ICGC
Institut
Cartogràfic i Geològic
de Catalunya

PROCEEDINGS DE LES VI JORNADES TÈCNIQUES DE NEU I ALLAUS



Novembre: 2026

Generalitat
de Catalunya

VI JORNADES TÈCNIQUES DE NEU I ALLAUS

Barcelona

22 d'octubre de 2026

Taula de continguts

1. Pròleg 8
2. Comitè organitzador 11
3. Comitè científico-tècnic 12
4. Patrocinadors 13
5. Col·laboradors 14
6. Ponències i pòsters 15

L'índex MSI com a eina de síntesi nivoclimàtica: cas d'aplicació a Andorra

Anna Albalat, Laura Trapero i Aina Margalef

O'Bell X 1.8: Un sistema modular i desmuntable de gas per al desecadenament preventiu d'allaus

Jean-Guillaume Aldebert, Thomas Berger, Cédric Larcher, Johann Query y Olivier Rivoal

Observación nivometeorológica local y gestión operacional del riesgo de aludes en Leitariegos (Cordillera Cantábrica occidental)

Gilberto Antón

Explorant la variabilitat regional de les plaques accidentals als Pirineus

Montse Bacardit, Jordi Gavaldà, Sara Orgué, Ivan Moner, Ibantxo González, Carles García-Sellés, Glòria Martí, Santiago Manguán, Jordi Pons, Francesc Vilar, Guillem Martín, Aina Margalef

Observacions de precipitació hivernal amb radars perfiladors verticals i disdròmetres: resultats del projecte "ARTEMIS"

Joan Bech, Mireia Udina, Francesc Polls, Eulàlia Busquets ,Arnau Toledano i Albert García Benadí

Aproximació algorítmica automatitzada a l'Avalanche Terrain Exposure Scale 2.0

Pablo Calomardo

Propuesta de servicio de informaci· n y predicci· n de aludes de Aragón

Jorge Crespo

Investigación sobre el uso de reflectores activos para el procesado INSAR y de la GNSS-R para la mejora de la estimación del SWE

Pedro Espín-López, Paolo Perret, Martina Lodigiani, Fabrizio Troilo, Guido Luzi y Marco Pasian

Escalfament depenent de l'altitud al Pirineu: dades, anàlisi i resultats

Pere Esteban, Javier Sigró, Marc Prohom, Jordi Cunillera, Jordi Cateura, Juan Ignacio López-Moreno

10 anys de MeteoMuntanya

Pere Esteban, Aleix Serra, Quim Pons, Verónica Couto i Jordi Cruz

PIRINEX: Una xarxa de radars meteorològics de banda-X per al Pirineu Català

Ferran Fabró, Patricia Altube, Oriol Rodríguez i Nicolau Pineda

Sistematització de la inspecció dels sistemes de contenció del mantell nival

Josep Farré, Josep M. Caba, Eugènia Álvarez i Josep Ricart

Indicadors anuals del perill d'allaus i evolució temporal al Pirineu de Catalunya

Carles García-Sellés, Glòria Martí, Santiago Manguán, Jordi Pons i Francesc Vilar

Implementació d'un sistema objectiu per a la gestió del risc d'allaus en zones vulnerables de la Val d'Aran

Jordi Gavaldà, Montse Bacardit, Sara Orgué, Pere Oller, Laura Trabal, Daniel Xifre

Avalarms, un sistema automàtic d'avís de perill d'allaus en accessos a instal·lacions hidroelèctriques

Francesc Grau, Pere Oller

Medición continua del equivalente en agua de la nieve mediante espectroscopía gamma de bajo coste

Víctor Herráiz-López, Ayla Marzo-Lorente, Adrián Subías Martín, Rafael Alonso y Víctor Berdejo-Arcéiz

Lecciones de la avalancha del cerro Cocinero: Dinámica de aerosoles e implicaciones para las operaciones de búsqueda y rescate

Cédric Larcher, Alejandro Casteller y Luis Schinelli

Trampas heurísticas en la evaluación del riesgo de aludes y manipulación de márketing: un enfoque cetético para la toma de decisiones críticas

Cédric Larcher

Lliscaments basals al Ter-Freser durant la temporada 2025-2026: caracterització i causes d'un episodi insòlit

Santiago Manguán Esteban, Francesc Vilar Bonet, Carles García-Sellés, Jordi Pons Otàlora, Glòria Martí i Domènech, Manuel Carmona Salcedo

Reducción del área inicial de búsqueda en accidentes por alud mediante detección automática con inteligencia artificial y geolocalización: el sistema Snowfyp

Francisco Manzano Gómez

Base de dades d'accidents per allau a Andorra: què ens aporta la cartografia?

Aina Margalef, Anna Albalat i Laura Trapero

Retrospectiva: 30 años de impacto. Historia de los RACS GAZEX en "Caltrans"

Ryan Marvin, Cedric Larcher

Morfologia de vall i estructura vertical dels cold-air pools a la Cerdanya: comparació dels transsectes de Masella i Cadí

Josep Ramon Miró, Juan Carlos Peña, Enric Casellas i Nick Pepin

Influencia de la actividad convectiva y de las capas de *graupel* en la estabilidad del manto nivoso en Sierra Nevada: propuesta metodológica 2026-27

NivoSur

Nivosur: experiencia piloto de observación nivológica y predicción de aludes en Sierra Nevada durante la campaña 2025-2026

NivoSur

Primers resultats de l'estudi de seguiment de les congestes de neu a la carretera BV-4031 al Coll de la Creueta

Pere Oller Figueras, Laura Trabal Garmon, Melina Matias Elias, Marc Mendez Costa, Jordi Diez Campoy i Oriol Lecha i Augé

Caracterització de la capa de neu erosionable als Pirineus

Pere Oller Figueras, Lukas Stoffel, Perry Bartelt, Laura Trabal Garmon, Jordi Gavaldà Bordes, Montse Bacardit Peñarroya, Sara Orgué Vila, Glòria Martí i Domènech, Carles García-Sellés, Guillem Martín Bellido, Xavier Pons Claret i Jordi Brocal Hernández

La plataforma Albina, dels Alps als Pirineus. Eina per a la Predicció de la comunicació del perill d'allaus regional

Sara Orgué Vila, Jordi Gavaldà Bordes i Montse Bacardit Peñarroya

Intervenció i control sobre el terreny d'una allau de lliscament basal en entorn urbà sense opcions de desencadenament amb explosius

Sergi Riba Porras, Vicente de Medina Iglesias, Joan Albós Cavaliere i Carles García-Sellés

Metodologia basada en SIG per a la priorització en temps real de les operacions de control d'allaus al domini esquiable d'Ordino Arcalís, Andorra

Sergi Riba Porras, Joan Viladomat Novell, Albert Reyes Comorera i Carles García-Sellés

Generació massiva de models numèrics pel seu calibratge i l'anàlisi multi-escenari de dinàmica d'allaus amb Iber

Marcos Sanz-Ramos, Lisa Sophie Ahlers, Pere Oller, Ernest Bladé

Localització tridimensional de víctimes d'allaus amb posicionament per satèl·lit: primera prova amb els bombers de la Generalitat

Joan Solà i Joan Vallvé

Estudio experimental de la evolución estructural del manto nivoso mediante un radar SFCW en el Pirineo Central

Adrián Subías, Víctor Herráiz-López, Samuel T. Buisán, Iñigo Salinas y Rafael Alonso

Modelització numèrica de l'episodi de torb del Balandrau (30/12/2000) amb WRF-CRYOWRF

Arnau Toledano, Mireia Udina, Yolanda Sola, Joan Bech, Eulàlia Busquets, Francesc Polls, Sergi González i Pere Esteban

1. Pròleg

El 22 d'octubre van tenir lloc les VI Jornades Tècniques de Neu i Allaus a la seu de l'Institut Geològic i Cartogràfic de Catalunya (ICGC) de Barcelona. Les jornades van ser organitzades per l'ICGC, el Conselh Generau d'Aran, el Servei Meteorològic de Catalunya (METEOCAT), Andorra Recerca i Innovació i l'Associació per al Coneixement de la Neu i les Allaus (ACNA), amb el patrocini d'ARANTEC i MND Safety i la col·laboració de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya (FGC Turisme), la Federació d'Entitats Excursionistes de Catalunya (FEEC), la Universitat de Barcelona i Protecció Civil.

La jornada va reunir més de 140 especialistes i persones vinculades al món de la neu i les allaus, i va esdevenir un espai d'intercanvi de coneixement, experiències i nous desenvolupaments relacionats amb aquesta temàtica.

El programa va incloure diverses ponències, dues conferències, presentacions de pòsters i una taula rodona sobre accidents per allaus, que van permetre compartir coneixement, experiències i desenvolupaments recents en aquest àmbit.



Les sessions es van estructurar al voltant de cinc grans eixos temàtics: meteorologia de muntanya i el canvi climàtic, predicció d'allaus, cartografia i dinàmica d'allaus, prevenció, planificació i seguretat, i neu i recursos hídrics.

Les jornades es van iniciar amb la benvinguda del subdirector d'Enginyeria Geològica i Geofísica de l'ICGC, Sr. Joan Palau, i amb les intervencions de la directora del Servei Meteorològic de Catalunya (Meteocat), Sra. Sarai Sarroca, i del director general de Polítiques de Muntanya, Sr. Carles Guàrdia.

Tot seguit, es van iniciar les jornades pròpiament dites amb l'exposició oral de 8 ponències i 2 conferències, i, en l'apartat de pòsters, es van presentar 26 treballs. També es va fer una taula rodona titulada «Accidents per allaus en la pràctica de muntanya: formació, previsió i sensibilització», que va comptar amb la participació de 5 especialistes en matèria de formació en allaus i seguretat, rescat, i predicció i cartografia d'allaus.



Els ponents, tant en les sessions orals com en les de pòsters, van presentar avenços en el seguiment meteorològic d'alta muntanya, amb la implantació de noves infraestructures d'observació al Pirineu; en la predicció d'allaus, amb estudis sobre la variabilitat de problemes allavosos com els lliscaments basals i les capes febles persistents, així com en la millora dels butlletins de perill; i en la cartografia i la modelització, amb nous treballs sobre la dinàmica d'allaus, les eines de simulació numèrica i els sistemes automatitzats per a l'elaboració de cartografia ATES. També es van exposar noves solucions per a la prevenció i la gestió del risc,

avenços en metodologies de rescat en allaus i eines innovadores per a l'estudi i el seguiment de l'evolució del mantell nival.

Les conferències magistrals van tractar sobre l'aplicació de la intel·ligència artificial a l'estudi de les allaus de neu i sobre els principals avenços i reptes actuals en l'àmbit de la nivologia. La Dra. Cristina Pérez, investigadora de l'Institut Suís de Recerca de la Neu i les Allaus (SLF), va presentar la conferència «Aprenentatge automàtic aplicat a la detecció i predicció d'allaus de neu», centrada en l'ús del machine learning per a la detecció i predicció d'allaus, els models de simulació i els sistemes automàtics d'avís en zones exposades. Per la seva banda, el Dr. Juan Ignacio López Moreno, científic titular del Consell Superior d'Investigacions Científiques (CSIC) a l'Institut Pirinenc d'Ecologia (IPE), va exposar els darrers desenvolupaments i els nous reptes en l'estudi de la neu a la conferència «Avances recientes y nuevos retos en el estudio de la nieve».

Com a novetat, enguany es van lliurar dos premis oferts per l'ACNA: un premi a la millor presentació oral per votació popular dels assistents i un premi al millor pòster per votació d'un jurat compost per membres del comitè científic i de l'ACNA. La millor ponència va recaure en la presentada per Santiago Manguán (ICGC) amb el títol «Lliscaments basals al Ter-Freser durant la temporada 2025-2026: caracterització i causes d'un episodi insòlit». El millor pòster exposat, segons el jurat, va ser el de Joan Solà i Joan Vallvé (CSIC-UPC), amb el títol «Localització tridimensional de víctimes d'allaus amb posicionament per satèl·lit: primera prova amb els Bombers de la Generalitat».

2. Comitè organitzador

Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC)

Conselh Generau d'Aran (CGA)

Servei Meteorològic de Catalunya (SMC)

Andorra Recerca i Innovació (AR+I)

Associació Coneixement Neu i Allaus (ACNA)

3. Comitè científico-tècnic

Anna Albalat (AR+I i ACNA)

Òscar Alemán (ACNA)

Jordi Cruz (SMC)

Pere Esteban (SMC)

Carles García (ICGC)

Jordi Gavaldà (CGA)

Santiago Manguán (ICGC)

Aina Margalef (AR+I)

Glòria Martí (ICGC)

Guillem Martín (Servei Meteorològic Nacional d'Andorra)

Jordi Pons (ICGC)

Laura Trapero (AR+I)

Francesc Vilar (ICGC)

4. Patrocinadors

ARANTEC

Arantec Enginheria SL

MND SAFETY

Groupe MND Safety

5. Col·laboradors

FGC TURISME

Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya

PIRINEU 365

Generalitat de Catalunya

FEEC Federació d'Entitats Excursionistes de Catalunya
Federació Catalana d'Alpinisme i Escalada

Federació d'Entitats Excursionistes de Catalunya

UNIVERSITAT DE BARCELONA
Facultat de Ciències de la Terra

Universitat de Barcelona

protecció civil

Protecció Civil

6. Ponències i pòsters

L'ÍNDEX MSI COM A EINA DE SÍNTESI NIVOCLIMÀTICA: CAS D'APLICACIÓ A ANDORRA

Anna Albalat [(1)]; Laura Trapero [(1)] i Aina Margalef [(1)]

(1) Andorra Recerca + Innovació. Av. Rocafort, 21-23, 3a planta. AD600, St Julià de Lòria (Andorra). aalbalat@ari.ad

PARAULES CLAUS: índex MSI, climatologia, gruix de neu, indicadors, variabilitat climàtica

Resum

La caracterització de les temporades de neu és una eina clau per interpretar l'evolució del mantell nival i contextualitzar les observacions en relació amb la variabilitat climàtica recent. Aquest treball presenta l'actualització de les sèries nivometeorològiques d'Arcalís (1980-2026) i Sorteny (2008-2026), incorporant les darreres temporades i aplicant-hi l'índex Multivariate Snow Index (MSI) com a indicador sintètic del comportament del gruix de neu a l'alta muntanya hivernal. L'anàlisi avalua la capacitat de l'índex MSI per discriminar entre temporades molt excedentàries, normals i deficitàries, amb una atenció especial a les temporades properes a la normalitat, que sovint són les més difícils de classificar i interpretar. Aquesta revisió contribueix a valorar l'MSI com a eina de seguiment climàtic de neu i per facilitar la comunicació de les tendències del gruix de neu en un context de variabilitat climàtica creixent.

INTRODUCCIÓ

Les regions de muntanya representen el 35 % de la superfície d'Europa, i un 17 % de població viu en aquestes zones de muntanya. En el cas dels Pirineus, aquests tenen una extensió aproximada de 55.000 km^2 (un 0,5 % del total de la superfície d'Europa) i Andorra representa el 0,85 % de la superfície del conjunt de la serralada pirinenca. A diferència dels països limítrofs, en el cas andorrà, tota la població habita en un territori 100% de muntanya. Les regions de muntanya tenen un paper estratègic en les reserves d'aigua (Beniston, 2003) on part de l'any es troben cobertes de neu. A escala global, la coberta de neu mostra una tendència majoritàriament negativa tant en extensió com en durada en les darreres dècades (Notarnicola, 2022) . Tot i aquesta tendència a escala global, les administracions cada cop tenen més interès en disposar de dades observades que permetin detectar la variabilitat interanual i quantificar els recursos hídrics a final de cada hivern. Els indicadors permeten quantificar i classificar els recurs hídric nival i anticipar-se a possibles escenaris futurs en un context de canvi climàtic. Els principals indicadors univariants clàssics tenen les seves limitacions per descriure el comportament global d'una temporada. Per això, Albalat et al. 2025 proposen treballar amb un indicador multivariant que permeti sintetitzar la informació extreta del mantell de neu en dues característiques: la magnitud entesa com l'excés de neu i la durada entesa com la persistència del mantell de neu.

Per tant, els principals objectius del treball seran per una banda actualitzar les sèries nivometeorològiques de Sorteny (2290m) (2009-2026) i d'Arcalís (2059m) (1980-2026) i, per l'altra, avaluar la capacitat de l'MSI per discriminar en temporades molt excedentàries, normals i deficitàries, amb un interès especial en aquelles properes a la normalitat. Finalment, es compara l'MSI amb altres indicadors amb l'objectiu de determinar les seves fortaleses, limitacions i possibles ajustos.

METODOLOGIA

Àrea d'estudi i dades:
Per al treball s'han utilitzat les dades de dues estacions nivometeorològiques d'Andorra, l'estació de Sorteny, situada al Parc Natural de la Vall de Sorteny, a 2290m, pel període 2009-2026; i l'estació manual de l'estació d'esquí d'Arcalís, a 2059m, pel període més ampli 1980-2026 totes dues dintre del territori d'Andorra (Figura 1). Les dades utilitzades corresponen al gruix de neu màxim observat diàriament, en cm, amb un control de qualitat manual.

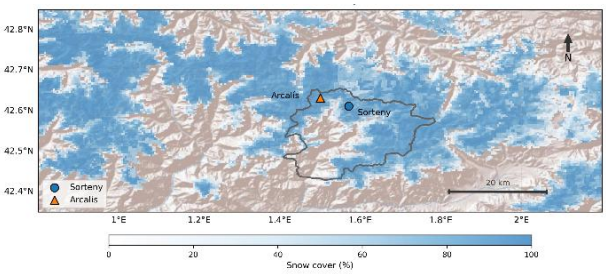


Figura 1 – Àrea d'estudi amb la localització de les dues estacions nivometeorològiques: Sorteny (2.290 m) i Arcalís (2.059 m, observació manual 1980-2026). Imatge de satèl·lit de la coberta de neu del 4 d'abril de 2026, dia del gruix màxim de la temporada 2025-26.

Índex MSI:
S'ha utilitzat l'índex MSI (Albalat et al. 2025) per caracteritzar el comportament del gruix de neu diari de la temporada nival, des de novembre fins a abril, a partir de dues components: la durada (SD_d), definida com el nombre de dies amb gruix de neu diari (HS) igual o superior al percentil 50 (P_{50}); i la magnitud (SD_i), definida com la suma dels excedents de gruix de neu respecte el P_{50} durant, com a mínim, tres dies consecutius i normalitzat per la temporada (181 dies). El resultat del càlcul permet distingir les anomalies sostingudes del gruix de neu durant la temporada de les fluctuacions aïllades i, alhora, permet comparar qualitativament amb els indicadors més clàssics (Steiger et al., 2019).

Per determinar la sensibilitat de les observacions en relació al període de referència seleccionat s'ha fet una anàlisi de sensibilitat per a cada estació. Per Sorteny s'han utilitzat dos períodes diferents: el conjunt de totes les temporades 2009-2026 i el subperíode 2010-2020 i, addicionalment, el subperíode 2010-2026 com a pertorbació mínima, que difereix de la referència completa en una única temporada i actua com a pertorbació mínima del llindar; i per la sèrie d'Arcalís el període complet 1980-2016 i el subperíode 2000-2016, amb 17 temporades. Primer s'han comparat les corbes del llindar P_{50} diari de l'HS pels períodes de referència amb la finestra mòbil de 31 dies dins de la finestra estacional de novembre a abril (nov-abr). A partir de l'anàlisi *Jackknife* (supressió successiva d'una observació; Efron & Tibshirani, 1993) l'índex es calcula tantes vegades com temporades s'estan analitzant, excloent-ne una cada vegada i establint un rang de valors amb les diferències del màxim i mínim de P_{50} per a cada temporada. Aquest mateix procediment s'ha fet per l'MSI, tant pel SD_d i el SD_i. Aquesta anàlisi indica quan pes tindria cada hivern dins del període de referència i quantifica la dispersió que cada hivern indueix en els valors resultants. Per la sèrie d'Arcalís, no s'ha pogut aplicar l'MSI en les temporades recents 2016-2026 ja que falten les dades d'inici i final de temporada, que són dependents de l'operativitat de l'estació d'esquí.

A més, de la mateixa manera que a Albalat et al. 2025, es treballa amb indicadors convencionals com a suport en la qualificació, ja publicats en el repositori de GitHub juntament amb l'index MSI. Per aquest treball, s'ha calculat, sobre la mateixa finestra temporal de novembre a abril, el gruix de neu mitjà (HSmean), a partir de la mitjana del gruix de neu durant tota la temporada. Els resultats es comparen i s'apliquen de dues maneres: (i) a la manera tradicional , situant el gruix de neu mitjà dins la seva distribució de percentils, i (ii) sobre l'MSI, situant-hi el percentil mitjà dels dos components.

Per a la classificació de cada temporada (MSI_score i HSmean) s'han utilitzat els percentils 10, 30, 70 i 90 de l'HSmean i de l'MSI ((SD_d_score + SD_i_score) / 2) pels diversos períodes de referència analitzats. Les temporades s'han classificat en 4 categories, molt excedentària (>P_{90}), excedentària (P_{70}-P_{90}), normal (P_{30}-P_{70}), deficitària (P_{10}-P_{30}) o molt deficitària (<P_{10}).
Aquests percentils encaixen amb els estadístics internacionals per definir les temporades nivals per freqüència percentílica (Spandre et al., 2019) . En aquest cas s'ha aplicat l'anàlisi *leave-one-out (loo)* seguint la metodologia de Lavaysse et al., 2018 per a la classificació. Es classifica la temporada traient aquesta del càlcul i recalculant els percentils per saber quina classe tindrà cada temporada sense que formi part de la pròpia referència.

RESULTATS

Respecte a la sensibilitat del període de referència: Pel cas de Sorteny, s'han dividit les dades en dos subperíodes. Els valors dels components de l'MSI son inferiors pel subperíode 2010-2020 en relació a la sèrie completa disponible. Aquest subperíode conté hiverns amb nevades més importants, com els dels anys 2013-2014 i 2017-2018; i exclou el trienni sec dels darrers anys (2022-2025). Excloure els hiverns recents fa augmentar el llindar P_{50}, en canvi, incloure'ls el rebaixa (Figura 2). Aquestes diferències es veuen més marcades en la durada SD_d (gràfic superior de la Figura 2) de la temporada que en la magnitud de l'excés de neu SD_i.

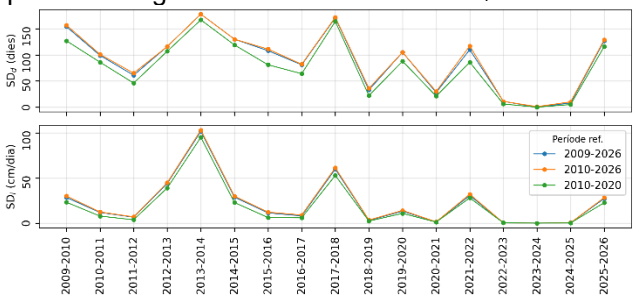


Figura 2 – Sensibilitat components de l'índex MSI (SD_d i SD_i) per temporada a Sorteny, calculats per als tres períodes de referència (2009-2026, 2010-2020 i 2010-2026). El subperíode 2010-2020, que exclou el trienni deficitari recent, desplaça sistemàticament els valors a la baixa.

La comparació de les dues corbes P_{50} diari d'HS de Sorteny mostra que el subperíode 2010-2020 té valors de P_{50} més elevats, amb +7,1 cm de mitjana que el període que inclou els darrers anys secs, i amb una separació màxima de fins a 24 cm. A

Arcalís s'ha repetit l'exercici (Figura 3) comparant la referència completa 1980-2016 (37 temporades) amb un subperíode recent de 17 temporades (2000-2016), la mateixa longitud que la referència de Sorteny. Tot i la reducció de la sèrie, el desplaçament del llindar P_{50} és de només +3,2 cm de mitjana (separació màxima de 21,9 cm), menys de la meitat que a Sorteny.

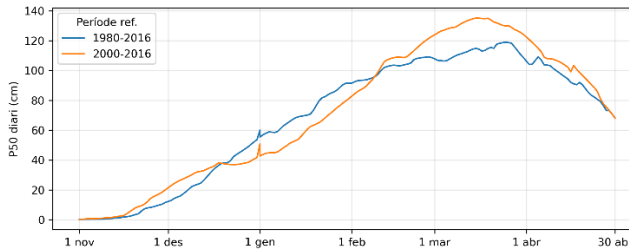


Figura 3 – Llindar P50 de gruix de neu diari (HS) a Arcalís, amb finestra mòbil de 31 dies, per al període novembre – abril.

A la Taula 1 es mostren els estadístics pel que fa SD_d (dies) i SD_i (cm/dia) a les dues estacions.

Rang Jackknife	SD_d Sorteny	SD_d Arcalís	SD_i Sorteny	SD_i Arcalís
Nombre de temporades	17	37	17	37
Mitjana	7,2	5,2	2,4	1,5
Mediana	5	4	2,7	1,4
Max	22	20	4,6	3,2

Taula 1 – Resultat de l'anàlisi de diagnosi Jackknife per HS a l'estació de Sorteny i Arcalís.

En el cas d'Arcalís s'observa com l'exclusió d'una sola temporada en el càlcul del llindar altera el còmput de les altres temporades una mitjana de 5,2 dies, amb un màxim de fins a 20 dies. A Sorteny, amb 17 temporades, cada hivern pesa el doble dins de la mostra en que es construeix el P_{50}. En treure una temporada de la referència, el SD_d varia fins a a 7,2 dies de mitjana, amb un màxim de 22 dies, això vol dir que el gruix de neu d'aquella temporada passa períodes llargs pròxims a la mitjana i un desplaçament petit del P_{50} fa que molts dies es no es tinguin en compte en la suma de la variable SD_d. Si comparem amb Arcalís, tot i disposar del doble de temporades, te un rang de valors del mateix ordre que Sorteny. En termes de magnitud, la mateixa pertorbació, és a dir, treure una temporada del càlcul del llindar, desplaça l'SD_i fins a un màxim de 4,6 cm/dia a Sorteny i de 3,2 cm/dia a Arcalís, seguint el mateix patró que la durada: la sensibilitat no es reparteix uniformement sinó que es concentra en temporades concretes i mantenint les altres temporades sense canvis.

Classificació MSI i qualificació del gruix de neu mitjà (HSmean) per temporada:

S'ha fet la classificació de les temporades en funció de l'MSI i el gruix de neu mitjà l'HSmean per a l'estació de Sorteny. Pel que fa a l'MSI, hem verificat si la classificació de les temporades varia aplicant la metodologia *leave-one-out* (*loo*), que exclou la temporada de la seva pròpia referència. Els resultats mostren que cap temporada de les 17 classificades en MSI_score canvien la seva classe, el desplaçament de les puntuacions és sistemàtic i es reforça la seva direcció sense creuar cap llindar de classe (Figura 4).

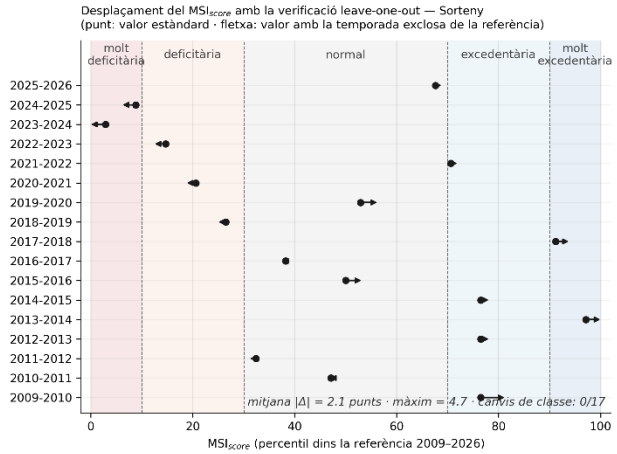


Figura 4 – Verificació leave-one-out de la classificació a Sorteny: puntuació MSI de cada temporada amb la referència completa (punt) i amb la mateixa temporada exclosa del llindar i de la distribució de percentils (fletxa), sobre les cinc classes operatives (percentils $P_{10}/P_{30}/P_{70}/P_{90}$).

Pel que fa a la classificació segons l'HSmean, de les 17 temporades analitzades, només 3 donen resultats diferents als de l'MSI (2014-2015, 2022-2023 i 2024-2025) com es mostra en la Figura 5. En el cas de la temporada 2014-2015, la classificació segons HSmean dona una categoria inferior (normal) que la realitzada amb l'MSI (excedentària). Això és degut a la magnitud de l'index, entès com l'excedent respecte el P_{50}, ja que HSmean es dilueix en un hivern persistent que si que capta l'MSI. Per a les temporades 2022-2023 i 2024-2025 s'observa un comportament oposat: la temporada 2024-2025 presenta un HSmean major que la temporada 2022-2023 (92 cm vs 75 cm) però amb menys dies per sobre el llindar (8 dies vs 11 dies). En aquest cas, l'índex MSI perd resolució en hiverns amb neu persistent però per sota la mediana, i dona la classificació més baixa a l'hivern 2024-2025 (molt deficitària). En canvi, l'HSmean mostra aquesta persistència classificant la temporada en deficitària. Pel que fa a la temporada 2022-2023, l'MSI la classifica com a deficitària i l'HSmean com a molt deficitària.

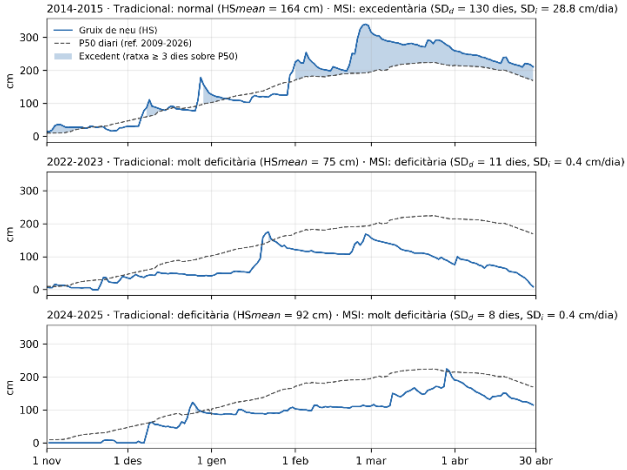


Figura 5 – Evolució diària del gruix de neu HS (línia contínua) i del llindar P_{50} (discontínua) a Sorteny per a les tres temporades amb desacord entre la classificació MSI i la tradicional; l'ombrejat marca SD_i, l'excedent comptabilitzat per l'índex (ratxes ≥ 3 dies sobre el P_{50}).

CONCLUSIONS

L'aplicació de l'índex MSI a la sèrie contínua de 17 anys de Sorteny (2009-2026) mostra sintètica i adequadament el comportament global d'una temporada, coincidint amb la qualificació del gruix de neu mitjà per percentils en 14 dels 17 casos. Per una banda, reconeix la persistència que el gruix de neu mitjà no permet. La incertesa en la classificació es concentra en les temporades limítrofes entre categories, i es deu sobretot al període de referència utilitzat. Les temporades frontereres que es queden a menys de 3 punts del percentil de tall entre categories son 5 de 17 temporades (29%) en el cas de Sorteny. L'anàlisi amb *Jackknife* de la sèrie d'Arcalís i Sorteny pels dos subperíodes analitzats confirma que la diferència rangs de SD_d i SD_i no s'explica per la longitud de la sèrie de referència sinó pel règim nivoclimàtic de cadascuna i la variabilitat específica de cada zona. Amb l'anàlisi leave-one-out verifiquem que no hi ha autoconaminació entre temporades limítrofes (0/17), aquestes son les mateixes que concentren la sensibilitat al període de referència. En el cas de les sèries curtes, es pot utilitzar l'índex MSI, indicant el període de referència utilitzat.

Com a exercici exploratori, s'ha fet el càlcul del dèficit de l'índex, és a dir, quants dies el gruix de neu no supera el P_{50}; i de la magnitud del dèficit, aplicant la mateixa regla dels tres dies consecutius per sota del llindar. Per a les temporades del trienni sec (2022-2025) els resultats mostren que amb dues temporades amb nombre de dies per sota el P_{50} similars (170 i 173 dies respectivament), la magnitud distingeix la 2022-23 (63,9 cm/dia) de la 2024-25 (46,5 cm/dia), sent aquesta darrera menys deficitària. La formalització de l'indicador pel càlcul del dèficit, juntament amb l'anàlisi de la sèrie llarga d'Arcalís pel període recent, constitueix la línia de continuïtat natural d'aquest treball.

Pel que fa a la magnitud, s'ha detectat que la formulació operativa publicada de l'SD_i pot incorporar, en temporades amb ratxes de poca magnitud, excedents dels dos primers dies de cada superació del llindar, que la pròpia definició de l'indicador i del càlcul de l'excedent exclou. A Sorteny això afecta només les dues temporades més deficitàries (amb la definició estricta, l'SD_i passa de 0,40 a 0,23 cm/dia el 2022-23 i de 0,36 a 0,17 el 2024-25), i corregir-ho no te cap variació: en tractar-se d'una classificació d'ordre, ni les puntuacions, ni cap classe, ni les correlacions no s'alteren. Aquest canvi s'ha incorporat com a variant opcional a la implementació al repositori de GitHub https://github.com/AnnaTramun/SnowDepthAnalysis.git per mantenir la formulació original.

AGRAÏMENTS

Les autores d'aquest treball volen agrair la informació proporcionada al llarg dels anys treballadors de pistes de les estacions d'esquí d'Andorra (Pal-Arinsal, Ordino-Arcalís, Soldeu - el Tarter i Pas de la Casa - Grau Roig), així com al Servei Meteorològic Nacional, per la informació compartida.

BIBLIOGRAFIA

ABEGG, B., MORIN, S., DEMIROGLU, O.C., FRANÇOIS, H., ROTHLEITNER, M., STRASSER, U., 2021. Overloaded! Critical revision and a new conceptual approach for snow indicators in ski tourism. International Journal of Biometeorology, 65, 691–701.

ALBALAT, A., TRAPERO, L., LEMUS-CANOVAS, M., PONS, M., 2025. Characterizing past and current snow seasons through the application of a new multivariate snow index. Journal of Hydrology, 657 10.1016/j.jhydrol.2025.133050.

BENISTON, M., 2003. Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts. Climatic Change, 59, 5–31.

EFRON, B., TIBSHIRANI, R.J., 1993. An Introduction to the Bootstrap. Chapman & Hall, New York, 436 pp.

LAVAYSSE, C., CAMMALLERI, C., DOSIO, A., VAN DER SCHRIER, G., TORETI, A., VOGT, J., 2018. Towards a monitoring system of temperature extremes in Europe. Natural Hazards and Earth System Sciences, 18, 91–104.

NOTARNICOLA, C., 2022. Overall negative trends for snow cover extent and duration in global mountain regions over 1982–2020. Scientific Reports, 12, 13731.

SPANDRE, P., FRANÇOIS, H., VERFAILLIE, D., PONS, M., VERNAY, M., LAFAYSSE, M., GEORGE, E., MORIN, S., 2019. Winter tourism under climate change in the Pyrenees and the French Alps: relevance of snowmaking as a technical adaptation. The Cryosphere, 13, 1325–1347.

STEIGER, R., SCOTT, D., ABEGG, B., PONS, M., AALL, C., 2019. A critical review of climate change risk for ski tourism. Current Issues in Tourism, 22(11), 1343–1379.

JorTec 6
Neu i Allaus

VI tècniques de neu i allaus
22 d'Octubre de 2026
Jornades Barcelona

O'BELLX 1.8: UN SISTEMA MODULAR Y DESMONTABLE DE GAS PARA EL DISPARO PREVENTIVO DE ALUDES

Jean-Guillaume Aldebert, Thomas Berger, Cédric Larcher, Johann Query y Olivier Rivoal

(1) MND Safety, Sainte-Hélène-du-Lac, France

RESUMEN: La gama O'BellX presenta un sistema modular de gas transportable por helicóptero para el disparo preventivo de aludes, diseñado para zonas remotas o ambientalmente sensibles. Este sistema utiliza un módulo de gas compacto y desmontable que puede desplegarse, recuperarse y mantenerse mediante helicóptero sin necesidad de personal en tierra. Entre sus características clave destacan un gancho automático patentado para instalación/retirada en una sola rotación, disparo sincronizado ("Multisynch") para explosiones coordinadas entre 2 y 10 sistemas, y un diseño ecológico sin residuos químicos y con mínimo impacto visual. Las especificaciones técnicas destacan un alcance efectivo de 55–65 m (isobara de 25 mbar a nivel del suelo) y una autonomía de 40–60 disparos. Su modularidad, movilidad y sincronización lo hacen ideal para rutas aisladas o áreas naturales protegidas, garantizando seguridad y cumplimiento ambiental.

PALABRAS CLAVE: prevención de aludes, control remoto de aludes, sistema de gas desmontable, CFD, onda de presión, despliegue por helicóptero

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de liberación de aludes basados en gas se han utilizado operativamente durante casi cuatro décadas, evolucionando desde instalaciones fijas como GAZEX hasta sistemas móviles transportados por helicóptero y sistemas desmontables de posición fija. Las arquitecturas desmontables buscan reducir la exposición del personal durante la instalación y recuperación, facilitar el mantenimiento en el valle y limitar la infraestructura permanente en el punto de liberación. Estos beneficios generan restricciones de ingeniería adicionales, ya que el almacenamiento de gas, la energía, las comunicaciones, la generación de ondas de presión, la resistencia estructural y el transporte en helicóptero deben integrarse en una unidad compacta.

El O'BellX 1.8 se desarrolló para aumentar la autonomía y el rendimiento de la onda de presión, manteniendo al mismo tiempo la retirada estacional, la operación remota y la interacción mínima con el sitio. Se conservó el gancho automático existente para que el módulo operativo pueda instalarse o recuperarse directamente por helicóptero sin necesidad de personal en el punto de liberación por helicóptero.

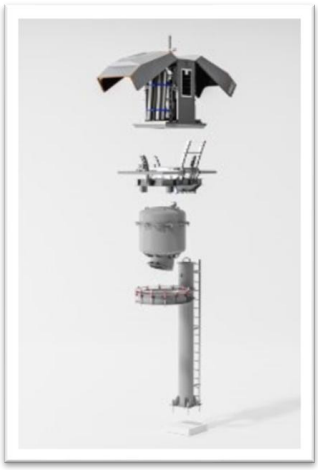


Figura 1: Vista explotada del sistema modular O'BellX 1.8 y del conjunto del mástil.

2. SELECCIÓN DE LA MEZCLA DE GASES Y REDISEÑO DE LA CÁMARA

La arquitectura anterior de O'BellX utilizaba H_2–O_2, mientras que el O'BellX 1.8 emplea C_3H_8–O_2 para aumentar la autonomía integrada de gas. El propano permite un almacenamiento más compacto que el hidrógeno, pero su mayor densidad y características de combustión distintas exigieron una geometría de cámara diferente. La cámara se rediseñó, pasando de una configuración en forma de campana a una más cerrada, con la salida orientada hacia el manto de nieve. El objetivo era fomentar un

** Dirección del autor correspondiente:*
Cedric LARCHER, MND SAFETY,
74 Voie Magellan, 73800 Sainte-Hélène-du-Lac,
France
tel: +33 6 63 13 12 00
email: cedric.larcher@mnd.com

ICGC Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya
Conselh Generau d'Aran
meteo.cat Servei Meteorològic de Catalunya
ANDORRA RECERCA + INNOVACIÓ
ACNA Associació Coneixement Neu i Allaus

desarrollo rápido de la onda de presión en un volumen limitado, respetando las restricciones estructurales y de transporte en helicóptero. El artículo original informe 40 disparos a máxima potencia y hasta 60 a potencia estándar.

Desarrollo de la onda de presión

Las explosiones de propano-oxígeno en aire libre son lentas, pero el confinamiento permite alcanzar condiciones de Chapman-Jouguet (CJ), acelerando la reacción de deflagración a detonación. En espacios confinados, las ondas de choque reflejadas y la expansión restringida del gas amplifican la presión. A diferencia de los tubos largos de GAZEX, el O'BellX 1.8 logra esta aceleración en un diseño compacto, equilibrando los límites estructurales y las restricciones de transporte en helicóptero. La posición de la bujía es crítica para maximizar la potencia de salida de la cámara.

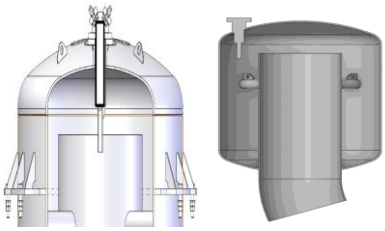


Figura 2: Diseño de la sección transversal de la cámara de combustión y configuración de la bujía para la detonación autoconfinada.

3. MÉTODO DE DISEÑO NUMÉRICO Y ESTRUCTURAL

Análisis de la onda de presión mediante CFD

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) analizó la evolución de la presión y la propagación de la onda dentro de la cámara. La Figura 3 muestra campos de presión estática resueltos en el tiempo, donde se observa cómo el frente de onda se propaga desde la región de iniciación, se separa cerca de la entrada del cilindro y forma un frente uniforme.

Evaluación estructural

Una evaluación estructural combinada con mediciones de presión analizó los esfuerzos en la cámara de explosión de acero de alta resistencia de 4 mm. Las cargas de presión obtenidas de las simulaciones CFD se utilizaron para calcular los esfuerzos mecánicos. Los resultados demuestran que, incluso en condiciones máximas de detonación, los esfuerzos permanecen por debajo del límite elástico del acero, con un factor de seguridad de al menos 2.

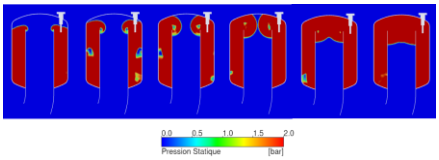


Figura 3: Simulación CFD de la propagación de la onda de presión estática (0 a 2 bar) en la entrada del cilindro a lo largo del tiempo.

Evolución de la onda de presión en la entrada del cilindro

A partir de la chispa, el frente de la onda de presión asciende por las paredes de la cámara hasta alcanzar la entrada del cilindro. En este punto, se observa una separación de la onda de presión. Posteriormente, la onda se propaga dentro del cilindro y forma un frente casi uniforme.

4. PRUEBAS DE CAMPO Y CARACTERIZACIÓN DEL RENDIMIENTO

Métrica de huella de presión

Las mediciones de campo coinciden con las simulaciones, mostrando una sobrepresión de 25 mbar sobre el manto de nieve —equivalente al paso de un esquiador— que se extiende hasta 65 metros. Sin embargo, esto no mide directamente la eficacia de liberación de aludes, que también depende de las condiciones del manto de nieve, las características de la pendiente y la ubicación del disparo.

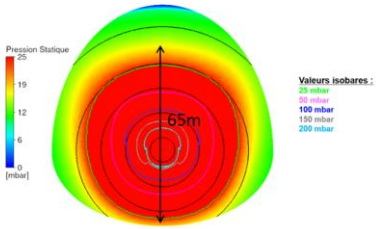


Figura 4: Huella isobárica de presión estática a nivel del suelo, mostrando el umbral de 25 mbar que se extiende hasta 65 m.

Mediciones preliminares en campo

Un O'BellX 1.8 fue probado en campo para evaluar su rendimiento. Las mediciones

coincidieron con las simulaciones numéricas, aunque no se proporcionó una configuración experimental ni una comparación cuantitativa. La altura de la explosión está optimizada para maximizar el impacto en el manto de nieve, lograda mediante un mástil adaptable para zonas con gran acumulación de nieve.

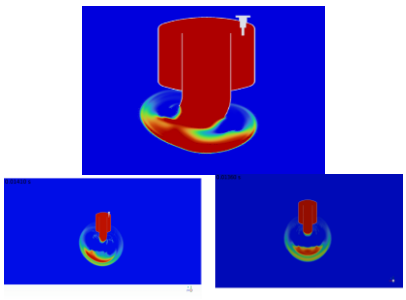


Figura 5: Simulación CFD de la dinámica y expansión de la onda de explosión desde la tobera de salida durante la detonación.

5. ARQUITECTURA OPERATIVA

Implementación, recuperación y mantenimiento

El O'BellX 1.8 está diseñado para una instalación y retirada estacional mediante helicóptero, gracias al gancho automático patentado de la gama O'BellX, sin necesidad de personal en el lugar.

Su arquitectura permite retirar el módulo activo fuera de temporada, protegiéndolo de desprendimientos de rocas, tormentas y otras degradaciones estivales. El mantenimiento se realiza principalmente en el valle, en condiciones controladas, antes de su redespliegue.

Su diseño modular también permite trasladar la unidad completa a otra ubicación si los requisitos operativos o los patrones de aludes cambian.

Operación remota y sincronizada

El O'BellX 1.8 combina una gran capacidad de gas integrada con las características de la onda de presión generada por su cámara de combustión rediseñada. Además de los disparos individuales, el sistema admite la operación sincronizada de múltiples unidades mediante la función Multisynch.

Entre dos y diez sistemas pueden activarse en una secuencia coordinada. Esta capacidad es compatible con toda la gama O'BellX de MND SAFETY y está diseñada para ofrecer a los operadores mayor flexibilidad al gestionar varios puntos de liberación dentro de la misma trayectoria o sector de alud.

El O'BellX 1.8 puede operarse a través de los entornos de control Safety-CS o GME, junto con otros sistemas de control remoto de aludes. La arquitectura de control permite disparos individuales, secuencias de disparo predefinidas y disparos sincronizados de múltiples unidades. Un comando de disparo puede ejecutarse en menos de 40 segundos bajo la configuración operativa definida.

Alimentación energética y comunicación

El O'BellX 1.8 está diseñado para funcionar de manera autónoma en entornos montañosos remotos. Se alimenta mediante cuatro paneles fotovoltaicos que complementan el sistema de baterías integrado. La capacidad de la batería puede ampliarse para condiciones de alta latitud o baja disponibilidad solar.

La comunicación se basa en un sistema redundante de radio + celular, lo que garantiza la conectividad con la base u otros sistemas MND RACS, incluso ante limitaciones del terreno o de la red.

Normativa y cumplimiento ambiental

La arquitectura desmontable del O'BellX 1.8 minimiza la interacción permanente con el sitio al integrar todos los componentes operativos en el módulo, reduciendo la necesidad de infraestructuras como tuberías e instalaciones de gas. La retirada estacional limita el impacto visual fuera de los períodos de control de aludes.

Al ser un sistema basado en gas, evita residuos explosivos. Su removibilidad y modularidad permiten una reubicación económica para adaptarse a condiciones cambiantes del manto de nieve.

6. CONCLUSIÓN

El O'BellX 1.8 se basa en sistemas anteriores de gas (como DaisyBell y O'BellX), mejorando la autonomía y el rendimiento de la onda de presión, al tiempo que conserva las ventajas de los sistemas removibles: despliegue por helicóptero, recuperación estacional, almacenamiento de gas integrado y mantenimiento en el valle.

El cambio de H_2–O_2 a C_3H_8–O_2 requirió un rediseño de la cámara de combustión, así como evaluaciones numéricas y mecánicas

combinadas. La cámara de acero de alta resistencia de 4 mm garantiza que los esfuerzos permanezcan por debajo de los límites de cedencia (factor de seguridad ≥ 2). Las simulaciones muestran una isobara de 25 mbar que se extiende hasta ~65 m, en línea con las mediciones de campo.

Su arquitectura removible minimiza la infraestructura permanente, permite la protección de componentes fuera de temporada y facilita el mantenimiento en el valle. Ante las variaciones en las necesidades de control de aludes, el O'BellX 1.8 amplía las opciones de ingeniería al combinar autonomía, removibilidad, operación remota y rendimiento de la onda de presión en un sistema compacto.

Criteria		***GAZEX***			***O'BellX***		***DaisyBell***
Categoria	Sub-criteria	0.8	1.5	3.0	1.2	1.8	-
Capacidad para desencadenar aludes	Potencia (isobara de 25 mbar a nivel del suelo) – Axial	50 m	60 m	75 m	55 m	65 m	25 m
	Autonomía (Número de disparos a potencia nominal)	80	80	80	24	60	50
	Tiempo de disparo	8 seg	11 seg	18 sec	21 seg	40 seg	7 seg
	Intervalo entre disparos	15 min	15 min	15 min	21 seg	5 min	7 seg
	Sincronización de disparos	Si	Si	Si	Si	**Si**	No

Tabla 1: Comparación de las características y parámetros de rendimiento de los Sistemas de Control Remoto de Aludes (RACS) entre los distintos modelos de productos.

REFERENCIAS

Binger, C., Nelsen, J., yOlson, K. A., 2006. Explosive shock wave compression in snow: effects of explosive orientation and snowpack compression, en: Proceedings of the International Snow Science Workshop, Telluride, CO, Octubre de 2006, 592–597.

Chernouss, P., Fedorenko, Y., Barashev, N., y Mokrov, E., 2006. A study of blasting induced snow instabilities and avalanche publicado en: Proceedings of the International Snow Science Workshop, Telluride, CO, Octubre del 2006, 598–606.

Formby, S. A. y Wharton, R. K., 1996. Blast characteristics and TNT equivalence values for some commercial explosives detonated at ground level, J. Hazard. Mater., 50, 183–198.

Gubler, H., 1977. Artificial release of avalanches by explosives, J. Glaciol., 19(81), 19–29.

Gubler, H. y Wyssen, S., 2002. Artificial release of avalanches using the remote controlled Wyssen avalanche tower, in: Proceedings of the International Snow Science Workshop, Penticton, BC, Canada, 29 September–4 October 2002, 688–695.

Lieberman, E., Schippers, J., y Lieberman, S. C., 2002. The GAZEX Avalanche Release System, en: Proceedings of the International Snow Science Workshop, Penticton, BC, Canada, 2002.

Perla, R., 1978. Artificial release of avalanches in North America, Arct. Alp. Res., 10(2), 235–340.

Schippers, J., 1994. GAZEX Avalanche Control System, en: Proceedings of the International Snow Science Workshop, Breckenridge, Colorado, 1994.

JorTec 6
Neu i Allaus

VI tècniques de neu i allaus
22 d'Octubre de 2026
Jornades Barcelona

OBSERVACIÓN NIVOMETEOROLÓGICA LOCAL Y GESTIÓN OPERACIONAL DEL RIESGO DE ALUDES EN LEITARIEGOS (CORDILLERA CANTÁBRICA OCCIDENTAL)

Gilberto Antón Menéndez.

(1) *Estación Invernal y de Montaña Valle Laciana-Leitariegos (Diputación de León).*
Pister-Socorrista / Nieve producida / Pisado de pistas
(2) *BPA Leitariegos / Puerto de Leitariegos, Cangas del Narcea (Asturias).*
Observador nivometeorológico. bpaleitariegos@gmail.com

PALABRAS CLAVE: aludes, nivología, Leitariegos, observación nivometeorológica, seguridad operacional.

RESUMEN

El occidente de la Cordillera Cantábrica presenta episodios recurrentes de inestabilidad del manto nivoso asociados a nevadas intensas, transporte de nieve por viento y ciclos de rehielo característicos del clima atlántico de montaña. En este sector se localiza la **Estación Invernal y de Montaña Valle Laciana-Leitariegos** y diversas áreas frecuentadas para actividades invernales. El presente trabajo expone observaciones nivometeorológicas realizadas en el entorno de Leitariegos dentro de labores operacionales de estación y de observación de campo. La metodología se basa en observación directa del manto, perfiles estratigráficos, ensayos de estabilidad, seguimiento de nevadas recientes y documentación fotográfica de episodios de inestabilidad, entre ellos acumulaciones por viento, cornisas y deslizamientos basales (zona de pistas de La Feradura). Se presenta asimismo la experiencia de BPA Leitariegos como iniciativa local de comunicación y divulgación nivológica. Entre los casos documentados se incluye un episodio ocurrido en febrero de 2014 en el que un alud afectó a una máquina pisapistas durante trabajos nocturnos de acondicionamiento en La Ferradura - El Neveiru, y un deslizamiento basal ocurrido el 16 de febrero de 2026 en el entorno del km 33 de la AS-213, con llegada de nieve a la calzada. Las observaciones realizadas ponen de manifiesto la utilidad de combinar el seguimiento local del manto con el conocimiento operacional del terreno para documentar su evolución, reconocer indicios de inestabilidad y apoyar la prevención y la comunicación de proximidad.

INTRODUCCIÓN

La nieve y los aludes forman parte de la dinámica invernal de la Cordillera Cantábrica. En su sector occidental, los cambios rápidos de tiempo, las nevadas acompañadas de viento y los ciclos de fusión-rehielo pueden modificar en poco tiempo la distribución y las propiedades del manto. En un dominio esquiable estas condiciones afectan tanto a usuarios como a trabajadores que desarrollan tareas de acondicionamiento, balizamiento, reconocimiento o mantenimiento.

El objetivo de este trabajo es describir la experiencia de observación nivometeorológica local desarrollada en Leitariegos y mostrar su aplicación práctica a la lectura del terreno, la documentación de problemas de inestabilidad, la seguridad operacional y la divulgación de proximidad.

La información presentada procede de observaciones de campo y del archivo fotográfico del autor. Los registros puntuales no constituyen por sí solos una predicción regional del peligro: se interpretan en su contexto meteorológico, temporal y topográfico.

DESARROLLO

Área de estudio y metodología. El área de trabajo se sitúa en el entorno de Leitariegos, en la Cordillera Cantábrica occidental, principalmente dentro del dominio de la Estación Invernal y de Montaña Valle Laciana-Leitariegos y en sectores próximos empleados para interpretar la evolución del manto. La metodología combina observación directa, perfiles estratigráficos, valoración de dureza, humedad y tipo de grano, ensayos de estabilidad, seguimiento de nevadas y redistribución por viento, identificación de cornisas y deslizamientos basales, y documentación fotográfica. Estas observaciones se integran con el conocimiento operativo del terreno adquirido durante los trabajos de estación.

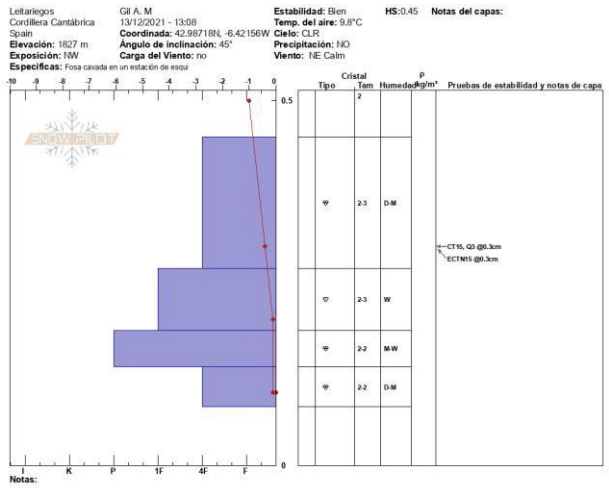


Figura 1 - Perfil nivológico realizado en Leitariegos el 13/12/2021. Registro de estratigrafía, dureza y ensayos de estabilidad. Fuente: BPA Leitariegos.

La lectura local del terreno permite reconocer problemas de distinta naturaleza. Tras nevadas acompañadas de viento pueden formarse acumulaciones a sotavento y cornisas en crestas o cambios de pendiente. Durante fases templadas o con presencia de agua líquida pueden aparecer procesos de nieve húmeda y deslizamientos basales. La observación continuada de estos indicios ayuda a identificar sectores que requieren especial vigilancia y a contextualizar perfiles y ensayos.

El perfil de la Figura 1 ejemplifica el tipo de registro utilizado para describir la estructura del manto en un punto y momento determinados. Su utilidad aumenta cuando se relaciona con la meteorología precedente, la distribución espacial de la nieve, los signos de inestabilidad observados y la evolución posterior.

OBSERVACIÓN OPERACIONAL Y PROBLEMAS DE INESTABILIDAD



Figura 2 - Vista general de La Ferradura-El Neveiru, sector utilizado como referencia para la lectura del terreno y la observación operacional. Fuente: BPA Leitariegos.

CASO OPERACIONAL: ALUD EN PISTAS

(Febrero de 2014)

Entre los antecedentes documentados destaca un episodio ocurrido en febrero de 2014 en la zona de La Ferradura-El Neveiru. Durante trabajos nocturnos de acondicionamiento, un alud alcanzó una máquina pisapistas. Las fotografías del archivo del autor muestran la máquina afectada y la acumulación de nieve sobre la cabina. El caso pone de manifiesto que la exposición al peligro de aludes no se limita a las actividades recreativas: también puede afectar a trabajadores y medios de explotación durante operaciones realizadas sobre terreno nevado.

Desde el punto de vista operacional, el episodio subraya la necesidad de valorar conjuntamente terreno, estado y evolución del manto y exposición. La memoria de incidentes y la documentación fotográfica de zonas problemáticas constituyen además una referencia útil para futuras observaciones y para la formación interna.



Figura 3 - Máquina pisapistas afectada por el alud de febrero de 2014 en La Ferradura-El Neveiru. Fuente: Estación.



Figura 4 - Vista exterior de la máquina pisapistas tras el alud de febrero de 2014 en La Ferradura-El Neveiru. Fuente: Estación.

DESLIZAMIENTO BASAL EN LA AS-213

(Febrero de 2026)

El 16 de febrero de 2026 se documentó un deslizamiento basal de nieve en el entorno del km 33 de la carretera AS-213, en la recta de entrada al pueblo del Puerto de Leitariegos desde Cangas del Narcea. El proceso se produjo sobre una ladera con una pendiente aproximada del 18-20 % y presencia de agua en la base del manto. La nieve movilizada alcanzó la calzada, donde quedaron depósitos y bloques sobre el firme. La documentación fotográfica permite observar la relación entre la ladera, la zona de salida, el recorrido del material y la carretera, y constituye un registro de un proceso de inestabilidad con afección directa a una infraestructura viaria de montaña.



Figura 5 - Deslizamiento basal en el entorno del km 33 de la AS-213 (16/02/2026): vista general y detalle del depósito sobre la calzada. Fuente: Fuente: BPA Leitariegos



Este episodio muestra el interés de extender la observación local más allá del dominio esquiable cuando los procesos de inestabilidad pueden alcanzar carreteras u otras infraestructuras próximas. El seguimiento visual y la conservación de un archivo de episodios facilitan la identificación de puntos expuestos y la comparación de situaciones futuras.



Figura 6 - Zona de salida del deslizamiento basal y depósitos próximos a la calzada de la AS-213. Fuente: BPA Leitariegos

BPA LEITARIEGOS Y DIVULGACIÓN DE PROXIMIDAD

Como extensión de las observaciones de campo se desarrolla BPA Leitariegos en redes sociales, orientado a comunicar de forma comprensible perfiles, fotografías e indicios observados en el manto. Su finalidad es aportar información de proximidad a esquiadores, clubes y usuarios de montaña y favorecer una cultura de observación y prevención. Esta comunicación debe entenderse como observación y divulgación complementaria y no como sustitución de un boletín oficial de peligro de aludes ni de la evaluación individual de cada actividad.

CONCLUSIONES

La experiencia presentada muestra que la observación nivometeorológica local, integrada con el conocimiento del terreno y la documentación de episodios, aporta información útil para la gestión operacional del riesgo. El alud de febrero de 2014 sobre una máquina pisapistas evidencia la exposición durante los trabajos de pista, mientras que el deslizamiento basal del 16/02/2026 en la AS-213 muestra que estos procesos también pueden afectar a infraestructuras viarias próximas. Los perfiles, ensayos, observaciones directas y registros fotográficos permiten conservar memoria de los episodios y apoyar su interpretación posterior. La divulgación de BPA Leitariegos complementa este trabajo acercando las observaciones a esquiadores, clubes y usuarios de montaña, sin sustituir un boletín oficial ni la evaluación específica de cada situación. En la actualidad, AEMET emite BPA periódicos para Picos de Europa y las Sierras del Cordel y Peña Labra, pero no para la Cordillera Cantábrica occidental ni para el Macizo Galaico-Leonés, aunque este último dispone ya de predicción meteorológica de montaña. La recurrencia de episodios de inestabilidad y la frecuentación invernal de estos sectores justifican considerar el refuerzo de la observación sistemática y valorar en el futuro una ampliación de la cobertura de información nivológica y de peligro de aludes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA (AEMET), 2015. La guía de aludes. Agencia Estatal de Meteorología, Madrid. DOI: 10.31978/281-15-009-X.

HERNÁNDEZ HOLGADO, O., 2014. Una aproximación a la nivología en los Picos de Europa. Nota Técnica 15. Agencia Estatal de Meteorología, Madrid. DOI: 10.31978/281-14-006-9.

AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA (AEMET), 2026. Boletín de peligro de aludes. Consulta: 21/09/2026.

AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA (AEMET), 2026. Ampliación de la cobertura geográfica de la predicción de montaña. Consulta: 21/09/2026.

EUROPEAN AVALANCHE WARNING SERVICES (EAWS), 2026. Standards: Avalanche Danger Scale y Avalanche Problems. Consulta: 21/09/2026.

BPA LEITARIEGOS, 2014-2026. Archivo de observaciones nivometeorológicas, perfiles nivológicos y documentación fotográfica de campo. Documentación propia no publicada.

OBSERVACIONS DE PRECIPITACIÓ HIVERNAL AMB RADARS PERFILADORS VERTICALS I DISDRÒMETRES: RESULTATS DEL PROJECTE "ARTEMIS"

Joan Bech [1,2]; Mireia Udina [1]; Francesc Polls [1]; Eulàlia Busquets [1]; Arnau Toledano [1]; Albert García Benadí [3]

(1) Universitat de Barcelona. Departament de Física Aplicada – Meteorologia, Martí i Franqués 1, Barcelona 08028. E-mails: joan.bech@ub.edu, mudina@meteo.ub.edu, fpolls@meteo.ub.edu, ebusquets@meteo.ub.edu, atoledano@meteo.ub.edu
(2) Institut de Recerca de l'Aigua, Universitat de Barcelona.
(3) Universitat Politècnica de Catalunya, Departament de Física, 08800 Vilanova i la Geltrú. E-mail: albert.garcia-benadi@upc.edu

PARAULES CLAUS: disdròmetre, radar meteorològic, perfilador Doppler, tipus de precipitació.

RESUM

Aquest treball descriu breument el projecte ARTEMIS, dedicat a l'estudi de la microfísica de la precipitació hivernal en zones de muntanya mitjançant observacions de radars perfiladors verticals d'efecte Doppler (Micro Rain Radar, MRR) i disdròmetres. Aquests instruments proporcionen informació detallada sobre l'estructura vertical de la precipitació i la distribució de mides de les partícules precipitants, complementant les observacions dels radars meteorològics operatius. La campanya experimental del projecte es va desenvolupar a la comarca de la Cerdanya entre 2024 i 2026, amb observacions a Das, Puigcerdà i la Tosa d'Alp (a 1.1, 1.2 i 2.5 km d'altitud, respectivament). Les dades dels MRR es van processar amb metodologies específiques que permeten millorar la qualitat de les mesures i estimar el tipus de precipitació. Els resultats mostren la capacitat de la combinació de MRR i disdròmetres per caracteritzar episodis de pluja i neu, identificar-ne les transicions de fase i analitzar-ne la variabilitat espaciotemporal. Les observacions obtingudes constitueixen una base valuosa per a la validació de models numèrics de predicció, la comparació amb estimacions de precipitació per satèl·lit i la millora dels mètodes de classificació del tipus de precipitació amb radar.

INTRODUCCIÓ

Els radars meteorològics operatius tradicionals permeten observar el camp de precipitació en un radi típicament d'entre 100 i 250 km, amb una resolució espacial i temporal d'aproximadament 1 km^2 i uns 5 minuts, complementant les observacions puntuals de les xarxes de pluviògrafs, ubicades a nivell del terra, i que segueixen essent la principal referència de precipitació acumulada. Nombrosos factors afecten la qualitat de les estimacions de precipitació amb radar, en particular en zones de muntanya, on el bloqueig orogràfic pot ser molt important. La resolució vertical de les observacions de radar operatiu sovint és força limitada. Per contra, els radars perfiladors verticals d'efecte Doppler com el MRR permet obtenir perfils de precipitació d'uns 6 km d'altura amb elevada resolució espacial, respecte la vertical, i temporal (50 m i 10 s) proporcionant addicionalment una estimació de la distribució de mides de partícules precipitants (DMPs). Les DMPs són clau per a descriure els processos microfísics que donen lloc a la precipitació i controlen la seva evolució, i a més, permeten comparar-les amb la representació que en fan els models numèrics de predicció meteorològica. D'altra banda, els disdròmetres són instruments que permeten obtenir les DMPs prop del terra, i a partir d'aquesta informació generar variables derivades, com el tipus de precipitació (pluja, neu, plugim, etc.) com el contingut en observacions SYNOP o METAR. Aquesta presentació descriu breument el projecte ARTEMIS (*Analysis of oRographic impacTs on prEcipitation MIcrophysics and Satellite-derived estimates*) durant el qual es va realitzar una campanya experimental per a obtenir mesures de disdròmetre i MRRs amb l'objectiu d'estudiar-ne la variabilitat, la seva representació en models numèrics de predicció i disposar d'observacions per a comparar amb estimacions fetes amb satèl·lit.

DESENVOLUPAMENT

La campanya experimental d'ARTEMIS es va dur a La Cerdanya entre 2024 i 2026, concretament a Das, Puigcerdà i la Tosa d'Alp (S1, S2, i S3, respectivament, segons mostra la Figura 1). A cada estació es va instal·lar un disdròmetre model Parsivel2 (TOKAY et al. 2014) i un MRR (PETERS et al. 2002). Amb les dades de MRR es va aplicar el post-processament, disponible de forma pública al repositori Github en les seves versions per MRR2 i MRR-PRO (GARCÍA-BENADÍ et al. 2020, 2021),

desenvolupat originalment amb observacions de la campanya Cerdanya-2017 (GONZÁLEZ et al. 2021) per tal de millorar la qualitat i obtenir una estimació del tipus de precipitació. La Figura 2 mostra un exemple d'observacions de MRR i disdròmetres corresponents al 22 de febrer de 2024.Les observacions de disdròmetre es mostren en diagrames de dispersió de mida de l'hidrometeor vs. velocitat de caiguda. La columna de l'esquerra mostra que la precipitació en superfície comença en forma de pluja i més tard passa a neu, si bé a nivells més alts predomina la fase sòlida. A la columna de l'esquerra es pot apreciar que, com més alta està l'estació, més partícules amb diàmetres grans i velocitats baixes, corresponents a neu.

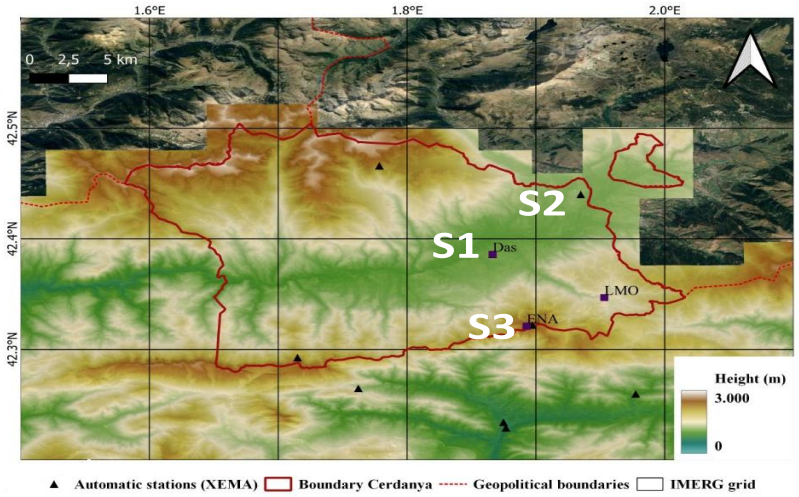


Figura 1 – Zona d'estudi a La Cerdanya mostrant les tres estacions on es van instal·lar disdròmetres i Micro Rain Radars (S1, S2 i S3), estacions automàtiques meteorològiques i la malla del producte de satèl·lit IMERG amb resolució 0.1º x 0.1º.

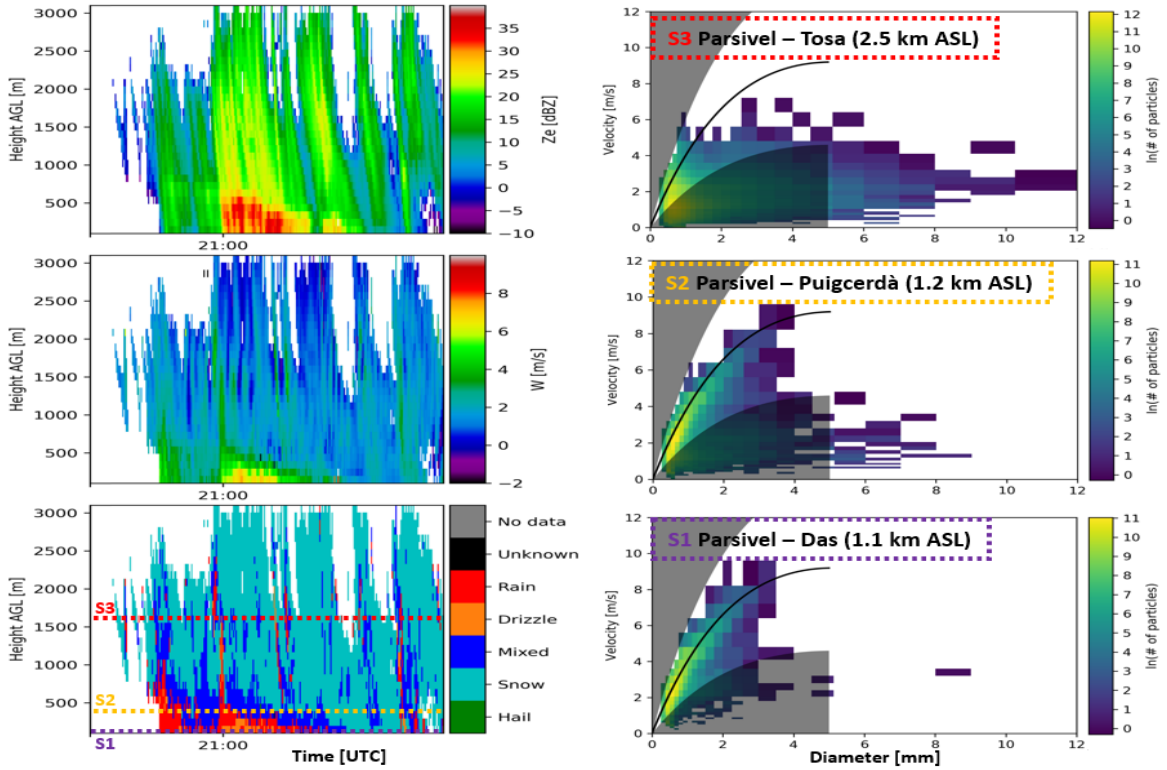


Figura 2 – Observacions del 22 de febrer de 2024 obtingudes amb el Micro Rain Radar (columna esquerra) ubicat a Das, mostrant perfils de reflectivitat equivalent (dBZ), velocitat vertical (m/s) i tipus d'hidrometeor així com els espectres de mides i velocitats de caiguda d'hidrometeors (columna dreta) amb els disdròmetres de la Tosa (S3), Puigcerdà (S2) i Das (S1), on la línia negra indica la relació empírica entre velocitat i diàmetre de gotes de pluja. L'altura dels disdròmetres (S1, S2 i S3) s'indica amb les línies puntejades de la subfigura inferior esquerra.

