadas, Furdada (1996) los utilizó por primera vez en los Pirineos occidentales catalanes para zonificar el peligro de aludes. En otras partes del Pirineo destacan los trabajos cartográficos de zonas probables de aludes de Julián y Chueca (1999) y Julián et al. (2000) en Canal Roya-Espelunciecha, Valle de Ordesa y Valle de Pineta, utilizando metodologías basadas en la observación de fotogramas aéreos junto con trabajo de campo. Estos trabajos no solo se centran en las zonas que han dejado registradas avalanchas de nieve, sino que se amplían también a aquellas otras zonas que podrían verse afectadas, si se consideran diferentes criterios establecidos previamente, como son el valor de las pendientes, la morfología y rugosidad de las laderas, el límite altitudinal o la vegetación.

El uso de metodologías multicriterio empleando la potencialidad de los SIG para la zonificación de aludes comenzó a consolidarse durante los primeros años del siglo XXI. Podemos

destacar los trabajos de Maestro (2004), Palomo Segovia (2008), Palomo et al. (2008) o Chueca y Julián (2010) en varias áreas del Pirineo aragonés, incluyendo el Alto Gállego, en el circo de Piedrafita y el Valle de Aguas Limpias. Estos estudios incorporaron factores clave como la altitud, pendiente, orientación, cobertura del terreno, rugosidad y morfología del terreno. Este tipo de investigaciones se popularizó en otras zonas montañosas del Norte de España como los Picos de Europa (Santos et al. 2010), a través de trabajo de campo, uso de SIG y encuestas a la población local, se consiguió definir las zonas con pendientes, altitud, orientaciones y vegetación idónea para el desencadenamiento de las avalanchas, con la elaboración de una cartografía que detalla las zonas afectadas, las que ofrecen un riesgo elevado y un riesgo menor. También es destacable el trabajo de Vada et al. (2012), estos autores centran su estudio en la aplicación de un Índice de Riesgo de Aludes (IRA) en itinerarios de montaña muy transitados en los Picos de Europa, integrando factores como la intensidad de los aludes, la frecuencia de ocurrencia, el número de zonas de encuentro entre aludes y personas, el tiempo de exposición de los montañeros y el número de usuarios de los caminos. Otros autores realizan zonificación según peligrosidad de aludes en el Pirineo catalán (Oller et al., 2013) o la cartografía de aludes en el Macizo de Peñalara en la Sierra de Guadarrama (Fernández-Cañadas et al., 2014), donde se aplicaron factores como la altitud, la pendiente, la orientación, la insolación potencial, la rugosidad del terreno y las condiciones nivometeorológicas. Si se acota el espacio de estudio al Sistema Penibético y a Sierra Nevada, apenas se encuentran trabajos al respecto, y estos se enfocan al estudio morfológico del terreno. En este sentido, cabe destacar el trabajo de Gómez Ortiz (2003), que elabora un mapa geomorfológico, en el que incide en el carácter glaciar y periglacial de la montaña, donde analiza la evolución cuaternaria del paisaje de Sierra Nevada, abarcando los sectores más elevados e incorporando los canales de aludes en la cartografía.

Se hace fundamental la realización de tales cartografías sobre las zonas de ocurrencia de aludes, debido a que permiten avanzar en el conocimiento de sus mecanismos de deformación y ayudan a paliar la exposición de las infraestructuras, y, en especial a los usuarios en tales zonas. En este sentido, esta investigación tiene como objetivo identificar y cartografiar las zonas probables de desencadenamiento de aludes en Sierra Nevada en los meses de invierno, a través del estudio de los factores que contribuyen a su desencadenamiento, ofreciendo un primer análisis que sirva de base para rellenar la falta de mapas sobre aludes en esta región y contribuir a garantizar la adecuada protección frente a estas amenazas.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Área de estudio

SIERRA NEVADA forma parte del Sistema Penibético, que constituye las montañas más prominentes de las Cordilleras Béticas, ubicadas en el extremo sureste de la Península Ibérica y próximo al Mar Mediterráneo. Este sistema montañoso se extiende a lo largo de aproximadamente 80 km, desde las proximidades de la ciudad de Granada hasta la localidad de Ohanes, en Almería, con un área total de 1722,38 km<sup>2</sup>. Este territorio incluye el Parque Natural de Sierra Nevada, así como el Parque Nacional de mismo nombre. La zona de estudio se encuentra delimitada por el oeste y norte con el Valle de Lecrín, la Sierra de Huétor y las depresiones de Granada y Guadix, por el sur y este se sitúa las Sierras de Lújar, la Contraviesa y la Sierra de Gádor a través de los ríos Guadalfeo y Andarax. Y, por último, en el

noreste y este se sitúa el río Nacimiento en las Sierras de Baza-Filabres. Este sistema montañoso incluye la cumbre con mayor altitud de la Península Ibérica, el pico Mulhacén con 3479 m de altitud. Los siguientes picos más elevados en Sierra Nevada son el Veleta (3398 m) y Alcazaba (3371 m) como se puede ver en la Figura 1.

La disposición transversal de Sierra Nevada siguiendo el paralelo 37° N y su notable volumen y altura, han dado lugar a que la red fluvial se distribuya de manera radial a partir de las cumbres. Cabe destacar que su disposición ofrece barrancos cortos, angostos y empinados, que se caracterizan por contar con un régimen irregular en su caudal que se puede identificar con el característico barranco Mediterráneo que ofrece una gran capacidad de arrastre.

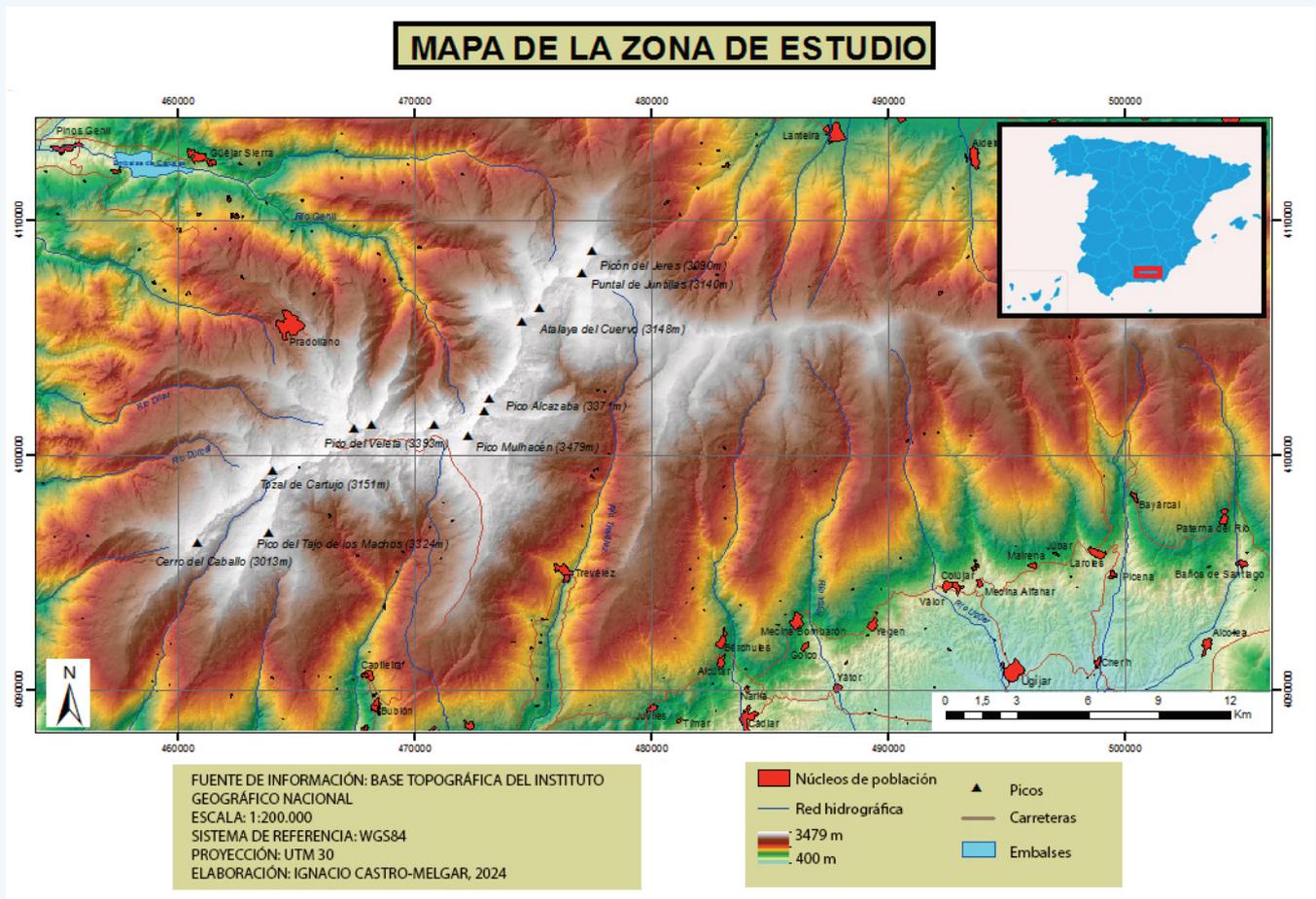


Figura 1. Mapa topográfico de la zona de estudio ubicada en Sierra Nevada, al sureste de España (ver ubicación en el recuadro superior a la derecha). Se destacan los núcleos de población (polígonos rojos), la red hidrográfica (líneas azules), los principales picos montañosos (triángulos negros), las carreteras (líneas marrones) y los embalses (polígonos azules). La altitud está representada por una escala de colores desde el blanco (máximo 3479 m) al azul (mínimo 400 m).

