

Análisis de susceptibilidad de aludes en la carretera del puerto de Somiedo (Asturias) y divulgación a través de Realidad aumentada

Snow avalanches susceptibility on the Somiedo road (Asturias) and its dissemination through Augmented Reality

ENRIQUE DEL VALLE GRANDA¹  0000-0002-7620-2595

SALVADOR BEATO BERGUA¹  0000-0001-5538-7685

CARMEN RODRÍGUEZ PÉREZ¹  0000-0002-2065-7515

DANIEL HERRERA ARENAS¹  0000-0002-5900-4730

¹ Universidad de Oviedo. España.

Resumen

La intensa actividad nivológica en la media y alta montaña de la Cordillera Cantábrica produce la acumulación de importantes espesores de nieve que pueden desencadenar aludes, poniendo en riesgo las vidas humanas y las infraestructuras. Es por ello por lo que en este trabajo se realiza un análisis general a través de SIG de los condicionantes responsables del desencadenamiento de aludes sobre el valle de Somiedo, en el suroccidente del Principado de Asturias. A este análisis se añade la información proporcionada por el trabajo de campo, la fotointerpretación, las entrevistas y las fuentes históricas, con el fin de conocer el resultado de la actividad de las avalanchas de nieve, especialmente de las que afectan a la carretera del Puerto de Somiedo (AS-227), en concreto en el tramo comprendido entre los pueblos de Caudedo y Santa María del Puerto. Se aporta, además, cartografía del entorno del valle, destacando por su interés el mapa de vegetación y los mapas de susceptibilidad y de vulnerabilidad de aludes sobre la carretera, exponiendo propuestas de intervención a fin de mitigar el riesgo. Además, se desarrollan materiales de realidad aumentada para divulgar los resultados de este estudio y conocer la dinámica de este fenómeno nivológico.

Palabras clave: aludes; Realidad Aumentada; SIG; cartografía; riesgos naturales.

Fechas • Dates

Recibido: 2022.11.04

Aceptado: 2023.10.20

Publicado: 2024.05.30

Autor/a para correspondencia Corresponding Author

Enrique del Valle Granda
enrique.delvallegranda@gmail.com

Abstract

The intense snow activity in the medium and high altitude of the Cantabrian division mountains produces an accumulation of significant thickness of snow that unchains forceful avalanches that put human lives and infrastructure at risk. For this work, a general analysis is carried out through GIS of the conditions for the triggering of avalanches in the Somiedo valley, southwest part of the Principality of Asturias. It is added to this analysis the information observed during the fieldwork, photo-interpretation, interviews and historical sources, in order to realize the damage caused by these processes to the vegetation and infrastructure, especially on the AS-227, between the villages of Caunedo and Santa Maria del Puerto. Cartography of the valley's environment is also provided: maps of vegetation, susceptibility and risk on the road. In addition, the development of AR in different media is proposed to host this cartography and in order to allow the viewer a more interactive and academic analysis on the study of avalanche risk.

Keywords: snow avalanches; augmented reality; GIS; natural risks.

1. Introducción

Los aludes suponen uno de los procesos geomorfológicos y nivológicos más competentes y generalizados en la dinámica de vertientes de la media y alta montaña de las latitudes frías y templadas. El crecimiento en las últimas décadas de las actividades de ocio y deportivas en la montaña española, tales como el esquí, el senderismo o la escalada, supone un aumento considerable del riesgo de producirse daños personales a consecuencia del desencadenamiento de avalanchas de nieve (Vada et al., 2012). Además, la concentración de infraestructuras en las zonas de altitud media (como ocurre en el Macizo Asturiano donde se acopian grandes volúmenes de nieve y el relieve es abrupto), la capacidad morfogenética de los aludes y el riesgo que producen es también sobresaliente (Poblete, Beato y Marino, 2019). Así lo demuestran los estudios sobre los aludes y su cartografía en toda la Cordillera Cantábrica, siguiendo la estela de los trabajos pioneros en los Pirineos desde finales de los años ochenta del siglo pasado (ver, p.e., Mases, 1991, 1997; Furdada, 1996; Julián et al., 2000). A pesar del precursor trabajo geomorfológico de Castañón (1984) en el sector suroriental de Peña Ubiña, los estudios sobre los aludes cantábricos se han desarrollado más recientemente, destacando las investigaciones de Marquínez et al. (2003), Wozniak y Marquínez (2004), Santos et al. (2010), Vada et al. (2011) y Serrano et al. (2016; 2017), así como los trabajos del Departamento de Geografía de la Universidad de Oviedo sobre aludes desde la perspectiva historicista y pedagógica (García-Hernández et al., 2014, 2017 y 2019), ecológica y paisajística (García-Hernández et al., 2017; Beato, Poblete y Marino, 2017 y 2019); cartográfica y aplicada (Poblete, Beato y Marino, 2016 y 2019; Beato, Poblete y Marino, 2018 y 2019). Sin embargo, la zona occidental del Macizo Asturiano apenas ha sido recogida por el trabajo general cartográfico sobre los riesgos naturales en Asturias de Marquínez et al. (2003) y por Santos et al. (2010) en la vertiente leonesa del Alto Sil.

Por otro lado, el uso de la Realidad Aumentada (RA), esto es, la combinación de técnicas que permite incrementar la información del entorno en el que nos desenvolvemos con elementos virtuales a través de soportes digitales, está siendo aplicado a los análisis del medio natural. Los estudios geográficos están incorporando RA, especialmente, para la divulgación de resultados académico-científicos sobre patrimonio natural y paisajístico de medios rurales (Beato et al., 2020; González et al., 2020; Marino et al., 2021; Poblete et al., 2022). En lo que se refiere a los riesgos naturales, la potencial utilidad de la RA se está desarrollando en los últimos años, con

aplicaciones relacionadas con los aludes como *IdAllau*, del Instituto Geológico de Cataluña y la Universidad de Girona, que permite la visualización desde el móvil, incluso sin cobertura, de la cartografía de aludes (Pérez et al., 2013). Este tipo de aplicaciones, más desarrolladas, bien podrían ser utilizadas para evitar los accidentes por aludes en las carreteras que atraviesan las laderas de media montaña asturianas, tan transitadas como susceptibles de verse afectadas por aludes (Beato, Poblete y Marino, 2019; Poblete, Beato y Marino, 2019 y 2020). Se podrían evitar así, muertes como las de los dos operarios de la carretera del puerto de San Isidro, arrastrados por un alud mientras la limpiaban y socorrían a personas atrapadas por la nieve en enero de 2021 (La Voz de Asturias, 2/1/2021). Hechos de esta magnitud pueden acontecer en vías de comunicación asturianas transitadas como la AS-227 o carretera Puente San Martín – Somiedo que cruza la divisoria cantábrica sirviendo de conexión entre Asturias y Castilla y León. Varios tramos de la carretera son afectados con cierta frecuencia por aludes inhabilitando el paso por la calzada y poniendo en riesgo a infraestructuras y personas. A pesar de que desde el punto de vista geomorfológico se han realizado numerosos estudios sobre las formas glaciares y periglaciares, así como acerca de los movimientos en masa (Muñoz, 1980; Castañón, 1989; Menéndez, 1995; Menéndez y Marquínez, 1996; Rodríguez, 2016; Frochoso, 2017), no se ha prestado una especial atención a los aludes. En este sentido, no se ha analizado la peligrosidad de este fenómeno aun teniendo en cuenta que en este sector la acumulación de importantes espesores nivales en invierno produce avalanchas de nieve que comprometen la seguridad. Así pues, el principal objetivo de este trabajo es realizar dicho análisis poniendo especial atención a lo que acontece en la carretera AS-227.

Además de realizar un estudio de la susceptibilidad por aludes en la carretera que asciende al puerto de Somiedo, planteamos la posibilidad de introducir la RA en el análisis y en la divulgación de los resultados. A priori, la RA podría favorecer un mayor conocimiento territorial y ayudar a que las personas que utilicen dicha infraestructura sean conscientes de las zonas más susceptibles de ser afectadas por aludes.

El área de estudio se localiza en la zona suroccidental del Principado de Asturias, concretamente, en la cabecera del valle de Somiedo. Por tanto, se trata de la cara norte de la divisoria de aguas cantábrica drenada por el río Somiedo. El trabajo se centra en la carretera AS-227, más precisamente en el tramo que va desde el pueblo de Caunedo (km. 42) hasta el de Santa María del Puerto (km. 51), ocupando una superficie total de 20,35 km² dentro del término municipal de Somiedo (Fig. 1). Atendiendo a los límites geográficos, el área de estudio se sitúa al este de la sierra del Páramo, al noroeste de la de Robezo y al oeste de la de Peñalba.

En términos generales la disposición y orografía del relieve presenta grandes desniveles, con diferencias de hasta 1.000 metros entre el fondo de valle (Caunedo, 970 m s.n.m) y las mayores elevaciones (El Alto de Putracón, 1.909 m s.n.m). Estos cordales se disponen generalmente con dirección NO-SE, en concordancia con el trazado del Sinclinal de Saliencia, generando una organización territorial en valles aledaños entre sí fruto de la erosión diferencial y varias dinámicas morfogénicas (glaciar, periglaciar, fluvial).

Figura 1. Mapa de localización del área de estudio.



Fuente: Elaboración propia a partir de las bases cartográficas digitales del IGN.

