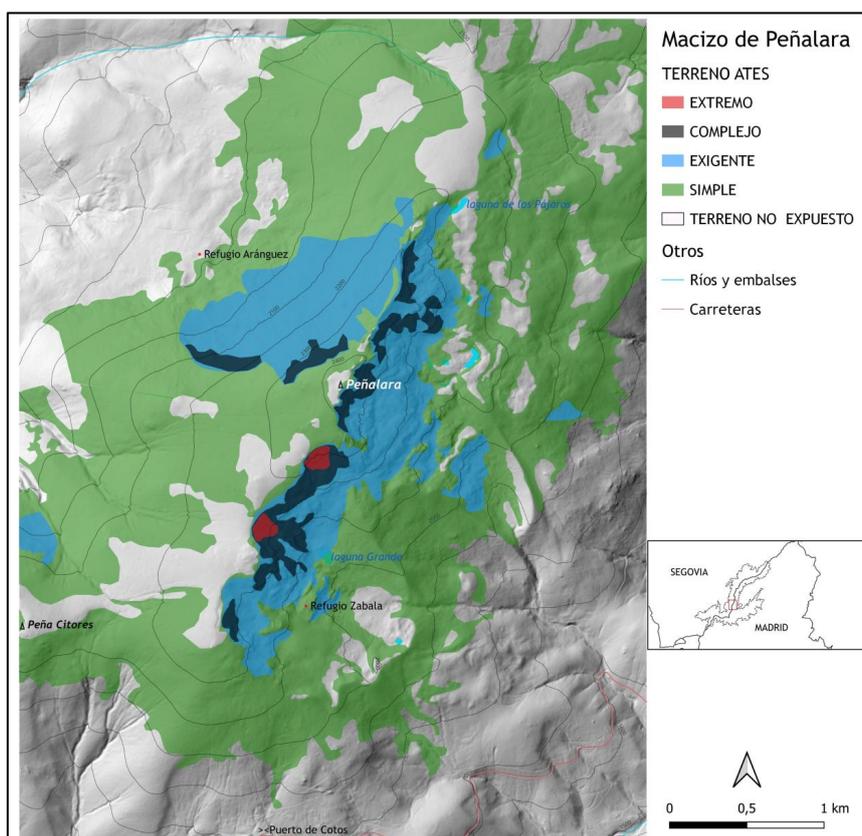


MAPA DE CLASIFICACIÓN DEL TERRENO POR EXPOSICIÓN AL PELIGRO DE ALUDES (ATES) DE LA SIERRA DE GUADARRAMA



Nota técnica 44 de AEMET Versión 1.0

Alberto PANTOJA DORDA
Luis PANTOJA TRIGUEROS
Juan Antonio FERNÁNDEZ-CAÑADAS LÓPEZ PELÁEZ
Andrés CHAZARRA BERNABÉ



Madrid, 2025

TÍTULO

Mapa de clasificación del terreno por exposición al peligro de aludes (ATES) de la sierra de Guadarrama

AUTORES

Alberto Pantoja Dorda
Luis Pantoja Trigueros
Juan Antonio Fernández-Cañadas López Peláez
Andrés Chazarra Bernabé

pantojaski@gmail.com, lpantojat@gmail.com, jtcanadas@gmail.com, achazarrab@aemet.es

© del texto, imágenes y fotografías: los autores, excepto donde se indique otra fuente.

PORTADA

Clasificación ATES v.2 del macizo de Peñalara. Elaboración propia.

AGRADECIMIENTOS

Dedicado a Esther Miquel Pericas, compañera que tanta ayuda nos proporcionó y que nos dejó antes de acabar este trabajo.



Aviso Legal: los contenidos de esta publicación podrán ser reutilizados, citando la fuente y la fecha, en su caso, de la última actualización

Edita:

© Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
Agencia Estatal de Meteorología
Madrid, 2025

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:
<https://cpage.mpr.gob.es>

NIPO: 666-25-005-8
<https://doi.org/10.31978/666-25-005-8>

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)
C/ Leonardo Prieto Castro, 8
28040 Madrid
<http://www.aemet.es/>

 @Aemet_Esp

 <https://www.facebook.com/AgenciaEstataldeMeteorologia>

Índice

Resumen	5
1 Introducción	6
2 Datos y metodología	7
2.1 Escala de Exposición del Terreno de Avalanchas (ATES)	8
2.2 Cartografía de aludes observados	11
2.3 Zonas potenciales de salida y de recorrido de aludes	13
2.4 Criterios seguidos en la elaboración del mapa ATES de la sierra de Guadarrama	14
3 Resultados	17
3.1 Mapa ATES v.2 de la sierra de Guadarrama	17
3.2 Comparación entre los mapas ATES v.1/04, ATES v.2 y el modelo teórico GPP	19
4 Conclusiones	20
5 Referencias	22

Abreviaturas

- **AEMET:** Agencia Estatal de Meteorología
- **ATES:** *Avalanche Terrain Exposure Scale*
- **EEPA:** Escala Europea de Peligro de Aludes
- **GIS:** *Geographic Information System*
- **GPP:** *Gravitational Process Path*
- **SAGA:** System for Automated Geoscientific Analyses
- **SIG:** Sistema de Información Geográfica

Resumen

En el presente trabajo se muestran los resultados que se han obtenido al aplicar la escala ATES (*Avalanche Terrain Exposure Scale*) en la sierra de Guadarrama para clasificar el terreno en distintos niveles de exposición al peligro de aludes. Se ha aplicado el modelo técnico ATES v.2 utilizando una detallada base de datos histórica de aludes observados en la zona de estudio y teniendo en cuenta, además, los resultados obtenidos al aplicar el modelo *Gravitational Process Path* para estimar las zonas potenciales de salida y de recorrido de aludes a partir de modelos digitales del terreno de alta resolución. El cartografiado final, con el ajuste detallado de las diferentes zonas de exposición a los aludes, se llevó a cabo tras un minucioso trabajo de campo realizado por expertos conocedores del terreno.

Palabras clave: escala ATES, aludes, Escala Europea de Peligro de Aludes, modelo *Gravitational Process Path*, sierra de Guadarrama, sistemas de información geográfica.

1 Introducción

En el presente trabajo se muestran los resultados que se han obtenido al aplicar diferentes criterios geomorfológicos y nivológicos de la escala ATES (*Avalanche Terrain Exposure Scale*) (Statham et al., 2006) al territorio que abarca la sierra de Guadarrama. El interés de este trabajo debe valorarse en el contexto de los proyectos científico-técnicos orientados a determinar el nivel de riesgo de aludes y a ofrecer herramientas que ayuden a disminuirlo.

Se considera riesgo a la posibilidad de que un fenómeno natural o provocado por la actividad humana produzca daños a las personas, los bienes o el medio ambiente (BOE, 1992). Los aludes o avalanchas de nieve son, evidentemente, un tipo de riesgo natural. El nivel o gradación de un riesgo se evalúa a partir de los tres factores que determinan su existencia: la peligrosidad del suceso o proceso, la exposición o conjunto de las personas y bienes expuestos al mismo, y la vulnerabilidad de esas personas y bienes.

En el caso de los aludes, se han confeccionado escalas que evalúan de forma global el nivel de peligrosidad en zonas bastante amplias, como macizos montañosos o caras de macizos. La más utilizada en Europa es la Escala Europea de Peligro de Aludes (EEPA), que distingue hasta cinco niveles de peligrosidad (Müller et al., 2023). Sin embargo, la información aportada por estas escalas es a menudo demasiado general para permitir que los montañeros puedan decidir qué itinerarios son los más adecuados en una situación nivológica concreta, o si es incluso aconsejable no aventurarse por determinadas zonas de montaña. Esta es precisamente la función y utilidad de la Escala de Exposición del Terreno de Avalanchas (ATES). Esta escala fue desarrollada por el personal de los Parques de Canadá para ayudar a los montañeros a evitar su exposición a los aludes eligiendo los itinerarios más adecuados en cada situación nivológica concreta.