Desde un punto de vista geológico, Sierra Nevada está formada por una cadena de plegamiento alpino originada durante el Terciario, periodo en el que comenzó a modelarse el relieve que caracteriza su morfología actual (Rodríguez Fernández, 2017). Posteriormente, las glaciaciones ocurridas durante el Cuaternario originaron lagunas y valles glaciares (Gómez Ortiz y Plana Castellví, 2004), mientras que la dinámica periglacial continúa manifestándose por encima de altitudes de 2500 – 2600 m (Gómez Ortiz et al., 1999). La estructura geológica de Sierra Nevada está compuesta por tres conjuntos diferentes de mantos de corrimiento que quedan superpuestos o apilados: 1. Zona central, formada a partir de materiales pertenecientes al Complejo Nevado-Filábride, un conjunto geológico formado por rocas metamórficas pertenecientes al periodo Paleozoico y anterior que llegan a superar los 250 Ma. Estos se identifican con el núcleo de Sierra Nevada, que posee a su vez otras dos unidades que están tectónicamente superpuestas y que se corresponden con las unidades del Veleta (unidad inferior) y del Mulhacén (superior). 2. Zona intermedia, que se sitúa en torno al núcleo, está compuestas por materiales del Complejo Alpujárride y cuenta con rocas calcáreas del Triásico y metapelitas del Paleozoico entre los 240 – 210 Ma. 3. Zona exterior, formada por rocas de composición variada del periodo comprendido entre el Neógeno y el Cuaternario, desde los 20 Ma. hasta la actualidad. Estos materiales son el resultado de la erosión del relieve y acumulación en las distintas cuencas que lo rodean (Rodríguez Fernández, 2017).

Sierra Nevada representa el ejemplo más característico de los ecosistemas mediterráneos de alta montaña según el propio catálogo de Parques Nacionales. De este modo, uno de sus rasgos más característicos del clima propio es la fuerte insolación de la zona mediterránea en la que se sitúa, así como una aridez relativa, ocasionada por su orientación sur y la preponderancia de vientos del oeste (Carvajal, 2016). Profundizando en este aspecto, Sierra Nevada cuenta con una gran diversidad climática, que se debe a unas condiciones marcadas por su compleja topografía, su latitud y su amplitud altitudinal. Esta última tiene una gran influencia en las grandes oscilaciones térmicas presentes. La temperatura media anual por debajo de los 1500 m oscila entre los 12° - 16° C, entre los 1500 y 2000 m se sitúa entre 8° - 12° C, entre los 2000 y 2500 m cuenta con una temperatura media anual entre 4° - 8° C, mientras que es a partir de los 3000 m cuando la media desciende de 0° C (Milheiro Santos, 2016). En este sentido, cabe destacar que el gradiente térmico vertical se establece en 0,48° C en el caso de la vertiente meridional, mientras que en la septentrional se sitúa en 0,71° C. El régimen de precipitación de Sierra Nevada presenta una distribución desigual a lo largo del año, influenciado por la circulación atmosférica de origen atlántico. Como resultado, las áreas norte y occidental experimentan mayor humedad y precipitaciones por lo que cuenta en su zona norte

y occidental con mayor humedad y precipitaciones, superando los 1500 mm al año, mientras que en la región oriental las precipitaciones se reducen significativamente, alcanzando valores cercanos a los 250 mm al año (Gómez Ortiz y Plana Castellví, 2004). Las precipitaciones superan los 775 mm a una altitud de 2550 m, correspondiendo a un 45% de tipo nivoso (Montávez et al., 1996).

Esta región destaca por una elevada singularidad y riqueza de especies y comunidades vegetales, resultado de factores como su localización geográfica, diversidad de sustratos geológicos, elevada altitud y el predominio del bioclima mediterráneo. Estos elementos favorecen el desarrollo de una vegetación diversa, cuyo máximo exponente en el bosque de *Quercus pyrenaica*, situado principalmente dentro de los pisos meso superior y supra mediterráneo, como señalan Castillo Rodríguez y Castillo Amaro (2010). A partir de los 2450 m, que constituye el límite superior del bosque, se desarrolla el piso de vegetación supraforestal, repoblado parcialmente con *Pinus sylvestris nevadensis*, tal y como señalan Molero y Marfil (2017). Este nivel corresponde a la parte alta del piso oromediterráneo, caracterizado por la presencia de comunidades de piornos, enebros y otras especies como las sabinas. En el piso criomediterráneo, iniciándose sobre los 2800 m en su vertiente septentrional y llegando a alcanzar las cumbres, cuenta con plantas de tipo perennes, pastizal seco y poco denso. Por último, el ombroclima, de tipo húmedo-subhúmedo, se transforma en seco alcanzando el carácter de semiárido con la altura y potenciado con los meses en los que la temperatura se sitúa bajo cero (Castillo Rodríguez y Castillo Amaro, 2010).

Atendiendo al paisaje y usos, estos han ido variando notablemente en las últimas décadas, pasando de un uso agroforestal y de actividad ganadera a una completa transformación hacia un uso turístico, destinado a actividades deportivas y de recreo (Vera-Rebollo, 2001), con la consiguiente creación de la Estación de Esquí de Pradollano a 2100 m de altura, que atrae a más de 1 millón de personas solo en la temporada de invierno-primavera (Granada Hoy, 2023; 2024). Esto se combina con otras actividades deportivas como el montañismo, escalada y alpinismo, deportes que tiene gran desarrollo en Sierra Nevada, dado que cuenta con multitud de travesías, lo que aumenta la exposición del riesgo.

La combinación de una elevada altitud, pendientes pronunciadas y la influencia de la dinámica periglacial hacen que Sierra Nevada presente condiciones propicias para el desencadenamiento de aludes en cotas altas. Las variaciones en la acumulación nival incrementan el riesgo durante los meses invernales. Estos factores, junto con el aumento de la actividad turística, refuerzan la necesidad de estudios sobre aludes en esta región.

## 2.2. Metodología

ESTE TRABAJO ESTÁ CENTRADO en elaborar una cartografía de susceptibilidad de riesgo de aludes en la zona de Sierra Nevada, para ello se han tenido en cuenta los trabajos previos enfocados en localizar el peligro a través de la elaboración de una serie de mapas que permita identificar zonas probables del desencadenamiento de aludes (CEMAGREF, 1981; Furdada et al., 1995; Furdada, 1996; Oller et al., 1998; Julián et al., 2000; Palomo Segovia, 2008; Chueca y Julián, 2010; Vada et al., 2012; Fernández-Cañadas y López-Pélaez et al., 2014).

En primer lugar, resulta determinante contar con un conocimiento pormenorizado de las características fisiológicas de un área para poder identificar y establecer las áreas propensas al desencadenamiento de aludes (Palomo Segovia, 2008). Respecto a las variables consideradas, habría que indicar que estas se han distribuido en variables principales, referidas a los factores intrínsecos a las vertientes, y variables de intensificación. Para la elaboración de esta cartografía se han tenido en cuenta las variables principales que se corresponden con el límite altitudinal que se establece la isoterma 0° C, el valor de las pendientes y los tipos de cubiertas del terreno (Ramón Fuertes, 2018).

En este sentido, se ha empleado para caracterizar dichas variables la información procedente del Instituto Geográfico Nacional (IGN), en primer lugar, el Modelo Digital del Terreno (MDT), con un paso de malla de 5 m (MDT05), junto con ortofotos digitales del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) correspondiente con los años 2010 y 2011 (color, 0,5 m píxel) y el Sistema de Información Sobre Ocupación del Suelo en España (SIOSE) del año 2011.

Posteriormente se ha procesado y tratado digitalmente la información mediante el Sistema de Información Geográfica (SIG) *ArcGIS 10*, que se ha desarrollado mediante un proceso dos fases, por un lado, una primera fase ha estado destinada a la delimitación y caracterización del área de estudio, teniendo en cuenta las distintas variables ya indicadas, y una segunda fase enfocada en realizar el posterior análisis multicriterio mediante la elaboración de una cartografía escala 1:200.000 y 1:50.000 de las zonas susceptibles de inicio de aludes en el área de estudio.

A continuación, se detallan las tres principales variables (límite altitudinal, pendientes y tipo de cubiertas del terreno) y las dos variables de intensificación (morfología del terreno y zonas de acumulación) que han sido tenidas en cuenta para realizar este estudio.

### 2.2.1. Límite altitudinal

EL LÍMITE ALTITUDINAL se encarga de marcar la cota inferior, en función de la cual las precipitaciones se presentan en forma de nieve y las bajas temperaturas fomentan su conservación durante una época del año concreta. La temperatura media

entre los meses de diciembre y marzo oscila entre los 6° y 7° C a altitudes de 700 – 1000 m en la vertiente norte y 7° - 10° C en la sur. La formación de nieve viene determinada por la isoterma de 0° C. En el contexto de Sierra Nevada y centrándonos en los meses de invierno, este valor ha sido determinado en los 2515 m (Giménez, 1985; Milheiro Santos, 2016). La probabilidad de que se produzca una avalancha en zonas localizadas a una altitud inferior resulta mínima; no obstante, estas áreas pueden resultar afectadas por la llegada o paso de un alud que se haya desencadenado en cotas más altas. Las zonas por debajo de la isoterma 0° C son excluidas asignándoles un valor “0”, mientras que las zonas situadas a esa altitud o por encima de esta cota son asignadas con el valor “1”.

### 2.2.2. Pendientes

SEGÚN ESTABLECE LA LITERATURA previa (McClung y Schaerer, 1996; Ayala y Olcina, 2002; Chueca et al., 2014), las pendientes más propicias para el desencadenamiento de aludes oscilan entre los 25° y 45°. Una inclinación mínima de 25° permite superar fuerzas de resistencia, como la cohesión o el rozamiento, así como la componente longitudinal del peso de la nieve. Aunque por debajo de los 25° la nieve tiende a permanecer estática, no existe un límite inferior absoluto que garantice la ausencia de aludes, ya que estos también dependen de las condiciones atmosféricas (Chueca y Julián, 2010). Por otro lado, en pendientes superiores a 45°, la acumulación de nieve es limitada debido a la falta de anclaje con el suelo, lo que impide la formación de aludes significativos. Por ello, los valores de pendiente considerados favorables se han delimitado entre 25° y 45°, asignándoles un valor de “1”, mientras que las pendientes fuera de este rango se clasifican con un valor de “0”.

