



Evaluación y cartografía de la peligrosidad de aludes en Sierra Nevada.

Evaluation and cartography of the danger of avalanches in Sierra Nevada

Tema: Evaluación y cartografía del riesgo de aludes en zonas de alta montaña.

Trabajo Fin de Grado en Ciencias Ambientales

Autora:

Clara Campos Castelló

Tutor:

Jesús Vías Martínez

Área de conocimiento y/o departamento: Departamento de Geografía.

Fecha de presentación: Junio, 2019

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD DEL TFG

Dña. Clara Campos Castelló, estudiante del Grado en Ciencias Ambientales de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Málaga,

DECLARO:

Que he realizado el Trabajo Fin de Grado titulado “Evaluación y cartografía de la peligrosidad de aludes en Sierra Nevada” y que lo presento para su evaluación. Dicho trabajo es original y todas las fuentes bibliográficas utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo.

Para que así conste, firmo la presente en Málaga, el 22/06/2019.

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke extending to the right.

ÍNDICE

RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	4
1. Introducción.....	5
2. Objetivo.....	9
3. Zona de Estudio.....	9
4. Metodología.....	13
4.1. Antecedentes.....	13
4.2. Factores.....	16
a) Factor Pendiente.....	16
b) Factor Vegetación.....	17
c) Factor Nieve.....	19
d) Factor Rugosidad.....	20
4.3. Índice de Peligrosidad.....	20
5. Resultados.....	21
5.1. Factores.....	21
a) Factor Pendiente.....	21
b) Factor Vegetación.....	21
c) Factor Nieve.....	22
d) Factor Rugosidad.....	22
5.2. Índice y mapa final.....	24
6. Discusión.....	27
7. Conclusión.....	29
Bibliografía.....	30

Evaluación y Cartografía de la peligrosidad de aludes en Sierra Nevada

RESUMEN

El desencadenamiento de aludes en zonas de montaña supone un importante peligro, sobre todo cuando se trata de áreas en las que tienen lugar actividades antrópicas como alpinismo, esquí de travesía o cualquier otro deporte de montaña invernal. Conocer los factores que intervienen en su formación es esencial para poder efectuar una buena planificación y gestión del territorio.

En este trabajo se presenta un mapa de peligrosidad de aludes en el macizo de Sierra Nevada (Granada, Andalucía). Para elaborarlo se realizó un análisis de una serie de factores mediante la utilización del programa ArcGIS y el desarrollo de una nueva metodología, de tal modo que se ha obtenido una delimitación de zonas en función de su nivel de peligrosidad frente a aludes.

Palabras claves:

Sierra Nevada, aludes de nieve, cartografía, peligrosidad, riesgo, ArcGIS.

Evaluation and cartography of the danger of avalanches in Sierra Nevada

ABSTRACT

The triggering of avalanches in mountain areas is a major danger, especially in areas where anthropogenic activities such as mountaineering, cross-country skiing or any other winter mountain sport take place. Knowing the factors involved in their training is essential for good spatial planning and management.

This paper presents a map of the danger of avalanches in the Sierra Nevada massif (Granada, Andalusia). An analysis of a series of factors was carried out using the ArcGIS programme and the development of a new methodology, in such a way that a delimitation of zones according to their level of danger against avalanches was obtained.

Key Words:

Sierra Nevada, snow avalanches, cartography, danger, risk, ArcGIS.

1. Introducción.

Un riesgo natural es la posibilidad de que un territorio y la sociedad que lo habita se vea afectado por un fenómeno natural de rango extraordinario (Ayala y Olcina, 2002). A partir de esta definición se entiende que se trata de un proceso natural que representa una amenaza para la vida humana o la propiedad.

Hay que diferenciar entre peligro y riesgo, de tal manera que el peligro se define como un fenómeno de carácter natural o tecnológico que puede originar daños a una población, bienes o al medio natural (Ayala y Olcina, 2002). Por otro lado, el riesgo es el daño esperable debido a la acción de un peligro sobre un bien a preservar, ya sea la vida humana, bienes económicos o el entorno natural (Ayala y Olcina, 2002). El riesgo está compuesto por tres factores: peligrosidad, exposición y vulnerabilidad.

Según Ayala y Olcina (2002) la peligrosidad es el conjunto de aspectos naturales de un fenómeno que tiene incidencia en el riesgo. Tiene dos componentes que están muy relacionados entre sí, la severidad, conjunto de características físicas de un peligro con incidencia en su capacidad de producir daño, y la probabilidad anual de excedencia, que es inversamente proporcional al periodo de retorno (número de años que han de pasar en promedio para que una determinada severidad se iguale o se supere) (Ayala y Olcina, 2002). Por otro lado, la exposición es el conjunto de bienes, también llamados elementos de riesgo, a preservar que pueden ser dañados por la acción de un peligro, pudiendo ser humana, económica o ecológica (Del Moral y Pita, 2002). Finalmente, la vulnerabilidad es el tanto por uno de pérdida esperable de un determinado bien expuesto por la acción de un peligro de una determinada intensidad. Depende tanto de la severidad, a más severidad más vulnerabilidad, como también de las medidas de protección que se hayan tomado (Ayala y Olcina, 2002).

El riesgo se puede evaluar, de forma cuantitativa o caracterizarse en términos cualitativos, a partir de la valoración de sus componentes. La evaluación cuantitativa parte de la fórmula general del riesgo (Varnes, 1948):

$$R = \Sigma P \times E \times V$$

Fórmula 1: *Fórmula general del riesgo.*

En esta fórmula R es el riesgo (víctimas/año esperables o euros/años esperables), P es la peligrosidad (probabilidad anual de excedencia), E la exposición

(personas: riesgo humano; valor: riesgo económico) y V es la vulnerabilidad (tanto por uno de pérdida, varía entre 0 y 1).

Para estimar el riesgo, Ayala y Olcina en su libro *Riesgos Naturales* del 2002 hablan del análisis de riesgos, una disciplina científico-técnica cuyo objeto es la identificación y estudio de los factores de riesgo con vistas a su evaluación y al diseño racional de medidas de mitigación de este. La fase inicial de este análisis es el inventario de peligros, es decir, identificar aquellos fenómenos que puedan producir daños, y consta de un análisis de los tres factores de riesgo (Ayala y Olcina, 2002). En esta fase es donde se hacen los mapas de peligrosidad a partir de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), y es en esta fase donde se centra el presente trabajo. La fase posterior a esta es la evaluación del riesgo, que consiste en el cálculo de las pérdidas esperables y la comparación con los criterios de admisibilidad, donde se evalúa si el riesgo es aceptable o no (Ayala y Olcina, 2002). Si el riesgo es aceptable hay que proceder a su reducción y se entraría en la tercera y última fase del análisis de riesgos, llamado análisis y diseño de las medidas de mitigación del riesgo. Estas medidas pueden ser estructurales (ej. sistemas estructurales de alerta) o no estructurales (ej. ordenación del territorio, seguros y educación para el riesgo) y están basadas en la predicción y la prevención del riesgo (Ayala y Olcina, 2002).

El riesgo de aludes es uno de los principales problemas en las zonas de montaña que, debido a sus características de relieve, tienen una predisposición especial a que se produzca este peligro natural (Segovia, 2011). La ordenación y gestión del territorio, la construcción de nuevas infraestructuras y la planificación de actividades en áreas de montaña exigen del conocimiento de los factores que generan este riesgo, así como de la utilización de una cartografía en la que aparezcan las zonas expuestas a ellos (Del Moral y Pita, 2002).

Un alud es una masa de nieve que se desprende y se precipita ladera abajo a una velocidad superior a 1 m/s. Para que se considere un alud debe movilizar al menos 100 m³ de nieve y recorrer al menos 50 metros (Furdada, 2006). Si sus dimensiones son menores recibe el nombre de purga o colada (AEMET, 2015). Los aludes se generan debido a la inestabilidad del manto nivoso, la cual es el resultado del balance de las fuerzas internas a la que está sometido el manto nivoso y por tanto depende de sus condiciones físicas y mecánicas (Ayala y Olcina, 2002). Pueden ser naturales o

inducidos por la actividad humana de manera indirecta durante la práctica de actividades de montaña.