La escala ATES aporta la información permanente relativa al terreno, mientras que la EEPA aporta la información variable relativa a la situación nivológica. Con la ayuda de esta herramienta, el montañero puede disminuir el nivel de riesgo de aludes al que se expone reduciendo o eliminando el tiempo de su exposición a las avalanchas. Las ventajas que aporta el uso de esta herramienta son especialmente notables en zonas montañosas donde la presión humana originada por los visitantes y aficionados a deportes de montaña es elevada. En estos casos, el nivel de riesgo de aludes puede ser tan alto como el de otras zonas con mayor acumulación y persistencia de la nieve, debido a la magnitud de la exposición de vidas humanas.

En el caso concreto de la sierra de Guadarrama, su cercanía a una gran zona urbana y el aumento significativo de los aficionados al alpinismo y al esquí de montaña en los últimos años hacen que la probabilidad de que el desencadenamiento de un alud afecte a alguna persona sea muy alta. Durante la temporada invernal 2012-13 se realizó un conteo del número de personas que accedieron al itinerario del tubo central de la Laguna Grande de Peñalara. El conteo lo efectuaron los guardas del entonces Parque Natural de Peñalara. Se eligió este lugar por ser la zona por la que se encauzan gran parte de los aludes de la zona superior del macizo de Peñalara. La cantidad media de montañeros que transitaban por él en un día laborable fue de 30, con un máximo de 101. Estos valores aumentaron durante los fines de semana, con una media de 42 y un máximo de 247. Este elevadísimo número de visitantes en temporada de nieve hacen que el nivel de riesgo de aludes aumente, no tanto por su nivel de peligro, cuanto por su alto grado de exposición.

Este trabajo pretende proporcionar herramientas eficaces para la prevención de riesgos frente a situaciones de inestabilidad del manto nivoso para los usuarios, sean expertos o no, de este entorno de montaña, ya sean profesionales (agentes forestales y medioambientales, vigilantes y gestores del Parque Nacional, servicios de rescate, operarios de mantenimiento de carreteras, etc.)

o particulares (guías de montaña, montañeros, senderistas y visitantes en general), e incluso para la protección de bienes materiales. Con estos mapas se pretende ayudar en la toma de decisión a la hora de transitar o renunciar a pasar por determinadas zonas en condiciones invernales en el territorio que abarca la sierra de Guadarrama.

2 Datos y metodología

La zona de estudio del presente trabajo (figura 1) abarca el área considerada en los boletines de peligro de aludes de la sierra de Guadarrama que emite la Agencia Estatal de Meteorología, y coincide con la zona considerada en el estudio *Caracterización de las zonas susceptibles a aludes en la sierra de Guadarrama mediante el modelo Gravitational Process Path* (Chazarra et al., 2025). Se trata, básicamente, de las zonas de montaña situadas al norte del Alto del León y al sur del puerto de Linera, entre las provincias de Madrid y Segovia. Comprende, por tanto, las zonas de mayor altitud de la sierra de Guadarrama, incluyendo la sierra de Quintanar, la Cuerda Larga, el macizo de Peñalara y los montes Carpetanos.

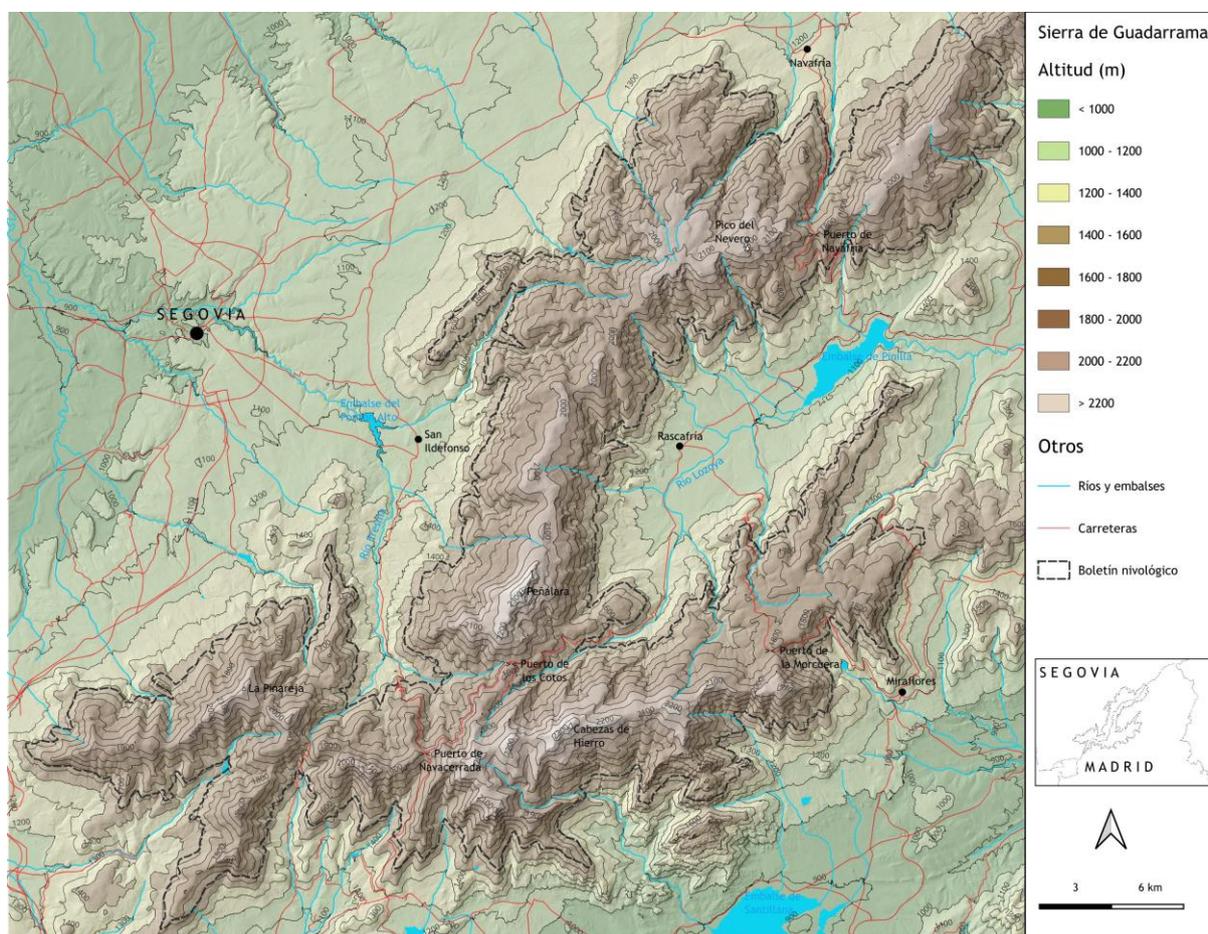


Figura 1. Límites de la zona de estudio.

2.1 Escala de Exposición del Terreno de Avalanchas (ATES)

La Escala de Exposición del Terreno de Avalanchas (ATES) utiliza un modelo técnico para clasificar el terreno en distintos niveles de exposición al peligro de ser afectado por un alud. Este modelo tiene en cuenta distintas variables concretas del terreno como la pendiente, la densidad del bosque, la forma de la ladera, las trampas del terreno y la cantidad de zonas de salida, y el recorrido y el depósito de aludes. Asimismo, tiene en cuenta otras variables como la frecuencia y el tamaño de los aludes observados, la exposición de la zona a la ocurrencia de aludes y las opciones posibles de evitar o reducir el peligro a los aludes.

2.1.1 Modelo técnico de la escala ATES v.1/04

El modelo técnico desarrollado inicialmente, denominado ATES v.1/04, contemplaba once variables concretas y clasificaba el terreno en tres niveles según el grado de exposición a los aludes: simple, exigente y complejo (Statham et al., 2006).

Los criterios de esta clasificación se muestran en la tabla 1.