Desde el punto de vista geológico, el valle de Somiedo se halla en la Región de Pliegues y Mantos. Destacan aquí la alternancia de materiales devónicos (calizas, areniscas y pizarras) dispuestas en pliegues NO-SE originando crestas y valles. En efecto, la orogenia alpina motivó la reactivación de la erosión diferencial, dando lugar a una configuración de afloramientos de materiales resistentes que arman los relieves destacados, al tiempo que el desmantelamiento de los materiales más deleznable permitió la apertura de amplios valles. Posteriormente, durante el Cuaternario, los procesos erosivos glaciares, periglaciares y fluviales vinieron a retocar la morfología heredada, modelando un relieve variado de indudable interés geomorfológico.

Así pues, buena parte del área de estudio se vio afectada por el glacialismo, dando lugar a la formación de un amplio valle glaciar recorrido en la actualidad por el río Somiedo. Además del valle en artesa, el catálogo de formas y formaciones glaciares incluye la presencia de circos glaciares en las vertientes de umbría, con morrenas frontales, además de depósitos fluvioglaciares ocupando el fondo del valle. Una vez iniciada la retirada del hielo tiene lugar el comienzo de la colmatación de las vertientes y del fondo de la artesa glaciar por dos mecanismos de gran trascendencia en el espacio que nos ocupa. En primer lugar, el debido a los aportes torrenciales laterales que han dado lugar a la formación de numerosos conos de deyección en las salidas de las principales canales, algunos de ellos de dimensiones considerables. El segundo de los mecanismos, de enorme capacidad de movilización de material (por la descompresión y desestabilización de las laderas), es el protagonizado por los voluminosos movimientos en masa. Así, se han identificado hasta cinco grandes movimientos en masa, siendo uno de ellos, el de La Peral, junto al *debris flow* del Llamardal, el Punto de Interés Geológico CA017 por las peculiaridades de su tamaño.

Respecto al resultado de la actividad periglacial cabe mencionar extensos taludes de derrubios activos e inactivos como resultado de la erosión de las crestas culminantes y la movilización de los materiales ladera abajo. Igualmente, se han identificado glaciares rocosos y canales de aludes junto con sus depósitos.

No obstante, la actividad periglacial actual es muy reducida comparada con la de etapas frías pleistocenas. Dada la localización de la zona y su relativa cercanía al mar, nos encontramos ante un clima de tipo oceánico de temperaturas suaves y precipitaciones abundantes. En el rango altitudinal entre los 1.000 y los 1.500 m s.n.m. hallamos un clima de tipo Cfsc, con unas precipi-

taciones de 1.000 - 1.400 mm y hasta 8 meses de temperatura media inferior a los 10 °C (AEMET & IPMA, 2011), favoreciendo la precipitación en forma de nieve durante los meses más fríos (Muñoz, 1982). La cubierta vegetal presenta el mosaico característico de la montaña oceánica con una marcada estratificación altitudinal. Así pues, en aquellas áreas más elevadas se desarrolla vegetación subalpina, casmofítica y de gleras. Los pastizales y herbazales, aprovechados como pasto por el ganado vacuno, ocupan las áreas menos pindias de las principales elevaciones. Los piornales, aulagares y brezales son las principales formaciones arbustivas colonizando las áreas de mayor pendiente mientras que las avellanedas forman cubiertas arborescentes en sectores con taludes de derrubios inactivos que comienzan a fitoestabilizarse. Hayedos, robledales y abedulares son las formaciones arbóreas dominantes sobre las laderas medias del valle, especialmente, en las zonas de umbría. Por último, las saucedas se desarrollan en las orillas de los ríos más importantes que transcurren en los fondos de valle entre prados de siega con cierres vegetales (sebes).

Así pues, el paisaje expresa una economía agraria y silvopastoril en proceso de decrecimiento, como en otras montañas ibéricas. Destacan las extensas áreas forestales y de matorral y la concentración de la presencia antrópica en torno a las infraestructuras y algunos núcleos poblacionales de poca entidad como La Peral, Caunedo y Santa María del Puerto.

2. Metodología

Para la elaboración de este trabajo se ha seguido la metodología clásica de análisis de riesgos naturales acopiando toda la información disponible tanto bibliográfica, cartográfica y fotográfica como sobre el terreno mediante trabajo de campo. A partir de esto se ha elaborado una base de datos que se ha integrado con su representación cartográfica en un SIG para realizar los cálculos de superficies pertinentes. Por otra parte, se han desarrollado materiales para ser utilizados mediante RA, tanto en el análisis como en la divulgación de resultados, que se han integrado en el trabajo.

2.1. Revisión bibliográfica, cartográfica y hemerográfica

Se ha efectuado una exhaustiva revisión bibliográfica y cartográfica a través de la búsqueda de investigaciones y trabajos sobre el medio natural y las actividades antrópicas del ámbito de estudio en bibliotecas, repositorios institucionales e Internet. A este respecto, se ha prestado especial atención a los temas relacionados con los aludes y su desencadenamiento. En cuanto a la cartografía, se ha consultado la hoja 0076-2 Pola de Somiedo del Mapa Topográfico Nacional 0076-2; la Hoja 76-11(6) de Pola de Somiedo del MAGNA50; el Mapa Geomorfológico de Menéndez (1996) y el de Rodríguez (2015); así como la Cartografía Temática Ambiental del Sistema de Información Territorial del Principado de Asturias.

Igualmente, se ha accedido al Archivo Histórico Digital del Principado de Asturias, toda vez que alberga noticias, imágenes y documentos históricos de interés para la investigación. Por otra parte, se han realizado búsquedas en diferentes repositorios y hemerotecas con el fin de conocer las noticias en prensa relacionadas con la dinámica de los aludes. Para ello se ha accedido a las hemerotecas de los tres principales periódicos asturianos, esto es, La Nueva España, El Comercio y La Voz de Asturias. Además, se ha consultado la Biblioteca Virtual de la Prensa Pública, organismo del Ministerio de Cultura y Deporte. Por último, las noticias en medios digitales han sido rastreadas a partir de la búsqueda de palabras clave en buscadores de Internet.

2.2. Fotointerpretación

La fotointerpretación se ha realizado en primer lugar sobre las imágenes del vuelo de la Diputación de 1970 disponibles en el Observatorio del Territorio del Departamento de Geografía de la Universidad de Oviedo. La interpretación de las formas del relieve, cubiertas vegetales y otros elementos necesarios para el análisis de riesgos ha sido realizada a partir de la visión estereoscópica de dichas fotografías aéreas utilizadas por su gran calidad. La actualización cartográfica se ha elaborado con imágenes del Servicio de Sistemas de Información Territorial e Infraestructura de Datos Espaciales del Principado de Asturias (SITPA IDEAS) y del Centro de Descargas del IGN, en concreto, las ortofotos de máxima actualidad (2020) del PNOA con resolución de 0,25 metros.

Para el tratamiento de estas imágenes se han utilizado diferentes programas, tanto software destinado a la gestión de SIG como de edición. El manejo de las imágenes del vuelo de la diputación se ha realizado con *Agisoft Metashape Pro 1.7 V* para crear un ortomosaico georreferenciado y así poder realizar una fotointerpretación y digitalizado de gran precisión. Para el tratamiento de las imágenes actuales se ha utilizado tanto *Quantum GIS 3.16.0* con el complemento *GRASS 7.8.4* como *ArcMap 3.10*.

2.3. Trabajo de campo

El trabajo de campo ha consistido en recorrer a pie las laderas para conocer in situ el dinamismo y comportamiento de los aludes, las características geomorfológicas y la vegetación de todo el entorno, contrastando la información obtenida mediante la fotointerpretación de las imágenes áreas. Del mismo modo, se ha recorrido la carretera AS-227 en varias ocasiones, realizando trayectos a pie y en vehículo, para analizarla en detalle. Así, se han identificado y localizado las huellas geomorfológicas y en la vegetación dejadas por las diferentes dinámicas de vertientes que tienen lugar en su recorrido; se han tomado fotografías, recogido datos (sobre los depósitos al pie de la carretera y el estado de los elementos de seguridad de esta) y anotaciones con apoyo de la cartografía topográfica y los ortofotomapas. Durante las salidas de campo se ha entrevistado a habitantes locales en busca de información sobre los aludes y sus efectos en la carretera. Además, se han realizado varias entrevistas a empleados públicos somedanos y de la administración regional. En efecto, se han mantenido reuniones con el ayuntamiento de Somiedo y responsables de Infraestructuras y Transportes del Gobierno del Principado de Asturias, para conocer de primera mano el estado y mantenimiento de la carretera, así como los proyectos de intervención sobre esta.

2.4. Análisis climático

El análisis de las condiciones climáticas de sectores de montaña en Asturias es complicado debido a la falta de estaciones meteorológicas y series de datos completas. Así pues, se ha recurrido a la interpolación de datos procedentes de estaciones cercanas, concretamente, de Leitariegos y Genestoso, que presentan una serie temporal superior a los 30 años. Para el análisis de los parámetros climatológicos locales únicamente se ha dispuesto de los datos recopilados por el INDUROT en el periodo 1970-1985 coincidiendo con la creación del Parque Natural de Somiedo y que han sido extraídos del trabajo de Menéndez (1995). Para los datos más actuales, se ha contactado con Javier Rodríguez, miembro de NOROMET y colaborador de la AEMET, que ha proporcionado los datos de su estación personal en La Peral, localizada a 1.350 m s.n.m. Gracias a la información que ha facilitado se han podido conocer los datos meteorológicos entre 2010 y 2015 de La Peral. Con estos datos se han calculado los días de nieve atendiendo a los días con temperaturas medias

inferiores a dos grados centígrados y que hayan presentado precipitaciones, debido a que ambas estaciones no recogen meteoros.

