



UNIVERSITAT D'ANDORRA

Programa de doctorat de la Universitat d'Andorra

Caracterització espaciotemporal de l'activitat d'allaus a Andorra: Nous coneixements, eines i tecnologies per la presa de decisions en la gestió del risc

Jon Apodaca Saracho

Direcció: Dr. Juan Ignacio López Moreno i Dr. Marc Pons Pons

Identificador: TD-123-108277/202409

Data de defensa: 29 de gener de 2025

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (*framing*). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading nor the availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (*framing*). These rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

TESI DOCTORAL

Caracterització espaciotemporal de
l'activitat d'allaus a Andorra: Nous
coneixements, eines i tecnologies per la
presa de decisions en la gestió del risc

Jon Apodaka Saratxo

Programa de Doctorat de la Universitat d'Andorra
2024



TESI DOCTORAL

Caracterització espaciotemporal de
l'activitat d'allaus a Andorra: Nous
coneixements, eines i tecnologies per la
presa de decisions en la gestió del risc

Programa de Doctorat de la Universitat d'Andorra
2024

Jon Apodaka Saratxo

Directors:

Marc Pons Pons

Juan Ignacio López Moreno



UNIVERSITAT
D'ANDORRA

Cita suggerida:

Apodaka, J. (2024). *Caracterització espaciotemporal de l'activitat d'allaus a Andorra: Nous coneixements, eines i tecnologies per a la presa de decisions en la gestió del risc* (Tesi doctoral). Universitat d'Andorra.



Reconeixement - NoComercial - SenseObraDerivada (by-nc-nd) o CC by-nc-nd:

No es permet un ús comercial de l'obra original ni la generació d'obres derivades per altres persones que no siguin les propietàries dels drets.

« L'idéal du pyrénéiste est de savoir à la fois ascensionner, écrire, et sentir. S'il écrit sans monter, il ne peut rien. S'il monte sans écrire, il ne laisse rien. Si, montant, il relate sec, il ne laisse rien qu'un document, qui peut être il est vrai de haut intérêt. Si - chose rare - il monte, écrit et sent, si en un mot il est le peintre d'une nature spéciale, le peintre de la montagne, il laisse un vrai livre, admirable. »

Henri Beraldi (1849-1931) était un bibliophile, éditeur et auteur français d'ouvrages sur les Pyrénées et sur les graveurs français du XIXe siècle.

La realització d'aquesta tesi doctoral ha estat finançada parcialment amb les ajudes atorgades pel Govern d'Andorra: ajuts de tercer cicle ATC020-AND-2017/2018, ATC020-AND-2018/2019, ajuts per al pagament de matrícula dels estudis de tercer cicle AMTC0062-AND/2017, AMTC0070-AND/2018, ajuts de mobilitat AM065-AND-2018, AM078-AND-2019; a més de ser autofinançada pel mateix autor.

Agraïments

El document que tens a les mans és fruit de diversos anys d'experiència i moments, tant acadèmics com professionals, que han estat fonamentals en una etapa important de la meua vida. Se'm fa difícil redactar aquest apartat sense reflexionar en tots aquests moments viscuts durant aquest dur, atrevit, però alhora bonic viatge a què m'he enfrontat els últims anys. En aquest temps he experimentat innumbrables moments de felicitat, molts dels quals van sorgir precisament de la ignorància dels desafiaments que m'esperaven. I en part, haver arribat al final, no hauria estat possible sense l'ajuda, l'orientació i l'afecte de moltes persones.

Començo per agrair als meus directors Marc i Nacho, per tota la seva ajuda, i en especial per la seva atenció i dedicació. Sempre han estat a l'altra banda del correu electrònic i telèfon, o disposats a veure'ns, malgrat la distància, prestant suport i quan els he necessitat no han dubtat a facilitar-me orientació i solucions per dur a terme els objectius marcats. Moltes han estat les crítiques constructives i les propostes que m'han plantejat. Estic en deute amb ells per la paciència que han tingut amb mi. No m'avergonyeixo a reconèixer que no sempre he pogut dedicar-li el temps que m'hauria agradat a aquesta investigació per responsabilitats i compromisos addicionals que han dificultat de vegades un seguiment fluid i continu del projecte. Tot i això, ells han respectat el meu *timing*, i potser això ha estat una de les claus de l'èxit i estic enormement agraït. Tenir el suport de dos directors d'aquest calibre és una experiència increïble, però encara ha estat millor tenir l'oportunitat de conèixer el seu costat personal.

Continuo amb l'agraïment incondicional a la meua família: aita, ama i Asier. No tinc paraules per descriure allò que m'estan aportant des de sempre. Un esforç personal i econòmic. Des de l'educació, a la disciplina i la constància, passant pel suport a les meves aficions i decisions, bones o dolentes. Sense el seu suport, tot seria més difícil a la meua vida.

A les companyes i companys d'Andorra Recerca i Innovació, que són tants que no em vull arriscar a enumerar-los per por de deixar-ne algun, i que van ser fonamentals en establir les bases d'aquest projecte durant els primers anys després de la meua arribada a Andorra. El seu suport i col·laboració van ser necessaris per dur a terme una investigació que combina la meua passió pels riscos naturals, la muntanya i els esports

al medi natural. El seu suport ha estat fonamental en molts moments i des del principi em van orientar pel bon camí, recomanant-me, per exemple, aprendre el llenguatge de R. No enganyaré ningú, aquests primers passos van ser un veritable cop de realitat. Amb el temps, però, el que va començar com una relació d'amor i odi amb R s'ha convertit en un veritable romanç. Aquest llenguatge no només ha esdevingut una eina indispensable en la meua recerca, sinó que també ha despertat en mi una passió per l'anàlisi de dades i la programació, que mai havia imaginat.

A la Universitat d'Andorra, per obrir-me les portes al cor dels Pirineus per continuar amb els meus estudis i enriquir-me amb les seves formacions transversals de l'Escola Internacional de Doctorat, i en especial a Virgínia i Bárbara, que han estat el meu enllaç constant amb la universitat. Un petit entorn acadèmic amb tots els recursos essencials, on és de valor incalculable poder assistir a una classe un dissabte al matí i, al migdia, estar foquejant amb els esquís de muntanya a més de 2000 metres d'altitud. Aquest equilibri entre l'acadèmia i la natura ha estat una experiència única a la meua formació. Tot i això, als dies de neu pols, també era un acte de fe i compromís haver de passar-me per la universitat, o continuar avançant en la investigació. El suport mutu amb altres doctorands de camps de recerca molt diferents del meu ha enriquit profundament la meua experiència i ha inspirat noves idees, contribuint de manera decisiva al meu desenvolupament. No puc deixar de mencionar Juan Jesús, Xavier i Cristina, amb qui he tingut més contacte i que han estat de gran ajuda al llarg d'aquest camí.

També vull expressar el meu més sincer agraïment a Margarita i Helena pel seu tracte amable i la seva comprensió en les gestions amb l'Àrea de Recerca del Ministeri de Relacions Institucionals, Educació i Universitats. L'itinerari programat a vegades no va ser com havíem somiat i volíem, però, malgrat tot, em van insistir que no prenguéssim el camí fàcil d'abandonar i que tiréssim endavant amb la investigació.

Continuo amb l'agraïment a Protecció Civil, Bombers, Policia i en especial a les estacions d'esquí, COEX i el Servei Meteorològic d'Andorra per obrir-me les portes i cedir-me les dades donant-me l'oportunitat de fer aquesta bonica feina. No puc oblidar-me del predictor Guillem, amb qui he pogut tenir converses molt interessants sobre predicció i l'operativa diària. Tampoc vull oblidar-me d'Oscar del GRM de Bombers d'Andorra, d'Albert "Carving" i del Putxi EFPM, amb els que he tingut l'oportunitat d'aprendre i compartir activitats interessants aplicades a la investigació, així com compartir moments en formacions o xerrades. Tampoc del Sergi, el Carles i l'Àlex de l'Assistència Tècnica, ni de tots els Caps de Pistes, professionals i col·laboradors que

enviaven informació diària sobre neu i allaus. He intentat aportar-vos la meua motivació i compromís, transmetre-us informació sobre accidents per allaus tant al país com a fora, i a canvi n'he rebut molt. Gràcies de cor per tractar-me com un més i per facilitar-me tant les coses.

No em puc oblidar dels companys de l'Àrea de Cartografia i el Departament d'Ordenació Territorial del Govern d'Andorra, amb els quals vaig passar d'estar discutint la portada del mapa 1:50.000 i definint els *inputs* de la Base de Dades de Riscos Geològics del país, a viure'n una pandèmia que ens va portar a connectar-nos cada matí per continuar amb el seguiment de projectes, i conèixer el nostre estat en una situació mai imaginada. El viscut i après aquí, ha estat clau en la meua evolució personal i professional, obrint-me noves oportunitats.

Tampoc vull acabar aquest apartat sense agrair l'oportunitat, la confiança i els coneixements que m'han donat moltes persones per endinsar-me en aquest camp professional. Entre elles els professors de geologia de l'Euskal Herriko Unibertsitatea; Glòria i Nue de la Universitat de Barcelona; Montse, Iván i Jordi del Centre Lauegi de la Vall d'Aran, Joan Martí del GEO3BCN-CSIC; Víctor, Nacho i Fernando d'A Lurte; Marc i Dimitri de Tavascan; Albert, Xavi i Oriol d'Ordino-Arcalís, ara Grandvalira Resorts; i Ramon de l'antic CENMA, entre molts d'altres que no tindria espai per enumerar. També em recordo, en escriure aquestes paraules, del Pere de GeoNeurisk i del Marc de l'ICGC, a qui sempre he tingut com a referents en el camp dels riscos geològics i la enginyeria, i que em van orientar molt a l'hora de presentar pressupostos en els meus inicis com a emprenedor. Des que vaig acabar la carrera, he intentat treballar al camp dels riscos naturals, i gràcies a tots vosaltres he tingut l'oportunitat de fer-ho. El vostre suport ha estat fonamental perquè aquesta experiència s'hagi anat consolidant a poc a poc. És important que t'obrin les portes i confiïn en tu, ja que aquesta confiança i oportunitat són fonamentals per poder créixer i desenvolupar-te professionalment. Això no és fàcil, i en qualsevol moment aquest viatge podria haver pres una altra destinació.

Finalment, no vull desaprofitar l'oportunitat per agrair als meus amics i amigues per compartir moments més enllà de la feina, per aquestes escalades, entrenaments, viatges o moments a la mar mentre esperàvem una sèrie d'onades. A totes les persones amb qui he compartit moments en aquests bonics anys, el meu agraïment més sincer.

Declaració

Jo, Jon Apodaka Saratxo, declaro haver participat activament en cadascun dels processos que han estat duts a terme per a la realització de la meva tesi doctoral. La meva participació s'estén des de la fase inicial del projecte, presentat per a l'ajuda de tercer cicle del Govern d'Andorra, fins a totes les fases posteriors. Aquest projecte preliminar va ser desenvolupat juntament amb Marc Pons Pons i Glòria Furdada Bellavista.

El programa de Doctorat estableix set fites clau durant el desenvolupament. La primera fita passa en començar el primer semestre, on es duu a terme l'admissió al programa de Doctorat i l'assignació d'un tutor, dos en el meu cas.

Després del segon semestre, cal complir dues fites importants. Primer, la defensa del Projecte de Recerca, de determinar la viabilitat i l'enfocament del treball de recerca i segon, l'acceptació definitiva del projecte i l'assignació de la direcció, on es confirma el tema de recerca.

Al final del quart semestre s'espera la presentació de les publicacions derivades de la investigació. Aquestes publicacions són una mostra del progrés i les aportacions científiques realitzades fins aquell moment. A més, es realitza una avaluació externa i l'aprovació del Report d'Avanç de la Tesi Doctoral i de la defensa.

Finalment, hi ha la redacció i el dipòsit de la memòria final.

La meva participació en la realització de la tesi doctoral ha estat integral i compromesa, complint amb cadascuna de les fites establertes pel programa de Doctorat, en un rang temporal que no és consecutiu pel fet que la dedicació no ha estat a jornada completa ni contínua en el temps.

La investigació s'ha realitzat amb el suport del grup d'investigadors d'Andorra Recerca i Innovació (anteriorment conegut com a Centre d'Estudis de la Neu de la Muntanya d'Andorra, CENMA; Observatori de la Sostenibilitat d'Andorra, OBSA; i ACTUATECH).

Les dades utilitzades en aquesta tesi han estat obtingudes gràcies a la col·laboració de diverses entitats i organitzacions. En particular, Andorra Recerca + Innovació, el Servei Meteorològic d'Andorra, Protecció Civil, Bombers, COEX i Ordenació Territorial del Govern d'Andorra. A més, les estacions d'esquí que actualment conformen Grandvalira Resort han contribuït significativament, igual que els estudis públics realitzats per l'ONF-RTM (Office National des Forêts - Service de la Restauration des Terrains de Montagne). Aquestes fonts han estat essencials per a la recopilació i anàlisi de les dades necessàries.

Per a l'elaboració d'aquesta tesi doctoral, he utilitzat de manera racional i puntual eines d'intel·ligència artificial a l'última fase de desenvolupament del projecte, quan s'han popularitzat, també a la comunitat científica. Aquestes eines m'han assistit en el procés d'escriptura, proposant-me idees de treball, suggerint una estructura inicial, fent-me reflexionar sobre la meua temàtica de recerca i resolent diverses qüestions o facilitant la cerca de documents.

El projecte ha complert amb els estàndards ètics de tota investigació i la cessió de les dades i publicació dels resultats ha estat autoritzada per les entitats esmentades.

Finalment, declaro que no hi ha hagut conflicte d'interès en cap de les tasques dutes a terme en la investigació i els ajuts financers no han condicionat de cap manera els resultats i les conclusions de la tesi.

Recomanacions per a la lectura

Aquesta tesi doctoral està estructurada en set capítols, cadascun dels quals es pot llegir de manera independent i va acompanyat de les referències i dels annexos. Tot seguit, es presenten algunes recomanacions per aprofitar al màxim el contingut de cada capítol i entendre com es relacionen entre si.

Capítol 1: **Introducció**

Es recomana començar per aquest capítol, ja que proporciona un panorama general del tema de la tesi, els objectius de la investigació i les hipòtesis plantejades. Aquesta introducció estableix el context necessari per comprendre la rellevància i la motivació darrere de l'estudi.

Capítol 2: **Caracterització espaciotemporal del mantell de neu i les nevades**

Aquest capítol se centra en la caracterització del mantell de neu i les nevades a Andorra. Aquí s'analitzen els patrons espaciotemporals de la neu, proporcionant dades de rellevància per a la comprensió del comportament de les nevades a la zona d'estudi partint de les dades manuals recollides sistemàticament des dels anys vuitanta.

Capítol 3: **Generació de patrons espaciotemporals de l'activitat d'allaus**

En aquest apartat es presenten els patrons espaciotemporals de l'activitat d'allaus a Andorra. Aquesta anàlisi innovadora ofereix una perspectiva avançada sobre la predicció i l'estudi de les allaus partint del registre de l'activitat.

Capítol 4: **Avaluació i mitigació del risc d'allaus: Proposta de noves estratègies, protocol, eines i tecnologies per a la gestió del risc d'allaus**

Aquí es discuteixen les estratègies d'avaluació i mitigació del risc d'allaus, analitzant i proposant noves eines, tecnologies i protocols per a una gestió més efectiva d'aquest risc.

Capítol 5: **Consideracions finals**

En aquest capítol final de la tesi doctoral es presenta una síntesi completa de les troballes de la investigació, estructurada en diversos apartats clau. A les **conclusions** es resumeixen els principals resultats obtinguts i la seva rellevància en el context de l'estudi sobre el risc d'allaus a Andorra. L'apartat d'aplicacions pràctiques descriu com

les troballes poden ser implementades en la gestió i mitigació de riscos a la regió, proporcionant eines útils per a autoritats i experts en la matèria.

En les **limitacions** es detallen els desafiaments i les restriccions trobats durant el desenvolupament de l'estudi, cosa que proporciona una visió crítica i realista dels resultats obtinguts. Les **futures línies de recerca** suggereixen àrees on es pot aprofundir o ampliar la investigació, oferint un punt de partida per a estudis futurs. Finalment, la **reflexió final** proporciona una visió general de l'impacte i la rellevància del treball, destacant la importància de la recerca en el context del canvi climàtic i la gestió de riscos naturals.

La tesi finalitza amb els apartats de **referències** i **annexos**, que inclouen totes les fonts referenciades i materials addicionals que complementen i donen suport a la investigació presentada a la tesi.

Resum

Andorra, un petit país muntanyenc situat als Pirineus, enfronta un risc significatiu d'allaus a causa de la seva geografia i condicions climàtiques. Tot i que s'han desenvolupat mitjans de defensa per mitigar els efectes d'aquests fenòmens naturals, els accidents continuen succeint, ocasionant pèrdues humanes i econòmiques considerables. En aquest context, la recerca se centra a analitzar i millorar les estratègies existents per a la gestió del risc d'allaus, donada la creixent exposició del territori a aquests esdeveniments. Per dur a terme aquesta recerca es van emprar diversos mètodes avançats, la gestió i creació de bases de dades específiques, tècniques d'anàlisi SIG i teledetecció, incloent-hi anàlisis estadístiques mitjançant R, un llenguatge de programació lliure àmpliament utilitzat per a l'anàlisi i la visualització de dades. A més, es va experimentar amb els últims avanços en eines, protocols i processos per a l'observació i gestió de l'activitat nivometeorològica i d'allaus, avaluant l'efectivitat d'aquestes noves tecnologies en la millora de la precisió de les prediccions i l'optimització de la gestió de riscos. Els resultats d'aquest estudi van permetre una caracterització espaciotemporal detallada del fenomen de les nevades i les allaus a Andorra, facilitant la sectorització del país en diferents regions nivoclimàtiques. Aquesta sectorització va ajudar a identificar comportaments específics de l'activitat d'allaus en funció de les característiques climàtiques de cada regió, identificant-se patrons sinòptics predominants que influeixen en l'activitat d'allaus, proporcionant una base sòlida per a futures prediccions i una millor gestió d'aquests fenòmens. També es va desenvolupar una base de dades geolocalitzada i històrica que recopila de manera exhaustiva i homogènia la informació sobre l'activitat d'allaus a Andorra. Les anàlisis estadístiques realitzades amb aquesta base de dades van permetre una comprensió més profunda dels patrons d'activitat d'allaus en el passat i la seva distribució espacial i temporal, aspecte important per millorar la planificació i la presa de decisions en la gestió del risc d'allaus. Així mateix, es va dur a terme una avaluació exhaustiva dels protocols, eines i fluxos d'informació actualment utilitzats en la gestió del risc d'allaus al país. Aquesta avaluació va identificar àrees de millora en la coordinació entre els diferents actors involucrats i va proposar ajustos que podrien augmentar l'eficàcia de les intervencions en situacions d'emergència. En conclusió, tot i que Andorra ha avançat en la gestió del risc d'allaus, encara hi ha àrees clau que requereixen millores, i la integració de noves tecnologies, juntament amb una millor coordinació entre els actors involucrats, pot contribuir significativament a la mitigació de riscos en el futur.