CONCLUSIONS

En el marc del projecte ARTEMIS s'han obtingut observacions de perfils de precipitació amb alta resolució a la zona de La Cerdanya. Entre les aplicacions en marxa o ja desenvolupades amb les dades obtingudes estan la comparació amb productes de satèl·lit (PEINÓ et al. 2024), amb simulacions numèriques amb el model de predicció meteorològica WRF (BUSQUETS et al. 2026) o la millora de l'estimació del tipus de precipitació amb radars operatius com l'estudi de POLLS et al. (2026). Les dades obtingudes es poden usar en treballs futurs com ara en l'estimació de la quantitat de precipitació hivernal, la detecció de calabruix o d'episodis amb transicions brusques de tipus de precipitació que poden afectar l'estabilitat del mantell nival.

AGRAÏMENTS

Aquest treball s'ha realitzat amb suport dels projectes ARTEMIS (PID2021-124253OB-I00), LIFE22-IPC-ES-LIFE PYRENEES4CLIMA i de l'Institut de Recerca de l'Aigua (IdRA) de la Universitat de Barcelona.

REFERÈNCIES

BUSQUETS, E., SERAFIN, S., UDINA, M., BECH, J., 2026. Sensitivity of Microphysical Parameters in the Thompson Scheme Using Idealized WRF Simulations, EGU General Assembly 2026, Vienna, Austria, 3–8 May 2026, EGU26-7985, https://doi.org/10.5194/egusphere-egu26-7985

GARCÍA-BENADí, A., BECH, J., GONZALEZ, S., UDINA, M., CODINA, B., GEORGIS, J.F., 2020. Precipitation type classification of Micro Rain Radar data using an improved Doppler spectral processing methodology. Remote Sens., 12(24), 4113. https://doi.org/10.3390/rs12244113

GARCÍA-BENADí, A., BECH, J., GONZALEZ, S., UDINA, M., CODINA, B., 2021. A new methodology to characterise the radar bright band using Doppler spectral moments from vertically pointing radar observations. Remote Sens., 13(21), 4323. https://doi.org/10.3390/rs13214323

GONZÁLEZ, S., BECH, J., GARCÍA-BENADí, A., UDINA, M., CODINA, B., TRAPERO, L., PACI, A., GEORGIS, J.F., 2021. Vertical structure and microphysical observations of winter precipitation in an inner valley during the Cerdanya-2017 field campaign. Atmos. Res., 264, 105826. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105826

PEINÓ, E., BECH, J., POLLS, F., UDINA, M., PETRACCA, M., ADIROSI, E., GONZALEZ, S., BOUDEVILLAIN, B.. 2024. Validation of GPM DPR rainfall and drop size distributions using disdrometer observations in the western Mediterranean. Remote Sens., 16(14), 2594. https://doi.org/10.3390/rs16142594

PETERS, G., FISCHER, B.; ANDERSSON, T., 2002. Rain observations with a vertically looking Micro Rain Radar (MRR). Boreal Env. Res., 7.4: 353. https://www.borenv.net/BER/archive/pdfs/ber7/ber7-353.pdf

POLLS, F. BOUDEVILLLAIN, B., UDINA, M., RUIZ, F.J., GARCIÍA-BENADí, BUSQUETS, E., VERNAY, M., BECH, J., 2026. Precipitation phase classification with X-band polarimetric radar and machine learning using micro rain radar and disdrometer data in Grenoble (French Alps). Remote Sens., 18(3), 433. https://doi.org/10.3390/rs18030433

TOKAY, A., WOLFF, D.B., PETERSEN, W.A., 2014. Evaluation of the new version of the laser-optical disdrometer, OTT Parsivel2. J. Atmos. Ocean. Technol. 31.6 (2014): 1276-1288. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00174.1

APROXIMACIÓ ALGORÍTMICA AUTOMATITZADA A L'AVALANCHE TERRAIN EXPOSURE SCALE 2.0

Pablo Calomardo Sangüesa (1)

(1) Facultat d'Informàtica de Barcelona (FIB), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) - BarcelonaTech. Edifici B6, Campus Nord, C/ Jordi Girona, 1-3, 08034 Barcelona.

PARAULES CLAU: allaus; ATES 2.0; AutoATES; Flow-PY; SIG; cartografia automàtica; geomorfologia; Vall d'Aran.

RESUM

L'Avalanche Terrain Exposure Scale (ATES) és un estàndard internacional per caracteritzar el terreny segons la seva exposició a allaus. La publicació de l'ATES 2.0 ha definit criteris més estructurats i ha reforçat l'interès per automatitzar-ne la cartografia a partir de dades geoespacials. Aquest treball analitza críticament l'algorisme AutoATES 2.0 i proposa una extensió orientada a aproximar de manera més explícita els criteris del model tècnic. Les principals limitacions identificades afecten la detecció i individualització de les zones potencials d'inici d'allaus (PRA), l'agregació de les simulacions de propagació i la representació de factors geomorfològics i forestals. La solució desenvolupada separa les PRA per vessants, adapta Flow-PY per conservar informació de cada simulació i incorpora noves capes derivades de la morfologia del terreny, l'exposició, el pendent i la densitat forestal. El model es valida qualitativament a Connaught Creek i Bow Summit, els casos d'estudi de l'AutoATES 2.0, i posteriorment s'aplica al sector d'El Pontet, a la Vall d'Aran. L'experimentació mostra una sensibilitat rellevant a la resolució del model digital d'elevacions, al llindar de detecció de PRA i a l'angle de frenada de Flow-PY. Amb una parametrització ajustada, la classificació obtinguda a El Pontet presenta una elevada concordança amb la cartografia manual de referència, especialment en el terreny extrem. Els resultats indiquen que combinar informació topogràfica, geomorfològica i forestal pot millorar la coherència de la classificació automàtica ATES i constitueix una base per a futurs processos cartogràfics escalables.

INTRODUCCIÓ

La classificació ATES descriu l'exposició associada a les característiques del terreny, independentment de les condicions nivometeorològiques d'un dia concret. L'ATES 2.0, publicada el 2025 [4], amplia i clarifica els criteris del model tècnic i introdueix el terreny extrem (classe 4). Tot i aquesta formalització, la cartografia continua elaborant-se principalment de manera manual per experts a partir de models digitals del terreny, ortofotografies i coneixement de camp. El procés és costós en temps, difícil d'escalar i pot incorporar variabilitat d'interpretació.

AutoATES 2.0 [5] és una de les primeres propostes obertes per automatitzar aquest procés mitjançant dades topogràfiques, detecció de zones potencials d'inici i simulacions de propagació amb Flow-PY [2]. L'anàlisi realitzada en aquest treball mostra, però, que l'arquitectura original utilitza explícitament només una part dels criteris ATES i perd informació rellevant en tractar conjuntament les zones d'inici i les simulacions. L'objectiu del TFG és analitzar aquestes limitacions i desenvolupar una versió determinista en Python que augmenti la informació disponible per al classificador i faciliti una aplicació reproduïble a entorns pirinencs.

DESENVOLUPAMENT I METODOLOGIA

El flux de treball parteix d'un model digital d'elevacions (DEM) i d'informació forestal. Després del preprocessament, es generen les PRA i s'executen les simulacions de propagació. A diferència de l'AutoATES 2.0, la proposta conserva la identitat de les zones d'inici i de les allaus simulades, fet que permet calcular propietats individuals i relacionar-les amb la morfologia del terreny. Les modificacions principals són:

- Separació de PRA. La màscara binària de zones potencials d'inici es divideix en unitats associades als diferents vessants. Això evita tractar totes les zones de sortida com una única entitat i permet vincular cada trajectòria amb la PRA que l'origina.
- Adaptació de Flow-PY. El simulador es modifica per processar diverses PRA i conservar per separat la informació de propagació. D'aquesta manera es poden explotar variables com l'abast, el nombre de cel·les afectades o l'energia relativa de cada trajectòria.
- Noves capes de criteri. A les capes d'exposició, pendent i densitat forestal s'hi afegeixen descriptors derivats de la forma del terreny i de la simulació, incloent informació útil per aproximar zones de frenada, trampes de terreny i complexitat geomorfològica, recolzant-se també en descriptors de terreny [3]. Un ponderador integra les capes i aplica filtres de generalització espacial per obtenir un mapa ATES continu.

La validació es va plantejar inicialment com una comparació píxel a píxel, però només es disposava de dues classificacions ATES 2.0 completes publicades, Connaught Creek i Bow Summit, que són també els casos emprats per desenvolupar AutoATES 2.0 [5]. Per evitar extreure conclusions de generalització a partir de dues àrees, es va prioritzar una validació qualitativa i geomorfològica, comparant el model proposat amb AutoATES 2.0 i amb la cartografia de referència agregada a partir de sis professionals.

Durant la reproducció dels casos es va detectar, a més, una diferència en l'ús de la limitació forestal entre les simulacions de Bow Summit i Connaught Creek. En aquest treball s'adopta una configuració homogènia per a tots els experiments, de manera que les diferències

entre resultats es puguin atribuir al model i no a criteris d'execució diferents.

APLICACIÓ AL PIRINEU CATALÀ

Com a darrera fase, el model s'aplica al sector d'El Pontet, al sud-oest de la Vall d'Aran. L'àrea combina vessants forestats, zones obertes d'alta muntanya, canals d'allaus i pendents pronunciats, i disposa d'una cartografia ATES 2.0 manual elaborada per Aguirre Noguera [1] amb suport tècnic de Lauegi. Aquesta cartografia s'utilitza com a referència qualitativa per estudiar la transferència del model al context pirinenc.

Per separar l'efecte dels diferents factors, els experiments modifiquen un únic paràmetre en cada execució i mantenen constants la resta de variables. Es parteix d'un DEM de 5 m de l'ICGC, remostrejat a 10, 15, 20, 25 i 30 m, i s'analitzen també el llindar de binarització de les PRA i dos paràmetres de Flow-PY: l'angle de frenada i l'exponent que controla la dispersió lateral. Els pesos i les regles internes del classificador ATES es mantenen fixos per preservar la interpretabilitat i afavorir la generalització del mètode.

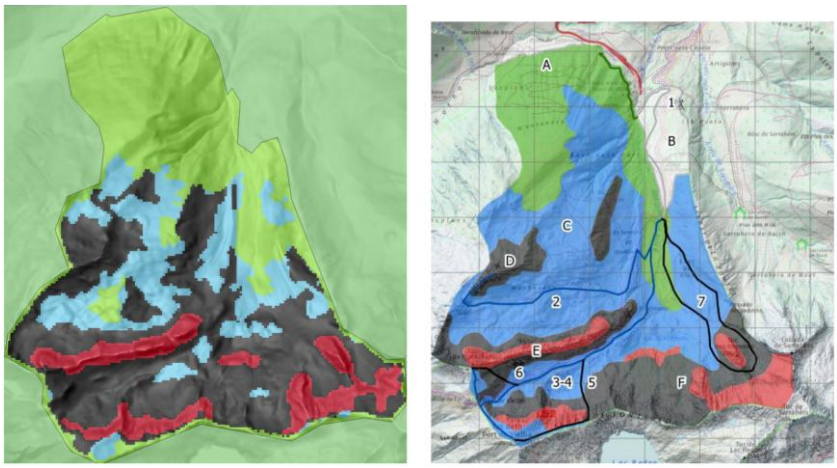


Figura 1 - Comparació al sector d'El Pontet entre la classificació generada pel model (esquerra) i la cartografia manual de referència d'Aguirre Noguera (dreta). Elaboració pròpia a partir de [1].

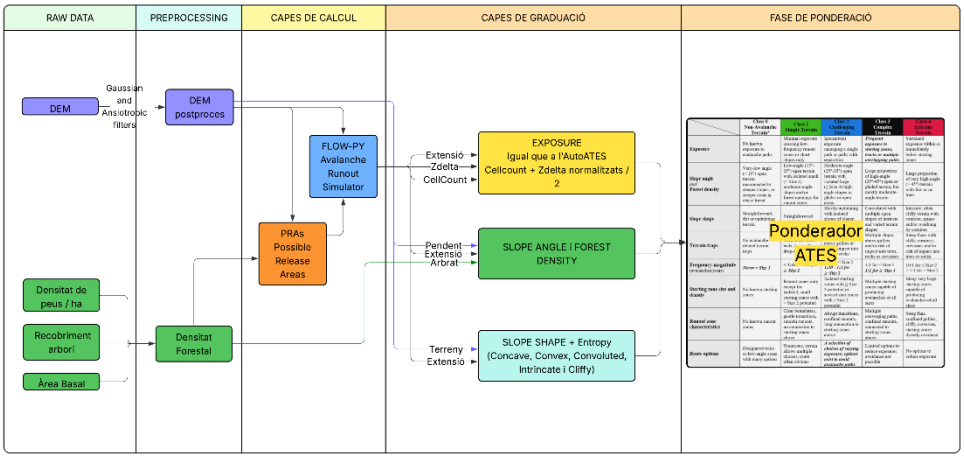


Figura 2 - Diagrama resum de les fases del model definitiu: dades d'entrada, preprocessament, generació de PRA i simulacions amb Flow-PY, construcció de capes de criteri i ponderació final ATES. Elaboració pròpia

RESULTATS I VALIDACIÓ

A Bow Summit, les modificacions introdueixen pocs canvis respecte d'AutoATES 2.0 [5], coherentment amb la simplicitat relativa de la zona extrema principal. A Connaught Creek, la nova metodologia modifica sobretot l'extensió de les classes 2 i 3 i permet revisar alguns clústers de classe 4 mitjançant criteris geomorfològics. En conjunt, els canvis redueixen artefactes locals i fan més explícita la relació entre simulació, forma del terreny i classificació.

L'aplicació final es realitza a El Pontet, al sud-oest de la Vall d'Aran, una zona amb vessants forestats, espais oberts d'alta muntanya, canals d'allaus i pendents pronunciats. L'experimentació identifica tres paràmetres especialment rellevants. La resolució del DEM té un impacte directe: resolucions molt fines tendeixen a incrementar la variabilitat local i a sobreestimar l'exposició, mentre que resolucions més gruixudes suavitzen el relleu. Els resultats més similars a la cartografia de referència se situen aproximadament entre 15 i 25 m, per sota dels 30 m recomanats a AutoATES 2.0.

El llindar de binarització de PRA també és determinant: augmentar-lo de 0,15 a prop de 0,55 redueix zones d'inici poc probables i evita simulacions excessivament extenses, mentre que valors a partir de 0,60 comencen a eliminar zones que haurien de mantenir-se en classe 2. En Flow-PY, augmentar l'angle de frenada α de 24° a 26° produeix recorreguts més coherents amb la referència; en canvi, el paràmetre de dispersió lateral té un impacte menor.

Amb aquesta configuració, el mapa generat presenta una concordança elevada amb la cartografia manual d'El Pontet [1], especialment en les zones de terreny extrem (classe 4), on la correspondència espacial és pràcticament completa. Les discrepàncies principals es concentren en les classes intermèdies: el model tendeix a assignar una superfície lleugerament superior a classe 3 i inferior a classe 2. També es detecta una possible sobreestimació de l'efecte protector de determinades masses forestals, aspecte que requereix més estudi.

DISCUSSIÓ

Els experiments indiquen que una part important del comportament del model depèn de l'escala a què es representa el relleu. En un DEM molt fi apareixen variacions locals de pendent i rugositat que poden activar més PRA i augmentar l'extensió de les simulacions; en resolucions massa gruixudes, en canvi, alguns detalls geomorfològics queden suavitzats. Aquest resultat suggereix que la resolució no s'hauria de considerar només un paràmetre tècnic de càlcul, sinó una decisió metodològica que condiciona directament la interpretació ATES.

La validació també posa de manifest dues limitacions. D'una banda, el nombre reduït de cartografies ATES 2.0 de referència disponibles dificulta una avaluació estadística robusta de la capacitat de generalització. De l'altra, la cobertura forestal continua sent un element especialment complex: tant AutoATES 2.0 com la proposta poden atribuir un efecte protector excessiu a determinades masses de bosc. Per això, el model s'ha d'entendre com una eina de suport a la cartografia i a l'anàlisi experta, amb l'avantatge que les regles són explícites, reproduïbles i auditables, però sense substituir la validació de camp ni el coneixement local.

CONCLUSIONS

El treball mostra que és possible ampliar AutoATES 2.0 mantenint un enfocament determinista, interpretable i basat en dades geoespacials. La individualització de les PRA i de les simulacions, juntament amb la incorporació de descriptors geomorfològics i forestals, permet representar de manera més coherent diferents comportaments del terreny i justificar millor les decisions del classificador.

L'aplicació a la Vall d'Aran confirma el potencial de l'eina, però també evidencia que l'automatització completa de la cartografia ATES continua sent complexa i sensible a les dades d'entrada i a determinats llindars. Com a treball futur, cal validar el model en més zones i amb geomorfologies diverses, revisar el tractament de la cobertura forestal, incorporar noves fonts d'informació - com inventaris històrics d'allaus o variables nivoclimàtiques- i explorar enfocaments híbrids que combinin regles deterministes amb aprenentatge automàtic. L'objectiu final és disposar d'una eina robusta i escalable que doni suport, i no substitueixi, la validació experta.

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

[1] AGUIRRE NOGUERA, 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. Treball de Final de Màster.

[2] D'AMBOISE, C.J.L. et al., 2022. Flow-Py v1.0: a customizable, open-source simulation tool to estimate runout and intensity of gravitational mass flows. Geoscientific Model Development, 15(6), 2423-2439. doi:10.5194/gmd-15-2423-2022.

[3] ARGUDO, O. et al., 2025. Terrain descriptors for landscape synthesis, analysis and simulation. Computer Graphics Forum, 44(2), e70080. doi:10.1111/cgf.70080.

[4] STATHAM, G.; CAMPBELL, C., 2025. The Avalanche Terrain Exposure Scale (ATES) v.2. Natural Hazards and Earth System Sciences, 25(3), 1113-1137. doi:10.5194/nhess-25-1113-2025.

[5] TOFT, H.B. et al., 2024. AutoATES v2.0: Automated Avalanche Terrain Exposure Scale mapping. Natural Hazards and Earth System Sciences, 24(5), 1779-1793. doi:10.5194/nhess-24-1779-2024.

JorTec 6
Neu i Allaus

VI Jornades tècniques de neu i allaus
22 d'Octubre de 2026
Barcelona

PROPUESTA DE SERVICIO DE INFORMACIÓN Y PREDICCIÓN DE ALUDES DE ARAGÓN

Jorge Crespo Junquera [1]

(1) Jefe de Servicio de Seguridad y Protección Civil. Dirección General de Interior y Emergencias. Departamento de Hacienda, Interior y Administración Pública. Gobierno de Aragón
jcrespoj@aragon.es

PALABRAS CLAVE: predicción, boletín, aludes, Aragón, Pirineos, Albina, InfoEx, Snowpack.

RESUMEN

El Servicio de Información y Predicción de Aludes de Aragón se plantea como un sistema integrado de observación, análisis y comunicación del peligro de aludes, adaptado a las particularidades nivológicas y territoriales del Pirineo Aragonés y alineado con los estándares de la European Avalanche Warning Services (EAWS).

La operativa combina tres herramientas digitales principales: INFOEX, como plataforma de gestión e intercambio de observaciones nivológicas y de aludes; SNOWPACK, como herramienta de modelización y seguimiento de la evolución del manto nivoso; y ALBINA, como entorno para la elaboración, publicación y difusión del Boletín de Peligro de Aludes. Esta arquitectura digital da soporte a una red distribuida de técnicos locales, predictores y colaboradores, que contarán también con el refuerzo progresivo de la instrumentación meteorológica mediante nuevas estaciones automáticas de alta montaña.

Un elemento central del sistema es la definición y revisión de microrregiones nivológicas, que permite adaptar la predicción a la variabilidad espacial de las condiciones del manto nivoso. La información se completa mediante la colaboración con AEMET, GREIM, servicios de predicción de aludes para carreteras, refugios de montaña, profesionales del sector y redes de observadores voluntarios.

El sistema incorpora asimismo una línea de investigación, desarrollo e innovación orientada a mejorar la capacidad predictiva a través de un mejor conocimiento de la dinámica de aludes del Pirineo de Aragón y de la aplicación al territorio de los desarrollos que puedan darse.

La participación en EAWS, congresos y redes técnicas especializadas permitirá contrastar metodologías, compartir experiencias y favorecer la transferencia de conocimiento y la mejora continua del sistema de predicción de aludes en Aragón.

OBJETIVOS

La propuesta plantea la puesta en marcha de un Centro de Información y Predicción de Aludes de Aragón integrado, operativo y orientado a la mejora continua, capaz de transformar la información procedente del territorio, la modelización nivológica y las herramientas tecnológicas en un producto de predicción útil para la toma de decisiones de las personas usuarias de la montaña invernal.

El servicio se fundamenta en tres pilares: un equipo especializado y distribuido territorialmente, una red de observación y colaboración amplia y el uso coordinado de herramientas específicas de predicción y comunicación. Todo ello permitirá disponer de una visión actualizada de las condiciones nivometeorológicas y de la evolución del manto nivoso en el Pirineo Aragonés.

La propuesta parte de la experiencia y conocimiento previo adquirido por el Servicio de Seguridad y Protección Civil, permitiendo una puesta en marcha rápida y una transición eficaz hacia una operativa plenamente consolidada.

El objetivo final será proporcionar un servicio fiable, cercano al territorio y alineado con los estándares de la European Avalanche Warning Services (EAWS), que combine rigor técnico, capacidad de adaptación, seguridad y utilidad para la ciudadanía y los organismos responsables de la gestión del riesgo.

FUNDAMENTOS DEL SERVICIO

La operativa diaria se apoyará en la utilización coordinada de INFOEX, SNOWPACK y ALBINA, que constituirán las principales herramientas tecnológicas del proceso de predicción.

INFOEX (Haegeli et al. 20 será el entorno principal de gestión e intercambio de información nivológica y de aludes. Permitirá integrar observaciones meteorológicas, perfiles estratigráficos, tests de

estabilidad, registros de actividad de aludes y resúmenes de campo procedentes tanto del equipo técnico como de la red de colaboradores.

Su utilización será especialmente importante para el análisis de las condiciones existentes o *nowcast*, proporcionando una visión territorial y temporalmente actualizada del estado del manto nivoso. Durante el contrato se mantendrá y mejorará el catálogo de localizaciones, los perfiles de usuario y los flujos de trabajo destinados a la recopilación, validación y explotación de la información.

SNOWPACK (Bartet & Lahnning 2002) complementará las observaciones mediante la simulación de la evolución del manto nivoso. Sus resultados permitirán analizar la estratigrafía, capas débiles, temperatura, metamorfismo y otros procesos relevantes para la estabilidad. Los productos del modelo se contrastarán siempre con las observaciones de campo y se utilizarán como herramienta de apoyo a la decisión, especialmente en zonas con menor cobertura de observación o durante episodios meteorológicos adversos.

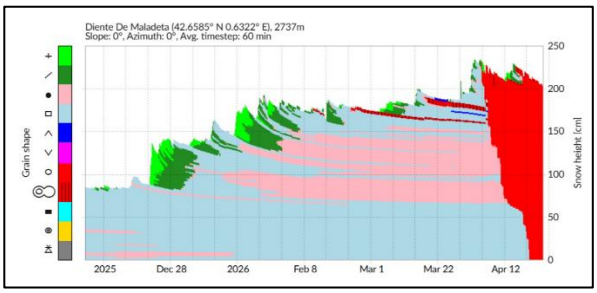


Figura 1 – *Representación del manto de nieve en la estación del Diente de Maladeta. Temporada 2025/26*

Se contempla además avanzar en la utilización de predicciones meteorológicas de alta resolución, modelos distribuidos e incluso técnicas de inteligencia artificial aplicadas a la interpretación de la información nivológica.

ALBINA (Lanzanasto et al. 2018, Mitterer et al. 2018) será la herramienta de elaboración y publicación del Boletín de Peligro de Aludes. Permitirá trasladar el análisis experto a un producto homogéneo, estructurado y conforme a la metodología EAWS, definiendo niveles de peligro, problemas de aludes, cotas, orientaciones y textos descriptivos.

Las tres herramientas se integrarán en un único flujo de trabajo:

observación → análisis y nowcast → modelización → evaluación experta → elaboración del BPA → publicación y difusión.

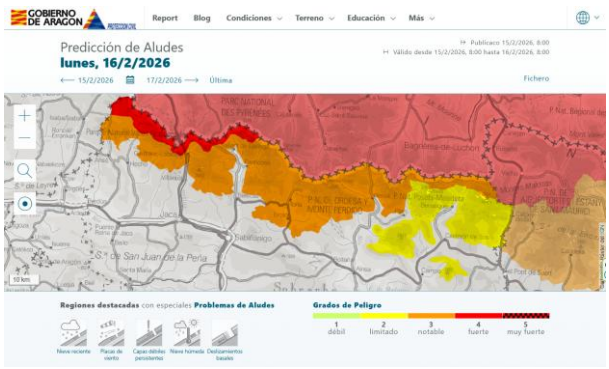


Figura 1 – *Web pública del boletín de aludes de Aragón , e fase de pruebas durante la temporada 2025/26*

El servicio contará con una estructura formada por director de Operación, tres predictores/as y tres técnicos/as locales. El director de Operación asumirá la coordinación general, la supervisión de los procedimientos, la seguridad de los trabajos de campo y la relación con organismos colaboradores. Los *predictores/as* realizarán el análisis diario y la elaboración del BPA, integrando todas las fuentes de información disponibles. Los técnicos locales aportarán presencia territorial mediante observaciones, perfiles, ensayos de estabilidad y seguimiento de la actividad de aludes.

La distribución territorial del equipo permitirá mejorar la cobertura del Pirineo Aragonés y disponer de conocimiento local de las distintas zonas. Se parte, además, de un equipo ya formado y con experiencia en las metodologías y herramientas específicas, reduciendo los tiempos necesarios para alcanzar una operativa estable.

La seguridad será transversal a toda la organización. Las salidas se planificarán mediante procedimientos específicos de gestión del riesgo y contarán con seguimiento desde el centro de operaciones, medios de comunicación y localización adecuados y capacidad para modificar o cancelar las actividades cuando las condiciones lo aconsejen.

La red de observación se reforzará mediante la instalación y puesta en funcionamiento de nuevas estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) en localizaciones estratégicas.



Figura 3 – *Estación automática del Diente de la Maladeta, a 2740 m. En funcionamiento desde octubre de 2025.*

La selección de emplazamientos atenderá a criterios de representatividad nivoclimática, altitud, nivológica. orientación y necesidades detectadas durante la elaboración del BPA. Los datos obtenidos permitirán mejorar la cobertura espacial y temporal de la información meteorológica y, cuando su calidad y características lo permitan, alimentar los sistemas de modelización

MICRORREGIONES

La regionalización nivológica constituye un elemento esencial para obtener una predicción espacialmente coherente. La diversidad de condiciones de altitud, orientación, precipitación, viento y evolución del manto existente en el Pirineo Aragonés requiere una división territorial suficientemente representativa.

Se realizará una revisión continua de las microrregiones utilizadas en el servicio, considerando las observaciones de campo, la actividad avalanchosa, los resultados de modelización y la experiencia acumulada durante cada temporada.

Las microrregiones constituirán la base para el análisis de las condiciones existentes y podrán agruparse posteriormente en regiones de predicción homogéneas para la elaboración del BPA mediante ALBINA.

La regionalización se entenderá como un elemento dinámico, susceptible de ser ajustado cuando la experiencia operativa y los datos disponibles indiquen la necesidad de mejorar sus límites o representatividad.

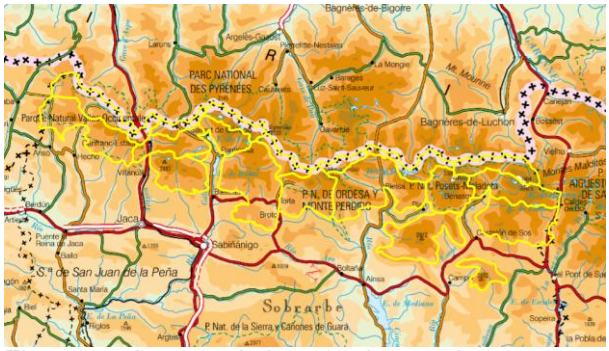


Figura 3 – *Imagen de las 18 microrregiones en que se .ha dividido el Pirineo de Aragón*

COLABORACIONES

La capacidad de observación del servicio se reforzará mediante una red estable de colaboradores formada por organismos públicos, servicios técnicos y profesionales vinculados al medio invernal.

La colaboración con AEMET permitirá incorporar información meteorológica y nivometeorológica de referencia y mejorar la interpretación de los episodios meteorológicos que condicionan la evolución del manto.

El Grupo de Rescate e Intervención e Montaña (GREIM) constituirá un colaborador estratégico por su presencia permanente en montaña y conocimiento del territorio. Se promoverán actividades conjuntas de observación, perfiles, ensayos y seguimiento de actividad de aludes, así como el intercambio de información obtenida durante rescates y actuaciones extraordinarias.

Se mantendrá igualmente una coordinación permanente con los servicios de predicción de aludes para carreteras e infraestructuras, favoreciendo el intercambio de observaciones y la coordinación durante episodios de especial peligrosidad o cuando pueda existir afección a la red viaria.

Los refugios, estaciones de esquí y guías de montaña podrán ampliar significativamente la cobertura de observación. Se fomentará su formación en observación nivológica y el uso de INFOEX para el registro estructurado de información.

Finalmente, se promoverá una red voluntaria de observadores, integrada por montañeros y usuarios habituales del medio invernal. Sus aportaciones permitirán complementar la red profesional, especialmente en zonas de difícil cobertura. Toda la información recibida será

revisada por el equipo técnico antes de su incorporación al proceso de predicción.

El objetivo será crear una auténtica red territorial de conocimiento compartido, en la que la información fluya hacia el servicio y, al mismo tiempo, exista retorno mediante formación, divulgación y comunicación.

IMPLICACIÓN EN EAWS, INVESTIGACIÓN Y DIVULGACIÓN

La participación en la European Avalanche Warning Services (EAWS) permitirá mantener el servicio conectado con la evolución de las metodologías y estándares europeos. Se promoverá la participación en reuniones, grupos de trabajo, congresos y jornadas técnicas, favoreciendo el intercambio de experiencias con otros servicios de predicción.

Asimismo, se mantendrá una participación activa en la comunidad de usuarios de ALBINA, colaborando en la identificación de necesidades, validación de funcionalidades y evolución de la plataforma.

La experiencia generada durante la prestación del servicio podrá trasladarse a publicaciones técnicas, comunicaciones, artículos y casos de estudio, especialmente en relación con episodios relevantes, modelización nivológica y características del manto nivoso del Pirineo Aragonés.

Esta transferencia de conocimiento se completará con actividades de divulgación dirigidas a usuarios y profesionales: charlas en el territorio, contenidos digitales y materiales destinados a facilitar la correcta interpretación del BPA y fomentar una cultura de seguridad en montaña.

CONCLUSIONES

La propuesta establece las bases para un Servicio de Información y Predicción de Aludes de Aragón integrado, territorialmente distribuido y alineado con los estándares de la EAWS.

La combinación de observaciones de campo, modelización nivológica y herramientas como INFOEX, SNOWPACK y ALBINA permitirá mejorar la calidad, coherencia y difusión de la predicción, adaptándola a la variabilidad espacial del Pirineo Aragonés.

La colaboración con los distintos organismos, servicios y usuarios del territorio permitirá ampliar la red de observación y mejorar el intercambio de información, mientras que la participación en la EAWS y en redes técnicas y científicas favorecerá la mejora continua del servicio.

En conjunto, el sistema permitirá transformar información diversa procedente del territorio en un producto de predicción útil para la ciudadanía y para la gestión del riesgo de aludes en Aragón.

BIBLIOGRAFIA

BARTELT, P. & LEHNING, M., 2002. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part I: Numerical model. Cold Regions Science and Technology, 35(3), 123–145. DOI: 10.1016/S0165-232X(02)00074-5.

BARTELT, P. & LEHNING, M., 2002. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part I: Numerical model. Cold Regions Science and Technology, 35(3), 123–145. DOI: 10.1016/S0165-232X(02)00074-5.

LANZANASTO, N., BONINSEGNA, A., CESTARI, P., KRIZ, K., NELL, D., PUCHER, A. & MITTERER, C., 2018. Project ALBINA: The technical framework for a consistent, cross-border and multilingual regional avalanche forecasting system. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Innsbruck, Austria.

MITTERER, C., LANZANASTO, N., NAIRZ, P., BONINSEGNA, A., MUNARI, M., GEIER, G., RASTNER, L., GHESER, F., TRENTI, A., BENIGNI, S., TOGNONI, G.L., PUCHER, A., NELL, D., KRIZ, K. & MAIR, R., 2018. Project ALBINA: A conceptual framework for a consistent, cross-border and multilingual regional avalanche forecasting system. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Innsbruck, Austria, 1523–1530

INVESTIGACIÓN SOBRE EL USO DE REFLECTORES ACTIVOS PARA EL PROCESADO INSAR Y DE LA GNSS-R PARA LA MEJORA DE LA ESTIMACIÓN DEL SWE

Pedro Espín-López [(1)]; Paolo Perret [(2)]; Martina Lodigiani (2); Fabrizio Troilo (2); Guido Luzi (1) y Marco Pasian (3)

(1) Geomatics Research Unit, Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC/CERCA), Castelldefels, España. pedro.espin@cttc.cat
(2) Fondazione Montagna Sicura, Glaciers and Permafrost Office, Courmayeur, Italia.
(3) University of Pavia, Department of Electrical, Computer Science and Biomedical Engineering, Pavía, Italia

PALABRAS CLAVE: equivalente en agua de la nieve, SWE, InSAR, Sentinel-1, reflector activo, refractometría GNSS, nieve seca, recursos hídricos.

1. INTRODUCCIÓN

El equivalente en agua de la nieve (Snow Water Equivalent, SWE) es la magnitud que determina la escorrentía, el almacenamiento y la disponibilidad de agua en las cuencas de montaña, y a la vez la que las redes de observación miden con menor densidad. La interferometría SAR en banda C ofrece una vía para cartografiarla, porque la nieve seca retrasa la onda radar en una cantidad que depende del agua equivalente de la capa que atraviesa (Guneriussen et al., 2001).

Convertir la fase interferométrica en SWE exige, sin embargo, una referencia, y esa referencia debe satisfacer tres condiciones a la vez. Primero, debe fijar el término aditivo que la interferometría deja indeterminado, de modo que una diferencia de fase pueda leerse como un cambio absoluto de SWE. Segundo, debe resolver la ambigüedad entera: la fase se conoce únicamente módulo 2π, y un ciclo en banda C corresponde aproximadamente a 25–30 mm (una cantidad que una sola nevada puede superar entre dos adquisiciones consecutivas). Tercero, debe indicar cuándo deja de cumplirse la hipótesis de nieve seca, porque el agua líquida destruye la relación entre fase y agua equivalente. Las estimaciones de SWE publicadas en banda C se han apoyado en redes de estaciones in situ para proporcionar esa referencia (Oveisgharan et al., 2024; Zhou et al., 2025), redes que no existen en la mayoría de las cuencas de montaña. La alternativa que se explora aquí consiste en concentrar la referencia en un único punto instrumentado: un blanco radar controlado que permanezca coherente durante todo el invierno y un sensor situado junto a él que mida directamente el SWE que lo cubre. Este trabajo describe esa estación, evalúa la calidad de la referencia de terreno que produjo durante el invierno 2025–2026 y muestra qué aspecto tiene la fase del reflector una vez aplicada dicha referencia en la propia estación.

2. ZONA DE ESTUDIO E INSTRUMENTACIÓN

2.1. Emplazamiento

La estación está instalada a 2.166 m.s.n.m. sobre un prado de pendiente suave en Pila, Valle de Aosta (Alpes italianos), dentro de un dominio esquiable que garantiza el acceso invernal para el mantenimiento y para las medidas manuales. El terreno es suficientemente llano como para que el manto se acumule sin los procesos de transporte y erosión eólica que complican la interpretación de una medida puntual. Junto a la estación se sitúan una estación meteorológica automática (EMA) y un punto fijo de perfiles manuales (Figura 1).

2.2. Reflector activo subnival

El blanco radar es un transpondedor electrónico en banda C, no un reflector pasivo. Recibe la señal de Sentinel-1 mediante una agrupación de parches microstrip, la amplifica unos 42 dB y la retransmite hacia el satélite a través de una segunda agrupación, de modo que aparece en las imágenes como un blanco puntual brillante y estable a 5,405 GHz, con una sección radar nominal próxima a 40 dBsm. El conjunto cabe en una caja estanca de aproximadamente 0,6 × 0,5 × 0,2 m, consume menos de 0,6 W y funciona con una batería pequeña y un panel solar. Un triedro pasivo de sección radar comparable necesitaría un lado de unos 1,6 m en banda C y sobresaldría notablemente del terreno (Garthwaite, 2017). Esa diferencia es la que hace posible la instalación. El reflector se aloja en una fosa poco profunda con su apertura enrasada con el terreno circundante, de manera que la nieve se acumula sobre él igual que sobre el prado no alterado (Figura 1), sin las perturbaciones que introducen los reflectores montados sobre mástiles o estructuras.

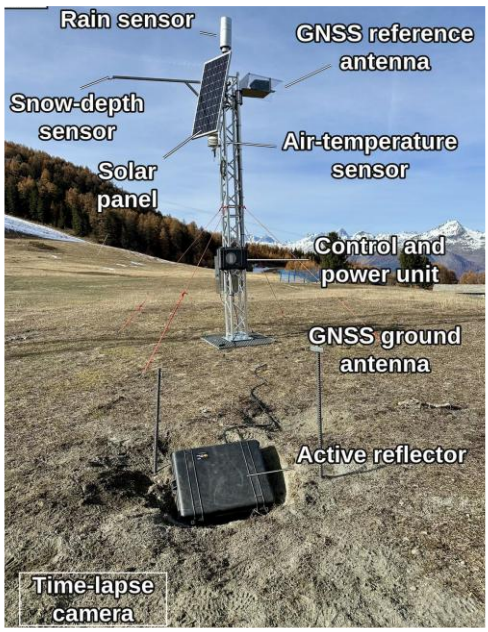


Fig. 1 La estación a 2.166 m.s.n.m.

Se instaló a finales de noviembre de 2025 y se recuperó el 18 de mayo de 2026, cubriendo la temporada nival completa.

El emplazamiento es observado por dos *tracks* descendentes de Sentinel-1 con repetición de seis días, en VV y VH. En la más oblicua (órbita relativa 66, ángulo de incidencia 43°; en adelante T66) el reflector se detectó en todas las adquisiciones del periodo de nieve seca. En la más escarpada (órbita relativa 139, incidencia 34°) la señal se fue atenuando bajo el manto seco a partir de finales de enero.

2.3. Refractometría GNSS

A pocos metros del reflector, y al mismo nivel del suelo, se instaló una antena GNSS de bajo coste que pasa igualmente el invierno bajo el manto (Figura 1). La nieve situada sobre una antena enterrada retrasa la portadora en banda L, y la comparación entre esa antena y una antena de referencia mantenida libre de nieve permite obtener el agua equivalente de la capa intermedia (Steiner et al., 2019). La señal GNSS se sitúa entre 1,2 y 1,6 GHz, aproximadamente una cuarta parte de la frecuencia radar de Sentinel-1: el agua líquida, que extingue el retorno en banda C, atenúa mucho menos la señal en banda L, de modo que la antena enterrada sigue recibiendo a través de un manto en fusión, aunque con menor exactitud.

Se emplearon dos antenas u-blox ANN-MB2, una sobre un mástil por encima de la altura máxima de nieve y otra a nivel del suelo, conectadas a dos receptores basados en el módulo u-blox ZED-X20P. La línea base corta entre ambas se procesa con la rama demo5 de RTKLIB, y el SWE se obtiene del sesgo que la nieve induce en la componente vertical de la línea base referido a una época sin nieve verificada. La medida es autónoma y no requiere partes móviles, sistemas de pesaje ni una medida independiente de densidad. La estación incorpora además un receptor dedicado a reflectometría GNSS (GNSS-R), cuyo análisis queda fuera del alcance de este trabajo.

Los dos instrumentos son complementarios por construcción. El reflector proporciona una fase precisa pero ambigua y con un origen indeterminado; la antena GNSS proporciona un SWE absoluto e inequívoco, pero válido únicamente en un punto. Puesto que ambos muestrean el mismo manto local con pocos metros de separación, el segundo puede utilizarse para condicionar el primero.

3. OBSERVACIONES DE REFERENCIA

En la estación se dispuso de dos referencias independientes. Por un lado, se realizaron catas manuales junto a ella en 22 fechas entre el 26 de noviembre y el 22 de abril, cada una de las cuales proporciona un SWE integrado en profundidad a partir de perfiles obtenidos manualmente. Abarcan un rango de 21 a 275 mm, y a cada valor se le asigna una incertidumbre de 5 mm más un 10 % de su magnitud, conforme a las exactitudes publicadas para este tipo de medidas (Proksch et al., 2016). Por otro lado, el modelo SNOWPACK (Lehning et al., 2002) se ejecutó para el punto de perfiles colocado, forzado con la EMA de la estación; ni las catas ni el GNSS intervienen en la simulación.

Ambas referencias son de naturaleza distinta. Las catas son observaciones directas, escasas en el tiempo y afectadas por la variabilidad espacial del manto a escala métrica. La simulación es continua, pero hereda los errores de su forzamiento meteorológico, en particular en la precipitación, además de la incertidumbre del propio modelo. Comparar el registro GNSS con ambas resulta, por tanto, más informativo que hacerlo con una sola.

4. RESULTADOS

4.1. Registro estacional

La estación GNSS proporcionó valores de SWE desde el 19 de noviembre de 2025 hasta el 17 de mayo de 2026: 179 días a lo largo de los cuales el 82 % de los intervalos contiene un valor válido (Figura 2a). El SWE superó por primera vez los 10 mm el 24 de noviembre y descendió por debajo de ese valor el 26 de abril, lo que supone unos cinco meses de cubierta nival. El máximo observado, 292 mm, se registró el 15 de marzo, y el manto se agotó a lo largo de las seis semanas siguientes. El

funcionamiento fue continuo también durante la fusión, la condición más difícil de instrumentar y precisamente la que una recuperación basada en nieve seca debe excluir.

4.2. Comparación con SNOWPACK

Sobre las 18 catas emparejables, el GNSS concuerda con una RMSD de 14,4 mm y un sesgo de −4,7 mm (21–275 mm), mejor en acumulación (12,3 mm) que en ablación (17,9 mm), donde el agua líquida degrada la medida. Frente a SNOWPACK, +3,7 mm de sesgo y 21,3 mm de RMSD, aunque el promedio oculta una estructura sistemática: unos 13 mm por encima del modelo durante la acumulación y unos 13 mm por debajo durante la fusión.

4.3. SWE a partir de la fase del reflector

Para el track T66 se extrajo la fase interferométrica del reflector en la época de activación y en las 13 adquisiciones del periodo seco que la siguen, entre el 5 de diciembre y el 15 de febrero, en polarización VV, como una secuencia de 13 diferencias a seis días. Cada diferencia se convirtió en un incremento de SWE mediante la relación de nieve seca de Guneriussen et al. (2001) al ángulo de incidencia local, para el que un ciclo corresponde a unos 25 mm, y la secuencia se refirió al valor GNSS en la fecha de activación.

Seis de las 13 diferencias superan medio ciclo —una de ellas en dos ciclos completos, durante el temporal de mediados de febrero— y son, por tanto, ambiguas por sí solas. Sus ciclos enteros se restituyeron manualmente contra el registro GNSS, como en el experimento anterior en Courmayeur (Perret et al., 2026). Con esos ciclos restituidos, el SWE derivado del reflector sigue al GNSS con un sesgo de +0,3 mm y una RMSD de 6,6 mm sobre nueve adquisiciones con GNSS válido, y a las cinco catas coincidentes con una adquisición con −7,0 mm y 10,6 mm (Figura 2a).

4.4. Amplitud del reflector e inicio de la fusión

El registro de amplitud aporta el tercer elemento que la referencia debe proporcionar. La relación señal-clutter del reflector (Figura 2b) se mantiene entre 4 y 10 dB en VV y entre 8 y 16 dB en VH a lo largo del periodo seco, con un descenso lento desde mediados de enero; cae después 7 dB en VV y 11 dB en VH entre las adquisiciones del 15 y el 21 de febrero, cuando el manto se humedece por primera vez, y permanece próxima a cero hasta que el terreno reaparece a finales de abril. El agua líquida atenúa el trayecto de ida y vuelta a través de la nieve, de modo que esa caída marca el final del régimen de nieve seca directamente sobre el blanco, en la misma línea que la disminución de retrodispersión empleada para cartografiar nieve húmeda con Sentinel-1 (Nagler et al., 2016), e identifica las adquisiciones a partir de las cuales la lectura de fase debe detenerse.

5. DISCUSIÓN Y TRABAJO EN CURSO

La limitación evidente de este trabajo es que describe un punto, un invierno, un emplazamiento y uno de los dos tracks. El valor de la estación no reside en que mida SWE en ese punto —también lo harían otros instrumentos puntuales—, sino en que lo hace junto a un blanco radar controlado, lo que permite propagar ese punto en una zona más amplia. Esa propagación constituye, junto con la resolución automática de la ambigüedad entera y el filtrado de los periodos de nieve húmeda a escala de cuenca, la línea de trabajo actualmente en curso: la corrección de fase establecida en el reflector se transfiere a los píxeles del valle con coherencia suficiente. Los primeros resultados de ese procesado se muestran en el póster asociado a esta comunicación, y su análisis detallado será objeto de una publicación específica.

6. CONCLUSIONES

Se ha descrito una estación compacta que combina un reflector activo en banda C enrasado con el terreno y una antena de refractometría GNSS, y se ha caracterizado la referencia de SWE que produjo durante el invierno 2025–2026 en los Alpes italianos. La estación proporcionó un registro a lo largo de 179 días con un 82 % de disponibilidad, que concuerda con las catas manuales con una RMSD de 14,4 mm y un sesgo de −4,7 mm, y con una simulación SNOWPACK con 21,3 mm y una estructura estacional que un promedio único ocultaría. Leída contra esa referencia, la fase del reflector en uno de los tracks de Sentinel-1 devolvió el SWE del periodo seco en la estación con una diferencia de 10,6 mm respecto de las catas, y su amplitud marcó el inicio de la fusión.

La referencia es autónoma, verificable frente a observaciones independientes y continúa operando durante la fusión. Lo que la recuperación de SWE mediante InSAR necesita es un nivel absoluto, ciclos resolubles y un indicador de nieve húmeda. En Pila, una única instalación de bajo coste proporcionó los tres durante un invierno.

BIBLIOGRAFÍA

GARTHWAITE, M.C., 2017. On the Design of Radar Corner Reflectors for Deformation Monitoring in Multi-Frequency InSAR. Remote Sensing, 9(7), 648.

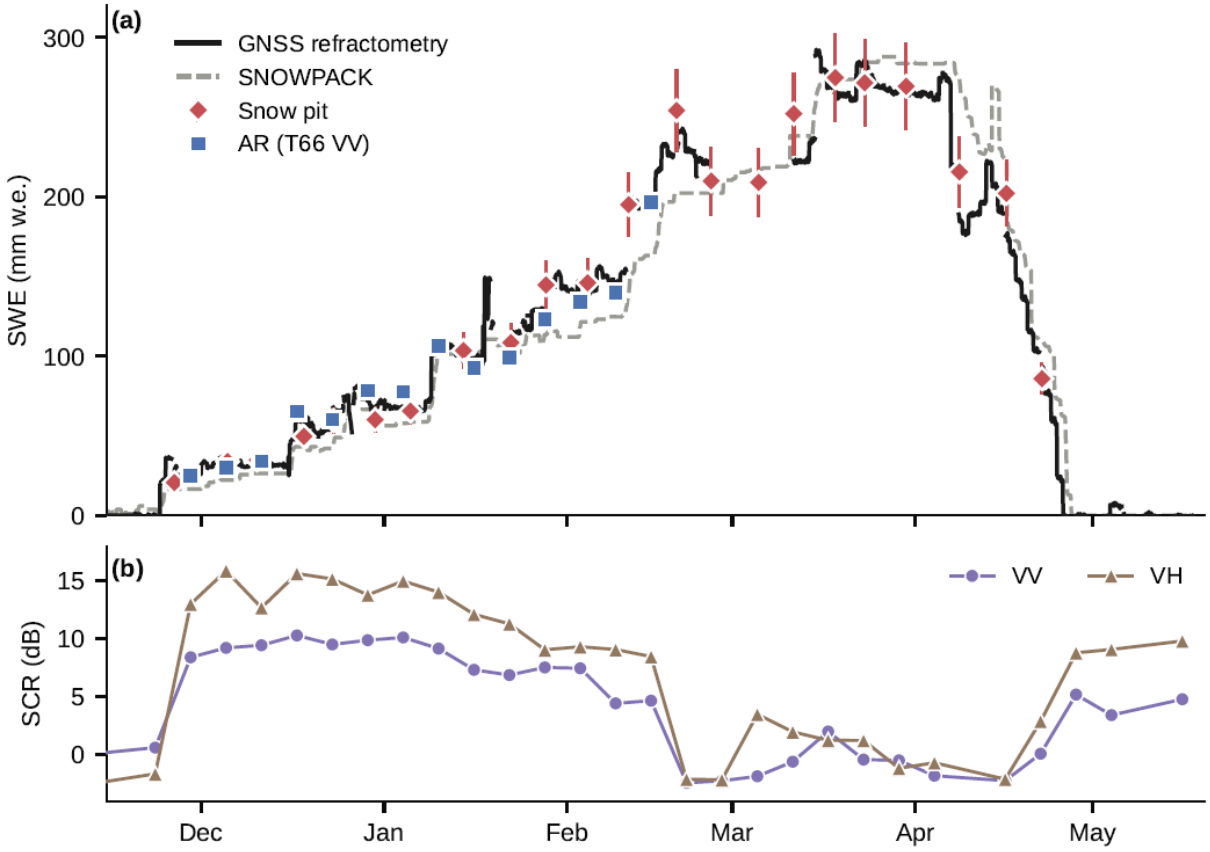


Fig. 2 Resultados del invierno 2025-2026 en la estación (a) SWE obtenido por el GNSS, las catas manuales, la simulación de SNOWPACK y el reflector. (b) SCR del reflector para el track T66

GUNERIUSSEN, T., HØGDA, K.A., JOHNSEN, H., LAUKNES, I., 2001. InSAR for Estimation of Changes in Snow Water Equivalent of Dry Snow. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(10), 2101-2108.

LEHNING, M., BARTELT, P., BROWN, B., FIERZ, C., 2002. A Physical SNOWPACK Model for the Swiss Avalanche Warning. Part III: Meteorological Forcing, Thin Layer Formation and Evaluation. Cold Regions Science and Technology, 35(3), 169-184.

NAGLER, T., ROTT, H., RIPPER, E., BIPPUS, G., HETZENECKER, M., 2016. Advancements for Snowmelt Monitoring by Means of Sentinel-1 SAR. Remote Sensing, 8(4), 348.

OVEISGHARAN, S., ZINKE, R., HOPPINEN, Z., MARSHALL, H.P., 2024. Snow water equivalent retrieval over Idaho – Part 1: Using Sentinel-1 repeat-pass interferometry. The Cryosphere, 18, 559-574.

PERRET, P., LUZI, G., ESPÍN-LÓPEZ, P., LODIGIANI, M., SILVESTRI, L., CONGIU, T., TROILO, F., ZUCCA, F., PASIAN, M., 2026. Direct Retrieval of Snow Water Equivalent (SWE) Using the Sentinel-1 Interferometric Phase Response of an Active Reflector. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-M-11-2026, 31-37.

PROKSCH, M., RUTTER, N., FIERZ, C., SCHNEEBELI, M., 2016. Intercomparison of Snow Density Measurements: Bias, Precision, and Vertical Resolution. The Cryosphere, 10, 371-384.

STEINER, L., MEINDL, M., GEIGER, A., 2019. Characteristics and Limitations of GPS L1 Observations from Submerged Antennas: Theoretical Investigation in Snow, Ice, and Freshwater and Practical Observations Within a Freshwater Layer. Journal of Geodesy, 93, 267-280.

ZHOU, J., LEI, Y., PAN, J., LIANG, C., YUNJUN, Z., LI, W., XIONG, C., SHI, J., MA, W., 2025. Snow water equivalent retrieval and analysis over Altay using 12 d repeat-pass Sentinel-1 interferometry. The Cryosphere, 19(11), 5361-5388.

JorTec 6
Neu i Allaus

VI Jornades tècniques de neu i allaus
22 d'Octubre de 2026
Barcelona

ESCALFAMENT DEPENENT DE L'ALTITUD AL PIRINEU: DADES, ANÍLISI I RESULTATS

Pere Esteban [1,2], Javier Sigró [3,4], Marc Prohom [1], Jordi Cunillera [1], Jordi Cateura [1], Juan Ignacio López-Moreno [5]

(1) Servei Meteorològic de Catalunya (SMC), Generalitat de Catalunya. pere.esteban@gencat.cat marc.prohom@gencat.cat jordi.cunillera@gencat.cat jordi.cateura@gencat.cat
(2) Antartic, Arctic and Alpine environments (ANTALP) research group. Universitat de Barcelona. pere.esteban@gencat.cat
(3) Centre en Canvi Climàtic C3, Department de Geografia, Universitat Rovira i Virgili (URV). Tarragona javier.sigro@urv.cat
(4) Institut Universitari de Recerca en Sostenibilitat, Canvi Climàtic i Transició Energètica (IU-RESCAT), Universitat Rovira i Virgili (URV). Tarragona javier.sigro@urv.cat
(5) Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC), Campus de Aula Dei, Zaragoza. nlopez@ipe.csic.es

PARAULES CLAU: Pirineus, canvi climàtic, anàlisi de tendències, escalfament depenent de l'altitud.

RESUM

En el marc del projecte LIFE-SIP Pyrenees4Clima (2024–2031), s'estan desenvolupant accions per detectar i analitzar l'escalfament dependent de l'altitud als Pirineus, també conegut amb el terme anglès Elevation Dependent Warming (EDW). Una tasca central és la compilació de les sèries de temperatura màxima i mínima més llargues i fiables de la serralada, i el seu posterior control de qualitat i anàlisi d'homogeneïtat. A partir d'aquestes sèries s'han calculat les tendències (període comú 2002-2025) i s'han determinat diferències en l'evolució tèrmica en tres franges altitudinals. Els resultats preliminars mostren l'existència de l'EDW a escala anual, estacional i mensual.
El projecte incorpora, a més, un enfocament innovador: la instal·lació de dos transsectes altitudinals a Bonabé-Moredo (Pirineu català) i Panticosa-Infiernos (Pirineu aragonès), on es registren la temperatura de l'aire i la humitat relativa seguint els estàndards UHOP (Unified High Observations Platform). Aquests transsectes permetran estudiar més a fons els vincles entre l'EDW, la circulació atmosfèrica i la cobertura nival.

INTRODUCCIÓ

El context pirinenc: La serralada dels Pirineus és especialment sensible al canvi climàtic per la seva orientació oest-est i la influència combinada de l'Atlàntic i la Mediterrània.

Diversos projectes europeus ja han quantificat aquest canvi. Així, en el marc del projecte LIFE-SIP Pyrenees4Clima (2024-2031), s'ha confirmat un augment de la temperatura de 1,9 °C des del 1959 (fins a 2,7 °C a l'estiu), 20 dies menys de glaçada i 32 dies més d'estiu (OPCC, 2026). Aquests canvis afecten profundament els recursos hídrics, el turisme i la biodiversitat. A l'alta muntanya destaquen el retrocés de la coberta de neu, del permagel i de les glaceres, amb pèrdues recents molt acusades (Izagirre et al., 2024), que també repercuteixen en la seguretat dels excursionistes.

Objectius de l'estudi: Quantificar la tendència tèrmica recent al Pirineu, amb una atenció especial a l'alta muntanya, i veure si hi ha escalfament dependent de l'altitud similar al que s'ha observat en altres serralades del planeta (Pepin et al., 2022). També començar a veure la influència que hi pot tenir el retrocés de la cobertura nival.

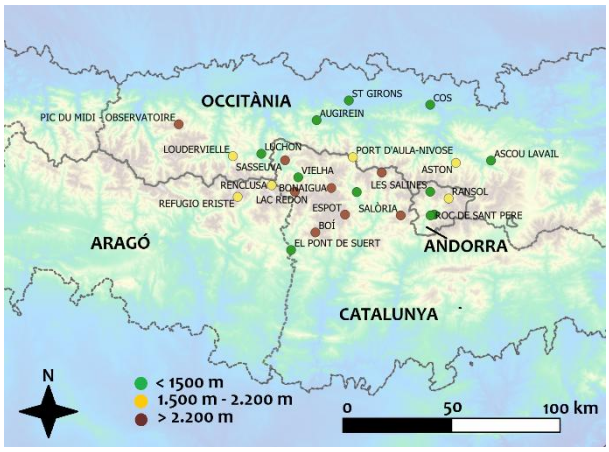


Figura 1. Localització dels observatoris utilitzats en l'estudi dins l'àmbit pirinenc definit per la Comunitat de Treball dels Pirineus (CTP). Font: elaboració pròpia.

METODOLOGIA

Sèries meteorològiques: En les darreres dècades, les observacions a l'alta muntanya han augmentat gràcies a les estacions automàtiques del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC), el Servei Meteorològic Nacional d'Andorra (SMA), l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET) i Météo-France (MF), millorant la cobertura i la qualitat de les dades. Tot i això, la recopilació continua sent laboriosa per la diversitat de fonts i formats i per les dificultats de manteniment de les estacions d'alta muntanya. Finalment, s'han seleccionat 25 sèries diàries de temperatura màxima (TX) i mínima (TN) per al període 1991-2025 al sector central dels Pirineus (figura 1), que inclou alguns dels cims més elevats de la serralada, com l'Aneto (3.404 m).

Control de qualitat i homogeneïtzació de les sèries: Les sèries recopilades han estat sotmeses a controls de qualitat pels respectius serveis meteorològics. A més, el mètode ACMANTv6, l'emprat en aquest estudi, incorpora el seu propi control de qualitat i detecta i corregeix discontinuïtats mitjançant la comparació amb estacions properes i ben correlacionades (Domonkos, 2025). Es considera un dels mètodes més precisos per identificar inhomogeneïtats en sèries climàtiques (Guijarro et al., 2023).

Divisió en franges altitudinals: Seguint les proves preliminars d'Esteban et al. (2026) i el criteri de Sigró et al. (2024), les estacions s'han agrupat en tres franges: <1500 m, 1500-2200 m i >2200 m. Aquestes corresponen, respectivament, a sectors amb neu escassa i esporàdica, sectors habitualment innivats però amb un clar retrocés i elevada variabilitat interanual, i sectors que encara mantenen una coberta nival persistent durant l'hivern (López-Moreno et al., 2020).

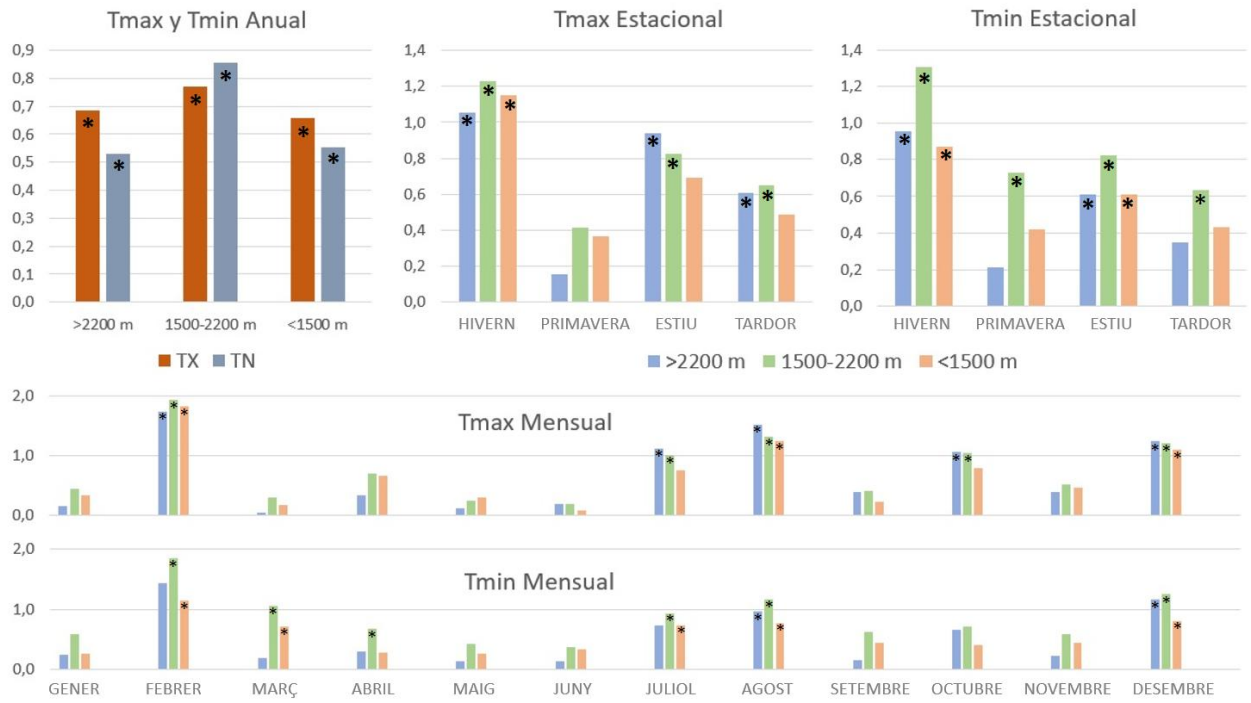


Figura 2. Tendències de la TX i la TN en funció de les diferents franges altitudinals i escales temporals. L'asterisc indica que la tendència és estadísticament significativa. Font: elaboració pròpia.

RESULTATS

Qualitat de les dades i sèries seleccionades: El procés d'homogeneïtzació de les sèries de TX i TN (1991-2025) ha identificat, de mitjana, entre 1 i 2 punts de ruptura per sèrie, amb ajustos anuals moderats, fet que limita l'impacte sobre les tendències. Tot i que ACMANTv6 permet completar dades mancants, aquesta opció s'ha descartat abans de 2002 per la manca d'una cobertura adequada a totes les franges altitudinals. Per al període 2002-2025 s'han seleccionat 22 sèries: 10 per sota de 1500 m, 5 entre 1500 i 2200 m i 7 per sobre de 2200 m.

Tendència segons les franges altitudinals: La tendència anual, estacional i mensual s'ha avaluat mitjançant regressió lineal i la prova de Mann-Kendall (95% de confiança). Els resultats per al

període 2002-2025 mostren un augment significatiu tant de la TX com de la TN al conjunt de les estacions analitzades, amb l'escalfament més intens a la franja intermèdia (1500-2200 m), especialment a l'hivern i en la TN (figura 2). En aquesta franja, la TN augmenta 1,31 °C per dècada, davant dels 0,87 °C i 0,95 °C per dècada observats a les franges inferior i superior. Per sobre dels 2200 m l'escalfament també és significatiu, destacant l'augment de la TX estival (0,94 °C per dècada), mentre que a les cotes baixes les tendències són més moderades. L'anàlisi mensual mostra els increments més acusats al desembre i, sobretot, al febrer, amb valors que superen els 1,5 °C per dècada. També s'observen augments destacables al juliol i a l'agost. No s'han detectat diferències significatives entre els vessants nord i sud dels Pirineus.

DISCUSSIÓ I CONCLUSIONS

En les darreres dècades s'han consolidat les xarxes transfrontereres d'estacions meteorològiques d'alta muntanya al Pirineu, fet que ha permès avançar en l'estudi de l'escalfament dependent de l'altitud (EDW), ja documentat en altres serralades com els Alps. Els resultats obtinguts fins ara indiquen que aquest fenomen també és present al Pirineu, tot i que amb matisos altitudinals i estacionals que cal continuar investigant amb sèries més llargues i una cobertura espacial més extensa. L'escalfament evident detectat a la franja intermitja (1500-2200 m) suggereixen la importància de la neu com a factor explicatiu de l'EDW, ja que és en aquest interval on el retrocés de la coberta nival és més evident. Tot i això, cal ampliar el nombre de sèries disponibles en aquesta franja per consolidar els resultats.



Figura 3. Estació tipus FLOAT a 2.500 m d'altitud integrada al transsecte de Bonabé, al Pirineu català, segons la classificació establerta per la Unified High Elevation Observing Platform. Font: SMC.

Amb l'objectiu d'aprofundir en aquest estudi, l'any 2025 es van desplegar nous transsectes instrumentats amb sensors de temperatura i humitat al Pirineu central (Bonabé i Infiernos), seguint les recomanacions de la Unified High Elevation Observing Platform (Pepin et al., 2024). Aquests dispositius cobreixen un gradient altitudinal que va dels 1.500 als més de 3.000 m (figura 3). En fases posteriors, aquesta recerca abordarà més a fons la relació entre l'EDW, la circulació atmosfèrica i l'evolució de la coberta nival.

En definitiva, en el marc del projecte LIFE-SIP Pyrenees4Clima (2024-2031), aquest treball presenta les investigacions en curs per detectar i caracteritzar l'escalfament dependent de l'altitud als Pirineus i identificar-ne els principals factors explicatius. L'anàlisi de sèries climàtiques d'alta muntanya d'Andorra, Espanya i França ja mostra unes primeres evidències consistents sobre l'ocurrència d'aquest fenomen durant les dues darreres dècades i anima a continuar-ne l'estudi per reforçar-ne la solidesa i millorar-ne la comprensió.

AGRAÏMENTS

Projecte LIFE-SIP Pyrenees4Clima (2024-2031), Parc Natural de l'Alt Pirineu, Oriol Grau, Ramon Baylina.

REFERÈNCIES

BURROUGH, P.A., 1996. Principles of Geographical Information Systems for land resources assessment. Clarendon Press, Oxford, 194 pp.

DOMONKOS, P. 2025. Homogenization of the Probability Distribution of Climatic Time Series: A Novel Algorithm. Atmosphere 2025, 16, 616. https://doi.org/10.3390/atmos16050616

ESTEBAN, P., PROHOM, M., CATEURA, J., LÓPEZ-MORENO, J.I., CUNILLERA, J. 2026. Elevation-dependent warming in the Pyrenees: Observed trends, new elevational transects and drivers' detection. Snowhydro Conference, Jaca 2-6 February 2026.

GUIJARRO, J.A., LÓPEZ, J.A., AGUILAR, E., DOMONKOS, P., VENEMA, V.K.C., SIGRÓ, J., BRUNET, M. 2023: Homogenization of monthly series of temperature and precipitation: Benchmarking results of the MULTITEST project. Int. J. Climatol., 43, 3994–4012

IZAGIRRE, E., REVUELTO, J., VIDALLER, I., et al. 2024: Pyrenean glaciers are disappearing fast: state of the glaciers after the extreme mass losses in 2022 and 2023. Reg Environ Change 24, 172. https://doi.org/10.1007/s10113-024-02333-1

LÓPEZ-MORENO, J.I., SOUBEYROUX, J.M., GASCOIN, S. et al. 2020. Long-term trends 1958–2017 in snow cover duration and depth in the Pyrenees. Int J Climatol.;40:6122–6136. https://doi.org/10.1002/joc.6571

OPCC 2026. Boletín de Indicadores de Cambio Climático de los Pirineos, 2024. Observatorio

Pirenaico de Cambio Climático. https://opcc-ctp.org/herramientas/boletin-climatico-biccpir/

PEPIN, N. C., ARNONE, E., GOBIET, A., HASLINGER, K., KOTLARSKI, S., NOTARNICOLA, C., et al. 2022. Climate changes and their elevational patterns in the mountains of the world. Reviews of Geophysics, 60, e2020RG000730. https://doi.org/10.1029/2020RG000730

PEPIN, N.C., BENEŠ, J., MASIOKAS, M., STEINER, J., THORNTON, J.M. & WILLIAMSON, S. 2024. Proposal for the Unified High Elevation Observational Platform UHOP. Mountain Research Initiative & GEO Mountains. doi: 10.48620/77051.

SIGRÓ, J., CISNEROS, M., PÉREZ-LUQUE, A.J., PÉREZ-MARTÍNEZ, C., VEGAS-VILARRUBIA, T. 2024: Trends in temperature and precipitation at high and low elevations in the main mountain ranges of the Iberian Peninsula 1894–2020: The Sierra Nevada and the Pyrenees. Int. J. Climatol. 449 2897-2920. https://doi.org/10.1002/joc.8487

10 ANYS DE METEOMUNTANYA

Pere Esteban [1], Aleix Serra [1], Quim Pons [2], Verónica Couto [1], Jordi Cruz [1]

(1) Servei Meteorològic de Catalunya (SMC), Generalitat de Catalunya.
pere.esteban@gencat.cat aleix.serra@gencat.cat veronicacouto@gencat.cat
(2) Federació d'Entitats Excursionistes de Catalunya (FEEC) quim.pons@feec.cat

PARAULES CLAUS: Meteorologia, muntanya, seguretat, excursionisme.