### 2.2.3. Tipo de cubiertas del terreno

LA CUBIERTA DEL TERRENO es uno de los factores más indicativos para identificar áreas con mayor probabilidad de aludes. Esto se debe, en primer lugar, a que las huellas dejadas por eventos previos suelen eliminar la vegetación, creando zonas desprovistas de cobertura vegetal en casos de mayor magnitud. Además, características como la densidad y el tamaño de la vegetación desempeñan un papel crucial en el desencadenamiento de aludes. En este sentido, las áreas desnudas o cubiertas únicamente por pasto se consideran las más propicias para la formación de aludes, seguidas de aquellas cubiertas por arbustos de densidad moderada. En cambio, tal y como recogen Julián Andrés et al. (2000) los sectores menos proclives a registrar aludes son el bosque cerrado. De este modo, se han reclasificado las cubiertas del terreno: helechos, roquedo, canchal, pastos y forestal poco denso como cubiertas favorables, asignándoles valor “1”, mientras que los bosques densos y las superficies de agua han sido catalogadas como zonas que resultan no favorables con un valor “0”.

### 2.2.4. Morfología del terreno

LA MORFOLOGÍA DEL TERRENO actúa como un factor determinante en la estabilidad del manto nivoso. En áreas con formas cóncavas, las fuerzas de comprensión predominantes tienden a estabilizar la capa de nieve, mientras que las zonas convexas son más proclives al desencadenamiento de laudes dado que aumentan las fuerzas de tracción. Por tanto, se asigna un valor “1” a aquellas zonas convexas, mientras que se asigna un valor “0” a las zonas cóncavas.

### 2.2.5. Zonas de acumulación

MEDIANTE EL USO DE FOTOINTERPRETACIÓN, se ha identificado y delimitado las zonas dentro de la región de estudio proclives a la acumulación de nieve, lo que puede favorecer el desencadenamiento de aludes. Este proceso se llevó a cabo utilizando fotografías aéreas de alta resolución proporcionadas por el PNOA, complementadas con el análisis del MDT para analizar patrones morfológicos característicos de acumulación de nieve. Los resultados fueron contrastados con estudios previos en la región para garantizar la coherencia y validez de las delimitaciones realizadas (Gómez Ortiz, 2003).

### 2.2.6. Análisis multicriterio

EL ANÁLISIS MULTICRITERIO permitió identificar las áreas con condiciones favorables para el desencadenamiento de aludes. Este proceso se basó en la superposición de mapas temáticos que representan variables clave: altitud, cubierta del terreno, pendiente, zonas de sobreacumulación y morfología favorables.

La combinación de estas capas se realizó utilizando la siguiente ecuación:

$$[Altitud\ favorable * Pendiente\ favorable * Cubierta\ favorable * (1 + Morfología\ favorable + Acumulación\ favorable)]$$

La metodología utilizada en este estudio basada en el trabajo de Palomo et al. (2008), considera que las variables analizadas tienen diferentes niveles de influencia en el desencadenamiento de aludes, según su interacción con las condiciones específicas del área de estudio. En este contexto, se ha determinado que no todas las variables contribuyen de manera uniforme a la generación de aludes. Por ejemplo, la falta de un manto de nieve continuo, una cubierta inadecuada o una pendiente desfavorable impiden que ocurra un alud. Por ello, estas tres características –pendiente, cubierta y altitud favorables– se clasifican como factores indispensables. En contraste, variables como la sobreacumulación de nieve o la presencia de morfologías específicas no garantizan por sí solas el desprendimiento de nieve, por lo que se han considerado factores de intensificación. La Figura 2 ilustra el proceso de análisis multicriterio utilizado en este análisis, donde la susceptibilidad al desencadenamiento de aludes se representa con valores de probabilidad de 0 y 3, tal y como se detalla en la Tabla 1.

**Tabla 1. Valores de salida relacionados con la probabilidad de ocurrencia de aludes**

Valor	Probabilidad
0	Baja
1	Moderada
2	Alta
3	Muy alta

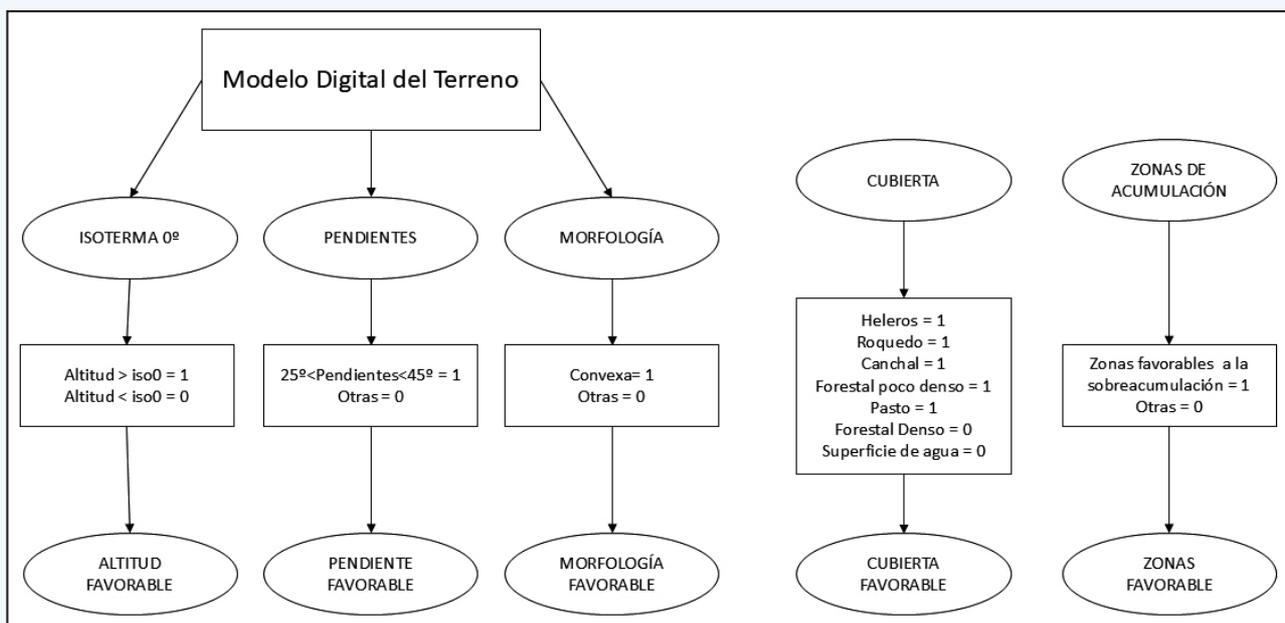


Figura 2. Esquema del proceso de análisis multicriterio para la zonificación de la susceptibilidad al desencadenamiento de aludes en Sierra Nevada.

Con base en los valores obtenidos, se clasificaron las áreas según su probabilidad de desencadenamiento de aludes. Las zonas con un valor de superposición 0 corresponden a una baja probabilidad, lo que implica que al menos una de las variables necesarias no presenta condiciones favorables. Las áreas con probabilidad moderada (valor 1) son aquellas donde las variables necesarias muestran condiciones favorables, pero las

variables de intensificación no lo hacen. Una alta probabilidad (valor 2) se asigna a las áreas donde las variables necesarias son favorables y, además, al menos una de las variables de intensificación también lo es. En último lugar, las zonas consideradas de probabilidad muy alta (valor 3) incluyen aquellas en las que tanto las variables necesarias como las de intensificación coinciden simultáneamente en ser favorables.

### 3. Resultados

A CONTINUACIÓN, se presentan los resultados de la cartografía elaborada donde se describen en detalle las zonas probables de aludes durante la temporada de invierno en el área de estudio. En primer lugar, en lo que respecta al mapa de pendientes (Figura 3) se aprecia una alta variabilidad en el terreno. Sierra Nevada posee dos partes claramente diferenciadas, la zona oriental, donde predominan las áreas de escasas y suaves pen-

dientes, mientras que en el lado occidental las pendientes resultan de mayor tamaño, cobrando especial relevancia la cara noroeste de los principales picos de la zona. Es necesario subrayar que es en la cabecera del río Genil donde se sitúan las pendientes más elevadas, los valles occidentales se encuentran más encajados con laderas de mayor inclinación.