Paraules clau: *allau, neu, tipus de temps, clima de neu, gestió operativa, risc, canvi climàtic, Pirineus.*

Abstract

Andorra, a small mountainous country located in the Pyrenees, faces a significant risk of avalanches due to its geography and climatic conditions. Although means of defence have been developed to mitigate the effects of these natural phenomena, accidents still occur, causing considerable human and economic losses. In this context, the research focuses on analysing and improving existing strategies for avalanche risk management, given the increasing exposure of the territory to these events. To carry out this research, several advanced methods, the management and creation of specific databases, GIS analysis and remote sensing techniques, including statistical analysis using R, a free programming language widely used for data analysis and visualisation, were used. In addition, the latest advances in tools, protocols and processes for the observation and management of snow and avalanche activity were experimented with, evaluating the effectiveness of these new technologies in improving the accuracy of predictions and optimising risk management. The results of this study allowed a detailed spatio-temporal characterisation of the phenomenon of snowfall and avalanches in Andorra, facilitating the sectorisation of the country into different snow-climatic regions. This sectorisation helped to identify specific behaviours of avalanche activity according to the climatic characteristics of each region, identifying predominant synoptic patterns that influence avalanche activity, providing a solid basis for future predictions and better management of these phenomena. A geolocalised and historical database was also developed that compiles exhaustive and homogeneous information on avalanche activity in Andorra. The statistical analyses carried out with this database allowed a more profound understanding of the patterns of past avalanche activity and its spatial and temporal distribution, a crucial aspect to improving planning and decision-making in avalanche risk management. A comprehensive assessment of the protocols, tools and information flows currently used in avalanche risk management in the country was also carried out. This assessment identified areas for improvement in the coordination between the different actors involved and proposed adjustments that could increase the effectiveness of interventions in emergencies. In conclusion, although Andorra has made progress in avalanche risk management, there are still key areas that require improvement, and the integration of new technologies, together with better coordination between the actors involved, can contribute significantly to risk mitigation in the future.

Keywords: *avalanche, snow, weather types, snow climate, operational management, risk, climate change, Pyrenees.*

Índex

AGRAÏMENTS	VII
RESUM	XVII
ABSTRACT	XIX
ÍNDEX.....	XXI
LLISTAT DE FIGURES	XXV
LLISTAT DE TAULES.....	XXIX
LLISTAT DE ACRÒNIMS	XXXI
CAPÍTOL 1.	2
1. INTRODUCCIÓ	2
1.1 PRESENTACIÓ I MARC DEL TREBALL	4
1.2 MARC TEÒRIC	7
1.2.1 <i>Caracterització espaciotemporal del mantell de neu i les nevades.....</i>	<i>8</i>
1.2.2 <i>Climatologia d'allaus.....</i>	<i>15</i>
1.2.3 <i>Noves eines i tecnologies, open data i ciència ciutadana en la gestió del risc d'allaus. 19</i>	<i>19</i>
1.2.4 <i>Transició del turisme d'hivern en un context d'emergència climàtica.....</i>	<i>26</i>
1.3 ZONA D'ESTUDI: EL PRINCIPAT D'ANDORRA	32
1.3.1 <i>Introducció</i>	<i>32</i>
1.3.2 <i>Geografia i geologia.....</i>	<i>33</i>
1.3.3 <i>Socioeconomia</i>	<i>37</i>
1.3.4 <i>Climatologia.....</i>	<i>39</i>
1.4 EL RISC D'ALLAUS A ANDORRA. EL FENOMEN, LA PREVENCIÓ I LA PROTECCIÓ DAVANT DEL PERILL	45
1.4.1 <i>Introducció</i>	<i>45</i>
1.4.2 <i>La protecció davant del perill i les mesures de defensa</i>	<i>46</i>
1.5 MOTIVACIÓ	62
1.6 OBJECTIUS.....	64
CAPÍTOL 2.	68
2. CARACTERITZACIÓ ESPACIOTEMPORAL DEL MANTELL DE NEU I LES NEVADES	68
2.1 INTRODUCCIÓ	68
2.1.1 <i>Base de dades harmonitzada</i>	<i>69</i>
2.1.2 <i>Estacions meteorològiques a Andorra</i>	<i>71</i>
2.1.3 <i>La xarxa nivometeorològica d'Andorra.....</i>	<i>73</i>

2.2	METODOLOGIA	74
2.2.1	Anàlisi estadística.....	74
2.2.2	Índex de Severitat de l'Hivern (Winter Severity Index, WSI).....	76
2.2.3	Classificació automàtica dels tipus de temps.....	79
2.2.4	Completar sèries temporals incompletes	82
2.2.5	Sectorització del país a regions nivoclimàtiques	83
2.2.6	Càlcul de períodes de retorn de nevades.....	84
2.3	RESULTATS	85
2.3.1	Densitat d'estacions meteorològiques al país.....	85
2.3.2	Anàlisi exploratòria i tendències de neu.....	86
2.3.3	Clústering i PCA	94
2.3.4	Tipus de temps i nevades	98
2.3.5	Índex de Severitat Hivernal per temporada a partir de la Base de Dades CLIMPY.....	107
2.3.6	Completar sèries temporals	109
2.3.7	Sectorització de regions nivoclimàtiques i càlcul de períodes de retorn	112
2.3.8	Sèrie climàtica de Ransol - FEDA 1641m	115
2.3.9	Resum dels resultats estadístics.....	127
2.4	DISCUSSIÓ	128
2.5	CONCLUSIONS	133
CAPÍTOL 3.		138
3. GENERACIÓ DE PATRONS ESPACIOTEMPORALS DE L'ACTIVITAT D'ALLAUS		138
3.1	INTRODUCCIÓ	138
3.2	METODOLOGIA	140
3.3	RESULTATS	141
3.4	DISCUSSIÓ	148
3.5	CONCLUSIONS	150
CAPÍTOL 4.		154
4. AVALUACIÓ I MITIGACIÓ DEL RISC D'ALLAUS: PROPOSTA DE NOVES ESTRATÈGIES, PROTOCOL, EINES I TECNOLOGIES PER A LA GESTIÓ DEL RISC D'ALLAUS		154
4.1	INTRODUCCIÓ	154
4.2	DAFO. VALORACIÓ DE L'ESTAT ACTUAL DEL CONEIXEMENT I LA GESTIÓ DEL RISC	160
4.3	METODOLOGIA	165
4.4	NOVES ESTRATÈGIES, PROTOCOLS, EINES I TECNOLOGIES	166
4.4.1	Experimentació amb UAS, teledetecció i modelització Snowpack	166
4.5	BASE DE DADES UNIFICADA	182

4.6	EXPLORACIÓ DEL POTENCIAL DE LES DADES DE TELÈFONS MÒBILS PER AL RASTREIG I ANALITZAR LA DINÀMICA D'ESQUIADORS.	186
4.6.1	<i>Introducció</i>	186
4.7	ENQUESTA SOBRE LA INFLUÈNCIA DEL CANVI CLIMÀTIC A LES ALLAUS DE NEU	192
4.7.1	<i>Introducció</i>	192
4.7.2	<i>Metodologia</i>	192
4.7.3	<i>Resultats</i>	194
4.8	PROPOSTA PER A LA GESTIÓ D'ALLAUS A ANDORRA	196
4.9	RECOMANACIONS	199
4.10	PUNTS CLAU DEL CAPÍTOL	201
CAPÍTOL 5.		204
5.	CONSIDERACIONS FINALS	204
5.1	RESUM I CONCLUSIONS	204
5.2	APLICACIONS PRÀCTIQUES	205
5.3	LIMITACIONS.....	206
5.4	FUTURES LÍNIES DE RECERCA.....	207
5.5	REFLEXIÓ FINAL	208
REFERÈNCIES		210

Llistat de figures

Figura 1.1: Coll Blanc : Primer telesquí al Pas de la Casa, durant la temporada 1956-57. Crèdits: Arxiu Francesc Viladomat.	3
Figura 1.2: Mapa topogràfic dels Pirineus, amb la representació de l'Oceà Atlàntic i el Mar Mediterrani. Crèdits: Eric Gaba.	32
Figura 1.3: Mapa d'elevació (m) d'Andorra. Crèdits: Elaboració pròpia.....	33
Figura 1.4: A excepció de les valls que conformen els rius Valira del Nord, Valira d'Orient i La Valira, la superfície majoritària del país es troba per sobre dels 1500m. Crèdits: Elaboració pròpia.....	34
Figura 1.5: Mapa de cobertes del Sòl d'Andorra (2012). Crèdits: AR+I.....	35
Figura 1.6: Localització de les estacions d'esquí i diferents sectors a Andorra: Crèdits: Ski Andorra.	38
Figura 1.7: La temperatura de l'aire a la superfície global (°C) augmenta per sobre de la mitjana del període de referència preindustrial de 1850 a 1900, segons diversos conjunts de dades de temperatura global que es mostren com a mitjanes de cinc anys des de 1850 (esquerra) i com a mitjanes anuals des de 1967 (dreta). Crèdits: C3S	40
Figura 1.8: Anomalies mensuals de la temperatura superficial global de l'aire [1] (°C) en relació amb el període 1991-2020 des de gener de 1940 fins a desembre de 2023, representades com a sèries temporals per a cada any. L'any 2023 es mostra amb una línia vermella gruixuda, mentre que els altres anys es mostren amb línies fines i ombrejades segons la dècada, des de blau (dècada de 1940) fins a vermell maó (dècada de 2020). Font de dades: ERA5. Crèdits: C3S...41	41
Figura 1.9: Nombre de víctimes mortals per allaus a Andorra, els Pirineus de França i Espanya segons la temporada d'hivern (2000-01 a 2019-20). Crèdits: Elaboració pròpia.....	49
Figura 1.10: L'allau va cobrir tota la zona del Solà d'Arinsal el febrer del 1996. Crèdits: SFG.....	50
Figura 1.11: Primera cartografia de riscos naturals d'Andorra, elaborada l'any 1992. Aquest mapa representa els riscos naturals identificats en el país, destacant les àrees més vulnerables. Crèdits: Becat.....	51
Figura 1.12: Cronologia històrica de les accions principals relacionades amb allaus els darrers anys a Andorra. Crèdits: Elaboració pròpia.	52
Figura 2.1: Estacions meteorològiques i anomalies de temperatura projectades per a l'any 2030 als Pirineus. Crèdits: Elaboració pròpia.	70
Figura 2.2: Mètode original per estimar les dades que faltaven./ Credits: Météo France	71
Figura 2.3: Mapa de les estacions meteorològiques a Andorra. Les estacions estan classificades en dues categories: aquelles que només operen a l'hivern (indicades amb un símbol de flocc de neu) i aquelles que operen durant tot l'any (indicades amb un símbol de sol). Crèdits: Govern d'Andorra.....	72
Figura 2.4: Mapa d'estacions meteorològiques d'Andorra segons altitud. Crèdits: Elaboració pròpia.	73
Figura 2.5: Representació simplificada dels tipus de temps o weather types més representatius. Crèdits: Elaboració pròpia.	80
Figura 2.6: Sèries temporals de l'espessor de neu (HS) per estació meteorològica. Crèdits: Elaboració pròpia.....	87
Figura 2.7: Variació de l'espessor de neu a les estacions meteorològiques analitzades durant les temporades de 1980-81 a 2015-16. Crèdits: Elaboració pròpia.....	92
Figura 2.8: Gràfic de dies de nevades per temporada, mostrant una lígera tendència general a l'alça al llarg del temps. La línia blava representa la tendència de les dades. Crèdits: Elaboració pròpia.....	94
Figura 2.9: Mètode del colze per determinar el nombre òptim de Clústers. Crèdits: Elaboració pròpia.	95
Figura 2.10: Scree Plot de l'Anàlisi de Components Principals. Crèdits: Elaboració pròpia.	96

Figura 2.11: Anàlisi de Components Principals (PCA) de les Estacions Meteorològiques analitzades. Crèdits: Elaboració pròpia.	97
Figura 2.12: Anàlisi de Components Principals (PCA) d'Individus. Crèdits: Elaboració pròpia.	98
Figura 2.13: Mapa de calor que mostra la matriu de correlació entre diferents tipus de temps, identificats amb les etiquetes S, SE, E, C, U, SW, W, NW, N, A i NE. Crèdits: Elaboració pròpia.	99
Figura 2.14: Mapa de calor que il·lustra la freqüència de diferents tipus de temps al llarg de diverses temporades, des de 1981-1982 fins a 2015-2016. Crèdits: Elaboració pròpia.	100
Figura 2.15: Mapa de calor que representa la correlació de dies amb nevades entre diferents ubicacions, etiquetades com a gra, pal, ari, pas, i arc. Crèdits: Elaboració pròpia.	101
Figura 2.16: Dendrograma de clúster que il·lustra l'agrupació jeràrquica de diferents grups o anys. Crèdits: Elaboració pròpia.	101
Figura 2.17: Nombre de dies amb una alçada de neu (HN) major o igual a 50, 30, 20 i 10 i 1cm, classificats per tipus de temps i estació. Crèdits: Elaboració pròpia.	103
Figura 2.18: Alçada màxima de neu recent (HN) per tipus de temps i estació. Crèdits: Elaboració pròpia.	104
Figura 2.19: Desviació estàndard de l'alçada de neu recent (HN) per tipus de temps i estació.	104
Figura 2.20: Alçada mitjana de neu recent (HN) per tipus de temps i estació.	104
Figura 2.21: Alçada mitjana de neu (HN) per tipus de temps (24 hores abans) i estació. Crèdits: Elaboració pròpia. ..	105
Figura 2.22: Desviació estàndard de l'alçada de neu recent (HN) per tipus de temps (24 hores abans) i estació.	105
Figura 2.23: Alçada màxima de neu recent (HN) per tipus de temps (24 hores abans) i estació.	105
Figura 2.24: Nombre de dies amb una alçada de neu (HN) major o igual a 50,30,20 i 10 i 1cm, classificats per tipus de temps (24 hores abans) i estació. Crèdits: Elaboració pròpia.	107
Figura 2.25: Índex de Severitat Hivernal (ISI) per temporada. Crèdits: Elaboració pròpia.	108
Figura 2.26: Residuals vs Fitted : Aquest gràfic mostra els residus enfront dels valors ajustats. Crèdits: Elaboració pròpia.	109
Figura 2.27: Gràfics que comparen diferents mètodes d'imputació de dades aplicades a una sèrie temporal de gruix de neu, amb la variable H_S (alçada de neu en centímetres) a l'eix vertical i la data a l'eix horitzontal. Crèdits: Elaboració pròpia.	110
Figura 2.28: Sèrie climàtica de l'Índex de Severitat Hivernal (WSI) per a les temporades de 1980-1981 a 2019-2020. Crèdits: Elaboració pròpia.	111
Figura 2.29: La figura presenta els resultats de diverses anàlisis estadístiques i diagnòstics realitzats per emplenar els buits a la sèrie de dades de l'Índex de Severitat Hivernal (ISI). Crèdits: Elaboració pròpia.	112
Figura 2.30: Sectorització de les principals regions nivoclimàtiques d'Andorra. Crèdits: Elaboració pròpia.	113
Figura 2.31: Un dels objectius de la tesi era validar o proposar una zonificació climàtica d'hivern. En l'actualitat el país es divideix en tres franges o regions climàtiques de manera arbitrària Crèdits: Servei Meteorològic Nacional.	114
Figura 2.32: Gràfics d'anomalies de temperatura per temporada hivernal. Període de referència 1981-2010 i 1991-2020). Crèdit: Elaboració pròpia.	120
Figura 2.33: Anomalies de precipitació per temporada hivernal (PR:1991-2020) Ransol-FEDA 1641m. Crèdit: Elaboració pròpia.	122
Figura 2.34: Heatmap de la temperatura mitjana per temporada d'hivern i mes. Ransol-FEDA 1641m. Crèdit: Elaboració pròpia.	123