RESUM

MeteoMuntanya va néixer el 2016 com una iniciativa del Servei Meteorològic de Catalunya i la FEEC per oferir informació meteorològica especialitzada orientada als practicants d'activitats de muntanya. L'objectiu era millorar la planificació i contribuir a la prevenció d'accidents en un context d'augment de la freqüentació dels espais de muntanya i dels rescats.

Durant aquests anys, el portal ha esdevingut una eina útil per a molts muntanyencs, gràcies a les previsions periòdiques, els continguts divulgatius sobre meteorologia, seguretat i canvi climàtic, així com a les nombroses activitats formatives i de sensibilització.

Ara, després d'una dècada de trajectòria, és moment de valorar-ne els resultats i definir com ha d'evolucionar un projecte consolidat com a font fiable i rigorosa d'informació meteorològica per a la muntanya.

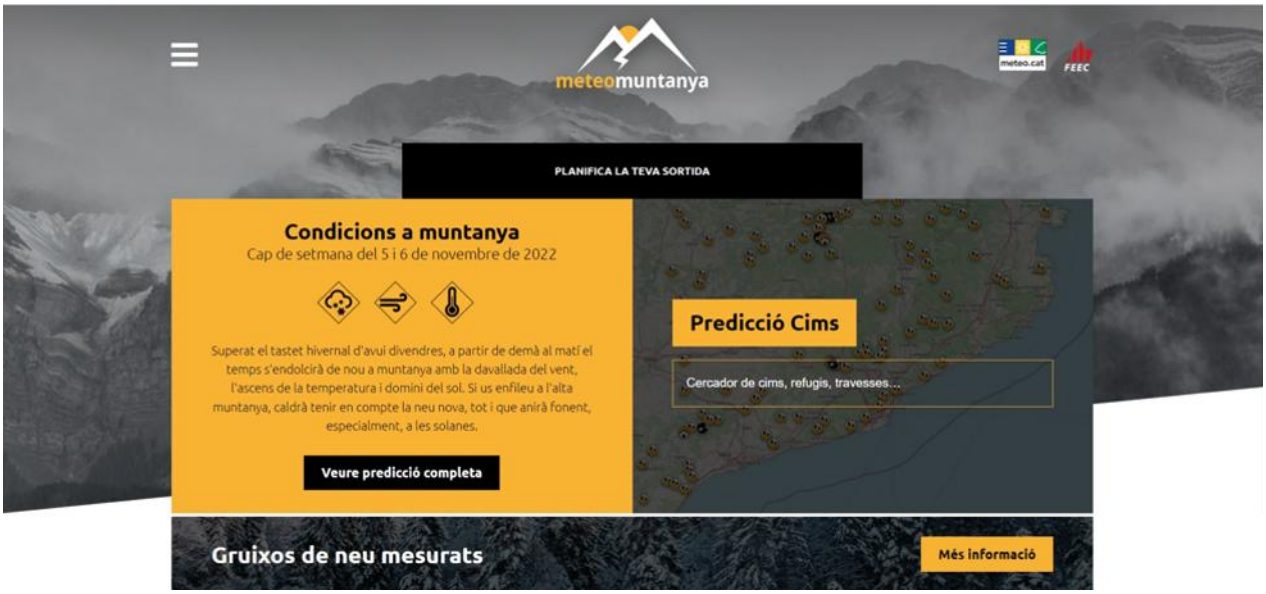


Figura 1 –Aspecte actual de la portada de meteomuntanya.cat. A la part de condicions s'observen els tres perills destacats i el titular de cara al cap de setmana. Podeu veure, també, el cercador de la predicció a cims, refugis i travesses, i l'enllaç per consultar els gruixos de neu mesurats a les estacions del Servei Meteorològic de Catalunya.

INTRODUCCIÓ

El novembre de 2016 va néixer MeteoMuntanya, una iniciativa conjunta del Servei Meteorològic de Catalunya i la Federació d'Entitats Excursionistes de Catalunya: un portal dedicat a la meteorologia i la seguretat en l'àmbit excursionista.

En un context d'increment notable de l'afluència d'aficionats a la muntanya als massissos catalans, així com del nombre de rescats, el projecte tenia com a objectiu facilitar l'accés a informació meteorològica més comprensible, detallada i rigorosa, juntament amb eines formatives que

ajudessin a planificar millor les activitats i a contribuir a la prevenció de l'accidentalitat.

Al llarg d'aquests anys, a través del web meteomuntanya.cat, s'ha treballat activament per fomentar la cultura de muntanya i el coneixement dels perills meteorològics que ens poden afectar durant la nostra activitat. Així, setmana rere setmana, els dimecres i els divendres, molts muntanyencs han consultat les actualitzacions de les condicions previstes per planificar les sortides del cap de setmana. També han pogut aprofundir en aspectes relacionats amb la meteorologia, la seguretat o el canvi climàtic mitjançant les publicacions del blog i la revista Vèrtex, i seguir campanyes, xerrades, jornades i webinars difosos tant a través de les xarxes socials com arreu del territori. Aquests continguts també han prestat una atenció especial als perills propis de la temporada hivernal, com el fred, les nevades, el torb o l'estat superficial de la neu.

METEOMUNTANYA FINS ARA

Per tal de fer útil i accessible la informació sobre el temps previst del Servei Meteorològic de Catalunya, així com entenedora per als aficionats a les activitats de muntanya, el portal MeteoMuntanya ofereix diversos recursos.

"Condicions de muntanya" ofereix una previsió meteorològica en format blog centrada en els caps de setmana i els dies festius. S'hi utilitza una simbologia específica per destacar fenòmens previstos com ara vent fort, visibilitat reduïda per boira, precipitacions intenses o persistents, tempestes i activitat elèctrica, nevades i torb, neu dura a la superfície i condicions de confort tèrmic (fred o calor). També s'hi poden incloure comentaris i recomanacions de seguretat.

Per complementar aquesta previsió escrita, l'apartat "Predicció cims" ofereix el pronòstic diari semi automatitzat (model WRF de 3 km de resolució) per a més de 300 cims dels massissos catalans, amb un horitzó de predicció de tres dies.

A més, durant la temporada hivernal els usuaris poden consultar dades de gruix de neu en temps real i de les anomalies diàries respecte a la mitjana climàtica.

També hi ha disponibles previsions centrades en les condicions de travesses de muntanya clàssiques del país (Cavalls del Vent, Carros de Foc...), alhora que periòdicament s'ofereix informació detallada de les condicions meteorològiques per a algunes competicions oficials FEEC (curses de muntanya, esquí de muntanya, raquetes de neu, caminades de resistència...). Des de fa uns anys també es cobreix la Matagalls-Montserrat.

A banda, els qui consulten la predicció sempre tenen a mà l'enllaç cap al Butlletí de Perill d'Allaus de Catalunya i l'Aran, per completar així la bona planificació de la sortida hivernal amb la informació nivològica.

Si ens centrem en la part divulgativa i de conscienciació, per promoure la cultura de muntanya i reforçar la sensibilització, l'apartat "Blog de MeteoMuntanya" ofereix continguts divulgatius breus (de 2 a 5 minuts de lectura) sobre temes com el canvi climàtic, els climes dels massissos catalans o la meteorologia de muntanya. Alguns exemples que tracten temàtica hivernal són "Jet, nevada i torb", "neu dura", "L'anticicló hivernal i la neu" o "Predir el Torb". Aquests articles també es publiquen de manera regular a Vèrtex, la revista de la FEEC, que arriba a més de 40.000 federats.



Figura 2. Captura de la càpsula de seguretat sobre vent i temperatura amb la Clàudia Sabata.

Finalment, l'apartat "Muntanya i seguretat" actua com un espai de referència per a particulars, entitats excursionistes i centres educatius que busquen recursos formatius. Hi destaquen vídeos divulgatius a YouTube sobre els perills meteorològics a la muntanya, amb la participació de muntanyencs reconeguts com Araceli Segarra, Ferran Latorre o Clàudia Sabata, com també càpsules juntament amb els Bombers sobre seguretat en diferents disciplines de muntanya. També s'hi ofereix accés directe a seminaris en línia sobre temes com el torb o les tempestes i els llamps.

IMPACTE I CREIXEMENT DEL PROJECTE

Les dades d'ús del portal MeteoMuntanya mostren una consolidació progressiva del projecte durant els darrers anys. Considerant els tres darrers períodes anuals complets (de l'1 de juliol al 30 de juny), MeteoMuntanya ha passat de 34.145 a 42.022 usuaris anuals, un increment acumulat del 23,1%, mentre que les visualitzacions han augmentat de 170.807 a 195.732 (+14,6%). Això

equival a una taxa de creixement mitjana anual del 10,9% en usuaris i del 7,1% en visualitzacions, fet que evidencia la consolidació progressiva del projecte i la seva creixent penetració dins la comunitat excursionista i muntanyenca. Aquí, sens dubte, cal tenir en compte que el darrer període 2025-2026 ha destacat per ser més advers pel que fa a les condicions a muntanya.

L'anàlisi de les pàgines més consultades mostra que els usuaris utilitzen MeteoMuntanya principalment com una eina de suport a la planificació i a la presa de decisions. Durant el període analitzat, les seccions de Predicció de cims, Condicions de muntanya i la portada del portal van registrar aproximadament 54.000, 50.000 i 52.000 visualitzacions anuals respectivament. En conjunt, aquestes tres seccions concentren al voltant del 80% del total de visualitzacions del portal. Creiem important destacar l'apartat de Condicions de muntanya, que supera les 50.000 visualitzacions anuals i s'ha consolidat com un dels principals elements diferencials del projecte. Aquest patró d'ús suggereix que els visitants no busquen únicament una predicció meteorològica convencional, sinó també informació contextualitzada sobre l'impacte dels episodis meteorològics recents al terreny, recomanacions per a planificar l'activitat, saber la distribució i l'estat de la neu, així com complementar la informació a partir de referències climatològiques derivades de les observacions efectuades a les estacions meteorològiques de la xarxa.

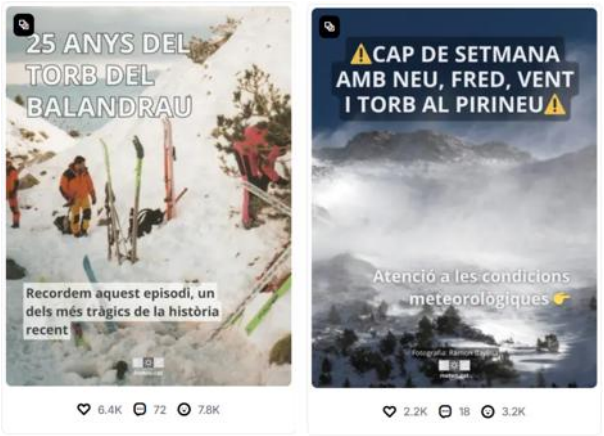


Figura 3. Captura de publicacions a Instagram de l'SMC de continguts de MeteoMuntanya. La publicació del Balandrau la van veure 280.000 persones.

L'impacte del projecte va més enllà de les visites registrades al portal web. L'activitat desenvolupada a través de les xarxes socials, els continguts audiovisuals i els canals de comunicació de l'SMC i la FEEC ha permès ampliar notablement l'abast dels missatges de prevenció i seguretat. Algunes publicacions a Instagram relacionades amb la meteorologia i els perills a la muntanya han superat les 280.000 visualitzacions, mentre que altres continguts sobre neu, torb, fred intens o llamps han assolit entre 120.000 i 160.000 visualitzacions. Paral·lelament, els vídeos divulgatius de meteorologia i seguretat elaborats per esportistes i alpinistes de referència (Clàudia Sabata, Ferran Latorre, Araceli Segarra) acumulen més de 23.500 visualitzacions, amb peces que superen les 8.600 visualitzacions, mentre que els vídeos desenvolupats conjuntament amb Bombers de la Generalitat que aborden activitats concretes (excursionisme, barrancs, raquetes de neu, ferrades) sumen prop d'11.400 visualitzacions addicionals. Altres xifres són les més de 5.200 visualitzacions dels seminaris web especialitzats (Meteorologia hivernal, Tempestes i llamps, Mites i realitats de la predicció, Torb a muntanya) i les més de cinc milions d'impressions anuals del banner de MeteoMuntanya a la web de la FEEC.

CONCLUSIÓ: EL FUTUR DE METEOMUNTANYA

Aprofitant aquesta primera dècada de col·laboració entre l'SMC i la FEEC en el desenvolupament de MeteoMuntanya, i amb l'experiència acumulada durant aquests anys, és un bon moment per fer balanç del camí recorregut.

Les dades mostren una evolució positiva tant pel que fa a l'ús del portal com a l'abast de les accions de divulgació i prevenció vinculades al projecte. En aquest temps, MeteoMuntanya ha anat guanyant presència com a espai d'informació meteorològica especialitzada sòlida i fiable, així com de referent de sensibilització sobre els perills meteorològics en l'àmbit excursionista.

Però sempre hi ha opcions de millora. Els canvis en els hàbits de consum d'informació, l'aparició de nous canals de comunicació i la creixent demanda d'informació en l'àmbit de la muntanya per l'increment de visitants als massissos catalans plantegen nous reptes que caldrà abordar durant els propers anys. En aquest context, l'objectiu continua essent reforçar la utilitat del servei per als practicants d'activitats de muntanya, millorant el coneixement i la comunicació preventiva dels fenòmens meteorològics adversos de cara a facilitar la presa de decisions abans i sobre el terreny.

BIBLIOGRAFIA I ENLLAÇOS

ESTEBAN P, SERRA A. 2017. MeteoMuntanya. Vèrtex 272, 68-74.
www.meteomuntanya.cat

PIRINEX: UNA XARXA DE RADARS METEOROLÒGICS DE BANDA X PER AL PIRINEU CATALÀ

Ferran Fabró [1]; Patricia Altube [2]; Oriol Rodríguez [3] i Nicolau Pineda [4]

(1) Equip de Teledetecció, Àrea de Sistemes d'Observació Meteorològica (Servei Meteorològic de Catalunya; ferran.fabro@gencat.cat).
(2) Equip de Teledetecció, Àrea de Sistemes d'Observació Meteorològica (Servei Meteorològic de Catalunya; patricia.altube@gencat.cat).
(3) Equip de Teledetecció, Àrea de Sistemes d'Observació Meteorològica (Servei Meteorològic de Catalunya; oriolrodriguezb@gencat.cat).
(4) Equip de Teledetecció, Àrea de Sistemes d'Observació Meteorològica (Servei Meteorològic de Catalunya; nicolau.pineda@gencat.cat).

PARAULES CLAU: Radar, Banda X, Polarització Dual, Pirineu, XRAD

RESUM

La xarxa actual de quatre radars meteorològics de banda C (XRAD) del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) presenta limitacions significatives de visibilitat a les zones d'alta muntanya del Pirineu català a causa del bloqueig orogràfic. L'abril de 2025, el Govern de la Generalitat de Catalunya va aprovar el projecte PIRINEX per desplegar una xarxa complementària de tres radars de banda X de polarització dual prioritzant la cobertura de proximitat i l'accessibilitat. En aquest resum ampliat es presenta la metodologia de disseny basada en simulacions d'altura mínima de visibilitat sense bloqueig (h_mint), l'estudi de compatibilitat electromagnètica (CEM) amb la xarxa RESCAT i el dimensionament de seguretat de les estructures d'antena d'acord amb la normativa ICNIRP (2020).

1. INTRODUCCIÓ I MOTIVACIÓ DEL PROJECTE PIRINEX

El Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) opera actualment la Xarxa de Radars Meteorològics (XRAD), formada per quatre equipaments de banda C situats a Puig d'Arques (PDA), la Panadella (CDV), Tivissa-Llaberia (LMI) i Vallirana (PBE). Aquesta xarxa proporciona una cobertura espacial densa i contínua a la major part del territori català amb cicles d'escaneig de 5 a 6 minuts. No obstant això, en zones de topografia complexa com la regió pirinenca, el feix del radar pateix un sever bloqueig orogràfic en les elevacions més baixes, fent que l'altura mínima sobre el terreny sense bloqueig del feix radar estigui per sobre dels 1500 metres pràcticament a tot el Pirineu. Aquesta manca d'observació en cotes baixes és especialment crítica, atès que nombrosos nuclis habitats i principals infraestructures de transport se situen precisament als fons de vall, pròxims a les meandres i llits dels rius, essent altament vulnerables a les inundacions sobtades i a les avingudes provocades per episodis de pluja intensa (White et al., 1997; Trapero et al., 2013; Victoriano et al., 2016). Així mateix, el seguiment dels episodis característics de la vessant nord del Pirineu, a vegades relacionats amb nevades abundants o altres situacions meteorològiques adverses, requereix una observació de proximitat de millor resolució.

Per resoldre aquesta problemàtica, l'abril de 2025 el Govern de la Generalitat de Catalunya va aprovar el desplegament de la xarxa de radars de banda X als Pirineus (projecte PIRINEX), encarregant-ne el disseny i la planificació tècnica a l'Equip de Teledetecció de l'SMC.

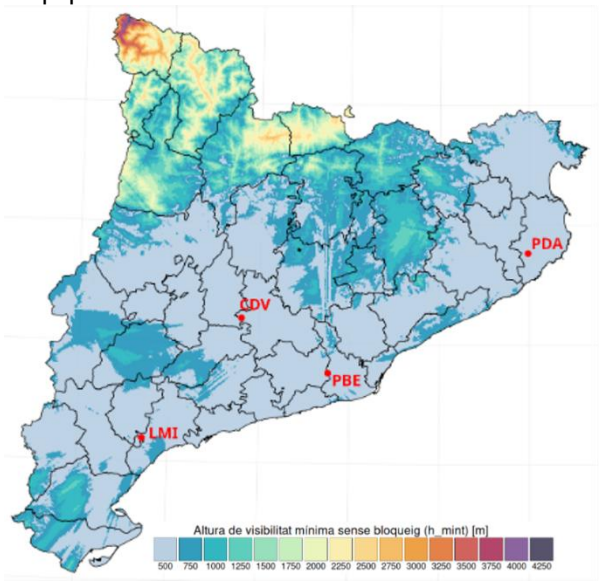


Figura 1 – Altura mínima sobre el terreny sense bloqueig del feix del radar (h_mint; altura de visibilitat) en cada punt del territori dins l'abast del radar.

2. TECNOLOGIA DE BANDA X DE POLARITZACIÓ DUAL I ESPECIFICACIONS TÈCNIQUES

En àrees de muntanya amb un alt bloqueig topogràfic, l'estratègia d'observació recomana l'ús de radars de banda X de polarització dual com a alternativa o complement als sistemes de banda C, prioritzant la cobertura de proximitat amb xarxes d'alta densitat, en lloc de l'abast a llarga distància. Els equipaments de banda X presenten una mida més reduïda, menys pes i una major facilitat de transport, instal·lació i manteniment, la qual cosa és especialment rellevant en emplaçaments d'alta muntanya de difícil accés.

La tecnologia de polarització dual permet mesurar de manera simultània l'energia retornada en les components horitzontal i vertical, oferint millores determinants per a la qualitat de les dades meteorològiques:

- **Distinció entre pluja i neu**: Permet diferenciar amb precisió la neu de la pluja en la columna atmosfèrica, proporcionant una millor estimació de la precipitació de neu en superfície per tal de calcular els gruixos acumulats.

- **Identificació del tipus d'hidrometeors**: Aporta informació sobre la varietat d'hidrometeors presents i permet avaluar la probabilitat de precipitació en forma de pedra o calamarsa.

- **Correcció d'atenuació per pluja**: En freqüències de banda X, les cel·les de pluja intensa atenuen el senyal, minvant la sensibilitat de l'instrument darrere de la precipitació; la polarimetria permet corregir aquesta atenuació mitjançant la fase diferencial específica (K_{DP}).

- **Eliminació d'ecos no meteorològics**: Permet identificar i filtrar automàticament els ecos espuris de terra i de mar (clutter) i altres fonts d'interferència electromagnètica.

METODOLOGIA DE SIMULACIÓ DE VISIBILITAT I SELECCIÓ D'EMPLAÇAMENTS

Per dissenyar la xarxa i avaluar de manera objectiva la millora de cobertura, s'ha establert com a indicador de qualitat l'altura mínima sobre el terreny sense bloqueig del feix del radar (h_mint; o altura de visibilitat). Aquest indicador permet quantificar tant el bloqueig topogràfic com l'altura del feix sobre la superfície, independentment de l'estratègia d'escaneig que s'implementi posteriorment. Per tant, amb aquest indicador és possible comparar directament la visibilitat entre diferents ubicacions dels radars i respecte a la visibilitat de la xarxa actual.

L'anàlisi de visibilitat s'ha estructurat dividint la regió pirinenca en sis zones clau d'avaluació: Vall d'Aran (Z1), Pallars Sobirà (Z2), Alta Ribagorça (Z3), Cerdanya i Alt Urgell (Z4), Pallars Jussà (Z5) i Berguedà i Ripollès (Z6) (Figura 2). L'objectiu de disseny establert per a la xarxa PIRINEX és aconseguir que més del 50% de la superfície tingui visibilitat per sota dels 750-1000 m i més del 95% per sota dels 1500 m.

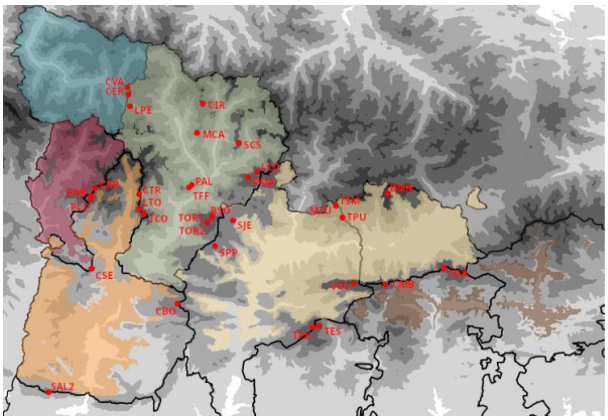


Figura 2 – Zones clau i llistat d'ubicacions potencials dels radars de banda-X (radi d'abast de 70 km) per cobrir-les.

S'han analitzat un total de 32 (Figura 2) ubicacions potencials (amb un radi d'abast màxim de 70 km) i s'han avaluat diferents configuracions de 4 i 3 radars. La simulació conclouen que la millor combinació per a una xarxa de 3 radars està formada pels emplaçaments següents (Figura 3):

- Port de la Bonaigua / La Peülla (LPE): Municipi de l'Alt Àneu, comarca del Pallars Sobirà. Assegura la cobertura de la Vall d'Aran i del nord del Pallars Sobirà.

- Portainé - Torreta de l'Orri (TOR): Municipi de Rialp, comarca del Pallars Sobirà. Proporciona una cobertura òptima del central del Pallars Sobirà i de les valls de la Noguera Pallaresa.

- La Tosa d'Alp (TDA): Municipi de Bagà, comarca del Berguedà. Cobreix la Cerdanya, l'Alt Urgell, el Berguedà i el vessant oriental del Pirineu.

Aquesta tríada d'emplaçaments permet aconseguir que el 95% de la superfície pirinenca tingui una altura de visibilitat H_vis < 900 m a les zones de muntanya, H_vis < 1500 m als fons de vall i H_vis < 1200 m als vessants (Figura 4).

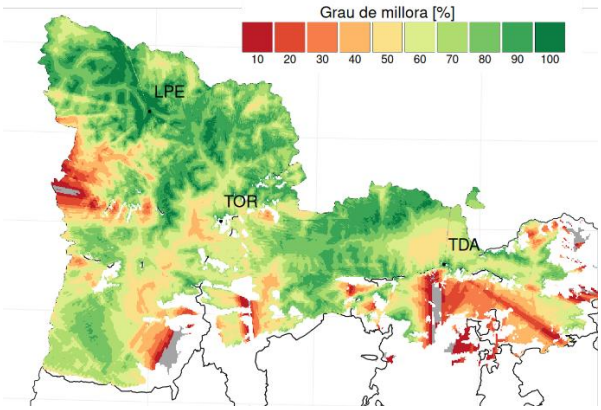


Figura 3 – Grau de millora amb els 3 emplaçaments seleccionats. Les zones en gris corresponen a zones sense millora.

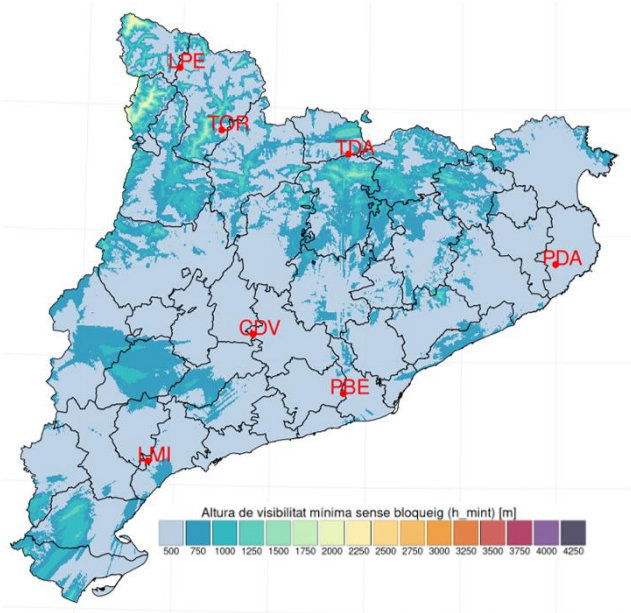


Figura 4 – Altura mínima sobre el terreny sense bloqueig del feix del radar (h_mint; altura de visibilitat) amb la xarxa Pirinex combinada amb la xarxa XRAD actual.

COMPATIBILITAT ELECTROMAGNÈTICA I DIMENSIONAMENT DE SEGURETAT

Els tres emplaçaments seleccionats se situen en estacions d'esquí i comparteixen espai físic amb infraestructures de comunicacions preexistents. Per aquest motiu, s'ha dut a terme un estudi de compatibilitat electromagnètica per avaluar les interferències amb receptors de radiocomunicació i determinar els nivells d'exposició a radiació de radiofreqüència per al personal tècnic i el públic general.

Els paràmetres tècnics utilitzats en aquest estudi corresponen a un transmissor amb potència de pic de 1000 W, un cicle de treball (duty cycle) del 15% (que equival a una potència mitjana de 150 W), un guany d'antena de 45 dBi i una atenuació del lòbul secundari de 25 dB respecte del lòbul principal, operant a una freqüència central de 9,4 GHz.

4.1. Intercoexistència amb els receptors TETRA de la xarxa RESCAT

S'ha avaluat el risc de saturació (blocking) dels receptors TETRA de la xarxa RESCAT (operant a 390 MHz) instal·lats en torres de telecomunicacions properes (a una distància d'aproximadament 300 m del radar de TOR). Segons el criteri de la norma ETSI EN 300 113, el llindar màxim d'immunitat admès és de -25 dBm.
Els càlculs d'EIRP i potència rebuda indiquen que a 300 m, la potència de pic rebuda pel receptor TETRA és de 12,9 dBm pel lòbul principal (+37,9 dB per sobre del llindar ETSI) i de -12,1 dBm pel lòbul secundari (+12,9 dB per sobre del llindar ETSI). Per tal de prevenir la saturació dels receptors RESCAT, es va determinar la necessitat d'implementar un sector d'emissió aturada (sector blanking) al radar de TOR en l'azimut comprès entre 89º N i 106º N, en direcció a la vall de la Cerdanya. Les simulacions de visibilitat confirmen que el blanqueig d'aquest sector no degrada la cobertura global, ja que el radar de La Tosa d'Alp (TDA) i la xarxa XRAD mantenen la visibilitat sobre la vall de la Cerdanya.

4.2. Seguretat per exposició humana segons les directrius ICNIRP (2020)

D'acord amb les directrius de la ICNIRP (2020) per a la freqüència de 9,4 GHz, els nivells de referència màxims de densitat de potència promitjats en 6 minuts són S_laboral = 408,9 W/m² i S_general = 81,8 W/m². Aplicant la potència mitjana radiada (150 W, corresponent al duty cycle del 15%), les distàncies mínimes de seguretat en línia recta en la direcció del feix principal són de 30,4 m per a l'estat laboral (treballadors formats) i de 67,9 m per al públic general.
Per tal de garantir que el feix radar no intercepti cap organisme sobre el terreny circumdant (considerant l'elevació mínima d'escaneig d'el_min = -2º i un perímetre de seguretat d = 68 m), les altures de les torres de suport s'han dimensionat afegint a l'altura

de seguretat geomètrica (h_0) l'acumulació màxima de neu hivernal prevista a cada emplaçament (Figura 5 i Taula 1).

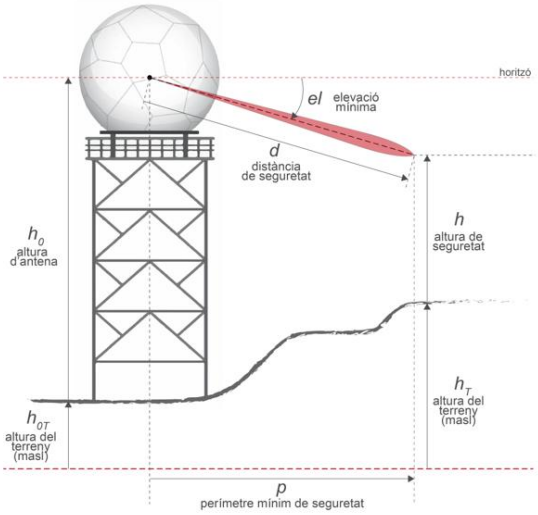


Figura 5 – Esquema de la disposició de l'estructura per a garantir la seguretat del públic general davant l'emissió de radiació no ionitzant durant l'operació habitual del radar.

	LPE	TOR	TDA
Altura mínima de seguretat	5.5 m	7.0 m	5.8 m
Gruix de neu	3.0 m	1.0 m	1.0 m
TOTAL	**8.5 m**	**8.0 m**	**6.8 m**

Taula 1 – Altura mínima de seguretat per a cada radar de la xarxa PIRINEX en les ubicacions programades, considerant l'altura mínima segons la configuració de radiació i el gruix de neu típic de neu.

CONCLUSIONS

El desplegament de la xarxa PIRINEX permetrà reduir la línia d'observació radar per sota dels 1500 m sobre el terreny all Pirineu català, resolent la principal manca de visibilitat de la xarxa XRAD actual. La tecnologia de polarització dual aportarà una millora directa en la vigilància de tempestes intenses, la distinció entre pluja i neu, la quantificació de precipitació de neu acumulada i l'avaluació del risc d'inundacions sobtades.

BIBLIOGRAFIA

ETSI EN 300 113. Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Land Mobile Service; Radio equipment intended for the transmission of data (and/or speech) having a constant or non-constant envelope antenna connector.

ICNIRP (2020). Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). Health Physics, 118(5), 483-524.

TRAPERO, L., BECH, J., & DUFOUR, A. (2013). Numerical modelling of a heavy snowfall event in the Pyrenees: Sensitivity to microphysics and snow level evolution. Atmospheric Research, 123, 370-384.

VICTORIANO, A., TRAPERO, L., & GARCIA, C. (2016). Analysis of convective storm events causing flash floods in high mountain environments: Pyrenean case studies. Journal of Hydrology, 541, 215-228.

WHITE, A. B., JORDAN, J. R., & MARTNER, B. E. (1997). Using dual-polarized radar to detect snow level and hydrometeor types in complex terrain. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 14(4), 890-902.

SISTEMATITZACIÓ DE LA INSPECCIÓ DELS SISTEMES DE CONTENCIÓ DEL MANTELL NIVAL

Josep Farré (1); Josep M. Caba (2); Eugènia Álvarez (3) i Josep Ricart (4)

(1) SOLUTIOMA. josep.farre@solutioma.com
(2) SOLUTIOMA jm.caba@solutioma.com
(3) GENERALITAT DE CATALUNYA eugenia.alvarez@gencat.cat
(4) GENERALITAT DE CATALUNYA josep.ricart@gencat.cat

RESUM

Aquest treball aborda la manca de planificació en la inspecció i manteniment dels sistemes de contenció del mantell nival, habitualment gestionats de manera reactiva dins del sector de la mitigació de riscos naturals. L'estudi se centra en una prova pilot aplicada a sistemes de barreres flexibles antiallaus situats en zones d'acumulació nival a les carreteres C-28 (Port de la Bonaigua) i C-142b (accés a Beret).
La recerca planteja el desenvolupament d'una metodologia sistematitzada d'inspecció com a pas previ per a futures hipòtesis orientades a la millora de la gestió, la reducció de riscos i l'allargament de la vida útil dels actius. La metodologia es basa en l'elaboració de fitxes d'inspecció i checklists derivats de manuals de fabricants, complementats amb vols de dron i l'anàlisi de documentació de projecte per a la caracterització de les infraestructures. La digitalització de la informació es realitza mitjançant una aplicació de camp connectada a la plataforma SYSTMA, que permet la gestió integrada d'actius geotècnics. El treball es recolza en referències tècniques internacionals, especialment estudis del CEREMA i criteris de la normativa austríaca.
Els resultats obtinguts constitueixen una primera aproximació a l'estat real dels actius, identificant tipologies de dany recurrents i evidenciant problemàtiques comunes. La prova pilot ha permès també detectar dificultats operatives en la captació de dades, així com estimar els recursos i rendiments necessaris per a la implementació del sistema. La digitalització ha demostrat ser clau per a la traçabilitat dels elements, la generació d'històrics i la visualització dinàmica d'indicadors, facilitant la programació i calendarització de futures actuacions.
Es conclou que la sistematització de les inspeccions constitueix una base fonamental per al desenvolupament de plans de manteniment estructurats i per a la presa de decisions basada en dades, permetent avançar cap a una gestió predictiva i no reactiva. Així mateix, es posa de manifest la necessitat d'estandarditzar criteris d'inspecció en el sector.

PARAULES CLAU: *barreres antiallaus; inspecció sistematitzada; gestió d'actius; digitalització; georeferenciació; manteniment preventiu.*

INTRODUCCIÓ

Els sistemes de contenció del mantell nival constitueixen una mesura estructural de protecció davant la iniciació d'allaus en zones d'acumulació. La seva funcionalitat al llarg del temps depèn no només del dimensionament i del muntatge inicials, sinó també de la conservació dels diferents components exposats a càrregues de neu, cicles de gel i desglaç, corrosió, moviments del terreny, vegetació i impactes puntuals. En aquest context, la inspecció periòdica és una eina essencial per conèixer l'estat real dels sistemes i programar el manteniment.
La pràctica habitual pot generar una gran quantitat d'informació tècnica —fitxes, fotografies, observacions i informes— que, si queda encapsulada en documents independents, resulta difícil de reutilitzar i comparar en campanyes successives. El repte no és únicament obtenir una diagnosi en una data determinada, sinó conservar i estructurar la informació de manera que pugui ser consultada, actualitzada i explotada al llarg del cicle de vida de l'actiu.
Aquesta necessitat és coherent amb la literatura recent sobre gestió digital d'infraestructures. Diversos treballs assenyalen que la captura, integració i visualització estructurada de dades permet millorar la presa de decisions basada en evidències, facilitar la continuïtat de la informació al llarg del cicle de vida i reforçar la resiliència dels actius (Caldera et al., 2021; Liu et al., 2024).
Aquest treball presenta una prova pilot aplicada a les barreres antiallaus del Port de la Bonaigua (C-28) i de l'accés al Pla de Beret(C142B). Les inspeccions efectuades tenien com a objectius verificar la integritat estructural, detectar deterioraments, comprovar la funcionalitat dels

sistemes i establir les bases d'un manteniment preventiu.

HIPÒTESI I OBJECTIUS

La hipòtesi de treball estableix que la sistematització de les inspeccions, combinada amb eines digitals de captura, estructuració, georeferenciació i explotació de dades, permet transformar una inspecció convencional basada principalment en un informe estàtic en un sistema dinàmic d'informació sobre l'estat dels actius.
L'objectiu general és desenvolupar i aplicar una metodologia que permeti estructurar, conservar, analitzar i representar la informació obtinguda en camp. Es pretén millorar la traçabilitat, homogeneïtzar criteris, evitar la pèrdua de coneixement entre campanyes i preparar una base comparable per a inspeccions futures.

MATERIALS I MÈTODES

La metodologia s'ha aplicat als conjunts de barreres existents al Port de la Bonaigua i al Pla de Beret. El procediment es va estructurar en una seqüència comuna: recopilació documental, visites preliminars, definició i validació de fitxes, inventari i georeferenciació, inspecció de camp, digitalització, classificació i explotació de dades.
La recopilació documental inclou, quan estan disponibles, projectes, plànols, informes anteriors, manuals de muntatge i documentació fotogràfica. Les visites preliminars permeten contrastar aquesta informació amb la realitat de camp i adaptar les fitxes a les diferents tipologies de sistema.
La unitat d'informació no és únicament la barrera. Cada conjunt es descompon jeràrquicament en emplaçament, sector, alineació, mòdul, component i observació. Aquesta estructura permet associar una incidència a un element concret i, posteriorment, agregar els resultats segons diferents criteris.
Les fitxes distingeixen, entre altres, sistemes tipus Umbrelli i sistemes de pal i xarxa de cable, amb camps específics per a malles, xarxes, cables, ancoratges, subjectacables, unions, bigues o pals, tubs, patins, bases i reforços. Els estats registrats inclouen valors com correcte, oxidat, soterrat, deformat, trencat, caigut, desplaçat, element absent o element restaurat.
La presa de dades es realitza mitjançant formularis digitals i es complementa amb registre fotogràfic i vols de dron per a la visió general, localització i documentació de zones de difícil accés. Les dades s'integren en una base de dades associada a la plataforma SYSTMA, de manera que cada registre conserva la relació amb l'actiu, la inspecció, el component i la incidència.

El model de governança proposa que cada registre respongui, com a mínim, a cinc preguntes: què s'ha inspeccionat, on es troba, quan s'ha inspeccionat, quin estat presenta i quina evidència documental hi està associada. D'aquesta manera, la inspecció deixa de ser únicament un document de campanya i es converteix en un registre persistent susceptible de ser actualitzat.

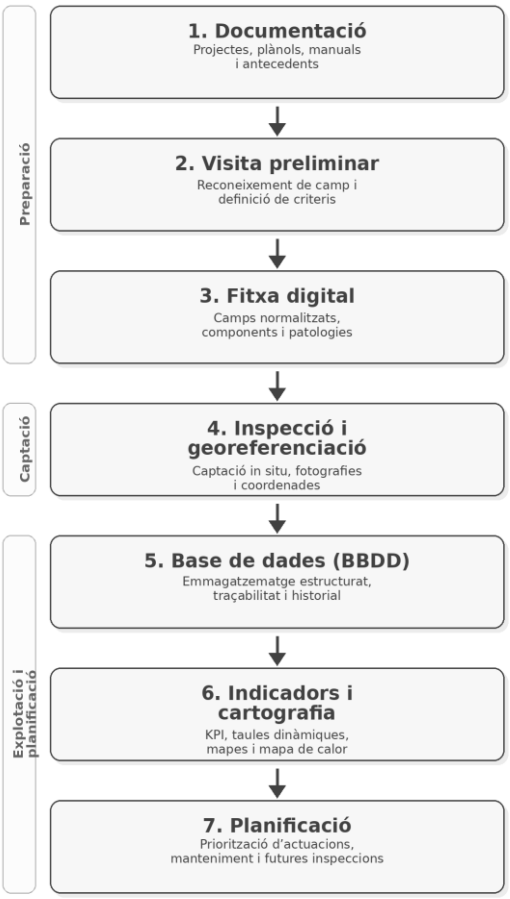


Figura 1 – Esquema conceptual del procés d'inspecció i explotació de la informació.

CRITERIS D'ESTAT I INDICADORS

Per facilitar la lectura global es proposa una classificació sintètica per mòdul: verd, estat funcional acceptable; groc, deteriorament o informació que requereix seguiment; vermell, defecte funcional o estructural potencialment rellevant.

Estat	Interpretació i criteri general
Verd	Estat funcional acceptable. Absència de defectes funcionals o estructurals rellevants; s'admeten incidències menors que no comprometin la funcionalitat del sistema.
Groc	Requereix seguiment. Presència de deterioraments, elements no verificables o incidències que requereixen revisió específica o manteniment programable.

Vermell	Requereix actuació prioritària. Presència de defectes estructurals o funcionals rellevants que poden comprometre parcialment o totalment la funcionalitat del sistema.

Taula 1 – Criteris generals de classificació de l'estat dels mòduls.

Quan coexisteixen diversos estats en un mateix mòdul, s'adopta la categoria més desfavorable.
Els indicadors tècnics poden incloure el nombre de mòduls inspeccionats, percentatge per nivell d'estat, freqüència de patologies, components més afectats i distribució espacial. Paral·lelament, es proposen indicadors de qualitat de la informació: percentatge d'actius georeferenciats, registres complets, elements amb evidència fotogràfica i registres recuperables en futures inspeccions.
La digitalització de la inspecció ha permès estructurar la totalitat de l'inventari analitzat, format per 110 files de barreres, totes elles inventariades, inspeccionades i georeferenciades. Aquestes files estan constituïdes per un nombre variable de mòduls en funció de la seva longitud i de la tipologia de sistema, amb un total de 1.767 mòduls inspeccionats: 898 al Port de la Bonaigua i 869 al Pla de Beret.
Aquesta estructuració permet disposar d'indicadors quantitatius amb denominadors clarament definits. A escala d'inventari, la cobertura de la inspecció i de la georeferenciació és del 100 % de les 110 files. A escala de detall, la base de dades permet explotar els 1.767 mòduls inspeccionats i els seus components, agregant o desagregant la informació segons l'emplaçament, la fila, el mòdul, la tipologia de barrera, el component o la incidència detectada.
La principal aportació dels indicadors no és únicament la quantificació de l'estat dels actius, sinó la possibilitat de generar dinàmicament diferents nivells de lectura a partir d'una mateixa font de dades. Així, els registres detallats de camp poden transformar-se en percentatges d'elements afectats, distribucions de patologies, classificacions sintètiques de l'estat, taules dinàmiques, quadres de comandament o representacions cartogràfiques, mantenint en tot moment la traçabilitat fins al registre original.
La classificació sintètica de l'estat es realitza agregant la informació des del nivell de component al mòdul i, posteriorment, del mòdul a la fila, adoptant com a criteri global la incidència de major rellevància detectada. Aquesta simplificació facilita la representació territorial i la priorització visual, sense perdre l'accés al detall de les observacions que han originat la classificació.
En aquesta primera campanya no s'ha considerat com a indicador principal la cobertura fotogràfica, ja que encara no tots els mòduls disposen d'evidència gràfica vinculada individualment al seu registre. La incorporació progressiva d'aquest contingut constitueix una línia de millora del sistema de traçabilitat.

RESULTATS

Les campanyes han identificat patologies recurrents en ambdós emplaçaments. Al Port de la Bonaigua es registren, entre altres, oxidació de cables i subjectacables, cables o patins soterrats, malles deteriorades, tubs deformats i incidències en ancoratges. Al Pla de Beret s'observen igualment mancances de subjectacables, malles deteriorades, cables soterrats, tubs deformats, patins doblegats i altres afectacions puntuals.
Els informes mostren que algunes patologies, com l'oxidació, tenen una presència molt generalitzada, mentre que d'altres són menys freqüents però poden tenir una repercussió funcional superior. Aquest fet evidencia que la priorització no pot basar-se exclusivament en la freqüència, sinó que ha d'incorporar la severitat i la funció del component afectat.
L'estructuració de la informació permet filtrar els resultats per zona, tipologia, mòdul, component, patologia o actuació. Això facilita passar de centenars de registres individuals a lectures agregades i generar taules dinàmiques, indicadors i consultes específiques sense reinterpretar manualment l'informe original.
La totalitat de les 110 files incloses en l'àmbit d'estudi han estat inventariades, inspeccionades i georeferenciades. La representació cartogràfica constitueix, per tant, una síntesi espacial de la informació tècnica recollida durant la campanya d'inspecció.
Atès que cada fila està formada per un nombre variable de mòduls, la classificació cromàtica definitiva s'ha d'obtenir a partir de l'agregació de l'estat dels mòduls que la componen. En conseqüència, la cartografia no es planteja com una representació independent, sinó com una visualització dinàmica dels resultats emmagatzemats a la base de dades.
Aquesta integració permet que qualsevol actualització de la informació d'inspecció pugui reflectir-se posteriorment en la classificació i representació cartogràfica dels actius.

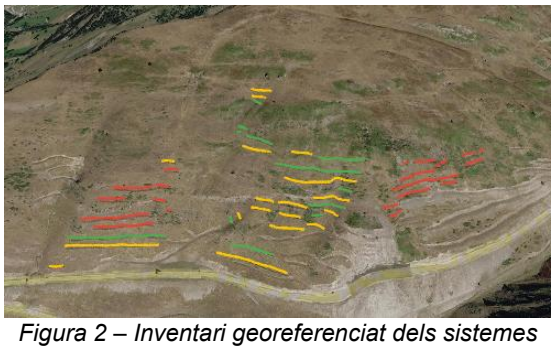


Figura 2 – Inventari georeferenciat dels sistemes inspeccionats i representació sintètica de l'estat dels mòduls zona Pla de Beret. Font: Google Earth

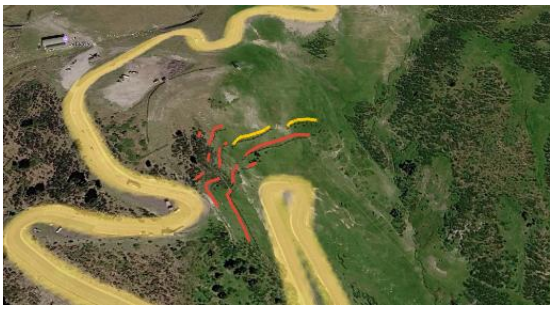


Figura 3 – Inventari georeferenciat dels sistemes inspeccionats i representació sintètica de l'estat dels mòduls zona Refugi de les Ares C-28. Font: Google Earth

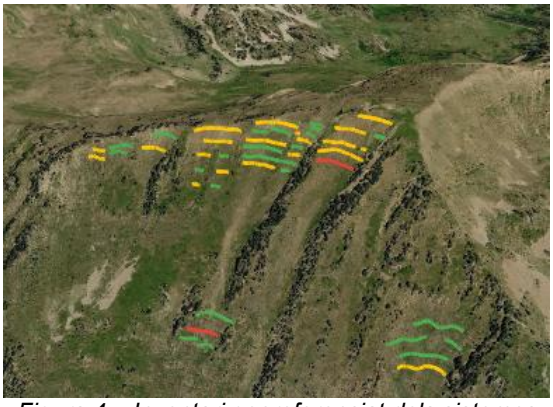


Figura 4 – Inventari georeferenciat dels sistemes inspeccionats i representació sintètica de l'estat dels mòduls zona Pic de Comials. Font: Google Earth

DISCUSSIÓ

La principal aportació de la metodologia no és la substitució del paper per una tauleta electrònica, sinó el canvi en l'arquitectura de la informació. En un model convencional, la inspecció culmina en un informe associat a una data. En el model sistematitzat, l'actiu manté una identitat persistent i acumula inspeccions successives, fotografies, patologies i actuacions.

Aquest enfocament és coherent amb experiències recents en gestió digital d'infraestructures, on la integració de bases de dades d'inventari i inspecció amb eines de visualització i suport a la decisió permet evolucionar des de registres estàtics cap a entorns de gestió orientats al manteniment programat. En particular, s'ha documentat l'ús combinat de dades d'inspecció, models digitals i eines de Business Intelligence en la gestió d'infraestructures viàries (Spallarossa i Pasqualato, 2024), així com el valor de repositoris integrats de dades per donar suport a l'operació i el manteniment (Liu et al., 2024).

Aquesta estructura permet que una futura campanya no parteixi de zero. El tècnic pot recuperar l'estat anterior del mateix element i determinar si una incidència és nova, es manté estable, ha evolucionat o ha estat reparada. La primera campanya constitueix així un estat inicial T0; una segona inspecció T1 permetrà començar a analitzar l'evolució temporal.

La metodologia presenta limitacions. La qualitat del sistema depèn de la qualitat de la dada introduïda i de l'homogeneïtat dels criteris entre inspectors. Les diferents tipologies i generacions de barreres dificulten una fitxa universal, i determinats components poden quedar ocults o soterrats. El dron aporta una visió complementària, però no substitueix la inspecció de proximitat quan cal verificar unions, cables o ancoratges.

CONCLUSIONS

La prova pilot evidencia la viabilitat de sistematitzar la inspecció dels sistemes de contenció del mantell nival mitjançant un model de dades estructurat i eines digitals de captura, georeferenciació, emmagatzematge i explotació. La identificació individualitzada dels actius i components millora la traçabilitat i permet associar-hi patologies, fotografies i actuacions.

La informació estructurada pot ser explotada mitjançant taules dinàmiques, indicadors, quadres de comandament i representacions cartogràfiques. Això facilita la identificació de patrons i crea una base per evolucionar des d'un manteniment reactiu cap a un manteniment planificat segons l'estat dels actius.

Amb una única campanya no es pot demostrar encara una reducció de fallades ni un allargament de la vida útil. El potencial més rellevant del sistema haurà de validar-se mitjançant inspeccions successives que permetin comparar els mateixos elements en el temps i establir criteris objectius de periodicitat i priorització.

REFERÈNCIES

SOLUTIOMA, 2024. Inspecció de les barreres antiallaus situades al Port de la Bonaigua. Unitat de Carreteres de la Generalitat de Catalunya a Lleida.

SOLUTIOMA, 2024. Inspecció de les barreres antiallaus situades al Pla de Beret. Unitat de Carreteres de la Generalitat de Catalunya a Lleida.

CALDERA, S.; MOSTAFA, S.; DESHA, C.; MOHAMED, S., 2021. Exploring the Role of Digital Infrastructure Asset Management Tools for Resilient Linear Infrastructure Outcomes in Cities and Towns: A Systematic Literature Review. Sustainability, 13(21), 11965. DOI: 10.3390/su132111965.

LIU, L.; ZENG, N.; LIU, Y.; HAN, D.; KÖNIG, M., 2024. Multi-domain data integration and management for enhancing service-oriented digital twin for infrastructure operation and maintenance. Developments in the Built Environment, 18, 100475. DOI: 10.1016/j.dibe.2024.100475.

SPALLAROSSA, E.; PASQUALATO, G., 2024. Digital Twin and Asset Management for Italian highways decision support towards scheduled maintenance, repair and rehab. Procedia Structural Integrity, 62, 241–249. DOI: 10.1016/j.prostr.2024.09.039.

INDICADORS ANUALS DEL PERILL D'ALLAUS I EVOLUCIÓ TEMPORAL AL PIRINEU DE CATALUNYA

Carles García-Sellés [(1)]; Glòria Martí i Domènech [(1)]; Santiago Manguán Esteban [(1)]; Jordi Pons Otálora [(1)] i Francesc Vilar i Bonet [(1)]

(1) Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. Parc de Montjuïc, SN, Barcelona 08038. allaus@icgc.cat

PARAULES CLAUS: índex de perill d'allaus, activitat d'allaus, evolució temporal, Pirineu de Catalunya.

RESUM

Finalitzada una temporada de predicció d'allaus es troba a faltar un indicador robust que valori el perill d'allaus, com els índexs climàtics de temperatura, precipitació i neu, que permeten valorar un hivern i la tendència del clima. Aquest article planteja diversos índexs per puntuar una temporada, avaluar l'evolució del perill en el temps i ser comparable entre regions d'Europa.

El principal problema és que en la seva majoria no són registres instrumentals que permetin una obtenció estrictament objectiva. Dels possibles indicadors explorats, el més evident és el grau de perill d'allaus. No obstant, es detecta una manca d'harmonització entre centres de predicció i una càrrega alta de subjectivitat, internament, entre els propis predictors. Al llarg del temps, *l'European Avalanche Warning Services* (EAWS) treballa per establir una única metodologia d'obtenció del grau de perill diari a partir de criteris científics i implementats per tots els centres de predicció, però aquests han evolucionat en el temps, des de la matriu bavaresa a la recent matriu basada en el *Avalanche Hazard Conceptual Model*. Altrament, la determinació de la sensibilitat del mantell a desprendre's també ha variat en el temps, sobretot a partir de la introducció dels tests d'estabilitat amb mesura de la capacitat de propagació de la fractura (ECT, PST), amb una probable assignació de menor inestabilitat a partir del seu ús.

L'activitat d'allaus és un altre indicador fonamental, però també està subjecte a inhomogeneïtats, bàsicament per l'augment de la dimensió de les xarxes d'observació amb el pas del temps, i per una component d'apreciació subjectiva per part de l'observador en la determinació de les mides, amb un probable biaix d'augment de l'activitat d'allaus amb el pas del temps, però de menors dimensions. Altres paràmetres a valorar són l'accidentalitat, els problemes d'allaus o valors extrems de nevades correlacionats amb l'activitat de grans allaus (neu recent en 24/72 h, gruix màxim anual). Malgrat ser considerats majoritàriament *proxy* data, explorem la seva validesa i possible combinació estadística per oferir un valoració del perill d'allaus per temporades en els darrers 30 anys en el Pirineu de Catalunya.

INTRODUCCIÓ

La definició i càlcul d'indicadors climàtics per seguir el senyal i les tendències del clima ja va ser l'objectiu del projecte CLIMPY (2016–2019) de l'OPCC. A més de crear una base de dades de temperatura, precipitació i neu al Pirineu, l'ICGC va assumir el compromís de proposar i actualitzar anualment indicadors del perill d'allaus, com a risc natural vinculat al clima, amb la finalitat de reduir la vulnerabilitat als impactes del canvi climàtic. Per descriure el comportament del perill d'allaus i la seva evolució temporal, aquest article proposa indicadors hivernals: grau mig de perill, dies amb perill FORT i MOLT FORT, nombre d'allaus (totals i grans), nevades màximes en 24 h i 72 h, gruix màxim de neu i accidents.

La recerca sobre l'evolució futura del perill d'allaus indica una disminució de l'activitat a cotes baixes per l'augment de precipitació líquida, i un possible increment de nevades extremes a cotes altes, amb un augment d'allaus de neu humida (Martin et al. 2021; Eckert et al. 2024). Tanmateix, s'ha estudiat menys l'evolució real de l'activitat en les darreres dècades, sovint per manca de sèries homogènies. Als Alps, els treballs clàssics mostren estabilitat en les grans allaus entre 1950–2000, però amb menys episodis de neu seca i més de neu humida (Laternser i Scheneebeli, 2002). Als Pirineus, diversos estudis indiquen un augment de grans allaus entre 1970–2010 i més cicles de neu humida (Muntán et al., 2009; García-Sellés et al., 2010; Oller et al. 2015). Al Pirineu central també s'ha detectat un increment d'allaus petites (Franco-Ramos et al. 2026), i en serralades asiàtiques un augment recent de grans allaus.

PERILL D'ALLAUS DIARI

El grau de perill d'allaus diari (GPD) és el perill d'allaus pronosticat. És l'indicador que millor

integra les condicions del mantell favorables a l'activitat d'allaus.

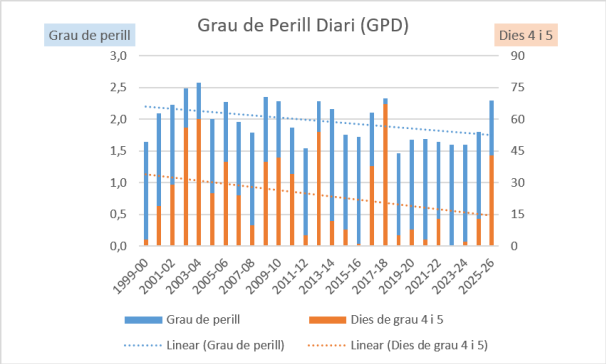


Figura 1 – Evolució anual del GPD mig (blau) i nombre de dies amb GPD 4 i 5 (taronja).

El GPD s'obté a partir de l'avaluació regional que fa un predictor dels nivells d'estabilitat del mantell, de la seva distribució i de la mida de l'allau que se n'espera (Müller et al., 2025). No és un registre instrumental; per tant, és una aproximació a la realitat però basada en el mètode científic; els biaixos existents per diferent nivell d'experiència de la persona i context nivo-climàtic de la regió tendeixen a reduir-se pels esforços en l'harmonització operativa entre tots els centres de predicció, missió de *l'European Avalanche Warning Services* (www.avalanches.org).

Per al període 1999-2000 a 2025-2026, el GPD mig anual s'ha obtingut a partir del valor de GPD de les 7 regions de predicció d'allaus del Pirineu de Catalunya (mostra N=27, mitjana X=2, dispersió S=0,3). El nombre de dies de GPD igual o superior a FORT (4) és la suma anual de tots els casos en què en una regió es prediu aquest valor (N=26, X=24. S=21). L'evolució temporal dels dos indicadors és a la baixa (Figura 1). Cal destacar que l'indicador "Dies de GPD 4 i 5" matisa el grau mig de la temporada, indicant si hi ha hagut situacions d'extrema inestabilitat.

ALLAUS OBSERVADES

L'indicador "Nombre d'allaus cartografiades" són les allaus de mida 2 i superior de les que es té coneixement i consten a la Base de Dades d'Allaus de Catalunya (BDAC) de l'ICGC. És una dada observacional, però subjecta a inhomogeneïtats per variacions històriques en la xarxa d'observació. No obstant, des de la temporada 1995-96, en què s'introdueix el seguiment de l'activitat d'allaus des d'helicòpter en casos de gran activitat, no hi ha hagut grans canvis en la densitat de la xarxa d'observació nivometeorològica i d'allaus (NIVOBS) de l'ICGC. Amb tot, és probable un increment de la recepció d'informació per l'aparició de les xarxes socials. Per al període 1995-1996 a 2025-2026, el nombre d'allaus cartografiades ha augmentat (N=31, X=237, S=119). S'ha filtrat el nombre d'allaus de mida 3 i superior per veure la freqüència de les allaus grans, molt grans i extremadament grans; la mostra és molt curta donat que l'escala de mides d'allaus s'ha implantat recentment. No obstant, cal definir un criteri aplicable a tota la sèrie per classificar la mida de les allaus. Un criteri que s'ha utilitzat en diverses investigacions és la definició de Schaerer (1986) per allau major com aquella que, entre d'altres característiques, supera els 1000 m de recorregut.

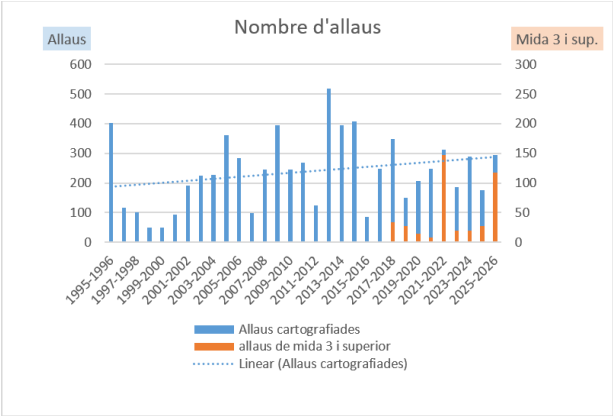


Figura 2 – Evolució anual del nombre d'allaus cartografiades (blau) i nombre d'allaus de mida 3 i superior (taronja), amb dades només des de 2017-18.

Els indicadors "Nombre d'allaus cartografiades" i "Nombre d'allaus de mida gran i superior" mostren una evolució temporal creixent que és coherent amb els estudis previs publicats per l'ICGC.

NEVADES MÀXIMES

En l'ocurrència de grans allaus un dels factors determinants és la quantitat de neu acumulada. La determinació de la profunditat de fractura és un dels paràmetres necessaris per a la simulació de grans allaus (Stoffel et al., 2024).

Per aquesta raó proposem el càlcul dels indicadors anuals "Nevada màxima en 24h", "Nevada màxima en 72h" i "Gruix màxim de neu a terra". S'ha calculat un valor regional anual per a tot el Pirineu resultat de la mitjana de les precipitacions màximes en 24h, en 72h així com de la mitjana del gruix màxim de neu a terra de 4 estacions nivometeorològiques representatives del conjunt del Pirineu. Són les estacions de Vall de Núria (Ter-Freser), Malniu (Perafita-Puigpedrós), Boí (Ribagorçana-Vallfosca) i Bonaigua (Aran-Franja Nord de la Pallaresa). Aglutinen diferents cotes (2000 m a 2500 m) i

orientacions i són representatives dels diferents nivoclimes del Pirineu.

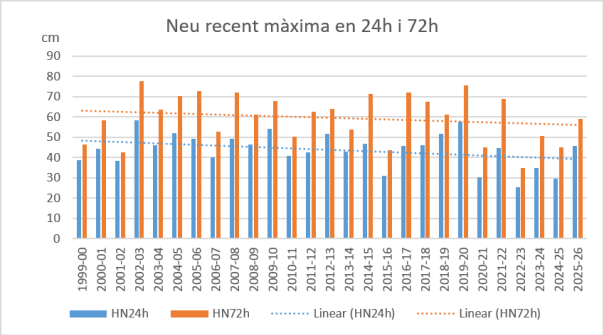


Figura 3 – Evolució anual de la nevada màxima en 24 h (blau) i en 72 h (taronja).

Per al període 1999-2000 a 2025-2026, tant el gruix màxim de la nevada en 24 h (N=27, X=44, S=8) com el màxim acumulat en 72 h (N=27, X=60, S=12), mostren una evolució decreixent, especialment la nevada màxima en 24 h. Cal destacar que durant bona part del període de 27 anys no hi ha variacions destacables en l'evolució i és a partir de 2020-21 que hi ha una clara davallada de tots dos indicadors (puntualment el 2025-26 mostra una recuperació fins a valors normals).

L'indicador anual "Gruix màxim de neu a terra" (N=27, X=140, S=42) també mostra una davallada al llarg dels anys, tot i que hi ha un període de valors alts entre 2012-2013 i 2019-2020.

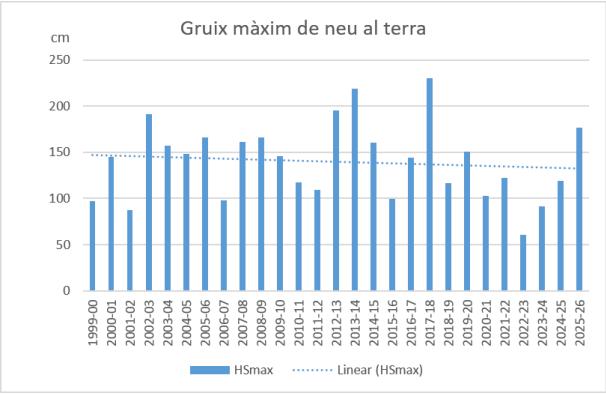


Figura 4 – Evolució anual del gruix màxim de neu al terra.

Dels indicadors exposats, és aquest el que mostra una major correlació amb el GPD (R=0,66), a banda lògicament del "Nombre de dies amb GPD igual o superior a 4", ja que són fortament dependents entre sí.

ACCIDENTS

L'indicador "Accidents per allaus" no es desprèn exclusivament del medi físic com tots els exposats fins ara, sinó que té una component vinculada al risc, la vulnerabilitat i exposició de les persones al perill d'allaus. L'evolució d'aquest indicador és essencialment conductual i les seves variacions van lligades principalment a causes com l'educació, la tecnologia i la presa de decisions.

D'altra banda, la sèrie de nombre d'accidents enregistrats és força inhomogènia, ja que les fonts d'informació han crescut amb el pas del temps, especialment a partir de l'ús de les xarxes socials.

Donat que un accident per allau requereix d'un nivell d'inestabilitat del mantell, s'ha volgut incloure aquest indicador i examinar quina és la seva evolució durant les darreres dècades. El període analitzat és de 1999-2000 a 2025-26 (N=27, X=9, S=5). És l'únic indicador que mostra un augment de la freqüència en aquestes darreres dècades.

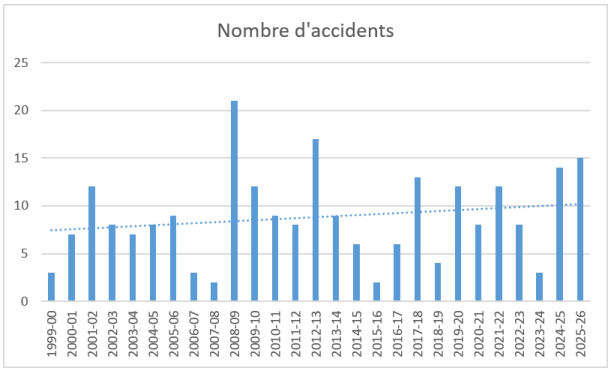


Figura 5 – Evolució del nombre d'accidents.

ÍNDEX INTEGRAL DE PERILLOSITAT

A la Figura 6 proposem un índex integral de la perillositat anual d'allaus.

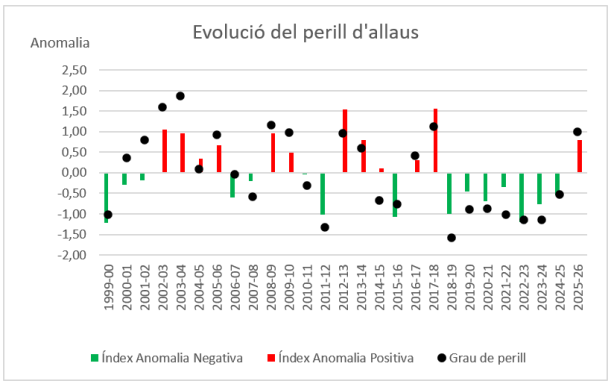


Figura 6 – Evolució de les anomalies de l'índex integral del perill d'allaus (barres) comparat amb el grau de perill (punts negres).

S'obté a partir dels indicadors "Grau de perill diari, GPD", "Dies de GPD 4 i 5", "Nombre d'allaus cartografiades" i "Gruix màxim de neu al terra", per

una caracterització més completa de la perillositat d'una temporada. L'índex integral es presenta com una mitjana dels indicadors estandarditzats, per tal d'observar les anomalies anuals.

DISCUSSIÓ I CONCLUSIONS

S'han presentat diversos indicadors del comportament del perill d'allaus per tal de valorar cada temporada i permetre detectar variacions en el temps i entre regions, sia a escala de sectors, sia a escala de grans serralades. Els indicadors "Grau de perill diari, GPD" i "Dies de GPD 4 i 5" estan estretament relacionats, però el segon permet conèixer si dues temporades amb un grau de perill molt similar ha estat per l'ocurrència de llargs períodes de perill baix interromputs per la presència de força dies de perill molt elevat (temporada amb alta variabilitat com la 2017-18), o bé ha estat més uniforme per l'alta freqüència de dies amb perill MARCAT (3) i pocs dies de perill molt elevat (temporada amb menor irregularitat, com la 2013-14).

Els indicadors sobre l'activitat d'allaus probablement no permeten la comparativa entre diferents serralades (a diferència del GPD), donat que cada centre de predicció pot tenir una xarxa d'observació de diversa densitat, però sí que permet l'anàlisi temporal en una determinada serralada.

Els indicadors sobre la intensitat de les nevades (24h i 72h) mostren un factor de correlació baix amb el grau de perill anual (R=0,4 i 0,3 respectivament), mentre que el gruix màxim de neu al terra és l'indicador que hi mostra una millor correlació (R=0,7). El gruix màxim de neu a terra indica una baixa o alta freqüència d'episodis de nevades, els quals van associats a un augment del grau de perill. Per contra, un valor elevat de nevada màxima en 24h i 72h explica només el perill d'un episodi singular i pot amagar l'ocurrència de freqüents episodis de quantitats relativament menors, però igualment d'alta perillositat. Per tant, com a treball futur proposem de major interès un indicador relacionat amb un llindar d'excedència, com pot ser el nombre de dies que se superen els 30 o 40 cm de neu recent en 24 h i algun altre valor a determinar en 72 h.

L'indicador de l'accidentalitat informa del risc derivat del perill d'allaus, i es basa en la gestió del factor humà. De fet, la tendència en l'evolució del grau de perill va en descens, mentre que l'evolució de l'accidentalitat va en augment. És significatiu que el grau de perill anual (GPD) està per sota de la mitjana (2,0) des de 2018-19, (excepte el recent 2025-26), mentre que l'accidentalitat està per sobre de la mitjana (8,8) durant gairebé la totalitat de la dècada del 2020.

Com a conclusió, l'índex integral proposat conté informació agregada de diferents variables explicatives de la perillositat d'allaus, i dona una idea més completa de la perillositat d'una temporada

REFERÈNCIES

ECKERT, N., CORONA, C., GIACONA, F., GAUME, J., MAYER, S., VAN HERWIJNEN, A., HAGEMULLER, P., and STOFFEL, M. 2024. Climate change impacts on snow avalanche activity and related risks, In Nat. Rev. Earth Environ., 5, pp. 369–389. https://doi.org/10.1038/s43017-024-00540-2, 2024.

FRANCO-RAMOS, O., BOYANO-GALIANO, J., MUÑOZ-TORRERO MANCHADO, A., LÓPEZ-MORENO, J.I., BALLESTEROS-CÁNOVAS, J.A. 2026. Climate snow-avalanche linkage revealed by geomorphological, historical and tree-ring records in the central Spanish Pyrenees, In Cold Regions Science and Technology, Volume 244, article 104819. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2026.104819.

GARCÍA-SELLÉS, C., PEÑA, J.C.. MARTÍ, G., OLLER, P., MARTÍNEZ, P. 2010. WeMOI and NAOi influence on major avalanche activity in the Eastern Pyrenees. Cold Reg. Sci. Technol., 64, 137–145.

LATERNSER, M., SCHNEEBELI, M. 2002. Temporal trend and spatial distribution of avalanche activity during the last 50 years in Switzerland. In Natural Hazards. 27. pp 201-230.

MARTIN, E., GIRAUD, G., LEJEUNE, Y., BOUDART, G. 2021. Impact of a climate change on avalanche hazard, Ann. Glaciol., 32, pp. 163–167, https://doi.org/10.3189/172756401781819292, 2001.

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, in: International Snow Science Workshop Proceedings, Bend, Oregon, pp. 540–546, http://arc.lib.montana.edu/snow-science/ item/2930.

MUNTÁN, E., GARCÍA, C., OLLER, P., MARTÍ, G., GARCÍA. A., GUTIÉRREZ, M. 2009. Reconstructing snow avalanches in the Southeastern Pyrenees. In Natural hazards and earth system sciences. 9. 1599–1612. 10.5194/nhess-9-1599-2009.