En cuanto a los escenarios que el cambio climático ha introducido en Asturias, el informe de Anadón *et al.* (2009) no indica cambios sustanciales a corto plazo en las precipitaciones totales, con reducciones del volumen total anual de menos del 10% para el conjunto regional e incluso pequeños aumentos en el periodo invernal. Por su parte, las temperaturas medias han experimentado un incremento medio de 0,21 °C/década entre 1961 y 2007 con aumentos que resultan mucho menos acusados en invierno (Anadón *et al.* 2009). Así pues, el análisis que en este trabajo se presenta puede tener una validez temporal, en principio, bastante alta.

2.5. SIG y cartografía

El SIG del proyecto se ha realizado creando una base de datos en la que se ha acopiado toda la información territorial disponible, así como la obtenida tras realizar las digitalizaciones y cálculos pertinentes. La elaboración de la base de datos y la cartografía se ha llevado a cabo con los programas *Quantum GIS 3.16.0*, con el complemento *GRASS 7.8.4*, y *ArcMap 3.10*. Se han descargado del Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional los modelos digitales del terreno con paso de malla de 2 y 5 metros para la realización de cálculos de superficies (para los análisis de pendiente, orientaciones, altitud y radiación), así como para el mapa de sombreado de relieve. Igualmente, se ha trabajado con los datos Lidar (hoja 0076) en la elaboración de la cartografía. Los datos numéricos y estadísticos se han obtenido a través de la reclasificación de los ráster para poder obtener en formato CSV toda su información y tratarla con MS Excel.

El mapa de vegetación ha sido digitalizado también en *Quantum GIS* con el complemento *Bezier Editing*. Para este se ha utilizado como fuente la cartografía temática ambiental del SITPA, en concreto el mapa de unidades de vegetación elaborado por la Consejería del medio Ambiente y encargado al INDUROT entre 1989 y 1998. Sin embargo, la antigüedad de esta cartografía hace que sea imprescindible actualizarla dado el importante cambio experimentado por las cubiertas vegetales. Para el análisis de los aspectos geomorfológicos se han utilizado como fuente los trabajos de Menéndez (1997) y Rodríguez (2015). Por último, las edificaciones digitalizadas se han extraído del portal de la Sede Electrónica del Catastro.

Finalmente, el mapa de susceptibilidad de aludes se ha realizado combinando algunos factores como la altitud, la pendiente, la vegetación y los aludes documentados, todo ello con el fin de obtener la composición más precisa posible. Con esta cartografía se ha realizado posteriormente un mapa de vulnerabilidad sobre la carretera del puerto de Somiedo (AS-227) para conocer los tramos afectados por los aludes.

Los aludes con más poder erosivo y de transporte se producen con pendientes superiores a los 30° de inclinación y altitudes por encima de los 1.000 m s.n.m (Embleton y Thornes, 1979; Beato *et al.*, 2017; Poblete *et al.*, 2019). Así pues, se han identificado sobre el mapa aquellas áreas que poseen estas características pero que, además, no presentan vegetación de porte arbóreo, debido al efecto de frenado que, a priori, causan estas formaciones sobre los aludes (Schneebeli y Bebi, 2014; Teich *et al.*, 2012). A las áreas resultantes se les han sumado las superficies en las que se encuentran las canales de aludes identificadas, desde sus zonas de salida, tránsito y llegada (incluyendo los lugares por los que transcurren los aludes bajo cubiertas arbóreas). De este modo se ha hecho una clasificación en susceptibilidad alta, media, baja y muy baja.

En la región asturiana, el desencadenamiento de aludes se produce con una inclinación de las laderas entre 30 y 50° (Marquínez *et al.*, 2003). Sin embargo, esto no supone una norma, ya que con las condiciones de suficiente niviosidad y rugosidad de la superficie, se pueden desencadenar aludes en pendientes con una inclinación superior a los 12-15°, siendo raro que se desencadenen en inclinaciones superiores a los 50° debido a que la pendiente no permite la suficiente acumulación de nieve (Hodder y Stoughton, 1979; Poblete, Beato y Marino, 2019). Así pues, se han delimitado los sectores de las laderas más susceptibles de verse afectados por aludes. Además, para conocer la pendiente de las laderas adyacentes a la carretera se ha tomado un área de hasta 200 metros de distancia sobre las laderas, obteniendo así una superficie de 135 hectáreas (1,35 km²), sobre la que se han realizado los cálculos pertinentes.

Dentro de los factores topográficos, otro factor estudiado a partir del modelo digital del terreno y el SIG del proyecto es la orientación de las vertientes, al determinar las horas de sol y, por ende, la radiación solar que recibe el manto nival. Esta radiación influye directamente en la sublimación y evaporación de los cristales de nieve (Pradhananga y Pomeroy, 2022). De este modo, las laderas situadas en las vertientes sur, suroeste o este recibirán mayor cantidad de horas de sol y de radiación.

Por último, se ha elaborado un mapa de vulnerabilidad de la carretera superponiendo el trazado de la carretera al mapa de susceptibilidad. Se han identificado, así, las zonas donde se cruzan los polígonos de alta, media y baja susceptibilidad con la calzada, señalándonos en este mismo sentido como vulnerables.

2.6. Desarrollos de RA

Para el desarrollo de productos para la RA se han realizado diferentes propuestas. Se han tomado fotos 360° con la cámara *Gear 360 Samsung* en los puntos más críticos de la carretera para, tras su tratamiento, poder ser incorporadas en *3DVista* incorporando enlaces, textos y audios descriptivos y así transmitir al usuario la información de forma clara y concisa.

Tras la realización de la cartografía de susceptibilidad, vegetación, pendientes, orientación, horas de sol y vulnerabilidad, se han realizado bloques diagramas 3D con el complemento *Qgis2threejs* de *Qgis* que permite la creación de bloques 3D utilizando como base un MDT al que se superpone cualquier ráster o composición vectorial que queramos representar. Estos bloques han sido publicados en los servidores del Observatorio del Territorio para que el usuario pueda interactuar con él, haciendo zoom o visualizándolo en detalle, acompañado de etiquetados para dar información espacial y geográfica de referencia.

Por último, también se ha realizado un vídeo del mapa de susceptibilidad de aludes con la herramienta de grabación de *Google Earth Pro* para poder enseñar de forma interactiva y clara la información. El vídeo se ha publicado en la plataforma de *Youtube* y en los mismos servidores del Observatorio del Territorio para su consulta pública.

3. Resultados

Entre los factores más significativos que explican la generación de aludes se encuentran los topográficos (altitud, pendientes, orientaciones) y los climáticos, especialmente los que explican el volumen de precipitaciones en forma de nieve y su distribución temporal. En Somiedo se dan las

condiciones adecuadas para el desencadenamiento de avalanchas de nieve, tal y como se constata en el análisis geomorfológico en diferentes localizaciones somedanas y en el seguimiento de las referencias recientes en prensa e investigaciones académico-científicas. En concreto, en el marco de estudio seleccionado, en la cabecera del valle de Somiedo, se presentan importantes elevaciones, fuertes pendientes y grandes nevadas en los periodos fríos invernales.

La diferente cubierta vegetal no parece un factor muy relevante que pueda explicar el desarrollo o no de aludes aunque debe ser tenida en cuenta toda vez que la dinámica de estos puede ser distinta en función de la vegetación (Fig. 2). Así pues, el área de estudio se encuentra recubierta por formaciones de pastos y herbazales, que concentran un total de 356,09 ha, esto es un 17 % de la superficie de toda el área de estudio. Atendiendo a las especies arbustivas destacan las propias de los piornales (*Genista polygaliphylla* y *Cytisus scoparius* con *Genista obtusiramea*); los aulagares (*Genista hispanica* ssp. *occidentalis* con *Erica vagans* sin presentar *Ulex europaeus*); y los brezales de brezo rojo (*Erica vagans*) y brecina mesófila. Estas formaciones arbustivas concentran una totalidad de 875,45 ha, esto es, un 46,7 % del área de estudio. Las formaciones arbóreas ocupan 455,06 ha, es decir, un 22,17 % del área analizada, siendo los hayedos (*Fagus sylvatica*) los que más superficie ocupan, 16,83 % del total del sector estudiado y un 75,9 % de la cubierta arbórea. El resto de las formaciones arbóreas que encontramos en la zona de estudio son los robledales, formados por *Quercus petraea* y *Betula pendula*, y las saucedas (*Salix cantabrica*) que se disponen en el contorno de los ríos, conformando los bosques de ribera.