Figura 2.35: Heatmap de la precipitació mitjana per temporada d'hivern i mes. Ransol-FEDA 1641m. Crèdit: Elaboració pròpia.	123
Figura 2.36: Temperatura mitjana a l'hivern cada 10 anys. Crèdits: Elaboració pròpia.....	125
Figura 2.37: Gràfics de caixes amb temperatura mitjana per període. Crèdits: Elaboració pròpia.....	126
Figura 2.38: Gràfics de residus i diagnòstic. Crèdits: Elaboració pròpia.....	127
Figura 3.1: Imatges d'observacions nivometeorològiques i desencadenament artificial d'allaus durant l'operació de PIDA (Pla d'Intervenció i Desencadenament d'Allaus). Crèdits: Grandvalira Resorts Andorra.	138
Figura 3.2: Gràfic de barres apilades que mostra la quantitat de dies d'activitat d'allaus per temporada i mes. Crèdits: Elaboració pròpia.	142
Figura 3.3: Tendència dels dies d'activitat d'allaus per temporada. Crèdits: Elaboració pròpia.	142
Figura 3.4: Freqüència de tipus de temps (WT) observats els dies d'activitat d'allaus. Crèdits: Elaboració pròpia.	143
Figura 3.5: Freqüència de tipus de temps (WT) observats 24 hores abans dels dies d'activitat d'allaus. Crèdits: Elaboració pròpia.	144
Figura 3.6: Mapa de calor que mostra la freqüència de tipus de temps (WT) per mes durant els dies d'activitat d'allaus. Crèdits: Elaboració pròpia.	144
Figura 3.7: Matriu de correlació dels tipus de temps (WT) actuals i dels dos dies anteriors. Crèdits: Elaboració pròpia.	145
Figura 3.8: Aquesta figura mostra un model d'arbre de decisió utilitzat per predir el nombre de dies d'activitat d'allaus en funció de l'any de temporada. Es tracta d'un esquema visual que divideix les dades en funció de condicions establertes per al factor analitzat, en aquest cas, el llindar temporal. Crèdits: Elaboració pròpia.....	146
Figura 3.9: Mapa de densitat dels accidents totals d'allaus registrats a Andorra, segons les dades de la Base de Dades d'Allaus Accidentals d'Andorra. Crèdits: AR+I	148
Figura 4.1: Mapa de Perill d'allaus a la Vall d'Incles. Crèdits: Elaboració pròpia.....	163
Figura 4.2: Imatges d'algunes de les aplicacions testejades i estudis experimentals realitzats durant els darrers mesos utilitzant UAV: (A) ortofotografia; (B) càlcul de gruixos de neu o canvi d'alçada; (C) modelatge 3D en allaus reals que s'han produït el desembre de 2019 (cornises/mesures de defensa); (D) obtenció d'informació i observació de mesures de defensa (D) i (E) càlcul de superfícies i estimació de volums, el cas d'estudi de l'església de Sant Vicenç d'Enclar. Crèdits: Elaboració pròpia.	168
Figura 4.3: Disseny conceptual de les diferents fases del Model d'informació de Riscos Naturals (NHIM); basat en BIM, metodologia de treball col·laborativa per a la creació i la gestió d'un projecte de construcció. El seu objectiu és centralitzar tota la informació del projecte en un model d'informació digital creat per tots els seus agents. Crèdits: Adaptat de la Càmera Argentina de la Construcció.	172
Figura 4.4: Imatge òptica obtinguda pel satèl·lit Sentinel-2 (10 m/píxel). Crèdits: EO Browser – Copernicus	175
Figura 4.5: Imatges captades a 120, 50 i 20 metres realitzades amb un dron /UAS DJI Mavic Air de 430g de pes, amb un sensor 1/2,3" CMOS de 12 MP efectius i un angle focal equivalent a 24mm. Crèdits: Elaboració pròpia.....	175
Figura 4.6: Comparativa de resolució d'imatges en una mateixa àrea: Ortofoto a color del Govern d'Andorra 2019 (10cm/px); vol dron a 120m d'alçada (6cm/ px); 50m d'alçada (2cm/ px) i 20m d'alçada (1cm/ px). Crèdits: Elaboració pròpia.	175
Figura 4.7: Alguns exemples dels productes generats a partir de vols amb dron i processat d'imatges. /UAS: A) Ortomosaics per a l'elaboració de Mapes Ràpids; B) model de núvols de punts; C) Model Digital de Superfície ;D) Model 3D; E) mesuraments i F) perfils topogràfics. Crèdits: Elaboració pròpia.	176

Figura 4.8: Diagrama d'agents multidisciplinaris que poden aportar informació al Model d'Informació sobre Riscos Naturals plantejat, millorant la comunicació i la col·laboració entre diferents agents. Crèdits: Elaboració pròpia.....	178
Figura 4.9: Les imatges A) i B) corresponen a la identificació de l'allau de lliscament basal del Pla de l'Estany amb imatges de Satèl·lit Sentinel 2, de l'abril al Parc Natural del Comapedrosa. La imatge C) correspon a una foto Satèl·lit de l'1 de gener de 2020 per observar la zona innivada a escala d'Andorra. Imatges D) i E) corresponen a l'observació de dues allaus de mida 3 mitjançant imatge satèl·lit i una resolució de 30m / píxel i fotografia aèria obtinguda amb UAV a 100m d'alçada i una resolució de 3 m / píxel a la Coma de Ransol (Andorra). Crèdits: Elaboració pròpia.	180
Figura 4.10: Modelització del mantell nival a Sorteny en orientació N i S. Crèdits: Snowpack.	182
Figura 4.11: Freqüència diària de persones a la vall de Sorteny estimada amb dades de CDR i el perill d'allaus durant el període d'estudi. La línia vermella representa el perill d'allaus.. Crèdits: AR+I	189
Figura 4.12: Quota diària de persones en cada tipus de terreny i perill d'allau. La línia vermella representa el perill d'allaus. Crèdits: AR+I	190
Figura 4.13: Representació tridimensional del model ATES (Avalanche Terrain Exposure Scale) extruït segons el percentatge de persones que es troben en cada tipus de terreny durant l'episodi A. Crèdits: AR+I	190
Figura 4.14: Representació tridimensional del model ATES extruït segons el percentatge de persones en cada tipus de terreny durant l'episodi B. Crèdits: AR+I	191
Figura 4.15: Localització dels participants a l'enquesta. Crèdits: Elaboració pròpia.....	193
Figura 4.16: Experiència i ocupació dels enquestats. Crèdits: Elaboració pròpia.	194

Llistat de taules

Taula 1.1: Indicadors econòmics del Principat d'Andorra. Crèdits: Govern d'Andorra.	37
Taula 1.2: Tendències de temperatura a Andorra. Crèdit: Andorra RI.	43
Taula 1.3: Tendències de Precipitació a Andorra. Crèdit: Andorra RI.	44
Taula 1.4: Accions a desenvolupar per la Assistència Tècnica. Crèdits: Govern d'Andorra.	46
Taula 1.5: Funcions i responsabilitats de cada servei operatiu a Andorra en relació amb la	47
Taula 1.6: Zones de seguiment i control per risc d'allaus a Andorra. Crèdits: Govern d'Andorra.....	54
Taula 1.7: Llistat de treballs a l'assistència tècnica per a la gestió del risc d'allaus. Crèdits: Govern d'Andorra.....	55
Taula 1.8: Diferents treballs que acostumen a realitzar-se a les tasques de mitigació del risc d'allaus. En blau s'indiquen els nombrosos treballs fets al Principat d'Andorra, que abasten gairebé la totalitat de les feines necessàries. Crèdits: Elaboració pròpia.	57
Taula 1.9: Taller de nivologia: Crèdits: Protecció Civil d'Andorra.	59
Taula 1.10: Síntesi de les hipòtesis i respostes del treball de recerca.	65
Taula 2.1: Llistats per assignar puntuacions, l'Índex de Severitat d'Hivern. Crèdits: Elaboració pròpia.	77
Taula 2.2: Estadístiques descriptives d'espessor de neu (cm). Crèdits: Elaboració pròpia.....	86
Taula 2.3: Mitjanes mensuals de de l'espessor de neu (cm). Crèdits: Elaboració pròpia.....	87
Taula 2.4: Tendència de l'espessor de neu (cm) per estació durant les temporades hivernals. Crèdits: Elaboració pròpia.	88
Taula 2.5: Matriu de correlació de l'espessor de neu entre estacions meteorològiques. Crèdits: Elaboració pròpia.	89
Taula 2.6: Resultats de la regressió lineal per a cinc estacions meteorològiques (arc , pas , ari , pal, gra). Crèdits: Elaboració pròpia.	93
Taula 2.7: Períodes de retorn de grans nevades (gruix de neu en cm). Crèdits: Elaboració pròpia.	114
Taula 2.8: Taula amb estadístiques descriptives (mitjana, mitjana, màxims, mínims, desviació estàndard i quartils). Crèdits: Elaboració pròpia.....	124
Taula 4.1: Comparativa entre l'ús de drons i satèl·lits per a la catalogació de fenòmens de riscos naturals. Crèdits: Elaboració pròpia.	169
Taula 4.2: Comparativa de GSD en diferents drons/UAS. Es tracta de la mida del món real capturat per un píxel en una imatge digital, basat en l'altitud de vol i els paràmetres de la càmera, que discutim tot seguit. Quan entén GSD com una relació de cm per píxel, és fàcil calcular la mida del terra i les característiques capturades en una imatge de dron La columna DRON-UAV-UAS-RPAS indica els diferents models de dron analitzats. Crèdits: Elaboració pròpia.....	173
Taula 4.3: Mostra de la base de dades utilitzada en l' anàlisi. Crèdits: Elaboració pròpia.	188
Taula 4.4: Proposta de Tàctiques Operatives per a les Allaus a Andorra. Crèdits: Elaboració pròpia.	198

Llistat de acrònims

Acrònim	Significat
AML	Advanced Mobile Location
AMTC	Ajuts per al Pagament de Matrícula d'Estudis de Tercer Cicle
ANOVA	Anàlisi de Variància
AR+I	Andorra Recerca + Innovació
ARVA	Aparat de Recerca de Víctimes d'Allaus
ATES	Avalanche Terrain Exposure Scale (Escala d'Exposició de Terreny d'Allaus)
AWSSI	Accumulated Winter Season Severity Index (Índex Acumulat de Severitat de la Temporada d'Hivern)
BDAA	Base de Dades d'Allaus d'Andorra
BDRG	Base de Dades de Risc Geològic
BIM	Building Information Modeling
BPA	Butlletí de Perill d'Allaus
C3S	Copernicus Climate Change Service
CAA	Canadian Avalanche Association
CCLM5:	Climate Community Land Model version 5.
CENMA	Centre d'Estudis de la Neu i de la Muntanya d'Andorra
CG	Carretera General
CLIMPY	Projecte de Caracterització de l'Evolució del Clima als Pirineus
CLPA	Cartes de Localització Probable d'Allaus
COEX	Conservació i Explotació de Carreteres del Govern d'Andorra
DEM	Digital Elevation Model

DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model
DVA	Detector de Víctimes d'Allaus
EAWS	Serveis Europeus d'Alerta d'Allaus
EDNA	Espai de Neu i Allaus
EIRG	Estudi d'Identificació de Riscos Geològics
EMA	Estació Meteorològica Automàtica
EZTPS	Estudi de Zonificació del Terreny Segons Perillositat Geològica
FEDA	Forces Elèctriques d'Andorra
FMI	Fons Monetari Internacional
GCP	Ground Control Points (Punts de Control de Terra)
GIS	Geographic Information Systems
GIS	Geographic Information System (Sistema d'informació geogràfica)
IEA	Institut d'Estudis Andorrans
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Panell Intergovernamental sobre Canvi Climàtic)
LEAP	Long-Range Energy Alternatives Planning (nombre de una herramienta de planificación energética a largo plazo)
MoU	Memoràndum d'Enteniment
MPRG	Mapa per a la Prevenció dels Riscos Geològics
NHIM	Natural Hazards Information Modeling
NIVOMET	Sistema de Observació Nivometeorològica
NVE	Direcció Noruega de Recursos Hídrics i Energia
OBSA	Observatori de la Sostenibilitat d'Andorra

OMA	Observatori de Muntanya d'Andorra
OMM	Organització Meteorològica Mundial
ONF-RTM	Office National des Forêts - Service de la Restauration des Terrains de Montagne
OPCC	Observatori Pirinenc del Canvi Climàtic
PCA	Principal Component Analysis
PIB	Producte Interior Brut
PIDA	Pla d'Intervenció i Desencadenament d'Allaus
PNUD	Programa de les Nacions Unides per al Desenvolupament
POUP	Plans d'Ordenació i Urbanisme Parroquial
R	Llenguatge de Programació per a Anàlisi Estadístiques
RCP8.5	(Representative Concentration Pathway 8.5)
RTK	Real-Time Kinematic
SAPYRA	Sistema de Protecció Antiallaus i Restauració Ambiental
SAR	Search and Rescue
SIG	Sistemes d'Informació Geogràfica
SNOWPACK	Model de simulació del desenvolupament del mantell de neu
SPEIS	Servei de Prevenció, Extinció d'Incendis i Salvaments
SWE	Snow Water Equivalent
UdA	Universitat d'Andorra
UAS	Unmanned Aerial Systems (Sistemes Aeris No Tripulats)
VAB	Valor Afegit Brut
WSI	Winter Severity Index
WT	Weather Type

regObs

Sistema de registre en temps real de dades sobre perills naturals

Capítol 1.

1. Introducció

En aquest primer capítol es duu a terme una revisió exhaustiva dels principals estudis sobre el medi físic a Andorra, amb especial èmfasi en la identificació del buit existent en les investigacions sobre la neu i les allaus en el territori. Aquest buit posa en relleu la necessitat i la rellevància d'aportar nou coneixement en aquesta temàtica, subratllant l'interès científic i social que comporta. A continuació, es presenta un marc teòric ampli i detallat que ofereix una base sòlida per als temes d'investigació abordats. Finalment, es dedica un apartat a exposar les motivacions personals i acadèmiques que impulsen aquesta recerca, així com els objectius específics que es pretenen assolir.

La neu i les allaus són part de la història del Principat d'Andorra i han condicionat la seva economia i l'estil de vida dels seus habitants des dels seus orígens (Figura 1.1). Aquest microestat enclavat als Pirineus axials entre França i Espanya, ha viscut un auge de les activitats de muntanya i el turisme d'hivern durant les últimes dècades, sent diversos els factors que han amplificat els beneficis i desafiaments associats a les nevades en aquesta regió. L'impacte econòmic derivat per la importància de l'economia andorrana de turisme d'hivern dinamitzat principalment per les estacions d'esquí, ha experimentat una expansió considerable, a la qual encara no se'l veu el sostre. Milers de turistes internacionals visiten el país durant tot l'any, molts atrets pel turisme hivernal en els mesos més freds. Això ha portat a una diversificació de l'oferta turística, incloent esports com l'esquí de muntanya/*splitboard*, el surf de neu, les caminades amb raquetes de neu i les excursions amb motos de neu, i les pistes i serveis dels dominis esquiables han anat augmentant tant en quilòmetres com en instal·lacions. Alhora, les competicions esportives, festivals d'hivern i esdeveniments culturals relacionats amb la neu s'han multiplicat i s'han convertit en elements essencials del calendari anual. Aquestes celebracions no només reforcen la identitat cultural d'Andorra, sinó que també atrauen més turistes, consolidant la reputació del país com a destinació d'hivern de primer nivell.



Figura 1.1: Coll Blanc : Primer telesquí al Pas de la Casa, durant la temporada 1956-57.
Crèdits: Arxiu Francesc Viladomat.

La demanda creixent d'infraestructures capaces de suportar el turisme d'hivern ha portat Andorra a fer inversions significatives en la millora de les instal·lacions i en l'expansió de la capacitat d'allotjament. La demanda creixent d'aigua per al consum humà i la neu artificial està plantejant desafiaments significatius.

Aquest augment del turisme d'hivern i les activitats de muntanya també plantegen preocupacions en el context del canvi climàtic. Hiverns amb menys neu i temporades més curtes d'esquí podrien afectar negativament l'economia del país. Per això, Andorra s'enfoca els darrers anys a desenvolupar estratègies sostenibles que permetin adaptar les activitats turístiques i protegir l'entorn natural.

A més, les poblacions i els serveis han anat augmentant, i cada cop s'han ocupat llocs de més perillositat, allunyant-se de les valls i ocupant els vessants de muntanya i ascendint en alçada. Això comporta la necessitat d'implantar noves mesures de protecció i fer-ne un seguiment continu per gestionar la seguretat del territori. Cal subratllar que un coneixement profund del fenomen de les allaus és essencial per millorar la gestió d'aquest risc al territori.

1.1 Presentació i marc del treball

Andorra, per la seva ubicació als Pirineus i la seva complexa orografia, ha estat objecte d'un gran nombre d'estudis científics centrats en els riscos naturals, els recursos naturals i l'impacte del canvi climàtic. Aquest petit país muntanyós es troba particularment exposat a fenòmens com esllavissades, nevades extremes, allaus, riscos sísmics i altres processos que poden tenir conseqüències significatives per al seu desenvolupament sostenible. En aquest context, s'han desenvolupat diverses investigacions que aborden aspectes clau del medi físic i la gestió de recursos del país, però amb un enfocament fragmentat segons els fenòmens específics.

Amb anterioritat, s'han elaborat investigacions monogràfiques sobre altres temàtiques d'interès per al país, però fins ara no s'havia abordat el tema de les allaus en una investigació d'aquesta magnitud. A continuació, es presenten algunes de les principals tesis doctorals sobre el medi físic publicades a Andorra, que ofereixen un marc de referència per a aquesta recerca.

A la tesi *Avaluació de la perillositat de caigudes de blocs a Andorra la Vella* (Copons, 2004), s'estudien els desprendiments, factors condicionants, perillositat i mesures de mitigació, proposant mètodes per gestionar el risc a zones urbanes. Amb un desnivell de 1000 metres, l'àrea d'estudi genera mapes de zonificació i mesures de protecció, permetent identificar zones afectades per desprendiments i determinar-ne la probabilitat.

La tesi *Avaluació del risc sísmic al Principat d'Andorra* (González, 2010) combina estudis de perillositat i vulnerabilitat per simular escenaris sísmics, destacant un risc moderat-alt per les característiques del territori. S'analitza la vulnerabilitat sísmica d'edificis d'habitatge utilitzant metodologies basades en classes i índexs, amb resultats aplicables a la gestió de riscos i emergències.

En la tesi *Classificació de tipus de circulació atmosfèrica* (Esteban, 2012), es caracteritzen nevades intenses a Andorra mitjançant set patrons de circulació, proporcionant eines útils per a la predicció meteorològica. Alhora, la tesi *Cartografia de les congestes i ecologia de les comunitats vegetals* (Domènech, 2012) aborda l'impacte del canvi climàtic en la neu i la vegetació a Andorra, destacant la relació entre variables climàtiques i la biodiversitat en congesteres.

El canvi climàtic també s'estudia a *Climate change impacts on winter tourism in the Pyrenees and adaptation strategies* (Pons, 2014), analitzant la vulnerabilitat del turisme d'esquí a Andorra i proposant estratègies d'adaptació. Paral·lelament, la tesi *Modelització de precipitacions intenses a zones d'orografia complexa* (Trapero, 2014) examina episodis de precipitació intensa als Pirineus orientals, identificant factors dinàmics i microfísics que en determinen la intensitat.