VARIABLES	1. Simple	2. Exigente	3. Complejo
Pendiente	Generalmente < 30°	<i>Generalmente pequeñas. Algunas pendientes aisladas > 35°</i>	<i>Variable. Gran parte del terreno con pendientes > 35°</i>
Forma de la ladera	Uniforme	Algunas convexidades	Irregular, con muchas convexidades y concavidades
Densidad del arbolado	Bosque denso	Terreno en general abierto	Grandes extensiones de terreno abierto o árboles aislados
Trampas del terreno	Mínimas, algunos arroyos o pequeños barrancos	Algunas depresiones, barrancos y/o zonas superiores de trayectos de aludes	Muchas depresiones, acantilados, declives ocultos sobre barrancos, cornisas
Frecuencia aludes (aludes:años)	1:30 ≥ tamaño 2	1:1 < tamaño 2 1:3 ≥ tamaño 2	1:1 < tamaño 3 1:1 ≥ tamaño 3
Densidad de zonas de salida de aludes	Poco terreno abierto	Terreno abierto. Algunas zonas de trayecto de aludes llegan al fondo del valle	Grandes extensiones de terreno abierto. Muchas zonas de trayecto de aludes llegan al fondo del valle
Características de las zonas erosionadas por aludes	Áreas aisladas y bien definidas; transiciones suaves y depósitos diseminados	Transiciones abruptas o depósitos en el fondo de depresiones profundas	Múltiples zonas convergentes de erosión, zona de deposición confinada, bajo trayectos con pendientes pronunciadas
Intersección con las zonas de trayecto de aludes	Únicamente con zonas de depósito	Con una única zona de trayecto o varias separadas entre sí	Con numerosas zonas de trayecto, generalmente superpuestas entre sí
Opciones de ruta	Numerosas rutas posibles. El terreno permite múltiples opciones	Varias opciones con distintos niveles de exposición. Existe la posibilidad de evitar las zonas de trayecto de aludes	Oportunidades limitadas de reducir la exposición, pasos obligados
Tiempo de exposición	Nulo o limitado al tránsito por zonas de depósito de aludes	Exposición ocasional a zonas de salida y trayecto de aludes	Exposición frecuente a zonas de salida y trayecto de aludes
Glaciares	No hay glaciares	Generalmente suave, con bandas aisladas de grietas	Secciones de grietas con roturas o muy inclinadas, cascadas de hielo o seracs

Tabla 1. Modelo técnico ATES v.1/04 (adaptado de Statham et al., 2006).

En el modelo técnico cada variable está descrita de una manera diferente en cada clase. Aunque una zona montañosa puede tener características que correspondan a diferentes tipos de terrenos, a la hora de determinar cuál es su clase, según los autores de este modelo técnico se dará prioridad a aquellas variables que aparecen escritas en negrita, de forma que un terreno en el que se verifica una característica marcada en negrita quedará automáticamente incluido en el tipo al que caracteriza dicha variable o en uno superior. El resto de variables tienen menor peso y no gozan de prioridad, pero deben considerarse en combinación con los demás factores.

Este es el modelo que se utilizó para realizar la clasificación ATES del macizo de Peñalara publicada en *Los aludes de nieve en el macizo de Peñalara* (Fernández-Cañadas, 2014), la única clasificación ATES realizada previamente en la sierra de Guadarrama de la que se tiene constancia.

2.1.2 Modelo técnico de la escala ATES v.2

Recientemente se ha publicado un nuevo modelo, denominado ATES v.2, con ocho variables y cinco niveles: no expuesto, simple, exigente, complejo y extremo (Statham & Campbell, 2023). Los criterios de esta clasificación se muestran en la tabla 2.

Al igual que en el caso de la escala original, cuando un terreno verifica alguno de los criterios marcados en negrita automáticamente se le debe asignar esa clase o una superior.

En el presente trabajo se ha utilizado el modelo técnico v.2 en la elaboración del mapa ATES de la sierra de Guadarrama. Para clasificar las diferentes zonas, se han tenido en cuenta en primer lugar las variables prioritarias, las cuales están marcadas en negrita. En los casos en los que no se verifica ninguno de los criterios prioritarios se han considerado el resto de las variables, dando mayor importancia, dependiendo de cada clase, a las siguientes variables:

- TERRENO NO EXPUESTO: Zonas en las que **nunca se han producido aludes (>1:300)**. Zonas abiertas en las que la pendiente es menor de 10°. Zonas de bosque denso (> 70 % de arbolado).
- TERRENO SIMPLE: Zonas en las que **se han producido aludes de tamaño mayor o igual que 2, con una frecuencia comprendida entre uno cada 100 años y uno cada 30 años (< 1:100 – 1:30 ≥ t 2)**. Zonas en donde la exposición es mínima con baja frecuencia de recorrido de aludes o pendientes cortas. Existen diferentes opciones para disminuir el riesgo.
- TERRENO EXIGENTE: Zonas en las que **se han producido aludes de tamaño mayor o igual que 2, con una frecuencia comprendida entre uno cada 30 años y uno cada 3 años (1:30 – 1:3 ≥ t 2)**. Zonas en las que se ha producido un alud al año de tamaño menor de 2. **Existen varias opciones con distintos niveles de exposición. Hay opciones de evitar las zonas de trayecto de aludes.**
- TERRENO COMPLEJO: Zonas en las que **se ha producido al menos un alud de tamaño mayor o igual que 3, con una frecuencia de uno al año (1:1 ≥ t 3)**. Zonas en las que se ha producido un alud al año de tamaño menor de 3. **Hay exposición frecuente a zonas de salida, recorrido o trayectos superpuestos.** Existen limitadas opciones de reducir la exposición pero evitarla no es posible.

- TERRENO EXTREMO: Zonas en las que se ha producido más de un alud al año de tamaño mayor de 2. Zonas en las que se han producido diez aludes al año de tamaño menor o igual de 2. Zonas de exposición mantenida en zonas de salida o bajo ella. No hay opciones para reducir la exposición.

	Clase 0: Terreno No Expuesto	Clase 1: Terreno Simple	Clase 2: Terreno Exigente	Clase 3: Terreno Complejo	Clase 4: Terreno Extremo
Exposición	No se observa exposición al recorrido de aludes	Mínima exposición al atravesar zonas de baja frecuencia de recorrido de aludes o pendientes cortas	Exposición intermitente en un trayecto o en trayectos separados	Exposición frecuente a zonas de salida, recorrido o trayectos superpuestos	Exposición mantenida en, o bajo zonas de salida
Pendiente y densidad del bosque	Pendiente menor de 10°, terreno abierto, o zonas más inclinadas con bosque denso	Pendiente menor de 20° o zonas más inclinadas en bosque denso con claros para el recorrido de aludes	Terreno abierto con pendiente menor de 30°, o bosque con claros y alguna pendiente mayor de 35°	Terreno de pendiente moderada menor de 35°, con muchas zonas abiertas de más de 35° y algunos rodales de árboles	Terreno abierto de más de 35°, con muchas zonas de más de 45°, con pocos árboles o sin ellos
Forma de la ladera	Terreno sencillo, llano u ondulado	Terreno ondulado sencillo	Terreno fundamentalmente plano con algunas convexidades	Terreno variado y enrevesado, con pendientes abiertas	Terreno enrevesado, con acantilados, corredores, dorsales y/o con cornisas
Trampas del terreno	No se observan trampas	Algunos arroyos, rodales de árboles o pequeños acantilados	Algunas pendientes sobre barrancos o riesgo de impacto contra árboles o rocas	Muchas pendientes sobre barrancos y/o riesgo de impacto contra árboles, rocas o grietas	Laderas empinadas con acantilados, cornisas, grietas y/o riesgo de impacto contra árboles o rocas
Frecuencia (nº años) y tamaño (t) de aludes	Nunca (> 1:300)	< 1:100 – 1:30 ≥ t 2	1:1 < t 2 1:30 – 1:3 ≥ t 2	1:1 < t 3 1:1 ≥ t 3	10:1 ≤ t 2 >1:1 > t 2
Densidad y tamaño de zonas de salida de aludes	No se observan zonas de salida	Zonas de salida aisladas y pequeñas con potencial de aludes de tamaño < 2	Zonas de salida aisladas con potencial de aludes de tamaño ≤ 3, o varias zonas con potencial ≤ 2	Múltiples zonas de salida capaces de provocar aludes de todos los tamaños	Muchas zonas de salida muy grandes, capaces de provocar aludes de todos los tamaños
Características de las zonas de llegada de aludes	No se observan zonas de llegada	Límites claros, transiciones suaves, zonas de llegada lisas, sin conexión con zonas de salida por encima	Transiciones abruptas, zonas de depósito confinadas, larga conexión con zonas de salida por encima	Zonas donde convergen distintas trayectorias, zonas de depósito confinadas, conexión con zonas de salida por encima	Laderas empinadas, confinamiento de acantilados, grietas, zonas de salida directamente sobre ellas
Opciones de ruta	Rutas designadas o zonas de poca pendiente con muchas opciones	Numerosas rutas posibles. El terreno permite múltiples opciones	Varias opciones con distintos niveles de exposición. Hay opciones de evitar las zonas de trayecto de aludes	Limitadas opciones de reducir la exposición, evitarlas no es posible	Sin opciones para reducir la exposición

Tabla 2. Modelo técnico ATES v.2 (adaptado de Statham & Campbel, 2023).