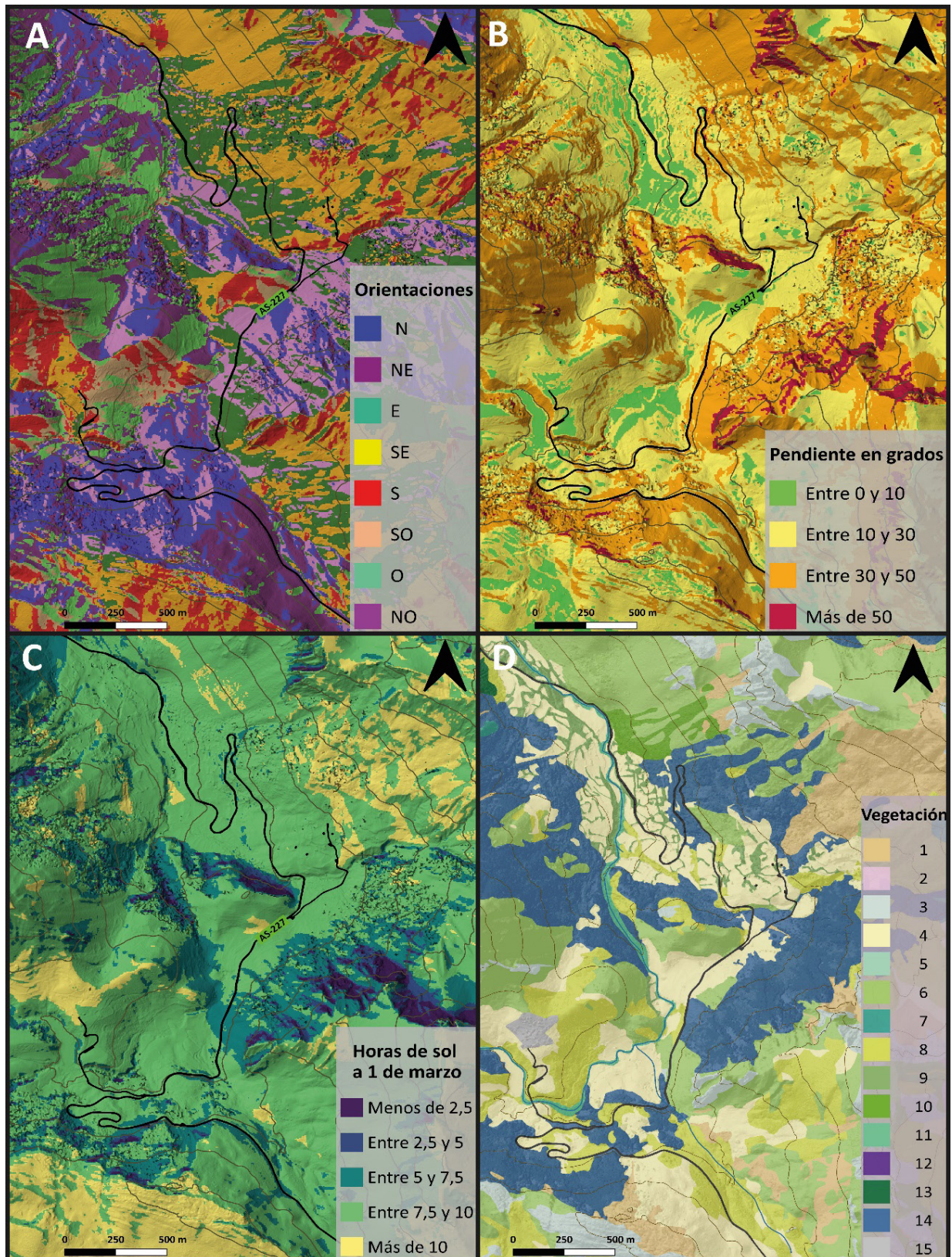
En los últimos 50 años se ha producido un importante crecimiento de la masa forestal. Efectivamente, la reforestación y matorralización se deben a los procesos naturales de sucesión vegetal ininterrumpidos por la reducción de la presión demográfica sobre estas áreas rurales y de montaña. Así, ha decrecido el aprovechamiento y el mantenimiento del territorio en su configuración paisajística secular facilitando que rápidamente comience a verse afectado por el proceso de expansión de formaciones arbustivas y arbóreas. De este modo, se están extendiendo y densificando las formaciones arbóreas, engrosando los cierres vegetales (sebes) y matorralizando los pastos y herbazales a causa del abandono de la actividad agroganadera tradicional. Sin embargo, la actividad de los aludes continúa produciéndose y afectando a la carretera (ver, por ejemplo, La Nueva España 29/11/2021, La Voz del Trubia 29/03/2018 y RTPA 3/3/2018).

3.1. Factores topográficos

Haciendo una división por pendientes en el área de estudio, las menores a 10° suponen un 10,43 % del área; entre los 10 y los 30°, un 54%; entre los 30 y 50°, un 32,51 %; y, por último, la superficie con una pendiente superior a los 50° ocupa un total de un 2,78 % del área. Así pues, alrededor de un tercio del área de estudio es proclive al desencadenamiento de aludes.

En cuanto a las laderas adyacentes a la carretera, se han analizado igualmente por tramos de pendiente encontrándonos con que un 7,25 % de ellas poseen pendientes inferiores a los 10°; un 49,31 % corresponden a pendientes situadas entre los 10 y 30° de inclinación; un 41,87 % entre los 30 y 50°; y, por último, la superficie con una inclinación superior a los 50° es muy reducida, concentrando un 2 %. En este caso, por tanto, las pendientes que favorecen el desarrollo de aludes constituyen un porcentaje mayor pues, en efecto, buena parte de las infraestructuras que atraviesan las montañas medias asturianas están expuestas a este tipo de riesgo (Poblete, Beato y Marino, 2019 y 2020).

Figura 2. Composición con los mapas de orientaciones (A), pendientes (B), insolación (C) y vegetación (D).



Legenda del mapa de vegetación: 1. Veg. de gleras. 2. Veg. Subalpina. 3. Veg. Casmoftítica. 4. Pastos y herbazales. 5. Pastos higrófilos. 6. Aulagar. 7. Brezal. 8. Piornal. 9. Sebes. 10. Avellaneda. 11. Bosque de ribera. 12. Abedular. 13. Robledal. 14. Hayedo. 15. Núcleo de población. Fuente: Elaboración propia a partir de las bases topográficas digitales del IGN.

En cuanto al análisis pormenorizado de la superficie en función de la orientación de las laderas, se aprecia un dominio de vertientes con orientaciones meridionales: NE, N y NO, que concentran un 17, 14,4 y 8,9 % del área de estudio respectivamente. En cuanto a las orientaciones septentrionales, la distribución se produce con un 14,4% de la superficie con orientaciones SO, un 12% S y un 8,5% SE. Las orientaciones E y O concentran una superficie de 13,3 y 11,2 % respectivamente.

Las horas de sol en el área de estudio (calculadas para el 31 de marzo) son, en general, bastante homogéneas debido a la propia amplitud del valle glaciario que, a diferencia de los fluviales, tienen vertientes muy separadas que no impiden el paso de la luz del sol. Las vertientes de la carretera tienen una radiación más heterogénea que el resto del área de estudio, presentando zonas de entre 1 y hasta 8 horas.

3.2. Factores climáticos

Los factores climáticos son, junto con las pendientes, los condicionantes elementales para el desencadenamiento de aludes, ya que de ellos dependen el aporte de nieve y el grosor que alcanzará el manto nival. Los escasos datos locales de los que se disponen indican una media de 8,6 °C de temperatura anual y unas precipitaciones de 1.587 mm con máximos en enero, febrero y noviembre. Se corresponderían con los de un clima templado húmedo con verano cálido. Somiedo apenas se encuentra a 70 km de distancia en línea recta de la costa por lo que las masas de aire llegan aún cargadas de humedad, causando grandes precipitaciones, especialmente en cotas superiores a los 1.000 m s.n.m., donde aumenta la probabilidad de que estas sean en forma de nieve. La entrada de perturbaciones y borrascas que se forman en el Atlántico norte y tienen una tendencia oeste-este durante buena parte del año favorece las nevadas en los periodos fríos. Las temperaturas medias mensuales son superiores en todos los meses a los 0 °C, registrando siempre un mínimo en el mes de febrero cercano a los 0-1 °C. En más de la mitad del año se presentan temperaturas inferiores a los 5 °C y apenas alcanzan los 10 en los meses estivales.

El análisis de los datos del INDUROT del 1970-1985 nos muestra de que todos los meses de primavera, otoño e invierno se produce al menos una nevada al mes, destacando febrero y marzo como los meses con más días de nieve. Los días de nieve se han estimado con la media de las temperaturas, señalando como día de nieve aquellos con temperatura media inferior a 2 °C y con registro de precipitaciones: esta temperatura, en condiciones de abundante humedad, es la necesaria para la precipitación en forma de nieve (National Geographic, 2018). Atendiendo al patrón y la intensidad de las nevadas, observamos como estas suelen producirse a lo largo de varios días seguidos, durante una o dos semanas. Los temporales de nieve se suceden en una media de 7,3 días, destacando el temporal del 27 de enero al 12 de febrero de 2014, cuando se registraron 17 días seguidos de precipitación en forma de nieve. Las acumulaciones nos indican importantes registros de espesores, con hasta 274 mm en 10 días. La transformación de mm a centímetros de nieve supone una relación de 1:10 a 1:13, dependiendo de las condiciones de humedad y la densidad de la nieve (McClung y Schaerer, 1996 como se citó en Vilar y Salvador, 2001). Esto supone que un mm de lluvia equivale entre 1 y 1,3 cm de nieve en función de las condiciones de humedad que se presenten. Nos encontramos así con temporales de nieve en este sector que han acumulado más de 2 metros en tan solo 10 días.

Atendiendo a los datos de Genestoso analizados en Beato *et al.* (2019) observamos como las precipitaciones en forma de nieve durante el periodo de 2010-2015 se producían entre 30 y 60 días

al año, datos muy similares a los registrados en La Peral. Lo mismo sucede con los espesores de nieve, que alcanzan fácilmente el metro en los meses más fríos.

3.3. Cartografía de susceptibilidad y vulnerabilidad por aludes

La alta susceptibilidad engloba las zonas situadas a más de 1.000 m s.n.m., con pendientes superiores a los 30° y sin cubierta vegetal de porte arbóreo, que suman 6,44 km² con los sectores identificados mediante trabajo de campo y otras técnicas. Las de media susceptibilidad son aquellas áreas que presentan las mismas características que las anteriores, pero con presencia de arbolado disperso, representando una superficie muy reducida, de apenas 16,9 ha (0,16 km²). Las áreas de baja susceptibilidad engloban las superficies por encima de 900 m s.n.m., con una pendiente superior a los 30° de inclinación y con cualquier tipo de vegetación, concentrando 2,19 km². Por último, las de muy baja susceptibilidad se sitúan sobre superficies con pendientes inferiores a los 30° y a cualquier altura, correspondiéndose con un total de 11,75 km².