OLLER, P., MUNTÁN, E., GARCÍA-SELLÉS, C., FURDADA, G., BAEZA, C., ANGULO, C. 2015. Characterizing major avalanche episodes in space and time in the twentieth and early twenty-first centuries in the Catalan Pyrenees. Cold Reg. Sci. Technol., 110, 129–148.

SCHAERER, P., 1986. Weather patterns for major avalanches. The Avalanche Review, vol. 4, nº 3: pp. 2.

STOFFEL, L., BARTELT, P., & MARGRETH, S. 2024. Scenario-Based Avalanche Simulations Including Snow Entrainment, Snow Temperature and Density. Proceedings of the International Snow Science Workshop (ISSW 2024), Tromsø, Noruega, pp. 374–380.

IMPLEMENTACIÓ D'UN SISTEMA OBJECTIU PER A LA GESTIÓ DEL RISC D'ALLAUS EN ZONES VULNERABLES DE LA VAL D'ARAN

Jordi Gavaldà[1]; Montse Bacardit[1]; Sara Orgué[1]; Pere Oller[2], Laura Trabal[2], Daniel Xifre[2]

(1) Centre de Lauegi, Conselh Generau d'Aran (CLA). lauegi@aran.org
(2) GeoNeu Risk (GNR) . pere.oller@geoneurisk.com

RESUM

Entre les atribucions del Centre de Lauegi del Conselh Generau d'Aran (CLA) hi ha el seguiment de la possible afectació d'allaus a zones vulnerables, informació que es transmet al Servei d'Emergéncies e Proteccion Civiu d'Aran. Fins ara, les situacions de risc elevat amb afectació potencial a carreteres i zones urbanes, fora dels casos habituals, es gestionaven principalment mitjançant la predicció regional (nivells de perill 4 i 5) i una avaluació subjectiva basada en el criteri d'expert de l'equip de tècnics. Trenta anys de recollida de dades d'allaus majors i d'informació històrica, juntament amb el monitoratge del mantell nival i els avenços tecnològics, han permès millorar la predicció del risc en aquests escenaris majors. El CLA ha seleccionat 23 indrets exposats a risc d'allaus —habitatges, vies de comunicació i altres infraestructures— i, per a cadascun, ha identificat les zones d'allaus que els poden afectar. A partir de l'anàlisi del terreny, l'estat de la vegetació, les condicions nivo-meteorològiques de l'activitat d'allaus d'episodis històrics, s'han reconstruït els escenaris d'allau amb els programaris RAMMS::Avalanche i RAMMS::Extended (RAMMS AG), simulant condicions de neu seca, neu humida i lliscaments basals, i obtenint l'abast, la velocitat, l'alçada de flux i la pressió dinàmica de cada escenari. Els escenaris nivo-meteorològics s'han definit a partir de les dades de les estacions nivometeorològiques automàtiques de Bonaigua i Sasseuva del Servei Meteorològic de Catalunya. Per facilitar-ne la gestió s'ha desenvolupat un programari que, a partir de les condicions nivo-meteorològiques previstes, identifica escenaris de risc i en representa una primera avaluació objectiva, esdevenint una millora significativa respecte la presa de decisions fonamentada amb la memòria i la intuïció. Atesa la baixa freqüència d'aquests escenaris, caldrà verificar els escenaris d'allaus quan aquests es tornin a produir i continuar alimentant el sistema amb noves dades per millorar-ne la capacitat predictiva, aprofitant el progrés de la modelització del mantell nival i de la dinàmica d'allaus, així com el desenvolupament de la intel·ligència artificial.

PARAULES CLAU: risc d'allaus, allaus majors, modelització dinàmica d'allaus, zones vulnerables d'Allaus, gestió d'emergències, Val d'Aran

1. INTRODUCCIÓ

La Val d'Aran, situada al vessant nord dels Pirineus centrals, té un clima d'influència atlàntica que li confereix un clima marcadament oceànic, a diferencia de la resta de Catalunya (Figura 1). El règim nivometeorològic, combinat amb una orografia abrupta, genera episodis periòdics d'allaus que, en els casos més severs, afecten carreteres, nuclis urbans i altres infraestructures.

El CLA, elabora actualment una predicció regional per al conjunt de la Val d'Aran —expressada en els nivells de perill de l'escala EAWS— i una predicció específica per a les carreteres de la C-28 al seu pas pel Port de la Bonaigua i la C-142b d'accés al Plan de Beret. A més, fa un seguiment del risc d'allaus per altres zones vulnerables que actualment es basa en el criteri d'expert construït amb la memòria i la intuïció de més de 20 anys d'experiència.

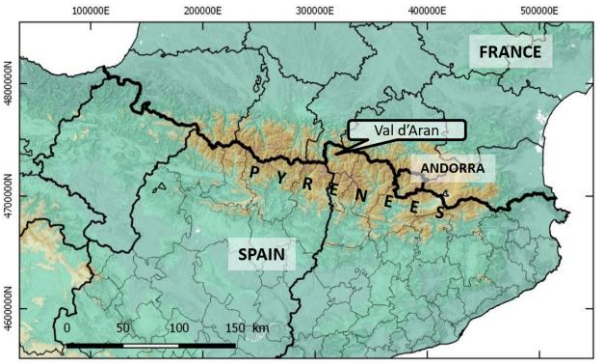


Figura 1 – Mapa de situació de la Val d'Aran.

El canvi climàtic modifica el règim nival de les zones d'alta muntanya, tant dels Alps (Mayer et al., 2024) com dels Pirineus i en modifica la, la freqüència i la magnitud dels episodis d'allaus majors. Aquest fet obligarà a gestionar nous escenaris de risc en els propers anys. Alhora, els avenços en la modelització dinàmica d'allaus, el processament de dades nivometeorològiques i les noves eines d'intel·ligència artificial han de permetre abordar aquesta predicció amb més seguretat.

La gestió del risc d'allaus a l'Aran s'inclou dins de les competències de Protecció Civil del Conselh Generau d'Aran (CGA) i està emmarcada en el Pla ALLAUCAT. En aquest context, el CLA ha desenvolupat una eina d'avaluació objectiva del risc d'allaus a un conjunt seleccionat de zones vulnerables, complementària a la predicció regional existent.

El principal objectiu del treball és disposar de forma operativa d'una eina que aproximi de manera objectiva el nivell de risc de cadascuna de les zones vulnerables seleccionades i que aporti als predictors d'allaus una idea clara i ràpida de la situació.

2. DADES

Per al present estudi no s'ha treballat amb la totalitat d'allaus que afecten a zones vulnerables a l'Aran, sinó que s'han seleccionat 23 zones amb elements exposats que s'han considerat més importants tenint en compte l'element vulnerable afectat i la seva freqüència (Figura 2). No s'han considerat les zones d'allaus que afecten les carreteres de la Bonaigua i d'accés al Plan de Beret on ja es fa la predicció específica.

Les zones d'allaus seleccionades tenen característiques molt diferents tant des del punt de vista geogràfic com de dinàmica d'allaus. Les zones de sortida se situen entre els 2750 m i els 1600 m i les zones d'arribada entre els 2150 m i els 700 m d'altitud. L'orientació també és molt variable, predominant les zones orientades al segon (E-S) i tercer (S-W) quadrant amb 10 i 6 zones respectivament mentre que les orientades al primer quadrant (N-E) només en són 2.

A l'Aran es disposa d'una extensa base de dades d'observacions (CLA i Geoíndex d'Allaus de l'ICGC) que inclou observacions de camp dels darrers 30 anys i referències històriques des del 1444.

Aquesta informació ha permès contrastar la reconstrucció dels escenaris majors amb episodis reals. Els períodes de retorn de les allaus modelitzades tenen una gran variabilitat que va des d'afectacions anuals com les zones que afecten a la Val de Varradòs (VAR274 i VAR277) i Val deth Joeu (JOE004 i JOE005) (Figura 3), fins a episodis amb períodes de retorn superiors als 100 anys (GAR050), que afecta a la població de Bossòst.

Per a cada una de les zones, a partir de les dades històriques i criteris geogràfics, s'ha determinat quines tipologies d'allaus són les més comunes. S'han considerat allaus de neu seca, allaus de neu humida i lliscaments basals.

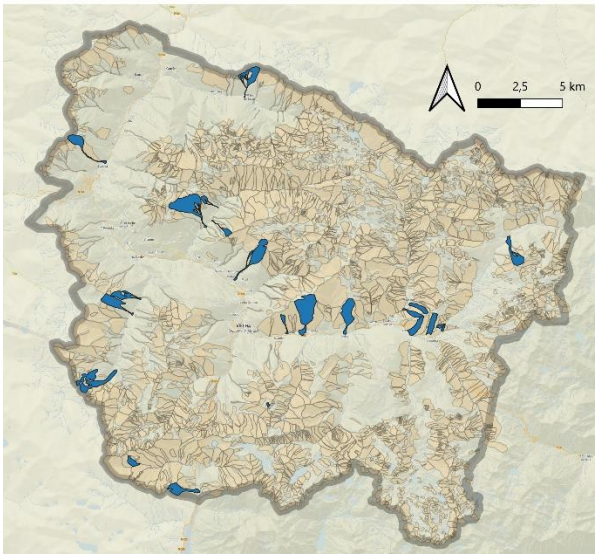


Figura 2 – Mapa d'allaus de la Val d'Aran (en carbassa clar) i les zones d'allaus seleccionades amb elements vulnerables (en blau).

En la reconstrucció dels escenaris nivometeorològics i per obtenir els períodes de retorn, s'han utilitzat les dades de les estacions automàtiques de Bonaigua i Sasseuva del Servei Meteorològic de Catalunya, i cada zona d'allaus s'ha modelitzat aplicant les dades nivològiques de l'estació més representativa.

Per cada zona d'allaus, a partir de la informació cartogràfica observacional o, en la seva absència, a partir de l'anàlisi del terreny, s'han delimitat les zones de sortida probables associades als escenaris observats o possibles. Pel què fa al gruix de neu mobilitzable (d_0) s'ha obtingut a partir dels gruixos mesurats acumulats en 72 h (DH3dd; Bartelt et al., 2026) a les estacions de referència, corresponents als dies previs als esdeveniments observats. En cas de no disposar-se d'aquesta informació, s'han assignat els valors teòrics segons el període de retorn estimat de l'allau a simular.



Figura 3. Dipòsit de l'allau JOE004 que bloqueja la carretera al gener de 2022.

Les zones d'allaus s'han modelitzat amb els programaris RAMMS::Avalanche i RAMMS::Extended (RAMMS AG), que permeten simular escenaris de neu seca, neu humida i lliscaments basals (Figura 4). Per a cada simulació s'ha obtingut l'abast, la velocitat, l'alçada de flux i la pressió dinàmica màxima, tant del nucli dens (model reològic de Voellmy) com, si escau, del núvol de pols. Les simulacions s'han realitzat a partir de retro anàlisi de la informació cartogràfica observacional disponible per cada zona d'allaus, en cas de disposar de suficient informació, o d'escenaris teòrics en cas de no disposar-ne.

A partir d'aquests resultats s'han establert, per a cada zona vulnerable, els llindars de gruix de neu acumulada en 3 dies (DH3dd) a partir dels quals l'allau simulada arriba a afectar a l'element vulnerable. Aquests llindars corresponen a diferents períodes de retorn.

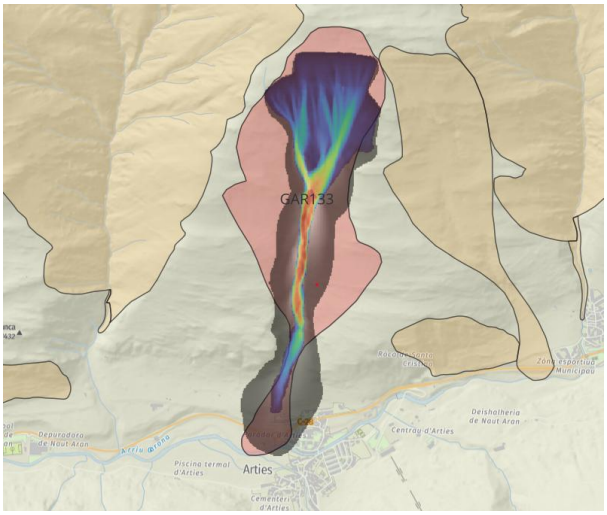


Figura 4 – Detall d'una zona vulnerable (GAR133, Arties) amb l'envolvent de la zona d'allau i el resultat de la simulació RAMMS::Extended.

3. EINA D'APROXIMACIÓ AL RISC

Per a facilitar la gestió, s'ha desenvolupat un visor que permet comparar les dades de gruix de neu interpretat a partir de la precipitació prevista amb els llindars obtinguts. Els paràmetres utilitzats són el gruix de neu previst acumulat en 72 hores (DH3dd) a 2.000 m, el gruix de neu mobilitzable (d_0), la temperatura màxima i mínima prevista a 1.500 m, i la direcció i la velocitat mitjana del vent. En una primera fase, aquestes dades s'obtenen manualment a partir dels models meteorològics locals i regionals disponibles.

Per al càlcul del gruix de neu mobilitzable (d_0), perpendicular al vessant, en cada zona de sortida, s'aplica una correcció de gradient altitudinal (+/- 0,05 m de gruix de neu per cada 100 m de desnivell), un factor reductor d'assentament (15% per a 3 dies) i una correcció de l'efecte del vent que pot arribar fins a un increment de 50 cm en condicions molt favorables d'acumulació (criteri d'expert). Al gruix obtingut se li aplica un factor reductor en funció del pendent del vessant a la zona de sortida de l'allau (Salm et al., 1990; Bartelt et al., 2026).

El valor de neu mobilitzable (d_0) resultant a la cota de sortida de cada zona vulnerable es compara amb el llindar establert per a aquella zona i s'assigna un nivell de risc segons el percentatge assolit respecte del valor de referència: inferior al 50 % (verd clar), entre el 50 % i el 75 % (verd fort), entre el 75 % i el 100 % (carbassa) i superior al 100 % (vermell). Les zones vulnerables sense dades suficients es representen en gris (Figura 5).

Els resultats es representen en un visor interactiu instal·lat sobre la mateixa plataforma operativa que s'utilitza per a la predicció regional. En la visualització, es poden sobreposar les modelitzacions prèviament processades (pressió màxima del nucli dens i pressió màxima del núvol de pols en cas que es desenvolupi) amb la informació dels paràmetres bàsics definits (tipus d'allau modelitzat, període de retorn, gruix de neu i temperatura de la neu).

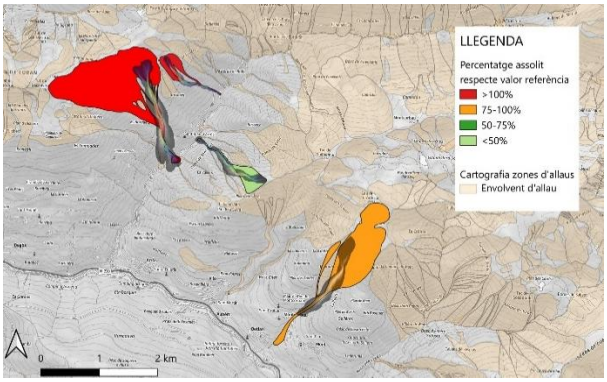


Figura 5 – Exemple de la visualització d'un sector de l'Aran amb el resultat d'una consulta específica on s'observen diferents graus de probabilitat d'afectació de les allaus sobre les zones en risc.

Aquest visor es posarà en marxa durant la temporada d'hivern 2026-27.

4. DESENVOLUPAMENTS FUTURS

Es preveu millorar l'eina en dues direccions principals. D'una banda, la connexió automàtica amb els models meteorològics públics (ECMWF, entre d'altres) ha de permetre substituir l'entrada manual de dades per una alimentació directa i contínua del sistema. D'altra banda, la connexió amb les sortides del model d'evolució del mantell nival SNOWPACK, i en particular amb l'indicador AvDays, ha d'aportar informació sobre l'estabilitat del mantell més enllà del gruix de neu acumulat, en

la línia dels treballs recents sobre l'ús de models explicables en la predicció del perill d'allaus (Pérez-Guillén et al., 2025).

Atesa la baixa freqüència dels escenaris de risc elevat en algunes zones, caldrà continuar alimentant el sistema amb noves dades d'observació per millorar-ne progressivament la capacitat predictiva, aprofitant tant el progrés de les eines de modelització del mantell nival i de la dinàmica d'allaus com el desenvolupament accelerat de la intel·ligència artificial aplicada a la predicció del perill.

5. CONCLUSIONS

La nova eina ha de permetre fer un seguiment continuat, durant l'hivern, del risc d'allaus a les zones vulnerables de l'Aran, establint llindars d'alerta que ajuden de forma objectiva i sistemàtica les tasques de seguiment i control del risc a l'equip tècnic de predicció d'allaus. Alhora, ha de servir com a eina de comunicació amb els responsables de Protecció Civil en el marc del Pla ALLAUCAT, aportant una primera avaluació objectiva del risc en escenaris d'allaus majors, complementària a la predicció regional existent.

AGRAÏMENTS

S'agraeix tant als tècnics de GeoNeuRisk com als de Maladeta Studio la seva implicació i bona disposició en el desenvolupament del projecte.

REFERÈNCIES

ICGC. Geoindex Allaus. https://www.icgc.cat/ca/Eines-i-visors/Visors/Visualitzadors-Geoindex/Geoindex-Allaus

BARTELT, P., STOFFEL, L., CHRISTEN, M., 2026. Parameter recommendations for avalanche dynamics calculations with RAMMS::Extended. Version 3.0.12. SLF&RAMMS AG.

MAYER, S., HENDRICK, M., MICHEL, A., RICHTER, B., SCHWEIZER, J., WERNLI, H., VAN HERWIJNEN, A., 2024. Impact of climate change on snow avalanche activity in the Swiss Alps. The Cryosphere, 18, 5495-5517. https://tc.copernicus.org/articles/18/5495/2024/

PÉREZ-GUILLÉN, C., TECHEL, F., VOLPI, M., VAN HERWIJNEN, A., 2025. Assessing the performance and explainability of an avalanche danger forecast model. Natural Hazards and Earth System Sciences, 25, 1331-1351.
https://nhess.copernicus.org/articles/25/1331/2025/

SALM, B., BURKARD, A., & GUBLER, H. (1990). Berechnung von Fliesslawinen: eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen (Mitteilungen des Eidgenössischen Instituts für Schnee- und Lawinenforschung, No. 47). Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF).

AVALARMS, UN SISTEMA AUTOMÀTIC D'AVÍS DE PERILL D'ALLAUS EN ACCESSOS A INSTAL·LACIONS HIDROELÈCTRIQUES

Francesc Grau i Fernàndez [1]; Pere Oller i Figueras [2]

(1) Endesa Generación, SA. Carretera de Cardós s/n 25595 Llavorsí. francesc.grau@enel.com
(2) GeoNeu Risk. Av. Mare de Déu de Montserrat, 20 08024 Barcelona. geoneurisk@geoneurisk.com

PARAULES CLAU: sistema automàtic d'avís, risc d'allaus, accés instal·lacions hidroelèctriques, Pirineus.

RESUM

Endesa té carreteres i pistes d'accés a instal·lacions en zones de muntanya susceptibles de ser afectades per allaus. Algunes d'aquestes allaus han afectat els accessos en els darrers anys, i d'altres consten a la cartografia d'allaus de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC).

Amb l'objectiu de millorar la seguretat de les instal·lacions, ja fa tres temporades que es va posar en funcionament Av**alarm**s (**Avala**nche **R**isk **M**anagement **S**ystem), un sistema automatitzat d'avís als usuaris dels accessos. L'eina incorpora diàriament la informació regional del perill d'allaus de les APIs de l'ICGC i del Centre de Lauegi d'Aran.

En funció de la distribució del perill d'allaus, Avalarms avalua quines zones de sortida podrien donar lloc a allaus en cada moment. A partir de la mida, i d'acord amb una simulació feta per a cadascuna de les allaus, es determina si tenen capacitat d'arribar als accessos. Segons la quantitat d'allaus que en cada moment poden atènyer els accessos, de la seva mida i del nivell de perill, s'estableix un protocol d'accés, que va des de l'accés lliure fins a la prohibició, passant per diferents nivells d'alerta, que suposen diferents nivells de restricció.

Els usuaris dels accessos reben missatges automatitzats informant-los de les restriccions vigents.

Per als dos accessos més utilitzats durant la temporada hivernal, es preveu la instal·lació d'estacions nivometeorològiques que permetin afinar la predicció, en particular pel que fa la mida de les allaus esperables.

ANTECEDENTS

Endesa té instal·lacions hidroelèctriques arreu del Pirineu, que van des de les preses fins a les mateixes centrals, passant per tots els elements intermedis, com ara canals, cambres de càrrega, canonades forçades, etc. A les capçaleres de les valls, molts d'aquests elements es troben en zones d'allaus.



Figura 1 – Àmbit del projecte.

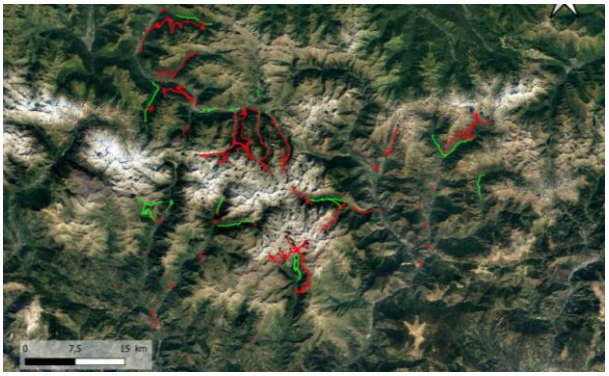


Figura 2 – El projecte inclou els accessos en verd.

Per les seves cotes i característiques, hi ha alguns dels accessos rodats a aquestes infraestructures que es fan servir durant l'hivern, ja sigui perquè es troben a cotes prou baixes o perquè són carreteres asfaltades i es poden netejar fàcilment de neu.

Una trentena d'aquests accessos, repartits entre els dos Pallars, la vall d'Aran i la Ribagorça, queden afectats per allaus que consten a la cartografia d'allaus de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC). S'han grafiat de color verd a la figura 2. A la figura 3 es veu la superposició de la cartografia d'allaus i els accessos de la zona de Tavascan.

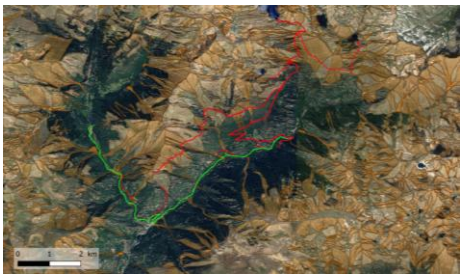


Figura 3 – Superposició d'accessos i cartografia d'allaus.

D'ençà de la construcció de les centrals, en alguns casos, aquestes allaus han arribat fins als accessos, amb un accident mortal el 1979.

Quan van aparèixer els primers butlletins d'allaus a principis dels anys 1990, en el cas dels accessos més freqüentats a l'hivern, s'utilitzaven criteris simples, com ara prohibir l'accés quan el nivell de perill era 4 o superior.

Amb la millora i sistematització de la informació emesa pels butlletins d'allaus, i en línia amb la política de l'empresa de minimitzar els riscos, s'ha desenvolupat el projecte Avalarms. Aquest, té per objectiu gestionar el perill d'allaus als accessos a les instal·lacions. Actualment porta tres temporades en funcionament.

AVALARMS

Avalarms és una eina basada en informació espacial (recorreguts i abast de les allaus, geometria dels accessos) i en informació temporal (emissions dels butlletins d'allaus) per tal d'avaluar el risc d'allaus a cadascun dels accessos.

Informació espacial

El punt de partida d'Avalarms són els indrets en què els corredors d'allaus travessen les carreteres d'accés a les diferents instal·lacions, els anomenats punts crítics.

Per a cadascun d'aquests punts crítics, es va analitzar quines cotes i orientacions tenen les zones de sortida de les allaus que hi podien arribar (unes 150, en total), per tal de poder-ho comparar amb la distribució del perill indicada als butlletins en cada moment de la temporada hivernal.

Cadascuna de les allaus es va modelitzar amb el programa RAMMS::AVALANCHE (Christen et al., 2008) per tal de determinar-ne l'abast des de la mida 2 i fins a la primera mida que arriba a l'accés (i de mida 4 com a molt), i fent la distinció entre neu seca i neu humida.

El volum de neu mobilitzada en cada cas va ser el proposat per l'escala de l'EAWS: de l'ordre de 1.000m^3 per a la mida 2, 10.000m^3 per a la mida 3 i 100.000 m^3 per a la mida 4. Els gruixos de neu es van determinar en relació a períodes de retorn estimats de cada escenari i l'extensió de la zona de sortida es va calcular en base als dos paràmetres anteriors.

Per tal de calibrar el model utilitzat, es van fer retroanàlisis d'allaus conegudes i, quan era possible, es comparaven els resultats obtinguts amb observacions de camp (figures 4 i 5).

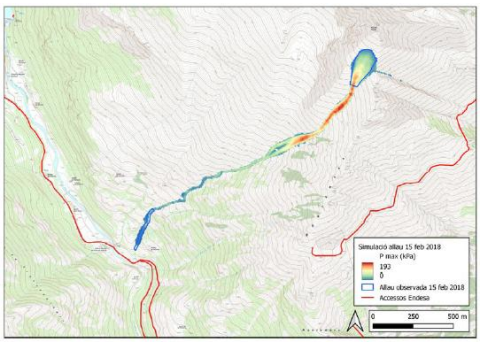


Figura 4 – Retroanàlisi de l'allau del Caubo (15/02/18).



Figura 5 – La cicatriu de l'allau del Caubo (15/2/18).

Les observacions de camp es van centrar als dos accessos més utilitzats d'entre els que formen part del projecte. Són els corresponents a les centrals reversibles de Sallente (a la vall Fosca) i de Montamara (a Tavascan).

Informació temporal

L'àmbit del projecte abasta tres zones nivoclimàtiques: Aran / Franja Nord de la Pallaresa; Pallaresa; Ribagorçana / Vall Fosca (figura 6).

La informació temporal utilitzada per Avalarms és la procedent dels butlletins d'allaus de l'ICGC i del Centre de Lauegi, per al cas de la vall d'Aran.

Avalarms consta d'un programa en Python per a l'extracció de la informació de les APIs d'aquests dos butlletins, que permet captar totes les dades referents a:

- Distribució espacial del perill (cotes i orientacions)
- Mida prevista de les allaus
- Origen (accidental / natural)

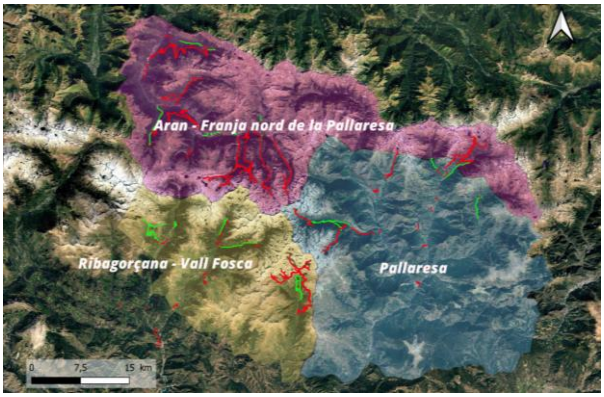


Figura 6 – Zones nivoclimàtiques a l'àmbit del projecte.

La informació s'introdueix a la base de dades de Postgres + Postgis on hi ha tota la informació espacial de zones de sortida, dels corredors d'allaus i dels accessos a les instal·lacions.

Determinació dels nivells de risc

Amb la informació obtinguda dels diferents butlletins, es comprova, per a totes les zones de sortida d'allaus, si tenen cotes i orientacions que coincideixin amb les indicades al butlletí. En cas de coincidència, es fa la comprovació, d'acord amb la mida prevista de les allaus al butlletí, de si l'allau és capaç d'arribar fins a la carretera.

A continuació, per a cadascuna de les carreteres, es fa un recompte de les allaus que hi poden arribar per tal de determinar el nivell d'exposició al perill suposant que hi hagi trànsit. Aquest valor, juntament amb el nivell de perill, la mida màxima de les allaus i el seu origen (si s'espera que es desencadeni de forma espontània o accidental), s'utilitza per calcular el nivell de risc, utilitzant la formulació que mostra la figura 7.

RISC = PROBABILITAT · EXPOSICIÓ · CONSEQÜÈNCIES

PROBABILITAT	Nivell de perill				
Desencadenament	1	2	3	4	5
Natural	1	1	2	4	5
Accidental (fora de zones de sortida)	1	1	2	4	5
Accidental (en zones de sortida)	1	2	3	5	5

EXPOSICIÓ	Exposició de l'accés		
Activitat	Baixa	Mitjana	Alta
Activitats de manteniment	4	5	5
Retirada de la neu	3	4	5
Trànsit amb neu a la calçada	2	3	4
Trànsit amb la carretera neta	1	2	3

CONSEQÜÈNCIES	Mida de l'allau				
	1	2	3	4	5
Conseqüències	1	2	4	5	5

Figura 7 – Càlcul del risc als accessos

Protocol d'actuació

Els valors de risc s'han agrupat en 5 nivells, i per a cadascun d'ells i per a la mida màxima de les allaus esperades s'ha establert un protocol que regula què es pot fer i què no per a cada nivell de risc i a cada accés (figura 8), des de l'accés obert sense restriccions fins al seu tancament, en les situacions més restrictives. En situacions intermèdies, es prohibeix sortir del vehicle o fer algun tipus d'activitat, com ara les que tenen a veure amb el manteniment dels accessos o bé la mateixa retirada de la neu. També es pot limitar l'accés a les actuacions urgents; en aquesta situació, es deixen de fer, per exemple, feines rutinàries o de neteja. Totes aquestes mesures van encaminades a minimitzar l'exposició al perill.

PROTOCOL		Mida			
		D1	D2	D3	D4
Nivell de risc	1				
	2				
	3				
	4				
	5				

Obert	Obert
Alerta	Prohibit sortir del vehicle i feines de manteniment a l'accés, EPIs
Alerta	Només activitats urgents. No es pot retirar la neu de Sallente
Alerta	Només activitats urgents. No es pot retirar la neu de Montamara
Tancat	Tancat

Figura 8 –Protocol d'actuació.

Flux d'informació

Cada cop que s'emet un nou butlletí, s'actualitza la base de dades i es calcula el risc de cada accés i el protocol a aplicar en cada cas. El resultat es pot visualitzar amb un Sistema d'Informació Geogràfica (GIS), com mostra la figura 9.

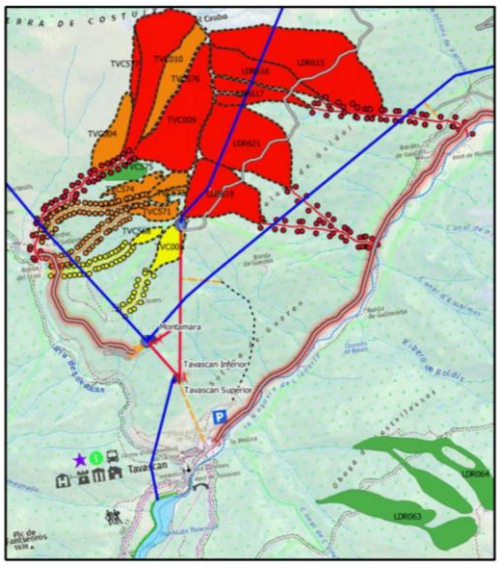


Figura 9 – Visualització de l'estat dels accessos (GIS).

Tanmateix, els usuaris dels accessos reben les notificacions a través de correu electrònic, en forma de llistats d'accessos afectats pel perill d'allaus i amb les limitacions aplicades.

Addicionalment, la informació també es distribueix a través d'un bot de Telegram, que facilita que empreses terceres que hagin d'utilitzar els accessos puguin rebre la informació quan sigui necessari, sense haver d'anar modificant contínuament la llista de distribució.

En el moment de la implantació del projecte, es va fer formació de seguretat en terreny d'allaus al personal de les zones afectades en què, a més de saber utilitzar els EPIs, se'ls va informar de quins són els punts crítics de cada zona, de manera que puguin minimitzar el temps d'exposició de forma conscient.

Resultats i futurs desenvolupaments

Avalarms utilitza informació de perill d'allaus a escala regional en el seu càlcul de la probabilitat a una escala local. Donada aquesta limitació, que genera una certa imprecisió, el càlcul del risc s'ha fet d'una manera relativament conservadora, fet que ja és adequat per a la majoria dels accessos, que s'utilitzen esporàdicament. En aquests casos, una limitació d'accés no té, en general, impacte directe sobre l'explotació dels salts hidroelèctrics, i per tant, es considera una solució adequada.

Tanmateix, hi ha casos en què aquesta limitació pot resultar problemàtica en alguns moments de la temporada. En aquestes situacions, es planteja, com a millores futures, no limitar-se a la simple coincidència entre cotes i orientacions del butlletí i de la zona de sortida, sinó a revisar en quina proporció hi ha aquesta coincidència. També es podria utilitzar la freqüència de les allaus com a paràmetre a considerar en futures versions del programa.

En qualsevol cas, per als dos accessos més crítics (els de les centrals reversibles de Sallente i Montamara), es preveu la instal·lació d'estacions nivometeorològiques a proximitat de les zones de sortida de les allaus per tal de millorar la informació a nivell local, en particular en el cas de Montamara, situada a cavall de dues zones nivoclimàtiques. En aquest cas, l'estació podria ajudar a discriminar de quina de les dues zones cal prendre les dades en cada moment. També hauria de servir per validar certs paràmetres de la predicció a escala regional, en particular la mida de les allaus, tenint en compte el gruix de neu i, més concretament, de la neu recent.

La implantació d'aquesta eina no només ha permès unificar criteris d'actuació a les diferents zones, sinó que també està servint per fer un seguiment de les allaus que afecten els accessos, fet que, a la llarga, hauria de contribuir a anar ajustant el model per trobar un bon equilibri entre la seguretat i l'operació de les instal·lacions.

AGRAÏMENTS

Voldríem agrair als Srs. F. Conesa, J. Alonso i S. Domínguez, d'O&M Hydro per haver cregut i impulsat aquest projecte des de l'inici, així com els companys d'OMI, DH, O&M i HSEQ per les seves aportacions i per fer-lo possible.

REFERÈNCIES

CHRISTEN, M., BARTELT, P., KOWALSKI, J., STOFFEL, L. 2008. Calculation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain with the numerical simulation programm RAMMS. In: International Snow Science Workshop 2008, Proceedings. September 21-27, 2008. Whistler, BC, CAN, 709-716.

Conselh Generau d'Aran. Avalanche bulletin: https://lauegi.report/bulletin/latest, last access: May 2025.

COPISA (1979). Informe sobre la nieve caída en la obra Estangento-Sallente a partir de la segunda quincena de diciembre de 1978.

EAWS. Standards. Avalanche size: https://www.avalanches.org/standards/avalanche-size/, last access: July 2024.

GARCÍA, C., MARTÍ, G., GARCÍA, A., MUNTÁN, E., OLLER, P., ESTEBAN, P., (2007). Weather and snowpack conditions of major avalanches in the Catalan Pyrenees. Proceedings of the Alpine Snow Workshop. Forschungsbericht 53. 49-56 pp.

ICGC. Avalanche bulletin: https://bpa.icgc.cat/, last access: May 2024

ICGC. Avalanche cartography WMS service: https://geoserveis.icgc.cat/geoserver/nivoallaus/wms?, last access: January 2023.

ICGC (2020). El servei de prevenció d'allaus a Catalunya: coneixement i prevenció. 9 – Monografies Tècniques.

MARTÍ, G.; PUJOL, J.; FLETA, J.; GARCIA, C.; OLLER, P.; COSTA, O.; MARTÍNEZ, P. (2009). A new iconographic avalanche bulletin for the Catalan Pyrenees: a beginning for a future avalanche forecasting database. Proceedings of the International Snow Science Workshop. 27 September to 2 October 2009. Davos, Switzerland. P. 361-365.

OLLER, P.; MARTURIÀ, J.; GONZÁLEZ, J.C.; ESCRIU, J.; MARTÍNEZ, P (2005): El servidor de datos de aludes de Cataluña, una herramienta de ayuda a la planificación territorial. In proceedings of: VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Valencia, 21-24 de Junio de 2005. E. P. 905-916. Alonso, J. Corominas, L. Jordà, M. Romana, J.B. Serón (Eds.).

MEDICIÓN CONTINUA DEL EQUIVALENTE EN AGUA DE LA NIEVE MEDIANTE ESPECTROSCOPÍA GAMMA DE BAJO COSTE

Víctor Herráiz-López [(1)]; Ayla Marzo-Lorente [(2)]; Adrián Subías Martín [(3)]; Rafael Alonso [(4)] y Víctor Berdejo-Arcéiz [(5)]

*(1,2,3,4,5) Departamento de Física Aplicada, Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España (*Contacto: vherraiz@unizar.es; vba@unizar.es*).*

PALABRAS CLAVE: Equivalente en agua de la nieve (SWE), recursos nivológicos, sensor de bajo coste, radiación gamma, tecnologías libres

RESUMEN

La medición del equivalente en agua de la nieve (SWE) resulta de gran interés para la gestión de los recursos hídricos en regiones de montaña, donde el fenómeno nival puede suponer una importante contribución al caudal de los ríos tanto en invierno como durante el deshielo. Sin embargo, su monitorización continua presenta dificultades asociadas al carácter destructivo y laborioso de los métodos manuales y a las limitaciones de algunas técnicas instrumentales. En este trabajo se evalúa la viabilidad de emplear un detector gamma de bajo coste y código abierto para estimar de forma continua y no invasiva el SWE a partir de la atenuación de la radiación gamma natural del terreno al atravesar el manto nivoso. Esta atenuación está relacionada con la cantidad total de agua atravesada, lo que permite estimar directamente el SWE sin necesidad de determinar por separado el espesor y la densidad de la nieve.

El detector, basado en espectroscopía gamma de la radiación natural proveniente del suelo, se instaló en la estación experimental AEMET Formigal-Sarrios (1800 m, Pirineo aragonés), donde operó durante la temporada invernal 2025-2026. El sistema se calibró mediante medidas manuales de SWE y se obtuvo una estimación continua a lo largo de toda la temporada. Las estimaciones reproducen adecuadamente las medidas empleadas para la calibración y presentan una elevada concordancia con la serie de referencia de AEMET, obtenida mediante simulación con el modelo SNOWPACK a partir de datos meteorológicos locales.

La integración del continuo Compton en una ventana de baja energía permite compensar la menor sensibilidad del detector, manteniendo un rango dinámico amplio. El sistema operó sin saturación hasta valores de SWE próximos a 1000 mm, superando el rango habitual indicado para sistemas gamma comerciales. Estos resultados muestran el potencial de la espectroscopía gamma de bajo coste y código abierto como alternativa para la monitorización continua y no invasiva de las reservas nivales, incluso en condiciones de elevada acumulación de nieve.

INTRODUCCIÓN

La nieve constituye un almacenamiento temporal de agua de gran importancia en regiones de montaña, donde su acumulación durante el invierno y posterior fusión regulan las aportaciones hídricas durante los meses más cálidos. Este efecto adquiere especial relevancia en cuencas mediterráneas y semiáridas, donde el deshielo puede contribuir de forma significativa a los recursos hídricos disponibles (ARENILLAS et al., 2008).

Desde el punto de vista hidrológico, una de las variables de mayor interés es el equivalente en agua de la nieve (SWE, *Snow Water Equivalent*), que representa la cantidad de agua contenida en el manto nivoso. Su monitorización resulta, por tanto, fundamental para caracterizar la evolución de las reservas nivales y mejorar su seguimiento a lo largo de la temporada. Sin embargo, las técnicas disponibles presentan distintas limitaciones. Las mediciones manuales de espesor y densidad requieren muestreos periódicos y alteran el manto nivoso, mientras que otras técnicas instrumentales pueden requerir elementos enterrados o presentan dificultades de mantenimiento y operación continua (LÓPEZ-MORENO et al., 2020).

En este contexto, la espectroscopía gamma constituye una alternativa no invasiva basada en la atenuación de la radiación gamma natural emitida por el terreno al atravesar la nieve. La señal registrada está relacionada con la cantidad total de agua atravesada y, por tanto, permite estimar directamente el SWE. Debido a que la nieve atenúa la radiación gamma al interactuar con las partículas que la forman, a mayor cantidad de nieve entre el suelo y el sensor, menor será la señal detectada procedente del suelo.

Este trabajo presenta los resultados preliminares de la aplicación de esta técnica mediante un

detector de bajo coste y código abierto durante una temporada invernal completa, comparando las estimaciones obtenidas con medidas independientes de referencia.

SISTEMA DE DETECCIÓN

El sistema empleado se basa en un detector de radiación gamma desarrollado dentro del proyecto de *hardware* y *software* libre *Open Gamma Project (OpenGammaProject, 2026)*, lo que permite disponer de una solución de bajo coste y reproducible. El detector utiliza un centelleador de yoduro de sodio dopado con talio (NaI(Tl)), que transforma la energía depositada por la radiación gamma en luz visible. Esta señal es registrada mediante fotomultiplicadores de silicio (SiPM), cuya salida es amplificada y procesada mediante un circuito encargado de retener el valor máximo de cada pulso para su posterior digitalización mediante el convertidor analógico-digital de un microcontrolador Raspberry Pi Pico 2. Paralelamente, un discriminador de pulsos permite establecer un umbral de detección y reducir las falsas detecciones causadas por ruido electrónico.

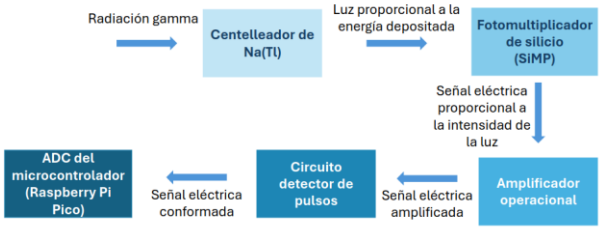


Figura 1. Diagrama de bloques del principio de funcionamiento y de la cadena de adquisición de señales del detector.

La amplitud digitalizada de cada pulso permite construir el espectro de radiación mediante un conteo de los eventos registrados para cada cantidad de energía depositada en el cristal centelleador, posibilitando determinar la tasa de cuentas en los intervalos energéticos de interés.
Una característica relevante del sistema es su dependencia de la temperatura. Las variaciones térmicas alteran el comportamiento del sistema detector y, por tanto, modifican la relación entre la medida realizada por el conversor ADC y la energía depositada por la partícula detectada. Este efecto se puede calibrar midiendo el espectro de fuentes radiactivas conocidas a diferentes temperaturas, lo que permite establecer una relación entre las medidas del ADC y la energía depositada por la partícula detectada para un rango amplio de temperaturas. En la Fig. 1 se muestra un esquema de bloques del funcionamiento de la electrónica de medición del sensor, que permite transformar las detecciones de partículas gamma en una señal de voltaje proporcional a la energía depositada por la partícula en su interacción con el material centelleador. En la Fig. 2 se muestra una fotografía del sensor, donde el cristal centelleador y el fotodetector aparecen encapsulados y se puede observar parte de la electrónica de acondicionamiento y medición de las señales.

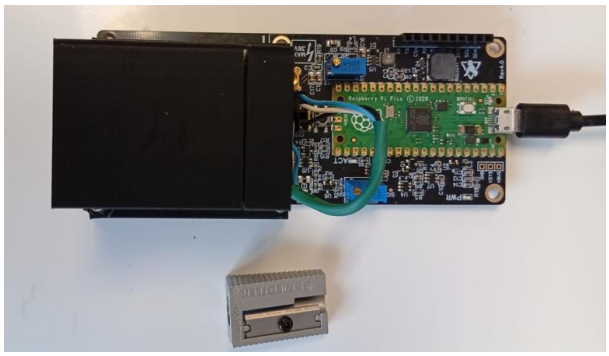


Figura 2. Fotografía del sensor de OpenGammaProject utilizado para este estudio.

TRATAMIENTO DE LOS DATOS

Para analizar la temporada invernal 2025-2026 se seleccionó un intervalo energético de 200-700 keV. Dado que el detector no presenta sensibilidad suficiente para resolver los fotópicos producidos por la radiación gamma emitida naturalmente por el suelo, se optó por integrar el continuo Compton asociado principalmente a la radiación de fondo. El intervalo seleccionado permite además reducir la influencia de las contribuciones asociadas al radón y sus descendientes y proporciona un número de cuentas suficiente para mejorar la estadística de la medida.
Las series temporales se procesaron aplicando la corrección por tiempo muerto y la corrección de la respuesta energética con la temperatura. Asimismo, se identificaron medidas afectadas por un exceso anómalo de ruido en los primeros canales del espectro, causado por un mayor ruido eléctrico. Estas medidas, correspondientes aproximadamente al 16% del total, fueron descartadas mediante un criterio basado en la tasa de cuentas registrada en dichos canales. El filtrado permitió obtener una serie temporal significativamente más estable, que fue empleada en el análisis posterior.
Para calibrar el sistema se utilizaron medidas manuales de SWE realizadas en diferentes momentos durante la temporada invernal. Para cada una de ellas se calculó la tasa media de cuentas en un intervalo de cinco horas centrado

en el momento del muestreo, descartando aquellos periodos afectados por precipitaciones (Fig. 3).
El SWE de referencia se obtuvo mediante métodos manuales de muestreo del manto nivoso, considerando una incertidumbre del 10% que da cuenta tanto de incertidumbres experimentales como de la variabilidad espacial del SWE propia de un entorno de montaña (LÓPEZ-MORENO et al., 2020).

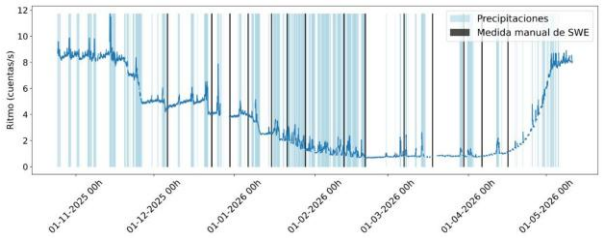


Figura 3. Evolución temporal de la tasa de cuentas total detectada. Las bandas verticales en azul claro indican los eventos de precipitación, mientras que las líneas verticales negras señalan catas de SWE.

La relación entre la tasa de cuentas y el SWE se ajustó mediante un modelo no lineal que tiene en cuenta tanto el campo de visión del sensor como la atenuación en intensidad que sufren las partículas al atravesar el manto nivoso. Los resultados muestran una buena concordancia entre las medidas experimentales y la curva ajustada (Fig. 4).

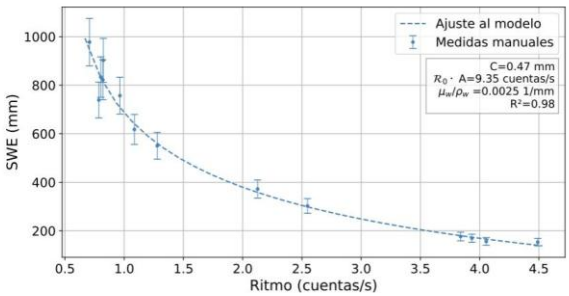


Figura 4. Ajuste de los datos experimentales de SWE (medidas manuales) en función de la tasa de cuentas.

Los parámetros obtenidos deben interpretarse como valores efectivos, ya que el intervalo energético empleado integra fotones de diferentes energías. En particular, el coeficiente de atenuación másico representa un valor promedio sobre el rango energético considerado, siendo además influido por estar integrando el espectro en una región donde la interacción Compton es la más relevante. No obstante, su orden de magnitud resulta consistente con los valores tabulados para el agua en el rango energético correspondiente (NIST, 2026).

OBTENCIÓN Y COMPARACIÓN DE LA SERIE TEMPORAL DE SWE

Una vez validado el modelo, se aplicó a la serie completa de tasas de cuentas para reconstruir la evolución temporal del SWE durante la temporada 2025-2026. Para reducir las fluctuaciones asociadas al ruido estadístico se aplicó un filtro de mediana de 21 muestras seguido de un filtro de Savitzky-Golay de 21 muestras y segundo grado. Durante toda la temporada no se observó saturación del detector, permitiendo alcanzar valores de SWE próximos a 1000 mm sin superar su rango dinámico, lo que sobrepasa el límite habitual de 600 mm de SWE de los dispositivos comerciales basados en la medición de la atenuación de la radiación gamma natural (CAMPBELL, 2026).
La serie reconstruida se comparó con la estimación de AEMET para la estación Formigal-Sarrios y con las propias medidas manuales de referencia con las que se ha calibrado el dispositivo. AEMET obtiene el SWE mediante simulación multicapa de las propiedades del manto nivoso empleando el modelo SNOWPACK, utilizando variables meteorológicas locales, incluida la medida de precipitación mediante un pluviómetro protegido por una doble valla (DFAR) (BUISÁN et al., 2017).

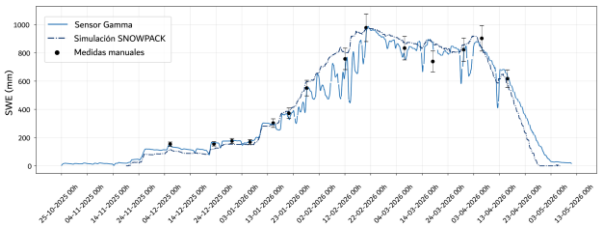


Figura 5. Evolución temporal del SWE medido con el sensor gamma, mediante medidas manuales y simulado empleando SNOWPACK.

Como se observa en la Fig. 5, la serie obtenida mediante el sensor basado en espectroscopía gamma de bajo coste reproduce adecuadamente la evolución temporal del SWE y sus principales variaciones. La mayoría de las medidas manuales son compatibles con las estimaciones del modelo dentro de sus incertidumbres. En conjunto, los resultados muestran que el detector permite reconstruir de forma continua y estable el SWE durante una temporada completa, incluso para valores elevados de acumulación nival.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos durante la temporada 2025-2026 demuestran la viabilidad de emplear un

detector gamma de bajo coste y código abierto para estimar de forma continua y no invasiva el SWE. La calibración térmica y el tratamiento de los datos permitieron obtener una señal estable, mientras que el uso del continuo Compton en el intervalo de 200-700 keV proporcionó un amplio rango dinámico, sin saturación hasta valores próximos a 1000 mm de SWE. El ajuste de las medidas manuales mostró una buena concordancia con el modelo empleado, y la serie reconstruida reprodujo adecuadamente la evolución temporal del manto nivoso y sus principales procesos de acumulación y fusión. La comparación con AEMET mostró tendencias coherentes, confirmando el potencial del sistema para la monitorización continua de las reservas nivales.

Disponer de una tecnología basada en desarrollos libres y de bajo coste puede permitir aumentar la red de sensores de SWE en el Pirineo, que actualmente es limitada y con instrumentos de menor precisión que además requieren de un alto mantenimiento. Durante la temporada invernal 2026-2027 se va a continuar la validación de la técnica en otras dos instalaciones experimentales diferentes en el Pirineo, permitiendo además comparar las medidas obtenidas con otros métodos de referencia actualmente empleados en el sensado remoto del SWE.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto T20-23R DGA-FSE. Los autores agradecen a la Delegación Territorial de AEMET en Aragón y a la estación de esquí Aramon Formigal-Panticosa su apoyo. Agradecen también al grupo de investigación «Geomorfología y Cambio Global (E02_23R)» del Gobierno de Aragón el apoyo al proporcionar algunos de los detectores utilizados en este estudio y al proyecto PID2023-147193OB-I00, financiado por la Agencia Estatal de Investigación, su apoyo para la adquisición de los datos de los detectores.

BIBLIOGRAFÍA

ARENILLAS et al., 2008. Datos sobre la nieve y los glaciares en las cordilleras españolas. El programa ERHIN (1984-2008). Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

BUISÁN et al., 2017. Assessment of snowfall accumulation underestimation by tipping bucket gauges in the Spanish operational network. Atmospheric Measurement Techniques, 10(3), 1079-1091.

CAMPBELL SCIENTIFIC, 2026. Campbell Scientific España. Consultado en junio de 2026.

LÓPEZ-MORENO et al., 2020. Intercomparison of measurements of bulk snow density and water equivalent of snow cover with snow core samplers: Instrumental bias and variability induced by observers. Hydrological Processes, 34(14), 3120-3133.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST), 2026. X-Ray Mass Attenuation Coefficients.

OPENGAMMAPROJECT, 2026. Open-Gamma-Detector. Repositorio de GitHub. Disponible en: https://github.com/OpenGammaProject/Open-Gamma-Detector. Consultado en junio de 2026.

LECCIONES DEL ALUD DEL CERRO COCINERO: DINÁMICA DE LA FASE EN AEROSOL E IMPLICACIONES PARA LAS OPERACIONES DE BÚSQUEDA Y RESCATE

Cédric Larcher[1]*, Alejandro Casteller y Luis Schinelli[2]

[1] MND Safety, Sainte-Hélène-du-Lac, Francia. cedric.larcher@mnd.com [2] Trevelin, Chubut, Argentina

RESUMEN: El 27 de agosto de 2010, un alud de gran magnitud sobre el Cerro Cocinero (2.281 m) destruyó un refugio de montaña y sepultó a sus tres ocupantes. La alerta tardía, una nevada posterior superior a 1 m, espesores de depósito de hasta aproximadamente 8 m y la incertidumbre sobre la posición exacta del refugio complicaron las operaciones de búsqueda y rescate (SAR). La estrategia inicial asumió un transporte predominantemente pendiente abajo. Tras localizar la parte inferior del refugio a unos 6 m de profundidad —con un error de geolocalización superior a 20 m— no se encontraron ni el altillo utilizado como dormitorio ni las víctimas. El análisis posterior de la orientación de los daños en la vegetación llevó a proponer que una fase en aerosol, o nube de nieve en suspensión de alta velocidad, había impactado lateralmente el refugio antes de la llegada del flujo denso. Esta reinterpretación desplazó el sector de búsqueda más de 60 m. Señales repetibles con detector RECCO, combinadas con sondeos y lectura del terreno, permitieron recuperar elementos estructurales, material personal y finalmente a las víctimas. El caso muestra que, en enterramientos estructurales complejos, la geometría de búsqueda debe mantenerse como una hipótesis revisable y contrastarse con múltiples evidencias de campo.

PALABRAS CLAVE: dinámica de aludes, fase en aerosol, búsqueda y rescate, RECCO, impacto de aludes, estudio de caso

1. INTRODUCCIÓN Y ALCANCE

Los aludes de gran magnitud que destruyen estructuras ocupadas plantean problemas de búsqueda distintos de los enterramientos individuales habituales. La posición final de víctimas y elementos constructivos depende no solo del depósito de flujo denso, sino también de la fragmentación de la estructura, de posibles componentes en suspensión y de la interacción con el relieve y la vegetación.

Este trabajo resume retrospectivamente el accidente de Cerro Cocinero de 2010 y la evolución de la estrategia de búsqueda. El objetivo no es reconstruir cuantitativamente la dinámica del alud —no se dispuso de medidas directas de velocidad ni de presión de impacto—, sino documentar cómo la reinterpretación de los daños en la vegetación y de la distribución de los restos modificó la hipótesis operativa de búsqueda.

2. EVENTO Y BÚSQUEDA INICIAL

2.1 Cronología y condiciones del emplazamiento

Durante la noche del 26 al 27 de agosto de 2010, tras varios días de fuertes nevadas, un gran alud descendió por las laderas del Cerro Cocinero (2.281 m) y destruyó el refugio situado junto a un cauce y un bosque de árboles de 7–8 m. Tres montañeros dormían en su interior. La alerta se activó al día siguiente al no presentarse al punto de recogida previsto; el reconocimiento aéreo del 29 de agosto confirmó la desaparición del refugio. Los primeros equipos terrestres encontraron un depósito de varios centenares de metros y espesores reportados de hasta aproximadamente 8 m.



Figura 1 – Fragmento del refugio localizado a gran distancia de su posición original.

2.2 Primeras operaciones de búsqueda

La búsqueda canina se vio limitada por la extensión del depósito, el tránsito previo de numerosos rescatadores y una nevada posterior superior a 1 m que redujo la expresión de posibles chimeneas de olor. Dado que el accidente ocurrió de noche, se consideró probable que las víctimas permanecieran en la zona de dormitorio del refugio.

La posición GPS de referencia condujo a excavar un pozo de unos 10 m sin resultado. La localización real del refugio se identificó aproximadamente diez días después, a unos 6 m de profundidad, mediante comparación con fotografías previas del terreno y sondeos con tubos de gas. La discrepancia entre el punto GPS y la posición real superaba los 20 m. Solo apareció la parte inferior del edificio; el altillo-dormitorio no estaba presente.

3. EVOLUCIÓN DE LA HIPÓTESIS DE BÚSQUEDA

TIEMPO	EVOLUCIÓN OPERATIVA
Noche 26–27 ago.	El alud destruye el refugio.
28 ago.	Se activa la alerta al no presentarse los montañeros al punto de recogida.
29 ago.	Reconocimiento en helicóptero; se confirma la desaparición del refugio.
30 ago.	Primeros equipos terrestres; depósito de varios centenares de metros y espesores de hasta ~8 m.
~Día 10	Se localiza la posición real del refugio a ~6 m de profundidad; el GPS estaba desviado >20 m.
Día 33	Se formula una nueva hipótesis sobre la dinámica y el transporte lateral.
Día 34	Se recuperan los primeros elementos de la parte superior del refugio, apoyando la nueva hipótesis.
Día 36	Se localizan los cuerpos y finaliza la operación de rescate.

3.1 Del cono de búsqueda inicial a una hipótesis lateral

Durante varias semanas se realizó un sondeo sistemático dentro de un cono de aproximadamente 60° proyectado pendiente abajo desde la posición presumida del refugio. La ausencia persistente de restos de la parte superior del edificio y de las víctimas obligó a cuestionar el modelo de transporte asumido.

La orientación de ramas rotas y otros daños en los flancos del valle aportó una evidencia diferente. La trayectoria inferida de la fase en aerosol parecía haber alcanzado el refugio antes que el flujo denso y con un ángulo superior a 70° respecto a su orientación. Se planteó que esta componente en suspensión pudo separar y desplazar lateralmente la parte superior del edificio antes de que el flujo denso ocupara el fondo del valle. Esta interpretación condujo a definir un segundo sector de búsqueda desplazado más de 60 m respecto al inicial.

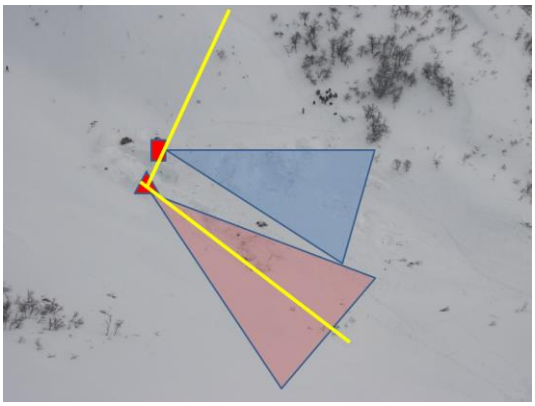


Figura 2 – Esquema del sector de búsqueda inicial y del sector revisado, desplazado lateralmente.

3.2 Detecciones RECCO y recuperación final

En el nuevo sector, el detector RECCO proporcionó dos retornos débiles pero repetibles. Tras cinco búsquedas ciegas consecutivas, ambos puntos fueron confirmados. El primer sondeo alcanzó a 1,3 m una tabla de madera; un clavo de una bisagra había actuado como elemento reflector. Un segundo retorno condujo a una chaqueta que contenía un teléfono móvil y una linterna frontal.

Estos hallazgos apoyaron la hipótesis de un desplazamiento lateral de la parte superior del refugio. El bosque habría actuado además como un filtro o «efecto tamiz», reteniendo elementos mayores y permitiendo el paso de fragmentos menores. Los sondeos progresivos recuperaron nuevos objetos y piezas estructurales. Finalmente, el techo y las tres víctimas fueron localizados a aproximadamente 50 m de la posición original del refugio, a unos 5 m de profundidad y desplazados lateralmente respecto al eje principal del flujo.



Figura 3 – Búsqueda con detector RECCO en el sector revisado.



4. RECONSTRUCCIÓN POSTERIOR DEL EVENTO

4.1 Dinámica propuesta: fase en aerosol y flujo denso

La visita de campo realizada el verano siguiente, con apoyo de Alejandro Casteller, permitió relacionar la distribución de restos con las cicatrices en la vegetación. Se propuso una estructura de dos fases. La fase en aerosol, de alta velocidad, habría seguido una trayectoria distinta a la del flujo denso, ascendiendo por la ladera opuesta antes de volver hacia la zona del refugio y afectar principalmente a su parte superior. El flujo denso habría seguido preferentemente la topografía del fondo del valle, doblando o derribando árboles en direcciones diferentes.

El desencadenamiento inicial se interpretó como un alud de placa en la cubeta superior tras un episodio de nevada rápida e intensa. La naturaleza exacta de la capa débil no pudo verificarse; la hipótesis planteada en el estudio original es una acumulación de nieve poco cohesionada. Un segundo alud en la ladera opuesta se superpuso al depósito principal y aumentó la complejidad espacial de la zona de búsqueda.

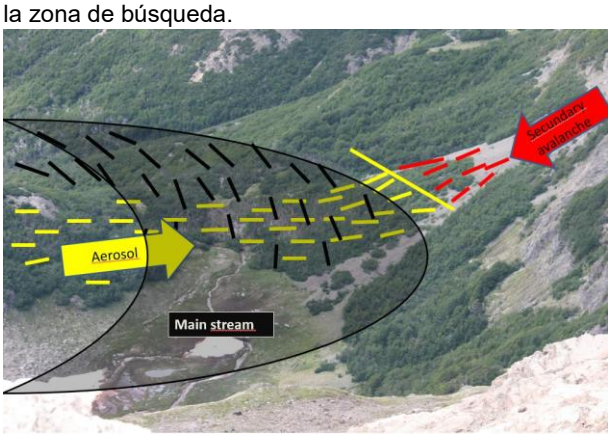


Figura 4 – Reconstrucción cualitativa de las trayectorias diferenciadas de la fase en aerosol y del flujo principal a partir de las cicatrices forestales.

4.2 Dendrocronología y contexto histórico

El análisis dendrocronológico de árboles del valle —algunos con más de 70 años— evidenció cicatrices asociadas a un alud de gran magnitud ocurrido 17 años antes del accidente de 2010. El refugio había sido construido 16 años antes del accidente. Fotografías históricas tomadas durante su construcción muestran daños atribuibles al episodio del año anterior, lo que documenta una actividad nival severa previa en el emplazamiento.



Figura 5 – Investigación dendrocronológica durante la visita posterior al evento.

5. DISCUSIÓN: IMPLICACIONES PARA SAR

5.1 La geometría de búsqueda debe ser una hipótesis revisable

El sector inicial era coherente con una hipótesis de transporte predominantemente pendiente abajo, pero no explicaba la ausencia de la parte superior del refugio. Cuando una búsqueda sistemática prolongada no produce evidencias compatibles con el modelo de deposición esperado, la dirección de transporte debe reexaminarse a partir de observaciones independientes.

5.2 Valor de la vegetación y de la distribución de restos

La vegetación aportó información que no era visible únicamente en el depósito nival. Las diferencias en la orientación de los daños entre el fondo del valle y los flancos permitieron inferir direcciones de flujo distintas. En este caso, la combinación de daños forestales, distribución de restos, sondeos y retornos electrónicos fue más informativa que cualquiera de estos indicadores por separado. Para enterramientos estructurales prolongados, el caso apoya un enfoque de múltiples evidencias.



Figura 6 – Ejemplo de daño severo en la vegetación observado en la trayectoria del alud.

5.3 Geolocalización y tecnologías de detección

Una discrepancia superior a 20 m en la posición inicial del refugio tuvo consecuencias operativas relevantes cuando las profundidades de enterramiento alcanzaban varios metros. La verificación independiente mediante fotografías, referencias del terreno y sondeo resultó esencial. RECCO contribuyó posteriormente a localizar señales repetibles asociadas a restos estructurales y equipos personales; este resultado debe entenderse como evidencia específica de este caso y no como una medida general de alcance o probabilidad de detección.

5.4 Limitaciones de la reconstrucción

La interpretación está condicionada por la naturaleza retrospectiva del caso. No existen medidas instrumentales contemporáneas de velocidad ni de presión de impacto. Más de 1 m de nieve posterior modificó la superficie del depósito; un segundo alud complicó el patrón de deposición y la posición inicial del refugio era incierta. Por ello, la trayectoria atribuida a la fase en aerosol y el mecanismo de separación de la parte superior del refugio deben considerarse hipótesis cualitativas coherentes con las evidencias observadas, no resultados dinámicos validados cuantitativamente.

6. CONCLUSIONES

El caso de Cerro Cocinero muestra la dificultad de definir áreas de búsqueda cuando un gran alud destruye y transporta una estructura ocupada. La reinterpretación de las cicatrices de vegetación y de la distribución de restos permitió abandonar una geometría exclusivamente pendiente abajo y orientar la búsqueda hacia un sector lateral donde se localizaron elementos estructurales, pertenencias y finalmente las víctimas.

De este caso se desprenden tres consideraciones operativas: (1) verificar la posición previa de una estructura enterrada mediante más de una fuente siempre que sea posible; (2) utilizar los daños en la vegetación y la distribución de restos para contrastar la dirección de transporte asumida; y (3) revisar periódicamente la hipótesis de búsqueda cuando las observaciones no coinciden con el patrón de deposición esperado. La combinación de sondeo sistemático, lectura geomorfológica del terreno y herramientas electrónicas puede ser decisiva en búsquedas estructurales complejas y prolongadas.

REFERENCIAS

Casteller, A., Christen, M., Villalba, R. y Stöckli, V., 2010. Using dendrochronology to validate numerical simulations of snow avalanches in the Patagonian Andes. En: Tree Rings and Natural Hazards: A State-of-the-Art, Springer, Dordrecht, 75–80.

Casteller, A., Villalba, R., Araneo, D. y Stöckli, V., 2011. Reconstructing temporal patterns of snow avalanches at Lago del Desierto, Southern Patagonian Andes. Cold Regions Science and Technology, 67, 68–78.

Casteller, A., Häfelfinger, T., Cortés Donoso, E., Podvin, K., Kulakowski, D. y Bebi, P., 2018. Assessing the interaction between mountain forests and snow avalanche at Nevados de Chillán, Chile. Natural Hazards and Earth System Sciences, 18, 1173–1186.

Stoffel, M., Casteller, A., Luckman, B. H. y Villalba, R., 2012. Spatiotemporal analysis of channel wall erosion in ephemeral torrents using tree roots – An example from the Patagonian Andes. Geology, 40(3), 247–250.

Thumlert, S., 2024. The four key components of the physical hazard posed by snow avalanches across terrain. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Tromsø, Norway.

TRAMPAS HEURÍSTICAS EN LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE ALUDES Y MANIPULACIÓN DE MARKETING: UN ENFOQUE CETÉTICO PARA LA TOMA DE DECISIONES CRÍTICAS

Cédric Larcher[1]

[1] *MND Safety, 74 Voie Magellan, 73800 Sainte-Hélène-du-Lac, France.* cedric.larcher@mnd.com

RESUMEN: Las decisiones en terreno de aludes también se ven afectadas por atajos cognitivos y presiones sociales. Las trampas heurísticas de McCammon (familiaridad, consistencia, aceptación, efecto halo, facilitación social y escasez) ayudan a identificar vulnerabilidades en la toma de decisiones.
Este artículo compara estas trampas con mecanismos de persuasión y economía del comportamiento, como prueba social, anclaje, autoridad, compromiso y escasez, para proponer contramedidas prácticas. Combina un enfoque zetético (cuestionamiento sistemático y verificación de supuestos) con herramientas estructuradas: listas de verificación, análisis premortem, disidencia deliberada, generación de alternativas y nudging.
El objetivo es hacer visibles los supuestos, la influencia social y las evidencias contradictorias, complementando —no reemplazando— la formación técnica y el juicio experto.

PALABRAS CLAVE: trampas heurísticas, riesgo de aludes, sesgos cognitivos, zététika, economía del comportamiento, nudging, toma de decisiones

1. ÁMBITO Y ENFOQUE

Este artículo es una revisión conceptual más que un estudio experimental. Reúne las trampas heurísticas establecidas en la toma de decisiones sobre aludes con conceptos seleccionados de la investigación en persuasión, economía del comportamiento y marcos de pensamiento crítico. Por lo tanto, las correspondencias propuestas deben entenderse como paralelos conceptuales que pueden ayudar a estructurar procesos de prevención y decisión, no como prueba de que los mecanismos psicológicos subyacentes sean idénticos.

2. TRAMPAS HEURÍSTICAS Y MECANISMOS DE INFLUENCIA RELACIONADOS

La evaluación del riesgo de aludes se realiza bajo incertidumbre, presión temporal y dinámicas grupales. McCammon (2004) identificó seis trampas heurísticas que facilitan reconocer influencias implícitas en las decisiones.
Es clave distinguir entre aceptación (costo social de disentir) y efecto halo del experto (peso por su estatus). Ambos reducen la evaluación independiente, pero requieren contramedidas distintas: permiso explícito para disentir en el primer caso, y separar la autoridad de las evidencias en el segundo.
En terreno, estas tendencias pueden aumentar la exposición al limitar la reevaluación o sobrestimar señales sociales. En marketing, mecanismos similares se usan para influir en el consumidor, mostrando cómo el juicio humano depende del contexto y la dinámica grupal.
Importante: Estas trampas no son aisladas; pueden activarse simultáneamente y reforzarse (ej.: familiaridad + consistencia + aceptación + escasez). El objetivo práctico es reconocer combinaciones de señales que limiten la atención del grupo antes de que el compromiso sea irreversible.
Para profesionales, la experiencia no elimina sesgos heurísticos: mejora el juicio técnico, pero la dinámica social y el encuadre siguen influyendo. Una pregunta clave es: «¿Qué evidencia nos haría cambiar el plan?».
La comparación con el marketing es útil, pero limitada: en montaña, los sesgos surgen de la familiaridad o la urgencia, no de una manipulación intencionada. Su valor es diagnóstico: hacer visibles influencias difíciles de identificar, sin equiparar ambos contextos.