Existen tres tipos de aludes; por un lado, están los de nieve reciente, que puede ser seca o húmeda según el contenido de agua líquida que contenga la masa de nieve. Se originan durante una fuerte nevada o poco después de esta, aunque si las temperaturas son bajas el peligro puede permanecer durante varios días (Calvo, 1984). La nieve que los forma tiene una densidad inferior a 200 kg/m^3 , suelen iniciarse en un único punto y son habituales en invierno, aunque en primavera también puede producirse algún episodio (AEMET, 2015). Existe un caso particular de estos aludes llamados aludes de nieve en polvo, donde la nieve cuando está en movimiento se mezcla con el aire y se origina un aerosol que llega a alcanzar hasta los 300 km/h de velocidad. Por otro lado, se encuentran los aludes de placa que se producen en mantos nivosos con una estructura de placa compuesta de una placa dura, formada por la acción del viento, y una capa subyacente de débil cohesión (AEMET, 2015). Las placas se rompen siempre de forma lineal, y se propaga rápidamente por la elevada cohesión de la nieve en las placas, típicamente formada por granos finos con una densidad entre 200 y 400 kg/m^3 (AEMET, 2015). Finalmente, los aludes de fusión son otro tipo de aludes ligados directamente a la presencia de agua líquida dentro del manto nivoso y a la pérdida de cohesión que supone (AEMET, 2015). Estas masas de nieve se movilizan en pendientes apenas superiores a los 25° , desplazándose a velocidades más bajas, entre $20\text{-}70 \text{ km/h}$, y con densidades de nieve comprendidas entre los 350 kg/m^3 y los 500 kg/m^3 . Son aludes típicos de la primavera y de periodos anormalmente cálidos en el invierno, así como de episodios lluviosos en cotas medias y altas (AEMET, 2015).

En Sierra Nevada, según el IGN (Instituto Geológico Nacional), los aludes más frecuentes son los de placa y los aludes de fusión, y son relativamente frecuentes en las zonas de altas cumbres occidentales de la cordillera, donde la nieve perdura durante más tiempo y el relieve es más abrupto (Rodríguez, 2017). Por suerte, el riesgo de aludes de Sierra Nevada causa una reducida siniestralidad, debido a la ausencia de población en alta montaña y suelen afectar únicamente a esquiadores de travesía y montañeros (Rodríguez, 2017).

Una de las mayores tragedias ocurridas en Sierra Nevada ocurrió en la primavera de 1989, cuando seis montañeros franceses perdieron la vida por un alud de nieve en la vertiente oeste del Mulhacén (García, 1989). En 2011, tres montañeros británicos fueron sorprendidos por un alud en el barranco de San Juan cuando volvían de una zona conocida como Posiciones del Veleta, dos de ellos salieron prácticamente ilesos pero el tercero quedó sepultado bajo la nieve perdiendo la vida (Cortés, 2011). Todos los años el SEREIM (Servicio de Rescate e Intervención en Montaña) recibe cientos de llamadas por la formación de aludes que pillan sorprendidos a esquiadores y montañeros, por lo que es necesario elaborar una cartografía que prevenga a los montañeros de las zonas donde se puede dar un alud.

En los análisis de riesgos la mayor parte de la investigación se centra en el factor peligrosidad en relación con los distintos tipos de riesgos (Ayala y Olcina, 2002). En el caso de los aludes ocurre lo mismo, se lleva sobre todo a cabo el análisis de la peligrosidad mediante la cartografía de los factores relativos al terreno (Andrés *et al.*, 2000). Esto se debe a que este tipo de riesgo se suele dar en zonas donde la vulnerabilidad y exposición es más baja, como es el caso de Sierra Nevada. Para poder elaborar un mapa de peligrosidad de aludes hay que conocer los factores que intervienen en su desencadenamiento. Por un lado están los factores meteorológicos y nivológicos como la precipitación, la temperatura, el viento y el estado del manto nivoso, que son independientes del terreno y sufren importantes variaciones temporales (Calvo, 1984); y por otro lado se encuentran los factores relacionados con el terreno, que son permanentes y susceptibles de ser cartografiados, como son la altitud, la pendiente, la vegetación existente, la orientación, la morfología y la rugosidad del terreno (Furdada, 2006). Este trabajo se centrará solo en la peligrosidad a partir de estos factores debido a la escasez de información sobre la vulnerabilidad y exposición de las zonas más elevadas del macizo de Sierra Nevada.

2. Objetivo.

El presente trabajo tiene como objetivos diseñar una nueva metodología de análisis de la peligrosidad y obtener un mapa de peligrosidad de aludes de Sierra Nevada con las características intrínsecas del terreno. El método diseñado tiene en cuenta cuatro factores condicionantes para la formación de aludes (vegetación, pendiente, acumulación de nieve y rugosidad del terreno) que permiten, mediante la utilización de SIG (Sistemas de Información Geografía), elaborar un índice de peligrosidad que se clasifica en tres clases.

3. Zona de Estudio.

El área estudiada en este proyecto es el macizo montañoso de Sierra Nevada, situado al sur de la Península Ibérica entre la provincia de Granada y Almería.

Aunque a simple vista parece estar claro qué es Sierra Nevada, no es tan fácil detallar sus límites por lo que para llevar a cabo este proyecto se ha considerado el área del conjunto formado por el Parque Natural y el Parque Nacional de Sierra Nevada. Se obtiene así una superficie total de 1722,38 km² que se extiende de Oeste a Este a lo largo de unos 90km y variando su anchura Norte-Sur desde los 37 km máximo en la parte central a los 20 km en la parte occidental.

Sierra Nevada pertenece al Sistema Penibético, siendo la principal elevación montañosa de las Cordilleras Béticas a 37º de latitud norte y con altitudes próximas a los 3.500 metros. Su origen es consecuencia de la orogénesis alpina que ocurrió en el periodo Terciario, la cual modeló inicialmente el terreno dando lugar a la morfología actual (Rodríguez, 2017). Esta morfología también es fruto de los grandes episodios glaciares del Cuaternario que tuvieron lugar durante la Pequeña Edad de Hielo, dejando como huella la existencia de medio centenar de lagunas y los valles en forma de "U" (Gómez y Plana, 2004). La dinámica periglacial sigue actuando a partir de los 2.500-2.600 m donde las nieves suelen ser perpetuas a partir de esta altitud, como ocurre en el Corral del Veleta (Estremera *et al.*, 1999).

En Sierra Nevada se localiza el Mulhacén, que con 3.478 metros de altitud es el pico más alto de la península, y el Pico Veleta con 3.398 metros (Gómez y Plana,

2004). La cara norte del macizo es el lugar de nacimiento de varios ríos como el Fardes y el río Genil situados en la cuenca del Guadalquivir, mientras que en las caras oeste y sur nacen ríos de la vertiente mediterránea como el río Dúrcal, el Trevélez, el Poqueira, el Adra y Andarax (Guerrero, 2001).

Geológicamente Sierra Nevada se puede dividir en tres sectores: el primero lo conforma el núcleo central de la Sierra, formado por rocas metamórficas como micaesquistos oscuros y cuarcitas del complejo Nevado-filábride procedentes de antiguos sedimentos arcillosos y arenosos. El segundo sector se superpone tectónicamente al anterior denominándose Complejo Alpujárde. Dispone una franja interna de terrenos triásicos que se desarrolla con más extensión en el cierre occidental del terreno, y presenta dos litológicas predominantes como son filitas grises y azuladas hacia la base de las formaciones, y calizas y dolomías metamorfozadas hacia los tramos altos. El tercer sector, más exterior, está formado por los sedimentos detríticos Neógeno-Cuaternario, que se corresponden esencialmente con limos, arenas, conglomerados, arcillas, margas e incluso en ocasiones calizas arrecifales. Este tercer sector se encuentra rodeando a los dos anteriores y de manera discordante (Rodríguez, 2017).

Sierra Nevada posee un clima mediterráneo continentalizado influenciado por la altitud. Se caracteriza por la relativa aridez, los vientos predominantes del oeste y la fuerte insolación de la zona en que se halla (Carvajal, 2016).

La altitud determina el aumento de la radiación solar conforme se asciende, de manera que por debajo de Trevélez (1.510 m de altitud) la temperatura media anual oscila entre los 16° y 12° C; desde los 1.500 m hasta el puerto de la Ragua (2.000 m), entre 12° y 8 ° C; entre los 2.000 m y el albergue juvenil de Pradollano (2.500 m), entre 8° y 4° C, y a partir de los 3.000 m es de menos de 0° C, llegando a los -4°C. La vertiente norte es más fría que la vertiente sur por su menor insolación y mayor exposición a los vientos del norte (Estremera *et al.*, 1999).