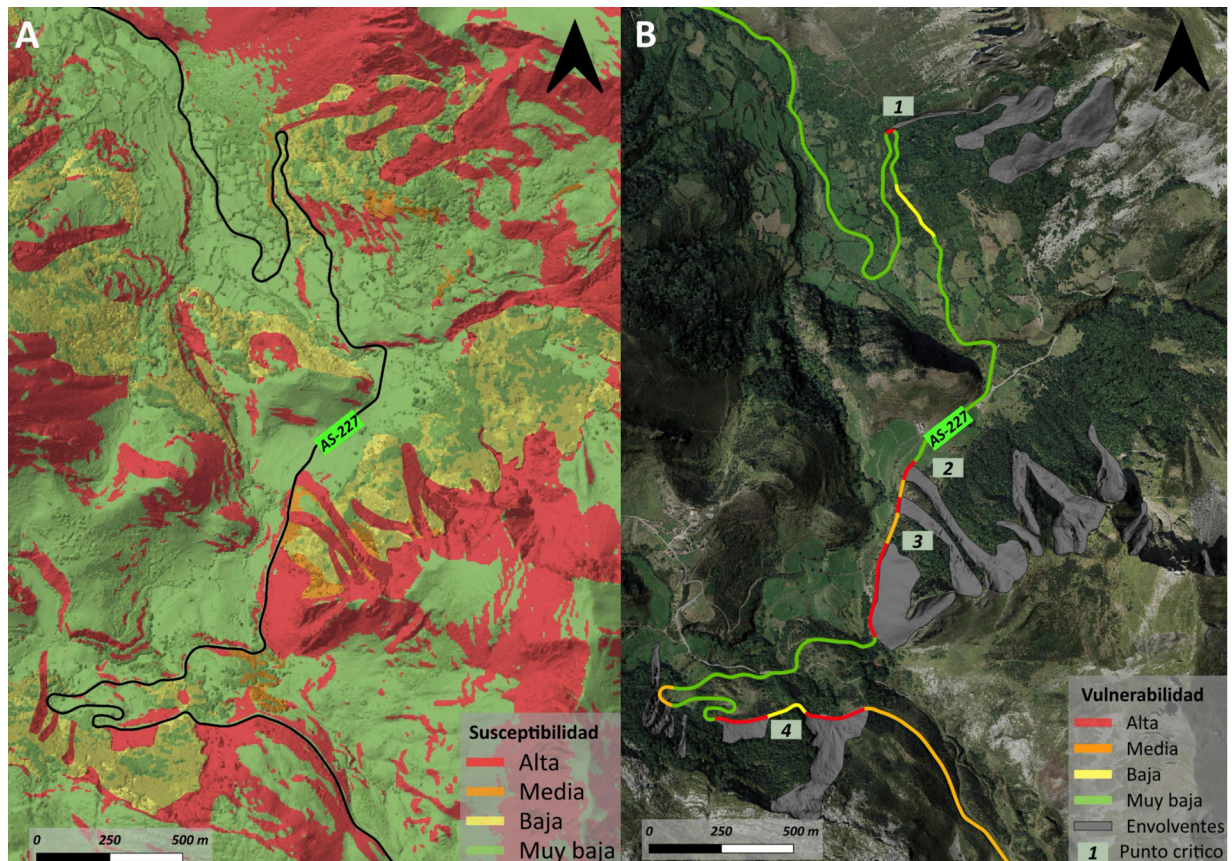
En la cartografía de susceptibilidad se pueden apreciar, además, los puntos más susceptibles y cercanos a la carretera, principalmente en el primer trazado sinuoso de curvas sobre el movimiento en masa del Llamardal (p.k. 45), en el extremo occidental de la Sierra de Robezo, antes del desvío de La Peral (p.k. 47) y en las Curvas del Nisaléu (p.k. 48). Así pues, se ha realizado un mapa de vulnerabilidad de la carretera teniendo en cuenta los tramos coincidentes con las zonas de caída de aludes identificadas además de aquellos tramos que, dada su inclinación y tras la confirmación a través de entrevistas, se han constatado como puntos de aludes recurrentes (Fig. 3).

En el mapa de vulnerabilidad de la carretera se han establecido 4 categorías distintas. Se observan así 4 sectores de vulnerabilidad muy alta, con un total de 792,3 metros de distancia. El primero se encuentra en el punto kilométrico 45, donde la calzada realiza varias curvas cerradas a fin de remontar el movimiento en masa del Llamardal. En este lugar se encuentra la canal de aludes más larga que se ha identificado en el área de estudio, con un total de 410 metros de recorrido. En este punto, la canal de aludes desciende justo en el borde la curva de la carretera, precipitando sobre la carretera.

Al sureste de esta canal aparecen sendas zonas con gran actividad por procesos de modelado de vertientes y aludes que no afectan, en principio, a la carretera. No obstante, el bosque que separa las áreas de llegada de los aludes de la carretera está afectada por dicha actividad que, por lo tanto, tendría que ser tenida en cuenta a pesar de que en el análisis de vulnerabilidad aparezca como de susceptibilidad media.

El segundo tramo más vulnerable se corresponde con el p.k. 47. de la carretera. En este sector, la inclinación de la vertiente junto con la falta de vegetación de porte arbóreo facilita el continuo desencadenamiento de aludes. Además, encontramos en este punto varias canales, algunas de gran tamaño y origen mixto (estructural, fluviotorrencial, nivoperiglaciario) propicias para el deslizamiento de aludes.

Figura 3. Composición con los mapas de susceptibilidad (A) y vulnerabilidad de la carretera (B).



Fuente: MDT05 y Ortofoto 2020 Hoja 076 del IGN. En B: 1. P.k. 45; 2 y 3. P.k. 47; 4. Curvas del Nisaléu. Elaboración propia.

En el entorno de las Curvas del Nisaléu se aprecia un tramo de susceptibilidad media al concentrar pequeñas canales de génesis mixta entre los hayedos que desembocan sobre la calzada. A continuación, encontramos el tramo con más vulnerabilidad de toda la carretera afectado por aludes recurrentemente. Esta actividad se ve favorecida por la situación topográfica sobre la cicatriz formada por el movimiento en masa de La Peral, teniendo la morfología cóncava y desnuda propicia para la acumulación de nieve y con una orientación que recibe gran cantidad de precipitaciones y viento. El continuo desencadenamiento de aludes a lo largo de todos los años y los pequeños deslizamientos impiden la fitoestabilización de la ladera.

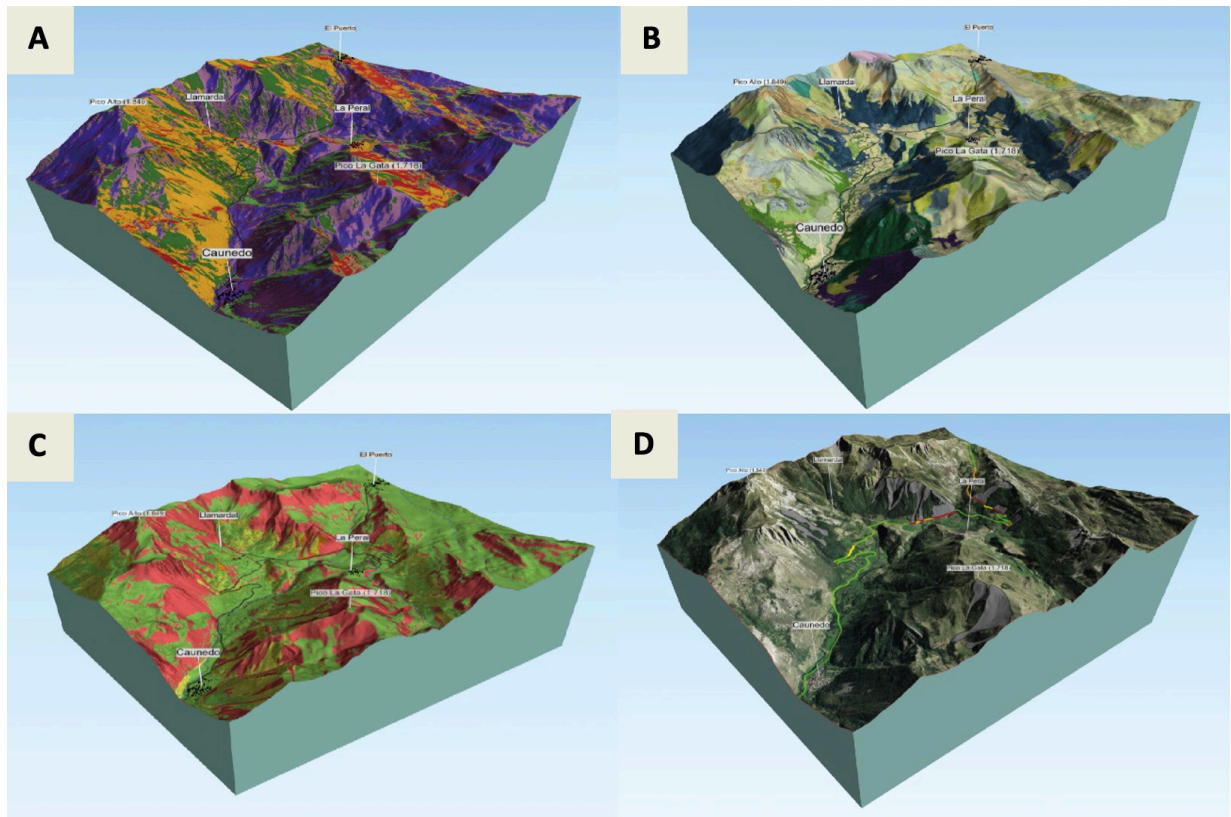
Las noticias del corte del puerto en este sector son habituales en los temporales invernales, ya no por la presencia de grandes aludes de fondo con nieve húmeda, sino por la propia precipitación del manto nival a causa de su gran espesor y la inclinación de la ladera. A partir de este punto y casi hasta el kilómetro 50 la carretera posee un nivel alta y media vulnerabilidad al presentar importantes pendientes sin vegetación arbórea. Cuando el trazado alcanza la recta de Santa María del Puerto, la susceptibilidad de aludes sobre la carretera es nula debido a que la carretera se encuentra alejada de las vertientes.