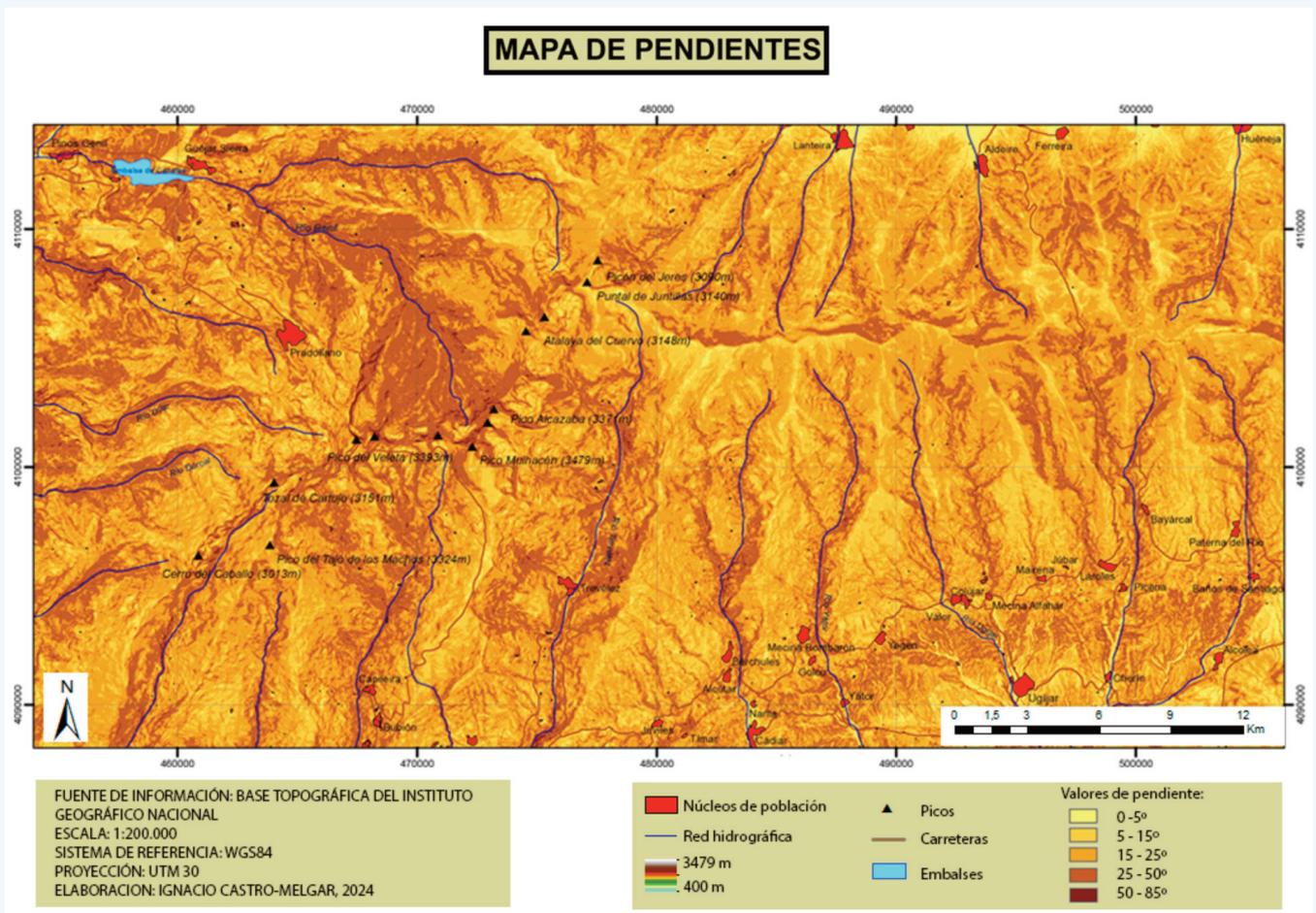


Figura 3. Mapa de pendientes de Sierra Nevada. Se representa la inclinación del terreno mediante una clasificación en cinco rangos (0-5°, 5-15°, 15-25°, 25-50° y 50-85°), destacando las áreas de mayor y menor pendiente. El mapa incluye información sobre los núcleos de población (polígonos rojos), la red hidrográfica (líneas azules), los principales picos montañosos (triángulos negros), las carreteras (líneas marrones) y los embalses (polígonos azules).

En la Figura 4 se muestra el mapa general de Sierra Nevada de zonas favorables al desencadenamiento de aludes. Como puede observarse, existe un riesgo de moderado a muy alto en gran parte de las laderas de los mayores picos. Las zonas con altitudes reducidas, pendientes poco pronunciadas y proximidad a núcleos de población presentan una baja probabilidad de desencadenar aludes, ya que se encuentran por debajo

de la isoterma cero. Como excepción, se observa el entorno de la estación de esquí de Pradollano, donde se pueden encontrar probabilidades moderadas y altas en las cercanías de las edificaciones y las pistas del complejo. Las áreas con probabilidades altas y muy altas resultan relativamente escasas. En ambos casos estas áreas se circunscriben a algunas de las laderas de los principales picos.

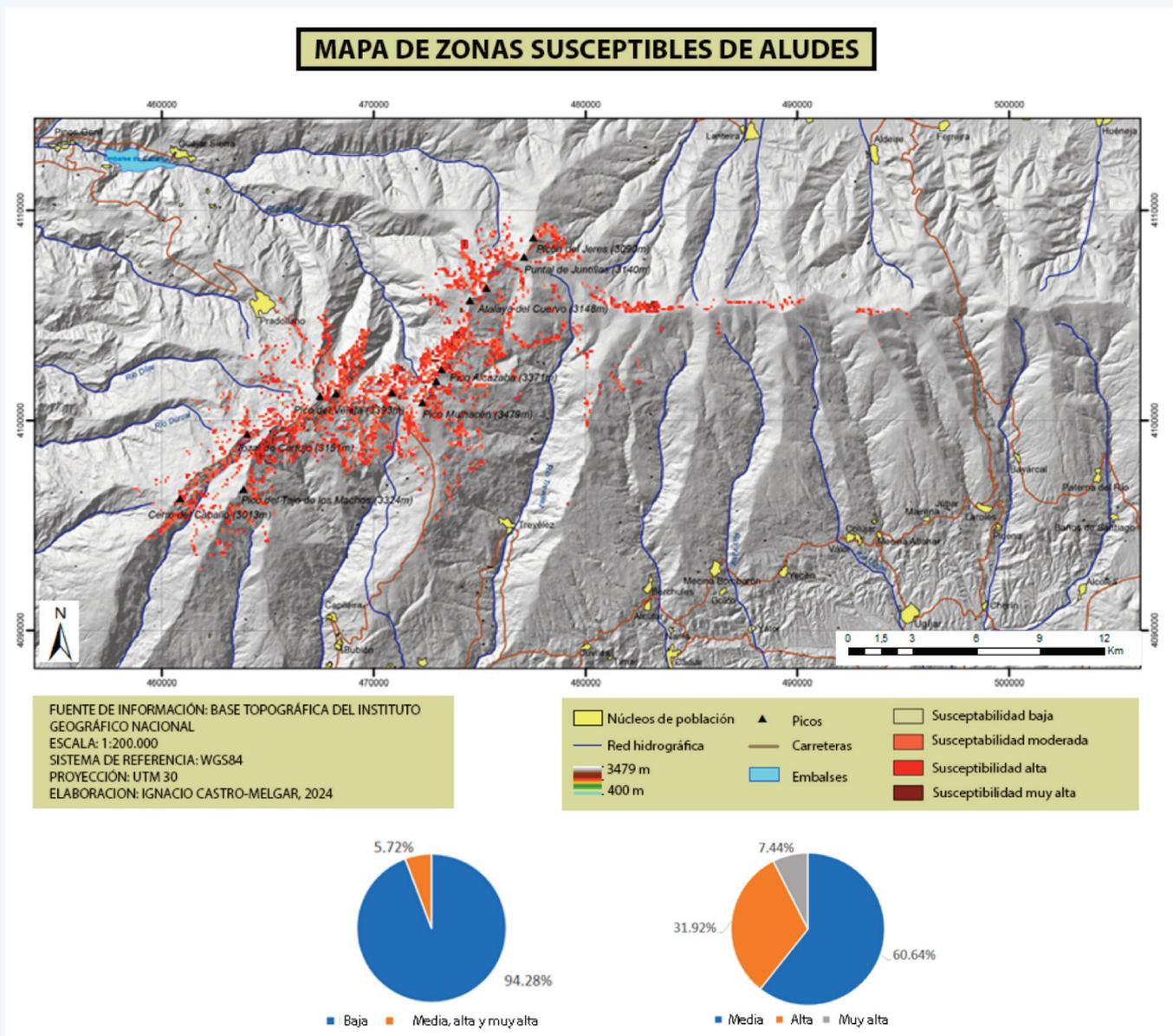


Figura 4. Mapa de zonas susceptibles de aludes en Sierra Nevada. El mapa muestra la distribución espacial de las áreas con diferentes niveles de susceptibilidad de origen de aludes, clasificados en baja, moderada, alta y muy alta. Las zonas con niveles más altos están indicadas con rojo oscuro. Se incluyen elementos relevantes como los núcleos de población (polígonos amarillos), la red hidrográfica (líneas azules), los principales picos montañosos (triángulos negros), las carreteras (líneas marrones) y los embalses (polígonos azules). En la parte inferior se incluyen gráficos que indican la distribución porcentual de la susceptibilidad en el área de estudio. A la izquierda, se muestra la proporción total de áreas de baja susceptibilidad (94,28 %) frente a aquellas con susceptibilidad moderada, alta y muy alta (5,72%). A la derecha, se detalla la subdivisión de estas últimas, donde el 60,64% corresponde a zonas con susceptibilidad moderada, el 31,92% a susceptibilidad alta y el 7,44% a muy alta.

Se ha dividido la zona de estudio de una escala 1:200.000 a una escala 1:50.000 para poder ver en detalle aquellas áreas que implican un análisis con mayor detalle.

El mapa que cubre el área de la estación de esquí de Pradolano y el pico Veleta se presenta en la Figura 5, aquí se puede observar valores de susceptibilidad de origen de aludes moderados y altos. Este aspecto resulta muy relevante dado que esta región se encuentra densificada por un uso recreativo a lo largo de todo el año, pero con especial intensificación en

los meses de invierno asociado a los deportes de nieve, como por ejemplo la presencia de pistas de esquí en el entorno de Borreguiles altos. Por otra parte, se puede ver la existencia de que las mayores susceptibilidades (valores moderados, altos y muy altos) se encuentran en la cara este y sureste del pico Veleta, esto implica un menor riesgo para los usuarios de la estación de esquí, si bien es conveniente resaltar el uso extensivo que se hace por parte de montañistas y escaladores en todo el parque natural y con mayor frecuencia el entorno de los picos más elevados.