Las precipitaciones son también muy variadas. La zona occidental es más húmeda con más de 1500 mm anuales. Sin embargo la zona oriental, próxima a Almería, recoge escasamente 250 mm anuales (Gómez y Plana, 2004). A partir de los 1.500 m de altura las precipitaciones suelen ser en forma de nieve, llegando a alcanzarse en las cumbres 2000 mm anuales. Por encima de los 1.800 m de altitud,

la lluvia precipita en forma de nieve al menos en un 30%, y por encima de los 2.500 m en un 95% (Neumann, 1960).

La localización geográfica, la elevada altitud, la heterogeneidad de los sustratos geológicos y el marcado carácter del bioclima mediterráneo hacen de Sierra Nevada un territorio muy singular rico en especies y comunidades vegetales (Neumann, 1960). Solo en la alta montaña se contabilizan más de 100 especies y unas 40 comunidades endémicas, lo que indica que se trata de un importante centro de biodiversidad vegetal (Blanca *et al.*, 2002).

Sierra Nevada no se caracteriza por la presencia de extensos bosques, sin embargo el bosque de *Quercus pyrenaica* representa la vegetación clímax, donde forma bosques entre los pisos meso superior y supramediterráneo (Castillo y Castillo, 2010). Destacan también especies forestales como la encina carrasca, *Quercus rotundifolia*, que es la más frecuente de encontrar formando bosques muy abiertos, desde la base termomediterránea hasta el piso supramediterráneo, donde llega a alcanzar más de 2.000 m de altitud en exposiciones favorables (Molero y Marfil, 2017).

Los pinares autóctonos sufrieron una intensa deforestación y sus teselas fueron repobladas. El *Pinus sylvestris*, pino silvestre, se extiende ampliamente por el hemisferio norte, de forma secundaria lo acompaña el pino salgareño ibérico, *Pinus nigra subsp. Latisquama* (Castillo, 2016). Otro pino de indudable interés endémico de la provincia Bética es el pino negro, *Pinus pinaster subsp. acutisquama*, característico de las sierras de Alfacar, Almijara y Bermeja, colonizando sustratos de dolomías y peridotitas. El pino carrasco, *Pinus halepensis*, también es natural en las laderas semiáridas termo y mesomediterráneas, y es el pino que más se ha usado en repoblación (Molero y Marfil, 2017).

El piso de vegetación supraforestal se sitúa por encima de los 2.450 m y representa el límite natural del bosque, parcialmente reconstruido con repoblaciones de *Pinus sylvestris nevadensis* (Molero y Marfil, 2017). Desde el punto de vista bioclimático, este piso de vegetación corresponde al horizonte superior del piso oromediterráneo, con vegetación potencial de enebros con sabinas y piornos, y al piso crioromediterráneo, con un pastizal seco, poco denso, de plantas perennes, enanas, que se inicia hacia los 2.800 m en la vertiente septentrional alcanzando las cumbres más elevadas de la Sierra (Castillo y Castillo, 2010). El ombroclima, en general

húmedo-subhúmedo, se convierte en altura en seco e incluso en semiárido, al aumentar los meses de temperaturas bajo cero. La acusada aridez estival y el aspecto pedregoso y seco de las cumbres de Sierra Nevada contrastan con el de las comunidades vegetales herbáceas siempre verdes de las depresiones y vaguadas adyacentes (borreguiles) (Maurel, 1957).

Antiguamente el uso humano de Sierra Nevada ha estado representado principalmente por el uso agroforestal y la actividad ganadera asociado a este, pero con el paso de los años estos han ido quedándose en un segundo plano y se están transformado hacia un uso turístico de ocio, de recreo y deportivo que hace que cada año miles de personas disfruten de este entorno natural (Vera-Rebollo, 2001).

De este modo encontramos la Estación de Esquí y Montaña de Sierra Nevada, que se eleva a partir de los 2.100 metros de altura, perteneciente a los términos municipales de Monachil y de Dílar, y junto a ella se sitúa el núcleo urbano de Pradollano (Castillo y Castillo, 2003).

El montañismo, escalada y el alpinismo son otras de las actividades más destacadas que se realizan en Sierra Nevada debido su formación rocosa, latitud y altitud, que le confieren unas condiciones favorables (Castillo y Castillo, 2003). Se llegan a encontrar vías de escalada por encima de los 3.000 metros de altitud, lo que hace que exalta aún más a esta cordillera. Algunas de las zonas donde se practica la escalada son en Cahorros (Nigüelas), en Rambla Seca (Dílar), en Riscos de Aldeire y Tajos del Ángel por ejemplo (Muñoz y Cuartero, 2015).

En relación con el alpinismo, Sierra Nevada cuenta con un gran número de travesías, algunas de ellas no excesivamente técnicas aptas para principiantes, razón por la cual está aumentando la exposición como factor de riesgo. A pesar de ello, hay vías donde escasean las fisuras y abunda a menudo el verglás, lo que dificulta el ascenso al no poder fijarse bien los tornillos de seguridad durante la ascensión. Hay rutas de predominio alpino, que en general suelen estar en buenas condiciones como sería el Corredor del Alhorí, pero que dependerá sobre todo de la época del año (Muñoz y Cuartero, 2015).

4. Metodología.

La metodología aquí presentada radica en la superposición de cuatro factores, con el fin de crear una cartografía que delimite las zonas favorables al desencadenamiento de aludes mediante el programa ArcGIS. Para ello se ha establecido un índice que diferencia la zona de estudio en una escala de 0 a 3 según la peligrosidad para originarse un alud. En este apartado se especifican los procesos que se han seguido para evaluar cada uno de los factores y la creación del índice que ha originado el mapa cartográfico de peligrosidad de aludes en Sierra Nevada. Esta nueva metodología está inspirada en los trabajos que se presentan a continuación, pero que han sido modificados para poder ser aplicados a este.

4.1. Antecedentes.

a) **Avalanche Terrain Exposure Scale (ATES) (Campbell y Gould, 2013)**

Desarrollado por los técnicos de “Parques de Canadá” en el 2004, este método proporciona un marco para evaluar de manera exhaustiva las complejidades de la exposición del terreno a avalanchas. Permite evaluar la exposición a las avalanchas de un itinerario o de una zona con tres clases de terreno que describen la exposición a los posibles peligros de aludes (Campbell y Gould, 2013).

Este sistema tiene dos modelos: el modelo técnico, diseñado para usuarios expertos en la interpretación del terreno de avalanchas, y el público que está orientado a comunicar fácilmente los mismos conceptos a un público menos capacitado. En el modelo técnico se encuentran las variables desglosadas que se estudiaron para determinar la exposición a aludes como muestra la Figura 1. Mientras que en el modelo de comunicación pública se resumen las mismas variables de tal manera que aquellas personas que quieran adentrarse en la montaña puedan comprender fácilmente cuales son las zonas que presentan mayor peligrosidad de exposición a aludes (Campbell y Gould, 2013):

Clase 1- Simple: exposición a laderas con poca pendiente y terreno forestal. Existen muchas opciones para reducir o eliminar la exposición (Campbell y Gould, 2013).

Clase 2- Exigente: exposición a zonas de trayecto de aludes bien definidas, a zonas de llegada o a trampas del terreno. Hay opciones para reducir o eliminar la exposición encontrando rutas con cuidado (Campbell y Gould, 2013).

Clase 3- Complejo: exposición a zonas de llegada de aludes múltiples y grandes extensiones de terreno abierto e inclinado. Las zonas de inicio de avalanchas múltiples están formadas por trampas del terreno debajo. Las opciones de reducir la exposición son mínimas (Campbell y Gould, 2013).

	1 – Simple	2 - Challenging	3 - Complex
Slope angle	Angles generally < 30°	<i>Mostly low angle, isolated slopes >35°</i>	<i>Variable with large % >35°</i>
Slope shape	Uniform	Some convexities	Convoluted
Forest density	Primarily treed with some forest openings	Mixed trees and open terrain	Large expanses of open terrain. Isolated tree bands
Terrain traps	Minimal, some creek slopes or cutbanks	Some depressions, gullies and/or overhead avalanche terrain	<i>Many depressions, gullies, cliffs, hidden slopes above gullies, cornices</i>
Avalanche frequency (events:years)	1:30 ≥ size 2	1:1 for < size 2 1:3 for ≥ size 2	1:1 < size 3 1:1 ≥ size 3
Start zone density	Limited open terrain	Some open terrain. Isolated avalanche paths leading to valley bottom	Large expanses of open terrain. Multiple avalanche paths leading to valley bottom
Runout zone characteristics	Solitary, well defined areas, smooth transitions, spread deposits	Abrupt transitions or depressions with deep deposits	Multiple converging runout zones, confined deposition area, steep tracks overhead
Interaction with avalanche paths	Runout zones only	Single path or paths with separation	<i>Numerous and overlapping paths</i>
Route options	Numerous, terrain allows multiple choices	A selection of choices of varying exposure, options to avoid avalanche paths	<i>Limited chances to reduce exposure, avoidance not possible</i>
Exposure time	None, or limited exposure crossing runouts only	<i>Isolated exposure to start zones and tracks</i>	<i>Frequent exposure to start zones and tracks</i>
Glaciation	None	<i>Generally smooth with isolated bands of crevasses</i>	<i>Broken or steep sections of crevasses, icefalls or serac exposure</i>

Figura 1: Modelo Técnico ATES. Fuente: Campbell y Gould, 2013.