3.4. Desarrollo de herramientas de realidad aumentada para el análisis y prevención de la susceptibilidad por aludes

Con toda la cartografía desarrollada se han realizado varios bloques 3D con el fin de permitir a las personas encargadas de la gestión de la carretera y usuarias en general interactuar con ellos y

entender los aspectos más importantes de esta investigación (Fig. 4). De este modo, se han publicado en los servidores del Observatorio del Territorio de la Universidad de Oviedo el mapa de vegetación y el de susceptibilidad de aludes sobre un sombreado realizado con el MDE 02, para poder así realizar consultas.

Figura 4. Composición con capturas de los materiales disponibles en RA.



Fuente: MDT05 y Ortofoto 2020 Hoja 076 del IGN. Capturas de pantalla de los bloques 3D digitales. A) Mapa de orientaciones. https://www.observatoriodelterritorio.es/rarv/Articulos/somiedoaludes/Modelo_Ori/; B) Mapa de vegetación. https://www.observatoriodelterritorio.es/rarv/Articulos/somiedoaludes/Modelo_Veg/; C) Mapa de susceptibilidad. https://www.observatoriodelterritorio.es/rarv/Articulos/somiedoaludes/Modelo_Sub/; D) Mapa de vulnerabilidad. https://www.observatoriodelterritorio.es/rarv/Articulos/somiedoaludes/Modelo_Pel/. Elaboración propia.

Además del desarrollo de bloques diagramas en 3D se ha realizado un vídeo utilizando la herramienta de edición de Google Earth en donde se hace un vuelo virtual sobre el valle observando las capas del mapa de susceptibilidad. En este vídeo, además, una voz en *off* comenta los aspectos más interesantes para que así cualquier usuario pueda entender de forma concisa y visual los resultados más importantes de la investigación. El vídeo se ha colgado también en los servidores del Observatorio del Territorio además de en una cuenta de la plataforma *Youtube*, con el fin de hacer la información accesible. Desde el propio vídeo se puede acceder a un archivo *Google Drive* con las capas SIG.

Por último, siguiendo las ideas de rutas paisajísticas, se ha creado a través de la aplicación de *3DVista* un tour virtual¹ con fotografías 360° de los puntos más críticos en el ascenso al puerto. Además, se han añadido audios explicativos e imágenes tanto de los aludes como de otros as-

1. <https://www.observatoriodelterritorio.es/rarv/Articulos/somiedoaludes/>

pectos naturales. De esta forma, al igual que con las dos técnicas anteriores, permite al usuario observar el entorno de forma didáctica y explicativa, a modo de *tour* guiado.

4. Discusión

Los aludes en la Cordillera Cantábrica constituyen un riesgo sobre infraestructuras, propiedades y personas, especialmente, en las áreas de media montaña y en las vías de comunicación intramontañas (Beato, Poblete y Marino, 2018 y 2019). La metodología propuesta por Poblete, Beato, & Marino (2016), implementada por dichos autores en diversos puntos del Macizo Asturiano (ver, por ejemplo, Poblete, Beato, & Marino, 2019 y 2021) y seguida en buena medida en esta investigación, señala de forma precisa los lugares concretos donde se producen aludes, permitiendo posteriormente una correcta gestión territorial. El trabajo de campo y la escala de análisis, mucho más detallada que la de estudios regionales pioneros e imprescindibles como el de Marquínez *et al.* (2003) que sirven para un primer acercamiento, son fundamentales para la determinación real de la susceptibilidad por aludes. En este sentido, es necesaria la extensión de este tipo de investigaciones a otros puntos de estas montañas, así como la ampliación y mejora de las fuentes de datos, para minimizar los riesgos y evitar pérdidas humanas y materiales (La Voz de Asturias, 2/1/2021). La escasez de datos climáticos y estaciones meteorológicas adecuadas para emitir señales de alerta impide un conocimiento preciso del factor meteorológico en la generación de aludes para prevenir eventos catastróficos (Poblete, Beato y Marino, 2019) a pesar de que se pueden pronosticar las nevadas y situaciones atmosféricas posteriores que favorecen el desarrollo de aludes que van a afectar a las carreteras (AEMET, 2022). Las instituciones públicas, en todo caso, tienen el deber de conocer de forma exhaustiva su territorio y establecer las medidas necesarias para su correcta gestión.

En efecto, casi todos los años se producen nevadas en cuantía suficiente para sepultar algunas carreteras de puertos de montaña como Somiedo y para que se desencadenen aludes, cerrando el paso y provocando accidentes, por el propio peso del manto nival o por su desestabilización. Nieve en cantidad suficiente y pendientes adecuadas constituyen el factor principal en la Cordillera Cantábrica a pesar de que la altitud, la orientación de la ladera y la diferente cubierta vegetal puedan modificar el comportamiento de los aludes.

La exposición de las carreteras a los riesgos naturales supone la necesidad de crear medidas que eviten o mitiguen los daños sobre las infraestructuras y vidas humanas. En la carretera AS-227 encontramos a la altura de las Curvas del Nisaléu (entre los p.k. 48 y 49) un muro de protección para evitar la llegada de los aludes a la calzada (Fig. 5). Sin embargo, tras las entrevistas con personal de la administración pública se ha conocido la intención de instalar unas mallas de acero galvanizado en 4 puntos distintos de uno de los sectores afectados de la carretera (dos niveles de mallas de 3,5 m de alto para fraccionar el manto nival y frenar su desplazamiento). Estas infraestructuras no suelen tener mucho efecto sobre canales de gran tamaño y con aludes de fondo de nieve húmeda, sin embargo, para este sector, parece una medida adecuada debido a que los aludes son de pequeño tamaño. También se instalarán, en el arcén de la calzada contigua a la ladera, unos muros de hormigón armado semejantes a los ya instalados para que frenen el avance de la nieve en caso de que falle la protección de las mallas.

Pese a que las intervenciones que se van a acometer solventarán en gran medida el problema más repetido en el puerto, lo cierto es que no cubre todos los sectores afectados por aludes y otros procesos geomorfológicos activos. En el proyecto gran parte de la ladera en las Curvas del Nisaléu

quedará sin ningún tipo de protección, sobre todo la parte central que presenta varias canales. Sería conveniente la instalación de las mismas medidas de seguridad en todo el tramo señalado de vulnerabilidad alta con el fin de desarrollar una solución más completa.

Figura 5. Imágenes de un sector de las Curvas del Nisaléu. A. Maquinaria y personal trabajando en la limpieza de la carretera tras la caída de aludes. B. Barrera de protección de la carretera instalada posteriormente en el mismo punto.



Fuente: A. La Voz del Trubia (29/03/2018). B. Elaboración propia.

Por otra parte, los habitantes de Somiedo han propuesto la instalación de viseras antialudes, que se llegó a plantear por parte de la Administración y que solucionaría el problema en este sector por completo. Sin embargo, los costes tan elevados de estas obras y el impacto paisajístico de tal infraestructura en pleno Parque Natural suponen un gran inconveniente.

Además del problema de los aludes, varios sectores de la carretera se encuentran afectados por el impacto de fragmentos de rocas heterométricas en la calzada. Se observan sobre el asfalto multitud de daños, especialmente, en el segundo tramo de alta vulnerabilidad, entre los kilómetros 46.5 y 47.5, a causa de cantos que se precipitan por la ladera. La caída de estos materiales sobre los vehículos puede llevar a la pérdida del control de este o al aplastamiento. Además, también se suceden sobre la calzada pequeños movimientos de tierras o *argayos* que pueden llegar a impedir el paso o la desestabilización del vehículo. Una propuesta para evitar parte de estos riesgos es la instalación en este sector de unas mallas de acero galvanizado de pequeño radio de apertura que impida el paso tanto de fragmentos de roca de pequeño tamaño como de aludes sobre la calzada.

Por otro lado, a partir de la curva del Llamardal la calzada es afectada por la concurrencia de canales torrenciales provenientes de la base de los circos glaciares. Se han desarrollado movimientos en masa junto con *debris flow*, uno de especial tamaño, que han generado conos de deyección sobre los que se sitúa la carretera. Esta dinámica causa flujos de materiales heterométricos que discurren en conjunto llegando a realizar una erosión lineal muy competente sobre el sustrato. Con abundantes precipitaciones se pueden llegar a constituir flujos de gran poder destructivo, tal y como se puede apreciar en las imágenes aéreas más antiguas y rescatar de las entrevistas.