Una vez clasificado el terreno a partir de estas variables, se comprueba si el resto de ellas se adecúan a esta primera clasificación o se debe realizar alguna corrección.

Además de los criterios anteriores, se ha aplicado un filtro por altitud debido a la habitual escasez de nieve en las zonas más bajas del territorio estudiado. Se ha limitado el terreno expuesto a los aludes al situado por encima de 1600 metros de altitud.

2.2 Cartografía de aludes observados

Dado que las variables principales que utiliza la escala ATES para determinar cada una de las clases son la frecuencia y el tamaño de los aludes observados, resulta fundamental disponer de un registro histórico de aludes observados en la zona de estudio.

La base de datos de aludes observados utilizada en el presente estudio se ha obtenido de diversas fuentes: alpinistas expertos, guías de montaña, agentes forestales y medioambientales, vigilantes del Parque Nacional y observadores meteorológicos del Observatorio del Puerto de Navacerrada. La mayor parte de la información ha sido proporcionada por Alberto Pantoja Dorda y Álvaro Pantoja Dorda (asociación deportiva RECmountain), que han elaborado un recuento y una descripción de los aludes observados desde el año 2009 hasta la actualidad en la sierra de Guadarrama. En el cartografiado de los aludes se ha tenido en cuenta la observación en el terreno de las características, el tamaño y los límites de los aludes, material fotográfico y descriptivo de aludes proporcionado por otras personas, indicios en campo de las huellas dejadas en el paisaje por los aludes, así como ortofotografías aéreas de muy alta resolución espacial.

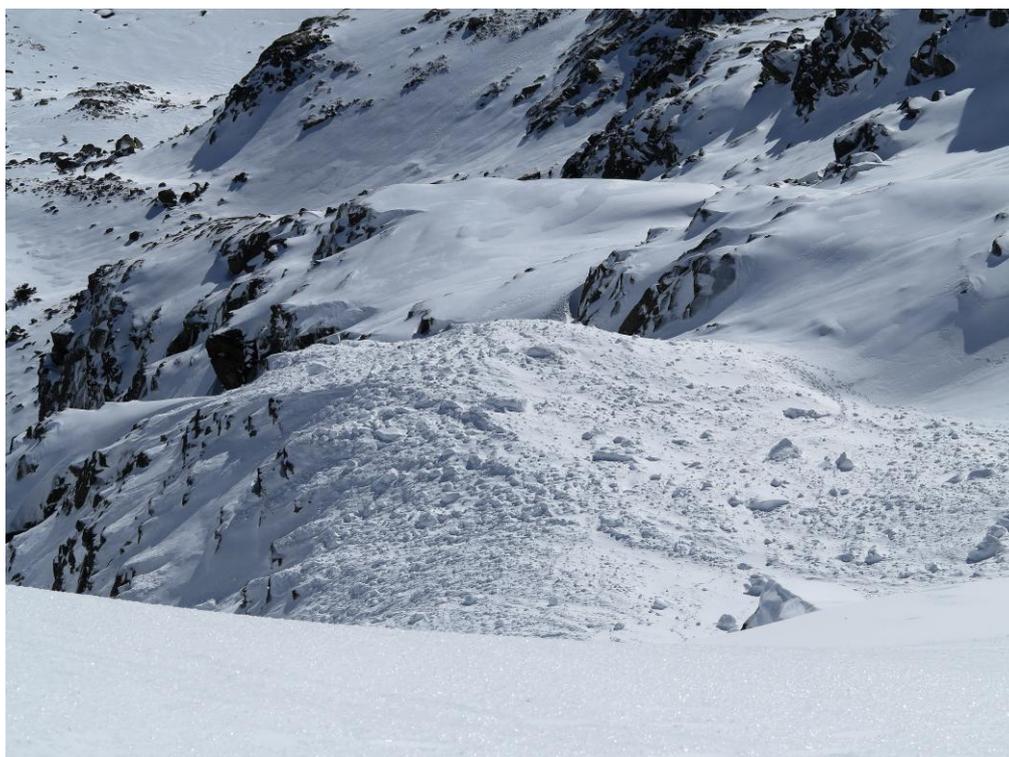


Figura 2. Reconocimiento de un gran alud de placa en el circo de la Laguna Grande de Peñalara, 29 de enero de 2013. Fotografía: RECmountain.



Figura 3. Reconstrucción de un alud de placa en el circo de la Laguna Grande de Peñalara, 6 de marzo de 2014.
Fotografía: RECmountain.

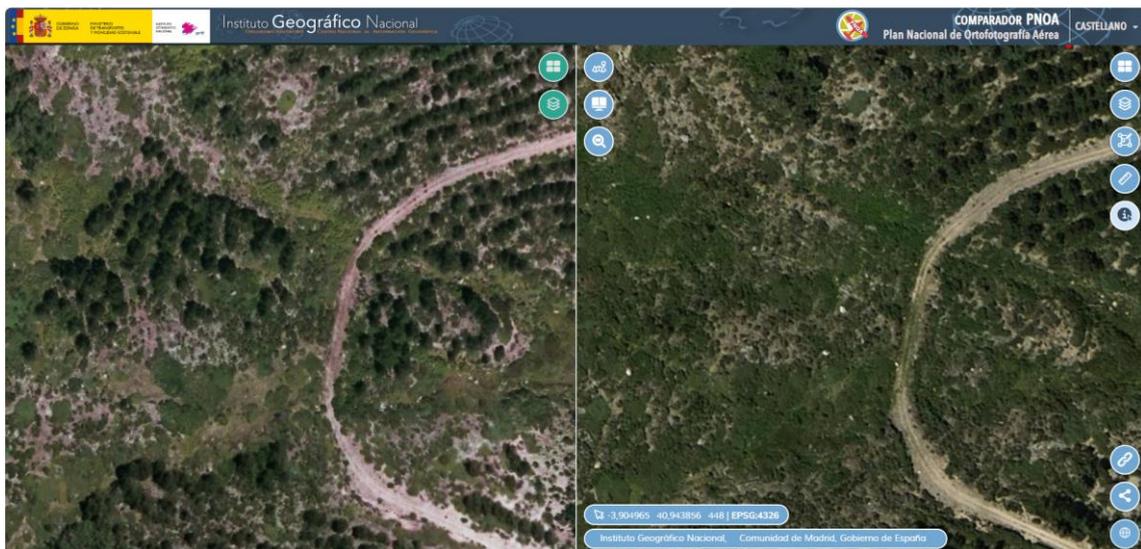


Figura 4. Ortofotografías PNOA de los años 2016 (izquierda) y 2018 (derecha) del circo de Hoyo Cerrado, en donde se aprecia la alteración del suelo y la pérdida de zona boscosa tras los aludes del invierno 2017-18. Fuente: IGN.

La mayor parte de los aludes observados se circunscriben a la zona del macizo de Peñalara, fundamentalmente por su mayor altitud e innivación, pero también por ser la zona más frecuentada y más fácil de observar. Para solventar esta limitación, se ha procedido a recorrer minuciosamente sobre el terreno toda la zona de estudio con el objetivo de encontrar rastros de las huellas ocasionadas por aludes no observados y que pudieran proporcionar información de las zonas más remotas. Asimismo, se han comparado imágenes de satélite en alta resolución de diferentes años para identificar las huellas dejadas por los aludes. Los aludes cartografiados han

sido perimetrados y definidos mediante observación directa, fotografías o mapas en 3D. Gracias a esta base de datos pudo realizarse el trabajo *Los aludes de nieve en el macizo de Peñalara* (Fernández-Cañadas, 2014), cuyas conclusiones han servido de base para el actual trabajo.