Altres investigacions inclouen l'estudi geològic *Estudi estructural i estratigràfic del sud d'Andorra* (Margalef, 2015), centrant-se en l'estructura i estratigrafia regional, i la prospectiva energètica a *Prospectiva energètica al Principat d'Andorra* (Travesset, 2017), que planteja escenaris sostenibles per al futur energètic del país.

En temes d'aigua, la tesi *Sostenibilitat de l'aigua a Andorra* (Pesado, 2021) analitza l'impacte del canvi climàtic en els recursos hídrics, mentre que *Anàlisi de susceptibilitat torrencial* (Riba, 2022) desenvolupa metodologies per cartografiar riscos torrencials. Finalment, es destaquen la relació entre toponímia i riscos geològics a *Els noms de lloc i els fenòmens geològics perillosos* (Planas, 2023) i la modelització energètica a *Modelització energètica d'edificis a escala urbana a Andorra* (Borges, 2023).

Aquestes recerques aborden aspectes clau del desenvolupament i la gestió de recursos a Andorra, però cap ha aprofundit en l'anàlisi de la neu i el risc d'allaus, que constitueix l'objecte principal d'aquesta tesi.

A continuació, al llarg d'aquesta tesi doctoral, es desenvolupen diferents línies de recerca amb una contribució científica específica a Andorra, basada en antecedents a altres zones dels Pirineus i del món. A través d'aquest treball es genera coneixement nou. D'una banda, s'analitzen les tendències de neu partint de dades reals i no modelitzades, recollides durant la temporada hivernal pels pisters-socorristes de les estacions d'esquí, durant més de trenta anys, període mínim per a l'estudi de variables meteorològiques segons l'Organització Meteorològica Mundial (OMM). Alhora, s'han identificat patrons espaciotemporals de l'activitat d'allaus mitjançant una anàlisi que té en consideració l'obtenció de dades recollida durant anys als diferents esdeveniments d'allaus registrades. Finalment, s'analitzen els protocols i els fluxos d'informació relacionats amb la gestió del risc d'allaus i el potencial de diverses eines i tecnologies complementàries.

Per dur a terme aquesta investigació, s'ha treballat dins dels procediments de gestió del risc d'allaus i es proposen algunes millores per optimitzar el servei. Les millores proposades inclouen la implementació de noves tecnologies de monitoratge, la revisió i actualització dels procediments actuals, i la capacitat contínua del personal involucrat en la gestió de riscos. La recerca específica sobre l'obtenció de patrons espaciotemporals i la relació amb la neu i les allaus a Andorra, representa una contribució original, innovadora i aplicable a altres àrees del món. L'anàlisi del perill usant directrius i tecnologies avançades, juntament amb la creació d'una base de dades geolocalitzades amb dades històriques i l'adaptació de noves tecnologies a Andorra, són punts clau que aporten nova comprensió. A més, això implica una transferència de coneixement i tecnologia directa i immediata a la societat andorrana.

Aquesta investigació es pot definir com una tesi aplicada i quasi industrial que aporta coneixement pràctic a l'operativa diària i analitza una gran quantitat de dades d'alt valor científic. S'hi aborden problemes o necessitats reals a la indústria, proporcionant solucions pràctiques i aplicables amb impacte directe en la millora de processos, productes o serveis. Des del primer moment també s'estableix col·laboració amb empreses o entitats del sector rellevant per obtenir dades, recursos i assegurar que la recerca estigui alineada amb les necessitats actuals. La presa de contacte, l'obtenció de dades, seguir una metodologia científica rigorosa, amb un disseny experimental adequat, recollida i anàlisi de dades precises, i validació de resultats són alguns dels punts forts d'aquest treball. Finalment, oferir solucions innovadores que no només resolguin problemes actuals, sinó que també aportin noves perspectives o enfocaments que puguin ser adoptats per la indústria i assegurar que els resultats de la investigació siguin fàcilment transferibles, mitjançant la creació de manuals, guies, protocols o la implementació de noves tecnologies o procediments han estat alguns dels punts clau d'aquest treball.

Els resultats d'aquesta investigació són útils per millorar l'eficiència de les actuacions, els protocols i la gestió general del risc d'allaus. Per exemple, poden tenir aplicabilitat en el disseny i la gestió dels plans d'intervenció d'activació d'allaus (PIDA) en la gestió del risc d'allaus de les estacions d'esquí i als protocols de vialitat hivernal i la recollida de dades per millorar les previsions diàries del perill d'allaus.

1.2 Marc teòric

A continuació, es presenta el marc teòric d'aquesta tesi doctoral en la qual s'ha dut a terme una anàlisi sistemàtica i exhaustiva per revisar la literatura i les investigacions dels temes tractats als 3 principals capítols de la investigació: Caracterització espacial temporal del mantell de neu i les nevades; Generació de patrons espaciotemporals de l'activitat d'allaus a Andorra; Avaluació i mitigació del risc d'allaus: Proposta de noves estratègies, protocols, eines i tecnologies per a la gestió del risc d'allaus. A aquests se'ls suma un apartat dedicat al marc teòric del canvi climàtic: neu i allaus, en què s'aprofundeix sobre les conseqüències que s'estan percebent els darrers anys.

S'hi inclouen els estudis previs més rellevants que estan relacionats amb aquest treball de recerca i els passos realitzats per dur a terme aquest apartat són:

- Termes de cerca: S'identifiquen termes i frases clau relacionats amb el tema d'estudi, com ara neu, allaus, tipus de temps, canvi climàtic, *open data*, *citizen science*, etc.
- Revisió de la literatura: Es realitza una cerca exhaustiva en bases de dades acadèmiques com Web of Science, Scopus i Google Scholar utilitzant els termes clau. La cerca inclou estudis, publicacions, informes i revistes. S'ajusten els criteris de recerca a estudis publicats en els darrers vint anys (excepte algunes excepcions pel seu interès), amb un èmfasi especial en la darrera dècada. A més, s'avalua la rellevància de cada contribució segons l'impacte i les cites, i es considera la regió geogràfica de l'estudi per tenir-ne un context de la seva aplicabilitat.
- Criteris d'inclusió i exclusió: Es filtren els resultats de cerca segons criteris predefinitos. Només s'hi inclouen articles en anglès i revisats per parells. S'eliminen estudis duplicats, semblants o no rellevants.
- Recull de dades: S'extreuen dades i informació dels articles seleccionats, incloent-hi autors, any de publicació, objectius de l'estudi, metodologia, troballes clau i recomanacions.
- Anàlisi i síntesi: S'analitzen i sintetitzen les dades recopilades per identificar patrons comuns, tendències i troballes clau dels estudis revisats.

1.2.1 Caracterització espaciotemporal del mantell de neu i les nevades

Sobre aquest tema, són nombrosos els estudis realitzats a diferents regions del món, als Alps i als Pirineus. Entre els treballs més rellevants sobre això trobem alguns dels següents classificats per àrees geogràfiques:

1.2.1.1 Regions del món

Diversos estudis han destacat una preocupant disminució de la capa de neu i del mantell de neu a les regions muntanyenques en l'àmbit mundial. Els gràfics de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), una agència científica del govern dels Estats Units que s'encarrega d'estudiar i supervisar les condicions dels oceans, l'atmosfera i el clima, indicaven una reducció de la capa de neu hemisfèrica durant els darrers cinc anys ja pels anys noranta, en particular a la primavera (Robinson et al., 1993). Aquesta tendència es veu recolzada a més a més per investigacions que mostren tendències generalment negatives en l'extensió de la capa de neu i l'equivalent en aigua de neu a Amèrica del Nord i Euràsia (Kunkel et al., 2016). A més, els estudis han demostrat una disminució significativa de la persistència de la neu a les muntanyes a tot el món durant les últimes dècades, amb una disminució mitjana global del 7,67 % (Ha et al., 2023).

L'impacte del canvi climàtic en les tendències de la neu és evident en les troballes que la capa de neu als sistemes muntanyencs està disminuint a nivell mundial, amb expectatives que la pèrdua de neu continuï en el futur (Carroll et al., 2020). Això coincideix amb les projeccions que suggereixen una disminució més gran de la capa de neu a l'hemisferi nord per a finals de segle, i també s'esperen canvis als Alps europeus (Klein et al., 2016). El canvi climàtic ha provocat canvis en els patrons de desglaç de la neu, amb menys precipitacions hivernals en forma de neu i un desglaç més aviat a la primavera, fet que contribueix a la disminució general de la capa de neu a moltes regions (Saavedra et al., 2018). Les investigacions també han destacat les implicacions de la disminució de la capa de neu a diversos ecosistemes. Aquestes investigacions han demostrat que, a mesura que la capa de neu continua disminuint a les àrees muntanyoses de tot el món, hi ha impactes significatius a les comunitats d'aus i plantes a causa de les interaccions alterades entre animals i plantes (Martin i Maron, 2012). A més, la disminució dels recursos de neu ha generat inquietuds sobre la disponibilitat

d'aigua i la vida sustentada per la neu, cosa que emfatitza la importància de comprendre i abordar les tendències negatives a la capa de neu (Sturm et al., 2017) .

Si bé les tendències a la capa de neu són generalment negatives, hi ha complexitats en les dades i les anàlisis. Tot i els esforços per seguir les tendències de les nevades, no hi ha un ampli acord entre els diferents estudis sobre la naturalesa exacta i l'abast dels canvis a la capa de neu terrestre a nivell mundial (Fischer et al., 2011). La variabilitat de les tendències històriques quant a nevades i profunditat de la neu s'atribueix a influències contraposades de les tendències a les precipitacions, cosa que complica l'avaluació general de les tendències de la neu (Knowles, 2015). A més, la manca de tendències estandarditzades a la capa de neu continental o hemisfèrica indica l'ambigüitat actual en la comprensió de la relació entre la capa de neu i les condicions atmosfèriques (Derksen i LeDrew, 2000).

Per exemple, alguns estudis realitzats als Estats Units han mostrat tendències cap a una aparició més tardana de la capa de neu a la meitat occidental i una aparició més primerenca a la meitat oriental, fet que porta a temporades de neu més curtes a l'est i temporades més llargues a les Grans Planes i al sud de les Muntanyes Rocoses (Knowles, 2015). De manera similar, a la regió de l'Himàlaia de l' Hindu Kush, s'ha produït una disminució significativa de la capa de neu entre rangs d'altitud específics, cosa que indica una reducció substancial a l'extensió de la neu (Desinayak et al., 2021). Aquestes troballes ressalten la variabilitat en les tendències de la neu i la necessitat d'una anàlisi específica de la regió per capturar els matisos dels patrons canviants de la neu.

Altres investigacions a l'oest dels Estats Units han emfatitzat l'impacte de l'escalfament de les temperatures a la destinació de la capa de neu, amb tendències generalitzades d'escalfament que afecten l'acumulació de neu i els processos de fosa (Hu i Nolin, 2020). Això posa en relleu la intrincada relació entre els canvis de temperatura i la dinàmica de la neu, cosa que indica la vulnerabilitat dels mantells de neu a les variacions climàtiques.

Els estudis sobre les cadenes muntanyenques mundials han posat en relleu taxes d'escalfament heterogènies i una disminució de la persistència de la neu, cosa que indica respostes variades al canvi climàtic en diferents sistemes muntanyosos (Ha et al., 2023). Aquesta variabilitat subratlla la necessitat de fer avaluacions localitzades per captar les tendències úniques en l'acumulació de neu i els comportaments de fosa. A

Austràlia, s'han observat tendències contrastants, amb una disminució del nombre total de dies de neu lleugera però un nombre constant de nevades intenses (Fiddes et al., 2014). Aquestes troballes suggereixen la importància de considerar no només les tendències generals de la neu, sinó també les variacions en la intensitat i la freqüència de les nevades.

A l'Antàrtida, la investigació ha mostrat tendències contrastants en l'acumulació de neu, amb informes de patrons de nevades tant creixents com decreixents a diferents regions (Thomas et al., 2015). Els estudis a la capa de gel de l'Antàrtida occidental han revelat variacions significatives en l'acumulació de neu des del 1900, i les diferents regions mostren tendències diferents als patrons de nevades (Wang et al., 2017). Aquesta variabilitat subratlla la complexitat de les tendències de la neu antàrtica i la influència dels factors climàtics regionals a l'acumulació de neu. De manera similar, els estudis als Camps de Gel Patagònics han identificat tendències positives en l'acumulació de neu a glaceres que experimenten canvis d'elevació, cosa que indica una relació entre la dinàmica de les glaceres i els patrons de neu (Bravo et al., 2019). Aquestes troballes emfatitzen la naturalesa interconnectada de les tendències de la neu amb processos ambientals més amplis a les regions glacialitzades .

1.2.1.2 Alps

Les tendències a la coberta de neu als Alps han estat un tema de gran interès en la investigació al llarg dels anys. Els estudis han aprofundit en diversos aspectes de la dinàmica de la neu, inclosa la profunditat de la neu, el desglaç i els canvis a la capa de neu, per comprendre l'impacte del canvi climàtic en aquests elements crítics de l'entorn alpí. La investigació de Vorkauf et al. (2021) es va centrar a avaluar les tendències a l'inici i el desglaç de la neu als Alps suïssos entre 1958 i 2019, destacant la importància de la temperatura i la capa de neu a l'hora d'influir en aquestes tendències. De manera similar, Fugazza et al. (2021) van observar canvis en la durada de la coberta de neu, l'inici i les dates de desglaç als Alps, cosa que indica una disminució de la durada de la coberta de neu a l'hivern i primavera des de la dècada de 1950 a diversos llocs de la regió.

Schöner et al. (2018) van destacar els patrons espaciotemporals de la profunditat de la neu als Alps suïssos i austríacs entre 1961 i 2012, i van assenyalar les limitacions per detectar tendències de neu sòlides a causa dels límits de les dades nacionals. Això subratlla la complexitat d'analitzar les tendències de la neu als Alps, ateses les diverses

condicions geogràfiques i climàtiques presents a la regió. A més, els estudis de Beniston (2012) i Klein et al. (2016) van destacar les tendències decreixents en la profunditat de la neu i la durada de la capa de neu als Alps suïssos, cosa que indica un impacte significatiu del canvi climàtic en la dinàmica de la neu a la regió.

Rumpf et al. (2022) van explorar la transició de la capa de neu a una major productivitat de la vegetació als Alps europeus, mostrant les conseqüències ecològiques dels patrons canviants de la neu. Aquest canvi de paisatges blancs a verds significa una transformació més àmplia en els ecosistemes alpins impulsada per alteracions en la durada i l'extensió de la capa de neu. A més, la investigació de Berard-Chenu et al. (2022) i Berard-Chenu et al. (2021) van examinar els canvis en la fiabilitat de la neu natural a les estacions d'esquí dels Alps francesos, cosa que reflecteix les implicacions pràctiques de les condicions canviants de la neu en les activitats recreatives i el desenvolupament d'infraestructures a les regions muntanyenques.

L'estudi de Matiu et al. (2021) va proporcionar una anàlisi de les tendències de la profunditat de la neu a tota la regió alpina a sis països alpins, la qual cosa va revelar una descripció general completa de la dinàmica de la neu a la regió. Aquesta investigació va consolidar les dades de nombroses estacions per avaluar les tendències en la profunditat de la neu, fet que va contribuir a una millor comprensió de la criosfera muntanyosa als Alps europeus. A més, Koehler et al. (2022) van investigar la dinàmica futura de la coberta de neu utilitzant sèries temporals de teledetecció òptica, cosa que va destacar el potencial de la tecnologia avançada per pronosticar les tendències i els canvis de la neu als Alps amb precisió. En general, la síntesi d'aquests estudis subratlla la relació entre el canvi climàtic i les tendències de la neu als Alps. Des dels patrons de desglaç fins a les respostes de la vegetació, la investigació pinta un panorama detallat de com els canvis ambientals estan remodelant el paisatge alpí. Comprendre aquestes tendències és fonamental per fonamentar els esforços de conservació, les estratègies de gestió de la terra i les mesures d'adaptació davant dels reptes actuals del canvi climàtic.

La tesi doctoral (Laternser, 2002) és un important referent per a aquesta investigació. Es presenten tendències nacionals a llarg termini (1931-1999) de diversos paràmetres de neu a Suïssa. Els resultats són de gran rellevància en el debat sobre el canvi climàtic i les tendències i projeccions climàtiques estimades: un augment general, amb interrupcions, fins al començament de la dècada de 1980, seguit d'una disminució estadísticament significativa cap a finals de segle. Els canvis s'amplifiquen a cotes més

baixes. Tot i això, el processament de dades va demostrar clarament que, per monitorar els canvis climàtics de forma correcta, superposats per grans variacions regionals, altitudinals i anuals, cal una xarxa força densa d'estacions meteorològiques contínues que resultin en sèries homogènies a llarg termini. Cal ressaltar que als Alps suïssos, els estudis a llarg termini han revelat un augment notable de la profunditat de la neu, la durada contínua de la capa de neu i els dies de nevades fins a principis de la dècada de 1980, seguit d'una disminució significativa cap a finals de segle (Laternser i Schneebeli, 2003). Aquestes tendències reflecteixen la complexa interacció dels factors climàtics que influeixen en les característiques de la neu durant períodes perllongats. Per determinar la cobertura òptima de les estacions nivometeorològiques, es va desenvolupar en aquest treball un model probabilístic basat en la freqüència espacial i temporal de tots els esdeveniments de neu. Segons aquest estudi, les xarxes meteorològiques haurien de tenir un espai triangular d'aproximadament 15 km per obtenir una probabilitat de captura de nevades espacialment contínua d'almenys 80%. Els espais de 20 km donen com a resultat només un 50% de probabilitat de captura garantida, cosa que significa que almenys la meitat dels mesuraments de nevades en àrees locals a màxima distància entre estacions es perd i, per tant, els pronòstics d'allaus subestimaran localment la situació en almenys la meitat de tots els casos. També es presenten greus deficiències en el mesurament de les nevades a l'operativa suïssa, sobretot al sud/sud-est i al llarg de la frontera nacional, cosa que indica la necessitat d'obtenir dades transfrontereres i intercanviar la informació. En aquesta recerca també es van analitzar les regions o climes d'hivern i es va acabar suggerint una nova divisió basada en un estudi probabilístic de gran interès.