En cuanto a los movimientos en masa, dada la magnitud e inmediatez de estos fenómenos, suponen un gran riesgo pues se trata de miles de metros cúbicos de materiales que, en función del entorno, pueden llegar a causar el sepultamiento de poblaciones e inundaciones a causa de la obturación de los ríos (Morages et al., 2021). El riesgo de movimientos en masa y desprendimientos

aún se mantiene en el valle de Somiedo (Marquínez *et al.*, 2003) por lo que es un peligro que se ha de tener en cuenta dada las consecuencias que pueden generar. Además, las abundantes precipitaciones (como las que se registran en la zona) pueden llegar a ser un factor desencadenante de estos grandes y complejos procesos (Valenzuela *et al.*, 2015).

La utilidad de la RA para la divulgación de los resultados de investigaciones científicas y trabajos académicos ha sido puesta de manifiesto ya en diversos campos (ver, *p.e.*, Beato *et al.*, 2020). Esto, unido a aplicaciones móviles y gracias a las tecnologías de localización geográfica contribuye a la prevención de riesgos naturales como los generados por los aludes (Pérez, Querol y Marturià, 2013). La implementación de este tipo de propuestas puede suponer un factor diferencial a la hora de proteger a la población y los transeúntes de espacios de montaña. Además, la RA ayuda a interpretar los procesos naturales y el territorio por lo que es una útil herramienta para las personas encargadas de su gestión.

5. Conclusiones

La recurrencia de eventos meteorológicos extremos junto con el crecimiento orgánico de nuestras sociedades hace que los riesgos naturales cada vez sean más continuados, imprevistos y devastadores, por lo que crece la necesidad de una planificación territorial precisa, a fin de evitar o mitigar la exposición a estos riesgos. Las carreteras de los puertos de montaña son tránsitos peligrosos por su propia idiosincrasia, pero aún más por la dinámica de las laderas por las que transcurren. En el marco de esta actividad geomorfológica y la Cordillera Cantábrica los aludes constituyen uno de los principales agentes que incrementan la vulnerabilidad de las carreteras.

En este sentido, la investigación realizada en Somiedo muestra una susceptibilidad alta para el desencadenamiento de aludes en un 31,39 % del área de estudio. Dicha susceptibilidad afecta directamente a la calzada de la AS-227, observándose hasta 6 puntos de vulnerabilidad alta sobre esta: 4 de media y 2 de baja. El trabajo de campo y la fotointerpretación han permitido observar los efectos de esta actividad nivológica sobre la vegetación y el relieve, así como constatar la presencia de canales de aludes entre las formaciones arbóreas, cuestión que manifiesta la necesidad de realizar un reconocimiento minucioso del territorio para su planificación.

Por otro lado, las medidas de protección actuales y previstas para la carretera son oportunas, al proteger de forma eficiente la carretera. Sin embargo, destacan algunos puntos y un largo tramo sobre las Curvas del Nisaléu que carecen de protección y que no tienen previsto ningún tipo de medida. Es por ello, por lo que es necesario este tipo de análisis que permitan, a través de los métodos clásicos de investigación junto con el SIG y la RA, identificar los puntos críticos para poder proponer la realización de las actuaciones oportunas que solventen la problemática detectada. Además, la RA y la divulgación de materiales gráficos combinados con descripciones en audio y vídeo pueden facilitar la comprensión de la persona receptora, haciendo de la lectura e interpretación de la información un método interactivo que favorezca el conocimiento de riesgos naturales como los aludes y su desarrollo en áreas concretas.

Bibliografía

- AEMET & IPMA (2011). *Atlas climático ibérico/Iberian climate atlas*. Agencia Estatal de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente y Rural y Marino, Instituto de Meteorología de Portugal.

- AEMET (2022). Boletín de peligro de aludes. En *Agencia Estatal de Meteorología*. Recuperado de/Retrieved from https://www.aemet.es/es/eltiempo/prediccion/montana/boletin_peligro_aludes
- Anadón Álvarez, R., Roqueñí Gutiérrez, N., López García, E., Abanades García, C., Alba Alonso, J., Álvarez García, M. A., ... & Zapatero Rodríguez, M. A. (2009). *Evidencias y efectos potenciales del cambio climático en Asturias*. Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio e Infraestructuras. Viceconsejería de Medio Ambiente, Oficina para la Sostenibilidad, el Cambio Climático y la Participación. Gobierno del Principado de Asturias.
- Beato, S., Poblete, M. A., & Marino, J. L. (2017). “El efecto de los aludes de nieve en las formaciones vegetales de la vertiente oriental de la Sierra del Aramo (Macizo Central Asturiano)”. En *Asociación de Geógrafos Españoles. Congreso 25º. 2017. Madrid* (pp. 70–79). <https://doi.org/10.15366/ntc.2017>
- Beato, S., Poblete, M. A., & Marino, J. L. (2018). Snow avalanche susceptibility in the eastern hillside of the Aramo Range (Asturian Central Massif, Cantabrian Mountains, NW Spain). *Journal of Maps*, 14:2, 373-381. <https://doi.org/10.1080/17445647.2018.1480974>
- Beato, S., Poblete, M. A., & Marino, J. L. (2019). Snow avalanches, land use changes, and atmospheric warming in landscape dynamics of the Atlantic mid-mountains (Cantabrian Range, NW Spain). *Applied Geography*, 107, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.04.007>
- Beato, S., Poblete, M. A., Herrera, D., Marino, J. L., & Fernández, F. (2020). Carreteras paisajísticas y realidad aumentada en la Sierra del Aramo (Macizo Central Asturiano). *Ería*, 40(2), 145-166. <https://doi.org/10.17811/er.2.2020.145-166>
- Castañón, J. C. (1984). Sobre el modelado originado por los aludes de nieve en el prau de Alvo (alto Huerna, Asturias). *Eria. Revista cuatrimestral de geografía.*, 6, 106–112. Recuperado de/Retrieved from <https://reunido.uniovi.es/index.php/RCG/article/download/926/855>
- Castañón, J. C. (1989). Las formas de relieve de origen glaciario en los sectores central y oriental del Macizo Asturiano [Tesis Doctoral de la Universidad de Oviedo].
- Embleton, C., & Thornes, J. (1979). *Process in Geomorphology* (1.ª ed.). Arnold-Heinemann Publishers.
- Frochoso, M., & Castañón, J. C. (1997). El relieve glaciario de la Cordillera Cantábrica. En A. Gómez & A. Pérez (Eds.), *Las huellas glaciares de las montañas españolas* (pp. 65-139). Universidad de Santiago de Compostela.
- Frochoso, M. (2017). Erosión del pasado y formas de relieve actuales en la Montaña Cantábrica. *Ería. Revista Cuatrimestral de Geografía*, 3(3), 368–370. <https://doi.org/10.17811/er.3.2017.368-370>
- Furdada, G. (1996): Estudi de les allaus al Pirineu occidental de Catalunya: predicció espacial i aplicacions de la cartografia. [Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona].
- García-Hernández, C., Ruiz-Fernández, J., Sánchez, C., & Poblete, M. A. (2014). El impacto del episodio avalanchoso de 1888 en el Macizo Asturiano, a través de la prensa. *Avances, métodos y técnicas en el estudio del periglaciario*, 55-63. Recuperado de/Retrieved from <http://hdl.handle.net/10651/39148>
- García-Hernández, C., Ruiz-Fernández, J., Sánchez-Posada, C., Pereira, S., Oliva, M., & Vieira, G. (2017). Reforestation and land use change as drivers for a decrease of avalanche damage in mid-latitude mountains (NW Spain). *Global and Planetary Change*, 153, 35–50. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.05.001>
- García-Hernández, C., Ruiz-Fernández, J., & Pereira, S. (2017). El efecto de los cambios en la cubierta vegetal sobre la evolución de los daños por aludes en el Macizo Asturiano. *Cuaternario y Geomorfología*, 31(3–4), 97–112. <https://doi.org/10.17735/cyg.v31i3-4.58396>
- García Hernández, C., Ruiz, J., & Rodríguez, F. (2019). El fenómeno de los aludes a través de un itinerario didáctico en la Montaña Cantábrica. *Cuadernos Geográficos*, 58(2). <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v58i2.7293>
- González, A., Loredó, E., Herrera, D., & Sevilla, J. (2020). Realidad Aumentada con aprovechamiento turístico: una aplicación para el Camín Real de la Mesa (tramo somedano). *ROTUR. Revista de Ocio y Turismo*, 14(1), 47–59. <https://doi.org/10.17979/rotur.2020.14.1.5943>
- La Nueva España (29/11/2021). “El Puerto de Somiedo, bajo la nevada “de noviembre a marzo””. <https://www.lne.es/asturias/2021/11/29/puerto-somiedo-nevada-noviembre-marzo-60089662.html>
- La Voz de Asturias (2/1/2021). “ Un informe científico alertaba ya del elevado riesgo de aludes en San Isidro”. <https://www.lavozdeasturias.es/noticia/asturias/2021/01/02/informe-cientifico-alertaba-elevado-riesgo-aludes-san-isidro/00031609613536832656240.htm>
- La Voz del Trubia (29/03/2018). “ Tres aludes bloquean en el puerto de Somiedo a decenas de turistas”. <https://lavozdeltrubia.es/2018/03/29/tres-aludes-bloquean-en-el-puerto-de-somiedo-a-decenas-de-turistas/>