3. LA ZETÉTICA COMO CONTRAMEDIDA PRÁCTICA

La zetética, asociada a Henri Broch, puede resumirse como la práctica disciplinada de cuestionar afirmaciones y poner a prueba supuestos antes de aceptarlos. Para la toma de decisiones en terreno de aludes, cuatro principios son especialmente relevantes: observación, cuestionamiento, experimentación y coherencia. Aplicados de manera operativa, estos principios alientan a los usuarios a verificar información de manera cruzada, distinguir entre observaciones e interpretaciones, y buscar deliberadamente evidencias que podrían invalidar el plan actual.

Aplicación operativa

Cuestionar la familiaridad: Priorizar las condiciones actuales de nieve y clima sobre la experiencia previa.

Reevaluar con nueva información: Mantener la reversibilidad de las decisiones iniciales.

Evitar la confianza ciega: La experiencia no debe silenciar observaciones contradictorias.

Resistir la presión social: La evaluación del riesgo debe ser independiente del comportamiento de otros grupos.

Punto clave: El cuestionamiento crítico no es desconfianza hacia la experiencia, sino separar la autoridad de la evidencia. Los líderes deben justificar sus decisiones con observaciones, y el grupo debe poder compartir información contradictoria sin que se interprete como un desafío personal. El objetivo es que todas las observaciones relevantes se consideren, sin filtros jerárquicos o grupales.

Límites

El escepticismo sistemático tiene un costo: requiere tiempo, esfuerzo cognitivo y una cultura grupal abierta al debate. Un análisis excesivo puede retrasar la acción, y el sesgo de confirmación puede persistir. Por ello, el razonamiento zétético es una herramienta estructurada para mejorar el juicio, no una garantía de eliminar sesgos por completo.

4. ECONOMÍA DEL COMPORTAMIENTO Y HERRAMIENTAS ESTRUCTURADAS DE DECISIÓN

La economía del comportamiento refuerza un punto central: muchas desviaciones de una toma de decisiones puramente racional son sistemáticas y predecibles. Conceptos discutidos por autores como Kahneman, Ariely, Thaler, Sunstein, Lovallo y Sibony incluyen el anclaje, los efectos de costos hundidos, el sesgo de confirmación, el pensamiento grupal (groupthink) y el sesgo de acción. En lugar de intentar "reprogramar" a los individuos, la gestión práctica del riesgo puede enfocarse en procesos de decisión que faciliten la detección de estas influencias.

Tres mecanismos adicionales merecen especial atención en las decisiones de montaña:

- Los efectos de costos hundidos pueden hacer que un grupo sea reacio a retroceder después de invertir tiempo, esfuerzo, dinero o compromiso emocional en un objetivo ("Hemos llegado hasta aquí").
- El pensamiento grupal puede suprimir las dudas cuando mantener la cohesión se vuelve más importante que evaluar la opción preferida.
- El sesgo de acción puede generar preferencia por continuar o hacer algo, en lugar de aceptar que la decisión más segura podría ser esperar, cambiar de terreno o detenerse.

Estos mecanismos son relevantes porque pueden operar incluso cuando la información técnica está disponible.

Cascadas de decisión representan otra preocupación a nivel grupal: a medida que la información se transmite en un equipo, la incertidumbre y las observaciones minoritarias pueden perderse si cada persona simplemente sigue el juicio previo. Un proceso de decisión estructurado debe, por lo tanto, preservar las observaciones originales (no solo la recomendación final) y permitir que los participantes posteriores vean en qué evidencia se basó la decisión.

Listas de verificación previas a la decisión: utilizar un conjunto breve de preguntas obligatorias antes de comprometerse con una pendiente o una ruta. El objetivo no es sustituir la experiencia, sino garantizar que no se omita información crítica.

El diseño de la lista de verificación también requiere cautela. El artículo original se basa en la discusión de Gawande sobre el uso de listas de verificación en medicina como ejemplo de cómo herramientas procedimentales simples pueden mejorar la fiabilidad en entornos complejos, aunque también suscitan resistencia entre profesionales experimentados. Esto no debe tratarse como evidencia directa para la práctica en avalanchas. La lección relevante es metodológica: una lista de verificación debe ser lo suficientemente breve para ser utilizada, centrarse en las omisiones críticas y ser probada en el entorno operativo para el que está destinada.

Herramientas prácticas:

- **Listas de verificación previas a la decisión:** Usar un conjunto breve de preguntas obligatorias antes de comprometerse con una pendiente o ruta. El objetivo no es reemplazar la experiencia, sino **asegurar que la información crítica no se omita**. *Nota:* El diseño de listas de verificación también requiere precaución. También pueden generar resistencia entre profesionales experimentados. Esto no debe tomarse como evidencia directa para la práctica en aludes, sino como una lección metodológica: una lista de verificación debe ser **breve, enfocada en omisiones críticas y probada en el entorno operativo** para el que está destinada.
- **Análisis *premortem*:** Suponer que la decisión ha llevado a un accidente y trabajar hacia atrás: **¿qué no notó, cuestionó o anticipó el grupo?**
- **Disidencia estructurada:** Asignar o invitar a alguien a desafiar el plan preferido. El conflicto cognitivo debe centrarse en la **decisión**, no en la persona.
- **Generación de alternativas:** Antes de comprometerse, identificar **al menos una alternativa viable**. Tener opciones reduce el costo psicológico de cambiar el plan original.
- **Puntos de control de decisión:** Definir momentos u observaciones que obliguen al grupo a **detenerse y reevaluar**, en lugar de continuar por inercia.

Estas herramientas son más útiles cuando son breves, repetibles y vinculadas a momentos explícitos de decisión. Una lista de verificación demasiado larga puede convertirse en un trámite; un punto de control sin un disparador definido puede simplemente ignorarse. En el contexto de aludes, el valor práctico radica en especificar cuándo el grupo debe detenerse y reevaluar: por ejemplo, cuando las condiciones observadas difieren del pronóstico, cuando el terreno planeado cambia o cuando aparecen nuevas señales de inestabilidad. Del mismo modo, un premortem es más útil antes del compromiso, cuando las alternativas aún están realísticamente disponibles.

La disidencia estructurada es especialmente relevante en grupos jerárquicos o liderados por expertos. Una práctica sencilla es invitar explícitamente una opinión contraria antes de la decisión final: "¿Qué estamos

pasando por alto?" o "¿Cuál sería la razón más fuerte para no continuar?". Esto genera conflicto cognitivo sin requerir conflicto interpersonal y ayuda a hacer visibles señales débiles u observaciones minoritarias antes de que sean suprimidas por el consenso.

5. EL NUDGING Y LA ARQUITECTURA DE DECISIONES

El nudging, o "impulso conductual", tal como lo describen Thaler y Sunstein, modifica el entorno de decisión sin eliminar la elección. En la prevención de aludes, las aplicaciones potenciales incluyen:

- Recordatorios destacados en puntos de decisión,
- Verificaciones de seguridad predeterminadas dentro de las rutinas grupales,
- Mensajes basados en normas sociales respaldados por datos conductuales fiables,
- Retroalimentación en tiempo real sobre las condiciones de aludes.

Cuatro aplicaciones son especialmente relevantes para la prevención de aludes. Los nudges ambientales pueden hacer que la información crítica sea más destacada en los inicios de senderos o puntos de decisión. Los nudges por defecto pueden convertir una verificación de seguridad en parte de la rutina normal del grupo en lugar de ser un paso opcional adicional. Los mensajes basados en normas sociales pueden fomentar comportamientos prudentes al mostrar lo que hacen los demás, mientras que los nudges de retroalimentación pueden proporcionar información oportuna sobre las condiciones cambiantes de aludes. En todos los casos, la intervención debe apoyar una decisión deliberada en lugar de crear la falsa impresión de que la decisión ya ha sido tomada por el usuario.

Las principales limitaciones son la dependencia del contexto, la aceptación cultural y la sobre dependencia. Un mensaje que funciona en un entorno recreativo puede no ser adecuado para un equipo profesional, y algunos usuarios pueden percibir los estímulos conductuales como paternalistas o manipuladores. Los impulsos conductuales deben, por lo tanto, seguir siendo transparentes, no coercitivos y subordinados a la formación técnica, las observaciones en el terreno y el juicio profesional. Su valor debe evaluarse en el entorno específico en el que se pretenden aplicar.

6. MARCO PROPUESTO PARA LA TOMA DE DECISIONES CRÍTICAS

La síntesis práctica consiste en un proceso de cuatro etapas:

- Identificar la señal heurística.
- Determinar su efecto cognitivo.
- Evaluar el riesgo de decisión resultante
- Aplicar una contramedida específica.

La Figura 1 resume esta lógica para las seis trampas heurísticas.

En la práctica, el marco puede usarse en puntos naturales de decisión en lugar de como una lista de verificación continua. Primero, identificar la señal que podría estar dando forma al juicio del grupo: familiaridad con el terreno, compromiso con el plan inicial, aceptación social, dependencia de un experto, el comportamiento de otros grupos o presión de tiempo/oportunidad. Segundo, preguntar qué efecto cognitivo podría crear esa señal, por ejemplo, reducción de la reevaluación, convergencia grupal o urgencia. Tercero, hacer explícito el riesgo de decisión resultante. Finalmente, elegir una contramedida que aborde directamente ese mecanismo: una verificación independiente, una pausa deliberada, un punto de reevaluación predefinido, una ruta alternativa o una invitación explícita al disentimiento.

Este marco no determina si una pendiente es segura ni sustituye los pronósticos de aludes, las observaciones del manto de nieve, la evaluación del terreno o la experiencia profesional. Su propósito es más específico: estructurar cómo se discute y cuestiona la información para que las evidencias técnicamente relevantes sean menos propensas a ignorarse debido a presiones sociales o cognitivas.

Esta distinción es esencial al introducir el método a profesionales experimentados, quienes podrían resistirse razonablemente a herramientas que parezcan sustituir la psicología genérica por la competencia en el terreno.



Figura 1 – Del indicio heurístico a la contramedida: un camino para la toma de decisiones en terreno de aludes.

7. CONSIDERACIONES DE IMPLEMENTACIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

Las herramientas propuestas deben adaptarse al contexto operativo, ya que la recreación en zonas remotas, los grupos guiados, las estaciones de esquí y los equipos profesionales de control de aludes enfrentan diferentes limitaciones, flujos de información y dinámicas sociales. Los nudges o ayudas para la decisión mal diseñados pueden parecer paternalistas, por lo que deben ser transparentes, no coercitivos y subordinados a la experiencia técnica y las evidencias de campo.

La implementación debe distinguir entre conciencia y eficacia. Reconocer una trampa heurística no la evita, y conocer la contramedida correcta no garantiza su uso bajo presión. La formación debe ir más allá de las definiciones, incorporando ejercicios realistas donde los participantes identifiquen señales heurísticas, expongan evidencias contradictorias y practiquen el ajuste de planes al alcanzar umbrales predefinidos.

Las futuras investigaciones deben centrarse en qué intervenciones mejoran mediblemente la calidad de la decisión en condiciones realistas. Ejercicios comparativos, reflexiones estructuradas y análisis de secuencias reales de decisión pueden revelar qué estímulos se retienen o ignoran y cómo la estructura grupal influye en su uso. Esto ayudaría a que el marco conceptual evolucione hacia una herramienta operativa basada en evidencias.

- Integrar el cuestionamiento estructurado y la conciencia sobre sesgos en la formación en seguridad de aludes.
- Probar estímulos de decisión, listas de verificación y nudges en escenarios realistas de montaña.
- Fomentar una cultura de expresión abierta donde las observaciones contradictorias y las alternativas conservadoras puedan plantearse sin penalización social.

8. CONCLUSION

Las trampas heurísticas explican por qué incluso individuos y grupos técnicamente cualificados pueden tomar decisiones erróneas en terrenos de aludes. La familiaridad, el compromiso, la autoridad, la prueba social y la escasez pueden influir en el juicio, incluso cuando hay información objetiva disponible. La solución no es asumir que la experiencia elimina los sesgos, sino diseñar procesos de decisión que expongan los supuestos y fomenten la reevaluación.

Herramientas como el razonamiento zetético, las listas de verificación, el análisis premortem, el disentimiento estructurado, la generación de alternativas y los nudges apoyan —en lugar de reemplazar— el conocimiento técnico, el juicio experto y la observación en el terreno. Este marco conceptual debe probarse mediante ejercicios de formación, estudios de campo y análisis de decisiones reales.

La idea central es procedimental: una mejor información técnica es esencial, pero insuficiente si el proceso de decisión ignora evidencias contradictorias o desalienta la reevaluación. Hacer que el proceso de decisión sea transparente —destacando supuestos, cambios, disentimientos y factores que activarían elecciones

alternativas— complementa los métodos existentes de gestión del riesgo de aludes sin sustituirlos.

REFERENCIAS

Ariely, D. 2008. Predictably Irrational: The Hidden Forces That Shape Our Decisions.
Broch, H. Zététique: L'Art du Doute.
Gawande, A. 2009. The Checklist Manifesto: How to Get Things Right.
Kahneman, D. 2002. Nobel Prize in Economics for work on heuristics and biases.
Kotler, P. Marketing Management.
Lovallo, D., and O. Sibony. 2010. The Case for Behavioral Strategy. McKinsey Quarterly.
McCammon, I. 2004. Heuristic Traps in Avalanche Terrain. International Snow Science Workshop.
Moretti, S., A. Edmüller, and T. Wilhelm. Neuro-Marketing Strategies.
Thaler, R. 2017. Nobel Prize in Economics for contributions to behavioral economics.
Thaler, R., and C. Sunstein. 2008. Nudge: Improving Decisions About Health, Wealth, and Happiness.

LLISCAMENTS BASALS AL TER-FRESER DURANT LA TEMPORADA 2025-2026: CARACTERITZACIÓ I CAUSES D'UN EPISODI INSÒLIT

Santiago Manguán Esteban [(1)], Francesc Vilar Bonet [(1)], Carles García-Sellés [(1)], Jordi Pons Otàlora [(1)], Glòria Martí Domènech [(1)], Manuel Carmona Salcedo [(1)]

(1) Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. santiago.manguan@icgc.cat, francesc.vilar@icgc.cat, jordi.pons@icgc.cat, carles.garcia@icgc.cat, gloria.marti@icgc.cat, mcarmonageo@gmail.com

PARAULES CLAUS: lliscament basal, allau, Pirineu Oriental, cartografia d'allaus, Sentinel, perfil estratigràfic, SNOWPACK.

INTRODUCCIÓ

Durant la temporada hivernal 2025-2026 es va registrar un nombre de lliscaments basals (LB) al Ter-Freser molt superior a l'habitual. En aquest treball s'ha recollit la informació sobre la caiguda de LB, tant la trobada per treball de camp com la cartografiada a partir d'imatges de satèl·lit. A continuació s'han caracteritzat les zones de sortida des del punt de vista de la cota i orientació, així com el tipus de sòl. Els perfils estratigràfics dels dies amb més activitat allavosa han estat estudiats i contrastats amb altres episodis en què no s'ha detectat caigudes de LB per tal de trobar els trets més propicis per a l'activitat d'allaus. L'interès de l'estudi dels LB rau en la seva difícil predictibilitat: es diferencien de les allaus de placa seca perquè la ruptura es produeix a la interfície neu–sòl i es mobilitza tot el gruix del mantell. L'aigua líquida a la interfície neu–sòl és el principal mecanisme de reducció de la fricció basal i d'afavoriment del lliscament (Clarke i McClung, 1999; Mitterer i Schweizer, 2012; Fees et al., 2025).

PRECEDENTS HISTÒRICS

El registre de LB caiguts al Ter-Freser les 34 temporades precedents a la 2025-2026 indica una activitat baixa d'aquesta tipologia d'allau, així com una distribució interanual irregular. A la figura 1 es representa l'evolució temporal del nombre de LB. Entre les temporades 1991-92 i la 2025-2026 s'havia registrat un total de 32 allaus, gairebé un per temporada. Hi ha hagut fins a 22 temporades sense cap registre de LB. Cal destacar la temporada 1995-96, que amb un total de 9 LB ha registrat més del doble que qualsevol altre temporada prèvia a la 2025-26. Com a mínim una d'aquestes allaus va assolir mida 4 i va afectar una infraestructura ferroviària així com dos camins. També és destacable l'allau que el 23 de març de 2024 va acabar amb la vida d'un excursionista al Torrent de la Balma. La temporada hivernal 2025-2026 s'ha registrat 66 LB, més del doble que els coneguts prèviament.

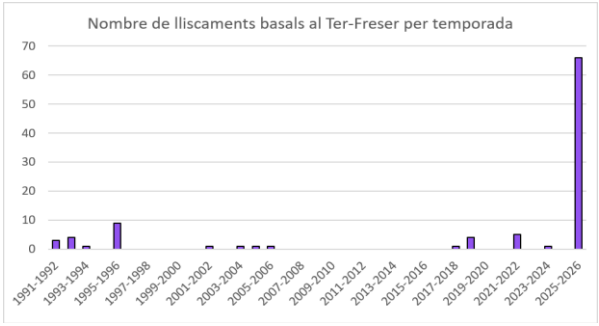


Figura 1 – Evolució interanual del nombre de lliscaments basals registrats al Ter-Freser.

Des de la temporada 2014-15 el Butlletí de Perill d'Allaus per al Pirineu de Catalunya, elaborat per l'ICGC, inclou els problemes per allaus seguint els estàndards de l'European Avalanche Warning Services (EAWS). Entre la citada temporada i la 2024-25 la situació de LB no havia estat mai predita com a problema d'allaus al Ter-Freser.

DADES I METODOLOGIA

L'ICGC registra i cartografia les allaus caigudes a Catalunya, que queden emmagatzemades a la Base de Dades d'Allaus de Catalunya (BDAC). Les allaus són observades per persones i trameses a l'ICGC per diferents vies, com ara empreses d'observació nivometeorològica, cossos de la Generalitat de Catalunya, personal d'estacions d'esquí, professionals o aficionats a disciplines de muntanya hivernal o, de manera creixent, xarxes socials i mitjans de comunicació. Pels canals citats l'ICGC va recollir un total de 26 lliscaments basals entre els dies 4 de gener i 21 de maig de 2026.

La cobertura espacial de les observacions realitzades per humans no és completa i, a més, està limitada per l'afluència al terreny i la visibilitat. Amb el propòsit d'incrementar les observacions de LB s'ha accedit a imatges de satèl·lit a partir de les

dades de la constel·lació Sentinel, proporcionades pel programa Copernicus de la Unió Europea. S'ha treballat amb imatges de 26 dies diferents entre gener i maig de 2026, amb una freqüència irregular pel fet que la nuvolositat no permetia registrar imatges de sòl. La comparació d'imatges successives de Sentinel ha permès localitzar i cartografiar 40 LB més al Ter-Freser. L'ús de la teledetecció i en concret de les imatge Sentinel per identificar activitat d'allaus ocorreguda és un recurs operatiu des de la dècada de 2010 per diversos centres d'estudi de les allaus (Lato et al., 2012; Eckerstorfer et al., 2019 i Abhinav et al., 2025).

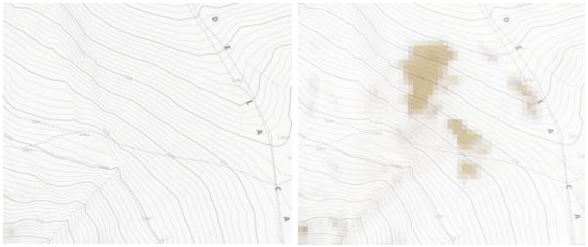


Figura 2 – Detall de les imatges de Sentinel dels dies 8 de febrer (esquerra) i 23 de febrer (dreta) sobre un mapa topogràfic del vessant sud-oest del Balandrau. A la imatge de la dreta s'aprecien diferents zones de sortida, la més gran de les quals té un àrea de 1,4 ha. A la zona de la carena s'aprecien deflacions produïdes pel vent.

El tractament d'imatges Sentinel ha permès augmentar en un 153 % el nombre d'allaus observades, incrementant la cobertura espacial a zones menys freqüentades.

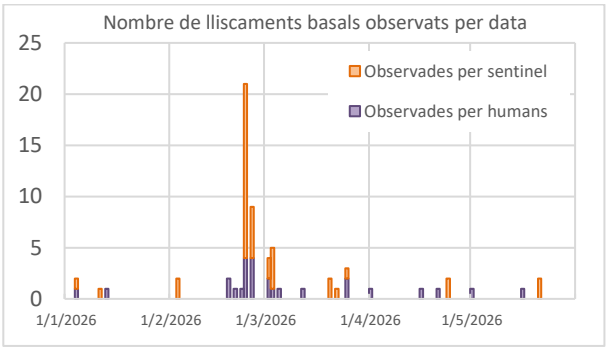


Figura 4 – Evolució temporal del nombre de LB observats al llarg de la temporada 2025-2026.

A la figura 4 s'observa el nombre de LB al Ter-Freser per data. La distribució temporal presenta un degoteig d'activitat distribuït per 130 dies, amb un màxim marcat d'activitat durant la segona quinzena de febrer i primera setmana de març.

COTA I ORIENTACIÓ

Un cop cartografiats els 66 LB, s'ha assignat a cadascun d'ells una cota màxima i una orientació a la zona de sortida. Cal considerar que hi ha menys superfície de terreny per a les cotes més altes. La següent gràfica representa el nombre de LB registrats per km² de terreny a cada cota.

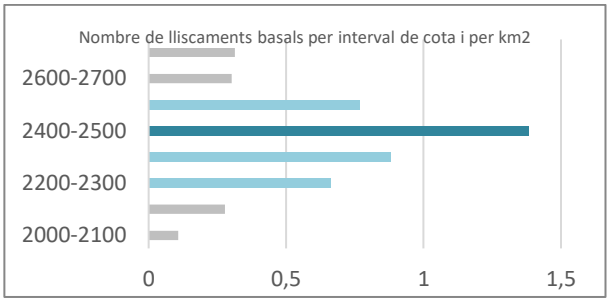


Figura 5 – Distribució del nombre de lliscaments per kilòmetre quadrat observat a cada rang de cota durant la temporada 2025-2026 al Ter-Freser.

El rang de cota més propici a la caiguda de LB ha estat entre 2200-2600 m, amb un màxim entre 2400 i 2500 m, a on es registrava 1,4 LB cada km².

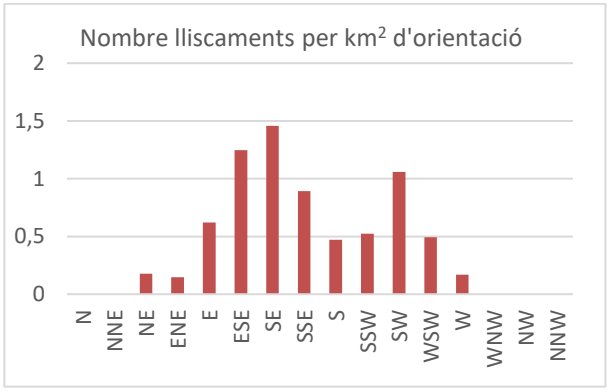


Figura 6 – Distribució del nombre de LB per kilòmetre quadrat observat a cada orientació durant la temporada 2025-2026 al Ter-Freser.

També s'ha classificat els LB en funció de l'orientació de la cota de sortida. Es pot observar que quasi no hi ha registres de LB a les orientacions més obagues i que es concentren en el terreny més assolellat. Tot i així la màxima activitat no es presenta a terreny orientat purament a sud, sinó desviada als vessants est.

CARACTERITZACIÓ DEL SÒL

Per a cadascun dels LB s'ha cartografiat la zona de sortida en forma de nou polígon. Per tal de caracteritzar el tipus de sòl que hi ha a les zones de sortida s'ha consultat la Cartografia dels Hàbitats del Parc Natural de les Capçaleres del Ter i del Freser, elaborada per Guardiola, M. et al.

A la citada Cartografia es classifica el terreny del citat Parc en funció del tipus de vegetació o sostrat rocós. S'ha determinat l'àrea de cada tipus de

substrat en les zones de sortida dels LB caiguts. Altrament s'ha determinat l'àrea total de cada tipus de substrat en el conjunt del Parc. Dels 129 tipus de substrat presents al conjunt del Parc, només 17 hi apareixen a les zones de sortida.

Tipus de sòl	Freqüència PNCTF (%)	Freqüència zones de sortida (%)
Prats de *Festuca esquia*	7,5	54,1
Prats de *Festuca yvesii*	6,5	10,8
Prats de *Festuca paniculata*	0,9	5,3
Pedrusques silícies amb *Poa cenísia*	0,4	5,2
Tarteres silícies amb *Senecio leucophyllus*	2,0	2,8
Prats de *Calluna vulgaris*	1,4	2,6

Figura 7 – Taula amb la freqüència dels tipus de sòl més rellevants en l'ocurrència de LB al Ter-Freser durant la temporada 2025-26.

A la figura 7 hi apareixen els tipus de substrat que superen l'1 % de l'extensió de les zones de sortida dels LB i que, a més, tenen una major proporció a les citades zones de sortida que en el conjunt del Parc. La primera classe correspon a prats de *Festuca eskia*, que constitueix un 7,5 % de l'àrea del Parc però apareix en un 54,1 % de l'extensió de les zones de sortida de LB. Un 16,1 % més de l'extensió de les zones de sortida correspon a dues varietats diferents de *Festuca*, *yvesii* i *paniculata*. La llista es completa amb tarteres i pedrusques silícies amb vegetació herbosa i *Calluna vulgaris*, amb proporcions properes o inferiors al 5 % a les zones de sortida.

ESTRATIGRAFIA DEL MANTELL NIVAL: OBSERVACIÓ MANUAL I SIMULACIÓ

A continuació es presenten els perfils estratigràfics i les simulacions corresponents al període entre el 15 de febrer i el 5 de març, dates que acumulen la màxima activitat de LB de la temporada.

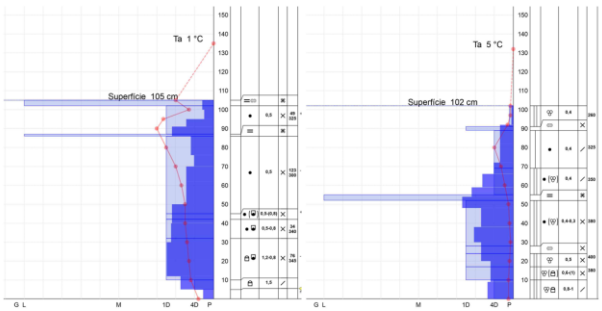


Figura 8 – Perfils estratigràfics realitzats a Coll de la Marrana, a 2.500 m i orientació est, els dies 18 (esquerra) i 26 (dreta) de febrer de 2026.

El perfil estratigràfic del 18 de febrer, data en què es va observar el primer LB de l'episodi, recull les condicions del mantell nival a 2.500 m a una orientació est. La neu es presenta seca a tot el seu gruix, amb temperatures negatives i a la base hi ha capes de facetes de mida grossa però arrodonint-se; la capa de duresa més baixa del mantell era la basal. El dia 26 de febrer la part inferior del mantell es presenta al voltant de 0 ºC, amb gra de fusió.

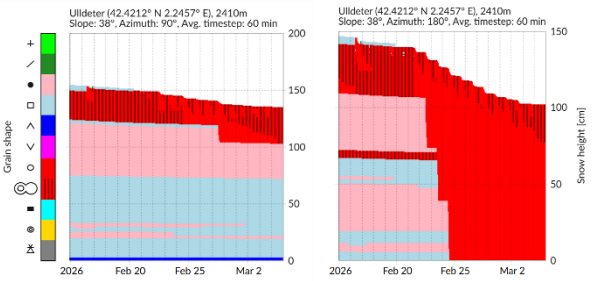


Figura 9 – Simulacions del model de mantell nival SNOWPACK pel període 15 de febrer a 5 de març de 2026, corresponents a Ulldeter, orientació est (esquerra) i orientació sud (dreta).

La simulació del model SNOWPACK per la mateixa orientació (E) i cota (2400-2500 m) no prediu la formació de gra de fusió a la base fins a principis d'abril. De fet, durant l'episodi de màxima activitat allavosa el resultat de la simulació al vessant E és un mantell format a la meitat inferior per facetes i amb una crosta de regel superficial, durant alguns dies en cicle diürn de fusió-regel. La simulació corresponent a l'orientació sud sí preveia la formació de gra de fusió a la base del mantell a partir del dia 24 de febrer.

RESULTATS I DISCUSIÓ

La no homogeneïtat de les observacions d'allaus impedeix classificar amb precisió una temporada com a insòlita o rècord. Tanmateix, un element que apuntaria en aquesta direcció és l'ocurrència de LB sense precedents coneguts, com els de Coma Ermada o Mulleres, en indrets fortament monitoritzats. A més, el nombre d'allaus registrat sense l'ús de satèl·lits ha sigut prop del triple que el de la segona temporada de major activitat.

Les imatges del satèl·lit Sentinel han millorat l'abast espacial i temporal de les observacions, però no de manera exhaustiva i amb una limitació d'escala derivada de la mida del píxel, que impedeix detectar LB de mida 1 i sovint també de mida 2.

No s'identifica un únic element del mantell nival associable a tota l'activitat de LB estudiada. Aquesta afirmació es pot concloure a partir de tres fets. En primer lloc, entre inicis de gener i finals de maig l'estratigrafia del mantell va evolucionar des

de configuracions plenament hivernals fins a mantells propis de primavera avançada. En segon lloc, es van registrar LB tant en zones sense una morfologia favorable a l'erosió o acumulació de neu com en indrets amb mantells en forma de congesta, més gruixuts i endurits. En tercer lloc, durant la temporada es van produir allaus successives a les mateixes zones de sortida, malgrat presentar estratigrafies diferents i, en els segons episodis, gruixos generalment inferiors.

Segons Mitterer et al. (2012), un mantell gruixut i sense capes febles definides afavoreix l'activitat de LB. Un major gruix incrementa la tensió sobre la interfície sòl-neu, mentre que l'absència de capes febles dificulta la ruptura interna i facilita el moviment del mantell en bloc. Els perfils estratigràfics de la temporada, com els que apareixen a la figura 8, mostren un mantell que compleix aquestes dues condicions i presenta, a més, una duresa basal baixa.

Altres temporades, com la 2005-2006 o la 2017-2018, van registrar gruixos similars o superiors sense una activitat destacada de LB. En comparar els perfils estratigràfics d'aquelles temporades amb l'actual, destaca la menor presència de crostes, especialment en profunditat. Aquestes no només aporten resistència mecànica al mantell, sinó que també dificulten la percolació d'aigua líquida cap a la base.

El paper de la vegetació també és rellevant. Tres varietats de *Festuca* constitueixen el 70 % del substrat sobre el qual ha lliscat la neu en els LB registrats, tot i ocupar només el 15 % del terreny. Dues varietats es troben amb molta freqüència al Parc Natural i no estan associades a activitat de LB, la *Festuca airoides* i la *Nardus Stricta*; aquestes es diferencien de les varietats que sí es troben a zones de sortida per tenir espigues curtes, d'entre 5 i 40 cm, mentre que les habituals a les zones de sortida es mouen entre 17-150 cm. La disposició i la mida de les espigues d'aquestes espècies poden afavorir la pèrdua de fricció i el lliscament de la neu. Cal destacar que aquesta vegetació era present a l'allau de Pla de Sallent del 1996 (F*estuca paniculata*) i a l'accident mortal de Torrent de la Balma de 2023 (*Festuca eskia*).

La temporada nival 2025-2026 al Ter-Freser va destacar pels episodis successius de nevada entre finals de desembre i mitjans de febrer. A mitjan febrer, a les cotes on habitualment es registren LB, s'acumulaven entre 100 i 150 cm de neu, principalment de gra fi o formes mixtes i sense crostes significatives. Entre el 16 i el 20 de febrer, l'augment de temperatura, lleugerament positiva a 2.500 m, juntament amb núvols baixos i alguns mm de pluja, va aportar aigua líquida al mantell, que va percolar fins al sòl i va transformar sovint els nivells basals en gra de fusió. El model SNOWPACK també indica la formació diària de gra de fusió superficial entre el 22 de febrer i el 5 de març, que podria donar lloc a percolació. En aquest període, del 18 de febrer al 5 de març, es va registrar la meitat dels LB de la temporada.

Mitterer et al. (2012) també proposen mecanismes de capil·laritat a la vegetació herbàcia com a origen de l'aigua líquida al contacte neu-sòl, fet que podria explicar l'activitat de LB en períodes sense percolació des de la superfície, com abans del 15 de febrer.

El 24 de febrer de 2026 es va predir per primera vegada el problema de lliscament basal al Ter-Freser, que va aparèixer al Butlletí de Perill d'Allaus durant 21 dies. Aquest fet representa una novetat per als professionals i aficionats que freqüenten aquest sector i zones adjacents. Cal continuar generant coneixement sobre aquesta situació per informar amb precisió sobre l'ocurrència d'aquestes allaus. Una aplicació immediata d'aquest estudi és la definició d'un llindar altitudinal, un ventall d'orientacions i uns tipus de vegetació prioritaris per efectuar perfils i sondejos del mantell nival, amb l'objectiu de millorar-hi la predicció.

REFERÈNCIES

CLARKE, J. AND MCCLUNG, D. 1999. Full-depth avalanche occurrences caused by snow gliding, Coquihalla, British Columbia, Canada. Journal of Glaciology, 45(151), 539–546.

ECKERSTORFER, M., VICKERS, H., MALNES E. AND GRAHN, J. 2019. Near-Real Time Automatic Snow Avalanche Activity Monitoring System Using Sentinel-1 SAR Data in Norway. *Remote Sens.* 2019, *11*(23), 2863; https://doi.org/10.3390/rs11232863.

GUARDIOLA, M., MERCADÉ, A., CARRERAS, J. 2021. Cartografia digital dels Hàbitats CORINE i dels Hàbitats d'interès Comunitari del Parc Natural de les Capçaleres del Ter i del Freser, escala 1:10.000.

MITTERER, C. AND SCHWEIZER, J. 2012. Towards a better understanding of glide-snow avalanche formation. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Anchorage, Alaska. 610-616

OLLER, P., MUNTÁN, E., MARTURIÀ, J., GARCÍA, C. AND MARTINEZ, P. 2006. Avalanche data in the Catalan Pyrenees. 20 years of avalanche mapping. Proceedings of the International Snow Science Workshop. Telluride, Colorado, 305–313

REDUCCIÓN DEL ÁREA DE BÚSQUEDA EN ACCIDENTES POR ALUD MEDIANTE DETECCIÓN AUTOMÁTICA CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y GEOLOCALIZACIÓN: EL SISTEMA SNOWFY

Francisco Manzano Gómez (1)

(1) Snowfy — KAPS Management Group, S.L. Avenida de Manoteras 30, B302, 28050 Madrid.
francisco.manzano@kaps.es

RESUMEN

En un accidente por alud, los desenlaces favorables comparten una circunstancia: alguien sabe dónde empezar a buscar. O los compañeros han seguido con la vista el arrastre de la víctima, o el enterramiento es parcial y algo asoma sobre la nieve una mano, un esquí, un gorro, una mochila. Esa señal reduce de golpe la superficie que hay que barrer con el ARVA. Las cifras lo confirman: la mortalidad del enterrado parcial es del 4,2 %, frente al 52,4 % del enterrado total (BRUGGER et al., 2011), y la ventana en la que la supervivencia supera el 90 % se ha acortado de 18 a 10 minutos (RAUCH et al., 2024).

Y ese margen es estrecho. FALK et al. (1994) situaron en unos 18 minutos la primera fase de la curva de supervivencia, aquella en la que la probabilidad supera el 90 %; después, la asfixia —causa de alrededor del 75 % de las muertes por alud— provoca una caída que deja la supervivencia en torno al 30 % a los 35 minutos. RAUCH et al. (2024) acortan esa primera fase de 18 a 10 minutos, y sitúan el rescate entre compañeros en 10 minutos de media frente a los 90 del rescate organizado: solo el primero opera dentro de la ventana útil. La curva, además, no es universal (HAEGELI et al., 2011; PROCTER et al.,2016).

Este trabajo presenta Snowfy, un sistema que combina tres funciones de envió de una alerta frente un alud: (1) detección automática de accidentes mediante inteligencia artificial, (2) activación manual mediante un pequeño dispositivo. (3) un botón de S.O.S desde la app, (figura 1) activando la alerta y enviando la última posición disponible, esta alerta es enviada al círculo de protectores designado por el usuario y, cuando existe integración previa, al servicio profesional conectado o asignado a la zona. Snowfy complementa al DVA el sondeo, la búsqueda visual y los procedimientos profesionales. Se discuten las limitaciones derivadas del arrastre posterior, la cobertura, la autonomía y la atenuación de las señales GPS y móviles

PALABRAS CLAVE: aludes, DVA, Bengala digital, área de búsqueda, geolocalización, inteligencia artificial, rescate.

INTRODUCCIÓN

La búsqueda de una persona sepultada por un alud comienza antes de la localización fina con ARVA: primero es necesario delimitar el sector probable de enterramiento. Cuando no existe un último punto visto ni indicios visibles, esta fase puede consumir minutos decisivos y obligar a rastrear una superficie extensa. Por ello, disponer con rapidez de información sobre la posición, el sentido de desplazamiento y la trayectoria de la víctima puede mejorar la definición del área inicial de búsqueda.

Snowfy pretende actuar como referencia digital cuando no existe un testigo fiable. El sistema combina tres modos de activación: detección automática mediante un modelo de inteligencia artificial que analiza los sensores inerciales y de posición del teléfono, un dispositivo de tan solo 22 gramos que lo podemos activar manualmente en caso de necesidad y una app con un botón de S.O.S para activar la alerta (figura 1). En el equipo de Snowfy nos gusta definir este concepto como "bengala digital del siglo XXI" es una señal invisible que puede activarse manual o automáticamente y que no solo comunica que se ha producido un accidente, sino que aporta mucha información para



Figura 1. Tres modos de activación: SOS desde la aplicación Snowfy, dispositivo físico Helpysafe conectado por BLE y detección automática mediante inteligencia artificial.

poder ayudar y siempre llega a alguien. Con cualquiera de estos 3 métodos lanzamos una alerta a los servicios de rescate y a nuestro circulo de confianza de lo sucedido con la ubicación de la víctima; con snowfy reducimos el área inicial de búsqueda mediante la última posición conocida y la trayectoria; y una

doble vía de aviso; una al círculo de protectores designado por el usuario y el otro cuando existe integración previa un servicio de rescate al servicio profesional conectado o asignado a la zona. **Snowfy no sustituye al DVA**: lo complementa aportando información previa para decidir dónde comenzar la búsqueda fina con Arva, pala y sonda, sin modificar los protocolos ni el equipamiento obligatorio.

DESARROLLO

Snowfy integra una aplicación móvil, un dispositivo manual de 22 g conectado por Bluetooth de baja energía y un modelo de detección automática. La alerta puede iniciarse desde el botón SOS, mediante la tracción del dispositivo o automáticamente, sin necesidad de tocar el teléfono.

DETECCIÓN AUTOMÁTICA Y DATOS DE LA ALERTA

El modelo analiza los sensores inerciales y de posición para reconocer secuencias compatibles con un accidente: pérdida brusca de velocidad, impactos, fases de vuelo o detención anómala. Detecta un patrón que debe interpretarse junto con el contexto; no garantiza por sí solo que el evento sea un alud, pero si detecta una anomalía.

La alerta incorpora identificación de la víctima, contacto, hora, últimas coordenadas de su posición, traza antes y después del accidente, velocidad antes y después del accidente, altura antes y después del accidente con el desnivel producido y parámetros cinemáticos. La consola los representa sobre cartografía para apoyar la evaluación y la asignación de recursos. Su disponibilidad depende de la precisión, la cobertura y los permisos concedidos. (figura 2)

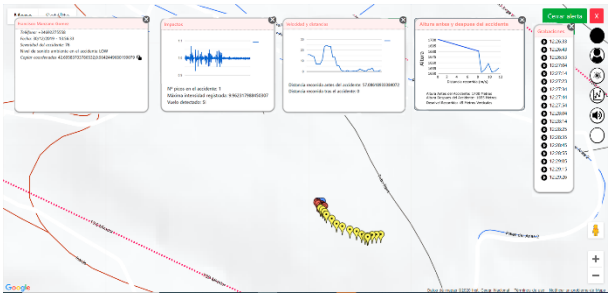


Figura 2. Ejemplo de consola profesional con posición, trayectoria y parámetros del evento. La información apoya la decisión operativa, pero no sustituye la valoración del equipo de rescate.

CADENA DE AVISO

La geolocalización dirige la alerta al círculo de confianza y, cuando existe integración previa, al servicio profesional designado para la zona. Esta función depende de los acuerdos, la configuración y la cobertura de cada territorio.

Snowfy puede detectar donde se encuentra la víctima y enviar la alerta a los servicios de rescate más cerca del accidentado. Las áreas de la figura son configurables, no fronteras administrativas, y requieren acuerdos previos. (figura 3)



Figura 3. Ejemplo conceptual de asignación geolocalizada de alertas. La posición determina la zona operativa y el servicio configurado. Las áreas no son límites administrativos.

REDUCCIÓN DEL ÁREA INICIAL DE BÚSQUEDA

En el escenario representado, dos esquiadores parten del mismo punto y siguen recorridos diferentes. Snowfy conserva para cada víctima la trayectoria de los 10 segundos anteriores, registra su propio instante de detección automática o activación manual y continúa trazando el desplazamiento durante el mismo alud mientras

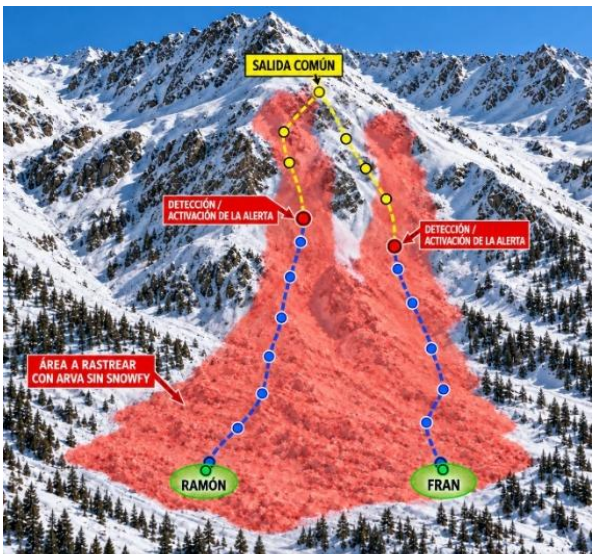


Figura 4. Dos víctimas parten del mismo punto, activan la alerta en lugares diferentes y son arrastradas por el mismo alud. El amarillo representa los 10 segundos anteriores; el rojo, la detección o activación; y el azul, la trayectoria durante el alud.

exista señal. Así se obtienen dos referencias iniciales distintas para comenzar la comprobación con DVA, (figura 4) que siempre deben combinarse con los indicios, la dinámica del alud y las instrucciones del responsable del rescate. Esto nos ayuda a poder coordinar el rescate y empezar a buscar a varias víctimas a la vez en una misma avalancha.

GEOMÉTRICO DE REFERENCIA

Escenario	Superficie	% depósito	Reducción
Sin Snowfy: depósito 380 × 120 m	45.600 m²	100 %	-
Con Snowfy: zona Ø 16 m	201 m²	0,44 %	99,56 %
Con Snowfy: zona Ø 12 m	113 m²	0,25 %	99,75 %

Tabla 4.1. Comparación geométrica entre el área general del depósito y dos posibles zonas iniciales de búsqueda con Snowfy. No es una medición de eficacia clínica ni garantiza la localización final.

Cuanto mayor sea la superficie del alud, mayor puede ser la reducción relativa respecto al depósito completo. La reducción efectiva será menor si la víctima continúa desplazándose después de la última lectura, si la precisión GPS empeora o si la alerta no se transmite. La zona calculada es un punto de inicio y un vector de trayectoria, no la posición de enterramiento.

COMPLEMENTARIEDAD CON LOS MEDIOS DE RESCATE

Snowfy no sustituye al DVA ni reduce la necesidad de llevarlo y saber utilizarlo. El ARVA continúa siendo el medio principal del rescate entre compañeros para localizar una señal emitida desde debajo del manto. El sondeo, la búsqueda visual, los perros y otros medios profesionales aportan capacidades adicionales. Snowfy añade detección, aviso, última posición y trayectoria previa, pero no elimina ninguna recomendación de equipamiento, formación o autoprotección.

PROTECCIÓN PERSONAL Y PROFESIONAL

El usuario puede compartir voluntariamente su ubicación con su círculo de confianza. En el ámbito profesional, la misma arquitectura protege a trabajadores de estaciones y equipos de montaña. Ante un accidente, desde Snowfy puedes ver la ubicación en tiempo real de tu circulo de confianza y la última posición, todo ello sin necesidad de haber activado Snowfy, de esta manera tu circulo de confianza podrá ver en la zona de donde te encuentras y dar la señal de aviso a los rescatistas.

El intercambio requiere consentimiento, es revocable y debe limitarse a la seguridad.(figura 5)



Figura 5. Dentro de tu circulo de confianza o grupo de trabajo, en cualquier momento desde la app podrás seleccionar a la persona a localizar y podrás ver en tiempo real donde se encuentra. Todo esto sin necesidad de activar la alerta por ninguna de las partes.

LIMITACIONES

La última posición transmitida no es la posición de enterramiento. El cuerpo puede ser arrastrado decenas o centenares de metros después de la última lectura válida. La precisión GPS varía con el relieve, la orientación del teléfono y las condiciones ambientales. Sin cobertura de datos, el aviso puede almacenarse y enviarse en diferido; el frío reduce la autonomía y el manto nival atenúa las señales GPS y móviles. La detección automática puede producir falsos positivos y falsos negativos, por lo que requiere calibración y validación independiente.

PROPUESTA DE VALIDACIÓN

Se propone realizar un programa piloto en colaboración con estaciones de esquí, servicios de rescate y centros de investigación. El objetivo será validar el funcionamiento integral de Snowfy en distintos escenarios y condiciones de montaña. El pilotaje evaluará; 1) la correcta activación de alerta mediante sus tres modalidades , botón SOS, dispositivo físico y detección automática mediante inteligencia artificial; 2)la precisión y envío de la ubicación, trayectoria y datos asociados al accidente en diferentes condiciones de cobertura, relieve y climatología; 3) la reducción del área inicial de búsqueda en situaciones de alud, comprobando los procedimientos con y sin la información aportada por snowfy; 4) la recepción, interpretación y gestión de las aletas por parte de equipo profesional de rescate; y 5) el funcionamiento del círculo de confianza o equipo interno, incluyendo la recepción simultanea del aviso y el acceso autorizado a la última posición disponible.

CONCLUSIONES

La reducción de la ventana inicial de supervivencia refuerza el valor de cualquier información que permita comenzar antes una búsqueda bien dirigida. Snowfy puede aportar detección automática, última posición, trayectoria previa y una cadena de aviso simultánea. En el escenario de referencia, la reducción geométrica supera el 99 %, pero esa cifra no representa la reducción real en todos los aludes ni la posición final de la víctima.

El siguiente paso es medir su contribución en ejercicios comparados y condiciones reales. Hasta disponer de esa validación, Snowfy debe presentarse como una herramienta de apoyo complementaria al ARVA, RECCO y los procedimientos profesionales de rescate.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRUGGER, H.; PAAL, P.; BOYD, J. (2011). Prehospital resuscitation of the buried avalanche victim. High Altitude Medicine & Biology, 12(3), 199-205. https://doi.org/10.1089/ham.2011.1028

FALK, M.; BRUGGER, H.; ADLER-KASTNER, L. (1994). Avalanche survival chances. Nature, 368, 21. https://doi.org/10.1038/368021a0

HAEGELI, P.; FALK, M.; BRUGGER, H.; ETTER, H. J.; BOYD, J. (2011). Comparison of avalanche survival patterns in Canada and Switzerland. CMAJ, 183(7), 789-795. https://doi.org/10.1503/cmaj.101435

PROCTER, E. et al. (2016). Burial duration, depth and air pocket explain avalanche survival patterns in Austria and Switzerland. Resuscitation, 105, 173-176. https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2016.06.001

RAUCH, S.; FALK, M.; STRAPAZZON, G.; BRUGGER, H. (2024). Avalanche Survival Rates in Switzerland, 1981-2020. JAMA Network Open, 7(9), e2435253. https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.35253

BASE DE DADES D'ACCIDENTS PER ALLAU A ANDORRA: QUÈ ENS APORTA LA CARTOGRAFIA?

Aina Margalef [(1)]; Anna Albalat [(1)] i Laura Trapero [(1)]

(1) Andorra Recerca + Innovació. Av. Rocafort, 21-23, 3a planta. AD600, St Julià de Lòria (Andorra). amargalef@ari.ad

PARAULES CLAUS: Accidents per allau, Andorra, Base de dades.

RESUM

Aquest treball actualitza i amplia la base de dades georeferenciada d'accidents per allau a Andorra a partir de la informació disponible a les bases de dades dels equips de rescat, a la premsa i més recentment, a les xarxes socials. S'han recopilat i cartografiat 122 accidents i incidents ocorreguts en àmbit de muntanya entre 1972 i 2026. L'objectiu és analitzar els factors espacials, temporals, topogràfics i nivològics associats als accidents, així com avaluar les relacions existents entre aquests factors. Aquest estudi posa de manifest el valor de la cartografia i la georeferenciació per millorar la comprensió, la prevenció i la gestió del risc d'allaus en l'àmbit de muntanya.

INTRODUCCIÓ

Les allaus han format part de la realitat d'Andorra al llarg de la seva història, però no va ser fins el 1964 que els serveis d'emergència van documentar la primera víctima mortal, a la carretera del Port d'Envalira. Des d'aleshores, s'han registrat 23 víctimes mortals per allaus, així com nombrosos ferits i danys a infraestructures. La georeferenciació dels esdeveniments ha permès fer una anàlisi detallada dels factors del terreny. En aquest treball hem actualitzat les dades presentades a Margalef et al. (2024), i n'hem ampliat l'anàlisi dels principals paràmetres topogràfics i temporals.

METODOLOGIA I RESULTATS

Pel que fa a la naturalesa de les dades utilitzades i a la metodologia emprada per a la seva recopilació us remetem a Margalef et al. (2024).

La mostra seleccionada per realitzar aquest treball consta de les allaus registrades a Andorra que tenen un component humà: o bé allaus naturals que hagin causat morts o ferits; o bé allaus accidentals, originades per una sobrecàrrega humana, tant si les víctimes han estat arrossegades com si han pogut escapar-ne; i en tots els casos s'ha exclòs aquelles allaus que fossin en l'àmbit urbà. Així, el primer accident fora de l'àmbit urbà reportat a Andorra és de l'any 1972. Des d'aleshores, s'han registrat un total de 122 accidents i incidents, amb 21 víctimes mortals i 35 ferits de diversa gravetat (Fig. 1). En 45 dels accidents hi ha hagut un total de 77 persones atrapades.

Per analitzar la tendència en el nombre d'accidents, s'han filtrat només aquells en què hi han intervingut els equips de rescat, amb l'objectiu de tenir la màxima homogeneïtat de la informació disponible per tot el període. Tot i que el nombre d'accidents ha anat augmentant, així com el nombre de practicants d'esports de muntanya, el nombre de víctimes mortals no ho ha fet (Fig. 1). Aquesta situació és similar en diferents estudis realitzats a Europa (Martí et al., 2023; EAWS fatalities).

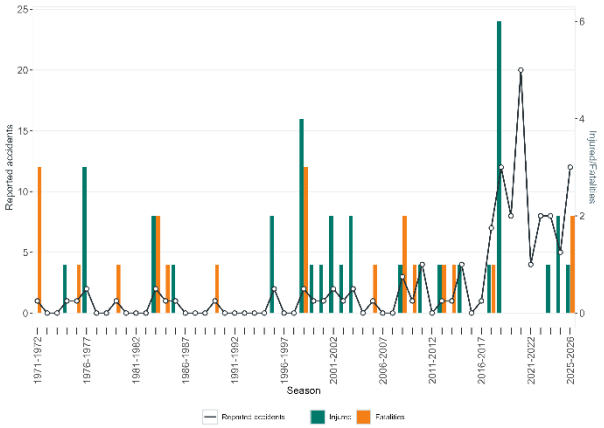


Figura 1 – Nombre d'accidents registrats en l'àmbit de muntanya i de persones ferides i mortes per allau a Andorra durant el període 1972-2026. N=122.

D'altra banda, si considerem el nombre de víctimes mortals en relació amb el nombre d'accidents, podem observar una lleugera tendència a la baixa, especialment en l'última dècada. Cal destacar l'elevat nombre de víctimes en la dècada del 06/16, amb 5 persones mortes en 4 accidents mortals (Fig. 2).

Distribució espacial

Pel que fa a la localització, en les dues últimes dècades el nombre d'accidents en zones de muntanya fora les pistes d'esquí ha augmentat; probablement a causa de la popularització de

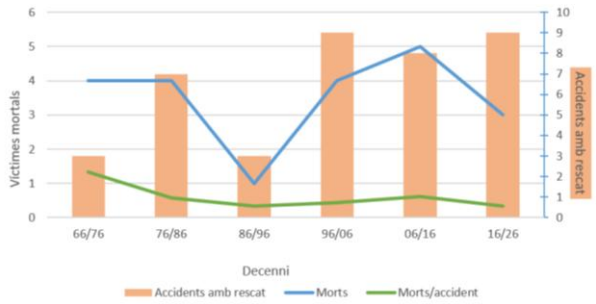


Figura 2 – Nombre d'accidents amb rescat, nombre de víctimes mortals i relació víctimes/accident; classificat per dècada. N=122.

l'esquí de muntanya (Fig. 3). Cal tenir en compte que la majoria d'accidents son d'esquí de muntanya (50%), seguit per esquí o snowboard fora pista (31%). En contrast amb els Pirineus catalans, on aquesta activitat és gairebé inexistent, un 6% dels accidents A Andorra son per moto de neu (https://www.acna.cat/estadistiques-daccidents/).

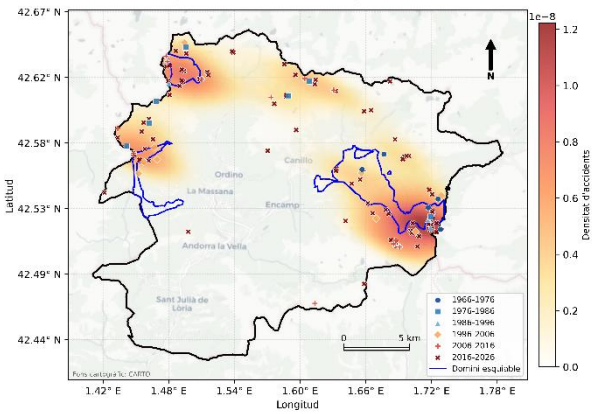


Figura 3 - Mapa de calor i densitat espacial dels accidents per allau a Andorra, per decenni.

Característiques del terreny

Orientació: La majoria de les allaus tenen la seva zona de sortida en els vessants NE i E (22% cadascun), seguit per N i SE (15% cadascun) (Fig. 4a), similar al que s'observa a la resta dels Pirineus catalans (Bacardit et al., 2016; ICGC, 2020).

Altitud: Pel que fa a l'altitud de la zona de sortida, un 53% de les allaus s'han desencadenat en el rang 2400-2600 m, seguit de lluny pels intervals de 2600-2800 m (21%) i de 2200-2400 m (15%).
Aquest resultat mostra altituds lleugerament superiors a les dades publicades als Pirineus catalans, on el 31% dels accidents mortals es produeixen en l'interval de 2100-2400 m (Bacardit et al., 2016; Martí et al., 2023) o en regions com els Alps suïssos (2400 m) o el Canadà (2000 m; Schweizer i Jamieson (2001)).
Pel que fa a l'angle de sortida, més de la meitat d'allaus registrades tenen l'origen en angles d'entre 36-40º (56%), un 19% entre 41-45º i un 13% entre 31-35º.

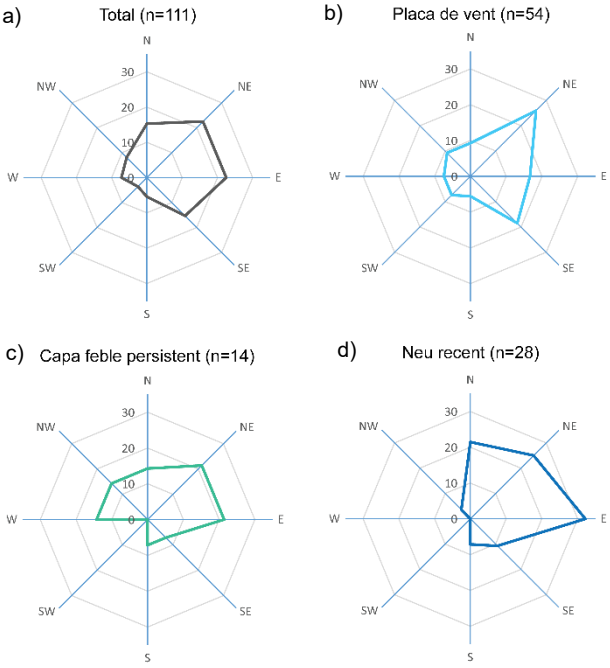


Figura 4 - Freqüència d'accidents segons l'orientació de la zona de sortida, a) en general i b, c, d) separat per problemes d'allaus segons European Avalanche Warning Services (EAWS).

ATES: Segons la classificació ATES d'Andorra (https://visor.allaus.ad/), el 89% de les allaus registrades tenen la seva zona de sortida en terreny complex i només l'11% la tenen en terreny exigent, xifres similars a les publicades al Canadà (Jamieson et al., 2007).

Característiques del mantell

Pel que fa a l'anàlisi nivometeorològica dels accidents, des del 1999 fins al 2016 s'ha utilitzat el BPA emès per MeteoFrance, i des del 2016 en endavant, el publicat pel Servei Meteorològic Nacional d'Andorra. Pel que fa al problema d'allaus observat, en els accidents més recents aquesta informació s'inclou en els informes, i l'accés a les fotos, a la meteorologia prèvia i fins i tot a la cicatriu de l'allau facilita l'atribució a un dels problemes. En els casos d'accidents més antics s'ha utilitzat la informació recollida en diaris, informes i fotografies per deduir el problema d'allaus, però tot i així en la majoria dels casos no ha estat possible determinar-lo.

Grau de perill d'allaus: La majoria dels accidents han ocorregut amb un grau de perill 3 (44%) i 2

(39%), seguint la tendència predominant als Pirineus catalans veïns (ICGC, 2020; Martí et al. 2023) (Fig. 5). Hi ha dos accidents amb un grau de perill 1 per neu humida; i un accident per allau d'origen natural amb un grau de perill 5.

Problemes d'allaus: Pel que fa als problemes d'allaus observats, s'han reportat plaques de vent en el 50% dels casos, neu recent en el 27% i capes febles persistents (CFP) en el 16% dels accidents (Fig. 5). Cal tenir en compte però que, abans de la implementació dels problemes d'allaus de l'EAWS l'any 2015, les plaques dures surten referenciades sempre com a plaques de vent, ja que el concepte de capa feble persistent no estava estès. Per tant, el nombre d'accidents causats per capes febles persistents podria estar subestimat a favor del de plaques de vent.

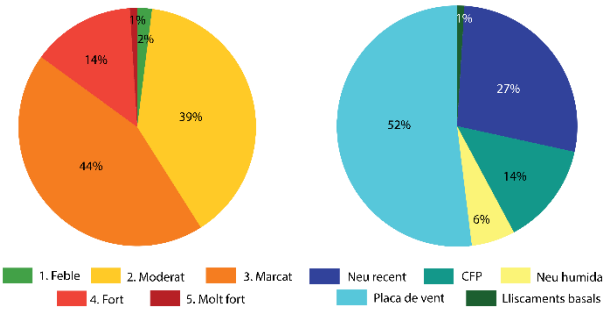


Figura 5 – Freqüència d'accidents segons el grau de perill d'allaus (dades a partir de 1999, n=100) i freqüència d'accidents segons el problema d'allaus observat (n=102).

Mida: La majoria de les allaus que han causat accidents són de mida D1 i D1,5 (44 %), i de mida D2 i D2,5 (40%). Pel que fa als accidents amb víctimes mortals per als quals es coneix la mida de l'allau (n = 9), 7 eren D3 i 2 eren D2.

Relació entre factors associats als accidents per allau:

Metodologia:

Per l'anàlisi estadística s'han creuat les següents variables: problema d'allaus amb mida i grau de perill amb mida (test de U de Mann-Whitney i la δ de Cliff), problema d'allaus amb orientació (test de Rayleigh) i mida de l'allau amb gravetat de l'accident (mètode de Wilson) per determinar quines d'elles poden tenir una relació significativa.

Resultats:

S'identifica una relació entre el problema d'allau observat i la mida de l'allau: les allaus accidentals associades a una CFP són significativament més grans que la resta (δ = 0,43; p = 0,0044), fet coherent amb la seva major capacitat de propagació de les fractures (Fig. 6).

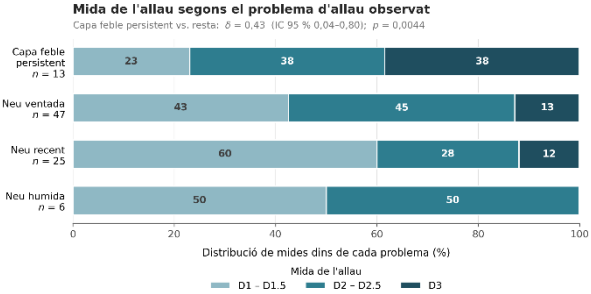


Figura 6 – Mida de l'allau segons el problema observat (n=91).

No es detecta una relació significativa entre el grau de perill previst i la mida de l'allau observada.

Pel que fa a les orientacions, s'ha aplicat el test de Rayleigh. S'observa una lleugera diferència entre la direcció mitjana pel problema de CFP (32º, p=0.840) respecte del de placa de vent i neu recent (70º, p=0.006; i 64º, p<0.001 respectivament) (Fig. 4). De totes maneres, amb una mostra tan petita aquests resultats no son significatius.

Per últim, podem afirmar que la mida de l'allau és determinant en la gravetat de l'accident, tal i com ja s'expressa en la definició de les mides (EAWS). A Andorra, la proporció d'accidents amb ferits o morts passa del 7,1% en les allaus D1–D1.5 al 60% en les de mida D3 (Fig. 7).

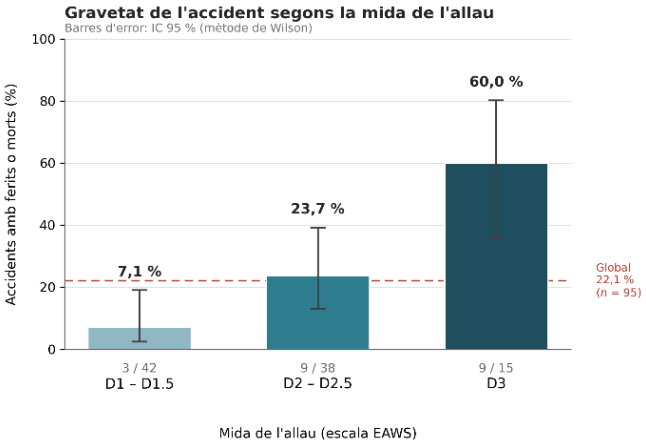


Figura 7 – Gravetat de l'accident (accidents amb ferits o morts) segons la mida de l'allau (n=95).

DISCUSSIÓ

La mida de la mostra és una limitació central d'aquest treball. Un cop desagregades les dades, algunes categories tenen una mostra massa petita perquè els tests estadístics puguin assolir prou potència. Això s'observa clarament en l'anàlisi d'orientació: la direcció mitjana de les CFP (32º) no és significativa (p=0,840), mentre que sí que ho són les de placa de vent (70º, p=0,006) i neu recent (64º, p<0,001), simplement perquè disposen de més casos. Tot i això, val la pena assenyalar que les tres direccions cauen dins un mateix sector

ampli N-NE-E, coherent amb el patró general (Fig. 4) i amb el descrit als Pirineus catalans, cosa que suggereix una tendència real encara que no es pugui confirmar estadísticament amb aquesta mostra. La relació entre el problema d'allau i la mida sí que dona un resultat significatiu (δ=0,43; p=0,0044), que mostra que les CFP produeixen allaus més grans, en línia amb la seva capacitat de propagació de fractura.
Per superar aquesta limitació, seria interessant ajuntar les dades d'Andorra amb les dels Pirineus catalans, atès que comparteixen règim nivometeorològic i orografia similars —com ja apunten les coincidències observades en aquest mateix estudi. Això multiplicaria la mostra disponible per a categories com les CFP i permetria confirmar amb prou potència si els diferents problemes d'allaus tenen realment orientacions diferenciades.
Finalment, no s'ha fet una anàlisi estadística separada dels accidents mortals (n=21) perquè les dades són insuficients per a cap test fiable. Les dades sobre víctimes mortals presentades es limiten a descriptives, sense inferència estadística.

CONCLUSIONS

Aquest treball actualitza i amplia l'anàlisi dels accidents per allau a Andorra en àmbit de muntanya des del 1972, a partir d'una base de dades de 122 accidents i incidents que permet caracteritzar de manera sistemàtica els factors del terreny, del mantell nival i de l'activitat humana.

La georeferenciació sistemàtica de cada esdeveniment ha estat determinant per extreure'n paràmetres morfològics i de terreny com l'orientació, l'altitud, l'angle de sortida o la classificació ATES — variables que permeten comparar de manera rigorosa els accidents d'Andorra amb els d'altres territoris pirinencs i alpins, i identificar tant les similituds (orientació predominant N-NE-E, graus de perill 2-3 dominants, terreny ATES complex) com les diferències (altituds de sortida lleugerament superiors a les del Pirineu català).

Pel que fa als resultats principals, es confirma que la mida de l'allau és un factor determinant en la gravetat de l'accident, amb una proporció de ferits o morts que passa del 7,1% en allaus D1-D1,5 al 60% en allaus D3. També s'ha identificat una relació significativa entre el problema d'allau observat i la mida (δ=0,43; p=0,0044), amb el problema de CFP generant allaus sistemàticament més grans, coherent amb la seva major capacitat de propagació. En canvi, la relació entre problema d'allau i orientació no ha pogut confirmar-se estadísticament, tot i que les tres categories analitzades mostren direccions mitjanes dins un mateix sector ampli (N-NE-E). Aquesta limitació s'atribueix a la mida reduïda de la mostra un cop desagregada per categories, i no a l'absència d'un patró real.

En definitiva, el treball demostra que un registre geoespacial precís dels accidents per allau permet caracteritzar-los millor, i és una condició necessària per a una millor prevenció i gestió del risc.

AGRAÏMENTS

Les autores d'aquest treball volen agrair la informació proporcionada al llarg dels anys als Bombers d'Andorra i a la Policia d'Andorra. També als responsables de pistes de les estacions d'esquí d'Andorra (Pal-Arinsal, Ordino-Arcalís, Soldeu - el Tarter i Pas de la Casa - Grau Roig), així com al Servei Meteorològic Nacional, per la informació compartida.

BIBLIOGRAFIA

ACNA: https://www.acna.cat/estadistiques-daccidents/; Últim accés 16/07/2026.

BACARDIT, M., MONER, I., GAVALDÀ, J., MARTÍ, G., GARCIA, C., 2016. Human-triggered slab avalanche properties from the Catalan Pyrenees, in: Proceedings of the ISSW, Breckenridge, CO, 541–547.

JAMIESON, B., HAEGELI, P., GAUTHIER, D. 2007. Avalanche accidents in Canada: 1997–2007, Volume 5. Revelstoke (BC): Canadian Avalanche Association.

MARGALEF, A., ALBALAT, A., APODAKA, J., PONS, M., TRAPERO, L. 2024. New georeferenced avalanche data base in Andorra: A brief characterization of accidents over the last 60 years, in: Proceedings of the ISSW, Tromsø, Norway, 1365-1372.

MARTÍ, G., CABRÉ, R., SOTERAS, I., ARQUÉ, R., GARCÍA-SELLÉS, C., MANGUAN, S., 2023. Analysis of 50 years of fatal avalanche accidents in the Catalan Pyrenees (1970–2020), in: Proceedings of the ISSW, Bend, OR, 741–744.

SCHWEIZER, J., JAMIESON, J.B., 2001. Snow cover properties for skier triggering of avalanches, Cold Regions Science and Technology, 33, 207–221.

EAWS: Fatal statistics: https://www.avalanches.org/fatalities/fatalities-statistics/, last access: 31 July 2024.

ICGC: https://www.icgc.cat/ca/Ambits-tematics/Serveis-dalerta/Allaus/Accidents-allaus/Estadistiques-daccidents-i-victimes-mortals-allaus-de-neu-Catalunya-1986-2020, last access: 31 July 2024.

JorTec 6
Neu i Allaus

VI Jornades tècniques de neu i allaus
22 d'Octubre de 2026
Barcelona

RETROSPECTIVA: 30 AÑOS DE IMPACTO. HISTORIA DE LOS RACS GAZEX EN CALTRANS

Ryan Marvin[1]* Cedric Larcher[1]

[1] *MND Safety, EE. UU. ryan.marvin@mnd.com*

RESUMEN: Desde principios de los años 1990, Caltrans utiliza sistemas Gazex RACS para el control de aludes en carreteras de montaña de California. Su implantación permitió reducir la exposición del personal y evolucionar hacia una gestión más remota y proactiva. La fiabilidad de disparo declarada pasó de alrededor del 75 % en 1999 a más del 99 % en la actualidad gracias al mantenimiento preventivo y a una organización técnica permanente. Más de 30 años de experiencia muestran también que el rendimiento depende del emplazamiento, la nieve, el terreno, la infraestructura y la existencia de soluciones de respaldo. La principal lección es que los RACS no eliminan el trabajo operativo, sino que lo desplazan hacia la predicción, el mantenimiento y la gestión estratégica.