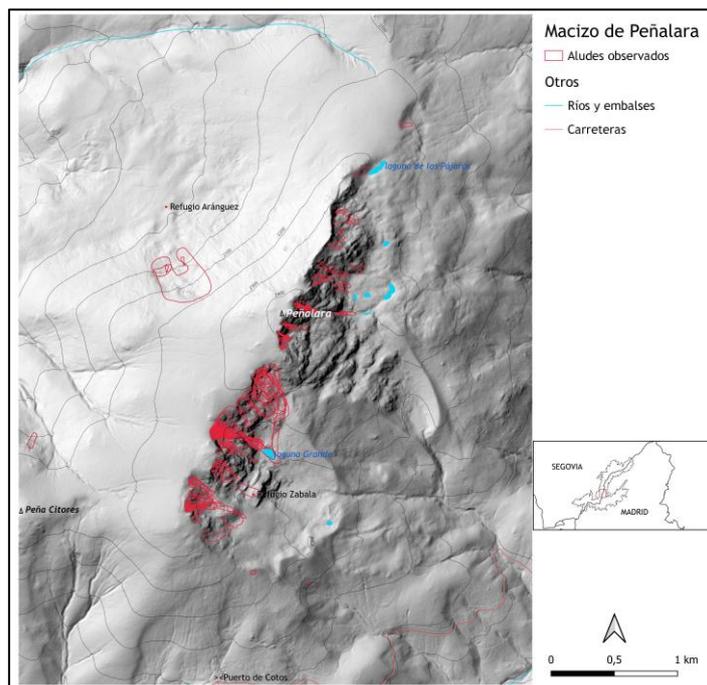


Figura 5. Cartografiado de los aludes observados en el macizo de Peñalara.

2.3 Zonas potenciales de salida y de recorrido de aludes

Dado que la mayoría de los aludes registrados se localizan en el macizo de Peñalara, para aplicar la clasificación ATES en zonas remotas, en las que la información disponible sobre aludes observados es escasa, se han utilizado los resultados del estudio *Caracterización de las zonas susceptibles a aludes en la sierra de Guadarrama mediante el modelo Gravitational Process Path* (Chazarra et al., 2025). En este estudio se estimaron las zonas potenciales de salida y de recorrido de aludes en la sierra de Guadarrama a partir de modelos digitales del terreno de alta resolución aplicando el modelo *Gravitational Process Path (GPP)*, implementado en el sistema de información geográfica libre SAGA GIS.

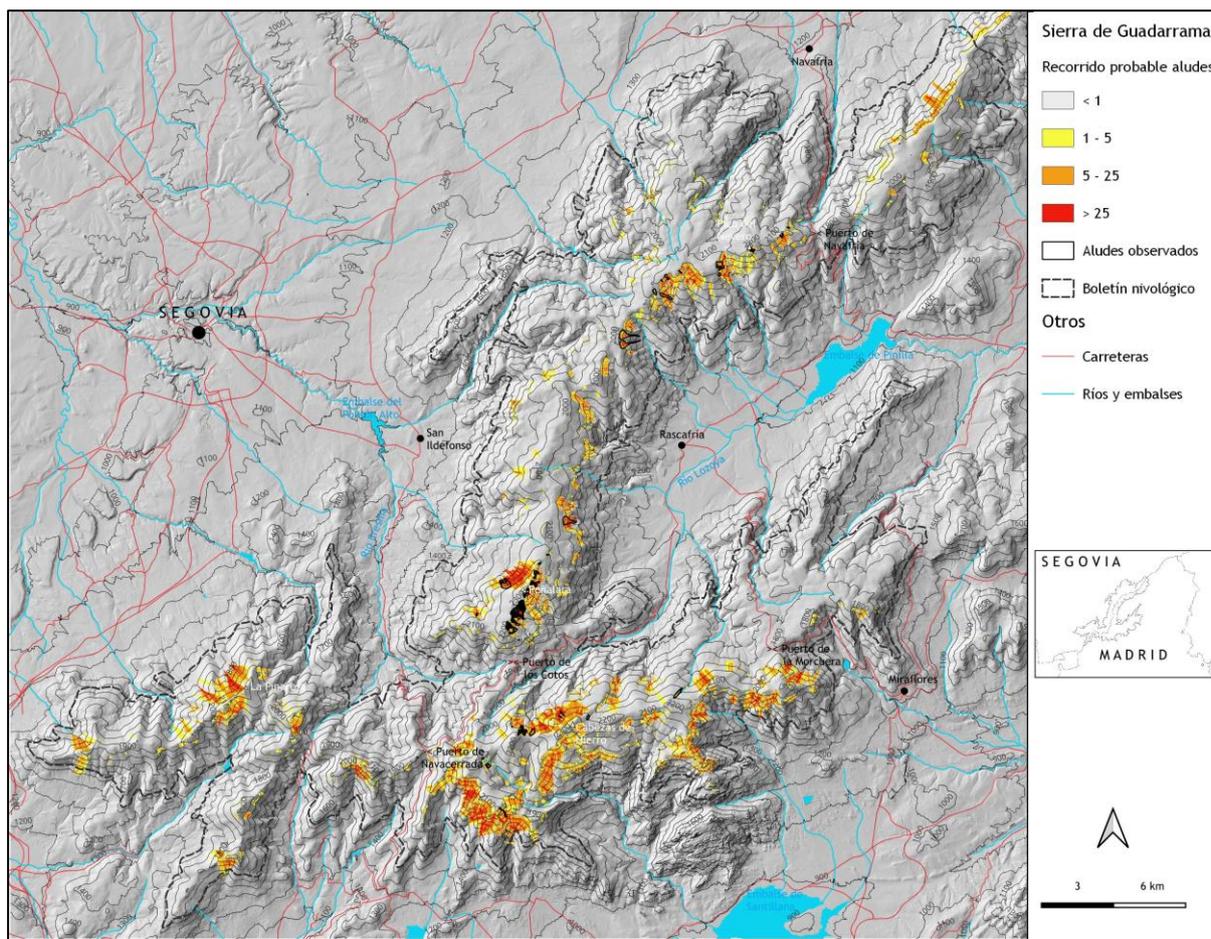


Figura 6. Zonas potenciales de recorrido de aludes en la sierra de Guadarrama obtenidas utilizando el modelo Gravitational Process Path (Chazarra et al., 2025)

2.4 Criterios seguidos en la elaboración del mapa ATES de la sierra de Guadarrama

Para la aplicación de la clasificación ATES en la zona de estudio se utilizaron sistemas de información geográfica y visores 3D para combinar la información correspondiente a la cartografía de aludes observados, las características del terreno (pendiente, orientación, vegetación, etc.) y las zonas potenciales de salida y de recorrido de aludes obtenidas al aplicar el modelo GPP (figura 7).

A continuación, se procedió a clasificar el terreno en cinco niveles de exposición a los aludes siguiendo los siguientes criterios:

ZONAS NO EXPUESTAS:

- zonas con altitud por debajo de 1600 m, en las que se considera que la acumulación de nieve es insuficiente para la ocurrencia de aludes
- zonas por encima de 1600 m con bosque denso (más del 70 % de arbolado)
- zonas por encima de 1600 m sin bosque denso, con pendiente menor de 10° y sin áreas de desencadenamiento o flujo de aludes

ZONAS SIMPLES (o de categoría superior):

- zonas por encima de 1600 m sin bosque denso con pendiente mayor de 10°.