- Marino, J. L., Poblete, M. A., Beato, S., & Herrera, D. (2021). Itinerario geográfico con realidad aumentada a través del paisaje natural en los Arribes del Duero zamoranos (Castilla y León, España). *Ería*, 41(1), 5-28. <https://doi.org/10.17811/er.1.2021.5-28>
- Marquínez, J., Menéndez, R., Lastra, J., Fernández, E., Jiménez-Alfaro, B., & Wozniak, E. (2003). *Riesgos naturales en Asturias*. Indurot, Universidad de Oviedo & KRK Ediciones.
- Mases, M. (1991). Estudi geomorfològic de la dinàmica nival i rise d'allaus a la Vallferrera (pallars Sobirà). Tesis de licenciatura. Dpt. de Geologia Dinàmica, Geofísica y Paleontología de la Universitat de Barcelona. Inédita. 129 pp.
- Mases, M. (1997): Analyse et modelisation de la distribution spatiale de la neige transportee par le vent. [Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona].
- Menéndez, R. A. (1995): Geomorfología del área de Somiedo (Cordillera Cantábrica, N de España): aplicaciones de los sistemas de información geográfica al estudio del relieve [Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo]. Repositorio de Tesis de la Universidad de Oviedo. Biblioteca Universitaria.
- Menéndez, R. A., & Marquínez, J. (1996). Glaciarismo y evolución tardiglaciaria de las vertientes en el Valle de Somiedo. Cordillera Cantábrica. *Cuaternario y Geomorfología*, 10(3-4). Recuperado de/Retrieved from [http://tierra.rediris.es/CuaternarioyGeomorfologia/images/vol10_2/cuaternario10\(3-4\)_02_.pdf](http://tierra.rediris.es/CuaternarioyGeomorfologia/images/vol10_2/cuaternario10(3-4)_02_.pdf)
- Muñoz, J. (1980). Morfología estructural y glaciarismo en la Cordillera Cantábrica: el relieve sinclinal de Saliencia. *Ería. Revista Cuatrimestral de Geografía*, 1(1), 35-65. <https://doi.org/10.17811/er.0.1980.35-65>
- Muñoz, J., (1982). *Geografía de Asturias*. Ayalga Ediciones. Oviedo
- Julián, A., Peña, J. L., Chueca, J., Zabalza, J., Lapena, A. y López, J. I. (2001). Cartografía de zonas probables de aludes en el Pirineo aragonés: metodología y resultados. *Boletín de la A.G.E.*, 30, 119-134. <https://bage.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/view/376>
- Pérez, M., Querol, N. & Marturià, J. (2013). *Desarrollo de aplicación para dispositivo móvil con software libre para el uso en zonas de alud*. Recuperado de/Retrieved from <https://dugi-doc.udg.edu/bitstream/handle/10256/7642/4Art-Alud.pdf?sequence=1>
- Poblete, M. A., Beato, S., & Marino, J. L. (2016). “Los aludes de nieve en el Alto Aller: su incidencia en la carretera AS-253 del Puerto de San Isidro (Macizo Central Asturiano)” En J.J. Durán, M. Montes, A. Robador & A. Salazar (Eds.), *Comprendiendo el relieve: del pasado al futuro* (pp. 751-758). Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. Recuperado de/Retrieved from <http://hdl.handle.net/10651/38219>
- Poblete, M. A., Beato, S., & Marino, J. L. (2019). El riesgo de aludes en el Alto San Isidro (Macizo Central Asturiano): La vulnerabilidad de la carretera AS-253. *Cuaternario y Geomorfología*, 33(3-4), 79-104. <https://doi.org/10.17735/cyg.v33i3-4.72057>
- Poblete, M. A., Beato, S., & Marino, J. L. (2021). Snow avalanches in the Middle Mountains of the Asturian Central Massif. En R.M. Reales (Ed.), *Recent Developments in Geomorphology* (pp. 35 - 58). Nueva York: Nova Science Publishers.
- Poblete, M. A., Beato, S., Marino, J. L., & Herrera, D. (2022). Geoturismo con realidad aumentada en la zona volcánica del Campo de Calatrava (Ciudad Real). *Ería*, 42(1), 73-106. <https://doi.org/10.17811/er.2022.2022.73-106>
- Pradhananga, D., & Pomeroy, J. W. (2022). Diagnosing changes in glacier hydrology from physical principles using a hydrological model with snow redistribution, sublimation, firnification and energy balance ablation algorithms. *Journal of Hydrology*, 608, 127545. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127545>
- Radio Televisión del Principado de Asturias (3/3/2018). “Más de 360.000 euros se invertirán en muros antialudes en el Puerto de Somiedo”. https://www.rtpa.es/noticias-asturias:Mas-de-360.000-euros-se-invertiran-en-muros-antialudes-en-el-Puerto-de-Somiedo_111520078414.html
- Rodríguez, C. (2016). *El relieve de la montaña central asturiana: la sierra de Sobia y el macizo de Somiedo* (1.ª ed.). Real Instituto de Estudios Asturianos. <https://doi.org/10.18002/pol.v0i28.4300>
- Schneebeli, M., & Bebi, P. (2004). Snow and avalanche control. En J. Burley, J. Evans, & J.A. Youngquist (Eds.), *Encyclopedia of Forest Sciences* (pp. 397-402). Oxford: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-145160-7/00271-4>
- Teich, M., Marty, C., Gollut, C., Grêt-Regamey, A., & Bebi, P. (2012). Snow and weather conditions associated with avalanche releases in forests: Rare situations with decreasing trends during the last 41 years. *Cold Regions Science and Technology*, 83-84, 77-88. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.06.007>
- 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. <https://doi.org/10.18172/cig.1224>

- Serrano, E., Lende, M. G., & Pisabarro, A. (2016). Nieve y riesgo de aludes en la Montaña Cantábrica. El alud de Cardaño de Arriba, Alto Carrión (Palencia). *Polígonos. Revista de Geografía*, núm. 28, p. 239-264. <https://doi.org/10.18002/pol.v0i28.4295>
- Serrano, E., Lende, M. G., & Pisabarro, A. (2017). Los aludes y su peligrosidad en Alto Campoo (Montaña Cantábrica): el mapa de riesgo de aludes. *Neus i allaus*, 9, p. 4-11. Recuperado de/Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/336956006_Los_aludes_y_su_peligrosidad_en_Alto_Campoo_Montana_Cantabrica_el_mapa_de_riesgo_de_aludes
- Vada, J. A., Frochoso, M., & Vilaplana, J. M. (2012). Evaluación y cartografía del riesgo de aludes en el camino PR-PNPE 21 de acceso a la Vega de Urriellu. Picos de Europa (noroeste de España). *Cuaternario y Geomorfología*, 26(1-2), 29-47. Recuperado de/Retrieved from <https://recyt.fecyt.es/index.php/CUGEO/article/view/18523>
- Vilar, F., & Salvador, F. (2001). Caracterización de episodios de nevadas intensas en el Pirineo oriental catalán. En A.J. Pérez Cueva, E. López Baeza, & J. Tamayo Carmona (Eds.), *El tiempo del clima* (págs. 423-434). Valencia: Asociación Española de Climatología.
- Wayand, N.E., Marsh, C.B., Shea, J.M., & Pomeroy, J.W. (2018). Globally scalable alpine snow metrics. *Remote Sens. Environ.* 213, 61-72. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.012>.
- Wozniak, E., & Marquínez, J. (2004). Evaluación de la susceptibilidad por aludes de nieve a escala regional: el caso de Asturias. En G. Benito, & A. Díez (Eds.), *Riesgos Naturales y Antrópicos en Geomorfología* (págs. 509-518). Toledo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Universidad de Castilla-La Mancha.

Tour virtual

<https://www.observatoriodelterritorio.es/rarv/Articulos/somiedoaludes/>

Bloque con el mapa de orientaciones

https://www.observatoriodelterritorio.es/rarv/Articulos/somiedoaludes/Modelo_Ori/

Bloque con el mapa de vulnerabilidad

https://www.observatoriodelterritorio.es/rarv/Articulos/somiedoaludes/Modelo_Pel/

Bloque con el mapa de pendientes

https://www.observatoriodelterritorio.es/rarv/Articulos/somiedoaludes/Modelo_Pen/

Bloque con el mapa de horas de sol

https://www.observatoriodelterritorio.es/rarv/Articulos/somiedoaludes/Modelo_Sol/

Bloque con el mapa de susceptibilidad

https://www.observatoriodelterritorio.es/rarv/Articulos/somiedoaludes/Modelo_Sub/

Bloque con el mapa de vegetación

https://www.observatoriodelterritorio.es/rarv/Articulos/somiedoaludes/Modelo_Veg/

Vídeo explicativo (YouTube)

<https://www.youtube.com/watch?v=iyWTacQGcmY>

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a Belarmino Fernández Fervienza, alcalde de Somiedo, y al resto del equipo municipal; a la dirección de la Consejería de Infraestructuras del Principado de Asturias; a Marité Lana Díaz y el equipo del Ecomuseo de Somiedo; a Javier Rodríguez, miembro de la Asociación Noromet, así como a todas las personas que colaboraron en las entrevistas y con el acopio de datos e información.

Contribución de autorías

Conceptualización, análisis formal, investigación, recursos, preparación del borrador original, redacción, revisión y edición: E.V.G., S.B.B., C.R.P y D.H.A. Cartografía: E.V.G. Materiales de Realidad Aumentada: E.V.G. y D.H.A.

Financiación

Ayudas para grupos de investigación de organismos del Principado de Asturias durante el periodo 2021-2023 (SV-PA-21-AYUD/2021/52140). Fundación para la investigación científica y técnica FICYT.

Conflicto de intereses

Los/as autores/as de este trabajo declaran que no existe ningún tipo de conflicto de intereses.