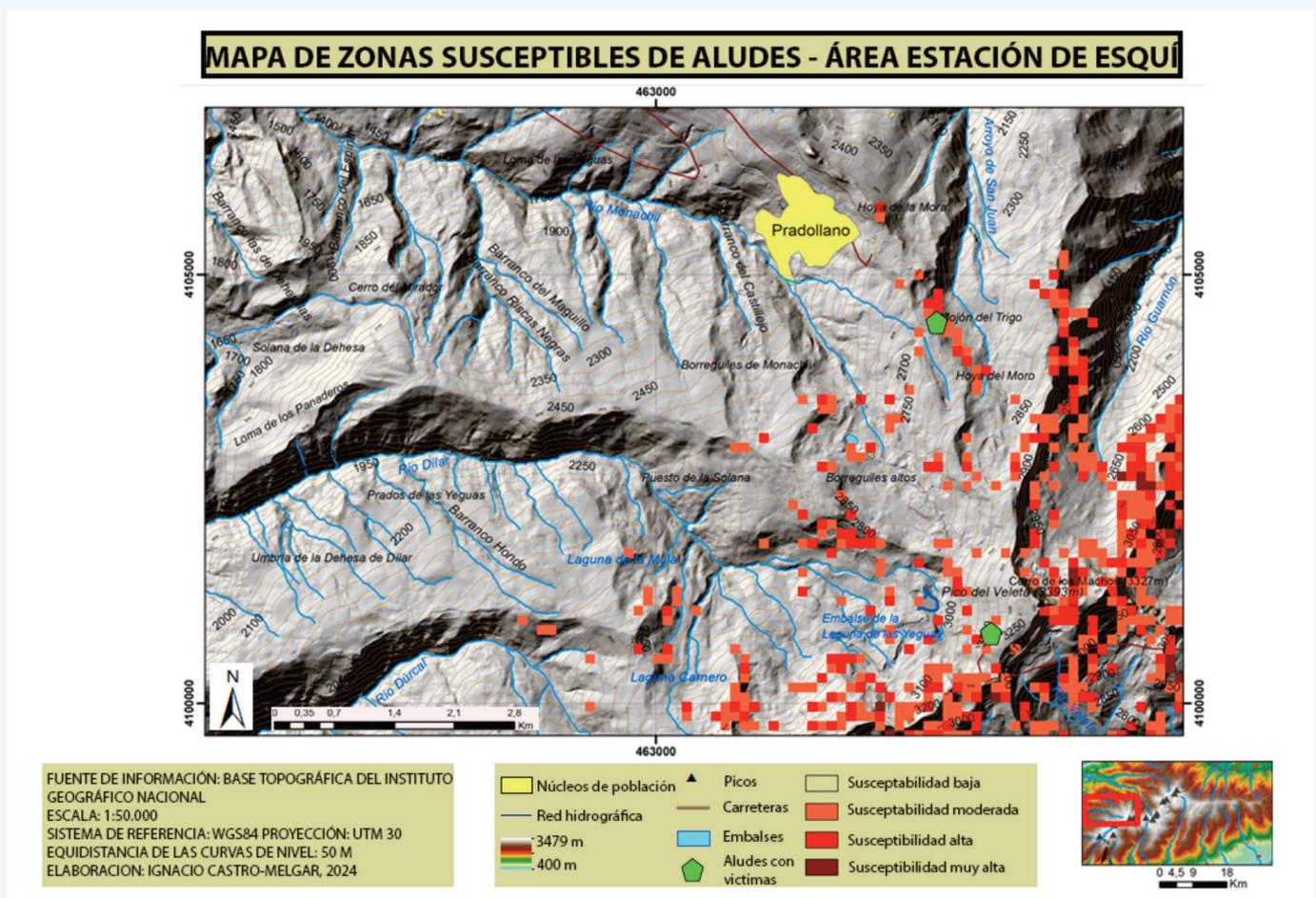


Figura 5. Mapa de zonas susceptibles de aludes en el área de la estación de esquí de Pradolano. El mapa muestra la distribución espacial de las áreas con diferentes niveles de susceptibilidad de origen de aludes, clasificados en baja, moderada, alta y muy alta. Las zonas con niveles más altos están indicadas con rojo oscuro. Se incluyen elementos relevantes como los núcleos de población (polígonos amarillos), la red hidrográfica (líneas azules), los principales picos montañosos (triángulos negros), las carreteras (líneas marrones) y los embalses (polígonos azules). El polígono verde muestra dos ejemplos de aludes con víctimas ocurridos en 2011 y 2021.

En la Figura 6 se recoge el área que cubre a los picos Mulhacén y Alcazaba entre otros. Se trata de una región de alta montaña que ofrece una de las zonas más atractivas y de mayor interés por su belleza paisajística para los usuarios de montaña. En esta zona se encuentran los principales picos de Sierra Nevada, zonas de lagunas glaciares como la Cañada de las Siete Lagunas o las Lagunas Larga, de la Caldera o del Majano. Como se aprecia en el mapa, las laderas noroeste y norte de los principales

picos en su zona alta presentan susceptibilidades de ocurrencia moderadas, altas y muy altas, lo que implica un serio peligro para el usuario de montaña. Por otra parte, en las laderas de la zona sureste también se localizan numerosas regiones de alta susceptibilidad, así como en áreas de gran interés para el montañista como los picos Alcazaba, Siete Lagunas y Mulhacén, además de zonas como la Cabaña de Siete Lagunas.

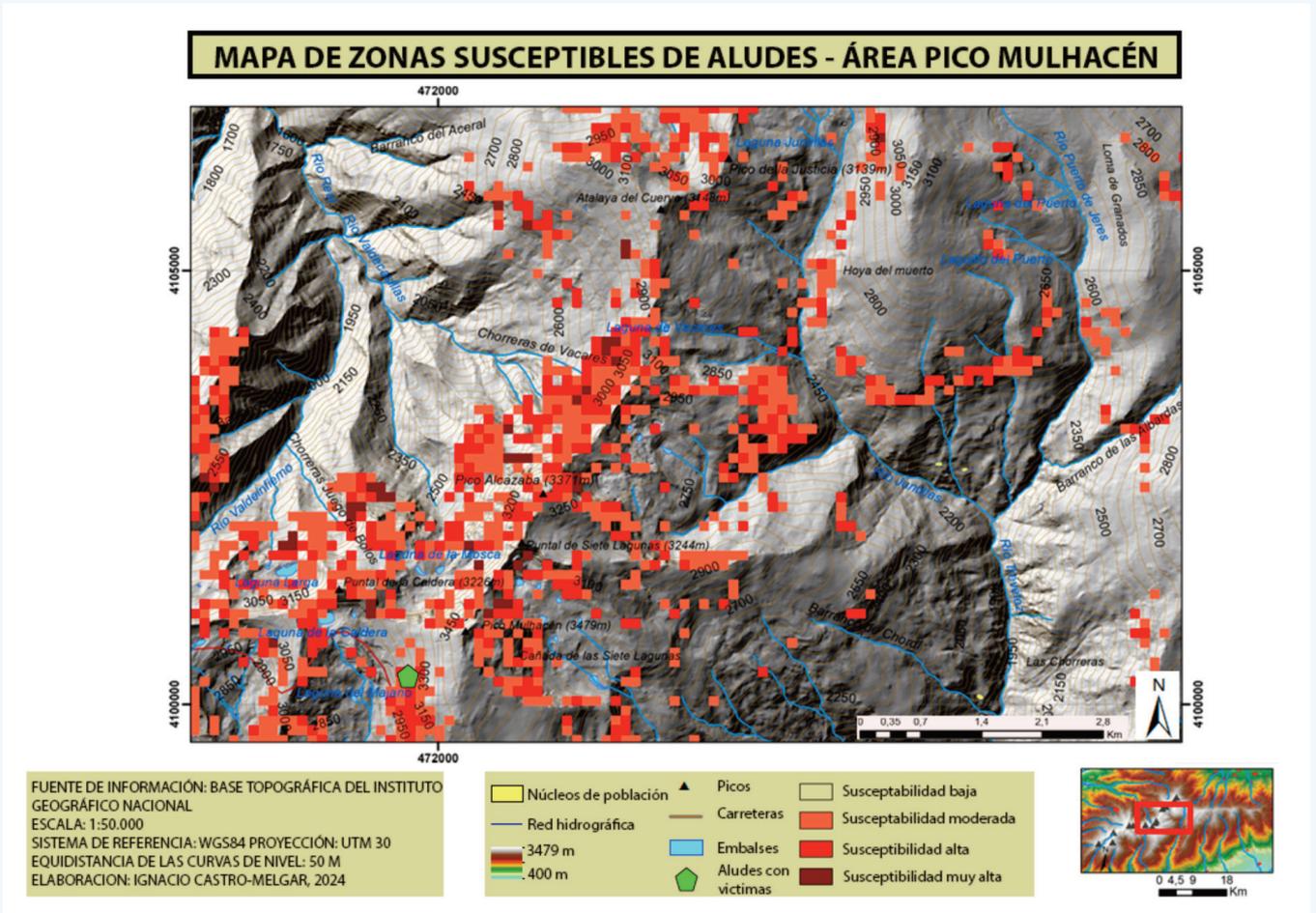


Figura 6. Mapa de zonas susceptibles de aludes en el área de los picos más elevados, como el Mulhacén o Alcazaba. El mapa muestra la distribución espacial de las áreas con diferentes niveles de susceptibilidad de origen de aludes, clasificados baja, moderada, alta y muy alta. Las zonas con niveles más altos están indicadas con rojo oscuro. Se incluyen elementos relevantes como los núcleos de población (polígonos amarillos), la red hidrográfica (líneas azules), los principales picos montañosos (triángulos negros), las carreteras (líneas marrones) y los embalses (polígonos azules). El polígono verde muestra el ejemplo de alud más importante en términos de vidas humanas ocurrido en 1989.

La siguiente región que se muestra en detalle corresponde con la región sureste (Figura 7). Se destaca el valle del Río Lanjarón, cuya ladera occidental presenta susceptibilidades moderadas y altas, siendo destacable también la cabecera de los Tajos de los Machos, donde existe unos valores de ocurrencia alto a muy altos, un área que resulta de especial atención dado que se encuentra entre una de las más importantes de desencadenamiento de aludes y resulta de gran interés entre los montañistas de Sierra Nevada.