- zonas por encima de 1600 m sin bosque denso, con pendiente menor de 10° pero con áreas de desencadenamiento o flujo de aludes

ZONAS EXIGENTES (o de categoría superior):

- zonas simples con probabilidad media o alta de desencadenamiento y flujo

ZONAS COMPLEJAS (o de categoría superior):

- zonas exigentes con probabilidad alta de desencadenamiento

ZONAS EXTREMAS:

- zonas complejas en las que, además, se tiene constancia de una frecuencia de aludes de más de uno al año de tamaño mayor de 2

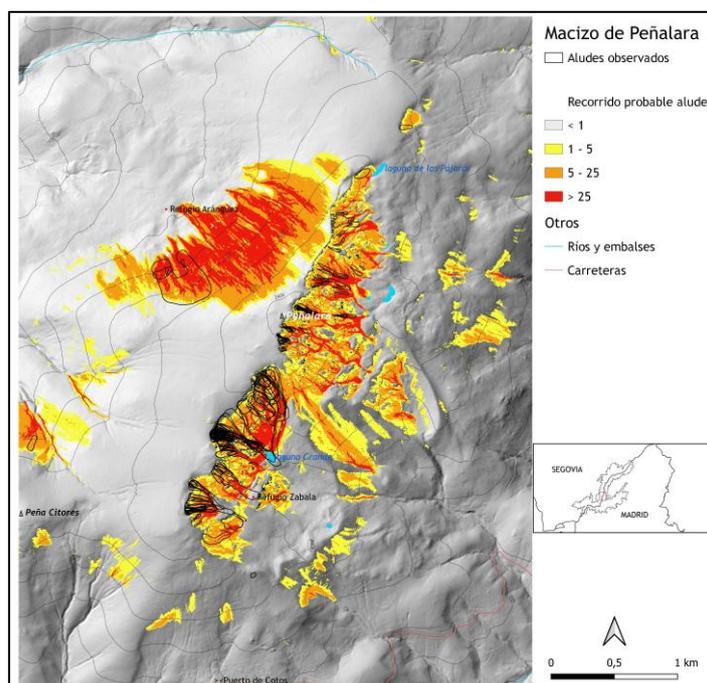


Figura 7. Combinación en un SIG de la información utilizada para realizar la clasificación ATEs en la zona del macizo de Peñalara

Una vez generado un primer mapa base, se procedió al ajuste de las diferentes zonas por parte de expertos conocedores de la sierra de Guadarrama mediante un minucioso trabajo de campo. Cada zona se evaluó por varios miembros del equipo de expertos hasta alcanzar un consenso. Una vez corregido el mapa base, se procedió a su comprobación mediante un visor 3D (figura 8).

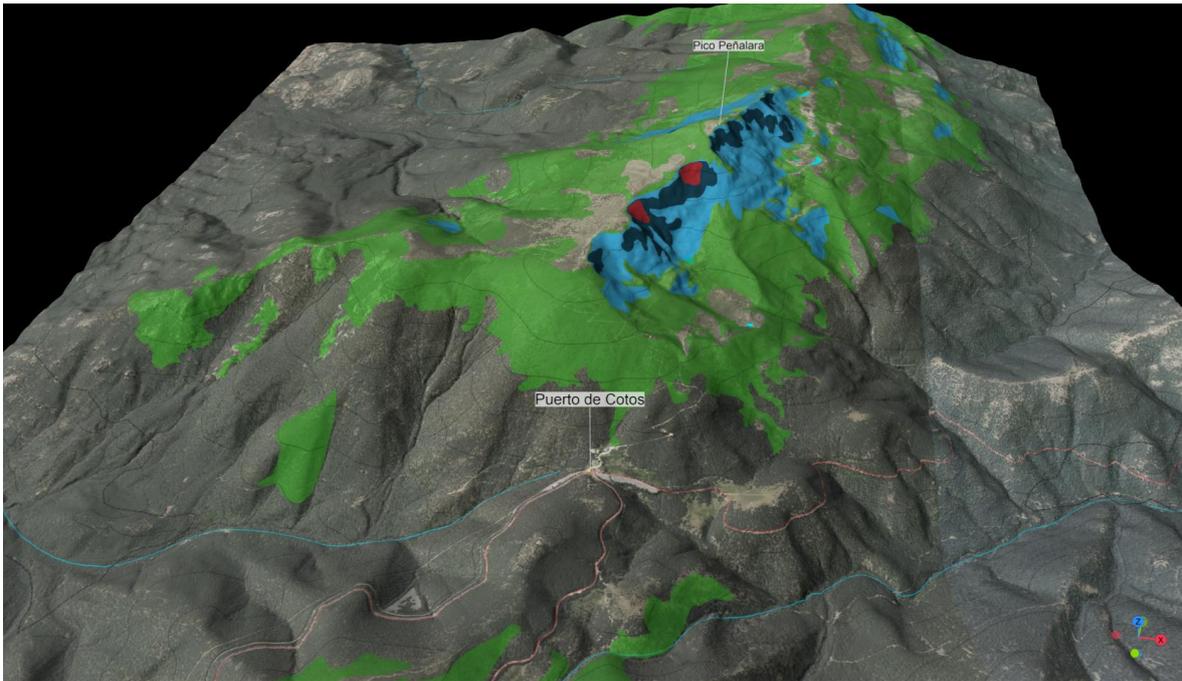


Figura 8. Ajuste de las zonas de la clasificación ATEs con modelo 3D a partir del trabajo de campo.

3 Resultados

3.1 Mapa ATEs v.2 de la sierra de Guadarrama

Siguiendo la metodología descrita en el apartado anterior se ha generado el mapa ATEs v.2 para la sierra de Guadarrama que se muestra en la figura 9.

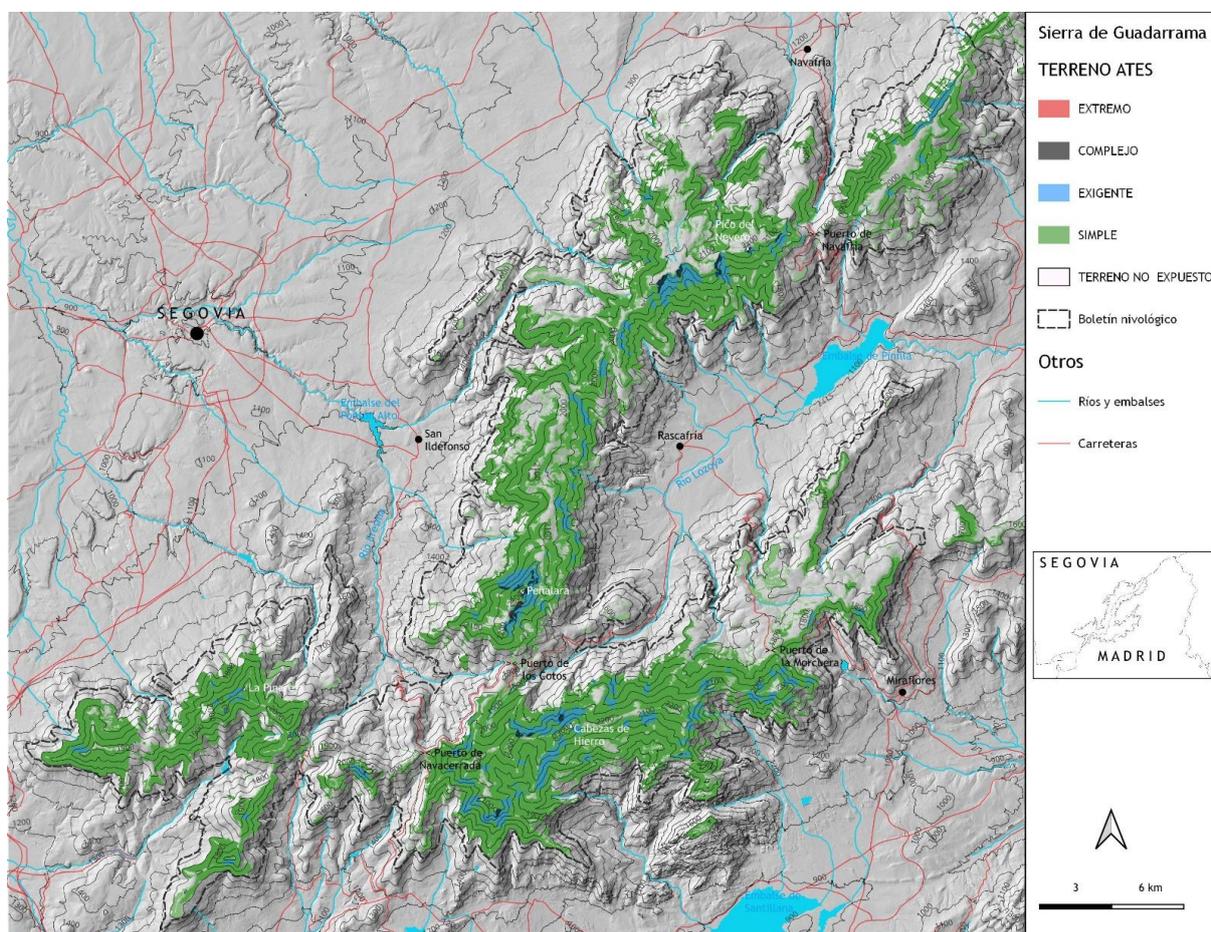


Figura 9. Mapa de la clasificación ATEs v.2 de la sierra de Guadarrama.