ATES establece una metodología que da como resultado un mapa, en distintos colores, de clasificación del terreno de aludes, y ha sido la base para la realización de la nueva metodología creada. Es un método que requiere un amplio plazo de tiempo para su ejecución, que necesita del estudio en campo y estudio de gabinete mediante sistemas de información geográfica.

b) Análisis de aludes en el circo de piedrafita en Huesca (Segovia, 2011)

En este trabajo, María Segovia presenta una cartografía de áreas susceptibles al desencadenamiento de aludes de la cabecera del río Aguas Limpias en Huesca, usando una metodología similar a la que se va a aplicar en este proyecto. Se combinan cinco factores (altitud, pendiente, vegetación, morfología y rugosidad del terreno), que

han sido cartografiados mediante datos geográficos y fotointerpretación, de tal manera que no todas las variables tienen el mismo comportamiento al contribuir al desencadenamiento de aludes. La altitud, las pendientes y las cubiertas vegetales se han considerado como factores necesarios para que se produzca un alud., mientras que la presencia de sobreacumulación o la existencia de morfologías favorables no son suficientes por sí mismas para que se produzca un desprendimiento de nieve, por lo que se han usado solo factores de intensificación. De este modo obtiene seis mapas, uno para cada uno de los meses estudiados, de probabilidad de desencadenamiento de aludes con una escala que va de 0 a 3 (Segovia, 2011).

Este método no se ha usado debido a que el criterio utilizado para la superposición de capas (**Fig. 2**), no se ajusta a lo que se ha querido reflejar con este proyecto. Si en una zona nunca se acumula nieve no puede producirse un alud, y con la fórmula que se plantea en este trabajo de Huesca, cuando no hay nieve va a puntuarse con un mínimo de 1 y no con 0 al ser usado como elemento intensificador.

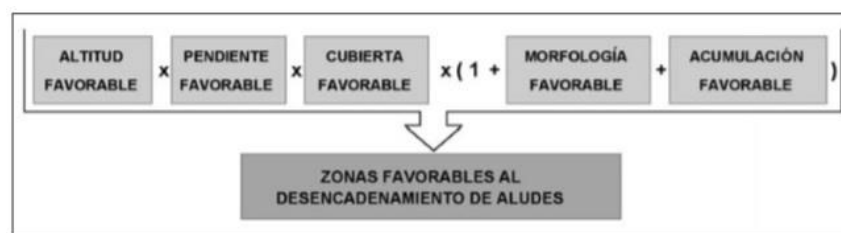


Figura 2: Criterio utilizado para la superposición de capas. Fuente: Segovia, 2011.

c) Evaluador del Riesgo de Aludes en Sierra Nevada. (Morales, 2019)

Daniel Morales publica un evaluador de aludes, un índice al que aportándole dos datos (pendiente y nivel de riesgo del BPA), indica el peligro de aludes correspondiente para cada tipo de pendiente en Sierra Nevada (Morales, 2019). A través del mapa topográfico se conoce la pendiente en grados de la zona a la que se quiere ir y con el nivel del riesgo de aludes que nos proporciona el boletín de peligro de aludes (BPA), de este modo se obtiene los datos que se usaran en el evaluador de aludes (Morales, 2019).

El principal problema de este evaluador es que solo contempla el factor pendiente como desencadenante de aludes, por lo que está bastante incompleto y va a variar en función de la información climática que el BPA proporcione cada día.

4.2. Factores.

Se ha generado una escala numérica para determinar la peligrosidad de aludes asociada al terreno, para ello se han distinguido cuatro factores que han sido estudiados y cartografiados de manera individual.

a) Factor Pendiente.

Los valores de pendiente más favorables al desencadenamiento de aludes oscilan entre los 25° y los 45° (Ayala y Olcina, 2002). Se necesita una inclinación de al menos 25° para que la componente longitudinal de peso de la nieve supere las fuerzas de resistencia (rozamiento, cohesión etc.). No existe un límite inferior preciso de seguridad por debajo del cual se pueda afirmar que no se va a producir un alud, ya que por debajo de los 28° la nieve por lo general puede permanecer estática pero va a estar condicionada por las situaciones atmosféricas que se puedan producir (Chueca y Andrés, 2010); de este modo, para tener un margen más amplio, se va a considerar la mínima pendiente que puede generar un alud con 25°. En el otro extremo, en las vertientes con ángulos superiores a los 45°, la nieve caída no se ancla al suelo por lo que se no acumula y no es suficiente para que se generen aludes significativos (Julián y Chueca, 2008). Al límite superior se le ha dado también un margen mayor, por lo que el rango a considerar para el factor pendiente está entre 25° a los 50°.

Para obtener la información relativa a este factor se ha descargado desde el Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (DERA) la capa referente a la cuadrícula 50.000 que forma parte del Equipamiento Geográfico de Referencia Nacional, con la cual se ha podido consultar cuáles son las cuadrículas que forman parte de la zona de estudio. De esta manera, se conocen cuáles son las cuadrículas del MDE nacional y se pueden descargar los correspondientes a la zona de estudio (11 en total) desde el Centro Nacional de Información Geográfica.

Los ráster descargados tiene una resolución de 5 metros de lado del píxel. El procedimiento que se ha seguido comienza por unir todos los rásters descargados mediante el comando "Mosaic to new ráster" y después mediante "Extract by mask" se recorta según la capa que se había creado anteriormente y que delimita la zona de estudio. Una vez obtenido un único ráster de Sierra Nevada se ha calculado el valor de la pendiente en grados a través del comando "Slope". Obtenida esta nueva capa,

con el comando “Reclassify” se clasificaron los valores de las tablas de atributos en 4 clases obteniendo así una clasificación de pendiente (**Tabla 1**). Esta clasificación va desde 0, que es el mínimo de peligrosidad, al valor 3 que es el considerado como alta peligrosidad.

Tabla 1: Clasificación del factor Pendiente.

Valor de la pendiente en grados	Valor del factor P
0-25; > 51°	0
26° - 30°	1
31° - 40°	2
41° - 50	3

b) Factor Vegetación.

Este es uno de los factores más fiables para la delimitación de zonas probables de aludes (Andrés y Chueca, 1999). Por un lado, porque las huellas del paso de estos permanecen en la vegetación dando lugar a zonas de ausencia total de esta cuando el fenómeno es importante. Por otro, porque el porte y la densidad de la vegetación son factores determinantes en relación con el desencadenamiento de aludes (Andrés y Chueca, 1999). Las zonas desnudas o cubiertas de pasto serán las más favorables para originar un alud, seguidas de las tapizadas por una masa relativamente densa de arbustos. Los sectores de bosque cerrado serán los menos proclives a registrar aludes, aunque pueden verse afectados en mayor o menor medida por aludes originados a cotas superiores en otras áreas fuera del bosque (Andrés *et al.*, 2000). De modo que este factor va a ser clave para saber en qué zonas se frenaría el alud originado a través de la vegetación que proporciona estabilidad al terreno.

Para cartografiar este factor ha sido necesario descargar las capas de formación arbórea y arbustiva a través de la página de la Red De Información Ambiental De Andalucía (REDIAM), que ofrece información cartografiada de la cobertura arbórea y arbustiva de Andalucía en el año 2009. Se cartografiaron primero las dos capas por separado para después crear un único mapa de cobertura vegetal que incluye árboles y arbustos de Sierra Nevada.

Ambas capas han sido recortadas según la plantilla inicial de la zona de estudio y a continuación se ha creado un nuevo atributo llamado factor arbóreo o arbustivo,

según el caso, en el que se le han dado valores de 0 a 3 según la densidad, en porcentaje, de árboles u arbustos presentes en cada cuadrícula. Una vez que se ha dado estos valores, ambas capas han sido disueltas de manera individual para simplificar los elementos de la capa, así como los registros de su tabla de atributos y unificar los elementos que presentan la misma propiedad.