Estas regiones acumulan los valores más elevados de ocurrencia de aludes, al contar con las principales elevaciones, aunque fue-

ra de estas también se destaca en las cercanías de la población de Trevélez (Figura 8). En el valle que recibe el mismo nombre y en su ladera occidental, se localizan pequeñas regiones de susceptibilidad moderada y alta, lo que resulta relevante debido a las cercanías con las poblaciones cercanas y el tránsito de vehículos y personas.

Además, se destaca también la región situada en la zona este de Sierra Nevada, en la divisoria de aguas entre los Barrancos del Sabinar y del Hoyo que presentan una susceptibilidad de desencadenamiento de aludes muy alta (Figura 9).

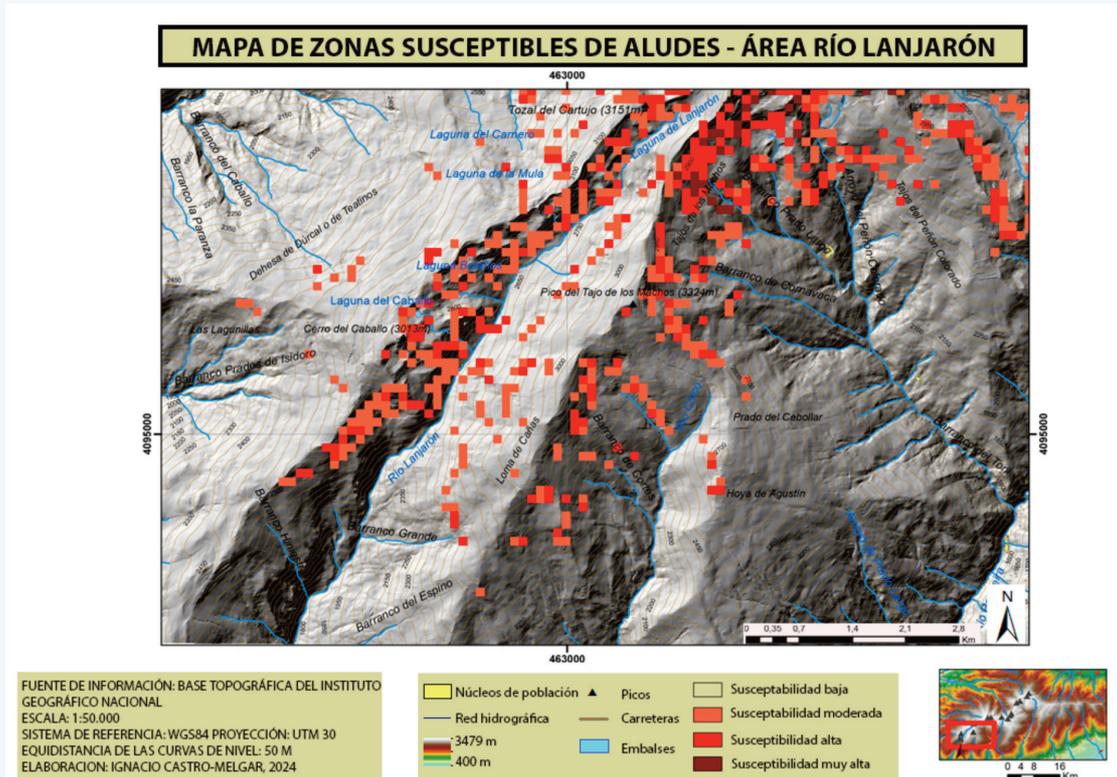


Figura 7. Mapa de zonas susceptibles de aludes en el área del Río Lanjarón. El mapa muestra la distribución espacial de las áreas con diferentes niveles de susceptibilidad de origen de aludes, clasificados en baja, moderada, alta y muy alta. Las zonas con niveles más altos están indicadas con rojo oscuro. Se incluyen elementos relevantes como los núcleos de población (polígonos amarillos), la red hidrográfica (líneas azules), los principales picos montañosos (triángulos negros), las carreteras (líneas marrones) y los embalses (polígonos azules).

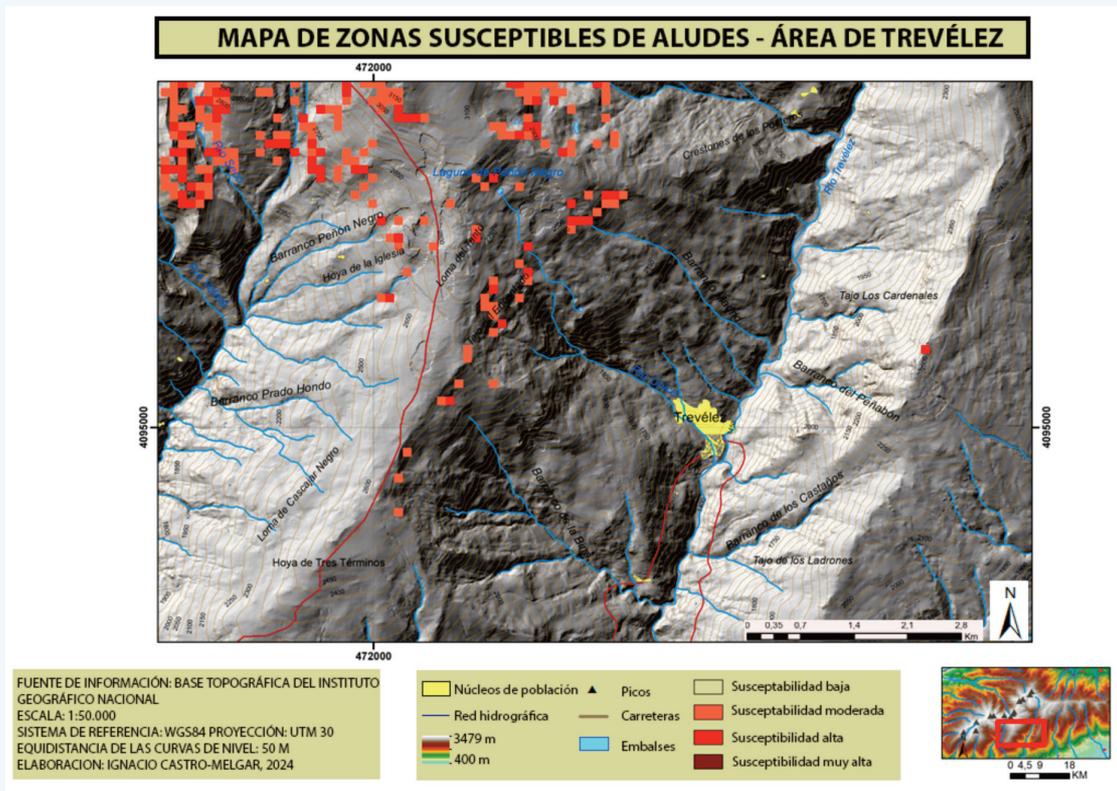


Figura 8. Mapa de zonas susceptibles de aludes en el área de la población de Trevélez. El mapa muestra la distribución espacial de las áreas con diferentes niveles de susceptibilidad de origen de aludes, clasificados en baja, moderada, alta y muy alta. Las zonas con niveles más altos están indicadas con rojo oscuro. Se incluyen elementos relevantes como los núcleos de población (polígonos amarillos), la red hidrográfica (líneas azules), los principales picos montañosos (triángulos negros), las carreteras (líneas marrones) y los embalses (polígonos azules).