En la figura 10 se muestra una ampliación de la clasificación obtenida en la zona el macizo de Peñalara, el sector en el que se tiene constancia de un mayor número de aludes y donde la afluencia de visitantes en época invernal es particularmente elevada.

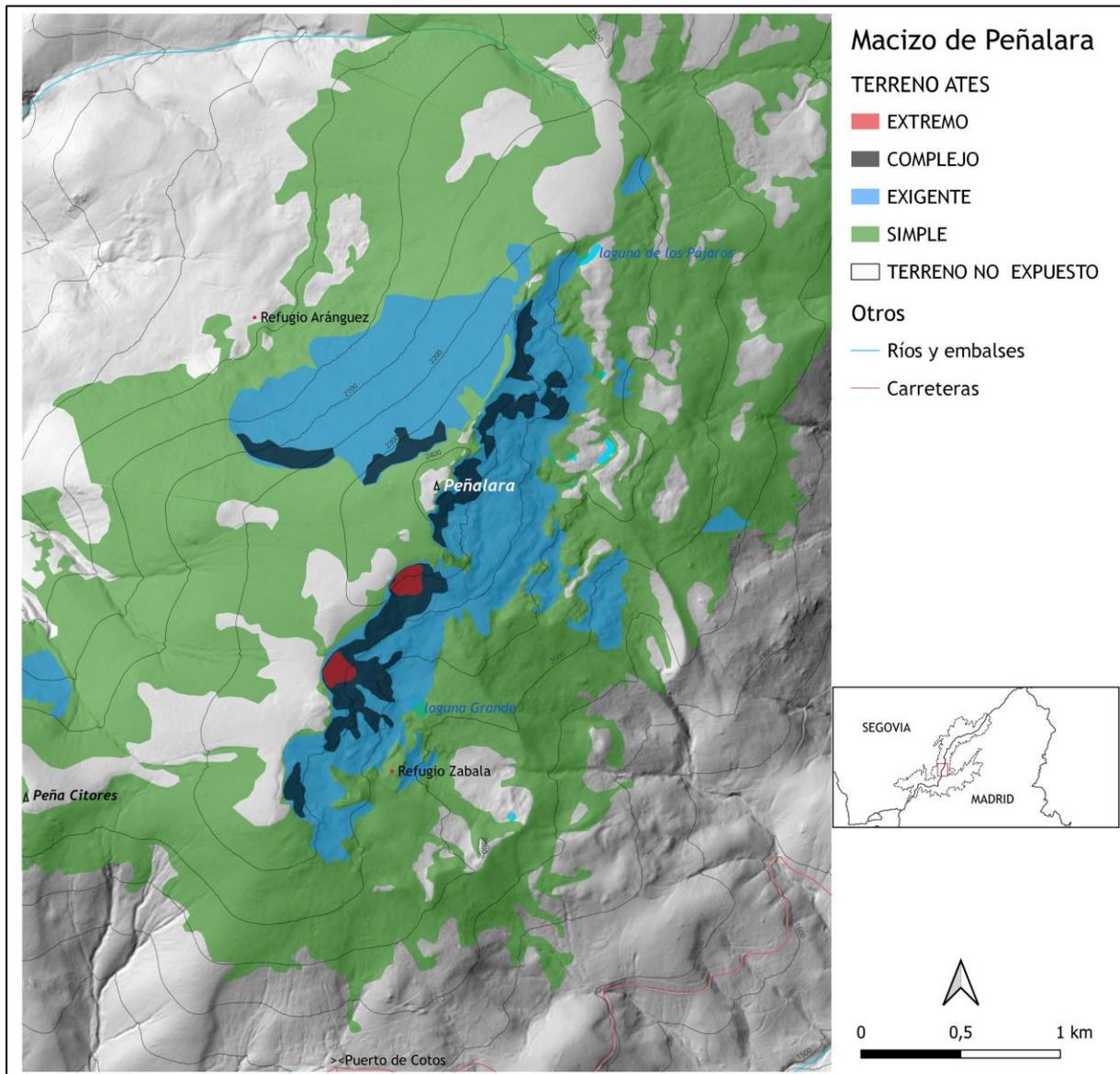


Figura 10. Mapa de la clasificación ATEs v.2 del macizo de Peñalara

Del análisis del Mapa ATEs v.2 de la Sierra de Guadarrama obtenido en este trabajo se observa lo siguiente:

- En la sierra de Guadarrama, por debajo de los 1600 m las acumulaciones de nieve han sido históricamente tan poco significativas que se puede asumir que es un terreno No Expuesto a los aludes, salvo que se presente una situación nivometeorológica excepcional.
- La mayor parte del territorio estudiado situado por encima de los 1600 m tiene un carácter Simple, con escasa exposición a los aludes, e incluso existen amplias zonas No Expuestas por su escasa pendiente o por la densidad del bosque.
- El terreno Exigente, donde es necesario estar informado del Boletín de Peligro de Aludes y tener experiencia para moverse en la nieve, se localiza en los circos y hoyas situados en general por encima de los 1800 m, en los que las pendientes superan los 30° de inclinación y el bosque no es suficientemente denso.

- Únicamente en los escarpes más inclinados de esos circos glaciares, normalmente por encima de los 2000 m, es donde encontramos un terreno Complejo, en el que las opciones de reducir el peligro al transitar con nieve son escasas y la información del Boletín de Peligro de Aludes se hace imprescindible.
- Dentro del terreno Complejo, se han obtenido dos pequeñas zonas en el macizo de Peñalara en las que la elevada frecuencia de observación de aludes ha determinado que se clasifiquen como Extremas. Se circunscriben al entorno superior del circo de la Laguna Grande, en donde la existencia de pendientes de más de 40°, la habitual acumulación de nieve por los vientos dominantes y la frecuente formación de grandes cornisas hacen que las avalanchas se desencadenen con facilidad.

3.2 Comparación entre los mapas ATES v.1/04, ATES v.2 y el modelo teórico GPP

Por último, se ha realizado una comparación (figura 11) entre la clasificación ATES v.2 obtenida en el presente trabajo, la clasificación ATES v.1/04 generada con anterioridad para el macizo de Peñalara (Fernández-Cañadas, 2014), y la clasificación que se obtendría utilizando únicamente las zonas potenciales de salida y de recorrido de aludes obtenidas al aplicar el modelo *Gravitational Process Path* (Chazarra et al., 2025).

TERRENO NO EXPUESTO:

- En el mapa ATES v.1/04 no existe el terreno No Expuesto, está incluido en el terreno Simple.
- En el mapa ATES v.2 y en el modelo GPP el terreno No Expuesto coincide perfectamente.

TERRENO SIMPLE:

- En el mapa ATES v.1/04 la extensión del terreno Simple es parecida a la del modelo GPP pero ligeramente más amplia, abarcando zonas de terreno Exigente de este último.
- En el mapa ATES v.2 el terreno Simple es más concreto que en el mapa ATES v.1/04 y en el modelo GPP, y abarca zonas que corresponden a terreno Exigente en estos últimos.

TERRENO EXIGENTE:

- En el mapa ATES v.1/04 el terreno Exigente es más amplio que en el mapa ATES v.2, pero más reducido que en el modelo GPP.
- En el mapa ATES v.2 el terreno Exigente es más concreto y reducido que en los otros dos.

TERRENO COMPLEJO:

- En el mapa ATES v.1/04 el terreno Complejo es más amplio que en los otros dos.
- En el mapa ATES v.2 el terreno Complejo es mucho más concreto y reducido que en los otros dos.
- En el modelo GPP el terreno Complejo es más amplio que en el mapa ATES v.2, fundamentalmente por las zonas de flujo.

TERRENO EXTREMO:

- En el mapa ATES v.1/04 el terreno Extremo no existe, está incluido en el terreno Complejo.
- En el mapa ATES v.2 el terreno Extremo se ha añadido gracias a la cartografía de aludes históricos.
- En el modelo GPP el terreno Extremo no aparece.