PALABRAS CLAVE: GAZEX, control remoto de aludes, mitigación del peligro de aludes en carreteras, Caltrans, seguridad frente a aludes, RACS

1. INTRODUCCIÓN Y ENFOQUE DE LA REVISIÓN

La mitigación del peligro de aludes en carreteras de montaña difiere de las operaciones en estaciones de esquí: los organismos de transporte deben gestionar corredores extensos, mantener la movilidad pública y trabajar a menudo bajo trayectorias de alud que se originan en terrenos públicos adyacentes. Caltrans (California Department of Transportation) mantiene actualmente programas relevantes de aludes en tres distritos de Sierra Nevada y supervisa y gestiona de forma habitual aproximadamente 105 trayectorias de alud distribuidas en 18 zonas. La evolución desde las cargas explosivas manuales y la artillería militar hasta los sistemas fijos de control remoto constituye un caso de estudio a largo plazo sobre cómo la tecnología puede transformar un programa completo, y no solo el momento del desencadenamiento.

Este artículo es una revisión operativa retrospectiva, no un estudio controlado de rendimiento. Las cifras históricas y las observaciones proceden principalmente de entrevistas con Rob Bickor, supervisor de área y especialista en aludes de Caltrans, complementadas con experiencias publicadas de otros programas viarios norteamericanos. Por tanto, salvo indicación contraria, los valores cuantitativos deben interpretarse como métricas operativas declaradas.

2. DE LA ARTILLERÍA AL CONTROL REMOTO DE ALUDES

El control de aludes de Caltrans comenzó a principios de la década de 1950 en la U.S. Highway 50, en Echo Summit, y posteriormente se amplió a la State Route 88 a medida que se desarrolló el acceso invernal permanente a Kirkwood. Las primeras operaciones dependían en gran medida de cargas explosivas manuales y cañones sin retroceso de 75 mm (Figura 1). Según los testimonios, cada año se disparaban miles de proyectiles, pero la munición disponible procedía en gran parte de excedentes militares envejecidos. El aumento de los fallos de detonación y las incertidumbres de suministro generaron un fuerte incentivo para encontrar un método remoto más fiable.

Gazex ofrecía un modelo operativo muy diferente: explosores instalados de forma permanente que podían accionarse a distancia desde una zona protegida cuando la previsión y los criterios operativos justificaban la intervención. Caltrans instaló sus primeros sistemas en Echo Summit en 1992, seguidos de Carson Spur en 1993 (Figura 2), Carson Pass en 1994 y varias instalaciones en la zona de June Lake. Lee Vining Hill, finalizada en 2007, es la instalación completa más reciente descrita en la historia del programa. La red estatal cuenta actualmente con 53 explosores Gazex operativos.



Figura 1 – Cañón sin retroceso de 75 mm de Caltrans en Carson Spur, 1978.



Figura 2 – Disparo de un explosor Gazex en Carson Spur.

3. LA LECCIÓN DEL «EASY BUTTON»: LA FIABILIDAD EXIGE MANTENIMIENTO

La experiencia inicial de Caltrans demostró que facilitar el desencadenamiento no mejora automáticamente la eficacia de un programa de gestión del peligro de aludes. El disparo remoto redujo de forma importante el personal, la manipulación de explosivos, la preparación de equipos y la exposición meteorológica necesarios para una misión de control. Sin embargo, esa facilidad también favoreció una frecuencia de disparo muy elevada durante la primera década, en ocasiones sin la estructura de mantenimiento, la documentación y los protocolos de decisión necesarios para sostener un uso intensivo. Posteriormente, el personal de Caltrans describió esta etapa como el problema del «easy button» o «botón fácil».

Cuando Bickor se incorporó al programa hacia 1999, recuerda una fiabilidad de disparo cercana al 75 %. Los sistemas aún eran relativamente nuevos, pero un mantenimiento preventivo limitado fuera de temporada ya había generado problemas operativos. Caltrans reforzó después la inspección anual, la detección de fugas, la sustitución de componentes, las pruebas de pretemporada, la documentación y la continuidad técnica durante todo el año. Estas necesidades de mantenimiento también ayudaron a justificar personal permanente en la base de mantenimiento de Caples Lake, que anteriormente cerraba unos seis meses al año.

El efecto declarado ha sido notable. Con más de 500 disparos Gazex en un año promedio, Caltrans registra actualmente solo uno o dos fallos, lo que corresponde a una fiabilidad de disparo superior al 99 %. La lección es tanto organizativa como técnica: los RACS permanentes deben gestionarse como infraestructura a largo plazo, no como equipos que se instalan y luego se atienden mínimamente. WYDOT (Wyoming Department of Transportation) documentó un patrón similar, identificando el mantenimiento fuera de temporada, la detección de fugas y los disparos de prueba de pretemporada como factores clave para una operación invernal fiable (Yount y Gorsage, 2016).

INDICADORES OPERATIVOS SELECCIONADOS

53	>500	>99%	~32 años
Explosores Gazex operativos	Disparos Gazex / año promedio	Fiabilidad de disparo actual declarada	Vida útil alcanzada por numerosos explosores de Carson Pass

4. DE UNA MITIGACIÓN REACTIVA A UNA GESTIÓN PROACTIVA

Uno de los cambios operativos más importantes afecta al momento de intervención. Históricamente, el control mediante artillería exigía reunir personal, equipos y un acceso seguro durante los mismos episodios de tormenta que generaban el problema de aludes. Los sistemas fijos remotos permiten a Caltrans actuar con mayor facilidad cuando la predicción indica que el control es necesario, favoreciendo el paso de una respuesta principalmente reactiva frente a impactos de aludes a una gestión más temprana de la inestabilidad en desarrollo.

En Carson Spur, los 16 explosores Gazex pueden dispararse en aproximadamente 15 minutos. El cierre total de la carretera puede prolongarse varias horas según los resultados del desencadenamiento y las necesidades de retirada de nieve, pero la fase de control se ha acortado de forma considerable. Dos unidades Gazex adicionales instaladas en 2017 sustituyeron puntos que antes requerían más de una hora de acceso del personal para colocar cargas manuales de forma rutinaria. Este caso ilustra un beneficio recurrente de los RACS fijos: eliminar el acceso repetido a una zona de salida conocida durante las operaciones habituales.

HITOS DEL PROGRAMA

Años 1950	Inicio del control de aludes en Echo Summit	1972	State Route 88 abierta todo el año hasta Kirkwood
1992	Primer Gazex de Caltrans en Echo Summit	1993–94	Carson Spur y Carson Pass
2007	Lee Vining Hill completado	2013	Se identifica una necesidad amplia de renovación
2017	Carson Spur: renovación + 2 explosores	2023	DaisyBell incorporado al programa
2026	Fin de la principal renovación estatal	Próx.	5 casetas antiguas de Carson Pass por sustituir

5. LOS RACS COMO PARTE DE UN PROGRAMA DE MITIGACIÓN MULTITÉCNICA

Gazex no sustituyó todos los métodos convencionales. Caltrans sigue combinando RACS fijos con lanzadores

neumáticos LoCat, (Figura 3) cargas explosivas manuales y una DaisyBell incorporado en 2023. Cada método responde a una necesidad operativa distinta. LoCat sigue siendo útil cuando la geometría del terreno limita la cobertura de los sistemas fijos o cuando la acumulación de nieve puede inutilizar los explosores. Las cargas manuales mantienen su interés ante patrones de sobrecarga inusuales, zonas fuera de la red fija y problemas específicos como las cornisas. DaisyBell (Figura 4) aporta una opción móvil para sectores extensos y trayectorias de menor frecuencia que pueden adquirir importancia durante grandes episodios de nevada.

El uso continuado de varios sistemas refleja una limitación central de los RACS fijos: una instalación solo puede actuar sobre el terreno para el que fue diseñada. Trayectorias poco frecuentes, zonas de salida atípicas, cambios en la distribución de la nieve o restricciones administrativas pueden dificultar la justificación de una infraestructura permanente. Para Caltrans, la cuestión no es si una tecnología puede sustituir a todas las demás, sino cómo combinar métodos complementarios para asegurar cobertura y redundancia en diferentes escenarios operativos.

6. EXPOSICIÓN DEL PERSONAL Y REUBICACIÓN DE LAS TAREAS DE CONTROL DE ALUDES

Un beneficio operativo principal de los sistemas remotos es reducir la exposición repetida del personal durante las misiones rutinarias de control. Los métodos convencionales generan exposición no solo en el momento del desencadenamiento, sino también durante los accesos, la preparación de la artillería, la colocación de cargas manuales y, en caso de fallo, la recuperación de munición sin detonar. El personal de Caltrans informa de una disminución marcada de incidentes y situaciones de casi accidente tras consolidarse los RACS, aunque la información disponible no permite una comparación estadística controlada antes-después.

La conclusión más sólida es que cambió el mecanismo de exposición. Muchas misiones que antes requerían personal en un emplazamiento de artillería o dentro de terreno de aludes pueden iniciarse ahora desde una ubicación protegida por un operador cualificado. Al mismo tiempo, la responsabilidad se desplaza hacia la predicción, la disponibilidad operativa del sistema, las comunicaciones, el mantenimiento y la calidad de la decisión. El control remoto reduce así determinadas exposiciones en campo sin eliminar la necesidad de profesionales experimentados en aludes.



Figura 3: LoCat de Caltrans en Carson Spur, 2010.

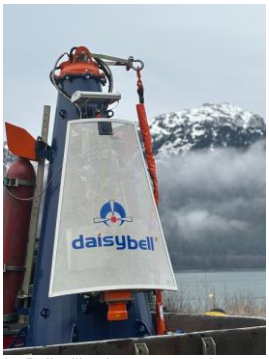


Figura 4: DaisyBell utilizado como complemento móvil de los RACS fijos.

7. LIMITACIONES ESPECÍFICAS DEL EMPLAZAMIENTO Y LECCIONES APRENDIDAS

Más de 30 años de uso han puesto de manifiesto limitaciones prácticas fáciles de subestimar durante el diseño inicial. Los primeros explosores carecían de elementos de drenaje, que después demostraron ser importantes cuando la nieve transportada por el viento humedecía los componentes de ignición. Las tuberías de suministro de gas plantearon otros retos de mantenimiento: las conducciones de polietileno enterradas podían resultar dañadas por fauna silvestre, mientras que las líneas de acero en superficie eran difíciles de reparar. Estas experiencias reforzaron la importancia de la calidad de instalación, la supervisión de

los contratistas, un diseño que facilite el mantenimiento y una metodología sistemática de diagnóstico.

El espesor de nieve sigue siendo una de las principales limitaciones físicas. En Carson Spur, hasta cinco de los 16 explosores pueden quedar sepultados durante un invierno, y Caltrans señala que el enterramiento se convierte en un problema operativo importante cuando la nieve alcanza aproximadamente 6 m en el emplazamiento del explosor. Los cambios de vegetación posteriores a incendios también han modificado la acumulación de nieve por el viento en algunos puntos. Las adaptaciones de diseño y unas cimentaciones más elevadas pueden aportar margen adicional, pero la selección del emplazamiento y el conocimiento local de la distribución de nieve siguen siendo críticos.

8. ALCANCE EFECTIVO, SELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO Y ESTRATEGIAS DE RESPALDO

La experiencia de campo de Caltrans también aconseja evitar un «alcance efectivo» único para cualquier sistema de control de aludes. Bickor describe casos en los que un disparo Gazex se asoció al desencadenamiento de una placa a más de 400 m, mientras que en otras condiciones apenas se movió nieve inmediatamente por debajo del explosor. Este contraste muestra que el desencadenamiento de un alud no puede reducirse a un radio fijo de onda de presión. La inestabilidad del manto nivoso, la geometría del terreno, la posición del punto de desencadenamiento y las trayectorias locales de flujo condicionan la eficacia operativa.

Varios explosores se reubicaron durante la década de 1990 y comienzos de la de 2000 a medida que los equipos identificaban los emplazamientos más eficaces. El microrelieve confinado de Carson Spur puede limitar la propagación de la onda de presión y exigir una cobertura relativamente densa; Carson Pass ofrece más opciones dentro de cuencas amplias, pero puede presentar mayores espesores de nieve. La lección práctica es que el análisis previo a la instalación debe combinar criterios de ingeniería con un conocimiento local detallado, y que los operadores deben estar dispuestos a adaptar la disposición cuando la experiencia a largo plazo revele puntos débiles.

Estas limitaciones explican por qué la redundancia sigue siendo esencial. Las instalaciones LoCat continúan aportando cobertura cuando el terreno no puede tratarse adecuadamente con RACS fijos o cuando los explosores quedan sepultados, mientras que DaisyBell añade flexibilidad durante grandes episodios de nevada. La filosofía operativa de Caltrans no es que cada RACS deba funcionar en cualquier circunstancia, sino que cada trayectoria de alud relevante debe disponer de una estrategia de respaldo viable.

9. GESTIÓN DE ACTIVOS A LARGO PLAZO Y PERSPECTIVAS FUTURAS

Muchas instalaciones originales de Caltrans funcionaron mucho más allá de la vida útil prevista inicialmente. La mayoría de los explosores de Carson Pass permanecieron en servicio unos 32 años antes de su sustitución en el verano de 2026. Caltrans identificó en 2013 la necesidad de un amplio programa de renovación y comenzó a sustituir unidades en Carson Spur en 2017 (Figura 5). A finales del verano de 2026 se preveía que casi todos los explosores y casetas técnicas del sistema estatal hubieran sido renovados durante la década anterior, quedando cinco casetas antiguas de Carson Pass previstas para una fase posterior.

La futura ampliación depende no solo de la necesidad técnica, sino también de la financiación, las autorizaciones de uso del suelo y los permisos de uso especial en terrenos del U.S. Forest Service. Otra cuestión estratégica es el futuro de los medios de respaldo, especialmente porque el fabricante original de LoCat ya no da soporte al sistema. Estas restricciones refuerzan la necesidad de considerar los RACS como parte de una arquitectura operativa de largo plazo que integra predicción, comunicaciones, soporte técnico, repuestos, planificación de renovaciones y métodos alternativos de control.

10. CONCLUSIÓN

La experiencia de Caltrans demuestra que el valor a largo plazo del control remoto de aludes no puede medirse únicamente por la comodidad de accionar un explosor. Gazex modificó el momento en que puede realizarse la intervención, redujo los accesos repetidos al terreno en numerosas zonas de salida y favoreció un modelo operativo más proactivo. La fiabilidad de disparo declarada superó el 99 % solo después de reforzar el mantenimiento preventivo, contar con personal durante todo el año, mejorar la documentación y estructurar la gestión de activos.

La misma historia demuestra también que los RACS no son soluciones universales. Su rendimiento depende de la calidad de instalación, el terreno, el espesor de nieve, la selección del emplazamiento, el conocimiento local, el mantenimiento y la planificación de medios de respaldo. Tras más de tres décadas, quizá la principal lección de Caltrans sea que el control remoto no eliminó el trabajo de control de aludes: cambió dónde se realiza. Puede reducirse la exposición del personal y el esfuerzo logístico durante cada misión, mientras aumenta la importancia de la predicción, el diseño del sistema, el mantenimiento preventivo, la planificación y la toma de decisiones estratégica.



Figura 5: Reubicacion de un exploser Gazex en Carson Spur, 2021.

REFERENCIAS

BICKOR, R. 2026. Comunicaciones personales/entrevistas con el autor, agosto de 2026.

LIEBERMAN, E. 2002. The GAZEX® avalanche release system. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Penticton, British Columbia, pp. 46–48.

YOUNT, J. M., GORSAGE, B. R. 2016. Evolution of an avalanche program: From artillery to infrastructure. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Breckenridge, Colorado, pp. 442–449.

MORFOLOGIA DE VALL I ESTRUCTURA VERTICAL DELS COLD-AIR POOLS A LA CERDANYA: COMPARACIÓ DELS TRANSSECTES DE MASELLA I CADÍ

Josep Ramon Miró Cubells [(1)]; Juan Carlos Peña Rabadán [(1)], Enric Casellas[(1)] i Nick Pepin [(2)]

(1) Servei Meteorològic de Catalunya. jr.miro@gencat.cat, juancarlos.pena@gencat.cat, enric.casellas@gencat.cat
(2) University of Portsmouth. nicholas.pepin@port.ac.uk

Resum: L'estudi dels cold-air pools (CAP) en zones de muntanya és clau per entendre com els processos de gran escala es tradueixen en microclimes locals fortament desacoblats de la circulació sinòptica. En aquest treball s'analitza el comportament de la inversió tèrmica hivernal a la Cerdanya (Pirineu oriental) a partir d'una xarxa densa de sensors HOBO desplegada des del 2012, centrat en la comparació de dos transsectes altitudinals amb morfologies diferents: Masella (vall àmplia, secció en U) i Cadí (vall estreta, secció en V). S'han analitzat els perfils verticals a les 06 UTC en dies anticiclònics hivernals entre el 2013 i 2024. Els dos transsectes desenvolupen estructures verticals d'inversió sistemàticament diferents: Masella presenta una inversió superficial molt pronunciada però confinada a molt poca alçada, seguida d'un estrat superior força isoterm i amb un comportament més erràtic, mentre que Cadí mostra un punt de ruptura («breakpoint») molt més consistent i predictible entre dies, típicament a la mateixa cota, en contrast amb la notable heterogeneïtat observada a Masella. Els forçaments sinòptics i mesoescalars (bloqueig orogràfic, humitat i geopotencial a 700-500 hPa) no expliquen les diferències observades, la qual cosa permet atribuir-les a la morfologia orogràfica de cada vall.

PARAULES CLAU: Cold-air pool, morfologia de vall, breakpoint d'inversió, perfil vertical de temperatura, Pirineus

INTRODUCCIÓ I MOTIVACIÓ

Durant les nits hivernals clares i amb el vent en calma, l'aire proper al terra de les valls i conques de muntanya es refreda ràpidament per radiació, mentre la manca de turbulència impedeix la seva barreja amb l'aire situat per sobre. Aquest procés genera una inversió tèrmica superficial i, quan l'aire fred queda atrapat per la topografia, dona lloc al fenomen conegut com a cold-air pooling (CAP), que desacobla la circulació del fons de vall de la sinòptica (Lareau et al., 2013). Aquest fet té conseqüències directes sobre la predicció local de temperatura, la qualitat de l'aire i la gestió de recursos en zones de muntanya, i ha estat objecte d'estudi en diverses zones muntanyoses del món (Whiteman, 1990; Whiteman & McKee, 1982).

La Cerdanya, a la part oriental dels Pirineus, constitueix un marc natural excepcional per a l'estudi d'aquest fenomen. Es tracta d'una vall tancada de caràcter marcadament continental, on s'han documentat i estudiat episodis de CAP especialment intensos i persistents (Pagès et al., 2017; Miró et al., 2018; Conangla et al, 2018). Dins d'aquest àmbit, la morfologia de la vall fa que ens apareguin subconques amb característiques molt diferenciades. L'àrea d'estudi comprèn les conques de la plana de la Cerdanya i la conca de Martinet. La plana de la Cerdanya és molt àmplia, oberta i en forma de U on es troba el transsecte de Masella, i la segona és una vall més estreta i encaixada, de secció en V on es troba el transsecte de Cadí. Per proximitat, el marc sinòptic al que estan sotmesos és el mateix, amb la qual cosa les diferències entre els transsectes cal buscar-les en escales més fines que ens ajudin a explicar l'efecte que la topografia circumdant exerceix sobre els fluxos sinòptics.

DADES I MÈTODES

Les dades procedeixen de la xarxa de sensors HOBO de temperatura instal·lada a la conca de la Cerdanya, formada per 50 sensors HOBO instal·lats el 2012 al llarg de 7 transsectes altitudinals (Figura 1) per registrar temperatures semi-horàries (Pagès et al., 2017). Els sensors es van instal·lar a intervals altitudinals aproximadament regulars (cada 200–250 m), cobrint una diferència d'uns 1000 m en cada transsecte, amb els punts més alts a l'entorn dels 2100 al 2400 m. La xarxa inclou, a més, un transsecte de referència a fons de la vall que s'usa com a temperatura base dels transsectes altitudinals i també dos transsectes amb una resolució vertical de 50 metres que cobreixen els primers 200 metres de cada una de les subconques, que no han estat usats en aquest estudi.

D'entre els set transsectes altitudinals, aquest treball se centra en els de Masella i Cadí, tots dos

orientats a cara nord. El primer pertany a la conca de la plana de la Cerdanya i el segon a la conca de Martinet.

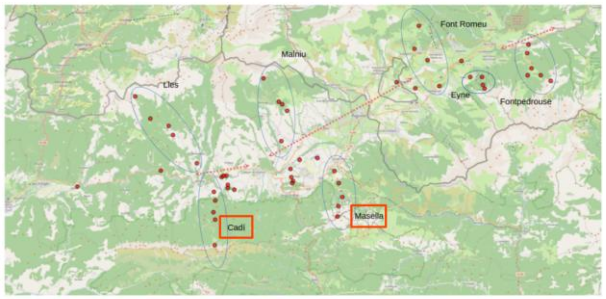


Figura 1 – En el context de la Cerdanya, els punts vermells de la figura són la localització dels sensors de temperatura i humitat , i marcats amb el·lipses serien cadascun dels transsectes. S'ha realçat la localització dels transsectes de referència per l'article Masella i Cadí.

Per estudiar les característiques de les inversions s'ha treballat sobre un subconjunt de 80 dies anticiclònics hivernals (2013–2024), seleccionats mitjançant una classificació sinòptica de tipus Jenkinson-Collison adaptada per Miró et al. (2018). Els perfils verticals de temperatura s'analitzen a les 06 UTC, hora prèvia a la sortida del sol en període hivernal, moment en què la influència de la radiació solar directa és nul·la.

L'alçada del breakpoint de la inversió es determina mitjançant un algorisme de detecció que, partint de la superfície, va resseguint el màxim de temperatura assolit a mesura que s'ascendeix. Es permeten petites davallades transitòries (fins a 0.2 °C) sense donar per finalitzada la inversió, per tal de no ser sensibles al soroll de mesura en perfils no estrictament monòtons; el breakpoint es fixa en l'alçada del màxim global un cop es detecta una davallada que supera aquest llindar. D'aquesta manera només captem les inversions superficials, deixant de banda les de subsidència. La intensitat de la inversió es defineix com la diferència entre la temperatura de terra i aquest màxim. El gradient normalitzat es defineix com aquesta intensitat dividida per la profunditat vertical fins al breakpoint, expressat en °C/100m; permet comparar el pendent tèrmic real entre transsectes amb breakpoints a alçades molt diferents, evitant que la comparació es vegi esbiaixada pel simple fet que la capa d'inversió sigui més profunda en un lloc que en un altre.

El número de sensors usats per cada transsecte són sis. Les altures dels sensors en cada transsecte poden variar, per tant, per evitar confusions i comparar coses diferents, es considera sempre l'altura relativa dels sensors sobre la vall i s'anomenen els sensors segons la posició relativa en què es troben dins el transsecte. Així, tenim que el sensor situat a fons de vall és S0, el primer sensor per sobre S1 i així consecutivament fins a arribar al sensor més alt que seria S6.

Per estudiar la possible influència de circulacions mesoescalars dins la vall durant els dies estudiats s'han escollit dies coincidents amb la campanya ATMOUNT que va tenir lloc el 2015 i s'han avaluat els perfils de vent mesurats amb el Windrass (0-400 metres) i amb UHF (1000-8000 metres).

RESULTATS

Els perfils verticals de temperatura mostren, de manera qualitativa i consistent, dues morfologies pròpies de cada transsecte. A Masella, el perfil típic presenta una inversió superficial molt marcada en els primers metres per sobre el sensor de fons de vall, seguida d'un estrat superior pràcticament isoterm que s'estén fins als sensors més alts del transsecte, dibuixant una L invertida. A Cadí, el perfil típic segueix una progressió més gradual i regular fins a una alçada intermèdia-alta del transsecte, dibuixant la clàssica forma de "panxa" (Figura 2).

Sobre els 80 dies anticiclònics hivernals analitzats, es detecta inversió superficial al 100% dels casos als dos transsectes. La diferència entre transsectes no es manifesta com una absència de breakpoint a Masella, sinó en on se situa i quina forma té el perfil que el sustenta. L'altura del breakpoint difereix marcadament entre transsectes ($\chi^2 = 49.05$, gl = 4, $p < 0.0001$). Mentre que a Cadí el breakpoint es concentra majoritàriament al sensor S4 (70.0%), a Masella es distribueix de manera més heterogènia, amb un màxim al sensor S3 (35.0%) i un segon pic al sensor S5 (28.7%).

Transsecte	S1	S2	S3	S4	S5
MASELLA	6	28	13	23	10
CADÍ	2	9	56	6	7

Taula 1 – Nombre de dies (d'un total de 80) en què el breakpoint s'assoleix a cada sensor (llindar de tolerància INVERSION_END_DROP = 0.2°C).

Tot i que Masella, per la seva orografia més oberta, podria esperar-se que afavorís un refredament superficial més intens, la intensitat absoluta de la inversió és significativament més alta a Cadí (mitjana 9.96°C, màx. 17.23°C) que a Masella (mitjana 7.39°C, màx. 14.13°C). Aquesta diferència, però, no es deu a un gradient tèrmic

vertical més acusat (no s'observen diferències significatives en el gradient normalitzat entre ambdós transsectes, p = 0.149) ni a una diferència significativa en la posició mitjana del "breakpoint" (mitjana de 4.09 a Cadí vs. 4.04 a Masella; Mann-Whitney U = 3330.0, p = 0.641), sinó probablement a la major consistència i menor dispersió de la posició del "breakpoint" a Cadí (σ = 0.79) enfront de la notable heterogeneïtat a Masella (σ = 1.20).

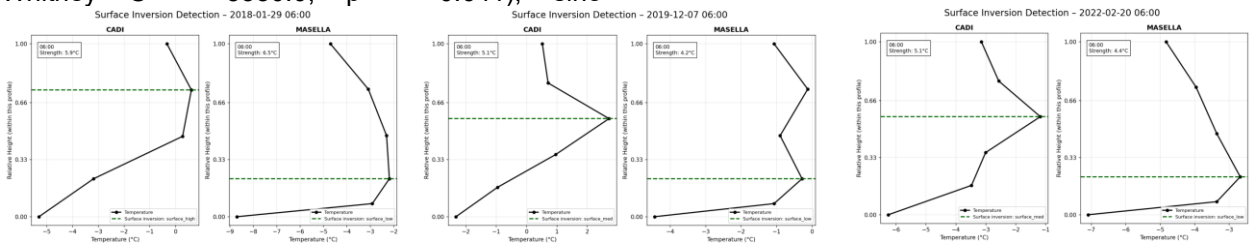


Figura 2 – Perfils verticals de temperatura representatius a Masella i Cadí (06 UTC), pels dies 29/01/2018, 07/12/2019 i 20/02/2022, en els que s'observen les diferències de comportament entre els transsectes de Cadí (esquerra) i Masella (dreta). La línia discontinua representa l'altura del "breakpoint" calculada.

Aquesta diferència estructural planteja la pregunta que motiva aquest treball: per què dues valls sotmeses a condicions sinòptiques equivalents desenvolupen estructures verticals d'inversió tan diferents? S'ha avaluat si les diferències entre els transsectes de les dues conques podrien ser degudes a la formació de turbulència en altura causada per ones orogràfiques, però aquesta possibilitat s'ha descartat, ja que el nombre de Froude (Fr) al nivell de 700 hPa (~3000 m) es manté al voltant d'1, un valor que indica un règim crític o neutre, incompatible amb la generació d'ones de muntanya intenses. També s'ha mirat si en situacions de calma es podrien generar vents de drenatge intensos a fons de vall que poguessin explicar les diferències, però s'han descartat amb els perfils de vent mesurats pel Windrass i el perfilador UHF. Per tant, podem concloure que els mecanismes que explicarien les diferències entre les dues conques van més enllà dels mecanismes sinòptics i mesoescalars.

A més, l'anàlisi de correlació entre la intensitat de la inversió i els paràmetres sinòptics (temperatura i humitat a 700 hPa, vent geostròfic) no ha mostrat cap relació significativa ($r < 0.2$, $p > 0.1$ en tots els casos), la qual cosa reforça la hipòtesi que el contrast entre transsectes és d'origen purament topogràfic

4. DISCUSSIÓ

Conangla et al. (2018) ha mostrat que la geometria de la vall condiciona tant la intensitat com el mecanisme de dissipació del CAP, mentre que Lareau & Horel (2015) documenten l'existència de dos tipus d'estructura vertical anàlegs (linealment estratificada vs. amb inversió superficial forta i capa superior neutra) —una distinció que s'ajusta bé al contrast observat entre Cadí i Masella. L'objectiu d'aquest treball és, per tant, caracteritzar i comparar sistemàticament la forma dels perfils verticals de temperatura entre els dos transsectes, i argumentar que les diferències observades són atribuïbles fonamentalment a la morfologia orogràfica de cada vall, un cop descartada la influència de forçaments sinòptics o mesoescalars diferencials entre ambdós emplaçaments. Per tal d'avaluar els mecanismes que expliquin aquests comportaments tan diferents caldrien simulacions a molta alta resolució per entendre'n el comportament.

La geometria oberta i àmplia de Masella (secció en U) afavoreix una inversió superficial molt intensa però confinada a molt poca alçada, per sobre de la qual l'aire s'homogeneïtza ràpidament en un estrat pràcticament isoterm. Aquesta estructura és consistent amb les simulacions d'alta resolució de Conangla et al. (2018) per a la mateixa Plana de la Cerdanya, que documenten un perfil amb una capa superficial fortament estratificada (fins a 10 K/100m en els primers ~100-130m) seguida d'una capa superior menys estable, atribuïda a la convergència dels fluxos de drenatge de diverses valls tributàries que s'uneixen en un corrent més profund al llarg de la vall principal. La secció transversal estreta i encaixada de Cadí (forma en V) limita aquesta convergència i afavoreix una estratificació més gradual i regular.

La major variabilitat interdiària del gradient normalitzat a Masella (σ = 1.43 enfront de σ = 0.53 a Cadí) suggereix que, tot i que la morfologia en U afavoreix una capa barrejada, la seva estructura és més sensible a petites variacions en el refredament radiatiu o en la velocitat del vent

sinòptic, mentre que la vall en V de Cadí actua com un filtre que estabilitza el perfil tèrmic.

CONCLUSIONS

Masella i Cadí presenten estructures verticals d'inversió tèrmica sistemàticament diferents: una inversió superficial curta i pronunciada a Masella enfront d'una inversió gradual i regular a Cadí. Aquesta diferència és estadísticament molt robusta i no s'explica per cap forçament sinòptic o mesoscalar diferencial, la qual cosa permet atribuir-la a la morfologia orogràfica de cada vall. Seria necessari fer un estudi més profund i a nivell microescalar per veure el perquè de la diferència entre les dues conques i es deixa per un estudi futur més profund amb simulacions a molt alta resolució (~400 metres).

REFERÈNCIES

Conangla, L., Cuxart, J., Jiménez, M.A., Martínez-Villagrasa, D., Miró, J.R., Tabarelli, D., & Zardi, D., 2018. Cold-air pool evolution in a wide Pyrenean valley. International Journal of Climatology, 38(6), 2852–2865.

Lareau, N.P., Crosman, E., Whiteman, C.D., Horel, J.D., Hoch, S.W., Brown, W.O., & Horst, T.W., 2013. The Persistent Cold-Air Pool Study. Bulletin of the American Meteorological Society, 94(1), 51–63.

Lareau, N.P., & Horel, J.D., 2015. Turbulent erosion of persistent cold-air pools: Numerical simulations. Journal of the Atmospheric Sciences, 72(4), 1409–1427.

Miró, J.R., Peña, J.C., Pepin, N., Sairouni, A., & Aran, M., 2018. Key features of cold-air pool episodes in the northeast of the Iberian Peninsula (Cerdanya, eastern Pyrenees). International Journal of Climatology, 38(3), 1105–1115.

Pagès, M., Pepin, N., & Miró, J.R., 2017. Measurement and modelling of temperature cold pools in the Cerdanya valley (Pyrenees), Spain. Meteorological Applications, 24(2), 290–302.

Whiteman, C.D., 1990. Observations of thermally developed wind systems in mountainous terrain. In: Atmospheric Processes over Complex Terrain, Meteorological Monographs, 23(45), 5–42. American Meteorological Society.

Whiteman, C.D., & McKee, T.B., 1982. Breakup of temperature inversions in deep mountain valleys: Part II. Thermodynamic model. Journal of Applied Meteorology, 21(3), 290–302.

INFLUENCIA DE LA ACTIVIDAD CONVECTIVA Y DE LAS CAPAS DE GRAUPEL EN LA ESTABILIDAD DEL MANTO NIVOSO DE SIERRA NEVADA: PROPUESTA METODOLÓGICA 2026–2027

NivoSur (1)

(1) Grupo de Nivología y Predicción de Aludes de Sierra Nevada. Info@nivosur.com

PALABRAS CLAVE: Sierra Nevada; convección; graupel; capa débil; estabilidad del manto; aludes de placa.

1. INTRODUCCIÓN

Las observaciones nivológicas realizadas en Sierra Nevada durante los últimos años han identificado una presencia relativamente recurrente de depósitos de nieve granulada (graupel) asociados a episodios de precipitación convectiva. Durante la campaña 2025–2026 se reconocieron capas de graupel de interés para la evaluación de la estabilidad del manto. La ausencia de un registro sistemático de los episodios de depósito y de su evolución posterior impide, sin embargo, caracterizar su distribución espacial, persistencia tras el enterramiento y posible participación en la rotura de placas.

El patrón de peligro 9 (dp.9), «graupel cubierto por nieve», descrito por Mair y Nairz (2018), identifica la distribución localizada del graupel y la dificultad de reconocerlo una vez enterrado. Los estudios de Abe (2004), sobre resistencia al corte de capas que contienen graupel, y de Ishizaka (2007), sobre formación de capas débiles a partir de partículas de precipitación, aportan antecedentes experimentales para diseñar el seguimiento. Se propone para 2026–2027 un protocolo que vincule: (i) las condiciones atmosféricas de los episodios convectivos; (ii) las propiedades físicas y la distribución espacial del depósito; y (iii) su evolución estratigráfica, térmica y mecánica tras el enterramiento. El objetivo es caracterizar la variabilidad espacial y temporal de estos depósitos y su posible relevancia para la predicción del peligro de aludes en Sierra Nevada.

2. ANTECEDENTES Y OBJETIVO

La alta frecuencia de este tipo de eventos de nieve convectiva, observada por el equipo de investigación (NivoSur) en los últimos años plantea la necesidad de documentar su génesis y evolución en el manto de Sierra Nevada. Su presencia no implica que todos los aludes de placa estén asociados a este tipo de capa débil. El interés del estudio reside en determinar en qué episodios y emplazamientos el depósito conserva una respuesta mecánica relevante después de quedar enterrado.

El patrón de peligro 9 descrito por Mair y Nairz (2018) describe el enterramiento de graupel bajo nieve posterior y advierte de su distribución espacial localizada y de su difícil identificación en el interior del manto. Abe (2004) caracterizó experimentalmente la resistencia al corte y otras propiedades físicas de capas con graupel; Ishizaka (2007) relacionó las características de las partículas precipitadas con la formación de capas débiles. Las observaciones operativas de Mount Shasta (Castle Lake, 2022) y Gallatin (Northern Bridgers, 2014) muestran acumulaciones localizadas y justifican combinar muestreo topográfico contrastado y seguimiento mecánico posterior. Estos antecedentes orientan el diseño del programa, sin establecer umbrales o tiempos de estabilización universales.

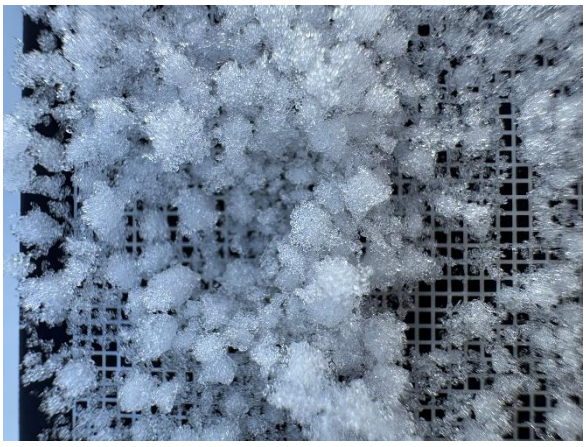
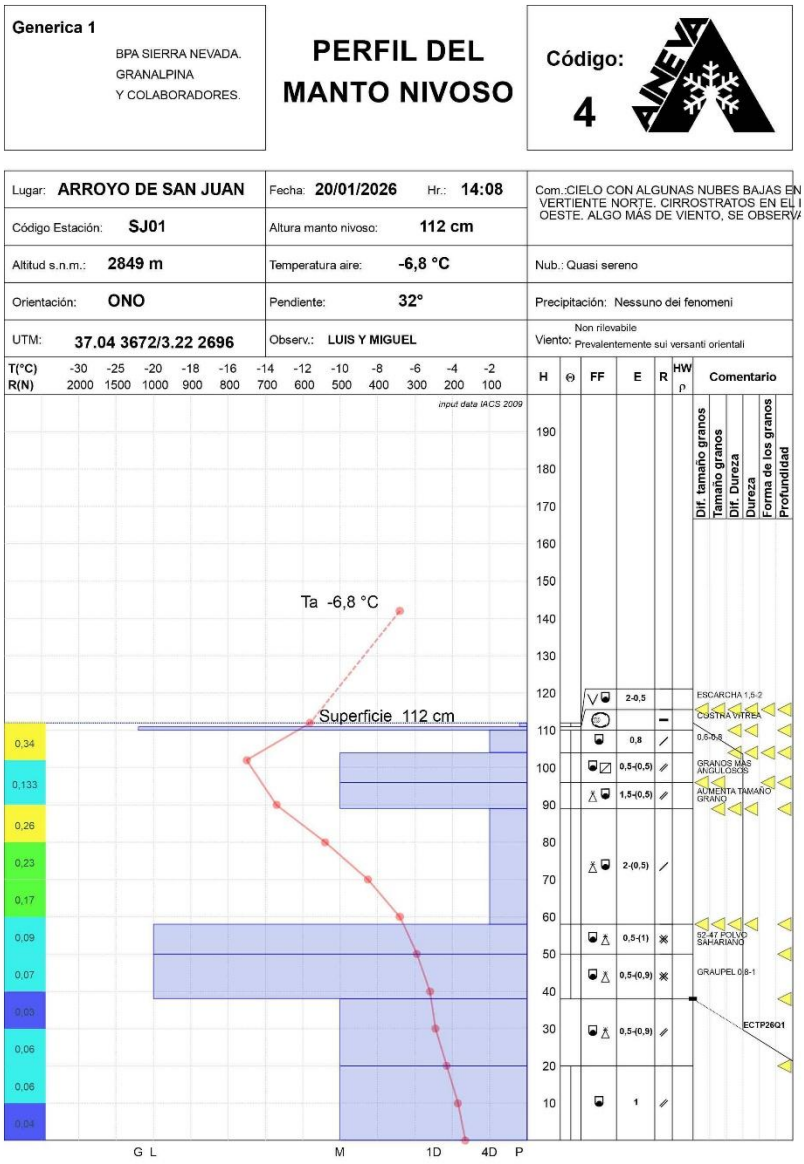


Figura 1 – Partículas de graupel correspondientes al día 12 enero de 2026 (cuadrícula 1mm).



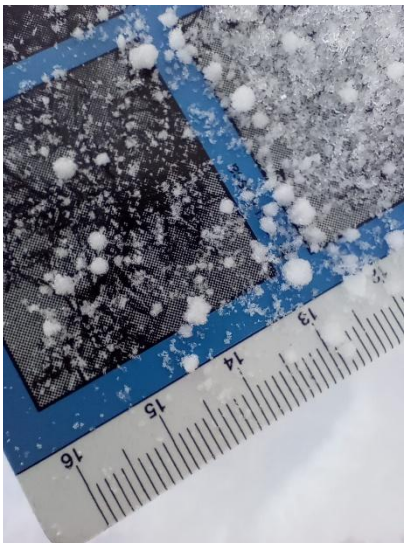




Figura 2 – Perfil correspondientes al día 20 de enero de 2026; varios episodios de nieve granulada fueron muy frecuentes desde mediados de enero a principios de marzo. Detalle de las partículas de graupel procedentes de la superficie de fracturación planar (Q1 SP).

2. PROTOCOLO DE OBSERVACIÓN PROPUESTO

2.1. Identificación y seguimiento atmosférico

Para cada evento episódico de precipitación de nieve convectiva (definido por los días con registro de graupel), se analizará la estructura vertical de temperatura y humedad), la inestabilidad convectiva, el agua precipitable, la evolución del viento y la cronología de la precipitación. Se combinarán sondeos observados o simulados, productos de predicción de mesoescala e información de satélite y radar, atendiendo a sus limitaciones de resolución y cobertura. CAPE, Lifted Index y PWAT se analizarán conjuntamente; no se adoptará inicialmente un umbral único de CAPE como indicador de formación de graupel.

2.2. Caracterización del depósito

Durante el episodio, cuando las condiciones de seguridad lo permitan, o inmediatamente después, se registrarán espesor, forma y tamaño de grano, distribución granulométrica y características de la superficie receptora, incluidas posibles costras. Cada observación incluirá posición, altitud, orientación, pendiente, exposición al viento y contexto topográfico. Se compararán concavidades, canales y otros sectores de acumulación con emplazamientos próximos sin depósito significativo, para discriminar la heterogeneidad de la precipitación y la redistribución posterior.

2.3. Seguimiento tras el enterramiento

En puntos de control seleccionados se realizarán perfiles sucesivos para documentar profundidad, espesor, continuidad lateral, forma de grano, dureza e interfaces de la capa. Los perfiles térmicos permitirán estimar el gradiente en el entorno del depósito y seguir su evolución. Se efectuarán ensayos ECT y, cuando proceda, PST, registrando el resultado, la localización de la fractura y su correspondencia con el graupel o sus interfaces. El seguimiento comenzará lo antes posible tras el depósito y se repetirá durante los días posteriores al enterramiento, sin presuponer un plazo de estabilización.

3. Integración de observaciones y criterios de contraste

Cada episodio dispondrá de una ficha común que vincule registros atmosféricos, observaciones del depósito, perfiles sucesivos, ensayos y actividad de aludes. Se documentarán tanto los casos con graupel como aquellos en los que, pese a las condiciones atmosféricas previstas, no se identifique un depósito significativo en los puntos muestreados. Se compararán posiciones topográficas con y sin acumulación y se registrará la superficie sobre la que se depositó el graupel. Cuando se observen aludes de placa, se contrastará la localización de la superficie de rotura con la estratigrafía disponible; la coincidencia temporal con una nevada convectiva no se considerará evidencia suficiente de causalidad.

El programa persigue obtener una serie de episodios comparables que permita evaluar la recurrencia y variabilidad espacial de estos depósitos, su evolución tras el enterramiento y la utilidad de las variables atmosféricas y nivológicas seleccionadas para el análisis operativo del peligro.

REFERENCIAS

ABE, O. 2004. Shear strength and angle of repose of snow layers including graupel. Annals of Glaciology, 38, 305–308. https://doi.org/10.3189/172756404781815149

GALLATIN NATIONAL FOREST AVALANCHE CENTER 2014. Northern Bridgers graupel, observación de campo. https://www.mtavalanche.com/images/14/northern-bridgers-graupel

ISHIZAKA, M. 2007. In situ observations of weak layers caused by graupels and snow crystals in snow packs deposited in a controlled cold room. Journal of the Japanese Society of Snow and Ice, 69(4), 481–488. https://doi.org/10.5331/seppyo.69.481

MAIR, R. y NAIRZ, P. 2018. Avalanche: Recognizing the Decisive Problems and Danger Patterns. Tyrolia Verlag, Innsbruck. ISBN 978-3-7022-3696-0.

MOUNT SHASTA AVALANCHE CENTER 2022. Graupel layer found at Castle Lake, observación de campo. https://www.shastaavalanche.org/snowpack-observation/graupel-layer-found-castle-lake

NIVOSUR: EXPERIENCIA PILOTO DE OBSERVACIÓN NIVOLÓGICA Y PREDICCIÓN DE ALUDES EN SIERRA NEVADA DURANTE LA CAMPAÑA 2025–2026

NivoSur (1)

(1) Grupo de Nivología y Predicción de Aludes de Sierra Nevada. info@nivosur.com

PALABRAS CLAVE: Sierra Nevada; BPA; observación nivológica; inventario; redes de observación.

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La actividad invernal en Sierra Nevada se desarrolla tanto en el dominio gestionado de la estación de esquí como en extensas áreas de montaña no controlada, para las que resulta necesaria una evaluación territorial del peligro de aludes.

Al inicio de la temporada 2025–2026, Sierra Nevada no disponía de un boletín de peligro de aludes (BPA) oficial específico para el macizo. La empresa gestora de la estación de esquí de Sierra Nevada publicaba información que incluía un valor numérico denominado literalmente «riesgo» de aludes. Esta información no constituía un BPA territorial conforme a los estándares EAWS (ni para el propio dominio esquiable) que identificara los problemas de aludes, su distribución por cotas y orientaciones y la evolución prevista del peligro.

Ante esta situación, un grupo de ocho voluntarios puso en marcha un dispositivo piloto de observación nivológica y predicción de aludes, inicialmente denominado GrupoSN y posteriormente constituido como NivoSur. Su objetivo durante la campaña fue elaborar y difundir información nivológica y BPA para el terreno de montaña no controlado, a partir de observaciones de campo y de la información meteorológica disponible. Todo ello de manera gratuita para el usuario.

La presente comunicación expone la organización y los resultados de la primera campaña, las limitaciones que condicionaron el análisis y las líneas de desarrollo previstas para ampliar la base observacional del dispositivo.

2. ORGANIZACIÓN Y METODOLOGÍA DE TRABAJO

2.1. Equipo y ámbito de observación

El dispositivo estuvo integrado por ocho voluntarios con perfiles profesionales complementarios, vinculados a la investigación, la nivología, las actividades de montaña, el rescate y el desarrollo de herramientas informáticas. Sus integrantes asumieron las tareas de observación de campo, análisis meteorológico y nivológico, elaboración y revisión de los BPA, mantenimiento de las herramientas digitales y difusión de la información.

La campaña se desarrolló sin financiación específica ni una estructura operativa institucional que proporcionara personal, instrumentación o medios de desplazamiento al equipo. Las actividades se sostuvieron mediante la dedicación personal de sus integrantes y la utilización de material y recursos propios. Esta circunstancia condicionó tanto la frecuencia de las salidas como la cobertura espacial de las observaciones.

El trabajo de campo se concentró principalmente en el sector occidental del macizo, con especial atención al valle de San Juan y a los sectores accesibles desde las cuencas de los ríos Monachil y Dílar. Para complementar la información de campo obtenida, se integraron observaciones de otros sectores cercanos a las parcelas de estudio a través de los canales de WhatsApp que la organización habilitó para los colectivos de montaña y skimo en calidad de observadores ocasionales.

2.2. Observación nivológica y fuentes de información

Las salidas de campo incluyeron la descripción estratigráfica del manto, medidas de espesor, temperatura, densidad y dureza, caracterización de los granos y realización de ensayos de estabilidad. Se registraron asimismo los indicios de transporte por viento, las condiciones superficiales y la actividad reciente de aludes observada durante los recorridos.

La evaluación incorporó información meteorológica procedente de estaciones y productos de acceso público, previsiones meteorológicas y modelos numéricos. Se dispuso también de medidas semanales de espesor total

del manto aportadas por técnicos del Observatorio del Cambio Global de Sierra Nevada y de información complementaria procedente de la simulación de nieve desarrollada por Javier Herrero, de la Universidad de Granada.
Estas fuentes permitieron contextualizar las observaciones de campo, pero no sustituyeron una red de medidas nivometeorológicas automáticas distribuida por el territorio. Durante la campaña, el equipo no tuvo acceso a determinados registros de la instrumentación científica instalada por los grupos de investigación en Sierra Nevada, una limitación relevante para el seguimiento de la evolución espacial y temporal del manto.

2.3. Elaboración y difusión de la información
Los BPA se elaboraron a partir de la integración de las observaciones disponibles y de la evolución meteorológica prevista, con especial atención a los problemas de aludes identificados, su localización y la tendencia para las siguientes 24–48 horas.
La emisión se concentró principalmente en los periodos previos al fin de semana, con publicaciones adicionales cuando la evolución de las condiciones lo requería. Cuando la meteorología adversa o la insuficiencia de observaciones impedían sustentar una evaluación territorial, se optó por publicar una nota nivológica en lugar de un BPA.
La información se difundió mediante los canales digitales del grupo. Se habilitaron, además, canales específicos para recibir observaciones de usuarios sobre el estado del manto y la actividad de aludes, con el propósito de ampliar la cobertura espacial de los registros de campo.

2.4. Evolución del procedimiento de trabajo
Durante las primeras semanas, la limitada experiencia del grupo en la elaboración conjunta de boletines se tradujo en dificultades para integrar las observaciones de campo con la información meteorológica, consensuar el modelo conceptual del peligro de aludes y trasladar la evaluación a los distintos elementos del BPA. Estas tareas exigían un tiempo considerable de análisis y discusión, al que se sumaban el trabajo de campo y la disponibilidad limitada de los voluntarios.
La experiencia acumulada permitió establecer criterios de análisis compartidos y mejorar la coordinación entre observadores y predictores. Esta evolución se reflejó en los tiempos de elaboración: los primeros BPA se publicaban en torno a las 23:00 h, mientras que en los últimos meses de la campaña se difundían habitualmente alrededor de las 19:00 h.
El adelanto del horario constituye un indicador de la mejora del procedimiento de trabajo, pero no debe interpretarse, por sí solo, como una validación de la calidad de los pronósticos.

3. RESULTADOS DE LA CAMPAÑA 2025–2026
3.1. Producción de información nivológica
Durante la campaña se publicaron 18 BPA y 11 notas nivológicas y se realizaron 25 perfiles estratigráficos. El dispositivo mantuvo actividad a lo largo de la temporada mediante salidas de campo, seguimiento meteorológico, análisis nivológico y recepción de observaciones externas.
La combinación de BPA y notas permitió adaptar el producto emitido a la información efectivamente disponible. Las notas nivológicas resultaron especialmente útiles en situaciones en las que existían indicios relevantes sobre la evolución del manto, pero no una base observacional suficiente para asignar un grado de peligro territorial.

3.2. Distribución de los grados de peligro y comparación con los valores publicados por la estación de esquí.
La distribución de los grados de peligro publicados por Grupo NivoSur durante la campaña fue del 15 % para el grado 1, 51 % para el grado 2, 29 % para el grado 3 y 5 % para el grado 4. En la información publicada por la empresa pública Cetursa para el mismo periodo, las proporciones correspondientes fueron del 0 %, 40 %, 36 % y 24 %, respectivamente.

Grado de Peligro	NivoSur	Cetursa
1	15	0
2	51	40
3	29	36
4	5	24

Figura 1 – Comparación entre la distribución porcentual del grado de peligro de aludes emitidos durante la temporada 2025-26 (ver introducción).

Las diferencias son particularmente visibles en los grados 1 y 4. No obstante, ambos productos presentan diferencias en su ámbito de aplicación y en la información utilizada para su elaboración. Por ello, la comparación de sus distribuciones no permite determinar cuál de las evaluaciones se ajustó mejor a las condiciones observadas.
El contraste pone de manifiesto la necesidad de disponer de una base de observación suficientemente amplia y de registros independientes que permitan examinar la correspondencia entre los grados publicados, las condiciones del manto y la actividad de aludes.

3.3. Inventario de puntos de salida de aludes
Uno de los resultados de la campaña fue la documentación de 123 puntos de salida de aludes, identificados mediante observaciones del equipo y comunicaciones recibidas a través de los canales habilitados por NivoSur. Su localización se presenta en la Figura 1.

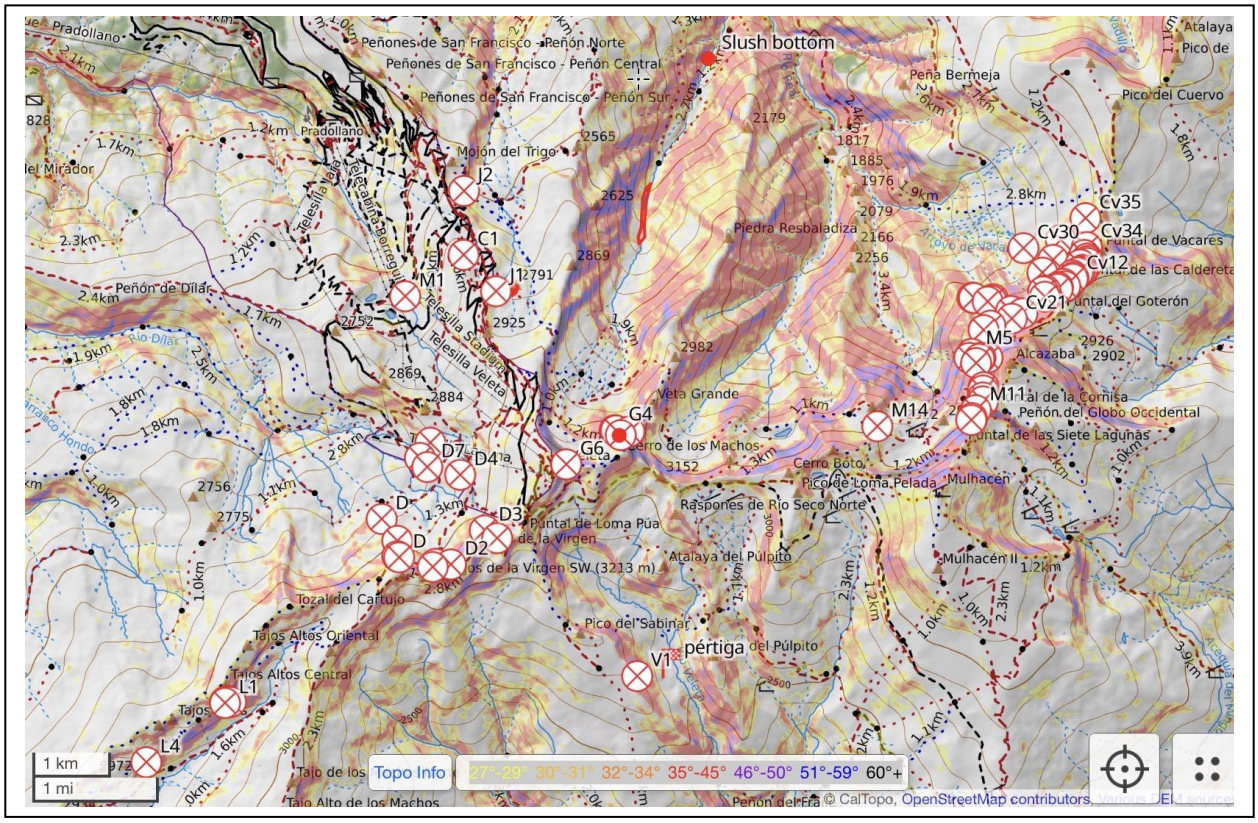


Figura 1 – Localización de los 123 puntos de salida de aludes documentados durante la campaña 2025–2026 mediante observaciones directas y comunicaciones recibidas por NivoSur.

Este registro constituye una primera base espacial de actividad de aludes para los sectores documentados. Su desarrollo requerirá revisar la localización y las características de cada observación, diferenciar los registros directos de los comunicados por terceros y ampliar la cobertura de los sectores con menor número de observaciones.
El inventario no representa todavía una cartografía de susceptibilidad. Su interés reside en proporcionar una base empírica para la futura identificación y delimitación de áreas susceptibles de desencadenamiento, junto con el análisis topográfico y nivometeorológico correspondiente.

4. LIMITACIONES Y PROPUESTA DE DESARROLLO
La principal limitación de la campaña fue la insuficiencia de observaciones distribuidas espacial y temporalmente. La ausencia de instrumentación nivometeorológica propia, el acceso limitado a determinados registros científicos y la dependencia del trabajo voluntario dificultaron el seguimiento continuo de la evolución del manto y la comparación de condiciones entre sectores.

Estas limitaciones no responden exclusivamente a la falta de equipamiento en Sierra Nevada. En el macizo existen estaciones meteorológicas e instrumentación científica gestionadas por distintas entidades, cuyos registros podrían contribuir al análisis nivológico mediante acuerdos de acceso e intercambio de datos. La prioridad propuesta es integrar la información procedente de las redes existentes y complementar las observaciones allí donde persistan carencias relevantes para la predicción de aludes.
Para las próximas campañas se plantea ampliar el acceso a los registros meteorológicos y nivológicos de las estaciones de investigación, instalar dos sensores automáticos de espesor de nieve en emplazamientos representativos y mantener medidas manuales de densidad que permitan caracterizar la evolución del

manto. La integración de estas observaciones en la plataforma de datos del grupo facilitaría su consulta conjunta con las previsiones meteorológicas, los perfiles de campo y el inventario de aludes.
En paralelo, se prevé consolidar la red de observadores y el canal de recepción de comunicaciones, establecer criterios homogéneos para el registro de aludes y avanzar en la revisión del inventario de puntos de salida. La ampliación de la base de datos permitirá abordar posteriormente la delimitación cartográfica de las áreas susceptibles y contrastar las evaluaciones de peligro con observaciones independientes.

NivoSur ha planteado una fase piloto plurianual, para cuyo desarrollo solicita apoyo económico a la Diputación de Granada. Esta etapa se concibe como un periodo de consolidación del dispositivo, ampliación de la red observacional y evaluación de sus procedimientos y resultados. La experiencia obtenida podría servir de base para estudiar, en una fase posterior, su eventual incorporación a una estructura pública de la Junta de Andalucía vinculada a la gestión de emergencias.

5. CONCLUSIONES

La campaña 2025–2026 permitió poner en funcionamiento un dispositivo voluntario de observación nivológica y predicción de aludes en Sierra Nevada, con una producción de 18 BPA, 11 notas nivológicas y 25 perfiles estratigráficos. La experiencia permitió también establecer un procedimiento compartido de análisis y emisión, cuyo tiempo de elaboración se redujo progresivamente a lo largo de la temporada.
La documentación de 123 puntos de salida de aludes constituye un resultado adicional de la campaña y proporciona una primera base de trabajo para desarrollar un inventario espacial sistemático y, posteriormente, una cartografía de áreas susceptibles.
La continuidad del dispositivo requiere ampliar la cobertura de las observaciones, facilitar el acceso a los registros de la instrumentación científica existente y establecer procedimientos de contraste de las evaluaciones emitidas. La siguiente fase deberá permitir valorar el funcionamiento del sistema con una base instrumental y observacional más completa, antes de considerar su eventual consolidación institucional.

PRIMERS RESULTATS DE L'ESTUDI DE SEGUIMENT DE LES CONGESTES DE NEU A LA CARRETERA BV-4031 AL COLL DE LA CREUETA

Pere Oller Figueras [(1)]; Laura Trabal Garmon [(1)]; Melina Matias Elias [(2)]; Marc Mendez Costa [(2)]; Jordi Diez Campoy [(3)]; Oriol Lecha i Augé [(3)]

(1) GeoNeu Risk. Av. Verge de Montserrat 20, 08024 Barcelona. geoneurisk@geoneurisk.com
(2) Inaccés Geotècnica Vertical. Passatge Amics d'Argentona, 36, 08310 Argentona (Barcelona). inacces@inacces.com
(3) Servei Territorial de Carreteres. Serveis Territorials a Barcelona. Departament de Territori, Habitatge i Transició Ecològica. jordi.diez@gencat.cat, oriollecha@gencat.cat

PARAULES CLAUS: vialitat hivernal, congestes de neu, Coll de la Creueta, Pirineu Oriental..

INTRODUCCIÓ

Es presenten els primers resultats del seguiment de les congestes de neu a la carretera BV-4031, al Coll de la Creueta. Aquest estudi s'emmarca en el contracte de manteniment dels Actius Geotècnics de la província de Barcelona, de la xarxa de carreteres de la Generalitat de Catalunya. Ha permès identificar, mesurar i caracteritzar les zones de formació de congestes, així com detectar els punts més problemàtics per proposar mesures per reduir el fenomen.

La formació de congestes de neu a les vies de comunicació representa un greu problema per a la seguretat i genera un cost molt elevat en el manteniment hivernal de les carreteres (Tabler, 2003). Estudiar aquest fenomen és clau per dissenyar mesures de reducció eficaces i econòmiques.

Les congestes que s'acumulen a la calçada provoquen situacions de perill per als conductors: pèrdua de control del vehicle, reducció de l'amplada efectiva de la carretera, reducció dràstica de la distància de visibilitat en corbes i interseccions, a més d'ocultar la senyalització viària; formació de gel a la calçada. S'ha demostrat que, en zones exposades sense protecció, fins al 25% dels accidents de trànsit es produeixen sota condicions de neu ventada (Tabler, 2003).

L'acumulació de neu no només afecta la circulació, sinó també la vida útil de la carretera: les congestes obstrueixen cunetes i drenatges, convertint-se en una font d'aigua constant que s'infiltra sota el paviment i accelera el seu deteriorament. La neteja mecànica de la neu (mitjançant màquines llevaneus) té un cost recurrent molt elevat.

La carretera BV-4031, al Coll de la Creueta, cada hivern queda afectada per episodis de nevades amb vent i formació de congestes. Aquest fenomen té lloc principalment entre els PK 16 i 25, en un tram de 9 km situat entre les cotes 1.675 m i 1.922 m. La revisió de la informació disponible per a les darreres 10 temporades hivernals permet identificar, com a mínim, 25 episodis de tancament per causes meteorològiques hivernals. Destaca la temporada 2018/19, amb 10 afectacions per tall de neu i 81 h 24 min acumulades, i la 2016/17, amb 4 afectacions però 362 h 24 min de tancament. Per aquest motiu, el Servei Territorial de Carreteres va posar en marxa, l'any 2024, un estudi específic sobre la formació de congestes a la carretera, i sobre la proposta de solucions per reduir aquest fenomen.

El clima mediterrani de la zona on se situa el Coll de la Creueta es caracteritza per una marcada irregularitat de la precipitació. El gruix de neu recent acumulat és molt variable, amb quantitats que, a 2.000 msnm, poden superar els 200 cm per temporada, però amb un mantell nival que difícilment assoleix gruixos superiors a 1m. Pel què fa al vent, es registren una mitjana de 6 episodis per temporada amb valors de vent mitjà diaris superiors als 50 km/h, principalment de component N i NO. Pel què fa a la temperatura, el mes de gener és quan se solen registrar les temperatures més baixes, amb nevades a cota baixa. Al desembre i a partir de febrer les temperatures són més oscil·lants i, per tant, també ho és la cota de neu.



Figura 1 – Obertura de la carretera (25-1-26). Foto: Servei Territorial de Carreteres.

MATERIAL I MÈTODES

El projecte s'inicia a la tardor de 2024. Es realitza una primera revisió dels punts crítics de formació de congestes a partir d'informació testimonial. Paral·lelament, s'inicien els tràmits per a la instal·lació d'una estació nivometeorològica a Pleta Roja. L'objectiu és fer el seguiment en temps real de les variables meteorològiques i del mantell nival que intervenen en el procés de formació de congestes. L'estació està dividida en dues unitats. Una estació nivometeorològica situada a 1.995 msnm, protegida del vent, amb sensors de temperatura i humitat, gruix de neu, radiació, càmera robotitzada i pluviòmetre; i una estació de vent, situada a 2.028 msnm, exposada al vent en totes les orientacions, amb anemòmetre i sensor FlowCapt (Figura 2).

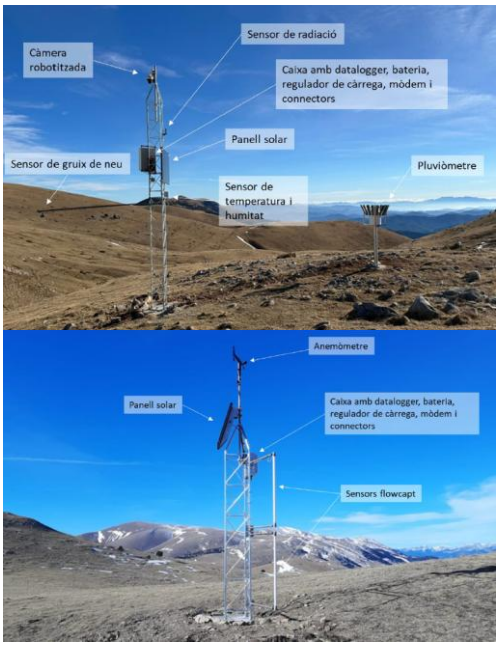


Figura 2 – Imatge superior: estació nivometeorològica i pluviòmetre (1.995 msnm). Imatge inferior: estació vent-FlowCapt (2.028 msnm).

Un cop instal·lada l'estació i iniciat el monitoratge de les variables nivometeorològiques, es va iniciar la campanya de seguiment dels episodis de formació de congestes a la carretera. Aquesta ha consistit en:

- Mesura sobre el terreny de les congestes després de cada episodi i cartografia de formes indicadores de la direcció local del vent.
- Realització d'un vol de dron posterior a cada episodi i generació, mitjançant fotogrametria, d'un model digital del terreny, amb l'objectiu de cartografiar la distribució i el gruix de les congestes.

Per a aquesta finalitat, el mes de novembre de 2024 es va realitzar un vol fotogramètric amb dron, amb l'objectiu de disposar d'una cartografia de detall del terreny sense neu que permetés comparar-la amb els models generats durant els episodis de formació de congestes. Durant el primer episodi (7-9/12/24), es van situar 17 punts de control per avaluar la precisió dels models digitals obtinguts per fotogrametria. Es va obtenir una precisió de +/- 10 cm (error mitjà) en la determinació del gruix de neu.



Figura 3 – Exemple de punt marcat sobre la congesta (esquerra), i mateix punt en l'ortoimatge amb una resolució de 3 cm, obtinguda amb dron.

Durant la temporada 2024/25 es van documentar dos episodis, i durant la temporada 2025/26, cinc. Es va considerar "episodi" als escenaris amb condicions de vent i de mobilitat de la neu favorables a la formació de congestes a la carretera. En tots els episodis, es van cartografiar i mesurar les congestes sobre el terreny (Figura 4). Les condicions meteorològiques van permetre efectuar quatre vols fotogramètrics (Figura 5).



Figura 4 – Mesura de les congestes sobre el terreny (28 de gener de 2026).

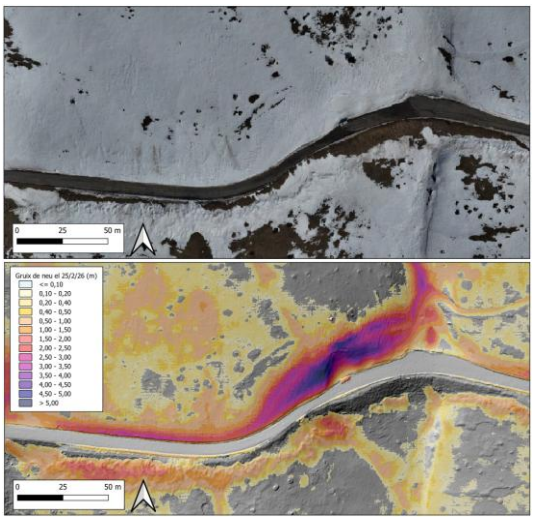


Figura 5 – 25/2/26. Imatge superior: Ortoimatge. Imatge inferior: model digital del terreny que representa el gruix del mantell nival. PK 20+400 – 20+700.

RESULTATS

La Figura 6 i la Figura 7 mostren, de forma conjunta, les característiques nivometeorològiques i de les característiques de les congestes formades en tots els episodis registrats durant les temporades 2024/25 i 2025/26.

Episodi	Escenari	VVX (Km/h)	DVX (º)	HN (cm)	TA (ºC)	TN (ºC)	FCX (g/m²/s)
7-9/12/24	Nevada de N amb vent	110	0-6 (N)	15	-4 a -8	?	?
14-15/3/25	Nevada amb vent de S-SO	42	187-208 (S-SO)	34	-1 a -2	-1 a -2	124
21-22/11/25	Nevada amb vent de N	125	N (360)	7	-10	-10	31
23-27/12/25	Nevada amb vent de S i E	68	60-120 (S, E)	35	-2 a 0	-3 a -1	2,6
10-11/1/26	Nevada amb vent de N	148	340-350 (NNO)	13	-5 a -6	-4 a -8	139
15-20/1/26	Nevada amb vent de S i E	40 (a l'inici)	190 (S) (a l'inici)	53	-0,1 a -3	0 a -6	43
20-27/1/26	Nevada amb vent de N	122	0 (N)	17	-4 a -6	-5 a -7	114

Figura 6 – Variables nivometeorològiques que caracteritzen els episodis registrats. VVX: velocitat màxima del vent; DVX: direcció del vent corresponent a la velocitat màxima; HN: gruix de neu recent; TA: temperatura de l'aire; TN: temperatura de la superfície de la neu; FCX: massa de neu transportada màxima.

Episodi	NC	HCX (cm)	LC (ml)	Afect. (%)	VC (m³)	MC (t)
7-9/12/24	23	160	2.295	25,5	3.215	643
14-15/3/25	21	115	2.406	26,7	2.767	553
21-22/11/25	3	166	193	2,1	101	202
23-27/12/25	19	270	2.962	32,9	4.756	951
10-11/1/26	37	230	5.993	66,6	9.388	1.877
15-20/1/26	29	301	4.488	49,8	10.146	2.029
20-27/1/26	39	425	5.299	58,8	14.532	2.906

Figura 7 –Característiques principals dels diferents episodis de congestes registrats. NC: nombre de congestes; HCX: altura màxima de les congestes; LC: longitud total de les congestes; Afect: percentatge de l'àmbit d'estudi afectat; VC: volum de neu acumulat a la carretera; MC: massa de neu acumulada a la carretera.

Com a conclusions de l'anàlisi dels episodis de congestes al Coll de la Creueta, a partir dels episodis registrats (7), s'observen diferències entre els episodis de vent N i NO, i la resta d'episodis, provinents de S, SO i E.

En general, en els episodis de S, SO i E, el vent té velocitats menors (40-80 km/h), però aquest fet es compensa amb més disponibilitat de neu transportable ja que les nevades que els acompanyen són de major magnitud. La neu acostuma a ser menys freda, més humida i, per tant, més densa. Això fa que el transport es produeixi preferentment per saltació més que per difusió turbulenta (torb). La tendència observada és a formar-se menys congestes i a cota més alta, però de major gruix.

En canvi, els episodis de N i NO, estan caracteritzats per vents molt forts (superiors a 100 km/h), amb temperatures molt baixes, i acompanyats de nevades sovint més febles. Això fa que hi hagi una elevada mobilitat de la neu, que el transport sigui en bona part per difusió turbulenta (torb) i que la distribució de les congestes sigui més extensa, però amb gruixos menors i, en general, més homogènia.

