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 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.

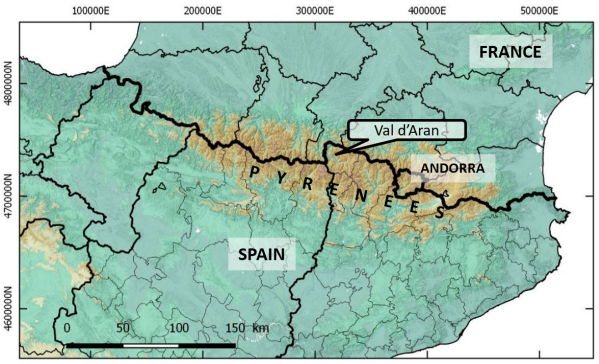

Figura 1 – Mapa de situació de la Val d'Aran.

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 vulnerables que s'han considerat més importants tenint en compte la zona vulnerable afectada 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 Geoindex d'Allaus de l'ICGC) amb registres històrics i d'observació de camp dels darrers 30 anys. 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.

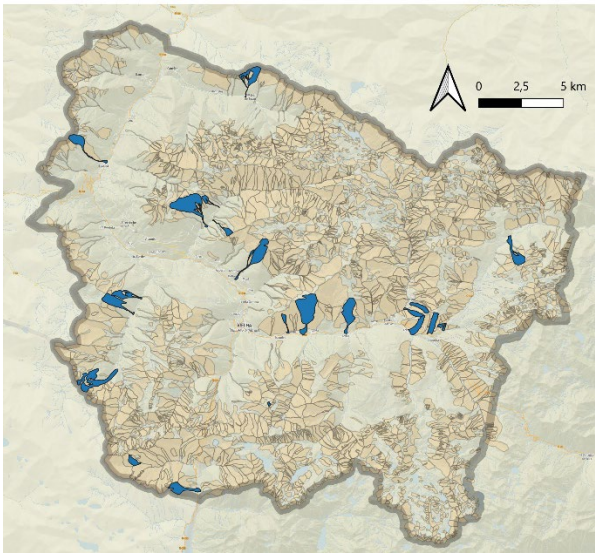

Figura 2 – Mapa d'allaus de la Val d'Aran (en carbassa clar) i les zones d'allaus que afecten a les zones vulnerables seleccionades (en blau).

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.

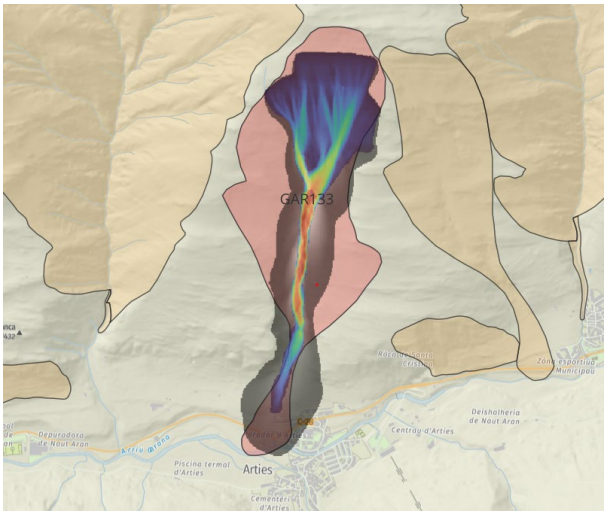

Figura 4 – Detall d'una zona vulnerable (GAR133, Arties) amb l'envolvent de la zona d'allau i el resultat de la simulació RAMMS::Extended.

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).

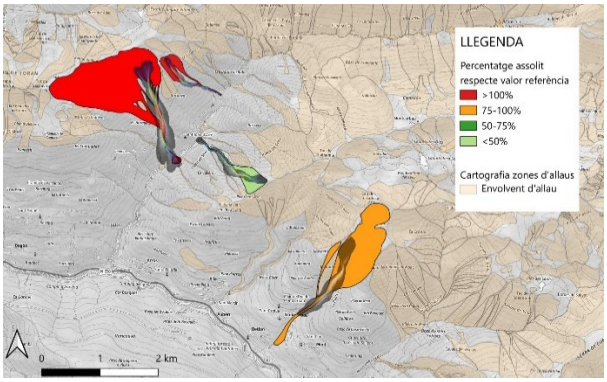

Figura 5 – Exemple de la visualització d'un sector de l'Aran amb el resultat d'una consulta específica on s'observen diferents graus de probabilitat d'afectació de les allaus sobre les zones en risc.

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).