A medida que aumenta el porcentaje de cobertura vegetal la peligrosidad de aludes disminuye, siendo las zonas más peligrosas aquellas en las que no hay vegetación (Maurel, 1957).

En la capa de vegetación arbórea aparecen clasificados los atributos de la siguiente manera (**Tabla 2**):

Tabla 2: Clasificación Cobertura Arbórea

%Cobertura arbórea	Valor del factor Veg. arbórea
> 76%	0
51% - 75%	1
26% - 50%	2
Ausente o < 25%	3

Respecto a la capa arbustiva los porcentajes clasificados con este método han resultado distintos ya que solo se han clasificado en tres clases como se muestra en la **Tabla 3**.

Tabla 3: Clasificación Cobertura Arbustiva.

% Cobertura arbustiva	Valor del factor V. Arbustiva
> 76%	1
26% - 75%	2
Ausentes o < 25%	3

Al tratar con los arbustos se han aumentado las zonas con mayor riesgo ya que estos no tienen la misma eficacia que tienen los árboles para mantener la estabilidad del manto nivoso, por lo que van a tener una ponderación inferior a la hora de asignar una puntuación de peligrosidad.

Finalmente se han unido estas dos capas con el comando “Union”, resultando un valor para el factor vegetación que va a ser dado por el valor de la cobertura arbórea anterior, al tener los árboles más eficacia para frenar aludes. Solo en aquellas zonas donde el valor dado a los árboles es 3, ha influido la cobertura arbustiva clasificándose así estas zonas con el valor que presenta la cobertura de arbustos como muestra la **Tabla 4**.

Tabla 4: Criterio usado para la clasificación del factor Vegetación.

		Arbustos		
		1	2	3
Árboles	0	0	0	0
	1	1	1	1
	2	2	2	2
	3	1	2	3

c) Factor Nieve.

Se han cartografiado las áreas existentes en la zona de estudio en las que se producen acumulaciones de nieve favorables al desencadenamiento de aludes y no favorables, aquellas en las que la nieve no queda acumulada.

La información usada para elaborar este factor se ha obtenido de la REDIAM, concretamente de la parte de caracterización climática, donde existen una serie de geodatos que contienen la información referente a la cobertura máxima de nieve mensual desde el año 2002 hasta el 2012. Esta información es adquirida del sensor MODIS del satélite Terra denominado MOD10_L2.

El procedimiento ha sido conocer el número de meses, de la serie historia de la que se disponía, de cada zona de Sierra Nevada que tenía nieve. Se ha realizado una serie de combinaciones, para finalmente obtener un mapa en el que se muestra, en porcentajes, la cobertura máxima de nieve que se ha registrado en las zonas del macizo durante los últimos 11 años.

El mapa se reclasificó en 3 clases (**Tabla 5**), dándoles valores de 1 a 3 según el porcentaje de tiempo en el que haya nieve, donde 1 se corresponde con una peligrosidad baja y el 3 con peligrosidad alta.

Tabla 5: Clasificación del factor Nieve.

N.º de meses con nieve (%)	Valor factor Nieve
0%	0
1% - 25%	1
26% -50%	2
> 51%	3

d) Factor Rugosidad

Si el terreno sobre el que está asentada la nieve es rugoso se va a favorecer el anclaje de esta y se reducirá la probabilidad de desencadenamiento de aludes, ya que a la capa de nieve le será más difícil deslizarse (Segovia, 2011).

Para cartografiar este factor se ha elaborado un mapa de rugosidad a partir del MDE (Modelo Digital de Elevaciones) usando el comando “Focal statistics” a través de la desviación típica de la pendiente del terreno. Como resultado se ha originado un mapa con 3 intervalos. Aquellas zonas donde el valor de rugosidad sea menor serán las que tengan mayor peligrosidad al poder deslizarse la nieve más fácilmente. Con el comando “Reclasificar” este factor queda clasificado como indica la **Tabla 6**. Los límites de cada intervalo se han elegido mediante el método cuantiles del programa ArcMap.

Tabla 6: Clasificación de la Rugosidad.

Rugosidad	Valor factor R
3-32	1
1,6-3	2
0-1,5	3

4.3. Índice de Peligrosidad.

Una vez cartografiados todos los factores se procedió a la creación del índice final en que se encuentran combinados. Para ello se transformaron todos los factores en formato ráster, y mediante el comando “Raster calculator” se superpusieron de manera que los cuatro factores se encuentran multiplicados entre ellos. De este modo, cuando el valor de los factores nieve o pendiente es 0 el peligro de aludes es bajo, ya que estos dos factores son los más condicionantes. La clasificación esta representada en la **Tabla 7** a continuación.

Tabla 7: Clasificación de valores del Índice de Peligrosidad de Aludes.

Resultado superposición	Valor del índice	Índice de peligrosidad
0	0	Sin peligro
1-25	1	Bajo
25-50	2	Medio
>50	3	Alto

5. Resultados

5.1. Factores

En la **Figura 3** se presentan cuatro mapas, cada uno correspondiente a uno de los factores ya descritos anteriormente, con una escala de valores de 0 (peligrosidad nula) a 3 (alta peligrosidad) diferenciada por colores.

a) Factor Pendiente.

Como se puede observar en la **Figura. 3**, este factor no sigue un patrón determinado, simplemente diferencia aquellas zonas donde la pendiente es más condicionante para que se produzca un alud de aquellas donde lo es en menor grado. Algunas zonas con altos valores de este factor se observan sobre todo en la parte Oeste de la Sierra, mientras que las zonas donde la pendiente no es apta (valores bajos o nulo) para originarlos están asociadas a zonas llanas y a las cimas más elevadas.

b) Factor Vegetación.

A diferencia del factor anterior, la vegetación sigue un claro patrón como se muestra en el mapa de la **Figura 3**. La distribución está afectada por la altitud de la zona y se observa como a medida que la altitud aumenta el valor del factor también lo hace, lo que significa que esas zonas son peligrosas por la escasez de vegetación. En las laderas externas que rodean la Sierra se puede ver como la vegetación es más abundante, con valores bajos e incluso nulos, hasta alcanzar los 1.300 metros de altitud. A partir de esta altura y hasta los 2.850 metros aproximadamente, empieza aparecer una vegetación de matorral con valores medios. Por encima de los 2.850

metros la vegetación se transforma en pastizal y a medida que aumenta la altura empieza a disminuir tomando valores altos.

c) Factor Nieve.

La nieve también tiene un patrón de distribución dentro de Sierra Nevada. Al igual que la vegetación, la nieve varía en función de la altitud, ya que a medida que aumenta esta la temperatura disminuye. Se ha registrado nieve en toda la zona estudiada durante los 132 meses analizados, en algunas zonas con más frecuencia que otras, salvo en unas pequeñas áreas del sureste más cercanas a Almería. A partir de los 1.700 metros aproximadamente la frecuencia de los meses con nieve empieza a aumentar, registrándose valores medios de peligrosidad. La acumulación de la nieve en el periodo estudiado es mayor desde los 2.800-3.000 metros, presentando las únicas zonas con valores altos.

d) Factor Rugosidad.

Este factor al igual que la pendiente no sigue una clara distribución de los valores. Las zonas más rugosas se corresponden con zonas donde la altitud es más elevada, sobre todo con la cima de las montañas, mientras que donde la rugosidad es menor coinciden con las laderas de estas montañas. De este modo se observa que las laderas de los valles son las principales zonas donde se puede desencadenar un alud, debido a su escasa rugosidad por la cual la nieve se puede deslizar fácilmente. En el extremo sureste hay una amplia zona donde se registran valores altos pero estos se corresponden con zonas llanas que no están rodeadas por elevadas pendientes donde se pueda acumular la nieve.