A partir de la cartografia dels diferents episodis s'han obtingut 2 mapes que defineixen l'afectació:

- Mapa de magnitud (Figura 8): s'ha obtingut a partir dels gruixos mitjans de tots els episodis superposats.
- Mapa de freqüència (Figura 9): s'ha obtingut a partir del nombre de vegades que es formen congestes al llarg de la traça de la carretera.

En relació amb la magnitud, s'observa com les magnituds més elevades es donen al costat sud, corresponent al vessant de Castellar de N'Hug, especialment entre el PK 18+650 el coll (PK 21+369).

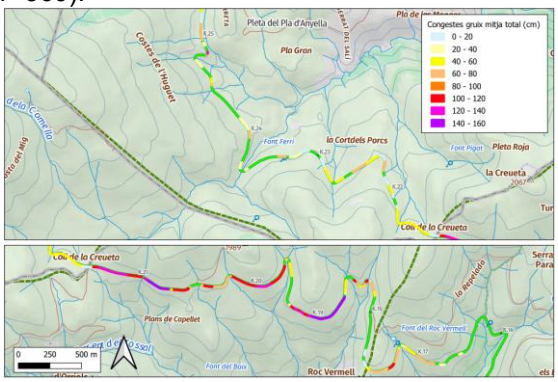


Figura 8 –Mapa de síntesi de la magnitud mitjana de les congestes.

Pel que fa a la freqüència, també són més freqüents les congestes al costat de Castellar de N'Hug (S) que al costat de Toses (N), a excepció de la part més propera al coll, on aquestes tenen també una freqüència elevada, tot i presentar una magnitud menor.

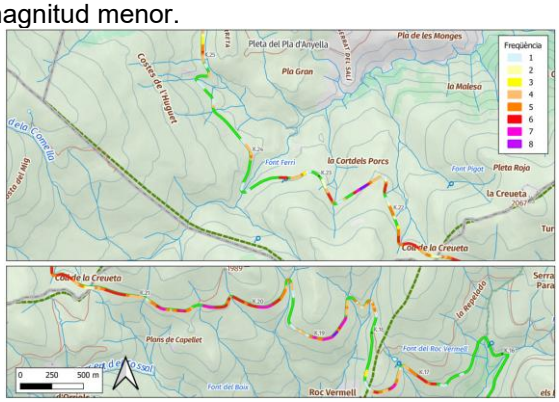


Figura 9 –Mapa de freqüència de formació de les congestes.

S'ha obtingut també un mapa de direccions locals del vent a partir de tots els episodis registrats (Figura 10). S'observa com s'han cartografiat més senyals al vessant S (Castellar de N'Hug) que al vessant N (Toses), fet que indica més afectació pel vent en aquest costat S en la majoria d'episodis i, conseqüentment, una major magnitud de les congestes.

Bàsicament, amb petites variacions entre ells, es poden diferenciar els episodis de N i NO dels episodis d'altres direccions (E, O, SO). Es tracta de dues direccions quasi perpendiculars en alguns sectors, o fins i tot quasi oposades, factor que cal tenir molt en compte a l'hora de dissenyar la proposta de protecció.

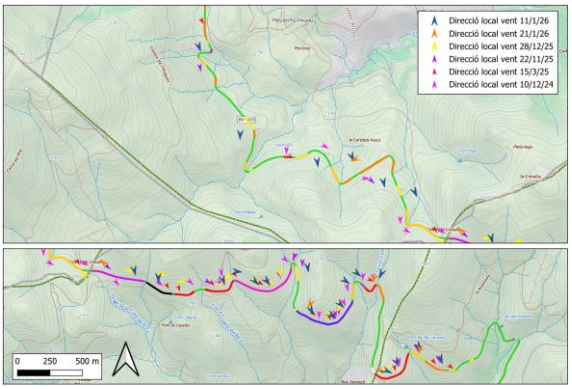


Figura 10 –Mapa de direccions locals del vent dels episodis registrats.

A partir de la magnitud i de la freqüència de formació de les congestes, s'ha definit unes classes per establir una prioritat d'actuacions. S'ha donat més pes a la magnitud, ja que es considera que un major gruix suposa més problemes a l'hora d'obrir la carretera, que les zones on les congestes es formen amb més freqüència però són de poc gruix. Les classes s'han establert com a Alta, Mitja i Baixa (Figura 11).

S'observa, lògicament, com les congestes prioritàries es troben al costat de Castellar de N'Hug (S), amb quatre trams de prioritat alta, i només de forma puntual al costat de Toses (N). El tram més afectat és el comprès entre el PK 18+650 i el coll (PK 21+367). Es tracta de congestes extenses, que poden arribar a tenir una continuïtat de fins a 800 metres lineals.

És important destacar la utilitat de disposar dels models digitals d'elevacions d'alta precisió generats després de cada episodi (Figures 5 i 12). Disposar d'informació detallada 3D de la distribució de la neu és una eina fonamental per al disseny de l'estratègia de reducció de les congestes i per a l'avaluació de la seva efectivitat.

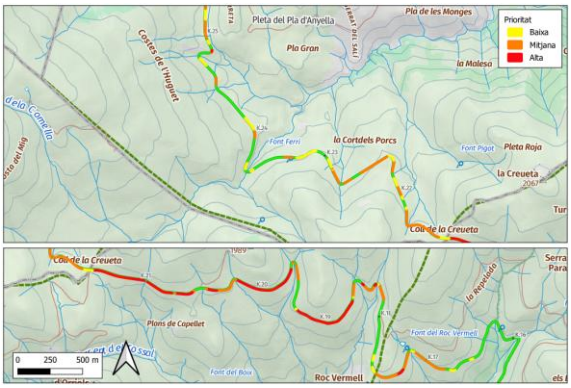


Figura 11 –Classes de prioritat establertes.

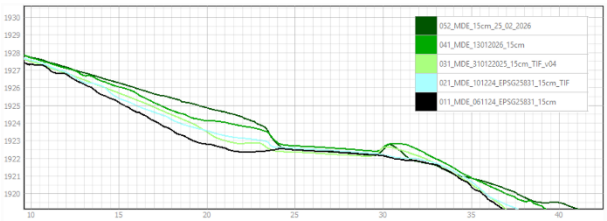


Figura 12 – Superposició dels diferents models generats en cadascun dels episodis de congestes en una secció transversal a la carretera (Pk. 21+300). En negre: superfície del terreny. En tons verdosos: diferents episodis de formació de congestes.

CONCLUSIONS

El seguiment de les temporades 2024/25 i 2025/26 ha permès identificar els principals patrons de formació de congestes i els trams amb major afectació.

S'observen diferències entre els episodis de N i NO, que generen congestes més extenses, i els de S, SO i E, que tendeixen a produir acumulacions de major gruix.

El tram entre el PK 18+650 i el Coll de la Creueta concentra les afectacions més importants i es defineix com a sector prioritari d'actuació.

La informació obtinguda constitueix una base objectiva per dissenyar i avaluar les futures mesures de reducció de les congestes.

REFERÈNCIES

TABLER, R. D. (2003). Controlling Blowing and Drifting Snow with Snow Fences and Road Design. Final Report per al National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Transportation Research Board of the National Academies. Niwot, Colorado: Tabler and Associates

CARACTERITZACIÓ DE LA CAPA DE NEU EROSIONABLE ALS PIRINEUS

Pere Oller Figueras [1,2]; Lukas Stoffel [3], Perry Bartelt [4], Laura Trabal Garmon[1], Jordi Gavaldà Bordes[5], Montse Bacardit Peñarroya[5], Sara Orgué Vila[5], Glòria Martí Domènech[6], Carles García-Sellés [6], Guillem Martín Bellido[7], Xavier Pons Claret [8], Jordi Brocal Hernandez [8]

(1) GeoNeu Risk. geoneurisk@geoneurisk.com
(2) RISKNAT-UB. pere.oller@ub.edu.
(3) WSL-Institut für Schnee-und Lawinenforschung SLF. stoffell@slf.ch
(4) RAMMS AG. perry@ramms.ch
(5) Centre de Lauegi d'Aran – Conselh Generau d'Aran (CLA-CGA). lauegi@aran.org
(6) Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC). Gloria.Marti@icgc.cat
(7) Servei Meteorològic Nacional del Principat d'Andorra (SMNPA). meteo@govern.ad
(8) Diputació de Barcelona (DIBA). ponscx@diba.cat

PARAULES CLAU: capa de neu erosionable, modelització dinàmica d'allaus, Pirineus.

INTRODUCCIÓ

En aquesta comunicació presentem els resultats d'un estudi realitzat a partir de l'anàlisi de perfils del mantell nival als Pirineus, amb l'objectiu de caracteritzar la capa de neu erosionable (*Erodible Snow Layer*, ESL segons el seu acrònim en anglès). Una ESL és la capa de neu, principalment neu recent, que es troba al llarg de la trajectòria d'una allau i que pot ser incorporada, arrossegada o erosionada pel pas de la pròpia allau (procés d'*entrainment*). Aquest fenomen és especialment rellevant en els models de dinàmica d'allaus, que inclouen incorporació de neu en el càlcul d'allaus de flux dens i d'allaus de neu pols. La incorporació de la neu modifica la massa de l'allau i, més important encara, el règim de flux. La incorporació de neu freda afavoreix un règim de flux fluïditzat i de col·lisió, necessari per a la formació d'un núvol de pols de grans dimensions i elevada velocitat (Stoffel et al., 2024). La modelització d'aquest núvol és fonamental en el càlcul d'allaus de neu pols, per determinar-ne l'abast, l'alçada i la intensitat.

La caracterització de la neu erosionable es pot realitzar a partir de dades nivològiques associades a esdeveniments coneguts, quan se'n disposa, mitjançant processos de retroanàlisi, com per exemple el procediment aplicat per Riba et al (2023), o a partir d'uns valors de referència obtinguts empíricament. En un estudi realitzat als Alps suïssos per Stoffel et al (2024), es van obtenir valors de referència per al càlcul d'allaus de neu pols en aquest massís. L'objectiu del present estudi és obtenir els valors de referència corresponents als Pirineus, tenint en compte la menor latitud i les diferents condicions nivoclimàtiques d'aquest massís respecte dels Alps. L'estudi s'ha desenvolupat seguint les pautes metodològiques del treball esmentat i es basa en l'anàlisi de perfils nivològics realitzats durant episodis (cicles) majors d'allaus.

Tal com s'indica a Stoffel et al (2024), el procediment seguit per a la simulació de grans allaus de neu pols es basa en el procediment tradicional de l'SLF (*Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung*; Salm et al., 1990) desenvolupat inicialment per a la simulació d'allaus de flux dens. Aquest procediment inclou quatre passos principals i s'amplia amb quatre passos addicionals per incorporar l'erosió, la temperatura i la densitat de la neu.

Per a la simulació d'allaus de flux dens, l'SLF segueix el següent procediment: 1) Selecció del període de retorn de l'allau; 2) Delimitació de la zona de sortida; 3) Determinació de la profunditat de fractura; 4) Elecció de la categoria de fricció

Per poder simular de manera més realista la formació del núvol de neu pols i la pressió associada a la seva propagació, el procediment proposa els passos addicionals següents: 5) Càlcul de la neu erosionable bàsica; 6) Determinació de la temperatura de la neu a la zona de sortida; 7) Determinació de la densitat de la neu a la zona superior; 8)Aplicació dels gradients altitudinals de gruix de neu erosionable i de temperatura de la neu al llarg del recorregut de l'allau.

Aquesta metodologia sistemàtica permet incorporar en la modelització diversos paràmetres clau que poden tenir una influència significativa tant en la distància d'arribada com en les pressions d'impacte associades a les grans allaus de neu pols.

Per determinar els paràmetres físics dels passos 5 a 8, Stoffel et al (2024) aplica un procediment basat en l'anàlisi de dades empíriques obtingudes a partir

de perfils de neu, contrastades amb models teòrics. En aquest estudi es van analitzar 33 perfils reals de neu enregistrats durant períodes de gran activitat d'allaus de neu pols als Alps.

Es va analitzar específicament la temperatura mitjana del metre superior de la neu recent, excloent els 20 cm més superficials per evitar possibles alteracions derivades de l'exposició a les condicions atmosfèriques. Segons la línia de tendència obtinguda, s'estableixen valors de referència fixos per a les tempestes hivernals: -5 °C per a zones de sortida a altituds baixes (<2.000 msnm); -6 °C per a altituds mitjanes; -7 °C per a altituds elevades (>2.600 msnm) o per a escenaris de fred extrem. Per ajustar la temperatura al llarg de la trajectòria de l'allau, s'aplica, de forma general, un gradient d'escalfament de 0,3 °C per cada 100 m de pèrdua d'altitud, amb un rang de 0,2 a 0,4 °C/100 m.

Pel què fa a la densitat de la neu, s'estableix per al primer metre de la placa de neu a la zona de desencadenament un interval de 150 a 200 kg/m³. Aquests valors es basen en les densitat obtingudes a partir de perfils de neu reals, amb valors mitjans de 150 kg/m³ en zones protegides de l'acció del vent.

Atès el desconeixement d'aquests paràmetres per als Pirineus, i seguint la mateixa metodologia, es va realitzar un estudi d'aquestes variables a partir de perfils nivològics obtinguts en aquest serralada durant episodis d'allaus majors amb desenvolupament de núvols de pols.

MATERIAL I MÈTODES

El primer pas en la realització de l'estudi va consistir en la recopilació de perfils nivològics realitzats temporalment propers a episodis majors d'allaus. Amb aquest objectiu es va sol·licitar a diverses institucions responsables de la predicció regional i local d'allaus -Centre de Lauegi d'Aran (CLA), Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), Diputació de Barcelona (DIBA) i Meteo Andorra (Meteo Ad)- els perfils nivològics disponibles corresponents a la setmana anterior i posterior a episodis majors en què s'haguessin observat allaus amb desenvolupament de núvol de pols.

Des de l'inici de les sèries de dades nivològiques d'aquestes institucions, els principals cicles d'allaus en què s'ha documentat el desenvolupament de núvols de pols són els següents: 22–23/01/1996, 06–08/02/1996, 31/01/2001, 30–31/01/2003, 02–03/01/2004, 29/01/2005, 29/01/2006, 10–15/02/2009, 08–09/03/2010, 20–22/11/2013, 30/12/2014–02/01/2015, 10/02/2018 i 10–11/12/2021. En conjunt, aquests episodis corresponen a 13 cicles majors d'allaus identificats durant un període d'aproximadament 30 anys.

En una segona fase es va procedir a l'anàlisi dels perfils nivològics recopilats. Per a la identificació i caracterització de la capa de neu erosionable (ESL) es van seguir els criteris metodològics aplicats per Stoffel et al. (2024), adaptats a les característiques de les dades disponibles als Pirineus.

Els principals criteris de selecció i anàlisi van ser els següents:

- Es considera sempre el metre superior del mantell nival
- Es consideren preferentment perfils corresponents als mesos de gener i febrer, representatius de les condicions hivernals. S'exclouen els perfils corresponents a condicions primaverals o de neu humida
- Es determina la temperatura mitjana de la neu corresponent al metre superior analitzat, excloent els 20 cm més superficials

A partir del perfil nivològic s'identifica la capa de neu susceptible de ser erosionada i incorporada al flux de l'allau, i se'n determina el gruix, la temperatura mitjana i la densitat (Figura 1).

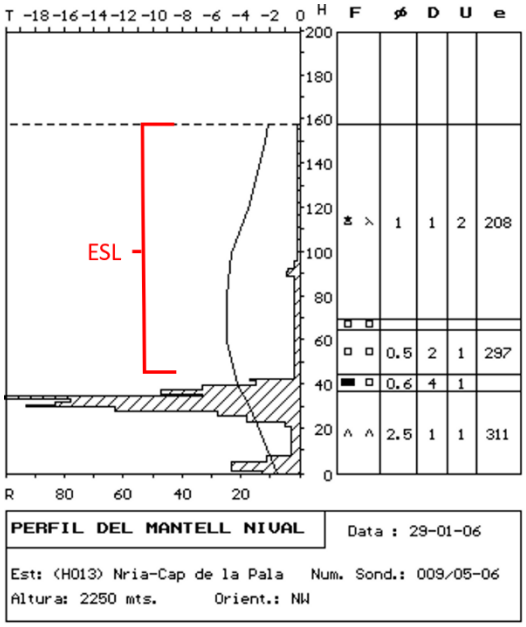


Figura 1 – Exemple d'un dels perfils seleccionats, amb l'ESL considerada, de 110 cm de gruix, una temperatura de -4,2ºC i una densitat de 230 kg/m³.

En una primera fase de selecció es van identificar 43 perfils potencialment representatius. Posteriorment, per garantir una major proximitat temporal entre les condicions del mantell nival caracteritzades en el perfil i l'episodi d'allaus, es va aplicar un criteri temporal de ±48 hores respecte del període en què es va produir cada cicle major d'allaus. Amb aquest criteri, el conjunt final de

dades es va reduir a 12 perfils, considerats representatius de les condicions nivològiques existents durant els episodis analitzats.

La Figura 2 mostra la distribució dels perfils finalment seleccionats. Com es pot observar, la major part dels perfils que compleixen amb els criteris establerts es concentren a la zona d'influència mediterrània dels Pirineus de Catalunya i d'Andorra.

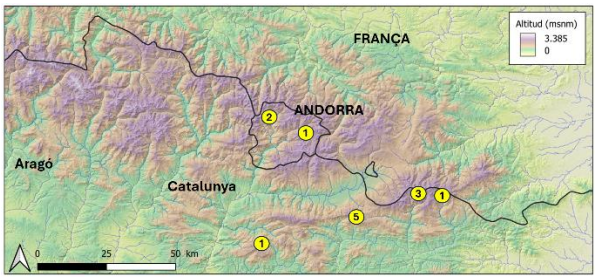


Figura 2 – Distribució dels perfils seleccionats.

RESULTATS

La figura 3 mostra els principals estadístics descriptius dels valors obtinguts per al gruix, la temperatura i la densitat de l'ESL. Els perfils analitzats corresponen a cotes compreses entre 2.000 msnm, i 2.650 msnm.

Variable	Mitjana	Màxim	Mínim	Desviació estàndard
Gruix ESL (cm)	104	125	80	13
Temperatura ESL (°C)	−4,5	−1,8	−8,0	2
Densitat ESL (kg/m³)	216	280	150	43

Figura 3 – Estadístics descriptius dels valors obtinguts en els perfils analitzats.

Els valors de gruix de l'ESL obtinguts presenten una mitjana de 104 cm, amb un valor mínim de 80 cm i un màxim de 125 cm. La desviació estàndard és de 13 cm. Cal tenir en compte, però, que el gruix de neu erosionable no es determina únicament a partir del valor observat en un perfil, sinó que, d'acord amb el procediment de Salm et al. (1990), s'obté mitjançant una anàlisi estadística dels valors extrems de les sèries de gruix de neu. Per tant, els valors obtinguts en aquest estudi constitueixen una caracterització empírica de les condicions observades. Pel que fa a la variació del gruix de l'ESL amb l'altitud, actualment no es disposa d'un gradient específicament establert per als Pirineus. Als Alps suïssos, s'adopta un gradient del gruix de neu erosionable de l'ordre de 3–5 cm per cada 100 m de variació altitudinal (Salm et al., 1990).

Les temperatures de l'ESL presenten una mitjana de −4,5 °C, amb valors compresos entre −8,0 °C i −1,8 °C i una desviació estàndard de 2,0 °C. La Figura 4 mostra la relació entre la temperatura de la neu i l'altitud dels perfils analitzats. Tot i el nombre reduït d'observacions, s'hi observa una tendència general de disminució de la temperatura de l'ESL amb l'altitud. A partir d'aquesta tendència es proposen valors de referència diferenciats per intervals altitudinals. A partir de la gràfica de la Figura 4, es poden establir uns valors de referència de -4ºC per sota dels 2.000 msnm, de -5ºC entre els 2.000 msnm i els 2.200 msnm, de -6ºC entre els 2.200 i 2.500 msnm, i de -7ºC per altituds superiors als 2.500 msnm. Pel que fa al gradient altitudinal de temperatura, a partir dels perfils analitzats s'estima un gradient d'aproximadament 0,5 °C per cada 100 m d'increment d'altitud, amb un rang estimat de 0,4–0,6 °C/100 m.

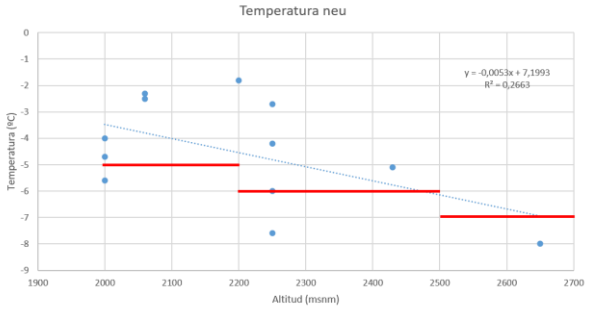


Figura 4 – Relació entre la temperatura de l'ESL i l'altitud dels perfils analitzats.

Pel que fa a la densitat de l'ESL, el nombre de dades disponibles és reduït: únicament es disposa de cinc mesures, ja que aquesta variable no sempre es determina durant la realització dels perfils nivològics. Aquest nombre reduït d'observacions no permet establir una relació estadísticament robusta entre la densitat de l'ESL i l'altitud. Per aquest motiu, no es proposa un gradient altitudinal de densitat. Com a valor de referència, es recomana adoptar una densitat mitjana de l'ordre de 200 kg/m³, considerant un rang orientatiu comprès entre 150 i 280 kg/m³.

<table>
<tr><th></th><th colspan="2">TS (ºC)</th><th colspan="2">ΔTS (ºC/100 m)</th></tr>
<tr><th>Altitud (msnm)</th><th>Pirineus</th><th>Alps</th><th>Pirineus</th><th>Alps</th></tr>
<tr><td>1900</td><td rowspan="2">-4</td><td rowspan="3">-5 (-4)</td><td rowspan="10">0,5 (0,4-0,6)</td><td rowspan="10">0,3 (0,2-0,4)</td></tr>
<tr><td>2000</td></tr>
<tr><td>2100</td><td rowspan="2">-5</td></tr>
<tr><td>2200</td><td rowspan="4">-6</td></tr>
<tr><td>2300</td></tr>
<tr><td>2400</td></tr>
<tr><td>2500</td><td rowspan="3">-7</td></tr>
<tr><td>2600</td><td rowspan="2">-7 (-8)</td></tr>
<tr><td>2700</td></tr>
</table>

Figura 5 – Valors de referència proposats per a la modelització d'allaus de neu pols en condicions representatives dels Pirineus orientals, en comparació amb els valors de referència adoptats als Alps suïssos.

DISCUSSIÓ I CONCLUSIONS

Els perfils nivològics compilats proporcionen una primera base de dades regional per caracteritzar les propietats de la capa de neu erosionable (ESL) i definir valors de referència per a la modelització de la dinàmica d'allaus als Pirineus. Malgrat el nombre limitat de perfils disponibles, els resultats obtinguts suggereixen diferències sistemàtiques respecte dels valors de referència establerts per als Alps suïssos, especialment pel que fa a la temperatura de la neu i al seu gradient altitudinal.

Els valors de temperatura de referència proposats per als Pirineus són aproximadament 1 °C superiors als adoptats als Alps suïssos per a altituds comparables. Així mateix, el gradient altitudinal estimat per a la temperatura de l'ESL és d'aproximadament 0,5 °C/100 m, és a dir, uns 0,2 °C/100 m superior al valor de referència de 0,3 °C/100 m utilitzat als Alps (Stoffel et al., 2024). Aquestes diferències són coherents amb les particularitats nivoclimàtiques dels Pirineus i suggereixen que l'aplicació directa dels paràmetres desenvolupats per als Alps pot introduir diferències significatives en els resultats de les simulacions.

Pel que fa a la densitat de l'ESL, els valors disponibles se situen entre 150 i 280 kg/m³, amb una densitat mitjana de 216 kg/m³. No obstant això, el nombre de mesures disponibles és molt reduït i no permet establir una relació robusta entre la densitat i l'altitud. Per aquest motiu, es proposa adoptar, com a valor de referència per a la modelització, una densitat de l'ordre de 200 kg/m³, considerant el rang observat com a interval orientatiu.

La importància de les diferències de temperatura identificades rau en la seva possible influència sobre la dinàmica de les allaus de neu pols. Segons Stoffel et al. (2024), variacions de l'ordre d'1 °C en la temperatura de la neu erosionable poden produir canvis significatius en el comportament del núvol de pols i, en determinades simulacions, reduccions de l'ordre de 100 m en la distància d'arribada. Per tant, la utilització de valors de temperatura específics per als Pirineus pot ser rellevant per obtenir simulacions més representatives de l'abast i de les pressions associades a les grans allaus de neu pols.

Tanmateix, els resultats s'han d'interpretar amb cautela. La mostra analitzada és limitada i presenta una distribució espacial i altitudinal no homogènia. A més, la manca de mesures sistemàtiques de densitat en els perfils nivològics disponibles limita especialment la capacitat d'establir valors de referència robustos per a aquest paràmetre. Els gradients altitudinals proposats, s'han de considerar, per tant, com una primera aproximació regional que haurà de ser contrastada amb una base de dades més àmplia.

Per millorar la caracterització de l'ESL als Pirineus, les futures campanyes de mesures haurien de prioritzar l'adquisició de perfils nivològics durant o immediatament abans dels cicles d'allaus majors. Seria convenient, així mateix, incorporar de manera sistemàtica les mesures de temperatura, densitat i gruix de l'ESL. L'ampliació de l'anàlisi a altres sectors del Pirineu, especialment al Pirineu aragonès i francès, permetria augmentar la representativitat espacial de la mostra.

En conjunt, els resultats obtinguts constitueixen una primera aproximació als paràmetres de la neu erosionable específics dels Pirineus i posen de manifest la necessitat de considerar les particularitats nivoclimàtiques del massís en la modelització d'allaus de neu pols. Els valors de temperatura, gradient altitudinal i densitat proposats poden servir com a valors de referència inicials per al calibratge regional dels models de simulació, si bé cal ampliar la base de dades per validar-los i quantificar-ne la incertesa. Aquesta millora de la caracterització dels paràmetres d'entrada pot contribuir a obtenir estimacions més representatives de l'abast i de les pressions d'impacte de les grans allaus de neu pols i, en conseqüència, a una millor avaluació i gestió del risc en zones de muntanya.

AGRAÏMENTS

S'agraeix al Centre de Lauegi d'Aran (CLA), a l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), a Meteo Andorra (Meteo Ad), i a la Diputació de Barcelona (DIBA), la seva col·laboració en la cessió dels perfils nivològics per al seu anàlisi.

BIBLIOGRAFIA

RIBA, S., MARTÍ, G., GARCÍA-SELLÉS, C., MANGUÁN, S., PONS, J., & VILAR, F. (2023). Reproducing layer and powder avalanche flow from structural building damages by means of the RAMMS extended model. International Snow Science Workshop (ISSW) 2023, Bend, Oregon, USA.

SALM, B., BURKARD, A., & GUBLER, H. U. (1990). *Berechnung von Fliesslawinen: eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen* (Mitteilungen des Eidgenössischen Instituts für Schnee- und Lawinenforschung, No. 47). Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF).

STOFFEL, L., BARTELT, P., & MARGRETH, S. (2024). Scenario-Based Avalanche Simulations Including Snow Entrainment, Snow Temperature and Density. Proceedings of the International Snow Science Workshop (ISSW 2024), Tromsø, Noruega, pp. 374–380.

LA PLATAFORMA ALBINA, DELS ALPS ALS PIRINEUS. EINA PER A LA PREDICCIÓ I LA COMUNICACIÓ DEL PERILL D'ALLAUS REGIONAL

Sara Orgué Vila[1]; Jordi Gavaldà Bordes [1] i Montse Bacardit Peñarroya [1]

(1) Centre de Lauegi – Conselh Generau d'Aran; lauegi@aran.org

PARAULES CLAUS: predicció regional d'allaus, projecte ALBINA, estàndards EAWS, Val d'Aran, Pirineus.

INTRODUCCIÓ

El projecte ALBINA (Mitterer et al., 2018) neix de la necessitat d'harmonitzar la predicció regional d'allaus entre territoris alpins. Impulsat pels centres de l'EUROREGIÓ del Tirol, Sud-Tirol i Trentino, es va instaurar a partir de la temporada 2018-19 un format de butlletí conjunt i multilingüe, seguint els estàndards de l'European Avalanche Warning Services (EAWS).

El sistema es fonamenta en un marc conceptual i un flux de treball consensuats que permeten augmentar la consistència en l'avaluació i comunicació del perill d'allaus entre predictors i centres diferents, mantenint alhora la flexibilitat operativa.

ALBINA utilitza una plataforma de codi obert i un catàleg de frases estructurat que facilita la generació automatitzada de butlletins en diferents idiomes. El sistema prioritza una comunicació clara i homogènia orientada tant als usuaris de la muntanya com a les autoritats locals.

Actualment, ALBINA és utilitzada al Tirol, Sud-Tirol i Trentino, a les regions italianes coordinades per AINEVA, i pels centres de predicció d'Eslovàquia, Eslovènia i la Val d'Aran.

BASES DEL PROJECTE ALBINA

Un dels pilars del projecte és l'editor de codi lliure, dissenyat per facilitar la incorporació de nous membres a la iniciativa. La plataforma web conjunta està preparada per integrar les observacions nivo-meteorològiques, avaluar el perill d'allaus mitjançant un mateix flux de treball i elaborar un butlletí d'allaus amb el mateix format gràfic i de text, seguint els estàndards de l'EAWS. Aquests són, principalment, l'Escala Europea de Perill d'Allaus, els Problemes d'Allaus Típics (TAPs) i la Matriu (EAWS, 2025) com a eina objectiva per assignar el grau de perill corresponent. La plataforma també està pensada per l'automatització de la producció i publicació dels butlletins en diferents idiomes.



Figura 1 – Butlletí de Perill d'Allaus emès pel Centre de Lauegi deth Conselh Generau d'Aran vàlid pel dia 11 de gener de 2026 i confeccionat des de la plataforma ALBINA.

L'eina permet dividir el domini de predicció de cada centre en diferents micro-regions. Per a cada butlletí, aquestes es combinen de manera flexible

en regions de predicció que comparteixen una mateixa avaluació del perill d'allaus. El grau de perill i els TAPs encapçalen el comunicat, seguit d'un apartat de text que detalla la informació i que acaba amb la descripció de la tendència del perill a 48 hores.

El contingut de text del butlletí s'elabora a partir del Catàleg de frases (CoP). Aquest catàleg està format per 132 frases estructurades en segments combinables i té l'origen en el catàleg de frases suís, utilitzat des del 2012 pel WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF. Amb la incorporació de noves regions a la iniciativa, aquesta primera versió va ser ampliada i, actualment, està disponible en 7 idiomes. Utilitzant prop de 1500 expressions, es descriuen de forma clara i concisa les principals fonts de perill (TAPs), la seva distribució en cotes i orientacions, la seva freqüència i estabilitat, i la mida d'allau que poden atènyer. Aquest sistema d'escriptura també permet elaborar un paràgraf per descriure la cobertura i els gruixos de neu, l'estructura del mantell i la seva variabilitat, un pronòstic del temps rellevant pel perill d'allaus i unes recomanacions de gestió, tant pels usuaris recreatius com per les autoritats locals.

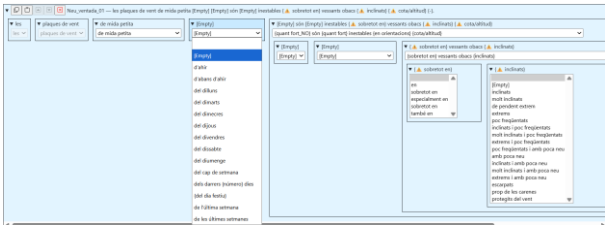


Figura 2 – Imatge del panell d'administració durant la utilització del CoP per generar el text d'un Butlletí de Perill d'Allaus dins de la plataforma ALBINA.

Els butlletins són vàlid des de l'hora de la publicació a les 17h fins a les 17h del dia següent. Si les condicions ho requereixen, també és possible publicar un grau de perill diferent pel matí i per la tarda. Quan hi ha incertesa en el pronòstic o les condicions són diferents de les pronosticades, es pot fer una actualització a les 8h, o fins i tot forçar una publicació en qualsevol moment per alertar d'una situació excepcional.

Un altre dels pilars del projecte és l'aplicació estricta dels estàndards de l'EAWS també en el procés intern d'anàlisi i avaluació del perill. L'eina guia la persona encarregada de fer la predicció a través d'un flux de treball estructurat, d'acord amb les directrius de la matriu EAWS. Aquest procés permet recórrer les diferents variables necessàries per descriure els TAPs i, finalment, aplicar la matriu per determinar el grau de perill de cada regió de predicció.

Aquestes estaran formades per l'agregat de micro-regions que, aquell dia, comparteixen una mateixa avaluació.



Figura 3 – Imatge del panell d'administració durant la selecció i la caracterització dels TAPs d'un Butlletí de Perill d'Allaus dins de la plataforma ALBINA.

A l'inici del procés, el sistema incorpora, amb caràcter experimental, una autoavaluació del nivell d'estrès del professional, amb l'objectiu de fomentar la consciència sobre la influència que el seu estat personal pot tenir en el procés d'anàlisi.

Per altra banda, l'Albina emmagatzema els butlletins en format de base de dades. Això permet exportar-los per fer els anàlisis estadístics de balanç de temporada, investigar la variabilitat entre predictors i utilitzar-los per a entrenar i testar models. A l'Aran, per exemple, s'ha testat el model de perill d'allaus suís desenvolupat per Pérez-Guillen et al. (2022) a partir de 3 hiverns de butlletins.

Per acabar, al ser un projecte col·laboratiu, la plataforma Albina té un manteniment i unes millores continuades desenvolupades principalment pel Tirol, però que se'n beneficien tots els centres que l'utilitzen.

ALBINA ALS PIRINEUS

El Centre de Lauegi deth Conselh Generau d'Aran es va incorporar al projecte l'hivern 2020-21,

traduint el CoP a l'aranès, al català i al castellà amb la col·laboració del Govern d'Andorra. Al mateix temps, això també va permetre publicar els butlletins de l'EUREGIÓ en aquestes llengües. Aquesta adhesió respon tant a la realitat multilingüe de la Val d'Aran com a l'augment del turisme internacional. Per la seva banda, el Govern d'Andorra, tot i no generar els seus butlletins amb Albina, si que ha incorporat el CoP pels apartats de text.

En aquesta contribució també s'analitza el potencial d'una implantació més extensa d'aquest model als Pirineus, una serralada que comparteix amb els Alps un mosaic de diferents serveis de predicció, llengües i maneres de treballar, però amb una mobilitat creixent d'usuaris entre territoris.

Durant la temporada 25/26, sis centres de predicció —Lauegi, ICGC, AEMET, A Lurte, Météo-France i Govern d'Andorra – han publicat butlletins d'allaus a escala regional als Pirineus, la majoria amb periodicitat diària. Tot i que aquests centres utilitzen l'Escala Europea de Perill d'Allaus, així com els TAPs i la piràmide d'informació seguint les directrius de l'EAWS, els butlletins presenten diferències significatives pel que fa a l'horari de publicació, al format, a les eines de comunicació utilitzades i al nivell de detall de la informació proporcionada. A dia d'avui, aquesta complexitat es veu accentuada pel fet que determinades àrees geogràfiques com la Val d'Aran, la zona de Canfranc i Catalunya disposen de més d'un butlletí, emesos per centres de predicció diferents. El conjunt de la situació descrita genera certa confusió entre els usuaris, que han d'aprendre a interpretar informació procedent de diferents fonts i, en alguns casos, consultar-la en una llengua que no dominen.

D'altra banda, els mateixos centres presenten estructures organitzatives diverses. Aquestes diferències es manifesten en la formació dels observadors i predictors implicats, en la recollida de la informació de camp i en el mateix procés d'anàlisi. En aquest context, el projecte Albina ofereix una molt bona eina de suport a la predicció. A més a més, la plataforma també permet als tècnics visualitzar a temps real el procés de confecció dels butlletins de regions veïnes i intercanviar suggeriments abans de la publicació definitiva dels comunicats.

CONCLUSIONS

La implementació del projecte ALBINA contribueix a homogeneïtzar i objectivar els processos de treball dels diferents centres implicats, i facilita la comunicació amb els usuaris.

A escala pirinenca, el seu desplegament permetria consultar, des d'un mateix entorn web, els butlletins de la serralada en un format homogeni i disponibles en diferents idiomes preservant les llengües minoritzades. També representaria un projecte cooperatiu entre els diferents centres que compartirien una molt bona eina de suport a la predicció.

Des de ja fa temps, la bona acollida de la iniciativa als Alps ha despertat l'interès de diversos centres de predicció pirinencs, que han començat a explorar-ne les possibilitats d'implantació. Aquesta tendència es consolidarà aquest mateix hivern amb la posada en funcionament d'un nou servei de predicció a la serralada, concebut des de l'inici per operar amb el suport d'aquesta eina automatitzada, i liderat pel Servicio de Seguridad y Protección Civil del Gobierno de Aragón.

REFERÈNCIES

EUROPEAN AVALANCHE WARNING SERVICES. (s. d.). European Avalanche Warning Services. https://www.avalanches.org/

EUROPEAN AVALANCHE WARNING SERVICES. (2022). Avalanche problems, approved by General Assembly of EAWS, Davos, 2022. EAWS.

MITTERER, C., LANZANASTO, N., NAIRZ, P., BONINSEGNA, A., MUNARI, M., GEIER, G., RASTNER, L., GHESER, F., TRENTI, A., BEGNINI, S., TOGNONI, G.-L., PUCHER, A., NELL, D., KRIZ, K., & MAIR, R., 2018. Project ALBINA: A conceptual framework for a consistent, cross-border and multilingual regional avalanche forecasting system. Proceedings of the International Snow Science Workshop 2018, 1523–1530.

MÜLLER, K., TECHEL, F., & MITTERER, C., 2025. The EAWS matrix, a decision support tool to determine the regional avalanche danger level: Conceptual development. Natural Hazards and Earth System Sciences.

PÉREZ-GUILLÉN, C., TECHEL, F., PURVES, R.S., SCHWEIZER, J. AND VAN HERWIJNEN, A., 2022. Data-driven automated predictions of the avalanche danger level for dry-snow conditions in Switzerland. The Cryosphere, 16(11), pp.4731-4756.

WINKLER, K., & KUHN, T. (2017). Fully automatic multi-language translation with a catalogue of phrases—Successful employment for the Swiss avalanche bulletin. Language Resources and Evaluation, 51, 13–35. https://doi.org/10.1007/s10579-015-9316-5

INTERVENCIÓ I CONTROL SOBRE EL TERRENY D'UNA ALLAU DE LLISCAMENT BASAL EN ENTORN URBÀ SENSE OPCIONS DE DESENCADENAMENT AMB EXPLOSIUS

Sergi Riba Porras [(1)]; Vicente de Medina Iglesias [(2)]; Joan Albós Cavaliere [(3)] i Carles García-Sellés [(1)]

(1) Nivorisk - Hydroalpin. C/Falguers 5, Segudet-Ordino, Andorra, AD300. nivorisk@nivorisk.com
(2) Universitat Politècnica de Catalunya. C/Jordi Girona, 31, Barcelona 08034. vicente.de.medina@upc.edu
(3)Bombers Andorra, Grup EMEDA. Parc de Bombers Central del Principat d'Andorra, Santa Coloma, Andorra AD500. secretaria_formacio_bombers@govern.ad

PARAULES CLAUS: gestió de risc d'allaus, lliscament basal, Ramms Avalanche.

RESUM

Les allaus de lliscament basal es diferencien de les allaus de placa seca perquè la ruptura es produeix a la interfície neu–sòl i pot mobilitzar la totalitat del mantell nival. El lliscament de la neu està controlat per les condicions mecàniques i hidràuliques al contacte amb el terreny. L'aigua líquida a la interfície neu–sòl és el mecanisme de reducció de la fricció basal i d'afavoriment del lliscament. Els models mecànics i les observacions de camp recents remarquen la importància de la magnitud i distribució espacial de la fricció basal i de l'aigua interficial en la determinació de la localització i la mida de la ruptura (Clarke i McClung, 1999; Mitterer i Schweizer, 2012; Fees et al., 2025).

Operativament, les allaus de lliscament basal continuen essent especialment difícils de gestionar. Una esquerda de lliscament evidencia el desplaçament del mantell, però no permet determinar de manera fiable el moment de ruptura total. La mitigació també és problemàtica: és reconegut que les allaus de fons són difícils de controlar amb explosius, especialment quan la zona de sortida es troba directament sobre edificacions. Stoffel i Margreth (2009) assenyalen que el desencadenament artificial sobre zones habitades s'ha d'emprar amb extrema prudència, pel risc de provocar involuntàriament una allau prou gran per causar danys a les edificacions. Treballs posteriors de Stoffel et al. (2013) també identifiquen el potencial de dany i el desencadenament no desitjat d'allaus secundàries com a possibles criteris de no-actuació.

Aquest article documenta una intervenció d'emergència realitzada entre els dies 17 i 20 de febrer de 2026 al Pas de la Casa, Andorra. L'objectiu operatiu no era desencadenar tota la massa de neu inestable, sinó reduir-ne progressivament la continuïtat mecànica, subdividir-la en volums menors i, posteriorment, induir el lliscament basal controlat d'aquests blocs. El treball se centra en tres aspectes: (1) l'avaluació de les conseqüències potencials mitjançant modelització RAMMS de flux dens; (2) el raonament operatiu per descartar els explosius i l'aportació massiva d'aigua; i (3) l'aplicació sobre el terreny i l'efectivitat observada del pretall hidràulic progressiu i de l'aplicació local d'aigua a la base.

ZONA D'ESTUDI I EPISODI

La inestabilitat es va detectar en un vessant curt i inclinat (ESE, 2160 m), al costat de la carretera CG-2 al Pas de la Casa, sobre una zona comercial (Figura 1). La sortida se situava pràcticament damunt dels carrers i façanes exposades. A diferència d'un corredor d'allau convencional, la distància entre la massa inestable i els elements vulnerables era molt reduïda, de manera que fins i tot un volum modest podia generar impactes significatius.

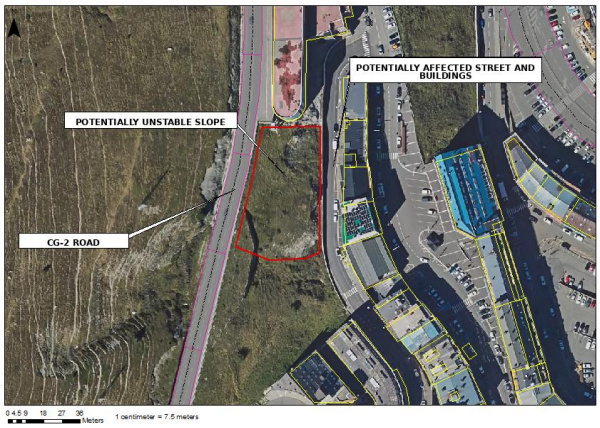


Figura 1 – Localització del vessant inestable sobre el sector urbà del Pas de la Casa (rectangle vermell). Font: Nivorisk / Cos de Bombers d'Andorra, 17 de febrer de 2026.

L'hivern 2025–2026 va presentar una innivació excepcional, amb gruixos puntualment al voltant del percentil 90 de gener a abril a l'estació de Sorteny (www.oma.ad). Cap a les 15:00 h del 17 de febrer, els Bombers d'Andorra van informar d'una gran esquerda en el mantell sobre la zona urbana (Figura 2). Els tècnics de Nivorisk van confirmar una situació de lliscament basal. L'esquerda tenia uns 50 m de longitud i es va adoptar un gruix representatiu d'1,0 m, amb neu densa i compactada. Dins del mantell s'hi observava una crosta interna de regel d'uns 3 cm, porosa i poc consolidada, situada 0,30 m sota la superfície, però no coincident amb el pla de lliscament. El volum mobilitzable es va estimar en uns 2.000 m³, amb una densitat representativa de 400 kg m^{-3}, corresponent a una massa potencial d'unes 800 t.



Figura 2 – Esquerda de lliscament i terreny exposat observats al vessant sobre la zona urbana. Font: Cos de Bombers d'Andorra / Nivorisk, 17 de febrer de 2026.

AVALUACIÓ NUMÈRICA I DECISIÓ OPERATIVA

Es va efectuar una avaluació ràpida sobre una topografia altimètrica de 0,5 × 0,5 m amb el model RAMMS:AVALANCHE per a neu densa. El model resol el moviment d'allaus amb equacions mitjanades en profunditat i una resistència basal de tipus Voellmy, amb fricció μ i terme turbulent ξ (Bartelt et al., 1999; Christen et al., 2010). En aquest cas, RAMMS es va utilitzar només per determinar la possible propagació de la massa observada i la intensitat sobre els elements vulnerables.

El model d'emergència va emprar un polígon de sortida amb pendent mitjà de 36°, cota de 2.145 m i superfícies de 1.354 m² (projectada) i 1.764 m² (inclinada). Amb un gruix d'1,0 m, el volum simulat era de 1.764 m³, equivalent a unes 706 t per una densitat de 400 kg/m³, coherent amb l'estimació de camp.

La simulació mostrava que un desencadenament complet podia afectar el carrer inferior i façanes properes, amb gruixos de flux d'uns 2 m i pressions d'impacte d'uns 40 kPa (Figura 3). Aquests valors van justificar el tancament preventiu del carrer i l'evacuació dels sectors exposats.

Es va descartar l'ús d'explosius perquè la inestabilitat era de lliscament basal, poc sensible a detonacions, i perquè la zona de sortida era immediata sobre edificacions, amb risc d'induir un volum excessiu. També es va descartar l'aplicació d'aigua des d'helicòpter, ja que podia reduir la fricció basal i mobilitzar tota la massa d'uns 2.000 m³, contrari a l'objectiu de limitar progressivament el volum connectat.

INTERVENCIÓ SOBRE EL TERRENY: FRAGMENTACIÓ HIDRÀULICA PROGRESSIVA.

La intervenció es va plantejar canviant l'objectiu operatiu: no es buscava desencadenar tota l'allau, sinó reduir el volum de sortida mitjançant la fragmentació del mantell. Un bomber, assegurat amb cordes, va accedir al vessant i va practicar talls perpendiculars al pendent a 1–2 m de profunditat per trencar la continuïtat lateral i definir blocs independents. Un cop generades les discontinuïtats, s'hi aplicava aigua al contacte neu–sòl per afavorir el lliscament controlat del bloc aïllat.

Els talls travessaven el mantell d'1,0 m, incloent la crosta interna de regel de 3 cm situada a 0,30 m, i continuaven fins a la neu densa inferior fins a arribar al terreny. La crosta no era el pla de ruptura. Inicialment, el raig actuava de manera mecànica, erosionant la neu; després, l'aigua reduïa la resistència al cisallament basal.

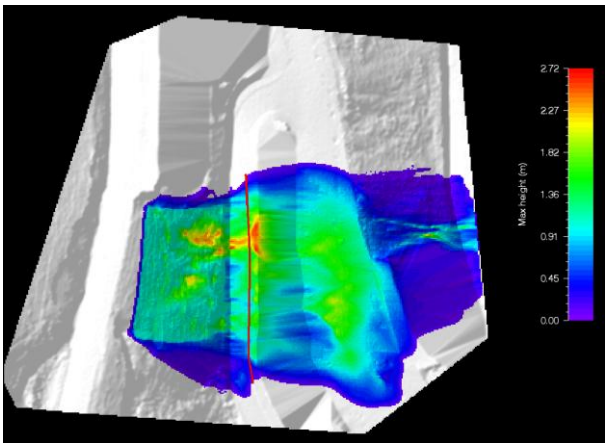


Figura 3 – Alçada màxima del flux dens obtinguda amb RAMMS. La simulació mostra acumulacions importants a la part inferior del vessant i a la interfície amb la zona urbana. Font: Nivorisk.

El sistema utilitzat era una mànega de 45 mm amb llança TurboJet, operant a 475 L/min, 7 bar a la punta i una reacció d'uns 28,8 kgf. Els càlculs hidràulics mostraven una velocitat del raig d'uns 36

m/s i una potència d'uns 5 kW, suficients per justificar l'erosió observada a distàncies curtes. Aquesta verificació era secundària respecte de l'estratègia de fragmentació.

L'endemà, els Bombers van aplicar el raig al sector més inestable (pendent d'uns 38°) (Figura 4), provocant tres despreniments parcials durant el matí, coherents amb l'objectiu de mobilitzar blocs successius i no tota la massa. La neu residual de la part superior es va retirar els dies 19 i 20 amb una retroexcavadora tipus aranya (Figura 5), i posteriorment es va mantenir un seguiment nivo-meteorològic per detectar possibles moviments.



Figura 4 – Bomber assegurat amb cordes aplicant el raig concentrat durant la fragmentació hidràulica progressiva. Font: Nivorisk/Bombers d'Andorra.

DISCUSSIÓ

La reducció controlada del volum com a concepte operatiu clau: La principal singularitat de la intervenció no resideix tant en l'ús de l'aigua com en la seqüència i l'escala espacial de la seva aplicació. La primera actuació tenia una funció de fragmentació mecànica: els pretalls transversals reduïen la continuïtat lateral del mantell i definien unitats de sortida més petites. Només en una segona fase, l'aigua s'aplicava localment cap a la interfície basal. Per tant, el mateix mecanisme físic que pot incrementar el risc en un context de lliscament basal —la reducció de la fricció neu–sòl per presència d'aigua— es va utilitzar deliberadament a una escala espacial limitada i sobre blocs prèviament definits. Els treballs de Fees et al. (2024) mostren que la mida de les allaus de lliscament depèn fortament de la distribució espacial de la resistència basal i de les zones de baixa fricció. Tot i que aquesta intervenció no constitueix una validació experimental d'aquests models, la correspondència conceptual és rellevant: l'estratègia operativa pretenia evitar una reducció homogènia i simultània de la resistència basal sobre tota la massa.

Paper i limitacions de la modelització numèrica: El software RAMMS es va utilitzar per analitzar les possibles conseqüències d'un potencial desencadenament global de la massa de neu observada. La transició física entre el lliscament lent i el desencadenament de fons depèn de processos acoblats que inclouen la fricció basal, la distribució d'aigua interficial, la rugositat del terreny, les propietats mecàniques de la neu i la redistribució local de tensions. La modelització RAMMS responia, en canvi, a la pregunta operativa de propagació: si la massa es desencadena, quin abast, alçada de flux i pressió d'impacte pot generar? Aquesta separació entre iniciació i propagació és essencial per interpretar correctament els resultats i evitar atribuir al model capacitats predictives que no té en aquest context.



Figura 5 – Finalització mecànica del sanejament mitjançant una retroexcavadora tipus aranya, després dels principals despreniments de blocs induïts hidràulicament. Font: Nivorisk/Cos de Bombers d'Andorra.

Limitacions operatives: Aquest cas descriu una intervenció d'emergència i no un experiment controlat. No es van mesurar directament la pressió d'aigua a la base, el contingut d'aigua líquida ni el coeficient de fricció neu–sòl durant l'operació. Tampoc no es van topografiar de manera independent els volums exactes dels tres blocs desencadenats. La simulació RAMMS representa (simplificadament) la propagació d'un flux dens després d'una ruptura imposada i no reprodueix el mecanisme físic de ruptura basal. Finalment, els valors hidràulics provenen de la configuració

operativa i del programa de càlcul del Cos de Bombers, i no de mesures instrumentals d'alta freqüència efectuades directament sobre el raig.

La tècnica també requeria unes condicions que no es poden donar per garantides en altres emplaçaments: evacuació i tancament previs de la zona exposada, bombers altament qualificats en treballs amb cordes, possibilitat d'aplicar el raig a molt curta distància, supervisió tècnica contínua i capacitat d'interrompre immediatament l'aportació d'aigua si canviava el comportament del mantell. Per tant, la intervenció s'ha d'interpretar com una estratègia específica de gestió del risc en un context especialment restringit, i no com un substitut general dels mètodes convencionals de control d'allaus.

CONCLUSIONS

El 17 de febrer de 2026 es va desenvolupar una massa de neu potencialment inestable per lliscament basal, d'aproximadament 2.000 m³, immediatament per sobre d'una zona urbana del Pas de la Casa. La modelització RAMMS de flux dens va indicar que el desencadenament complet podia afectar el carrer inferior i les façanes adjacents, amb gruixos de flux de l'ordre de 2 m i pressions d'impacte de l'ordre de 40 kPa en els sectors exposats. Aquests resultats van justificar mesures preventives d'evacuació i tancament.

El desencadenament convencional amb explosius es va considerar inadequat per la naturalesa basal de la inestabilitat i per l'exposició urbana immediata. Igualment, es va evitar una aportació ràpida i extensa d'aigua perquè una reducció simultània de la resistència basal podia afavorir la mobilització de tota la massa. Es va adoptar, en canvi, una estratègia de reducció progressiva del volum potencialment mobilitzable.

Un bomber assegurat amb cordes va utilitzar un raig concentrat d'aigua d'aproximadament 475 L min^{-1} i 7 bar a la punta de llança per executar pretalls transversals a través del mantell dens d'aproximadament 1 m de gruix. Una comprovació hidràulica simple dona una velocitat efectiva del raig d'uns 36 m s^{-1} i una potència cinètica de l'ordre de 5 kW, valors compatibles amb l'erosió progressiva observada. Els pretalls van permetre reduir la continuïtat mecànica del mantell, definir blocs més petits i, posteriorment, aplicar aigua localment a la interfície neu–sòl per afavorir-ne el lliscament. L'operació va provocar tres despreniments principals de blocs abans del sanejament mecànic final.

La principal lliçó d'aquest episodi és operativa: quan el desencadenament complet d'una massa nival és inacceptable, la combinació d'una avaluació de camp de la mecànica del mantell, una modelització ràpida de conseqüències i una fragmentació física controlada pot oferir una via alternativa per reduir progressivament el risc. El cas del Pas de la Casa posa de manifest el valor d'integrar observació directa, modelització numèrica, presa de decisions conservadora i adaptació sobre el terreny en situacions en què les tècniques convencionals de control no són adequades.

AGRAÏMENTS

Els autors agraeixen al Cos de Bombers d'Andorra - EMEDA per l'actuació operativa, les dades d'observació i hidràuliques obtingudes sobre terreny utilitzades en aquest estudi.

REFERÈNCIES

BARTELT, P., SALM, B. AND GRUBER, U. 1999. Calculating dense-snow avalanche run-out using a Voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining. Journal of Glaciology, 45(150), 242–254.

CHRISTEN, M., KOWALSKI, J. AND BARTELT, P. 2010. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. Cold Regions Science and Technology, 63(1–2), 1–14.

CLARKE, J. AND MCCLUNG, D. 1999. Full-depth avalanche occurrences caused by snow gliding, Coquihalla, British Columbia, Cana-da. Journal of Glaciology, 45(151), 539–546.

FEES, A., VAN HERWIJNEN, A., LOMBARDO, M., SCHWEIZER, J. AND LEHMANN, P. 2024. Glide-snow avalanches: a mechanical, thres-hold-based release area model. Natural Hazards and Earth System Sciences, 24, 3387–3400.

FEES, A., LOMBARDO, M., VAN HERWIJNEN, A., LEHMANN, P. AND SCHWEIZER, J. 2025. The source, quantity, and spatial distribution of interfacial water during glide-snow avalanche release: experimental evidence from field monitoring. The Cryosphere, 19, 1453–1468.

MITTERER, C. AND SCHWEIZER, J. 2012. Towards a better understanding of glide-snow avalanche formation. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Anchorage, Alaska.

STOFFEL, L. AND MARGRETH, S. 2009. Artificial avalanche release above settlements. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Davos, Switzerland.

STOFFEL, L., MARGRETH, S., SCHWEIZER, J., 2013. Artificial avalanche release and the probability of triggering secondary avalanches. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Grenoble-Chamonix Mont-Blanc, France.

METODOLOGIA BASADA EN SIG PER A LA PRIORITZACIÓ EN TEMPS REAL DE LES OPERACIONS DE CONTROL D'ALLAUS AL DOMINI ESQUIABLE D'ORDINO ARCALÍS, ANDORRA

Sergi Riba Porras [1]; Joan Viladomat Novell [2]; Albert Reyes Comorera [1] i Carles García-Sellés [1]

(1) Nivorisk - Hydroalpin. C/Falguers 5, Segudet-Ordino, Andorra, AD300. nivorisk@nivorisk.com
(2) PGI-SAETDE-SECNOA, Prat de la Creu, 59–65 B, 5a planta, AD500 Andorra la Vella, Andorra. contact@pgi.ad

PARAULES CLAUS: gestió de risc d'allaus, modelització numèrica, estació d'esquí, desencadenament d'allaus.

RESUM

La prioritització del control d'allaus en dominis esquiables exigeix integrar la susceptibilitat del terreny, l'evolució del mantell, l'exposició operacional i el criteri expert en un sistema de decisió àgil. L'estudi presenta una metodologia SIG per prioritzar els tirs preventius a Ordino Arcalís, identificant quines zones de sortida s'han de tractar primer segons la seva capacitat d'afectar pistes, remuntadors, edificis, accessos i altres elements exposats.

El flux de treball combina quatre blocs: antecedents cadastrals i històrics, anàlisi geomorfològica, monitoratge nivològic i modelització numèrica. La base espacial inclou 57 zones de sortida definides a partir del cadastre, la topografia, la fotointerpretació, el treball de camp i el coneixement operacional. La càrrega recent es controla amb estacions automàtiques en finestres de 24, 48 i 72 h, complementades amb perfils estratigràfics, tests d'estabilitat i observacions directes.

El llindar inicial de 40 cm de neu nova deriva de tres dècades d'experiència i s'utilitza com a criteri operacional pendent de verificació i recalibratge. Les condicions observades es comparen amb una biblioteca de simulacions RAMMS precomputades amb diversos gruixos i dues configuracions físiques per estimar abasts i interseccions amb elements vulnerables.

La prioritització final aplica tres criteris binaris — càrrega recent, indicis d'inestabilitat i conseqüència potencial— sempre validats amb criteri expert. La metodologia busca millorar l'eficiència, la traçabilitat i la seguretat de les decisions PIDA, i planteja ampliar la xarxa automàtica de mesura a diferents cotes i orientacions.

ÀREA D'ESTUDI I ANTECEDENTS

Context nivoclimàtic. Ordino Arcalís és al sector nord-occidental d'Andorra, en alta muntanya i amb influència atlàntica. Les adveccions de N i NW aporten gran part de les nevades i sovint generen vent intens, que redistribueix la neu i crea acumulacions a sotavent. La relació entre patrons de circulació i episodis de nevada intensa a Andorra ha estat descrita per Esteban et al. (2005); a escala pirinenca, García-Sellés et al. (2013) mostren la importància de la seqüència combinada de precipitació i temperatura en els episodis allavosos majors.

La cota de neu és molt variable. Episodis de neu seca i freda poden alternar amb períodes més temperats o pluja a cotes altes, modificant ràpidament l'estabilitat del mantell. Per això, la metodologia no utilitza la neu nova com a indicador únic, sinó que la combina amb observacions directes, perfils, tests i evidències d'activitat allavosa recent.

Cadastre històric i coneixement d'allaus. El Cadastre d'Allaus d'Andorra és la cartografia històrica principal del país. Elaborat pel Govern i actualitzat per l'administració territorial, prové de l'homogeneïtzació de les cartes de localització probable d'allaus i és una eina de referència per a la gestió del risc (Ferrer i Furdada, 2003). No és un model dinàmic: delimita zones conegudes o probables a partir d'informació històrica, geomorfològica, testimonial i de fotointerpretació.

En aquest estudi, la informació cadastral es combina amb l'anàlisi topogràfica, el treball de camp i el coneixement operacional de l'estació. Els límits històrics s'ajusten quan la morfologia o la interpretació de trajectòries indiquen una geometria de sortida més adequada. La base final inclou 57

polígons potencials de sortida associats als tirs inicials del PIDA, i l'inventari es manté obert per incorporar zones addicionals en episodis excepcionals (Figura 1).

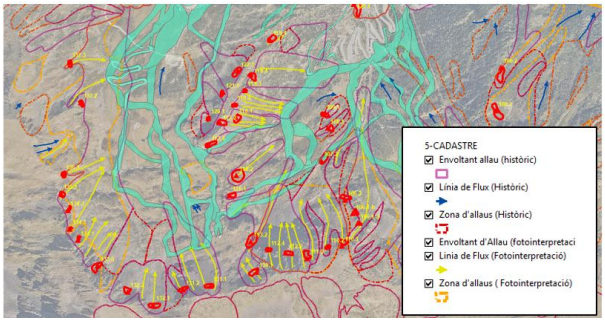


Figura 1 – Cadastre d'Allaus d'Andorra a Ordino Arcalís, amb punts de tir i zones de sortida utilitzades com a base del sistema de priorització.

DADES I METODOLOGIA

Model digital del terreny i zones potencials de sortida. El model digital original és un LiDAR de 0,5 m, reinterpolat a 3 m per suavitzar micro-relleus i evitar artefactes numèrics, atesa la sensibilitat dels models d'allaus a la resolució (Bühler et al., 2011). Les zones potencials de sortida es delimiten combinant pendent, orientació, curvatura, cota, morfologia, antecedents cadastrals i criteri expert (Figura 2). Les classes de pendent actuen com a filtre geomorfològic i permeten definir polígons extensos per allaus de retorn llarg i polígons més petits per allaus habituals (Techel et al., 2020). L'extensió del polígon i el gruix de ruptura condicionen fortament la simulació, per això la definició final integra camp, topografia i antecedents, seguint les directrius de RAMMS (RAMMS AG, 2024).

Monitoratge nivològic, indicis d'inestabilitat i criteri d'activació. La neu nova (HN) es controla amb estacions automàtiques d'Ordino Arcalís i amb el sensor FlowCapt d'Arinsal, que ajuda a contextualitzar el transport eòlic. Aquestes dades permeten calcular HN en finestres de 24, 48 i 72 h. La representativitat és limitada en un domini amb grans contrastos, per això es recomana ampliar progressivament la xarxa de sensors en cotes i orientacions representatives.

El criteri A és positiu amb 40 cm de neu nova en alguna finestra, valor basat en trenta anys d'experiència operativa i que caldrà validar retrospectivament i ajustar en el futur. L'estat del mantell es caracteritza amb perfils, tests i observacions de camp. El criteri B és positiu quan hi ha evidències consistents d'inestabilitat (tests desfavorables, capes febles, fissures, activitat natural, plaques de vent).

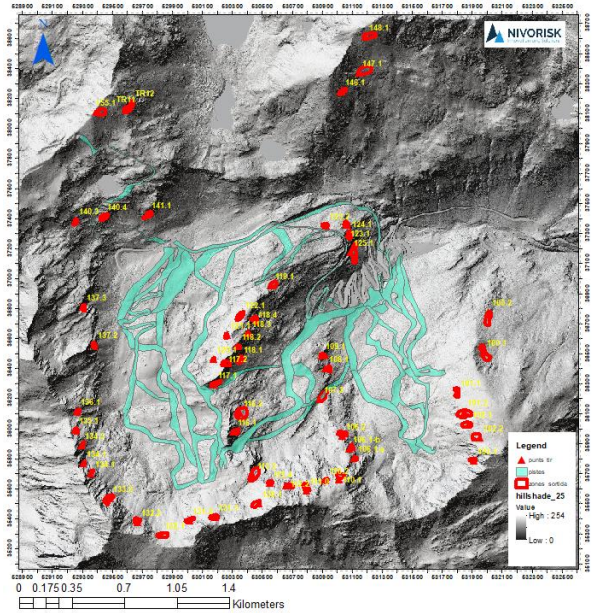


Figura 2 – Model digital d'elevacions LiDAR de 0,5 × 0,5 m, amb punts de tir, zones de sortida pre-computades i traçat de pistes.

La matriu de decisió segueix Jaedicke et al. (2023), avaluant probabilitat de sortida i d'abast, i classificant el resultat en quatre valors (3–0) (Figura 3).

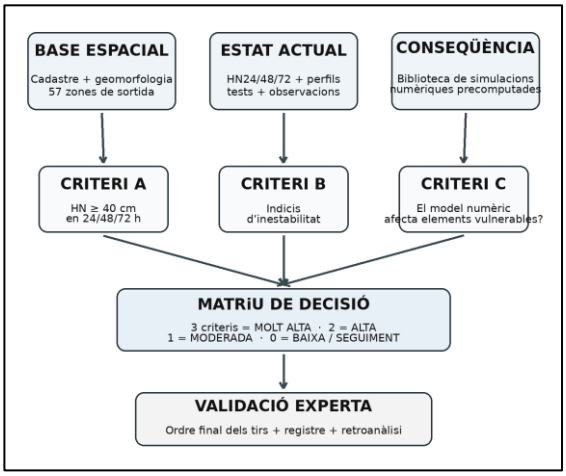


Figura 3 – Flux d'informació i arquitectura de la regla de decisió proposada. El llindar de 40 cm és un criteri operacional empíric subjecte a validació.

Biblioteca de simulacions numèriques i paràmetres físics. La conseqüència potencial es calcula amb RAMMS::AVALANCHE, basat en equacions promediades i fricció Voellmy-Salm (Bartelt et al., 1999; Christen et al., 2010a). Per a cada polígon es generen vuit escenaris (quatre

gruixos i dues configuracions físiques), sumant 456 simulacions. Els coeficients μ i ξ s'assignen amb MuXi, que deriva valors segons topografia i paràmetres globals, mantenint coherència entre escenaris i ajustant límits altitudinals al context pirinenc. N0 actua com a cohesió i modifica la resistència; la densitat ρ és constant i afecta sobretot la pressió d'impacte. Els escenaris formen una biblioteca de consulta que no substitueix simulacions específiques, i la retroanàlisi confirma la importància de validar geometria i paràmetres amb evidències (Riba et al., 2018).

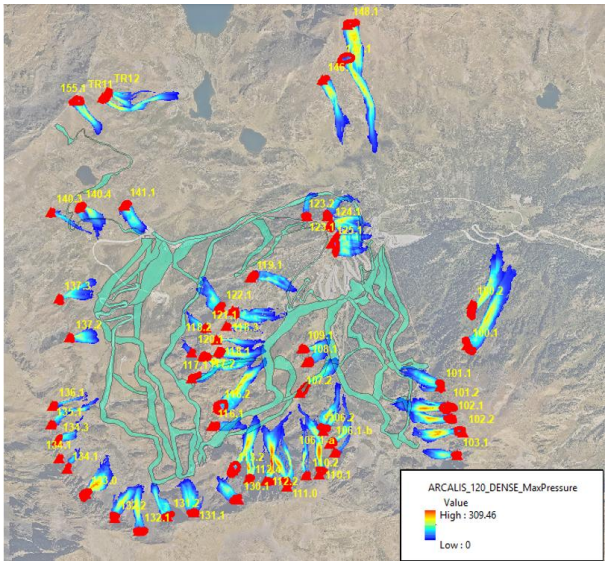


Figura 4 – Exemple de resultats precomputats amb el model numèric RAMMS::AVALANCHE per a un gruix de sortida d'1,20 m, ρ = 350 kg m−3 i N0 = 100 Pa.

Criteri de conseqüència i integració SIG. El criteri C respon si l'abast calculat interseca pistes, remuntadors, edificis o altres elements exposats. La resposta s'obté per superposició SIG entre simulacions i capes d'exposició. El model estima conseqüències, no el moment de ruptura; la diagnosi del mantell prové de càrrega recent, perfils, tests i observacions. Cada zona té un identificador que vincula geometria, antecedents, dades nivològiques, escenari, elements vulnerables, prioritat, decisió i resultat, garantint traçabilitat.

REGLA DE DECISIÓ I FLUX OPERATIU

La classificació utilitza tres criteris binaris sense pesos: A) 40 cm de neu nova en 24, 48 o 72 h; B) indicis consistents d'inestabilitat; C) afectació d'un element vulnerable segons la simulació (Taula 1). Tres criteris positius impliquen prioritat molt alta; dos, alta; un, moderada; cap, baixa. La categoria alta pot incloure situacions diferents, com nevada significativa amb inestabilitat sense afectació potencial, o bé inestabilitat i afectació amb menys neu nova, com en plaques de vent o capes febles persistents. El sistema evita que l'absència d'un indicador anul·li dues evidències independents.

Les 57 zones es processen amb una seqüència comuna: actualització d'HN, revisió de perfils i signes de camp, selecció de l'escenari numèric, intersecció amb elements vulnerables i assignació de classe. L'ordre final dels tirs dins d'una classe és operacional i pot considerar accessibilitat, seguretat, dependències i experiència del responsable. L'artificier pot ajustar la classe quan disposa d'informació rellevant no representada, registrant-ne la justificació.

VALIDACIÓ I DISCUSSIÓ

Validació retrospectiva i prospectiva. La metodologia es valida en dues fases. La retroanàlisi ha de reconstruir, per a cada zona, la neu nova, els indicis d'inestabilitat, l'escenari numèric que s'hauria triat i el resultat real del tir. Serveix per contrastar el llindar de 40 cm i decidir si cal mantenir-lo o ajustar-lo per sectors. La validació prospectiva compara les classes proposades amb els resultats de les operacions de les properes temporades.

Taula 1 – Matriu completa de les vuit combinacions de decisió.

A: neu	*B: inest.*	C: afectació	*Prioritat*
Sí	Sí	Sí	MOLT ALTA
Sí	Sí	No	ALTA
Sí	No	Sí	ALTA
No	Sí	Sí	ALTA
Sí	No	No	MODERADA
No	Sí	No	MODERADA
No	No	Sí	MODERADA
No	No	No	BAIXA

Els indicadors principals són: percentatge de tirs positius per classe, proporció d'allaus rellevants anticipades com a alta o molt alta, concordança entre classe proposada i decisió final, i error entre abast simulat i observat. L'episodi de l'11 de gener de 2026 és un exemple útil per contrastar simulació i geometria real al camp.