1.2.1.3 Els Pirineus

En els darrers anys, la serralada dels Pirineus ha experimentat una disminució de la capa de neu. Els estudis han demostrat una disminució significativa de la profunditat i la durada de la neu, especialment en les elevacions altes dels Pirineus francesos i espanyols (López-Moreno et al., 2020; Vidaller et al., 2021; Hammond et al., 2018). Aquesta disminució s'ha atribuït a l'escalfament continu des del període industrial, amb un augment marcat observat des del 1955, que actua com un factor important de la reducció de la capa de neu (López-Moreno et al., 2020). A més, les simulacions han indicat una disminució de la capa de neu similar a la trobada als Alps (Beniston et al., 2018; Herring et al., 2014).

A més, la investigació ha posat en relleu l'impacte del canvi climàtic a la capa de neu dels Pirineus, projectant-se una dràstica disminució de l'espessor i la durada de la capa de neu durant el proper segle, en particular als sectors central i oriental dels Pirineus espanyols (López - Moreno et al., 2009). Aquestes troballes són consistents amb les tendències observades en altres serralades de latituds mitjanes, que indiquen una disminució general de la profunditat i la durada de la neu (Alonso-Gonzalez et al., 2020; Tennant et al., 2017).

En general, la literatura científica dona suport a una tendència clara a la disminució de la capa de neu als Pirineus, impulsada per factors com l'escalfament continu, els canvis en els patrons de precipitació i la influència del canvi climàtic. Aquestes troballes tenen implicacions significatives per a la gestió dels recursos hídrics i la dinàmica dels ecosistemes a la regió. Les tendències de la neu a Espanya, especialment a les regions del nord, han estat objecte de recerca científica al llarg dels anys. Estudis com els de Vicente - Serrano et al. (2017) han aprofundit en l'anàlisi de les tendències de la neu al nord d'Espanya utilitzant dades d'observació d'una xarxa d'estacions. Aquests estudis han revelat una tendència decreixent significativa a la freqüència anual de neu des de mitjans dels anys setanta, amb una reducció del voltant del 50% en el nombre de dies de neu. Aquesta tendència ha estat constant en diferents elevacions i estacions, cosa que indica un impacte generalitzat en els patrons de neu a la regió. A més, la feina de Buisán et al. (2014) ha explorat més a fons la variabilitat espacial i temporal dels dies de neu i precipitació hivernals als Pirineus occidentals i centrals espanyols, i ha proporcionat informació valuosa sobre l'evolució dels dies de neu a la zona.

La investigació de Navarro-Planes (2024) utilitzant imatges de satèl·lit Landsat ha permès estudiar les tendències de persistència de la neu als Pirineus centrals d'Espanya durant un període de 40 anys. Aquesta anàlisi ha proporcionat una comprensió integral de com la superfície de neu i la persistència de la neu han canviat a diferents escales espacials dins de la regió.

Alhora, la influència de la circulació atmosfèrica en la variabilitat del mantell de neu a les regions muntanyenques ha estat un focus clau d'estudis com els de (López-Moreno i Vicente-Serrano, 2007). Aquestes investigacions han ressaltat l'impacte significatiu dels patrons de circulació atmosfèrica en la variabilitat interanual del mantell de neu als Pirineus espanyols, emfatitzant les complexes interaccions entre els factors climàtics i la dinàmica de la neu a la regió. El treball de García-Hernández (2024) sobre nevades extremes i patrons de circulació atmosfèrica a la Serralada Cantàbrica del NO d'Espanya

dona llum sobre les variacions localitzades als esdeveniments de nevades i la seva relació amb les condicions atmosfèriques. Els estudis de Beniston et al. (2018) han subratllat els desafiaments que plantegen les condicions climàtiques canviants a la criosfera muntanyosa europea, incloses les alteracions en els patrons de nevades extremes i la profunditat de la neu. Aquests canvis estan estretament vinculats a factors com les variacions de temperatura, la intensitat de les precipitacions i la variabilitat climàtica, cosa que dificulta predir la freqüència, magnitud i moment futurs de les tempestes de neu en regions muntanyoses com Espanya. A més, la investigació de Pérez-Palazón et al. (2015) sobre els valors extrems de les variables relacionades amb la neu a les regions mediterrànies ha destacat el paper dels règims de precipitació en la dinàmica de la neu, emfatitzant la importància de considerar tant les tendències de temperatura com de precipitació per comprendre les tendències de la neu.

En general, aquests estudis proporcionen una visió general completa de les tendències i la dinàmica de la neu a Espanya, particularment a les regions septentrionals i muntanyenques. En examinar les dades d'observació, les imatges satel·litàries i les influències atmosfèriques, s'han pogut dilucidar els patrons canviants d'aparició, persistència i variabilitat de la neu. Aquestes troballes tenen implicacions per comprendre els impactes més amplis del canvi climàtic als ecosistemes dependents de la neu i els recursos hídrics a Espanya.

I per conèixer quina és la severitat de cada temporada hivernal, s'ha fet una revisió dels treballs sobre l'índex de severitat acumulada de la temporada d'hivern (AWSSI, per les sigles en anglès), una mètrica que quantifica la severitat de les temporades d'hivern en funció dels llindars de temperatures màximes i mínimes, nevades i profunditat de la neu (Boustead et al., 2015). Proporciona una mesura integral de la “duresa” de la temporada de fred (Budikova et al., 2021). Aquest índex utilitza llindars de temperatura absoluta per avaluar la severitat de l'hivern, fet que el converteix en una eina valuosa per avaluar esdeveniments de fred extrem (Smith i Sheridan, 2018). AWSSI s'ha utilitzat per comparar temporades d'hivern, com el sever hivern de l'Oest Mitjà de 2013/14, mitjançant l'anàlisi de nevades, profunditat de la neu i dades de temperatura (Marinero et al., 2015).

Les conclusions principals sobre l'estat de l'art d'aquesta temàtica ens indiquen que les tendències de la neu exhibeixen patrons diversos a escala mundial, influenciats per una varietat de factors climàtics, geogràfics i ambientals. Des de l'oest dels Estats Units fins a l'Himàlaia, des dels Alps suïssos fins a l'Antàrtida, la ciència ha demostrat la

complexitat de la dinàmica de la neu i la necessitat d'estudis integrals per capturar els matisos dels patrons canviants de la neu. En integrar avaluacions localitzades amb anàlisis regionals més àmplies, els investigadors poden obtenir una comprensió més holística de les tendències de la neu i les seves implicacions per adaptar-se al canvi climàtic i la gestió dels recursos hídrics.

1.2.2 Climatologia d'allaus

La climatologia d'allaus és una disciplina que estudia les condicions climàtiques i meteorològiques que influeixen en la formació, el desencadenament i el comportament de les allaus. La climatologia d'allaus és un camp crucial que implica la integració de diverses fonts de dades per avaluar amb precisió els problemes d'allaus. Aquest procés inclou observacions d'allaus, condicions de la capa de neu, patrons climàtics i característiques del terreny (Horton et al., 2020). Per comprendre els nivells de perill d'allaus, cal un enfocament integral, que combini mesuraments d'estacions meteorològiques automatitzades, simulacions de models de coberta de neu i dades d'observació recopilades per al pronòstic d'allaus (Techel et al., 2020). Els investigadors han emfatitzat la importància d'estendre el temps d'anticipació dels pronòstics d'allaus incorporant pronòstics meteorològics numèrics a regions muntanyoses per millorar la precisió de les prediccions (Roeger et al., 2003).

El pronòstic precís d'allaus depèn en gran manera de dades actualitzades sobre l'ocurrència d'allaus obtingudes a través de mètodes com el monitoratge sísmic, ja que les allaus recents brinden evidència directa de la inestabilitat de la capa de neu (Herwijnen et al., 2016). A diferència de disciplines com la previsió meteorològica, que sovint impliquen valors numèrics precisos, les previsions d'allaus es basen principalment en informació categòrica, cosa que posa en relleu la necessitat de comptar amb mètodes sòlids de recopilació i anàlisi de dades (Müller, 2024). L'estabilitat del mantell de neu, la distribució de freqüències de l'estabilitat del mantell de neu i la mida de les allaus són factors clau per avaluar els nivells de perill d'allaus, cosa que subratlla la importància de l'evidència quantitativa derivada de les proves d'estabilitat i les observacions d'allaus (Techel et al., 2020).

(Mock and Birkeland, 2000) fan un treball sobre la temàtica per justificar científicament la hipòtesi que el clima d'allaus de neu de l'oest dels Estats Units consisteix en tres zones climàtiques principals que es relacionen amb diferents

característiques d'allaus: costanera intramuntanyosa i continental. Per fer-ho, duen a terme una anàlisi quantitativa del clima i l'activitat d'allaus de neu de la regió d'acord amb les dades de la Westwide Avalanche Network del 1969 al 1995. Una classificació climàtica binària d'allaus, basada en l'indici de neu i rangs de mantell de neu i variables climàtiques, il·lustra la climatologia a gran escala de les tres zones principals i alguns patrons.

(Castebrunet et al., 2012), mostren que l'activitat d'allaus de neu està controlada en gran manera per la neu i els patrons climàtics i que la resposta a les fluctuacions climàtiques ha estat molt poc estudiada. Els estudis previs s'han centrat en l'extracció directa de tendències en allaus i dades climàtiques a l'hivern, i aquest estudi fa servir un mètode implícit en el temps per modelar l'activitat d'allau anual als Alps francesos durant el període 1958-2009 a partir de factors de control climàtics més representatius. En aquest treball es discuteixen les diferències regionals i les variacions estacionals entre l'activitat d'hivern i primavera i es confirmen règims climàtics i de neu força diferents que influeixen en l'activitat d'allaus sobre els Alps del Nord i del Sud, segons la temporada. Un treball molt interessant, però que compta amb una mostra de dades sistemàtica consolidada i de gran qualitat, però inexistent a altres zones entre elles la nostra. A Andorra hi ha un registre històric meteorològic amb una sèrie llarga i sistemàtica que permet treballar les dades climàtiques recollides a les estacions meteorològiques, però, per contra, es parteix d'un registre molt pobre d'inventariat de fenòmens d'allaus, que pot provocar una dificultat a l'hora de validar i correlacionar les dades nivometeorològiques amb esdeveniments reals d'allaus.

Fins ara, els únics antecedents relacionats amb Els Pirineus són les tesis doctorals i els seus respectius articles publicats per Pere Esteban, Carles García i Pere Oller. El primer estudia sobre les fortes nevades sobre les regions muntanyenques, que solen ser una causa directa d'allaus. Les situacions atmosfèriques a escala sinòptica específiques són responsables d'aquest tipus d'esdeveniments de precipitacions nivals extremes, i aquest és el cas d'Andorra. Basat en dies amb una intensitat de precipitació d'almenys 30 cm de neu en un període de 24 hores, a l'estudi es du a terme l'anàlisi de components principals (PCA) i les tècniques de clusterització per caracteritzar els patrons de circulació sinòptics per dies durant la temporada d'hivern. La metodologia proposada implica un enfocament de processament consistent en una estandardització espacial de les dades utilitzades per a la PCA. Els resultats, com els gràfics meteorològics, són una eina útil per ajudar els models meteorològics amb fortes prediccions de nevades i la classificació del dia.

En diversos articles publicats en el marc de la tesi doctoral *Caracterització espai temporal de la dinàmica d'allaus majors al Pirineu català* (Oller, 2021), tenen com a objectiu avançar en el coneixement de la dinàmica de les allaus majors al Pirineu de Catalunya. Basada en una base de dades d'allaus més grans recopilada a partir d'enquestes, seguiment hivernal, cartografia exhaustiva i documentació històrica, la investigació va quantificar la magnitud d'episodis d'allaus mitjançant un índex específic (MAAMI). L'anàlisi detallada dels hiverns des del 1995/96 fins al 2013/14 va permetre determinar la magnitud, freqüència i extensió dels episodis d'allaus majors, identificant patrons atmosfèrics responsables i probabilitats d'ocurrència, especialment en àrees urbanitzades.

A més, a la tesi es va ajustar el model empíric noruec α - β per calcular distàncies d'abast d'allaus "extrems" al Pirineu Català, millorant significativament els models previs. Aquest nou model, basat en una mostra de 97 esdeveniments i utilitzant variables com ara el pendent, la distància horitzontal i l'àrea de la zona de sortida, va mostrar un ajustament considerable ($R^2=0.81$). Els resultats van indicar que una zona de sortida més gran augmenta l'abast de l'allau, mentre que una major longitud de la zona de trajecte la redueix. Aquesta anàlisi pionera ha permès un avenç significatiu en la predicció de l'abast d'allaus i en la comprensió de la perillositat i risc associats al Pirineu Català.

A la tesi doctoral titulada *Variabilitat espai-temporal de grans allaus al Pirineu Oriental segons l'estructura del mantell nival i la circulació atmosfèrica* (Garcia, 2018), l'autor fa referència que, al llarg de vint-i-cinc anys de predicció d'allaus al Pirineu de Catalunya s'ha observat que l'índex de perill està subjecte a una variabilitat temporal i espacial clara. A través de les dades de l'estat del mantell nival, de les característiques atmosfèriques, de l'ocurrència de grans allaus, d'accidents per allaus, de la caracterització dels dies d'hivern quant a temperatura i humitat, ha aportat coneixement sobre el comportament del mantell nival, realitzant una regionalització del perill d'allaus de neu en una part del Pirineu de Catalunya. Aquest és un treball referent per a aquesta tesi doctoral, que parteix d'una gran quantitat de dades de molta qualitat i en què es dona continuïtat a treballs com els que (Hageli and McClung, 2007) presenten i on se suggereix el nom de «Règim d'hivern d'allaus» com a nou terme per descriure i classificar les característiques locals de neu i allaus que són directament rellevants per al pronòstic d'allaus. En un d'aquests treballs s'estudien tres règims d'allaus d'hivern diferents que s'identifiquen per al sud-oest del Canadà.

Destaquen també alguns articles com Large-scale teleconnection patterns and Synoptic Climatology of major snow-avalanche winters in the Presidential Range (New Hampshire, USA) de Martin i Germain (2017) que fan una aproximació similar aquest cas a l'estat de New Hampshire als Estats Units.

D'altra banda, a la recerca de (Martin and Germain, 2017) s'estudien les relacions entre la climatologia sinòptica, les teleconnexions a gran escala i l'índex regional d'activitat d'allaus (RAAI) inferides d'anells d'arbres a través d'estudis dendrocronològics. Durant el període 1936-2012, comparen 18 anys d'activitat d'allaus regional amb els tipus de clima / temperatura conjunta d'hivern predominant (fred / humit (CW), fred / sec (CD), càlid / humit (WW) i càlid / sec (WW), l'Oscil·lació de l'Atlàntic Nord (NAO), El Nen-Oscil·lació del Sud (ENSO, els mapes d'anomalies de 500mbar i la relació amb la neu precipitada.

Entre les investigacions que es presenten en el marc teòric, una de les més interessants són les realitzades pel nord-americà (Schauer et al., 2019) molt relacionat amb un dels capítols d'aquesta investigació. L'autor juntament amb el seu equip de recerca té com a objectiu millorar la capacitat de predir allaus de placa profundes mitjançant la identificació a escala regional de patrons de circulació atmosfèrica associats amb aquests. Es classifiquen els mapes d'alçada geopotencial de 500hPa en categories que resumeixen els patrons atmosfèrics principals experimentats a l'oest dels Estats Units durant els mesos d'hivern. Per fer aquest treball, els autors han accedit als registres històrics de les àrees d'esquí a tot l'oest per identificar anys amb allaus i sense allaus de plaques profundes. Els quadres sinòptics per als anys significatius identificats a partir del registre d'allaus es comparen amb les classificacions sinòptiques resumides per analitzar els patrons atmosfèrics associats amb cicles d'allau de plaques profundes a diferents llocs de l'oest dels EUA.

Un fet a destacar i que remarca l'estat de l'art de la temàtica és que la majoria dels articles relacionats amb la dinàmica i nivoclimatologia d'allaus i els seus patrons espaciotemporals han estat publicats en els darrers 10 anys.

L'avaluació del risc d'allaus es veu facilitada significativament per les observacions d'allaus, que serveixen com a indicadors eficaços del nivell de perill actual proporcionen evidència directa de la inestabilitat de la neu (Pagnier et al., 2022). Els pronosticadors d'allaus han de tenir un coneixement profund de la interacció entre les característiques

del terreny i els processos del mantell de neu per avaluar amb precisió els nivells de perill d'allaus (Statham et al., 2017). Els estàndards utilitzats en la predicció d'allaus, com l'escala de perill d'allaus, els problemes d'allaus, la classificació de la mida de les allaus i els models conceptuals de perill d'allaus, fan servir termes específics per descriure l'estabilitat del mantell de neu, la distribució de freqüència de l'estabilitat i la mida esperada de l'allau (Hutter et al., 2021).

S'han utilitzat metodologies basades en SIG per avaluar el risc d'allaus de neu, considerant paràmetres com l'elevació, el pendent, l'orientació, la curvatura i la cobertura del sòl per millorar la precisió de la predicció (Aydin et al., 2023). S'han emprat tècniques de predicció espaciotemporal, incloses les màquines de vectors de suport i els classificadors de bosc aleatori, per predir els nivells de perill d'allaus en funció de l'activitat històrica d'allaus, les condicions meteorològiques i les observacions del mantell de neu (Pozdnoukhov et al., 2011; Pérez-Guillén et al., 2022). S'han desenvolupat sistemes de predicció automatitzats que utilitzen algorismes d'aprenentatge automàtic per proporcionar avaluacions del perill d'allaus gairebé en temps real, aprofitant àmplies dades meteorològiques i simulacions de la capa de neu (Pérez-Guillén et al., 2022).