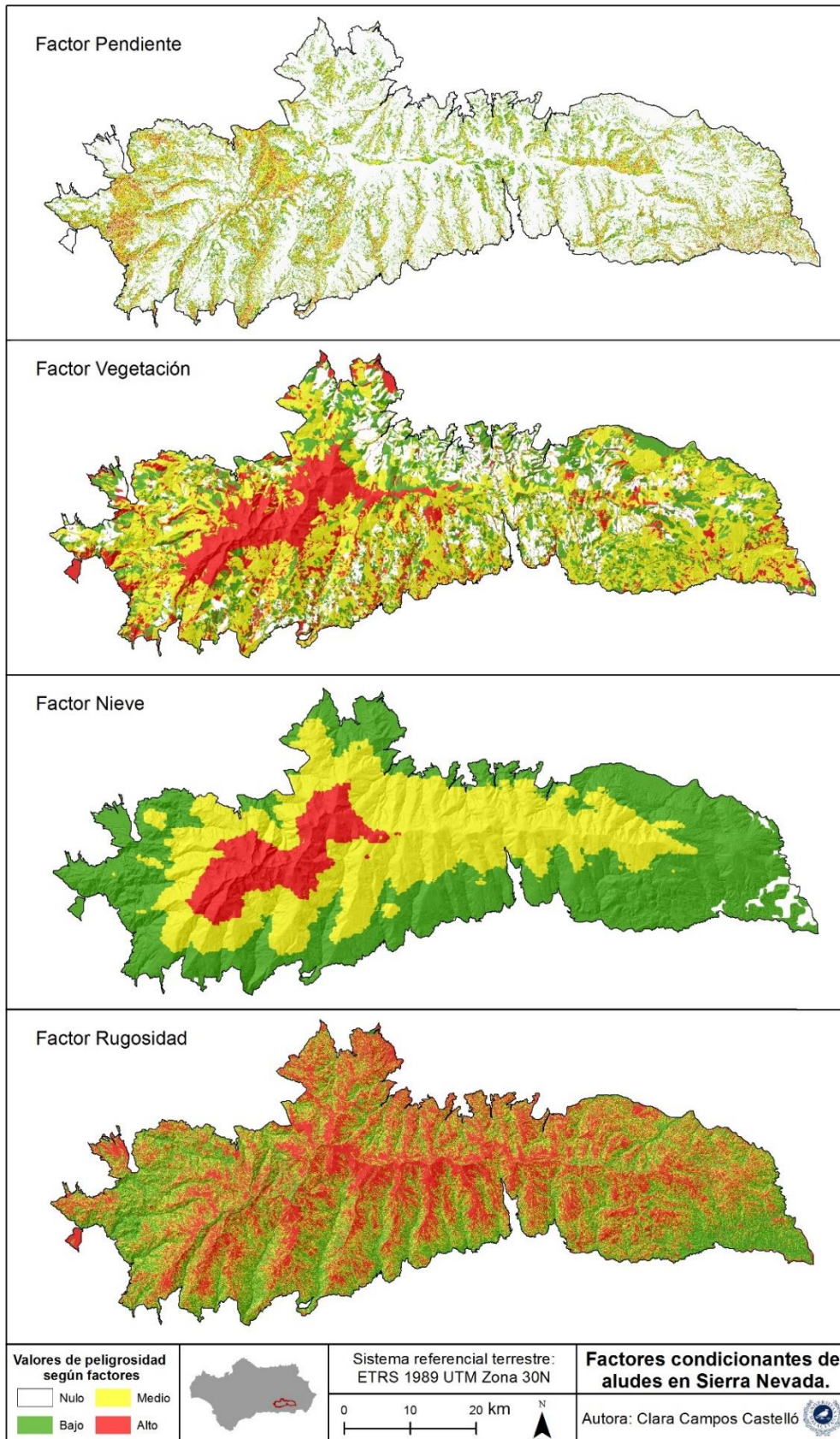


Figura 3: Mapa de los factores condicionantes de aludes en Sierra Nevada.

5.2. Índice y mapa final.

El resultado final de este trabajo ha sido elaborar un mapa de peligrosidad a los aludes en Sierra Nevada. Con el índice calculado según la metodología se ha obtenido un mapa (**Fig. 4**) que diferencia el peligro de aludes en tres colores y, en general, se observa que Sierra Nevada no es una zona donde exista mucho peligro de aludes.

Las zonas con peligrosidad más alta se localizan en las cabeceras de los valles y barrancos, coincidiendo en algunos casos con antiguos circos glaciares. La ladera noreste del Barranco de San Juan, la ladera fuera de pista conocida como el ascensor, el Corral del Veleta, los Tajos de la Virgen, el Paso de los Machos, la ladera este de acceso a la Laguna Caldera y el este del pico Mulhacén son algunos ejemplos de este tipo de zonas.

Los sectores con valores medios de peligrosidad se encuentran por debajo de las zonas de máxima acumulación de nieve, rodeando las zonas de alta peligrosidad, en el Pico del Jerez, Cerro del Trevélez, Cerro del Gallo, en la cara oeste del Mulhacén, Loma del Alcazaba, Prados de Chordi, cerca del telesilla Dílar, la zona más céntrica de Chorreras del Molinillo y zonas más al norte como Ventisqueros del Corazón.

Las zonas con peligrosidad baja tienen una distribución más amplia por todo el macizo, como por ejemplo en su parte más occidental en la Buitrera, Loma de los Castaños y Cerro de la Silleta. También en la zona norte central, como en las cimas del Morrón del Mediodía, Tajos del Ciego, Altos de San Juan, Tajos del Gallego, Loma del Espinar. Al sur en las crestas de las montañas como Cima del Tejar, Tajos del Reyecillo, Tajos del Campanario, alrededores de Trevélez; y en la parte más oriental destaca una amplia zona por encima de Piedra de Águila. También se encuentran clasificada bajo esta clase Pradollano y los núcleos urbanos que se encuentran en el macizo.

Las zonas donde la peligrosidad es nula se corresponden con valles como ocurre por ejemplo en el Barranco de los Poyos o en la vertiente sur del río Grande. También se corresponden con zonas donde la morfología del terreno es demasiado plana al igual que en las laderas más externas del macizo, tanto al norte como al sur, la zona más oriental y occidental como sucede en Llanos de Salas y Loma Alta.

