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 fluiditzat i col·lisional, 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).

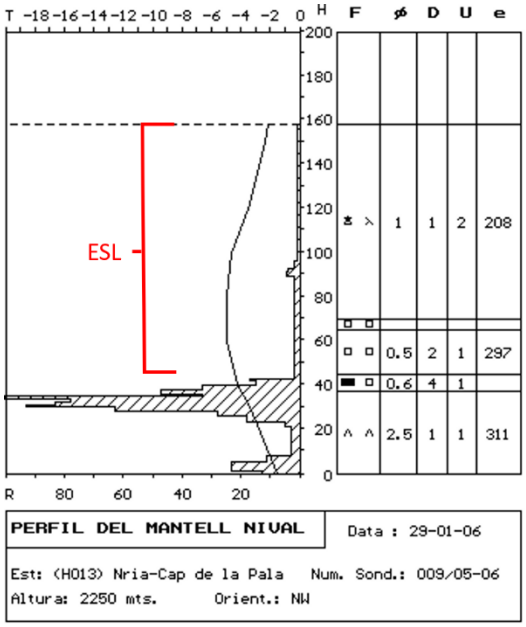

Figura 1 – Exemple d'un dels perfils seleccionats, amb l'ESL considerada, de 110 cm de gruix, una temperatura de -4,2ºC i una densitat de 230 kg/m³.

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.

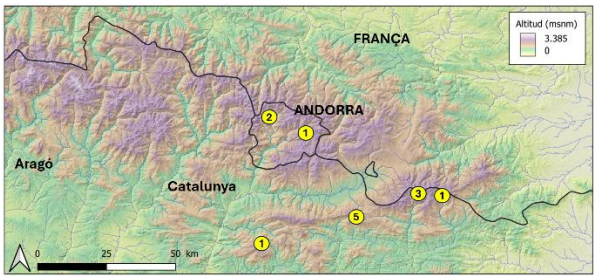

Figura 2 – Distribució dels perfils seleccionats.

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.

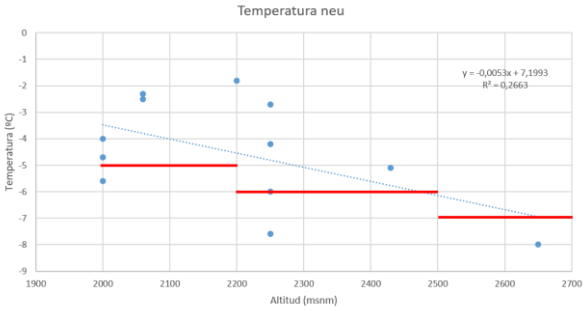

Figura 4 – Relació entre la temperatura de l'ESL i l'altitud dels perfils analitzats.

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.

	TS (ºC)		ΔTS (ºC/100 m)	
Altitud (msnm)	Pirineus	Alps	Pirineus	Alps
1900	-4	-5 (-4)	0,5 (0,4-0,6)	0,3 (0,2-0,4)
2000				
2100	-5			
2200		-6		
2300	-6			
2400				
2500				
2600	-7	-7 (-8)		
2700				

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.