Fortaleses, limitacions i transferibilitat. La fortalesa principal és la traçabilitat: la matriu de tres criteris identifica l'evidència que genera la prioritat i evita la falsa precisió d'índexs ponderats sense base estadística. La limitació central és la

discretització: zones de sortida, gruixos precomputats i dues configuracions no capten tota la variabilitat del mantell, del transport eòlic ni de les geometries de ruptura. Quan les condicions superen la biblioteca, cal una simulació específica o criteri expert conservador. La representativitat de les dades nivològiques és limitada; cal ampliar observacions segons orientacions, cotes i patrons de sobrecàrrega. L'ús d'estacions automàtiques properes és clau per millorar la representativitat de les simulacions RAMMS en infraestructures (Glaus et al., 2025). RAMMS té limitacions en allaus de recorregut curt (Dreier et al., 2014), per això és essencial registrar i cartografiar allaus cada temporada per a retrocàlcul i calibratge.

L'ampliació de la xarxa i el registre sistemàtic dels resultats PIDA permetran un calibratge progressiu. L'arquitectura és transferible, però llindars, zones de sortida, escenaris i elements vulnerables s'han d'ajustar localment.

CONCLUSIONS

Sistema proposat. S'estableix un sistema de suport al PIDA que integra una base SIG de zones de sortida, informació històrica i geomorfològica, monitoratge de càrrega recent i estabilitat del mantell, i simulacions numèriques precomputades de conseqüències. El plantejament és coherent amb la metodologia de reducció del risc d'allaus a escala de punt específic proposada per l'*European Avalanche Warning Centers* (Jaedicke et al., 2023).

Llindar i validació. El llindar de 40 cm en 24/48/72 h es formalitza com a criteri operacional empíric basat en tres dècades d'experiència, però no és universal: la retroanàlisi de PIDA passats i la validació de les properes temporades han de determinar-ne la sensibilitat i els ajustos locals.

Regla de decisió i millores futures. La regla de tres criteris permet decisions ràpides, explicables i auditables sense substituir el criteri del responsable del PIDA. La millora del sistema dependrà de densificar el monitoratge automàtic en diverses orientacions i cotes, ampliar la base d'episodis validats i mantenir un calibratge sistemàtic entre simulacions numèriques i allaus observades.

AGRAÏMENTS

Els autors agraeixen la contribució dels nivòlegs, artificiers, caps de pistes i equips operatius d'Ordino Arcalís, que al llarg del temps han mantingut la informació de camp, cartogràfica i operacional necessària per desenvolupar aquesta metodologia.

REFERÈNCIES

BARTELT, P., SALM, B., GRUBER, U., 1999. Calculating dense-snow avalanche run-out using a Voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining, Journal of Glaciology, 45(150), 242–254.

CHRISTEN, M., KOWALSKI, J., BARTELT, P., 2010. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain, Cold Regions Science and Technology, 63(1–2), 1–14, https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.04.005.

DREIER, L., BÜHLER, Y., STEINKOGLER, W., FEISTL, T., CHRISTEN, M., BARTELT, P. 2014. Modelling small and frequent avalanches. International Snow Science Workshop (ISSW), Banff, Canada, 649-656.

ESTEBAN, P., JONES, P. D., MARTÍN-VIDE, J., MASES, M., 2005. Atmospheric circulation patterns related to heavy snowfall days in Andorra, Pyrenees, International Journal of Climatology, 25, 319–329.

FERRER, P., FURDADA, G., 2003. El cadastre digital d'allaus d'Andorra: ús d'un sistema d'informació geogràfica per a la gestió del risc d'allaus, Horitzó, 1, 13–20.

GARCÍA-SELLÉS, C., MANGUÁN, S., MARTÍ, G., OLLER, P., AND MARTÍNEZ, P., 2013. Combined temperature–precipitation winter modes and major avalanche activity in the Eastern Pyrenees, Proceedings of the International Snow Science Workshop, Grenoble–Chamonix Mont-Blanc, France, 1264–1269.

GLAUS, J., WIKSTROM JONES, K., BARTELT, P., CHRISTEN, M., STOFFEL, L., GAUME, J., BÜHLER, Y. 2025. Simulation of cold-powder snow avalanches considering daily snowpack and weather situations. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 25, 2399–2419, 2025.

JAEDICKE, C., MONTI, F., DELLAVEDOVA, P., STOFFEL, L., AND MOLNÉ, T. 2023. a process-based definition of site-specific avalanche warning. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Bend, Oregon (USA), 218–222.

RAMMS AG, 2024. RAMMS::AVALANCHE User Manual, version 1.8.27, Davos, Switzerland.

RIBA, S., GARCÍA-SELLÉS, C., BARTELT, P., STOFFEL, L., 2018. Analysis of one avalanche zone in the Eastern Pyrenees (Val d'Aran) using historical analysis, snow-climate data and mixed flowing/powder avalanche modelling, Proceedings of the International Snow Science Workshop, Innsbruck, Austria, 561–565.

TECHEL, F., MULLER, K., SCHWEIZER, J., 2020. On the importance of snowpack stability, the frequency distribution of snowpack stability, and avalanche size in assessing the avalanche danger level. The cryosphere, Volum 14, issue 10, 3503–3521.

GENERACIÓ MASSIVA DE MODELS NUMÈRICS PEL SEU CALIBRATGE I L'ANÀLISI MULTI-ESCENARI DE DINÀMICA D'ALLAUS AMB IBER

Marcos Sanz-Ramos([1a]); Lisa Sophie Ahlers([2]), Pere Oller([2,3]), Ernest Bladé([1b])

(1) Institut Flumen, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC-BarcelonaTECH) – Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE); [a]marcos.sanz-ramos@upc.edu, [b]ernest.blade@upc.edu
(2) RISKNAT, Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Universitat de Barcelona; lisasahlers@aol.de
(3) GeoNeuRisk; geoneurisk@geoneurisk.com

PARAULES CLAUS: Modelització numèrica, Calibratge, GUI adaptativa, Iber, Python-TCL.

RESUM

Aquest treball presenta una metodologia innovadora pel calibratge de models numèrics d'allaus mitjançant l'eina Iber, orientada a superar una de les principals limitacions d'aquest tipus d'estudis: la gestió manual d'un gran nombre d'escenaris de simulació. La proposta aprofita la flexibilitat de la interfície gràfica d'Iber per automatitzar la generació massiva de models a partir d'un únic model base, explorant de manera sistemàtica diferents combinacions de paràmetres reològics i d'incorporació de material (*entrainment*). L'aportació més destacada és el desenvolupament d'un flux de treball complet que combina la creació automàtica de centenars de simulacions amb l'extracció automatitzada dels resultats per a la seva anàlisi posterior en entorns SIG. Aquesta aproximació redueix significativament el temps necessari per al calibratge i minimitza el risc d'excloure configuracions que podrien reproduir millor el comportament observat de l'allau. La metodologia es va aplicar a cinc casos d'estudi del Pirineu català, analitzant tant la influència dels paràmetres d'*entrainment* com les combinacions del model reològic Voellmy-Bartelt. A partir de la definició d'intervals de valors, Iber va generar automàticament entre 75 i 1.000 escenaris de càlcul per zona d'estudi. L'avaluació dels resultats es va basar en indicadors representatius, com ara la distància recorreguda, l'extensió de l'allau i les desviacions de la trajectòria respecte a les observacions reals, permetent identificar de manera objectiva les configuracions amb millor capacitat predictiva.

INTRODUCCIÓ

El calibratge de models numèrics per a la simulació de la dinàmica d'allaus és un punt crític i essencial per obtenir resultats representatius i fidels al fenomen observat. Diversos estudis han destacat que els models físics de propagació d'allaus requereixen un calibratge local dels seus paràmetres de fricció per proporcionar prediccions robustes i aplicables a l'avaluació del risc (p.ex., Heredia et al., 2020).

Malgrat l'existència de guies i manuals d'aplicació, aquesta fase resulta especialment necessària quan l'allau es produeix en entorns diferents d'aquells per als quals s'han desenvolupat les calibracions de referència (Oller et al., 2010; Sanz-Ramos et al., 2023a). En aquests casos, els valors dels paràmetres no poden transferir-se directament i cal adaptar-los a les condicions locals (Eglit et al., 2020; Wilbur et al., 2014).

Per aquest motiu, és habitual dur a terme un procés iteratiu basat en la generació d'un gran nombre d'escenaris de simulació derivats de diferents combinacions dels paràmetres del model reològic de Voellmy-Bartlet i dels models d'incorporació de neu o material (*entrainment*). Atès que alguns d'aquests paràmetres no poden mesurar-se directament i sovint tenen una base empírica, la seva selecció requereix contrastar els resultats de la simulació amb observacions reals (Dreier et al., 2014; Eglit et al., 2020).

La generació i l'anàlisi manual d'aquests escenaris poden convertir-se en un coll d'ampolla dins del procés de calibratge, incrementant el temps necessari per a l'anàlisi i augmentant el risc d'ometre la combinació de paràmetres que millor reprodueix el comportament observat de l'allau.

La present comunicació té per objectiu mostrar, per una banda, les capacitats de l'eina de modelització hidrodinàmica Iber (www.iberaula.com) per simular allaus i, per altra, la flexibilitat de la seva interfície gràfica per acollir metodologies i processos ad-hoc que permeten crear de forma massiva models numèrics amb paràmetres dins d'un rang predefinit. Així mateix, es va desenvolupar una metodologia per extreure'n els resultats de forma automàtica amb l'objectiu poder-los analitzar amb softwares SIG.

EINA DE MODELITZACIÓ NUMÈRICA

Iber (Bladé et al., 2014) és una eina de modelització hidrodinàmica consolidada en el món de l'enginyeria, àmpliament utilitzada en estudis d'inundabilitat, processos morfològics i de transports de sediments en rius, transport de contaminants, estudis hidrològics a escala de conca i/o urbana, eco-hidràulica, etc. (Sanz-Ramos et al., 2025b).
Recentment ha incorporat un mòdul de càlcul per l'anàlisi de fluxos no newtonians i que, gràcies als 8 models reològics que incorpora, permet la simulació i anàlisi de fluxos hipercongestionats de fusta (Ruiz-Villanueva et al., 2019), vessaments de llots per trencament de basses mineres (Sanz-Ramos et al., 2024), lahars (Sanz-Ramos et al., 2025a), i allaus de neu densa (Sanz-Ramos et al., 2020, 2021, 2023b, 2023a).
Iber es un programa *freeware* completament integrat a la interfície d'usuari (GUI en anglès) GiD (Coll et al., 2018). La GUI es pot personalitzar per tal d'automatitzar processos. De fet, Iber ja integra nombroses personalitzacions per tal de facilitar i agilitzar el flux de treball alhora de construir el model i assignar condicions (pre-procés) i analitzar resultats (post-procés). Entre elles destaquen la creació automàtica de models usant tècniques RTIN (Rectangular Triangular Irregular Network) a partir de models digitals del terreny (MDTs), l'assignació d'usos del sòl a partir de ràsters o l'extracció de resultats a ràster o shapefile.
En el present treball es van desenvolupar dues funcionalitats per tal de crear models i extreure els resultats a ràster, tot de forma automàtica en base als paràmetres definits per l'usuari o usuària.

GENERACIÓ MASSIVA DE MODELS

Una de les principals limitacions o colls d'ampolla alhora de calibrar els paràmetres del model reològic és la necessitat de provar diferents combinacions dels mateixos. Això implica, generalment, la creació de tants models com combinacions de paràmetres es vulguin analitzar. Aquest procés pot donar lloc des de desenes fins a milions de models (en el cas, per exemple, de fer servir tècniques tipus Monte-Carlo).
És per aquest motiu que es va crear un *script* que permet la creació automàtica de models i l'assignació sistemàtica de condicions amb l'objectiu de calibrar els models en base al criteri d'*entrainment* (Figura 1).
Aquest codi, integrat en la GUI com una finestra on indicar els paràmetres, permet seleccionar el model base, el directori on guardar els nous models, el criteri d'*entrainment*, la taxa de d'increment del paràmetre (mínima, màxima i l'increment) i el llindar de valors a definir (mínim, màxim i l'increment). És a dir, per cada model base, Iber generarà *n* models com a resultat de les combinacions de la *x* taxes i *y* llindars.

L'eina es va aplicar a 5 casos d'estudi del Pirineu català en 2 tipus de procés de calibratge: 4 a la conca de la Vallferrera per analitzar l'efecte de la incorporació de material (*criteri*: tensió de fons, depenent del calat, depenent de la velocitat i depenent de la velocitat al quadrat; *coeficient* d'*entrainment*: $1 \cdot 10^{-5}$–$2 \cdot 10^{-5}$ m s^{-1} Pa^{-1}; *llindar* d'*entrainment*: 10–200 Pa) i 1 a la Bonaigua per analitzar la combinació dels diferents paràmetres del model reològic (μ: 0.1–0.4; ξ: 250–2000 m s^{-2}; C: 0–500 Pa).
Un cop indicats els valors dels paràmetres, Iber va generar entre 75 i 1000 escenaris de càlcul per zona d'estudi tan sols partint d'un model base. L'evolució del procés de creació de models es mostra a través d'una barra de progrés. El temps requerit per aquest procés fou inferior als 5 minuts, en el cas més desfavorable (1000 escenaris).

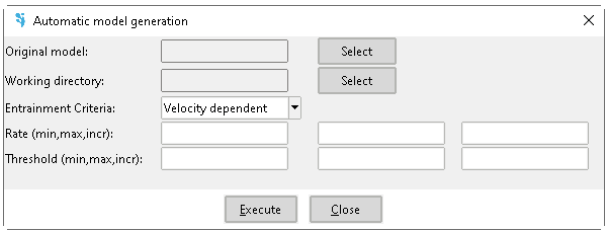


Figura 1 – Finestra de la GUI que permet crear models de forma automàtica.

CÀLCUL EN CASCADA DE MODELS

Un cop generats els models, cal fer la simulació. En aquest punt es va optar per generar primer tots els models i després llançar la simulació. Si bé es podria haver llançat la simulació just al crear el model en base a la combinació de paràmetres, es va creure convenient separar-ho en dues fases per tal que els dos processos siguin independents.
A tal fi també es va crear un *script* que busca tots els models continguts a un directori i llança la simulació de forma consecutiva (Figura 2): quan acaba el càlcul d'un model, obre el següent i llança un nou càlcul. Aquesta funcionalitat ja està disponible a la versió oficial d'Iber.

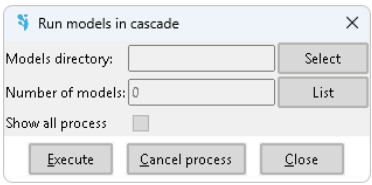


Figura 2 – Finestra de la GUI que permet llançar simulacions en cascada.

Aquest procés pot mostrar-se a través d'una barra de progrés, igual que en el cas anterior, o bé obrint el model i la finestra de progrés de la simulació, tot indicant també quina de les simulacions s'està duent a terme.

EXTRACCIÓ I ANÀLISI DE RESULTATS

La creació, càlcul i visualització de resultats es pot fer dins de la GUI d'Iber. L'anàlisi de resultats, però, també suposa un coll d'ampolla. Donat el gran nombre de simulacions, resulta complex determinar quina de les combinacions de paràmetres proporciona el millor ajust amb les dades observades.

Per aquest motiu es van desenvolupar dues estratègies en paral·lel. La primera, referent a l'extracció de resultats a un format compatible per un posterior anàlisi. La segona, per analitzar els resultats segons variables representatives de l'allau, com la distància recorreguda i extensió, així com la desviació en la direcció del flux i perpendicular al flux respecte l'observat (Figura 3).

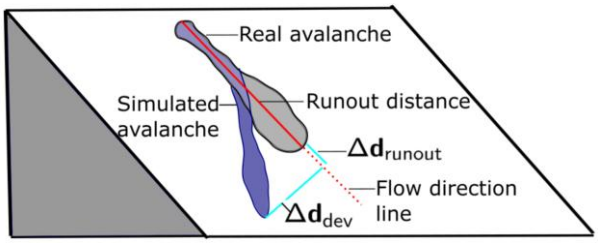


Figura 3 – Diagrama del procés de càlcul de l'error utilitzat en els scripts de Python per identificar la simulació amb el Δd_{runout} més petit.

Malgrat que Iber permet realitzar l'anàlisi de resultats dins de la GUI (Sanz-Ramos et al., 2023c), es va preferir utilitzar les potencialitats d'eines SIG i generar un codi Python ad-hoc per dur-lo a terme (Ahlers, 2025).

Per aquest motiu els desenvolupaments dins Iber es van centrar en la generació de ràsters de resultats durant el temps d'execució del càlcul. És a dir, per cada instant de temps d'escriptura de resultats indicat, Iber genera un ràster per cada paràmetre hidrodinàmic (p.ex., calat i velocitat del flux) i d'interès per l'anàlisi de la dinàmica d'allaus (p.ex., pressió dinàmica).

La Figura 4 mostra com Iber integra la possibilitat d'extreure resultats a format ràster, per la qual cosa només cal indicar el tipus d'interpolació (lineal o per proximitat), si es vol extreure només una zona concreta, els màxims al final de la simulació i si es vol convertir aquests rásters a format NetCDF.

D'aquesta manera, els resultats es poden obrir amb eines SIG sense necessitat d'obrir, model a model, i extreure els resultats a ràster a partir de la informació disponible en la GUI –opció també disponible a Iber.

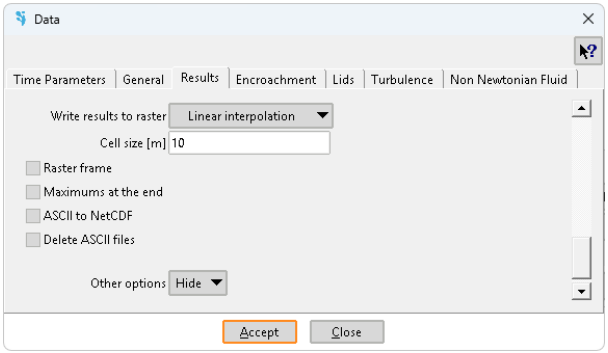


Figura 4 – Finestra on es pot seleccionar la generació de rásters de resultats durant l'execució del càlcul.

CONCLUSIONS

El procés de calibratge de models numèrics de base hidrodinàmica és un pas crític i essencial, i alhora habitualment omès. L'existència de guies i manual pot ser un primer pas alhora d'obtenir resultats de base física, però no sempre son vàlids per allaus de neu fora de l'àmbit en el qual es van desenvolupar.

La flexibilitat d'eines de modelització numèrica *freeware*, o *open-source*, que permeten personalitzar la GUI per tal d'automatitzar processos és una avantatge respecte a *software* comercials. Aquest ha estat el cas d'Iber, una eina de modelització de lliure distribució on s'han desenvolupat tres nous processos dins la seva GUI.

Aquests processos permeten generar models de forma massiva en base a rangs de paràmetres de diferents models d'*entrainment*, llançar el càlcul de tots aquests models prèviament generats de forma seqüencial, i generar ràsters de resultats de variables hidrodinàmiques i pròpies d'allaus amb la finalitat d'analitzar-los en eines SIG. Aquesta metodologia ha permès definir els paràmetres que millor s'ajusten a les observacions tot limitant el coll d'ampolla que suposa la generació massiva i anàlisi multi-escenari dels models de dinàmica d'allaus.

REFERÈNCIES

Ahlers, L.S., 2025. Characterisation of the February 2015 avalanche cycle in Vallferrera (Pyrenees) and reconstruction of selected events using the Iber numerical modelling tool. Universitat de Barcelona - Universitat Autònoma de Barcelona.

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., Coll, A., 2014. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. Rev. Int. Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ing. 30, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004

Coll, A., Pasenau, M., Escolano, E., Perez, J.S., Melendo, A., Monros, A., Gárate, J., 2018. www.gidhome.com.

Dreier, L., Bühler, Y., Steinkogler, W., Feistl, T., Christen, M., Bartelt, P., 2014. Modelling Small and Frequent Avalanches, in: International Snow Science

Workshop 2014 Proceedings. 29 Sep - 3 Oct, Banff, Canada, p. 8.

Eglit, M., Yakubenko, A., Zayko, J., 2020. A Review of Russian Snow Avalanche Models—From Analytical Solutions to Novel 3D Models. Geosciences 10, 77. https://doi.org/10.3390/geosciences10020077

Heredia, M.B., Eckert, N., Prieur, C., Thibert, E., 2020. Bayesian calibration of an avalanche model from autocorrelated measurements along the flow: Application to velocities extracted from photogrammetric images. J. Glaciol. https://doi.org/10.1017/jog.2020.11

Oller, P., Janeras, M., de Buen, H., Arnó, G., Christen, M., García, C., Martínez, P., 2010. Using AVAL-1D to simulate avalanches in the eastern Pyrenees. Cold Reg. Sci. Technol. 64, 190–198. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.08.011

Ruiz-Villanueva, V., Mazzorana, B., Bladé, E., Bürkli, L., Iribarren-Anacona, P., Mao, L., Nakamura, F., Ravazzolo, D., Rickenmann, D., Sanz-Ramos, M., Stoffel, M., Wohl, E., 2019. Characterization of wood-laden flows in rivers. Earth Surf. Process. Landforms 44, 1694–1709. https://doi.org/10.1002/esp.4603

Sanz-Ramos, M., Andrade, C.A., Oller, P., Furdada, G., Bladé, E., Martínez-Gomariz, E., 2021. Reconstructing the Snow Avalanche of Coll de Pal 2018 (SE Pyrenees). GeoHazards 2, 196–211. https://doi.org/10.3390/geohazards2030011

Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Díez-Herrero, A., Vázquez-Tarrío, D., Garrote, J., Sánchez, N., Galindo, I., 2025a. An analysis of rheological models for lahar modelling with Iber. Rev. Mex. Ciencias Geológicas 42, 160–169. https://doi.org/10.22201/igc.20072902e.2025.3.1882

Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Oller, P., Furdada, G., 2023a. Numerical modelling of dense snow avalanches with a well-balanced scheme based on the 2D shallow water equations. J. Glaciol. 1–17. https://doi.org/10.1017/jog.2023.48

Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Sánchez-Juny, M., 2023b. El rol de los términos de fricción y cohesión en la modelización bidimensional de fluidos no Newtonianos: avalanchas de nieve densa. Ing. del Agua 27, 295–310. https://doi.org/10.4995/ia.2023.20080

Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Sánchez-Juny, M., Dysarz, T., 2024. Extension of Iber for Simulating Non–Newtonian Shallow Flows: Mine-Tailings Spill Propagation Modelling. Water 16, 2039. https://doi.org/10.3390/w16142039

Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Silva-Cancino, N., Salazar, F., López-Gómez, D., Martínez-Gomariz, E., 2023c. A Probabilistic Approach for Off-Stream Reservoir Failure Flood Hazard Assessment. Water 15, 2202. https://doi.org/10.3390/w15122202

Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Torralba, A., Oller, P., 2020. Las ecuaciones de Saint Venant para la modelización de avalanchas de nieve densa. Ing. del agua 24, 65. https://doi.org/10.4995/ia.2020.12302

Sanz-Ramos, M., Sañudo, E., López-Gómez, D., García-Feal, O., Bladé, E., Cea, L., 2025b. Evolución de la modelización numérica bidimensional del flujo en lámina libre a través del software Iber. Ing. del Agua 29, 114–131. https://doi.org/10.4995/ia.2025.23259

Wilbur, C., Mears, A., Margreth, S., Burak, S., 2014. Avalanche dynamics model RAMMS applied in two North American Climates, in: Proceedings, International Snow Science Workshop. ISSW - International Snow Science Workshop, Banf, Canada., p. 7.

LOCALITZACIÓ TRIDIMENSIONAL DE VÍCTIMES D'ALLAUS AMB POSICIONAMENT PER SATÈL·LIT: PRIMERA PROVA AMB ELS BOMBERS DE LA GENERALITAT

Joan Solà [1] i Joan Vallvé [1]

(1) Institut de Robòtica i Informàtica Industrial (Consell Superior d'Investigacions Científiques – Universitat Politècnica de Catalunya). Parc Tecnològic de Barcelona, carrer de Llorens i Artigas 4-6, 08028 Barcelona. jsola@iri.upc.edu; jvallve@iri.upc.edu

PARAULES CLAUS: allaus, rescat, detector de víctimes d'allaus, localització tridimensional, posicionament per satèl·lit, sensors inercials, cerca fina, sondeig.

RESUM

Els detectors de víctimes d'allaus actuals guien el cercador seguint les línies del camp magnètic que emet l'aparell de la víctima, però no li indiquen on és la víctima ni a quina profunditat. Aquesta informació només s'obté a la fase final, on la cerca fina i el sondeig consumeixen una part important del temps, sobretot en enterraments profunds.

Presentem un detector que calcula la posició tridimensional de l'emissor enterrat, en planta i en profunditat. L'aparell coneix la seva pròpia posició i orientació gràcies al posicionament per satèl·lit i a sensors inercials. Combina aquesta informació amb la mesura del camp magnètic en tres dimensions, presa des dels diferents punts per on passa el cercador. És compatible amb els emissors estàndard de 457 kHz.

A Vallter 2000 es va fer una prova de demostració amb el Grup d'Actuacions Especials (GRAE) dels Bombers de la Generalitat de Catalunya. L'emissor era dins d'una motxilla enterrada a 3 m de profunditat i la cerca començava a 60 m, fora de l'abast de detecció. Un rescatador del GRAE amb un detector comercial de gamma alta va arribar al contacte amb la sonda en 5 minuts, després de sondar uns 4 m². El prototip hi va arribar en 3 minuts, sense cerca fina i sondant uns 0,5 m².

La tecnologia està protegida per una patent del Consell Superior d'Investigacions Científiques i s'està constituint una empresa derivada per comercialitzar-la. El producte, adreçat a practicants de muntanya hivernal i a equips de rescat, està previst al mercat a finals de 2027.

INTRODUCCIÓ

Quan una persona queda completament enterrada per una allau, el temps que triga a ser desenterrada determina en bona part si sobreviu. Segons les dades suïsses, la probabilitat de sobreviure supera el 90 % durant els primers 15 minuts d'enterrament i després cau ràpidament (Falk et al., 1994). En climes nivals més densos, la caiguda comença abans, cap als 10 minuts (Haegeli et al., 2011). En aquesta finestra, l'ajuda organitzada rarament pot arribar. El rescat depèn gairebé sempre dels companys de la víctima, del seu detector de víctimes d'allaus, de la sonda i de la pala.

Els detectors actuals treballen a 457 kHz, la freqüència estàndard internacional. Els models digitals amb tres antenes indiquen al cercador una distància i una direcció que segueixen la línia del camp magnètic, però no la posició de la víctima.

La cerca es fa en diverses fases. Primer cal captar el senyal. Després se segueixen les línies de camp fins a prop de la víctima. A continuació ve la cerca fina, feta arran de la superfície, i finalment el sondeig. La cerca fina és especialment lenta en enterraments profunds. Com més profunda és la víctima, més feble i menys definit és el senyal en superfície. Això obliga a cerques en creu, amb lectures que depenen de l'orientació de l'emissor, i a sondejar una àrea àmplia. L'eficàcia del procés depèn molt de l'entrenament i de la serenor del cercador.

El detector que presentem aborda aquest problema de base: en lloc de guiar el cercador, calcula directament la posició tridimensional de la víctima.

LOCALITZACIÓ TRIDIMENSIONAL DE LA VÍCTIMA

El principi del sistema és senzill. Si el detector sap exactament on és i com està orientat en cada moment, les mesures del camp magnètic preses des de diferents punts es poden combinar per deduir d'on prové el camp. És a dir, on és l'emissor enterrat.

El detector integra tres elements:

- un receptor de posicionament per satèl·lit, que dona la posició del cercador;
- sensors inercials, que en donen l'orientació;
- tres antenes, que mesuren el camp magnètic en tres dimensions.

El posicionament per satèl·lit es fa en mode relatiu. A muntanya normalment no hi ha connexió a internet per rebre correccions externes, de manera que la posició absoluta del receptor té un error d'uns 3 m. Aquest error, però, no afecta el resultat: la víctima es localitza respecte al cercador, i el que importa és seguir amb precisió els moviments del receptor. Aquests moviments es mesuren amb una deriva de pocs centímetres. Així, el sistema funciona sense cobertura ni infraestructura externa.

Mentre el cercador avança, l'aparell acumula mesures i resol la posició de l'emissor en planta i en profunditat. Com més s'ha mogut el cercador, més precisa és l'estimació. El sistema és compatible amb els emissors estàndard de 457 kHz, de manera que no cal cap canvi en l'equipament de la víctima.

Per al rescat, això té tres conseqüències:

- **Localització precisa.** La posició calculada és prou precisa per indicar directament on s'ha de sondar. Així desapareix la cerca fina i l'àrea de sondeig es redueix molt: si el sondeig es fa correctament, el primer cop de sonda ja hauria de tocar la víctima.
- **Profunditat coneguda abans de sondar.** Permet planificar el sondeig i l'excavació abans d'arribar-hi.
- **Menys dependència de la perícia.** Una indicació de posició és més fàcil d'interpretar sota estrès que una lectura de distància i direcció que canvia a cada pas.

PROVA DE DEMOSTRACIÓ AMB EL GRAE

El 8 de maig de 2026 es va fer una prova a l'estació de Vallter 2000 amb el GRAE dels Bombers de la Generalitat de Catalunya.

Es va enterrar un emissor dins d'una motxilla plena de roba, a 3 m de profunditat (Figura 1). La motxilla és un objectiu clarament més petit que una persona. La zona d'enterrament era coneguda, però era una superfície uniforme de neu trepitjada. Entre prova i prova es movien pales, bastons i motxilles, perquè el cercador no pogués orientar-se per referències visuals. Cada cerca començava a uns 60 m, fora de l'abast de detecció de tots dos aparells, i acabava quan la sonda tocava la motxilla.



Figura 1 – Prova de demostració amb el GRAE a Vallter 2000.

Un rescatador del GRAE, amb un detector comercial de gamma alta (Mammut Barryvox S), va arribar a la motxilla en 5 minuts, després de sondar una àrea d'uns 2 × 2 m (4 m²). Amb el prototip V04, el primer autor hi va arribar en 3 minuts i va sondar una àrea d'uns 0,7 × 0,7 m (0,5 m²).

Taula 1 – Temps de cerca per fases (minuts:segons).

Fase	**GRAE, Barryvox S**		**Prototip V04**
Captació del senyal	0:10		0:10
Aproximació	0:30	1:50	0:50
Cerca fina	1:20		
Àrea de sondeig	4 m²		0,5 m²
Temps de sondeig	3:00		2:00*
Total	**5:00**		**3:00**

** Allargat per converses entre els equips durant la prova.*

La Taula 1 desglossa el temps per fases. El guany es concentra en la cerca fina, que desapareix amb el prototip, i en el sondeig, on l'àrea explorada és vuit vegades menor.

CONCLUSIONS

Els detectors de víctimes d'allaus actuals orienten el cercador, però no li diuen on és la víctima. El detector que presentem sí que ho fa. Calcula la posició tridimensional de la víctima combinant el posicionament per satèl·lit, els sensors inercials i la mesura del camp magnètic. Funciona sense cobertura ni infraestructura externa i és compatible amb els emissors estàndard. La precisió de la localització fa desaparèixer la cerca fina i redueix molt l'àrea de sondeig. La prova amb el GRAE ho

ha mostrat en condicions reals, amb un enterrament a 3 m de profunditat.

La tecnologia està protegida per la patent europea EP4692855A1, titularitat del Consell Superior d'Investigacions Científiques, i ha estat desenvolupada a l'Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, en part amb el suport del programa IMPULSA-T. S'està constituint una empresa derivada que n'adquirirà la llicència per industrialitzar-la i comercialitzar-la. Un segon prototip ja integra totes les funcions d'un producte comercial en un format de mà. El producte, adreçat a practicants d'activitats de muntanya hivernal i a equips de rescat, està previst al mercat a finals de 2027.

AGRAÏMENTS

Agraïm al Grup d'Actuacions Especials dels Bombers de la Generalitat de Catalunya la seva participació en la prova de Vallter 2000; al programa IMPULSA-T del Consell Superior d'Investigacions Científiques el finançament d'una part del projecte, i a Spin-Off Partners el seu assessorament.

REFERÈNCIES

FALK, M., BRUGGER, H., ADLER-KASTNER, L., 1994. Avalanche survival chances. Nature, 368, 21.

HAEGELI, P., FALK, M., BRUGGER, H., ETTER, H.-J., BOYD, J., 2011. Comparison of avalanche survival patterns in Canada and Switzerland. Canadian Medical Association Journal, 183(7), 789-795.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA EVOLUCIÓN ESTRUCTURAL DEL MANTO NIVOSO MEDIANTE UN RADAR SFCW EN EL PIRINEO CENTRAL

Adrián Subías Martín [(1)]; Víctor Herráiz-López [(2)]; Samuel T. Buisán [(3)]; Iñigo Salinas [(4)] y Rafael Alonso [(5)]

(1,2,5) Departamento de Física Aplicada, Instituto de Investigación de Aragón (I3A), Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España (asubias@unizar.es; vherraiz@unizar.es; ralonso@unizar.es)
(3) Delegación Territorial de AEMET en Aragón, Zaragoza, España (sbuisans@aemet.es)
(4) Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones, Instituto de Investigación de Aragón (I3A), Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España (isalinas@unizar.es)

PALABRAS CLAVE: Estratigrafía, radar SFCW, SNOWPACK, reflectogramas, manto nivoso.

RESUMEN

La caracterización continua de la estructura interna del manto nivoso sigue siendo uno de los principales retos de la nivología. Los perfiles nivológicos manuales —en adelante, catas— permiten medir el espesor, la densidad, el tipo de grano y el contenido de agua líquida en las diferentes capas. Sin embargo, requieren trabajo de campo, alteran el punto observado y describen únicamente un lugar y un instante, lo que dificulta el seguimiento continuo.

Este trabajo presenta una evaluación preliminar de un radar SFCW (Stepped-Frequency Continuous-Wave), operativo entre 0,6 y 6 GHz, para monitorizar la estructura interna del manto de forma automática y no destructiva. Las medidas adquiridas durante la temporada invernal 2025-2026 en Formigal-Sarrios se comparan con reflectogramas simulados mediante un modelo electromagnético multicapa a partir de perfiles simulados con el software SNOWPACK y de catas nivológicas.

Los resultados muestran una concordancia clara entre la evolución global observada experimentalmente y la simulada mediante SNOWPACK, incluyendo los principales episodios de acumulación, asentamiento y fusión, así como diferentes estructuras internas persistentes. Estos resultados ponen de manifiesto la capacidad del radar para monitorizar de forma continua la altura y la estructura electromagnética del manto y su potencial para estimar el equivalente en agua de la nieve (SWE) y el contenido de agua líquida (LWC). La identificación detallada de cada capa y la inversión cuantitativa de sus propiedades constituyen las siguientes etapas de desarrollo.

INTRODUCCIÓN

La estructura interna del manto nivoso condiciona su evolución, metamorfismo y respuesta mecánica (Kinar & Pomeroy, 2015). La disposición de las capas y la presencia de agua líquida generan contrastes físicos relacionados, por ejemplo, con su estabilidad; por ello, el seguimiento de la estratigrafía resulta relevante para caracterizar el estado del manto (Bartelt & Lehning, 2002).

Frente a las catas nivológicas, las técnicas electromagnéticas ofrecen una alternativa no destructiva para observar la nieve (Mätzler et al., 1987; Heilig et al., 2009; Marshall et al., 2007) ya que las capas de nieve son lo suficientemente transparentes, particularmente en el rango entre 60 MHz y 6 GHz, con longitudes de propagación de hasta centenares de metros. La evolución tecnológica de los sistemas de radiofrecuencia permite actualmente implementar radares de altas prestaciones y coste reducido. El radar SFCW de Formigal-Sarrios se desarrolló inicialmente para estimar el SWE a partir del eco del suelo (Alonso et al., 2021). Los reflectogramas contienen además reflexiones internas que evolucionan durante la temporada y responden a discontinuidades electromagnéticas del manto.

El objetivo de este trabajo es presentar una primera comparación cualitativa entre las estructuras medidas y las simuladas a partir de perfiles de SNOWPACK y de las catas manuales. La inversión cuantitativa de las propiedades del manto queda fuera del alcance de este estudio preliminar.

SISTEMA EXPERIMENTAL

El radar SFCW obtiene información en distancia mediante medidas en el dominio frecuencial (Alonso et al., 2021). El sistema transmite secuencialmente frecuencias dentro de una banda definida y registra la amplitud y la fase de la reflectancia del manto nival. La transformada inversa de Fourier, calculada mediante un algoritmo IFFT, convierte este barrido en un perfil de reflexión en función del camino electromagnético (Figura 1), cuyos máximos están asociados a cambios en las propiedades electromagnéticas del medio.

La banda de 0,6 a 6 GHz proporciona una resolución nominal en aire de unos 2,8 cm. El espaciado frecuencial fija el intervalo no ambiguo y la conversión a profundidad física depende de la permitividad efectiva de la nieve.

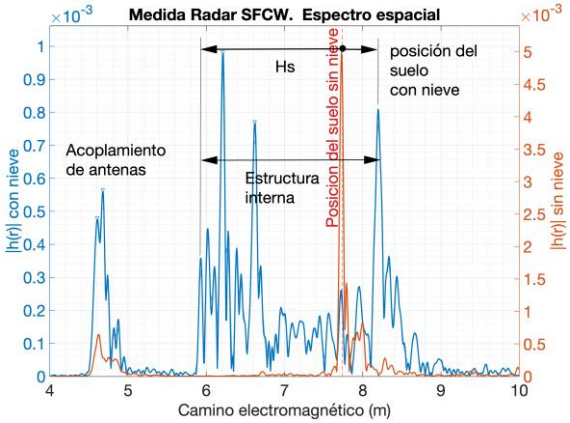


Figura 1. Reflectograma espacial obtenido mediante IFFT a partir de la reflectancia espectral (azul). Se compara con el adquirido sin nieve (naranja). La altura de nieve es Hs, y se indica el rango de estructura interna.



Figura 2. Torre instrumental de la Universidad de Zaragoza en la estación de AEMET de Formigal-Sarrios, en condiciones sin nieve y durante la temporada invernal.

Las medidas se realizaron, en el invierno 2025-2026, en la estación experimental de AEMET en Formigal-Sarrios, a 1800 m de altitud en el Pirineo aragonés. Dos radares SFCW de banda ultraancha adquirieron datos automáticamente durante la temporada invernal (Figura 2).

La estación de AEMET registra las variables necesarias para la simulación SNOWPACK: temperatura, altura, humedad del aire, viento, precipitación y balance radiativo.
La precipitación sólida y líquida se determinó mediante un sistema de referencia DFAR (Double Fence Automatic Reference). Adicionalmente, se disponía de medidas de temperatura superficial de la nieve, perfiles térmicos de la nieve, altura mediante láser y radares FMCW de 60 y 120 GHz, doble medida de SWE mediante sensor CRNS (Kodama et al., 1997) y atenuación de la radiación gamma natural del suelo (Bland et al., 1997), y medidas puntuales de LWC con un Finnish Snow Fork (Sihvola, 1986). Asimismo, se realizaron catas en las proximidades de las zonas observadas por los radares. Este conjunto proporcionó información independiente para interpretar los reflectogramas.

METODOLOGÍA

En los perfiles simulados con SNOWPACK, la densidad y el LWC son variables de salida del modelo (Bartelt & Lehning, 2002). En las catas, estas propiedades se obtienen mediante observaciones independientes, utilizando la Finnish Snow Fork para determinar el contenido de agua líquida y la densidad mediante el pesado de muestras. Por tanto, los valores de LWC usados en este trabajo no se recuperan a partir del radar, sino que constituyen referencias físicas utilizadas para calcular y contrastar su respuesta electromagnética con la medida por el radar.
Para cada capa, la densidad y el LWC se transformaron en una permitividad dieléctrica compleja dependiente de la frecuencia mediante las relaciones empíricas propuestas por Tiuri et al. (1984). Los perfiles de permitividad obtenidos se introdujeron en un algoritmo clásico de cálculo electromagnético multicapa para obtener la reflectancia espectral compleja correspondiente (Alonso et al., 2021). Se obtuvieron las reflectancias espaciales y se construyeron las series temporales simuladas y medidas de forma equivalente.

RESULTADOS

En este trabajo se compara directamente la reflectancia espacial medida por el radar (Figura 3, abajo) con la calculada a partir de la estructura simulada con SNOWPACK y de una cata (Figura 3 arriba). Ambos radargramas reproducen los principales episodios de acumulación, asentamiento y fusión, así como la desaparición final de la nieve. También muestran una primera etapa con numerosas reflexiones internas persistentes, seguida de otra de mayor uniformidad, compatible con la compactación y transformación del manto.
Las nevadas producen un aumento de la altura y nuevas reflexiones próximas a la superficie, mientras que la lluvia sobre nieve (ROS) y la fusión modifican la intensidad y continuidad de las reflexiones internas. Las acumulaciones de agua líquida pueden generar contrastes dieléctricos intensos, pero también aumentan la absorción y atenúan los ecos procedentes de niveles inferiores (Schmid et al., 2016). La coincidencia temporal de estos patrones demuestra la capacidad del radar para monitorizar la evolución estructural del manto, aunque la asignación de cada reflexión a una capa concreta requiere observaciones de campo e inversión electromagnética.
La identificación de los ecos de la superficie y del suelo permite determinar la altura y el incremento del camino electromagnético respecto a la referencia sin nieve respectivamente. Además, el agua líquida modifica la velocidad de propagación

y la atenuación, especialmente en las frecuencias altas. El análisis conjunto de la posición y amplitud del eco del suelo en diferentes subbandas permite estimar el SWE y el LWC en nieve húmeda.

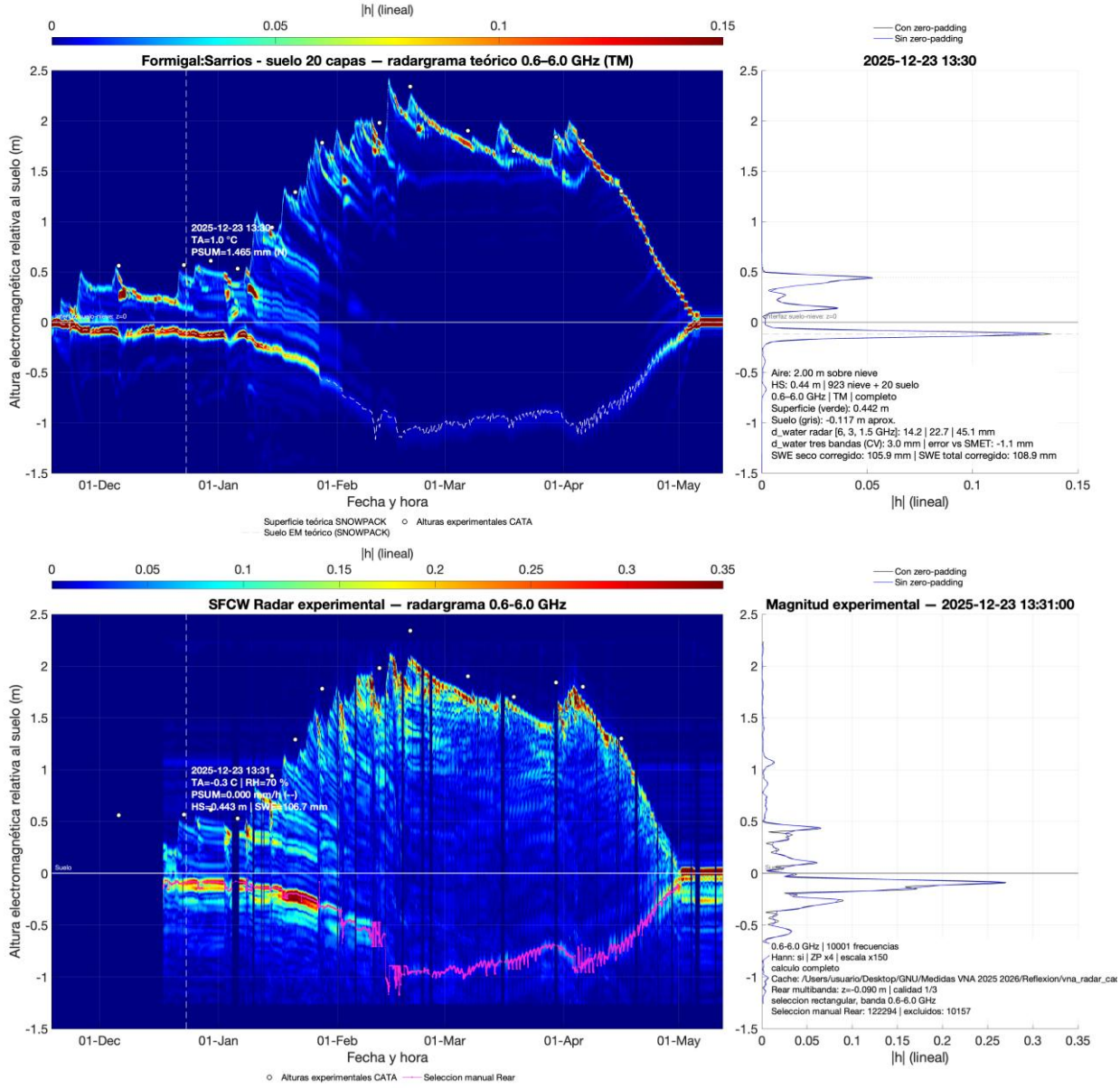


Figura 3. Radargrama simulado a partir de la estructura generada mediante SNOWPACK (arriba) y medido con el radar SFCW (abajo). Los círculos blancos indican las medidas experimentales de altura.

Para analizar el origen físico de las reflexiones internas se seleccionó el 23 de diciembre de 2025. En primer lugar, la Figura 4 compara las propiedades físicas del manto obtenidas mediante SNOWPACK y mediante una cata. A partir de ambos perfiles se calcularon las respuestas electromagnéticas simuladas, que se comparan en la Figura 5 con la medida del radar. Aunque el espesor total difiere — 43,7 cm en SNOWPACK y 56,5 cm en la cata —, ambos perfiles presentan una distribución vertical cualitativamente semejante de la densidad y, especialmente, dos zonas principales de acumulación de agua líquida:

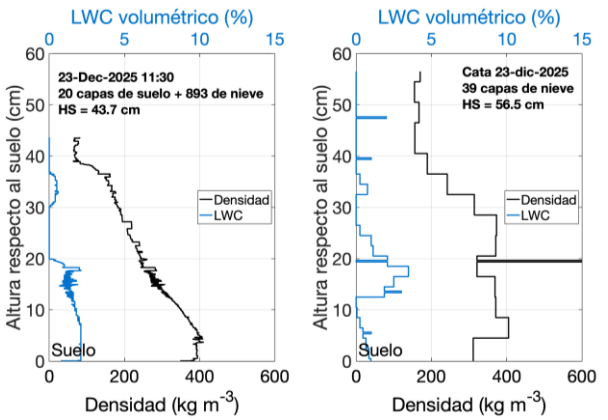


Figura 4. Perfiles de densidad y LWC obtenidos con SNOWPACK (izquierda) y en la cata (derecha) el 23/12/2025

una superior, aproximadamente a 30–35 cm sobre el suelo, y otra desde 20-25 cm hasta el suelo. Estas zonas de alto LWC aumentan el contraste de permitividad y originan reflexiones internas claramente identificables.

La Figura 5 compara la reflectancia experimental con las simuladas a partir de SNOWPACK y de la cata. Los tres perfiles presentan una sucesión semejante de máximos.

El máximo 1 corresponde a la interfaz aire-nieve; los máximos internos 2 (doble) y 3 aparecen en las proximidades de las dos zonas de LWC elevado identificadas en los perfiles físicos; y el máximo 4 corresponde a la interfaz nieve-suelo. Las acumulaciones de agua líquida aumentan el contraste dieléctrico y generan reflexiones internas, pero también incrementan la absorción y atenúan los ecos procedentes de niveles inferiores.

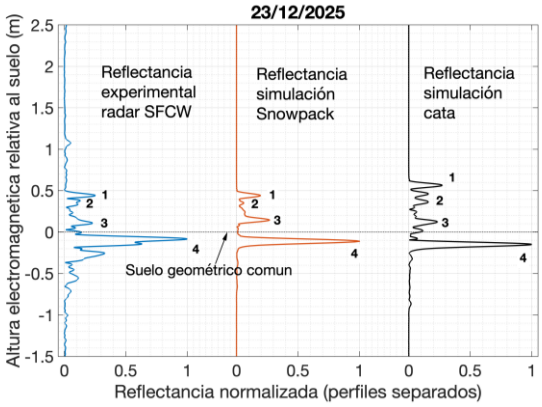


Figura 5. Reflectancias experimentales y simuladas: superficie (1), zonas de LWC elevado (2 y 3) y suelo (4).

Las diferencias de posición, anchura e intensidad pueden deberse a la resolución del radar, la heterogeneidad lateral y la separación espacial entre el radar y la cata. Por ello, la comparación debe considerarse cualitativa y centrarse principalmente en la posición y sucesión de los máximos.

CONCLUSIONES

Se ha presentado un procedimiento para visualizar experimentalmente y no destructivamente la evolución estructural interna del manto nivoso mediante un radar SFCW. Se ha calculado la reflectancia electromagnética a partir de perfiles simulados de SNOWPACK y de observaciones nivológicas manuales. La concordancia obtenida muestra que el sistema reproduce las principales etapas de evolución del manto y permite seguir de forma continua diferentes estructuras electromagnéticas internas.

El radar desarrollado constituye una plataforma transportable capaz de proporcionar, de forma continua, no destructivamente y prácticamente en tiempo real, información sobre la altura y la estructura interna del manto, y presenta potencial para la estimación conjunta del SWE y del LWC. Asimismo, permite observar la respuesta de la nieve ante nevadas, procesos de fusión y episodios ROS, y realizar medidas distribuidas para estudiar la variabilidad espacial de la estructura.

El desarrollo de técnicas cuantitativas de detección e inversión permitirá relacionar con mayor precisión los perfiles de reflectancia observados con las propiedades físicas de las capas. Los resultados obtenidos constituyen una validación del sistema y proporcionan la base experimental para la siguiente etapa.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto PID2021-124451OB-I00, cofinanciado por MICIU/AEI /10.13039/501100011033, FEDER UE y la Unión Europea Next Generation EU/PRTR, y por el proyecto T20-23R DGA-FSE. Los autores agradecen el apoyo de la Delegación Territorial de AEMET en Aragón, y de la estación Aramon Formigal-Panticosa.

BIBLIOGRAFÍA

Alonso, R., del Pozo, J. M. G., Buisán, S. T., & Álvarez, J. A. (2021). Analysis of the Snow Water Equivalent at the AEMet-Formigal Field Laboratory (Spanish Pyrenees) during the 2019/2020 winter season using a Stepped-Frequency Continuous Wave Radar (SFCW). *Remote Sens.*, *13*, 616. https://doi.org/10.3390/rs13040616

Bartelt, P., & Lehning, M. (2002). A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning. *Cold Regions Science and Technology*, *35*(3), 123-145. doi: 10.1016/S0165-232X(02)00074-5

Bland, W. L., Helmke, P. A., & Baker, J. M. (1997). High-resolution snow-water equivalent measurement by gamma-ray spectroscopy. Agricultural and Forest Meteorology, 83(1–2), 27–36., doi: 10.1016/S0168-1923(96)02351-9

Heilig, A., Schneebeli, M., & Eisen, O. (2009). Upward-looking ground-penetrating radar for monitoring snowpack stratigraphy. *Cold Regions Science and Technology*, *59*(2-3), 152-162. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.07.008

Kinar, N. J., & Pomeroy, J. W. (2015). Measurement of the physical properties of the snowpack. *Reviews of Geophysics*, *53*, 481-544.

Marshall, H. P., Schneebeli, M., & Koh, G. (2007). Snow stratigraphy measurements with high-frequency FMCW radar: Comparison with snow micro-penetrometer. *Cold Regions Science and Technology*, *47*, 108-117.

Mätzler, C. (1987). Applications of the interaction of microwaves with the natural snow cover. Remote Sensing Reviews, 2(2), 259–387. https://doi.org/10.1080/02757258709532086

Kodama, M., Nakai, K., Kawasaki, S., & Wada, M. (1979). An application of cosmic-ray neutron measurements to the determination of the snow-water equivalent. Journal of Hydrology, 41(1), 85–92. doi: 10.1016/0022-1694(79)90107-0

Schmid, L., Schweizer, J., Bradford, J., & Maurer, H. (2016). A synthetic study to assess the applicability of full-waveform inversion to infer snow stratigraphy from upward-looking ground-penetrating radar data. *Geophysics*, *81*(1), WA213-WA223. https://doi.org/10.1190/geo2015-0152.1

Sihvola, A., & Tiuri, M. (1986). Snow Fork for Field Determination of the Density and Wetness Profiles of a Snow Pack. *IEEE Transac. on Geosc. and Remote Sensing*, *GE-24*(5), 717-721.

Tiuri, M., Sihvola, A., Nyfors, E., & Hallikainen, M. (1984). The complex dielectric constant of snow at microwave frequencies. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 9(5), 377-382.

JorTec 6
Neu i Allaus

VI Jornades tècniques de neu i allaus
22 d'octubre de 2026
Barcelona

MODELITZACIÓ NUMÈRICA DE L'EPISODI DE TORB DEL BALANDRAU (30/12/2000) AMB WRF-CRYOWRF

Arnau Toledano [(1)]; Mireia Udina [(1)]; Yolanda Sola [(1)]; Joan Bech [(1)]; Eulàlia Busquets [(1)]; Francesc Polls [(1)]; Sergi González [(2)]; Pere Esteban [(3)]

(1) Universitat de Barcelona. Departament de Física Aplicada – Meteorologia, Martí i Franquès 1, 08028 Barcelona. E-mails: atoledano@meteo.ub.edu, mudina@meteo.ub.edu, ysola@meteo.ub.edu, joan.bech@ub.edu, ebusquets@meteo.ub.edu, fpolls@meteo.ub.edu
(2) Institut per a l'Estudi de la Neu i les Allaus (SLF). Flüelastrasse 11, CH-7260 Davos Dorf, Suïssa. E-mail: sergi.gonzalez@slf.ch
(3) Servei Meteorològic de Catalunya (SMC). Dr. Roux, 80, 1a, 08017 Barcelona. E-mail: pere.esteban@gencat.cat
PARAULES CLAUS: torb, cryowrf, balandrau, modelització, microescala.

RESUM

L'episodi de vent, torb i neu del 30 de desembre de l'any 2000 és un dels esdeveniments meteorològics més extrems i tràgics documentats als Pirineus. La combinació del torb i el fred van causar la mort de deu persones, set de les quals als voltants del Balandrau. Es presenta una reconstrucció numèrica dels fets a alta resolució amb el model WRF-ARW. La simulació revela un potent corrent en jet a sotavent, amb turbulència i inestabilitat atmosfèrica. A l'estació d'Ulldeter, les ratxes de vent van assolir els 138 km/h i la temperatura va caure 5,5 °C entre les 12 i les 15 UTC, i 9 °C fins a les 18. Amb aquestes dades, la sensació de fred calculada fou de gairebé −30 °C. Els resultats es verifiquen amb estacions meteorològiques automàtiques: la temperatura es reprodueix bé, mentre que el vent se sobreestima a Molló i a Núria i, a Ulldeter, no se'n reprodueix bé l'evolució. Finalment, també es mostren resultats preliminars amb CRYOWRF, que acobla el model WRF-ARW amb SNOWPACK i resol de manera explícita la neu en suspensió i, per tant, el torb.

INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS

El preludi de l'episodi és una nevada entre els dies 21 i 25 de desembre. Les dades de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) registren gruixos totals de fins a 72 cm a l'Hostal Pastuira, a Vallter 2000 (Setcases), el dia 25, i de 149 cm al Coll de la Marrana, entre el Pic de Bastiments i el Gra de Fajol, ja el dia 22.

La virulència del que va passar prové de la suma de diversos factors, especialment de la violència del vent, d'un mantell amb neu poc cohesionada a la seva part superior i de la forta baixada de temperatura. Aquestes condicions van afavorir el fenomen del torb (*blizzard* en anglès, amb *whiteout* quan la visibilitat s'anul·la). Segons la fórmula JAG/TI (Osczevski i Bluestein, 2005), que combina la temperatura de l'aire i la velocitat del vent a 10 m, a l'estació d'Ulldeter la sensació de fred va davallar fins als −29 °C a les 22 UTC calculada amb el vent mitjà, i fins als −34 °C a les 21 UTC amb la ratxa màxima horària.

Diversos autors han estudiat els fets anteriorment. Pascual (2001) va investigar el cas a partir de dades observacionals i va identificar possibles causes; una massa d'aire fred retinguda al vessant nord, canvis de pressió de 9 hPa en només tres hores, i una forta baixada de les temperatures. Discuteix que el model conceptual de corrent de densitat s'ajusta al fenomen. Anys després, Pascual i Callado (2010) van descriure l'episodi del Balandrau en un recull d'accidents de muntanya al Pirineu mediterrani. Ambdues anàlisis van utilitzar observacions (la segona, també reanàlisis de baixa resolució) i eren, en major part, qualitatives.

Per tal de complementar aquestes contribucions, aquest treball proposa reconstruir numèricament la dinàmica a mesoescala i contrastar amb observacions els resultats obtinguts. Posteriorment, quantificar el transport de neu i el seu intercanvi amb l'atmosfera amb CRYOWRF (Sharma et al., 2023).

DADES I METODOLOGIA

La simulació numèrica es realitza amb el model WRF-ARW v4.7.1 (Skamarock et al., 2019), amb quatre dominis niats amb passos de malla de 9 km, 3 km, 1 km i 333 m, centrats al Balandrau (Ripollès), 90 nivells verticals, microfísica Thompson (Thompson et al., 2008), capa límit MYNN 2.5 (Nakanishi i Niino, 2009), radiació RRTMG (Iacono et al., 2008) i model de superfície Noah-MP (Niu et al., 2011). Les condicions inicials i de contorn provenen d'ERA5 (Hersbach et al., 2020) i la integració dura 72 h, des de les 00 UTC del 29/12/2000. El domini intern, d04 amb una

resolució horitzontal de 333 m (figura 1), abasta les capçaleres del Ter i del Freser, amb la Vall de Núria a ponent i el circ d'Ulldeter al nord. L'experiment amb CRYOWRF (Sharma et al., 2023) hi afegeix SNOWPACK i el transport de neu pel vent.

Respecte a les observacions, s'han emprat tres estacions de la Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques (XEMA) del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC): Molló-Fabert (CG, 1405 m), Núria (DG, 1971 m) i la històrica d'Ulldeter (Z4, 2364 m). A més, també s'utilitzen dades nivològiques de l'ICGC: el registre diari de l'estació H030 (Hostal Pastuira, 2000 m) i els sondejos de les campanyes de desembre de 2000 i gener de 2001, entre els quals hi ha el perfil de referència del Coll de la Marrana (H061, 2420 m) del 28 de desembre.

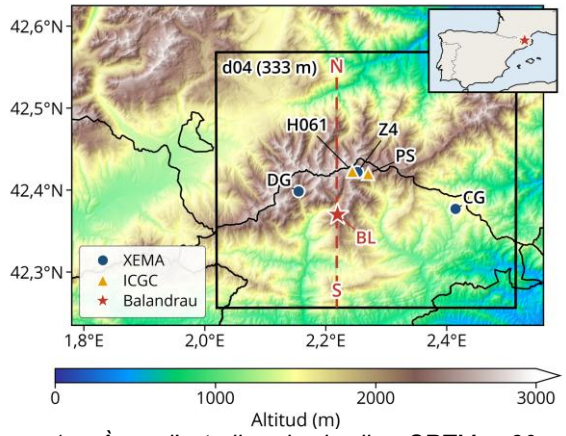


Figura 1 – Àrea d'estudi amb el relleu SRTM a 30 m, límits comarcals, punts analitzats i tall N–S pel Balandrau. El requadre negre delimita el domini d04 (Δx = 333 m).

RESULTATS I DISCUSSIÓ

A. Validació contra estacions.

La temperatura mostra una variació temporal coincident (r = 0,93–0,96), però amb biaixos que depenen de l'estació: el model és massa fred a Núria (−1,8 °C) i a Ulldeter (−1,1 °C). A Núria, el desnivell entre la cota real i la del model és de només 22 m, i corregir-lo redueix el biaix tan sols 0,1 °C: el fred del model és sistemàtic. Amb tot, el WRF-ARW encerta l'arribada i el ritme del canvi de temps (Taula 1).

El vent se sobreestima a Molló i a Núria (+1,8 i +1,3 m/s), amb una correlació alta (r = 0,94). A Ulldeter el biaix és de −1,4 m/s i la correlació, baixa (r = 0,48): el model reprodueix el vent de la tarda, però no el manté de nit. Les ratxes (fins a 138 km/h) no tenen equivalent al model. No s'atribueix una causa única, però la falta de representativitat orogràfica podria ser-ho. També s'ha de tenir en compte que a 333 m, el flux cau dins la zona grisa de la turbulència.

Taula 1 - Verificació del WRF-ARW (domini d04) del 30 de desembre de 2000 contra les estacions de la XEMA de Molló-Fabert (CG, 1405 m), Núria (DG, 1971 m) i Ulldeter (Z4, 2364 m). Es comparen la temperatura a 2 m (T) i la velocitat del vent (Vv) mitjançant el biaix (model menys observació), l'error absolut mitjà (MAE) i el coeficient de correlació de Pearson (r). El nombre de valors comparats (n) respon a la cadència de cada estació: semihorària a CG i DG, horària a Z4. A Z4 el vent es compara a 6 m, que és l'altura de l'anemòmetre; a CG i DG, a 10 m. El vent del model s'interpola a aquestes altures.

Codi Estació	n	Mètrica	T (ºC)	Vv (m/s)
CG	48	Biaix	0,6	1,8
		MAE	1,0	2,1
		r	0,93	0,94
DG	48	Biaix	−1,8	1,3
		MAE	1,8	1,6
		r	0,96	0,94
Z4	24	Biaix	−1,1	−1,4
		MAE	1,4	3,1
		r	0,96	0,48

B. Reconstrucció dinàmica.

La figura 2 mostra l'evolució simulada de l'episodi al llarg d'un tall vertical N–S pel Balandrau. A les 09 UTC l'atmosfera és estratificada i el vent, feble. A les 12 UTC apareixen els primers símptomes del canvi de temps, que arriba entre les 13 i les 14 UTC: una pertorbació del flux i turbulència i acceleració del vent a sotavent.

El punt àlgid esdevé al voltant de les 15 UTC, on es distingeixen ones de muntanya i velocitats verticals de fins a 9,4 m/s. En aquest moment, un fort corrent en jet prop de la superfície s'accelera a sotavent, amb un mòdul de fins a 40 m/s (145 km/h) a 86 m del terra. A prop de la superfície, el vent és unes 6 vegades més fort a sotavent que a barlovent, on les isentropes de θ es comprimeixen indicant aire molt estable i acceleració del flux. Al cim del Balandrau el model simula una caiguda de −6,0 a −11,7 °C en tres hores, del mateix ordre que els 5,5 °C que va registrar Ulldeter en aquest mateix interval.

C. Mantell nival i resultats preliminars amb CRYOWRF.

L'ICGC va realitzar un perfil de neu a l'estació H061 del Coll de la Marrana el 28 de desembre, a 2420 m. Descriu un mantell de 165 cm. En canvi, a l'estació del SMC d'Ulldeter (2364 m), a menys de 700 m de distància, se'n mesuraven només entre 18 i 24 cm. Aquesta gran diferència segurament és a causa del vent i de l'orientació.

L'última fila de la figura 2 mostra la neu en suspensió (en anglès, *blowing snow*) simulada amb CRYOWRF (Sharma et al., 2023). Entre les 13 i les 14 UTC passa d'uns 2 a 19 g/m³ (màxim del domini); a les 15 UTC el màxim és d'1,9×10⁻² kg/kg, que amb la densitat de l'aire (1,05 kg/m³) equival a uns 20 g/m³ de neu transportada. Aquest experiment és preliminar: parteix d'un mantell d'uns 1,4 m a Núria i a Ulldeter (observats: 56 i 22 cm) i sobreestima el vent a Molló (+8 m/s), de manera que les quantitats són només orientatives.

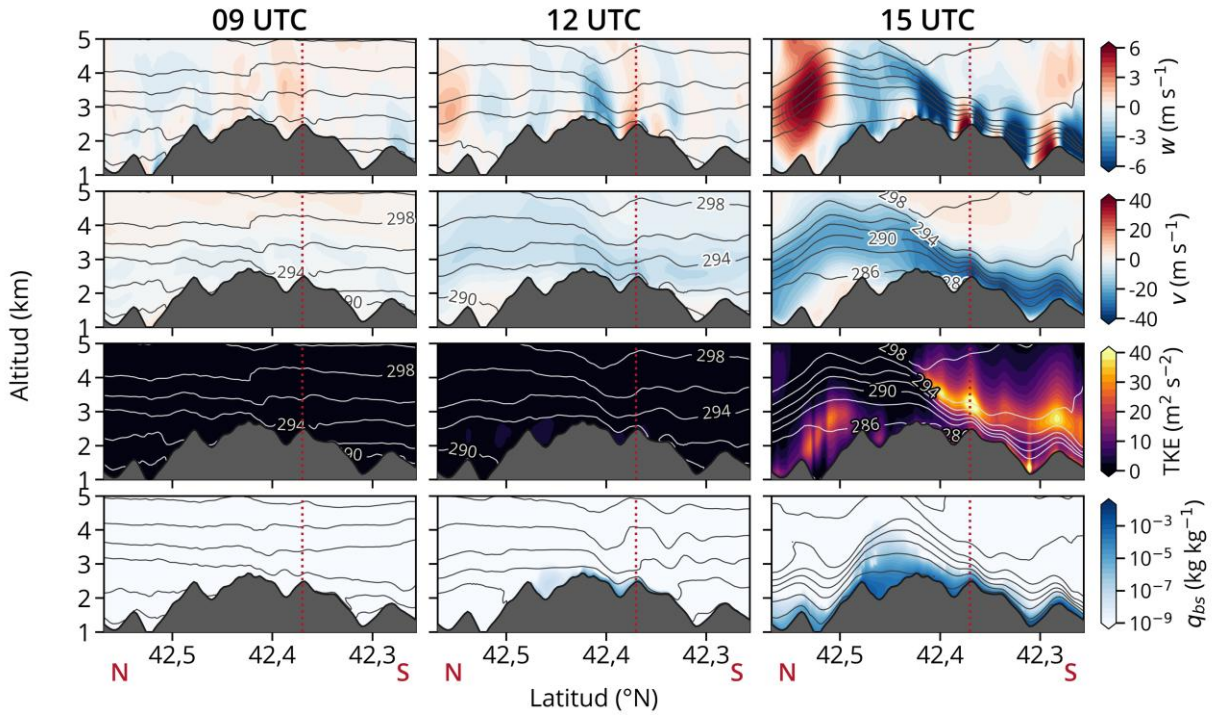


Figura 2 – Evolució del tall N–S pel Balandrau (2,22 °E) a les 09, 12 i 15 UTC del 30/12/2000, amb el nord a l'esquerra. Files 1–3, WRF-ARW sense CRYOWRF: velocitat vertical (w), component N–S del vent (v; negativa = vent del nord) i energia cinètica turbulenta parametritzada ($TKE_{MYNN2.5}$). Fila 4, resultat provisional de l'experiment amb CRYOWRF: neu en suspensió (q_{bs}) a escala logarítmica. Les isolínies són de temperatura potencial (θ) cada 2 K, i la línia vermella assenyala la posició del Balandrau.

CONCLUSIONS

Es reconstrueix la dinàmica atmosfèrica de l'episodi del Balandrau amb una simulació d'alta resolució WRF-ARW. Després d'un matí amb certa calma i estratificació, a partir del migdia entra vent de nord i cau en picat la temperatura (5,5–7,5 ºC en 3 hores a les estacions). Un corrent d'aire a sotavent acompanyat de torb i turbulència va comportar condicions extremes de fred, visibilitat reduïda, vent i neu a alta muntanya.

La comparació amb observacions mostra que el WRF-ARW reprodueix bé la temperatura i l'hora del canvi de temps, però sobreestima el vent a Molló i a Núria i no en reprodueix l'evolució nocturna a Ulldeter. Una malla de 333 m no pot reproduir exactament els fets per limitacions de resolució, representativitat i física.

Finalment, l'experiment amb CRYOWRF mostra el transport de neu durant la tarda i obre la porta a quantificar-ne la contribució mitjançant experiments addicionals.

AGRAÏMENTS

Aquesta recerca s'ha realitzat gràcies a dades del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) i de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), conjuntament amb el finançament dels projectes FI-STEP (STEP 2025 00137) i LIFE PYRENEES4CLIMA (LIFE22-IPC-ES-LIFE PYRENEES4CLIMA).

REFERÈNCIES

HERSBACH, H., et al., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 146, 1999-2049.

IACONO, M.J., DELAMERE, J.S., MLAWER, E.J., SHEPHARD, M.W., CLOUGH, S.A., COLLINS, W.D., 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res.*, 113, D13103.

NAKANISHI, M., NIINO, H., 2009. Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 87, 895-912.

NIU, G.-Y., et al., 2011. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *J. Geophys. Res.*, 116, D12109.

OSCZEVSKI, R., BLUESTEIN, M., 2005. The new wind chill equivalent temperature chart. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 86, 1453-1458.

PASCUAL, R., 2001. La situació meteorològica del 30 de desembre de 2000 al Pirineu Oriental: entrada brusca de vents forts. *Penell*, 9.

PASCUAL, R., CALLADO, A., 2010. Mountain accidents associated with winter northern flows in the Mediterranean Pyrenees. *Tethys*, 7, 41-56.

SHARMA, V., GERBER, F., LEHNING, M., 2023. Introducing CRYOWRF v1.0: multiscale atmospheric flow simulations with advanced snow cover modelling. *Geosci. Model Dev.*, 16, 719-749.

SKAMAROCK, W.C., et al., 2019. A description of the Advanced Research WRF model version 4. *NCAR Technical Note*, NCAR/TN-556+STR, Boulder, Colorado, 145 pp.

THOMPSON, G., FIELD, P.R., RASMUSSEN, R.M., HALL, W.D., 2008. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: implementation of a new snow parameterization. *Mon. Weather Rev.*, 136, 5095-5115.