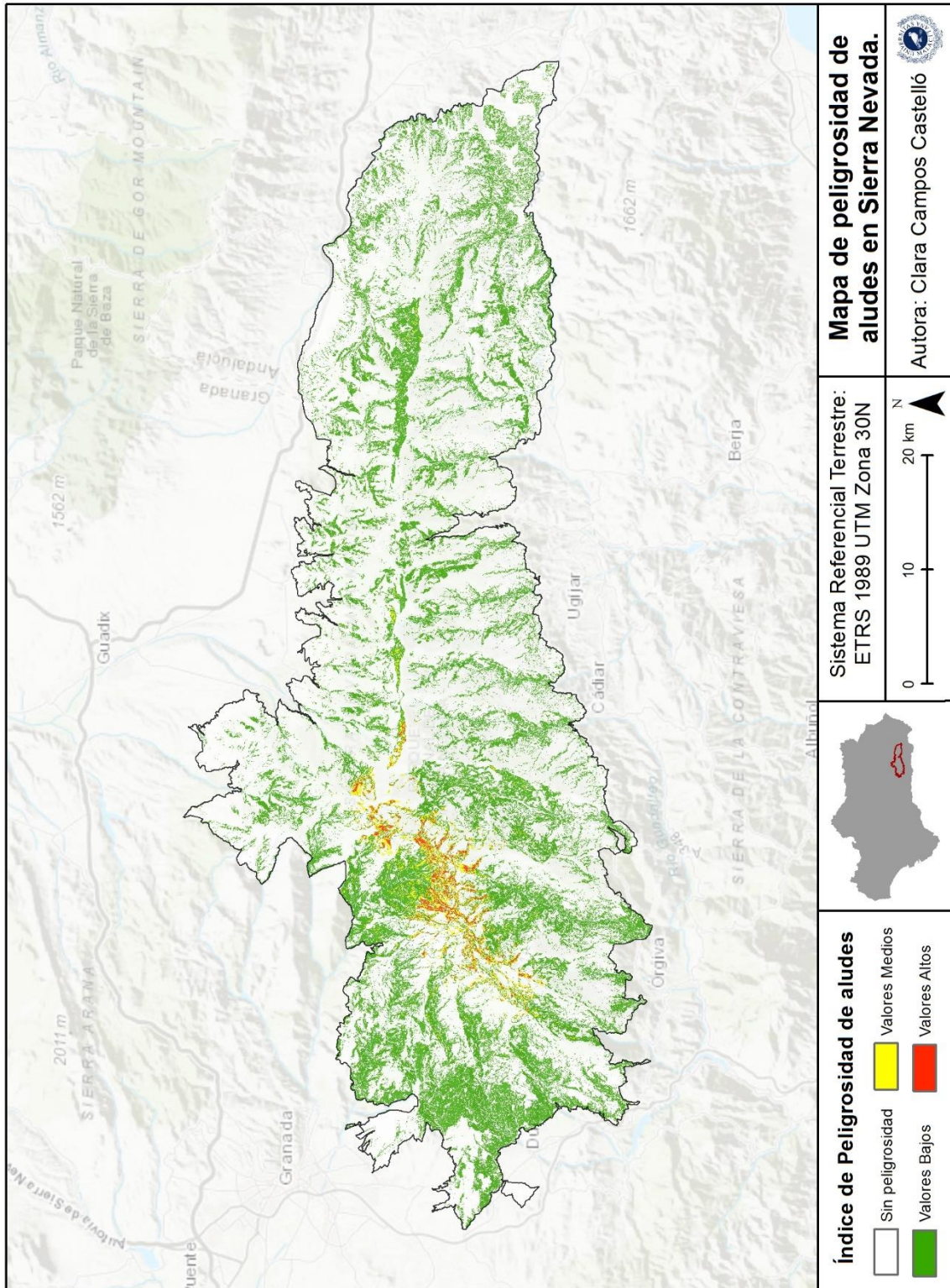


Figura 4: Mapa de peligrosidad de aludes en Sierra Nevada. Las zonas blancas se corresponden con el valor 0 de la escala creada, las verdes con el 1, las amarillas con el 2 y las zonas rojas con el valor 3.

A partir del mapa resultante también se puede calcular la superficie del macizo que tiene más o menos peligrosidad de avalancha, para tener una idea más clara de la proporción del peligro de aludes dentro de Sierra Nevada. Estos valores se encuentran recogidos en la **Tabla 8** que se muestra a continuación.

Tabla 8: Superficie de Sierra Nevada afectada por la peligrosidad.

Índice de peligrosidad	Superficie (Km ²)	Porcentaje (%)
Sin Peligrosidad	1239,16	71
Valores Bajos	444,99	26
Valores Medios	27,58	2
Valores Altos	10,43	1
Superficie Total	1722,17	100

De este modo, vemos como el 97% de la superficie de Sierra Nevada se encuentra categorizada con valores bajos y sin peligrosidad, siendo la peligrosidad por aludes de nieve prácticamente escasa ya que solo supone un 3% del total.

Se ha obtenido el porcentaje de superficie con peligrosidad dentro del Parque Nacional y Parque Natural de Sierra Nevada representado en la **Tabla 9**.

Tabla 9: Porcentaje de superficie con Peligrosidad en el Parque Nacional y Natural de Sierra Nevada.

Índice de Peligrosidad	% Parque Nacional	% Parque Natural	% Total
Sin Peligrosidad	34,52	36,48	71
Valores Bajos	11,13	14,87	26
Valores Medios	1,54	0,46	2
Valores Altos	0,69	0,31	1

Se puede apreciar que la mayor parte de la peligrosidad en Sierra Nevada se concentra dentro del Parque Nacional, ocupando así un 2,23% de la superficie total estudiada sumando valores medios y altos.

6. Discusión.

Los resultados de este estudio revelan que Sierra Nevada es un macizo donde la peligrosidad de aludes es escasa (3% del total de superficie) y que se concentran, en su gran mayoría, en las zonas próximas a los picos más elevados donde la altitud es máxima. Esto coincide con la información que fue proporcionada por el teniente del SEREIM de Granada, quien apuntaba que Sierra Nevada es un macizo donde no se suelen dar un alto número de avalanchas importantes a lo largo de los años. Con los resultados obtenidos hemos podido corroborar esta información ya que el 97% de la superficie no tiene peligrosidad o valores bajos valores de ella, y solo un 1% presenta una peligrosidad elevada.

La distribución de las zonas de peligro obtenidas viene dada por la multiplicación de los cuatro factores; vegetación, nieve, pendiente y rugosidad del terreno. Las zonas donde no existe peligro de aludes se deben a que el valor del factor nieve o pendiente en esa zona era cero, anulando el resto de los factores, ya que sin nieve o sin una pendiente adecuada no se puede generar un alud.

La peligrosidad es baja en todas aquellas zonas que presentan menores pendientes y escasa acumulación de nieve. La presencia de una topografía llana o con escasa pendiente hace que la probabilidad sea baja incluso en zonas de mayores altitudes. De tal modo, la peligrosidad es baja en la base de los barrancos, de morfologías más o menos planas y con presencia de una vegetación alta, y en los fondos de los valles colgados adyacentes, que aunque están situados a mayor altitud y tiene una vegetación escasa no cumplen los requisitos de pendiente favorable ya que supera los 50°. También presentan una elevada rugosidad lo que hace difícil el deslizamiento de la nieve, disminuyendo la peligrosidad.

Las zonas donde la peligrosidad toma valores medios son escasas comparadas con las zonas anteriores. Son zonas que se sitúan al borde de los valores altos, que tienen una pendiente más o menos favorable (entre los 21° y los 40°), la acumulación de nieve empieza a aumentar, la vegetación arbórea en cambio es cada vez más escasa y es sustituida por arbustos que fijan menos el terreno. Al aumentar la pendiente y disminuir la vegetación, el terreno es también cada vez menos rugoso aunque sigue teniendo una rugosidad aceptable para que la nieve no se deslice demasiado.

Las zonas con peligrosidad alta son aquellas en las que son favorables todos los factores analizados. Tal y como se observa en la **Figura 4**, son muy escasas las zonas de alta peligrosidad de aludes y se sitúan, en su gran mayoría, en las zonas más elevadas del macizo, rodeando las altas cumbres. En estas zonas las pendientes están entre los 41º y los 50º, facilitando así que la nieve se mueva con más rapidez ladera abajo. La acumulación de nieve es máxima en estas zonas, debido sobre todo a los vientos procedentes del Atlántico. Estos vientos transportan nubes cargadas de agua que al encontrarse con el primer obstáculo a los 3.000 metros de altitud suelen descargar en forma de nieve por las bajas temperaturas (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2017). La vegetación es prácticamente escasa o como mucho se presenta en forma de pastizal, aumentando así el efecto del factor rugosidad. El terreno al no tener vegetación y al ser la pendiente tan elevada no va a tener ningún tipo de obstáculo por lo que la rugosidad va a ser mínima facilitando así el desplazamiento de la nieve sobre una superficie lisa.

Según los últimos datos que aparecen en el apartado anterior, se ha podido comprobar que la mayor parte de la peligrosidad de aludes en la zona estudiada se sitúa dentro del Parque Nacional de Sierra Nevada. De este modo, queda claro que las competencias sobre aludes deberían recaer sobre el Parque Nacional, ya que en esta zona es donde se van a originar los mayores episodios de avalanchas por lo que deberían establecer las medidas de seguridad y mitigación pertinentes para ello.

Al investigar sobre los accidentes ocurridos en Sierra Nevada por la formación de aludes en los últimos años se ha comprobado que, la gran mayoría de ellos, tuvieron lugar en zonas donde se han obtenido valores medios y/o altos de peligrosidad a aludes. El mayor accidente ocurrido en Sierra Nevada fue en el invierno de 1989, cuando un alud sorprendió a un grupo de seis excursionistas cuando volvían del refugio Félix Méndez (García, 1989). El alud se originó en la ruta que va desde el pico del Alcazaba al Mulhacén, y con el mapa de peligrosidad que se ha originado en este trabajo se puede comprobar que esta zona se encuentra bajo el criterio de alta peligrosidad. Otro de los accidentes más llamativos es el ocurrido en febrero del 2011, donde un alud se cobró la vida de un montañero británico que tuvo lugar en el Barranco de San Juan (Cortés, 2011), que ha sido clasificado como una de las zonas de alta peligrosidad de la Sierra como se muestra en la **Figura 5**.