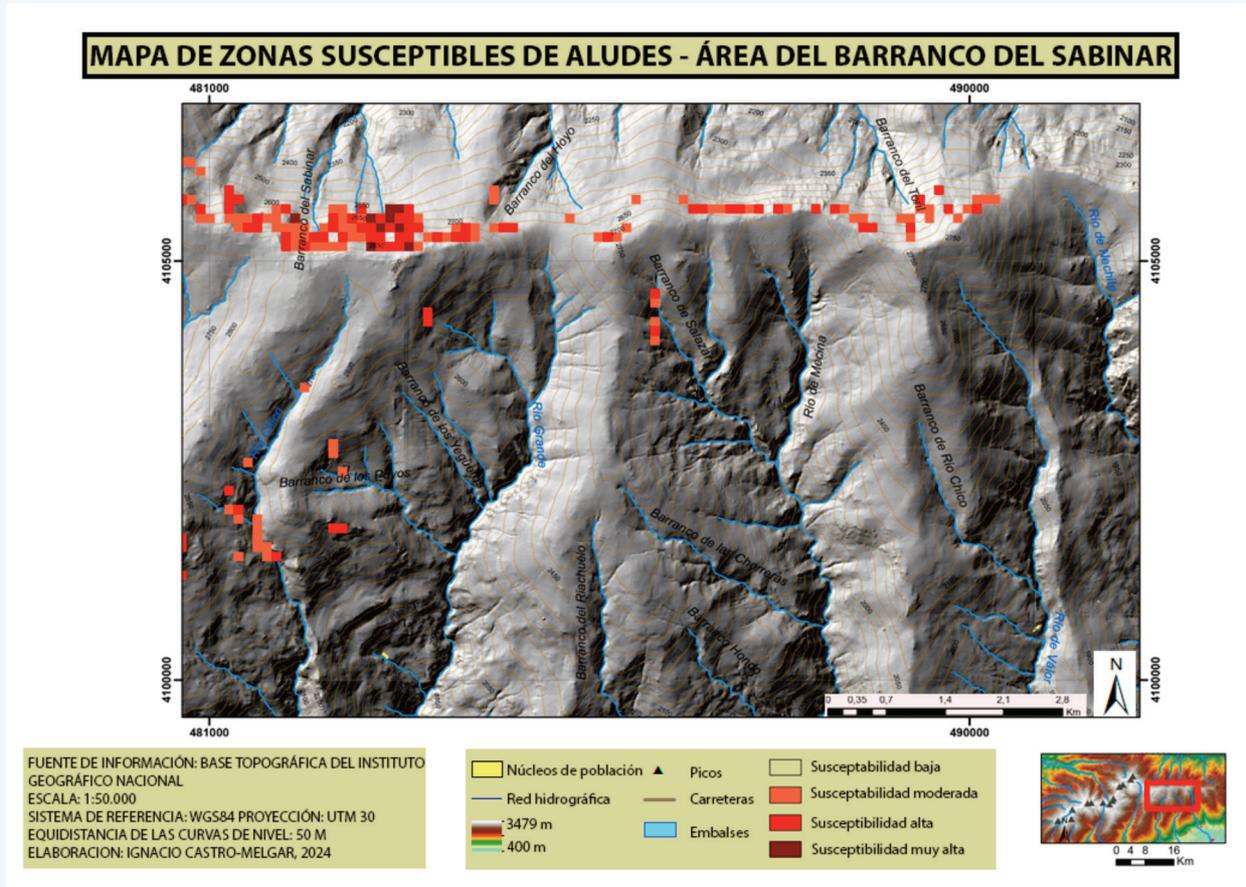


Figura 9. Mapa de zonas susceptibles de aludes en el área de los barrancos del Sabinar y del Hoyo. El mapa muestra la distribución espacial de las áreas con diferentes niveles de susceptibilidad de origen de aludes, clasificados en baja, moderada, alta y muy alta. Las zonas con niveles más altos están indicadas con rojo oscuro. Se incluyen elementos relevantes como los núcleos de población (polígonos amarillos), la red hidrográfica (líneas azules), los principales picos montañosos (triángulos negros), las carreteras (líneas marrones) y los embalses (polígonos azules).

## 4. Discusión y conclusiones

EN ESPAÑA, los aludes son un fenómeno recurrente, y en el caso de Sierra Nevada, se ha observado que ocurren con relativa frecuencia en las áreas de cumbres elevadas (Rodríguez Fernández, 2017). Existen numerosos casos de aludes que han provocado accidentes a montañistas y esquiadores en los últimos años. Cabe destacar el alud ocurrido en el barranco de San Juan en el año 2011 (Figura 5) que provocó la muerte de un montañista, este barranco es visitado por multitud de senderistas todos los años, al ofrecer rutas de gran belleza y de una accesibilidad alta. También cabe mencionar el accidente que sufrieron dos esquiadores de montaña en abril del año 2021 (Figura 5) en su ruta entre la Hoya de la Mora y el pico Alcazaba, provocado por la ocurrencia de un alud de placa seca dura que alcanzó unas dimensiones de 100 x 40 m a una cota de 3270 m, una inclinación de 38° y una cubierta de terreno favorable (García Lorente, 2021). Este alud se produjo en los Vasares del Veleta, una ladera ubicada en los alrededores del pico Veleta, una zona que ha sido descrita en el presente estudio con una susceptibilidad moderada y alta, y en la que es

necesario prestar especial atención dado que está muy frecuentada por el paso de usuarios de esquí al ofrecer acceso a la cara sur, y que ha registrado otras avalanchas en el pasado.

Si bien estos dos casos nombrados han resultado de mayor trascendencia, puesto que hubo afectación a las vidas de los usuarios de montaña, la cantidad de aludes que cada año se originan es mucho mayor. Además, haciendo un repaso histórico de esta región se han producido otros muchos aludes con graves consecuencias para esquiadores y montañistas, como por ejemplo el ocurrido en febrero de 1989 que provocó la muerte de 6 montañistas en las cercanías del pico Mulhacén cuando un grupo de montañistas franceses pretendían alcanzar el citado pico (Figura 6). Las localizaciones en las que se originaron estos aludes nombrados se pueden situar en las Figura 5 y 6 donde se puede comprobar que se sitúan en zonas con susceptibilidad moderada – alta de ocurrencia de aludes que presenta esta investigación, validando los resultados. Sin embargo, es importante resaltar que la metodología tiene limitaciones,

ya que no se aplicaron estrategias de ponderación entre factores ni se consideraron variables adicionales, como la exposición solar o la variabilidad meteorológica estacional, que podrían influir significativamente en el desencadenamiento de aludes. Estas variables junto a otros trabajos de mayor detalle como la exposición de riesgo en ciertas rutas de montaña pueden resultar de gran interés. Este análisis es un punto de partida para categorizar las zonas de riesgo en Sierra Nevada, pero plantea la necesidad de futuras investigaciones que incorporen estas variables y métodos más avanzados de análisis multicriterio.

Estos resultados han de servir como una llamada de atención a las autoridades de la importancia que tienen este tipo de estudios y cartografías para evitar consecuencias fatales para los usuarios de la montaña. En este sentido, resulta fundamental incorporar en la planificación de los usos de la montaña los riesgos de todo tipo, incluyendo el de los aludes. La clasificación de susceptibilidad utilizada en este estudio, basada en un enfoque binario para cada variable, dio lugar a un rango de valores de 0 a 4, donde 4 representa el valor máximo de susceptibilidad. Esto implica que, en el área de estudio una categoría de susceptibilidad muy alta se aplica exclusivamente a las zonas donde todas las variables analizadas coinciden en ser favorables simultáneamente. En relación con los sistemas actuales de predicción de riesgos, el trabajo presentado podría complementarse con la integración de escalas internacionales como el sistema europeo de peligro de aludes, que clasifica el riesgo en 5 niveles, desde débil (1) hasta muy fuerte (5) (Agencia Estatal de Meteorología, 2024). Vincular los resultados de este estudio con una escala internacionalmente reconocida podría facilitar la interpretación y aplicación de la información por parte de administraciones y usuarios.

Estos resultados son una primera contribución al conocimiento de los aludes y su susceptibilidad al desencadenamiento de estos en Sierra Nevada ofreciendo interés a través de la categorización de las zonas bajo estudio con unos valores de baja, media, alta y muy alta ocurrencia de aludes. Las primeras conclusiones que ofrece este trabajo son el establecimiento de zonas susceptibles de aludes en el área de estudio, para ello se ha tenido en cuenta distintas variables como son el límite de altitud, la pendiente, la morfología, la cubierta del terreno o las zonas de acumulación. Dentro del área que nos ocupa y a partir de la cartografía elaborada, se ha podido observar que la mayor susceptibilidad de aludes se concentra principalmente en la zona occidental del área de estudio, de forma específica alrededor de los picos más altos. De tal modo que las zonas que podrían verse afectadas por el origen de los aludes serían los valles de origen glaciar y la cara noroeste de los grandes picos. En la zona donde se centra la mayor parte de la actividad de deportes de invierno, la estación de esquí, a pesar de no ser una de las que cuenta con mayor riesgo, si se pueden encontrar áreas concretas que pueden verse afectadas por susceptibilidades moderadas y altas de desencadenamiento de aludes. La elaboración de cartografías de aludes revela las grandes potencialidades que tienen los Sistemas de Información Geográfica aplicados a los riesgos naturales.

Este estudio se centra en una región poco explorada en investigaciones sobre aludes, lo que lo convierte en un aporte de gran interés y utilidad. Los resultados obtenidos pueden servir como base para desarrollar una línea de trabajo más amplia, que integre estudios posteriores más detallados y complementarios. Esta información resulta crucial para los usuarios de la montaña y puede facilitar a las administraciones y organismos públicos la identificación de zonas potencialmente peligrosas, contribuyendo así a una gestión más efectiva y una correcta toma de decisiones.

## 5. Bibliografía

- Agencia Estatal de Meteorología. (2015). La guía de aludes. *Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado*.
- Agencia Estatal de Meteorología. (2024). *Escala Europea de Peligro de Aludes*. Accedido el 20 de diciembre de 2024. [https://www.aemet.es/es/conocermas/montana/detalles/escala\\_peligro\\_aludes](https://www.aemet.es/es/conocermas/montana/detalles/escala_peligro_aludes)
- Ayala, F. J., Olcina, J. (2002). *Riesgos naturales*. Barcelona: Ed. Ariel, 1512 pp.
- Ballesteros-Cánovas, J. A., Trappmann, D., Madrigal-González, J., Eckert, N. y Stoffel, M. (2018). Climate warming enhances snow avalanche risk in the Western Himalayas. *PNAS*, 115 (13), 3410-3415. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1716913115>
- Beato Bergua, S., Poblete Piedrabuena, M. A. y Marino Alfonso, J. L. (2019). La dinámica del paisaje en la Sierra del Aramo (Macizo Central Asturiano): procesos naturales y antrópicos. *Pirineos*, 174, 1-16. DOI: <https://doi.org/10.3989/pirineos.2019.174001>
- Bebi, P., Kulakowski, D. y Rixen, C. (2009). Snow avalanche disturbances in forest ecosystems-State of research and implications for management. *Forest Ecology and Management*, 257(9), 1883-1892. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.050>
- Butler, D. R. (1985). Vegetational and geomorphic change on snow avalanche paths, Glacier National Park, Montana, USA. *The Great Basin Naturalist*, 45(2), 313-317.
- Butler, D. R., Malanson, G. P. y Walsh, S. J. (1992). Snow-avalanche paths: conduits from the periglacial alpine to the subalpine depositional zone. En: Abrahams, A. y Dixon, J. (eds). *Periglacial Geomorphology* (pp. 185-202). London: Wiley.
- Campos Castelló, C. (2019) Evaluación y cartografía de peligrosidad de aludes en Sierra Nevada. Universidad de Málaga.
- Castillo Rodríguez, A. y Castillo Amaro, A. (2010). *Sierra Nevada inédita*. Granada: Penibética.
- Carvajal, C. (2016). Veleta. El rey alpino del sur. *Campo Base*, 149, 36-75.
- CEMAGREF. (1981). *Plan de zones exposées aux avalanches*. Paris: Ministère de l'Agriculture.
- 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. DOI: <https://doi.org/10.18172/cig.1225>
- Chueca Cía, J., Julián Andrés, A. y Montañés Magallón, 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. <https://doi.org/10.1080/17445647.2013.870501>
- Fernández-Cañadas, J. A., Palomo, M. y Pantoja, L. (2014). Delimitación espacial de las zonas probables de salida de aludes en el macizo de Peñalara mediante el uso de SIG. *Espacio, Tiempo y Forma*, 6-7. 73-94. DOI: <https://doi.org/10.5944/etfvi.6-7.0.14849>
- Furdada, G.; Martí, G.; Oller, P.; García, C.; Mases, M.; Vilaplana, J. M. (1995). Avalanche mapping and related G.I.S. applications in the Catalan Pyrenees. *Surveys in Geophysics*, 16, 681-693. <https://doi.org/10.1007/BF00665748>
- Furdada, G. (1996). *Estudi de les allaus al Pirineu Occidental de Catalunya: Predicció espacial i aplicacions de la cartografia*. Logroño: Geoforma ediciones.
- Furdada, G. (2006). Aludes de nieve. Riesgo actual y riesgo futuro. *Cuaternario y Geomorfología*, 20, 3-4.
- Furdada, G., Bosch, X. y Vilaplana, J. M. (1989). Predicción de zonas con peligro de alud. Consecuencias socioeconómicas de la falta de planificación territorial. En: Encuentro internacional "Catástrofes y sociedad". Fundación MAPFRE/ITSEMARP.
- Furdada, G., Calderón, L. E. y Marqués, M. A. (2008). Flood hazard map of La Trinidad (NW Nicaragua). Method and results. *Natural Hazards*, 45, 183-195. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9156-8>
- García Lorente, M. A. (2021). Accidente por avalancha en Sierra Nevada. *Neu i Allaus*, (13), 24-31.
- Giménez, F. (1985). El régimen térmico de alta montaña mediterránea. Sierra Nevada, España. *Paralelo*, 37. 8-9.