La qualitat dels pronòstics d'allaus és difícil de verificar a causa de la naturalesa categòrica de les dades, cosa que requereix investigacions sobre la coherència espacial i el biaix per avaluar la precisió dels pronòstics (Techel et al., 2018). S'han implementat sistemes de monitoratge en temps real que utilitzen dades SAR per rastrejar l'activitat d'allaus, cosa que proporciona informació crucial per al pronòstic d'allaus i l'avaluació de riscos (Eckerstorfer et al., 2019). Hi ha desafiaments metodològics i conceptuals en la verificació de pronòstics per a esdeveniments rars i severos com a allaus, cosa que emfatitza la necessitat de processos de verificació sòlids en el pronòstic d'allaus (Ebert i Milne, 2021).

Pel que fa al marc teòric de la climatologia d'allaus, es tracta d'un camp multidisciplinari que requereix la integració de diverses fonts de dades, tècniques avançades de modelatge i mètodes de verificació robustos per avaluar amb precisió els riscos d'allaus i proporcionar pronòstics oportuns.

1.2.3 Noves eines i tecnologies, open data i ciència ciutadana en la gestió del risc d'allaus

Finalment, en aquest profund marc teòric sobre la investigació desenvolupada en aquesta tesi doctoral es fa un repàs a la literatura científica sobre eines i noves tecnologies útils en la gestió del risc d'allaus i l'interès de dur a terme campanyes de ciència ciutadana i enfortir les polítiques de dades obertes. “ Les allaus representen riscos significatius a les regions muntanyoses, la qual cosa requereix el manteniment de bases de dades exhaustives per millorar les mesures de seguretat i els esforços de recerca. Les bases de dades d'allaus tenen un paper molt important en la validació de butlletins d'allaus, complementant bases de dades existents i permetent anàlisis estadístiques de paràmetres clau d'allaus” (Bühler et al., 2019). Aquestes bases són fonamentals per produir mapes de risc amb alta fiabilitat, incorporant anàlisis del terreny, dades climatològiques i modelatge numèric per avaluar els riscos d'allaus (Bühler et al., 2018). S'han desenvolupat eines automatitzades que utilitzen dades històriques d'allaus per identificar possibles àrees de desencadenament d'allaus, assistint a l'elaboració de mapes d'indicació i avaluació de riscos (Bühler et al., 2013).

Les tècniques de teledetecció i dades satel·litàries s'han emprat per mapejar allaus, avaluar-ne el rendiment i garantir la integritat de les dades per a fins de validació (Hafner et al., 2020). A més, els avenços tecnològics han portat al desenvolupament de sistemes basats a la web per monitorar els perills d'allaus de neu, proporcionant registres diaris d'ocurrències i mides d'allaus, tant naturals com controlades (Bourova et al., 2016). Les bases de dades d'allaus també han estat utilitzades per estudiar els patrons de mort entre les fatalitats per allaus, destacant la importància de considerar els efectes combinats de trauma, asfíxia i hipotèrmia en aquests incidents (Boyd et al., 2009). La base de dades WWAN conté registres tant d'allaus naturals com controlades, proporcionant dades diàries sobre el nombre i la mida de les allaus (Birkeland i Mock, 2001). Al Canadà, la base de dades Information Exchange (InfoEx) de la Canadian Avalanche Association (CAA) proporciona ocurrències diàries d'allaus des del 1991, presentades per professionals de la indústria de les allaus (Haegeli i McClung, 2007; Haegeli et al, 2014). A Europa, les dades observacionals, topogràfics i meteorològiques per a esdeveniments d'allaus extremes o atípiques estan disponibles a la base de dades EU CADZIE (Domaas et al, 2002).

Incorporar el coneixement local juntament amb dades científiques és necessari per a una comprensió integral de les allaus de neu i gel en regions muntanyoses altes (Acharya et al., 2023). Les bases de dades d'allaus han estat utilitzades per investigar factors sociodemogràfics relacionats amb la mortalitat per allaus, destacant la importància de vincular les morts per allaus amb bases de dades completes per a

finalitats de recerca (Berlin et al., 2019). A més, s'han comparat bases de dades per avaluar les fatalitats per allaus a diferents regions, ressaltant la importància de la precisió i consistència de les dades (Spencer i Ashley, 2010). Enumerar aquesta informació en un camp específic la farà més accessible. A més, un estudi sobre fatalitats per allau (Boyd et al 2009) va utilitzar un esquema de classificació en què esquiadors i surfistes de neu es van agrupar en una sola categoria. Tot i que les bases de dades utilitzaven l'esquí i l'snowboard com a categories separades, es podria fer més recerca per determinar si les diferències entre aquestes activitats són prou significatives per justificar dues categories. A l'estudi més extens, Page et al (1999) van examinar en detall les fatalitats per allau als Estats Units des del 1950 fins al 1994. Utilitzant la National Avalanche Database (NAD), van identificar 440 fatalitats causades per 324 esdeveniments d'allau durant el període d'estudi. Les fatalitats per allau van assolir el màxim al gener, van disminuir constantment durant febrer i març, i es van fer menys freqüents a l'abril. El pic de fatalitats per allau al desembre i al gener es produeix durant els mesos de màxima participació en esports d'hivern als estats occidentals (Page et al 1999). Per tant, aquests enllaços i una base de dades més completa de la UE CADZIE també ajudarien a desenvolupar models estadístics/topogràfics i comparatius per a altres regions. Els models estadístics/topogràfics s'han aplicat anteriorment també a Àustria (Lied et al, 1995), Islàndia (Jóhannesson, 1998) i als Pirineus catalans (Furdada i Vilaplana, 1998). La importància dels registres històrics per a la zonificació de riscos en termes de condicions que influeixen en les ocurrencies d'allaus és discutida per diferents autors, mentre que l'anàlisi de probabilitats i la incertesa a la zonificació de riscos són discutits per Barbolini i Savi (2001) i Harbitz et al (2001).

Diversos estudis han destacat la importància de comprendre el perill d'allaus, les característiques del terreny, els impactes del canvi climàtic i el paper de la tecnologia per millorar les estratègies de gestió de riscos. Statham et al. (2017) destaquen la importància del terreny per influir en la formació d'allaus, posant èmfasi en la necessitat d'identificar on tenen lloc problemes específics d'allaus al terreny per a una gestió eficaç del risc. Aquesta comprensió del terreny és necessari per implementar mesures adequades de mitigació de riscos. Ballesteros-Cánovas et al. (2018) qüestionen la suposició que l'escalfament condueix a menys allaus de neu, indicant que l'escalfament climàtic en realitat augmenta el risc d'allaus de neu a l'Himàlaia occidental, fet que subratlla la necessitat d'estratègies de gestió de riscos actualitzades davant de les condicions climàtiques canviants.

En l'àmbit dels avenços tecnològics, Marchetti et al. (2015) analitzen la importància dels conjunts d'infrasons per a la detecció i l'estimació automàtiques de les velocitats dels fronts d'allau de neu, i destaquen el potencial dels sistemes d'alerta primerenca en temps real per millorar la gestió del risc d'allaus. Ortner et al. (2023) presenten un enfocament d'avaluació de riscos a gran escala per al perill d'allaus de neu a regions alpines, cosa que permet la quantificació del risc d'allaus en àrees extenses i la creació de mapes de distribució de riscos per a ubicacions específiques, que ajuda als esforços de gestió de riscos específics. Aquestes innovacions tecnològiques proporcionen eines valuoses per avaluar i gestionar el risc d'allaus de manera eficaç.

A més, Bründl et al. (2009) destaquen el paper de l'educació en la comunicació de riscos, els quals suggereixen que els cursos d'educació poden contribuir significativament a la comunicació de riscos i exercir un paper central en la gestió integral de riscos, d'acord amb la idea que les persones informades estan més ben equipades per mitigar els riscos d'allaus. Herla et al. (2021) aprofundeixen en la utilitat dels models de mantell de neu en la previsió d'allaus, i destaquen com aquests models poden oferir informació addicional per a l'avaluació del risc d'allaus, en particular en regions amb disponibilitat limitada de dades o condicions climàtiques adverses, millorant així les operacions de gestió de riscos.

Pel que fa a les zones boscoses, Bebi et al. (2009) analitzen com la gestió silvícola pot influir en la freqüència d'allaus, augmentant potencialment la funció protectora dels boscos per als assentaments i la infraestructura riu avall, mostrant com la gestió dels ecosistemes es pot integrar en les estratègies de gestió del risc d'allaus. Shandro i Haegeli (2018) destaquen la importància de monitorar sistemàticament les debilitats del mantell de neu per gestionar eficaçment el risc d'allaus a regions amb climes de neu continental, subratllant la necessitat d'un monitoratge com a aspecte clau de la gestió de riscos.

A més, l'ús de models d'aprenentatge automàtic per al modelatge espacial d'allaus de neu, com van explorar (Rahmati et al., 2019), ofereix una via prometedora per millorar la presa de decisions basada en el risc, millorar la credibilitat de les prediccions del perill d'allaus i proporcionar informació crítica per als administradors de perills d'allaus, fet que demostra el potencial de les tecnologies avançades en la gestió de riscos. Sterchi et al. (2019) investiguen la relació entre el perill d'allaus i les opcions de terreny en les operacions d'esquí amb helicòpter, destacant la importància d'avaluar contínuament les condicions de perill locals i seleccionar el terreny apropiat per mitigar

l'exposició i mantenir un nivell acceptable de risc alhora que es garanteix una experiència d'esquí de qualitat.

En el context de la gestió del risc d'allaus, s'ha explorat l'ús de drons per a operacions de cerca i de rescat. Tilburg (2017) va informar sobre la utilització reeixida d'UAS portàtils per a missions de cerca i rescat, cosa que indica l'efectivitat potencial dels drons en escenaris de cerca d'allaus (Tilburg, 2017). A més, l'estudi demostra que els UAS poden emprar-se per a la vigilància de la capa de neu i l'activació controlada d'allaus, mostrant la seva capacitat en tasques relacionades amb allaus (McCormack i Stimberis, 2010).

Comprendre la variabilitat espacial de les condicions de la neu a través d'estacions automàtiques de mesurament del clima i la neu és essencial per a alertes d'allaus i avaluacions de risc precises (Egli, 2008). Aquestes estacions brinden dades valuoses sobre paràmetres com la quantitat de neu nova, la temperatura i el contingut d'aigua, que són factors crítics que influeixen en el comportament de les allaus (Valero et al., 2018).

En l'àmbit de la prevenció d'allaus i la mitigació de riscos, les tecnologies com el LiDAR tenen un paper important en l'avaluació de la susceptibilitat a les allaus i el desenvolupament de plans de control efectius (Boccardo et al., 2020). En utilitzar models d'elevació digitals derivats de dades LiDAR, les autoritats poden gestionar millor les àrees propenses a allaus mitjançant l'anàlisi del pendent, l'orientació i altres característiques topogràfiques. A més, els avenços en la tecnologia de fotodíodes d'allau, com els detectors InGaAs / InP, ofereixen un rendiment millorat per a aplicacions de comunicació quàntica (Zhang et al., 2015). Aquests detectors permeten una activació d'alta freqüència i un funcionament sense interrupció, cosa que millora la seva utilitat en els sistemes de monitorització d'allaus.

A més, la integració de díodes d'allau de fotó únic (SPAD) a tecnologies CMOS ha revolucionat les capacitats de generació d'imatges per a aplicacions que requereixen alta sensibilitat i velocitats de quadre ràpides (Sanzaro et al., 2018). S'han desenvolupat SPAD amb una sensibilitat millorada a l'espectre de l'infraroig proper per a sistemes LiDAR automotrius, cosa que demostra la seva versatilitat en diversos dominis (Takai et al., 2016). A més, la implementació de SPAD a la tecnologia CMOS ha facilitat el desenvolupament de fotomultiplicadors de silici (SiPM) compactes i rendibles per a una major precisió de detecció (Vornicu et al., 2017).

En el context de la investigació sobre allaus, comprendre les característiques i els perills dels diferents tipus d'allaus de neu és decisiu per a una gestió eficaç dels desastres i l'assignació de recursos (Hao et al., 2021). En categoritzar els tipus d'allaus en funció dels climes regionals de neu, les autoritats poden adaptar les estratègies de resposta per mitigar els riscos de manera eficaç. A més, els avenços en els esquemes de detecció de fotó únic, com el filtratge de domini de freqüència, ofereixen capacitats de detecció d'alta velocitat clau per al monitoratge d'allaus i els sistemes d'alerta primerenca (Wu et al., 2022). Aquests esquemes milloren l'extracció de senyals en minimitzar el soroll de manera comuna, cosa que garanteix una detecció precisa i oportuna dels esdeveniments d'allau.

La neu i les allaus plantegen riscos importants a diverses regions, especialment en àrees deshabitades on el monitoratge pot ser un desafiament. Les tecnologies de teledetecció han sorgit com a eines valuoses per detectar i monitorar allaus de neu. Abermann et al. (2019) van destacar el potencial de la teledetecció satel·litari d'alta resolució per monitorar l'activitat d'allaus a grans regions, i van emfatitzar la importància d'aquestes tecnologies per observar grans cicles d'allaus que sovint passen desapercebudes. Això subratlla el paper fonamental de la teledetecció en la millora de les capacitats de monitoratge d'allaus, especialment en àrees remotes i inaccessibles.

A més a més, l'estudi de Boccardo et al. (2020) va demostrar l'eficàcia de la detecció i el mapeig automatitzats de dipòsits d'allaus utilitzant tecnologia LiDAR aerotransportada. En aprofitar les tecnologies de teledetecció, els investigadors van poder automatitzar el procés d'identificació i mapeig de dipòsits d'allaus, cosa que mostra l'aplicació pràctica de la teledetecció al monitoratge d'allaus. Aquest enfocament automatitzat no només millora l'eficiència, sinó que també permet l'observació contínua d'àrees propenses a allaus, millorant les estratègies generals de gestió del risc d'allaus. Alhora, Vickers et al. (2016) van analitzar l'aplicació operativa de la tecnologia LiDAR aèria per monitorar allaus de neu a diferents escales espacials. Els investigadors van poder fer observacions objectives i contínues de l'activitat d'allaus, cosa que condueix a una millor comprensió de la dinàmica de les allaus i les àrees afectades pels esdeveniments d'allaus.

L'ús d'imatges de radar d'obertura sintètica (SAR) ha demostrat ser prometedori a la detecció automatitzada de dipòsits d'allaus de neu. L'estudi de Hafner et al. (2022) va demostrar el potencial de les imatges SAR per identificar allaus en detectar una retrodispersió més gran de la neu de dipòsits d'allaus. Aquest innovador enfocament

aprofita la tecnologia SAR per detectar l'ocurrència d'allaus, cosa que mostra les diverses aplicacions de la teledetecció en la detecció i el monitoratge d'allaus. En integrar les imatges SAR amb altres tècniques de teledetecció, els investigadors poden millorar la precisió i l'eficiència dels sistemes de detecció d'allaus.

Les dades obertes, que impliquen fer accessibles les dades de recerca per a la seva anàlisi secundària, permeten als investigadors i les parts interessades accedir, utilitzar, modificar i compartir dades entre disciplines (Chauvette et al., 2019). Es tracta de dades que estan disponibles de forma gratuïta per al seu ús sense restriccions de drets d'autor, cosa que beneficia la ciència, les polítiques públiques i la societat (Corrales-Garay et al., 2020). Les iniciatives de dades obertes tenen com a objectiu millorar la transparència, empoderar els ciutadans, fomentar la innovació i reformar els serveis públics (Ojo et al., 2015). L'agenda de dades obertes se centra a fer que les dades siguin obertes i estiguin disponibles, cosa que contribueix al govern obert, la transparència, la participació ciutadana, la presa de decisions més ben informades i la creació de nous negocis (Childs et al., 2014 ; Els investigadors estan més inclinats a utilitzar dades de recerca obertes quan l'accés és fàcil i els requisits d'esforç són menors (Shinde i Jeng, 2020).

Per acabar, la ciència ciutadana, definida en termes generals com la participació pública en projectes de recerca científica, implica la col·laboració entre científics i voluntaris per millorar el coneixement científic (Fraisl et al., 2022). Aquest enfocament permet la participació de les persones en diversos processos científics, inclosa la recopilació, l'anàlisi i la interpretació de dades, cosa que genera contribucions valuoses en diferents dominis científics (Fraisl et al., 2022). En involucrar persones no professionals en activitats de recerca, la ciència ciutadana permet generar observacions a gran escala que serien inabastables per als investigadors individuals (Kobori et al., 2015). Aquest model participatiu de ciència no només fomenta el compromís ambiental, sinó que també promou l'alfabetització científica i contribueix a abordar desafiaments ambientals clau (Dean et al., 2018; Rubio-Iglesias et al., 2020). A través de la ciència ciutadana, els voluntaris tenen un paper essencial en el monitoratge dels canvis ecològics, el foment de la ciutadania ambiental i l'avenç dels esforços de conservació (Jørgensen i Jørgensen, 2020; Dunkley, 2018).

Com a conclusió, cal sintetitzar que la integració de noves eines i tecnologies és vital per avançar en la comprensió i gestió de les allaus en un context de canvi climàtic. L'ús de dades obertes (open data) facilita l'accés a informació climàtica i geològica d'alta qualitat, cosa que permet als investigadors i gestors de riscos prendre decisions més

informades. A més, la ciència ciutadana ha emergit com una poderosa eina, on la participació del públic en la recol·lecció i l'anàlisi de dades amplia significativament la base de coneixement i millora la capacitat de monitoratge en temps real. Aquestes innovacions no només potencien la investigació científica, sinó que també promouen una major consciència i preparació comunitària davant dels riscos associats a les allaus.

1.2.4 Transició del turisme d'hivern en un context d'emergència climàtica

A causa de la seva especial importància i conseqüències notòries, en aquest apartat del marc teòric s'explora específicament la relació entre el canvi climàtic i els patrons de nevades i allaus. Encara que aquest tema no constitueix un apartat específic de la tesi doctoral, té especial rellevància en el context actual d'emergència climàtica. Per això, s'ha decidit fer una revisió sistemàtica de les investigacions principals sobre això, a causa de l'estreta relació que presenten amb els apartats d'estudi d'aquesta investigació.