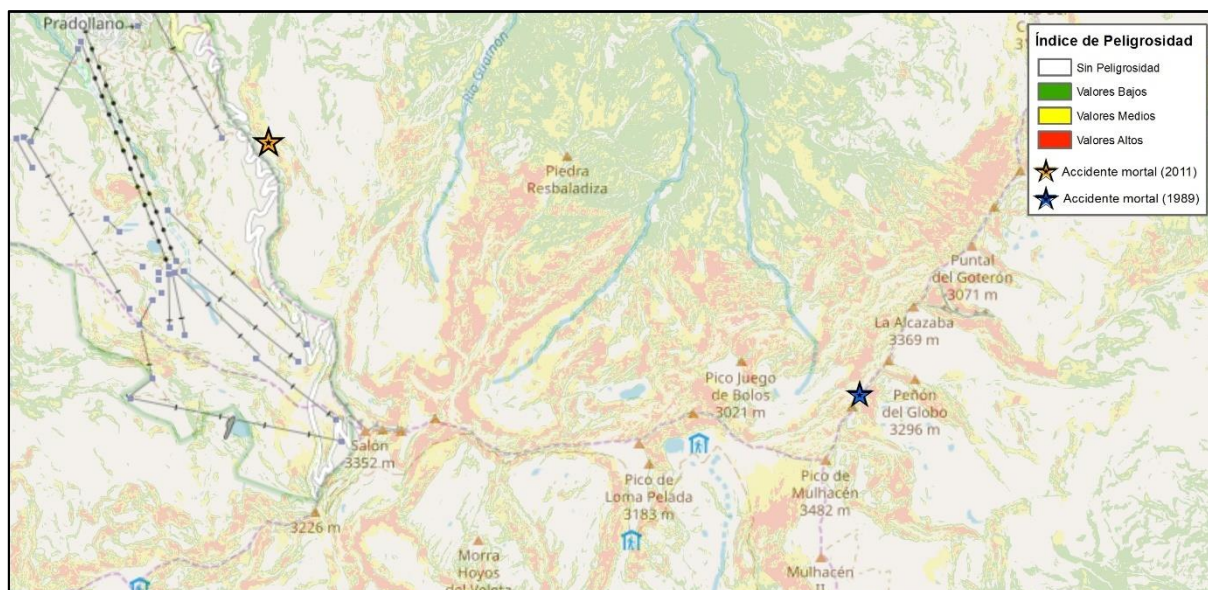


Figura 5: Representación de los accidentes mortales en Sierra Nevada.

7. Conclusión.

A partir de la cartografía expuesta con anterioridad se puede concluir que Sierra Nevada no es una zona peligrosa en lo que respecta a la formación de aludes de nieve. La alta peligrosidad se concentra prácticamente en zonas donde queda mas o menos bien delimitada por lo que, con un estudio más detallado en campo, se podría mitigar el peligro con una buena ordenación y medidas estructurales.

Otro objetivo de este trabajo era elaborar una nueva metodología para cartografiar el riesgo de aludes en Sierra Nevada, que como se puede observar en función del resultado final, ha sido bastante eficaz ya que los resultados se corresponden a lo esperable en este macizo.

El presente trabajo solo se ha centrado en la peligrosidad, una parte dentro del análisis total del riesgo, por lo que sería ideal complementar esta cartografía con el análisis de la vulnerabilidad y exposición para conocer el riesgo total de aludes en Sierra Nevada. Para ello habría que hacer un exhaustivo estudio en campo y elaborar una fuente de información a partir de los datos recogidos por los expertos y las rutas de montañismo que se realizan en Sierra Nevada.

Bibliografía.

- AEMET (2015). Guía de Aludes. Delegaciones territoriales de Aragón y Cataluña. Agencia Estatal de Meteorología. Madrid, España. 48 pp.
- Andrés, A. J., & Chueca, J. C. (1999). Cartografía de zonas probables de aludes en el valle de Ordesa (Pirineo aragonés). *Geographicalia*, 37, 73-86.
- Andrés, A. J., & Chueca, J. C. (2008). Cartografía de zonas de salida de aludes en el valle de Ordesa (Pirineo central español): factores condicionantes y evolución temporal. In *Trabajos de geomorfología en España, 2006-2008: actas de la X Reunión Nacional de Geomorfología, Cádiz, 14-19 de septiembre de 2008* (pp. 413-416).
- Andrés, A. J., Monné, J. P., Cía, J. C., Martínez, J. Z., La iglesia, A. L., & Moreno, I. L. (2000). Cartografía de zonas probables de aludes en el Pirineo aragonés: metodología y resultados. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 30.
- Ayala-Carcedo, F. J., y Olcina Cantos, J. (2002). *Riesgos naturales*. Barcelona: Ariel.
- Blanca López, G., López Onieva, M.R., Lorite, J., Martínez Lirola, M.J., Molero Mesa J., Quintas, S., Ruiz Girela, M., Varo, M.A. & Vidal, S. (2002). *Flora amenazada y endémica de Sierra Nevada*. Granada: Universidad de Granada, 407 pp.
- Calvo García-Tornel, F. (1984). La Geografía de los riesgos. Geocrítica. *Cuadernos críticos de Geografía Humana*, IX (54).
- Campbell, C., & Gould, B. (2013). A proposed practical model for zoning with the Avalanche Terrain Exposure Scale. In *Proceedings of the International Snow Science Workshop, Grenoble–Chamonix Mont-Blanc, France* (pp. 385-391).
- Carvajal, C. (2016). *Veleta. El rey alpino del sur*. Campo Base, 149, (pp. 36-75).
- Castillo Rodríguez, A., & Castillo Amaro, A. (2010). Sierra Nevada inédita. Granada: Penibética.
- Castillo Rodríguez, A., & Castillo Amaro, A. (2003). Sierra Nevada. Guía de montaña. Granada: Penibética, 180 pp.

- Castillo Martín, A. (2016). *Lagunas de Sierra Nevada* (2ª edición). Universidad de Granada, 317.
- Chueca, J. C., & Andrés, A. J. (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), 27-42.
- Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. (2017). Carpeta Informativa. Parque Nacional, Parque Natural y Reserva de la Biosfera de Sierra Nevada. Recuperado:
http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/servtc5/ventana/descargaPublicaciones.do?s=/img/Publicaciones/SierraNevada/&n=Carpeta_Informativa_Sierra_Nevada_junio2017.pdf
- Cortés, V. (21 de febrero de 2011). Un desaparecido por un alud. *El País*. Recuperado:
https://elpais.com/diario/2011/02/21/andalucia/1298244125_850215.html
- Del Moral, I. L. & Pita, M.F. (2002). El papel de los riegos en las sociedades contemporáneas. In *Riesgos naturales* (pp. 75-88). Ariel.
- Estremera, D. P., Sainz, M. R., García, L. M. T., Schulte, L., Franch, F. S., & Ortiz, A. G. (1999). Degradación de permafrost en Sierra Nevada y repercusiones geomorfológicas: el caso del Corral del Veleta. Resultados preliminares. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 27, 7-22.
- Furdada, G. (2006). Aludes de nieve. Riesgo actual y riesgo futuro. *Cuaternario y Geomorfología*, 20(3), 73-88.
- García V., A. (14 de febrero de 1989). Rescatados los cadáveres de cuatro de los seis montañeros franceses sepultados por un alud en Sierra Nevada. *El País*. Recuperado:
https://elpais.com/diario/1989/02/14/espana/603414004_850215.html
- Gómez Ortiz, A., & Plana Castellví, J. A. (2004). El paisaje glaciar de Sierra Nevada a través de los escritos de época (siglos XVIII y XIX). Contribución al conocimiento geográfico español. *Investigaciones geográficas*, nº 34, 29-45.

- Guerrero, T. V. (2001). Los espacios naturales protegidos como recurso turístico: metodología para el estudio del Parque Nacional de Sierra Nevada. *Estudios turísticos*, (147), 57-84.
- Maurel, J. B. (1957). El clima de Granada. *Estudios Geográficos*, 18 (69), 457.
- Molero, J., & Marfil, J. M. (2017). Betic and Southwest Andalusia. In *The Vegetation of the Iberian Peninsula* Springer, 143-247.
- Morales, D. (2019). Evaluador de Riesgo de Aludes. Mapa Topográfico de Sierra Nevada. Granada: Veleta. Recuperado: <https://mapasierranevada.com/>
- Muñoz Iranzo, A., & Cuartero Zueco, J. (2015). Disfrutar por los caminos de Sierra Nevada. Guía de recorridos (Vol I). La Serranía, 366 pp.
- Neumann, H. (1960). El clima del sudeste de España. *Estudios Geográficos*, 21 (79),171.
- Rodríguez, L. R. et al. (2017). Parque Nacional de Sierra Nevada. Guía Geológica. Instituto Geológico y Minero de España, España (pp. 324).
- Segovia, M. P. (2011). Análisis espacial de las áreas favorables al desencadenamiento de aludes en el circo de Piedrafita (Huesca). Lucas Mallada. *Revista de Ciencias*, (13), pp. 215-235.
- Vera-Rebollo, J. F. (2001). Planificación y gestión del desarrollo turístico sostenible: propuestas para la creación de un sistema de indicadores.