- Granada Hoy. (2023). *Sierra Nevada concluye la temporada con más de un millón de usuarios*. Accedido el 7 de agosto de 2024. [https://www.granadahoy.com/sierra\\_nevada/Sierra-Nevada-millon-usuarios-temporada-2022-2023\\_0\\_1784822022.html](https://www.granadahoy.com/sierra_nevada/Sierra-Nevada-millon-usuarios-temporada-2022-2023_0_1784822022.html)
- Granada Hoy. (2024). *Sierra Nevada cerró la temporada 2024 con 46 millones de euros de negocio, la cifra "más alta de su historia"*. Accedido el 7 de agosto de 2024. [https://www.granadahoy.com/sierra\\_nevada/sierra-nevada-cerro-temporada-2024-46-millones-euros-cifra-mas-alta-historia\\_0\\_2000456071.html](https://www.granadahoy.com/sierra_nevada/sierra-nevada-cerro-temporada-2024-46-millones-euros-cifra-mas-alta-historia_0_2000456071.html)
- Gómez Ortiz, A. (2003). *Mapa geomorfológico de Sierra Nevada, Morfología glacial y periglacial*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía y Universidad de Barcelona.
- Gómez Ortiz, A., Palacios Estremera, D., Ramos Sainz, M., Schulte, L., Salvador Franch, F. y Tanarro García, L. M. (1999). Degradación de permafrost en Sierra Nevada y repercusiones geomorfológicas: el caso del Corral del Veleta. Resultados preliminares. *Boletín de la A.G.E.*, 27, 7-21.
- Gómez Ortiz, A. y Plana Castellví, J. A. (2004). El paisaje glacial de Sierra Nevada a través de los escritos de época (siglos XVIII y XIX). Contribución al conocimiento geográfico español. *Investigaciones Geográficas*, 34, 29-45. <https://doi.org/10.14198/INGEO2004.34.04>
- Julián, A. y Chueca, J. (1999). Cartografía de zonas probables de aludes en el Valle de Ordesa (Pirineo aragonés). *Geographicalia*, 37. 73-86. DOI: [https://doi.org/10.26754/ojs\\_geoph/geoph.1999371401](https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.1999371401)
- Julián Andrés, A., Peña Monné, J. L., Chueca Cía, J., Zabalza Martínez, A., Lapeña Laiglesia, A. y López Moreno, I. (2000) Cartografía de zonas probables de aludes en el pirineo aragonés: metodología y resultados. *Boletín de la A. G. E.* 30.
- Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. (2000). El servei de prevenció d'allaus a Catalunya. Coneixement i prevenció. En: *Monografies tècniques*. Barcelona.
- Instituto Tecnológico GeoMinero de España. (1994). Estudio del Medio Físico y de sus Riesgos Naturales en un sector del Pirineo Central.
- Kulakowski, D., Rixen, C. y Bebi, P. (2006). Changes in forest structure and in the relative importance of climatic stress as a result of suppression of avalanche disturbances. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 36(4), 436-445. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.058>
- Luckman, B. H. (1978). Geomorphic work of snow avalanches in the Canadian Rocky Mountains. *Arctic and Alpine Research*, 10, 261-276. DOI: <https://doi.org/10.2307/1550759>
- Maestro, I. (2004). Map of the intrinsic risk of avalanches for the aragonese Pyrenees by using GIS techniques. En: *4<sup>th</sup> ICA Workshop on Mountain Cartography*.
- McClung D. y Schaerer, P. (1996). *Avalanchas*. Madrid: Ed. Desnivel, 307 pp.
- Milheiro Santos, B. A. (2016). Cubierta nival y temperaturas de superficie en Sierra Nevada a través del tratamiento digital de imágenes de satélite. Tesis doctoral, Universitat de Barcelona. [https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/108441/1/BENEDITA%20SANTOS\\_TESIS.pdf](https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/108441/1/BENEDITA%20SANTOS_TESIS.pdf)
- Molero, J. y Marfil, J. M. (2017). Betic and Southwest Andalusia. En: *The Vegetation of the Iberian Peninsula*. Springer International Publishing, 173-247.
- Montavez, J. P., Roldán, C., Rodríguez, A., y Jiménez, J. I. (1996). Primeros resultados de la climatología de Sierra Nevada. En *Conferencia Internacional Sierra Nevada*.
- Muntán, E. (2012). La historia de les allaus escrita als arbres. L'exemple de Soberpera (Val d'Aran). *Neu i Allaus*, 4, 4-9.
- Muntán, E. (2016). Snow avalanches in the Pyrenees: Dendrochronological dating, dendrogeomorphological mapping and detection of past snow-avalanche seasons at a regional scale. Tesis doctoral, Universidad de Barcelona. <http://hdl.handle.net/10803/403058>
- Muñoz, P. (1988). Prevención y defensa contra aludes. Aplicación práctica al Pirineo Aragonés. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.

- Naaim, M., Eckert, N., Giraud, G., Faug, T., Chambon, G., Naaim-Bouvet, F. y Richard, D. (2016). Impact du réchauffement climatique sur l'activité avalanchreuse et multiplication des avalanches humides dans les Alpes françaises. *La Houille Blanche*, 6, 12-20. DOI: <https://doi.org/10.1051/lhb/2016055>
- Oller, P., Martí, G. y Marturià, J. (1998). New methods applied to avalanche mapping. En: *Proceedings Second Congress on Regional Geological Cartography and Information Systems*, Barcelona, 211-215.
- Oller, P., Janeras, M., Costa, O., García-Sellés, C., Muntán, E., Martí, G. y Martínez, P. (2013). Plan de zonificación del terreno según la peligrosidad por aludes para el Pirineo de Catalunya. En: *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*.
- Palomo Segovia, M. (2008). Análisis espacial de las áreas favorables al desencadenamiento de aludes en el Circo de Piedrafita (Huesca). *Lucas Mallada*, 13. 215-235.
- Palomo, M., Julián, A. y Chueca, J. (2008). Aplicación de un análisis multicriterio a la delimitación de zonas probables de aludes (valle del Aguas Limpias, Pirineo Central Español). En: *X Reunión Nacional de Geomorfología, Cádiz*.
- Ramón Fuertes, J. (2018). 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. Universidad de Zaragoza.
- Rixen, C., Haag, S., Kulakowski, D. y Bebi, P. (2007). Natural avalanche disturbance shapes plant diversity and species composition in subalpine forest belt. *Journal of Vegetation Science*, 18, 735-742. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2007.tb02588.x>
- Rodríguez Fernández, L. R. (2017). *Guía geológica del Parque Nacional de Sierra Nevada*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España y Organismo Autónomo Parques Nacionales.
- Santos, J., Redondo, J. M., Gómez, A., González, R. B. (2010). Los aludes de nieve en el Alto Sil (oeste de la Cordillera Cantábrica, España). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 36 (1). 7-26.
- Schläppy, R., Jomelli, V., Eckert, N., Stoffel, M., Grancher, D., Brunstein, C. H., Corona, D. y Deschatres, M. (2016). Can we infer avalanche-climate regions using tree-ring data? Case studies in the French Alps. *Regional Environmental Change*, 16, 629-642. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0823-0>
- Schweizer, J., Jamieson, J. B. y Schneebeli, M. (2003). Snow avalanche formation. *Reviews of Geophysics*, 41(4), 2-25. DOI: <https://doi.org/10.1029/2002RG000123>
- Vada, J. A., Frochoso, M. y Vilaplana, J. M. (2012). Evaluación y cartografía del riesgo de aludes en el camino PR-PNPE 21 de acceso a la Vega de Urriellu, Picus de Europa (Noroeste de España). *Cuaternario y Geomorfología* 26(1-2), 29-47.
- Vera-Rebolllo, J. F. (2001). *Planificación y gestión del desarrollo turístico sostenible: propuestas para la creación de un sistema de indicadores*. Universidad de Alicante.