El canvi climàtic té implicacions significatives per al turisme d'hivern, especialment en activitats que depenen de la neu, com ara l'esquí. La sensibilitat del turisme d'hivern alpi al canvi climàtic és ben coneguda (Trawöger, 2014). La disponibilitat de neu és un factor decisiu per a les estacions d'esquí i els canvis a la capa de neu poden tenir un impacte profund a la indústria (Steiger et al., 2013). La percepció del canvi climàtic entre els actors del turisme d'hivern és un factor important en les seves estratègies d'adaptació. Les percepcions de risc de les parts interessades poden impulsar o limitar les seves accions en resposta al canvi climàtic (Trawöger, 2014).

Els estudis han demostrat que hi ha una consciència cada vegada més gran sobre el canvi climàtic entre les parts interessades en el turisme d'hivern. Tanmateix, aquesta consciència sovint es limita a percebre el canvi climàtic com un fenomen global, i hi ha una manca de consciència sobre les conseqüències regionals i específiques del canvi climàtic. Això destaca la importància d'obtenir i transferir coneixements sobre els impactes específics del canvi climàtic a les destinacions de turisme d'hivern per induir l'acció pel que fa a destinació (Trawöger, 2014).

Una mesura d'adaptació que han emprat les estacions d'esquí és la fabricació de neu, que consisteix en la producció de neu artificial. La fabricació de neu ha esdevingut

un component rutinari de les operacions de les estacions d'esquí i té el potencial de contrarestar la disminució de la neu natural. No obstant això, l'eficàcia de la fabricació de neu com a mesura d'adaptació davant del canvi climàtic futur és un tema de debat (Falk i Vanat, 2016; Hennessy et al., 2008; Pütz et al., 2011; Rixen et al., 2011; Schmidt et al., 2012; Spandre et al., 2015, 2019; Steiger, 2018); Els estudis han demostrat que la fabricació de neu pot millorar la confiança de la neu, però la seva rellevància com a mesura d'adaptació a llarg termini depèn de diversos factors, inclosa la disponibilitat de recursos hídrics i condicions meteorològiques adequades (Spandre et al., 2019).

Si bé la fabricació de neu s'ha emprat com una mesura d'adaptació, encara se'n debat l'eficàcia i la rellevància a l'escenari de temperatures positives. La fabricació de neu implica l'ús de tecnologia per produir neu artificial, que pot ajudar a complementar les nevades naturals i estendre la temporada de turisme d'hivern (Dawson & Scott, 2013; Duglio & Beltramo, 2016; Scott et al., 2003). Un estudi recentment publicat a la revista *Nature* analitza 2.234 estacions d'esquí a 28 països europeus, descobrint que, en un escenari d'escalfament global de 2°C, el 53% estarien en un risc molt elevat de subministrament de neu sense la producció artificial. En un escenari de 4°C, aquest risc puja al 98%. Tot i que la producció de neu artificial pot mitigar parcialment aquests riscos, també augmenta significativament la demanda d'aigua i electricitat, exacerbant l'empremta de carboni de les estacions d'esquí i presenta un dilema a la cruïlla entre l'adaptació al canvi climàtic, la mitigació i el desenvolupament sostenible. Davant d'aquest repte, se suscita un debat intens sobre la sostenibilitat de les pràctiques actuals i la necessitat de reavaluar i possiblement transformar els models de negoci i vida a les regions muntanyoses d'Europa. (François et al., 2023). A les darreres dècades, s'ha emfatitzat la importància d'incloure la fabricació de neu i altres estratègies d'adaptació a les avaluacions de vulnerabilitat de la indústria de l'esquí i el turisme d'hivern.

Els impactes del canvi climàtic al turisme d'hivern no es limiten als Alps o als Pirineus, sinó que també afecten les estacions d'esquí d'altres regions del món. Els estudis realitzats a Austràlia, els Estats Units, la Xina, Andorra, Grècia, Finlàndia, Suècia, Dinamarca, Canadà, Àfrica, entre d'altres, també han destacat la vulnerabilitat de les estacions d'esquí al canvi climàtic (Dawson i Scott, 2013; Fang et al., 2021, Haanpää et al., 2015 ; et al., 2021). Les investigacions realitzades a l'estació d'esquí més gran d'Austràlia, a Andorra i altres països, van concloure que un percentatge significatiu d'esquiadors esquiarà amb menys freqüència si hi hagués poca neu natural, cosa que indica l'impacte negatiu potencial de la reducció de la capa de neu als patrons de visites (Pickering et al., 2010; Pons-Pons et al., 2012; Prettenhaler et al., 2022). Diversos

estudis també van plantejar que els esquiadors creien que el canvi climàtic afectaria la indústria de l'esquí i que aquest impacte passaria abans del que es pensava (Abegg et al., 2007; Bausch i Gartner, 2020; Pickering et al., 2010; Pons-Pons et al., 2012, Pons et al., 2015; Steiger et al., 2017).

El retrocés de les glaceres, els canvis en la quantitat i la freqüència de les nevades i els canvis en la biodiversitat són exemples de la sensibilitat dels ecosistemes de muntanya davant el canvi climàtic, que té implicacions per al turisme d'hivern (Pons-Pons et al., 2012). La vulnerabilitat de les destinacions turístiques de neu davant del canvi climàtic varia en funció de factors com ara la ubicació, l'altitud i la capacitat d'adaptació. Els estudis han demostrat que les destinacions turístiques basades en la neu al nord global han estat el focus d'investigacions prèvies sobre turisme, canvi climàtic, adaptació i activitats de turisme d'hivern. No obstant això, és important considerar les experiències i vulnerabilitats de les destinacions turístiques de neu en altres regions també (Hoogendoorn et al., 2020).

El turisme d'hivern és un sector altament vulnerable al canvi climàtic a causa de la dependència de recursos climàtics com les baixes temperatures i les nevades. Els impactes del canvi climàtic en el turisme d'hivern han estat objecte de preocupació i investigació (Haanpää et al., 2015; Hendrikx i Hreinsson, 2012; Pons et al., 2015; Scott et al., 2008). Els estudis han demostrat que els canvis en els patrons de temperatura i precipitació poden tenir efectes significatius a la capa de neu, cosa que alhora afecta la viabilitat de les activitats de turisme d'hivern (Brown i Mote, 2009).

L'article titulat “ Overall negative trends for snow cover llarga i durada global mountain regions over 1982-2020” examina les tendències en l'extensió i la durada de la capa de neu a les regions muntanyenques de tot el món durant un període de gairebé quatre dècades. La investigació, publicada a la revista Nature, va analitzar dades satel·litàries del 1982 al 2020 per avaluar els canvis a la capa de neu en diverses regions muntanyenques. Les troballes indiquen una disminució general tant a l'extensió com a la durada de la capa de neu durant aquest període. Els investigadors van observar tendències negatives consistents, que van revelar una reducció en la cobertura espacial i el temps que la neu cobreix les àrees muntanyenques (Notarnicola, 2022).

Als Alps, els conjunts de dades de referència i alguns dels conjunts de dades avaluats proporcionen tendències passades en línia amb la literatura disponible actual. Durant els darrers 50 anys (1968-2017) a escala regional, els Alps europeus han experimentat

un escalfament hivernal de 0,3 a 0,4 °C per dècada, una feble reducció de les precipitacions hivernals i una disminució substancial de les característiques de la capa de neu, amb una disminució de la profunditat de la neu hivernal i la durada de la capa de neu que arriba a un -10 % per dècada i un -10 dies per dècada, respectivament, especialment en elevacions baixes i intermèdies (Monteiro i Morin, 2023). I l'estudi de Marty et al., 2023 se centra en la importància de la capa de neu com un sistema d'emmagatzematge d'aigua vital per a les àrees riu avall, alhora que en reconeix els perills potencials i la importància per al turisme d'hivern. Els investigadors van utilitzar una gran quantitat de mesuraments manuals de l'equivalent en aigua de la capa de neu (SWE) de gairebé 30 estacions als Alps d'Europa central, que abasten diversos programes de monitorització que daten del 1937. En analitzar aquests mesuraments, l'estudi va obtenir sèries temporals diàries de SWE per a cada estació, cosa que els va permetre investigar les diferències espacials i els canvis temporals en les últimes set dècades (1957-2022). Les troballes indiquen tendències decreixents significatives al SWE mitjà (novembre-abril) i al SWE màxim, juntament amb una aparició més primerenca del SWE màxim i una desaparició més ràpida de la coberta de neu contínua. L'estudi també revela que la sèrie d'hiverns amb poca neu des de la dècada del 1990 no té precedents a les dades registrades. Addicionalment, s'observa una fosa més gran durant el període d'acumulació per sota dels 2.000 metres sobre el nivell del mar (msnm), particularment en els últims anys, juntament amb taxes de fosa més lentes a la primavera i una major variabilitat dia a dia. En particular, aquestes tendències van ser consistents en totes les estacions investigades, cosa que suggereix la seva transferibilitat a altres regions dels Alps malgrat la seva variabilitat climatològica. La investigació destaca els canvis significatius en les característiques de la capa de neu als Alps d'Europa central durant les darreres set dècades. Aquestes troballes tenen implicacions per als recursos hídrics, els perills naturals i la indústria del turisme d'hivern a la regió.

A escala pirinenca, l'article titulat “ Longterm trends (1958–2017) in snow cover duration and depth in the Pyrenees ” de (López-Moreno et al., 2020) s'investiguen els patrons a llarg termini de durada i profunditat de la capa de neu a la serralada dels Pirineus des del 1958 fins al 2017. Els investigadors van analitzar registres històrics i dades d'observació per avaluar les tendències en la durada i profunditat de la capa de neu. Van trobar canvis significatius a les característiques de la capa de neu durant el període d'estudi. Els resultats van revelar una clara disminució en la durada de la capa de neu i una reducció en la profunditat de la neu als Pirineus.

Pel que fa a les allaus, el canvi climàtic té el potencial d'afectar les allaus de neu, encara que no es comprèn bé la relació exacta entre el canvi climàtic i el perill d'allau (Beniston et al., 2018). Si bé hi ha la suposició comuna que l'augment de les temperatures donaria com a resultat menys neu i menys allaus de neu, estudis recents han demostrat que l'escalfament del clima pot augmentar el risc d'allaus de neu a certes regions. Per exemple, una investigació realitzada a l'Himàlaia occidental va trobar que l'escalfament climàtic ha portat a un augment de l'ocurrència d'allaus i distàncies d'escapament les darreres dècades. Això contradiu la suposició intuïtiva i té importants implicacions per a la gestió del risc de desastres a la regió (Ballesteros-Cánovas et al., 2018). Per avaluar les possibles conseqüències dels canvis potencials a l'acumulació de neu i la temperatura, investigadors suïssos han presentat recentment un marc per modelar allaus a gran escala incorporant escenaris de canvi climàtic. Van processar dades de l'escenari de canvi climàtic suís CH2018 sota l'extrem escenari d'emissió RCP8.5, considerant sis cadenes de models climàtics. Amb aquestes dades, han simulat els mantells de neu de 100 hiverns futurs utilitzant el model SNOWPACK. S'han simulat escenaris de períodes de retorn amb futures profunditats de fractura d'allau per a mitjans (2060) i finals del segle (2085). Aquests paràmetres modificats es van modelitzar amb el programari de simulació d'allaus RAMMS. Com a resultat, s'han obtingut mapes que mostren possibles efectes del canvi climàtic en el perill d'allaus. Les simulacions indiquen que els canvis en l'acumulació de neu i la temperatura afecten significativament les allaus, però els resultats depenen del model climàtic considerat. Tot i que no hi ha una tendència clara, generalment s'observa una disminució a les àrees afectades per allaus amb menors pressions i recorreguts més curts, especialment considerant un possible augment de la línia de neu en el futur. Aquests mapes millorats del perill d'allaus podrien ajudar a avaluar riscos futurs i adissenyar estratègies per enfrontar-se als objectius relacionats amb el canvi climàtic (Ortner et al., 2023).

L'ocurrència d'allaus de neu humida sovint es desencadena per la pluja o l'escalfament de la capa de neu, cosa que permet que l'aigua de desglaç es filtri. Les allaus de neu humida generalment tenen lloc a la primavera quan la capa de neu s'escalfa i l'aigua de desgel comença a filtrar-se. En cadenes muntanyenques amb un clima de neu de transició, les allaus de plaques de neu humida són comunes durant aquestes condicions (Baggi i Schweizer, 2009).

Els canvis als patrons climàtics, incloses la temperatura i les nevades, poden alterar la freqüència de les allaus de neu i els patrons de pertorbació que provoquen als boscos. Tot i que les dades climàtiques a llarg termini mostren un augment de la temperatura

hivernal en moltes àrees muntanyoses, les tendències en la profunditat de la neu, la durada de la capa de neu i les condicions climàtiques extremes solen ser menys clares (Bebi et al., 2009). L'impacte del canvi climàtic a les allaus de neu i els seus patrons de pertorbació als boscos és complex i requereix més investigació.

Els efectes del canvi climàtic en els accidents per allaus i la supervivència són multifacètics. Amb un clima de neu més humit i càlid, les conseqüències de l'enterrament per allau es poden tornar més greus. Les densitats de neu més altes a la runa d'allaus poden interferir amb la respiració de les víctimes completament enterrades, cosa que augmenta el risc d'asfíxia. A més, l'augment de la rugositat del terreny i la capa de neu més prima associada al canvi climàtic poden provocar traumatismes i lesions secundàries més freqüents (Strapazzon et al., 2021). L'impacte general del canvi climàtic en les morts per allaus és complex i està influenciat per diversos factors, inclòs el comportament dels recreacionistes hivernals i els canvis en la durada de la temporada de neu (Techel et al., 2016).

És possible que els equips de cerca i rescat (SAR) i els proveïdors d'atenció mèdica involucrats en el rescat d'allaus hagin d'adaptar les estratègies en resposta a les característiques canviants de les allaus causades pel canvi climàtic. Tot i això, és poc probable que les estratègies establertes necessitin canvis significatius en àrees on ja estan implementades i que calgui ampliar les estratègies de mitigació, com les mesures de control d'allaus, per abordar l'augment del risc d'allaus associat amb el canvi climàtic (Strapazzon et al., 2021).

És important assenyalar que els efectes del canvi climàtic a les allaus no són uniformes a totes les regions muntanyenques. La sensibilitat de la criosfera muntanyosa al forçament climàtic varia en funció de factors com les propietats fisiogràfiques i l'extensió de la cobertura criosfèrica. Per tant, diferents blocs muntanyosos poden experimentar diferents trajectòries de canvi geomorfològic i activitat d'allaus en resposta al canvi climàtic (Knight i Harrison, 2023).

1.3 Zona d'estudi: El Principat d'Andorra

1.3.1 Introducció

El Principat d'Andorra, situat al bell mig dels Pirineus, entre França i Espanya, constitueix un entorn singular i complex tant des del punt de vista geogràfic com climàtic, amb una notable influència tant del mar Cantàbric com del Mediterrani (Figura 1.2). En aquest capítol, s'aborda una anàlisi de la zona d'estudi, amb un enfocament a la geografia, la geologia, i els factors socioeconòmics que defineixen el país, juntament amb la climatologia.



Figura 1.2: Mapa topogràfic dels Pirineus, amb la representació de l'Oceà Atlàntic i el Mar Mediterrani. Crèdits: Eric Gaba.

L'estudi es fonamenta en un ampli conjunt de dades recopilades de fonts clau, com Andorra Recerca + Innovació, el Servei Meteorològic d'Andorra, el Departament de Medi Ambient i Sostenibilitat, i altres organismes governamentals. Al llarg del text s'exploren els components del paisatge andorrà, que inclouen des de la vegetació fins a les característiques geomorfològiques. És important destacar que els grans incendis forestals, potenciats per l'augment de les temperatures globals, podrien incrementar significativament la perillositat per allaus a moltes àrees del país que avui dia estan protegides per boscos de protecció. A més, es fa una breu introducció a la situació socioeconòmica d'Andorra.

Finalment, el capítol presenta una anàlisi de la climatologia del país a partir de la sèrie de dades de l'estació de Ransol, la qual s'ha consolidat com una referència essencial des dels inicis del 1935. Aquesta anàlisi permet comprendre les variacions climàtiques al llarg dels anys i proporciona una base sòlida per avaluar com aquestes tendències podrien evolucionar en el futur, impactant tant el medi ambient com la societat andorrana.

1.3.2 Geografia i geologia

El Principat d'Andorra està situat al sud-oest d'Europa, a zona de transició entre el vessant nord i el vessant mediterrani dels Pirineus orientals, entre dos estats de la Unió Europea, França i Espanya. Al nord, el Principat d'Andorra limita al llarg de 56,6 km amb els departaments d'Ariège i els Pirineus Orientals (França). Al sud, comparteix 63,7 km de frontera amb les comarques catalanes de la Cerdanya, l'Alt Urgell i el Pallars Sobirà (Espanya). El territori del Principat té una extensió de 468 km² i una altitud mitjana de 1996m (Figura 1.3). Administrativament, el país es divideix en set parròquies, cadascuna de les quals té la seva administració local, el Comú.

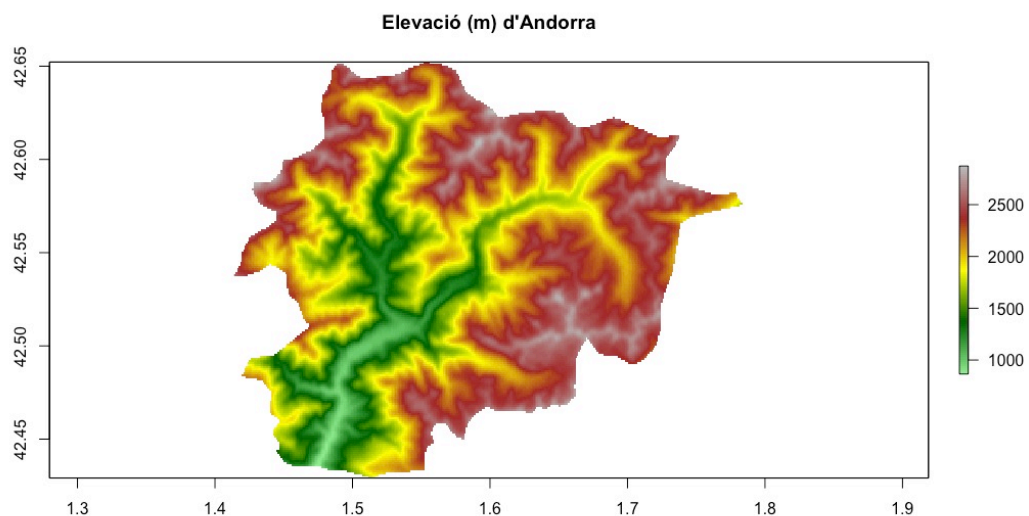


Figura 1.3: Mapa d'elevació (m) d'Andorra. Crèdits: Elaboració pròpia.