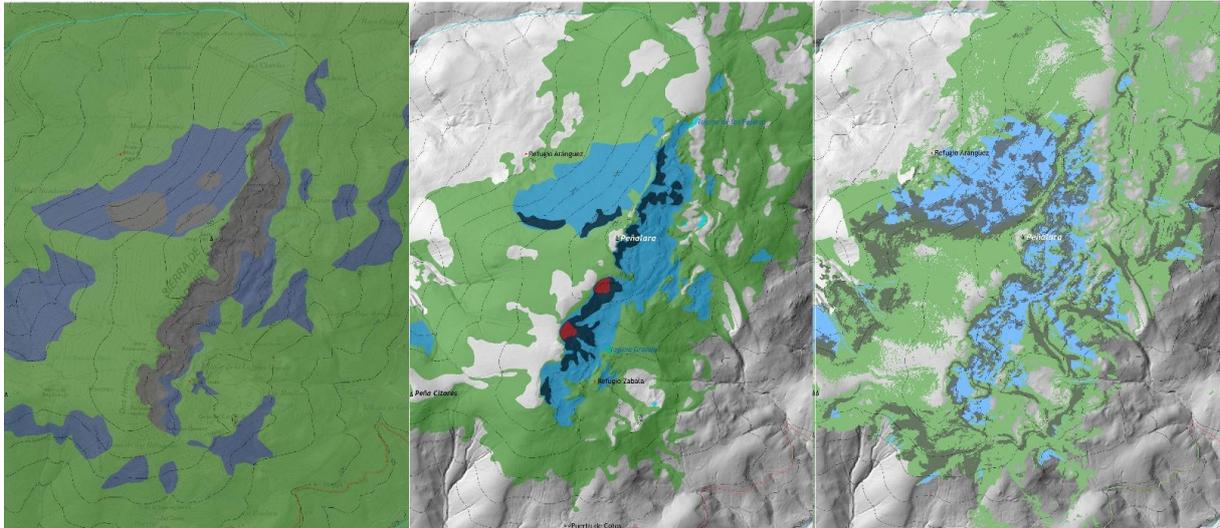


Figura 11. Comparación de los resultados de las clasificaciones ATES v.1/04, ATES v.2 y GPP en el macizo de Peñalara.

4 Conclusiones

La existencia de una cartografía de aludes suficientemente exhaustiva del macizo de Peñalara ha permitido comprobar la validez del método empleado para la elaboración de un mapa ATES v.2 de este sector, y extrapolarlo al resto de zonas de la sierra de Guadarrama en donde la escasez de datos de observación de aludes no permitía obtener un resultado satisfactorio. Asimismo, el modelo GPP ha ayudado eficazmente a realizar un mapa base con el que trabajar sobre el campo para corregir y concretar sus resultados. El trazado final, realizado gracias al sistema de información geográfica SAGA GIS y los visores 3D, ha hecho posible la elaboración de un mapa con un gran detalle que puede resultar de gran utilidad para los diferentes usuarios.

Aunque los Boletines de Peligro de Aludes son una herramienta fundamental para evaluar el peligro de aludes de un macizo montañoso en una circunstancia nivometeorológica concreta, una gran parte de los visitantes de estos entornos no tiene los suficientes conocimientos para decidir si un determinado itinerario es seguro o no. Para estas personas, el mapa ATES v.2 obtenido en este trabajo ayudará a decidir cuál es el itinerario más adecuado en función de sus conocimientos, su preparación física y su nivel técnico, evitando las zonas que transitan por el terreno de mayor exposición a las avalanchas, independientemente del nivel de peligro de aludes existente en ese momento especificado en el Boletín de Peligro de Aludes. Para aquellos quienes, en cambio, son capaces de evaluar el riesgo según el Boletín de Peligro de Aludes, este mapa ATES v.2 complementará esos datos, aportando información de la exposición de cada ruta según el terreno que atraviese, y el nivel de riesgo que quiere asumir al pasar por dichas zonas. Asimismo, el mapa con la clasificación ATES v.2 puede resultar de gran utilidad para los organismos responsables de la gestión y de la seguridad de los recursos de montaña, al ser una herramienta de ayuda para tomar las decisiones oportunas para evitar posibles accidentes en la zona que afecten a personas y a bienes.

Debido al actual calentamiento global y al previsible aumento de las temperaturas, cabe esperar que las nevadas en el futuro sean en general más escasas. Pero bajo este escenario también se contempla la ocurrencia de situaciones excepcionales puntuales que ocasionen episodios de acumulación de nieve que se transformen con rapidez y deriven en situaciones pasajeras de gran inestabilidad del manto nivoso. Tomando como referencia los datos del Observatorio

Meteorológico del Puerto de Navacerrada, podemos ver a simple vista un aumento general de las temperaturas y una disminución de los días de nieve cuajada en el suelo en las últimas décadas. Aun así, durante los últimos años se han registrado temporadas invernales de notables acumulaciones de nieve y situaciones excepcionales que han dado lugar a grandes aludes en la sierra de Guadarrama. En el año 2013 los neveros se mantuvieron hasta octubre; en 2018 se registraron aludes de tamaño 3 y 4 que ocasionaron significativas alteraciones del paisaje; en 2021 hubo episodios de gran inestabilidad del manto nivoso (Filomena); y en el año 2025 las tardías pero abundantes nevadas ocasionaron episodios generalizados de aludes en zonas en las que habitualmente no eran frecuentes.

Por todo ello, este Mapa ATES v.2 de la sierra de Guadarrama puede ser de agran ayuda a la hora de salvaguardar no solo los bienes materiales, sino también las vidas de profesionales (agentes forestales y medioambientales, vigilantes y gestores del Parque Nacional, servicios de rescate, operarios de mantenimiento de carreteras, etc.), particulares (guías de montaña, esquiadores, montañeros, senderistas) y visitantes en general de este entorno de montaña.

5 Referencias

- [1] Aguirre, B. (2024). Aplicació i validació d'una nova escala de classificació del terreny d'allaus al Pirineu occidental català. Prova pilot al sector del Pontet, Val d'Aran. Centre de Lauegi D'Aran.
- [2] Bacardit, M., Moner, I., & Gavaldà, J. (2011). Si la neu és el problema, la solució és en el terreny: aplicació de l'Escala de Classificació del Terreny Allavós a la Val d'Aran. IV Jornades Tècniques de Neu i Allaus. Vielha, Spain.
- [3] Boletín Oficial del Estado (BOE) (1992). Real Decreto 407/1992, de 24 de abril, por el que se aprueba la Norma Básica de Protección Civil. BOE núm. 105, pp. 14868 a 14870 <https://www.boe.es/eli/es/rd/1992/04/24/407>
- [4] Campbell, C., and Gould, B. (2014). ATES zoning model. *The Avalanche Journal*, 26-29.
- [5] Chazarra, A., Fernández-Cañadas, J.A., Pantoja, L., Pantoja, A. (2025). Caracterización de las zonas susceptibles a aludes en la sierra de Guadarrama mediante el modelo *Gravitational Process Path*. Nota técnica N° 43. Agencia Estatal de Meteorología.
- [6] Fernández-Cañadas, J.A. (2014). Los aludes de nieve en el macizo de Peñalara. Nota técnica 14. Agencia Estatal de Meteorología. <https://dx.doi.org/10.31978/281-14-005-3>
- [7] Müller, K., Techel, F., Mitterer, C., Feistl, T., Sofia, S., Roux, N., Palmgren, P., Bellido, G.M., Bertranda, L. (2023). The EAWS Matrix, a look-up table for regional avalanche danger level assessment, and its underlying concept. *Proceedings, International Snow Science Workshop, Bend, Oregon, 2023*.
- [8] Statham, G., McMahon, B., Tomm, I. (2006): The Avalanche Terrain Exposure Scale. *International Snow Science Workshop, Telluride, USA, 491-497*.
- [8] Statham, G. and Campbell, C. (2023): The Avalanche Terrain Exposure Scale v.2, in: *Proceedings International Snow Science Workshop, Bend, OR, USA, 9-13 October 2023*, <https://arc.lib.montana.edu/snow-science/item/2939>
- [9] Sykes, J., Toft, H., Haegeli, P., and Statham, G. (2024). Automated Avalanche Terrain Exposure Scale (ATES) mapping – local validation and optimization in western Canada, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 24, 947–971, <https://doi.org/10.5194/nhess-24-947-2024>, 2024.