Al seu territori hi ha 65 pics de més de 2500m d'altitud. El cim del país se situa al Comapedrosa amb els seus 2942 metres i el punt més baix del país se situa a la confluència del riu Runer i el riu Valira, al costat de la frontera hispanoandorrana (Figura 1.4). Les principals característiques geomorfològiques són els pics escarpats i les estretes valls per les quals recorren nombroses rieres, que aboquen les seves aigües als tres principals rius del país: el Valira del Nord, Valira d'Orient i el Gran Valira, que

comença en unir-se els dos anteriors. Al país també hi ha 60 estanys, sent els més importants el de Juclar, el de l'Illa, el d'Engolasters i els 3 estanys de Tristania, al nord.

El paisatge del Principat d'Andorra està estretament relacionat amb la geologia i els processos geològics recents que ho han modelat. A una regió amb una orografia tan accidentada, la ubicació de la població i les activitats econòmiques també estan condicionades per la geomorfologia típica de les zones d'alta muntanya.

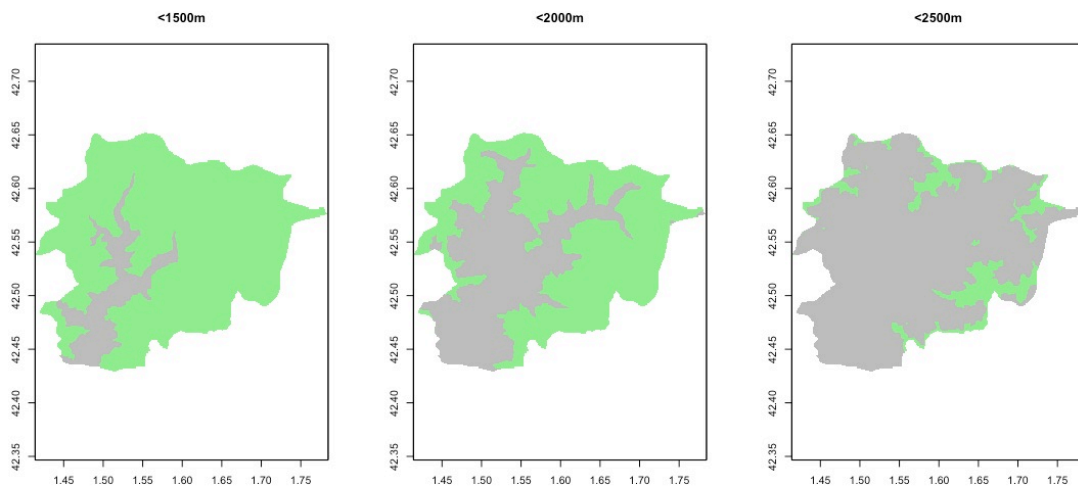


Figura 1.4: A excepció de les valls que conformen els rius Valira del Nord, Valira d'Orient i La Valira, la superfície majoritària del país es troba per sobre dels 1500m. Crèdits: Elaboració pròpia.

1.3.2.1 Components del paisatge

Els elements dominants del paisatge andorrà són els biòtics (63,57%) i els abiòtics (28,43%), mentre que els elements antròpics (1,69%) i mixtos (6,38%) són presents en menor proporció (Figura 1.5).

Elements biòtics :

Comprenen principalment boscos, matolls i pastures que ocupen els vessants, altiplans i els fons de les valls, compartint aquest darrer espai amb cultius i prats.

Elements abiòtics:

El paisatge on la roca queda exposada sense vegetació és especialment majestuós a Andorra, amb crestes, pics i regions muntanyenques que defineixen el paisatge alpí clàssic. A més, les formes d'origen glacial mostren la influència dels processos erosius recents als Pirineus.

Zones urbanitzades:

Les àrees urbanitzades ocupen una part mínima del territori, concentrant-se en nuclis compactes i assentaments dispersos, principalment a les àrees més planes i a cotes més baixes, sovint als fons de les valls travessades pels rius principals i en vessants de pendent moderat.

Elements mixts:

Destaquen pel seu ús en activitats agràries, que, encara que en reculada, tenen gran importància històrica, i en activitats relacionades amb l'esquí.

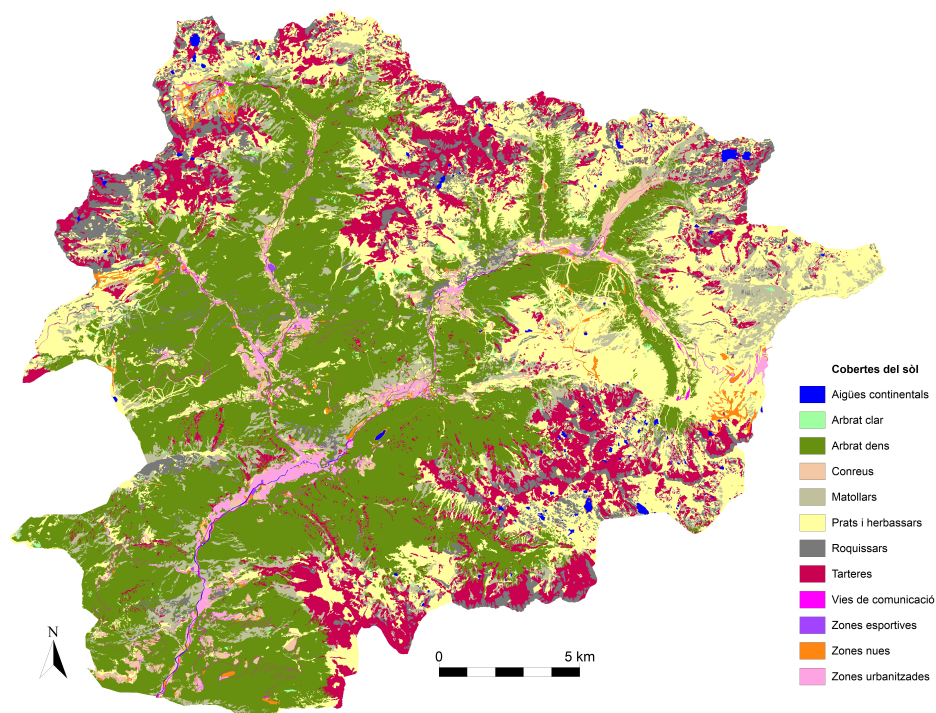


Figura 1.5: Mapa de cobertes del Sòl d'Andorra (2012). Crèdits: AR+I.

1.3.2.2 Història geològica

La història geològica d'Andorra ha modelat completament el paisatge natural i social. Els Pirineus són una serralada de direcció E-W formada durant l'orogènia alpina fa aproximadament 85 milions d'anys, a causa del xoc entre les plaques tectòniques Ibèrica i Eurasiàtica. Aquest xoc va provocar el plegament de les roques preexistents, donant lloc a la formació de la serralada pirinenca.

La zona central dels Pirineus, coneguda com la zona axial, està formada per roques molt antigues d'edat paleozoica, afectades prèviament per l'orogènia herciniana, que va contribuir a la formació del supercontinent Pangea. Andorra es troba íntegrament dins aquesta zona axial, per la qual cosa les seves roques han estat impactades per les dues orogènies.

1.3.2.3 Tipus de roques a Andorra:

Andorra acull els tres grans grups de roques. Les roques d'edat paleozoica predominen, encara que també hi ha formacions més modernes del Plistocè i Holocè, com les roques detrítiques d'origen glacial, al·luvial i fluvial.

Cambroordovicic:

Les roques més antigues del Principat, incloent esquists i pissarres amb intercalacions de calcàries i quarsites.

Ordovícic Mitjà:

Gneisses d'Aston i Hospitalet, antigues intrusions granítiques metamorfitzades durant l'orogènia herciniana.

Ordovícic Superior:

Una sèrie detrítica amb litologies variades com conglomerats, gresos, pissarres, margues, calcàries i quarsites.

Silúric:

Pissarres ampelítiques negres o gris fosc, molt deformades i amb calcàries negres fossilíferes a la part superior.

Devònic:

Roques formades en ambients marins, principalment calcàries i margues amb pissarres i gresos fossilíferes.

Carbonífer-Permià :

Granodiorites que intrueixen a les etapes finals de l'orogènia herciniana, trobant-se tres principals a Andorra: el plutó de Santa Coloma, l'estoc de Fontaneda i el batòlit d'Andorra - Montlluís.

Quaternari:

Materials resultats de l'acció erosiva de glaceres i rius, generant dipòsits detrítics escampats pel territori.

1.3.3 Socioeconomia

El Principat d'Andorra és una nació de 85.330 persones, segons l'estadística del 2023 d'estadistica.ad, situada als Pirineus entre França i Espanya. Andorra la Vella és la capital i altres centres urbans són Escaldes-Engordany, La Massana, Encamp, Sant Julià de Lòria, Ordino i Canillo. L'idioma oficial és el català, però l'espanyol és molt comú en l'ús quotidià a gairebé tots els nivells. També es parla el francès i el portuguès com a resultat de la comunitat habitant del país. La densitat de població és de 164 habitants per quilòmetre quadrat (2020), i l'ingrés per càpita el 2022 va ser de 39.348 €, segons [\[www.estadistica.ad\]](http://www.estadistica.ad) (Taula 1.1). L'esperança de vida és de 83, 5 anys (2022), amb una taxa de creixement d'aproximadament l'1,60% anual el 2022. La seva classificació a l'Índex de Desenvolupament Humà és 0,858, a escala mundial, número 40, segons el PNUD el 2021.

Taula 1.1: Indicadors econòmics del Principat d'Andorra. Crèdits: Govern d'Andorra.

INDICADORS ECONÒMICS
PIB estimat: 3.187 milions d'euros (2022)
Creixement real del PIB: 2,3% (2023, FMI)
Taxa d'inflació: 4,6% (2023)
Balança de compte corrent: -1.416 milions d'euros (2021)
Superàvit públic: 3,2% del PIB (2022)
Taxa d'atur: 2,1% (2023)

El turisme d'hivern és fonamental per a l'economia d'Andorra, representant al voltant del 4% del PIB directament i més del 30% quan s'hi inclouen activitats relacionades com a restaurants, hotels, compres i banys termals. Els complexos d'esquí van generar més de 100 milions d'euros en ingressos el 2018 i van fer servir més de 2.200 persones. Andorra es manté com una de les destinacions més visitades del món d'esquí, amb més de dos milions i mig de dies d'esquí registrats. Compte amb 303 km de pistes d'esquí distribuïts en dos dominis principals: Grandvalira i Vallnord, a més de l'hotel Parador Canaro . Grandvalira, amb 210 km de pistes, va ser el 12è més visitat del món el 2018 (Figura 1.6). Andorra ha invertit a millorar les seves instal·lacions per oferir la millor experiència als visitants, no només en temporada alta sinó també en temporada baixa. A més, els centres d'esquí estan compromesos amb la lluita contra el canvi climàtic, implementant mesures com ara la producció de neu artificial i restringint l'expansió de pistes a altituds baixes.



Figura 1.6: Localització de les estacions d'esquí i diferents sectors a Andorra: Crèdits: Ski Andorra.

La variada oferta turística d'Andorra, que inclou termalisme i compres, li atorga un avantatge competitiu davant d'altres destinacions als Pirineus i als Alps. La internacionalització del turisme d'esquí, amb esdeveniments com la Copa del Món FIS d'Esquí Alpí, ha contribuït a la reputació d'Andorra en l'àmbit mundial de l'esquí. A l'estiu, el turisme continua amb activitats com el Bike Park de Vallnord i el Family Park Montmàgic de Canillo, diversificant i desestacionalitzant l'oferta turística.

Tot i la seva petita superfície, Andorra té una alta densitat de població, 181 habitants/km² (2023). A les zones urbanes, com Andorra la Vella i Escaldes- Engordany, la densitat és encara més gran. La població ha crescut exponencialment des de mitjans del segle XX, passant de 5.385 habitants el 1947 a més de 85.000 el 2023, impulsada pel desenvolupament econòmic i la immigració. Andorra és un dels pocs països on la població estrangera (51,3%) supera la nacional (48,7%). Les nacionalitats més representades són l'espanyola (24,8%), la portuguesa (11,9%) i la francesa (4,4%).

Pel que fa a l'energia, Andorra depèn en gran mesura de les importacions de combustibles fòssils (75,5%) i energia elèctrica, i supera el 90% de la demanda nacional. La producció nacional d'energia elèctrica cobreix el 20,1% de la demanda, principalment a través d'energia hidràulica i valorització energètica de residus. La cogeneració i l'energia fotovoltaica estan augmentant, diversificant la producció energètica nacional. El país també importa una part significativa dels seus combustibles, molts dels quals es consumeixen fora del país a causa del fenomen del “*fuel tourism*”.

La indústria i la manufactura tenen un paper limitat en l'economia andorrana i només representen el 0,6% del VAB el 2019. No obstant això, s'ha observat un creixement en aquests sectors, amb un augment del nombre d'assalariats i establiments. L'agricultura i la ramaderia, tot i que són marginals en termes econòmics, són importants per al manteniment del paisatge i la biodiversitat del país. La ramaderia es basa en mètodes tradicionals, i l'associació de Ramaders d'Andorra promou la Carn d'Andorra sota segells de qualitat reconeguts per la UE.

Finalment, el sector serveis és el més significatiu, amb 8.291 empreses i el 87% dels treballadors treballant en aquest sector. El comerç és un atractiu turístic clau, amb preus competitiu, horaris flexibles i una àmplia oferta de productes. El turisme és fonamental per a l'economia, representant el 86,5% del VAB el 2019 i atraient prop de 8 milions de visitants anualment. Les activitats d'hivern i estiu diversifiquen l'oferta turística, convertint Andorra en una destinació atractiva durant tot l'any.

1.3.4 Climatologia

1.3.4.1 Global

A continuació, es presenta una introducció breu sobre la climatologia general a escala mundial i regional a Andorra per contextualitzar la zona d'estudi d'aquesta recerca.

La Terra ja s'ha escalfat i refredat altres vegades de forma natural. No obstant això, aquests cicles sempre havien estat molt més lents, necessitant milions d'anys, mentre que ara i a conseqüència de l'activitat humana, estem arribant a uns ritmes de variació climàtica que en altres èpoques van portar extincions en només dos-cents anys.

Actualment, la temperatura mitjana mundial és 0,85°C superior a la de finals del segle XIX (Figura 1.7). Cadascuna de les tres dècades anteriors ha estat més càlida que

qualsevol de les precedents des que van començar a registrar dades, el 1850 (Beniston et al., 2018; Copernicus, 2020; European Unió, 2020; Furdada, 2006).

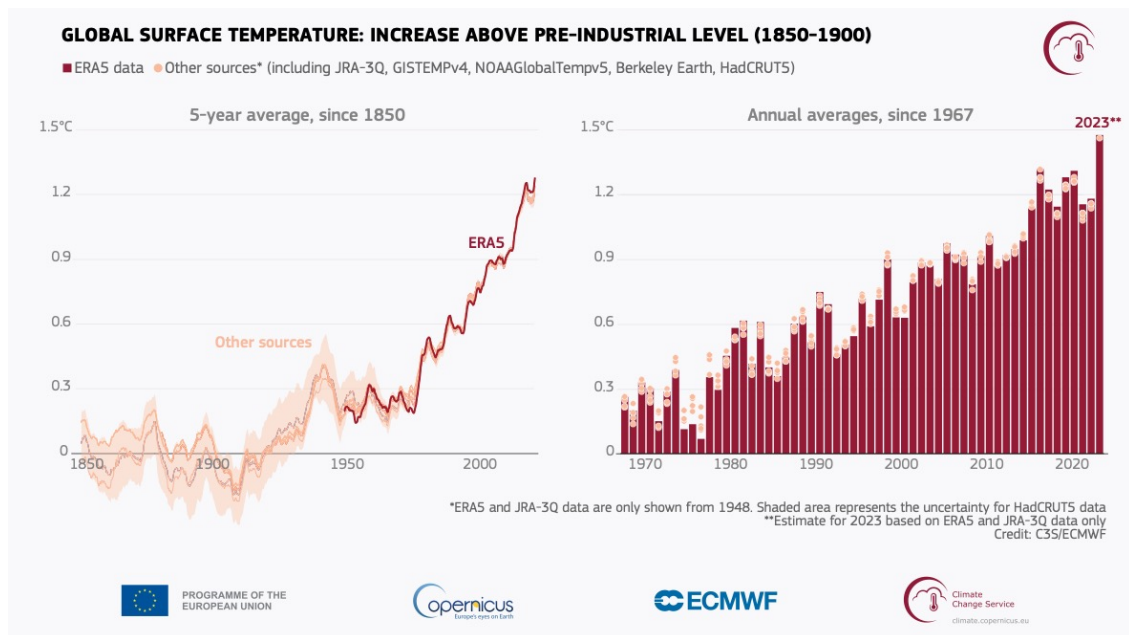


Figura 1.7: La temperatura de l'aire a la superfície global (°C) augmenta per sobre de la mitjana del període de referència preindustrial de 1850 a 1900, segons diversos conjunts de dades de temperatura global que es mostren com a mitjanes de cinc anys des de 1850 (esquerra) i com a mitjanes anuals des de 1967 (dreta). Crèdits: C3S

La gran majoria de la comunitat científica considera que és una evidència que l'activitat humana és molt probablement la causa principal de l'augment de la temperatura registrat des de mitjans del segle XX. Els científics consideren que un augment de 2°C respecte a la temperatura de l'era preindustrial és el límit més enllà del que hi ha un risc molt més gran que es produeixin canvis perillosos i catastròfics per al medi ambient global (Figura 1.8). Per això, la comunitat internacional ha reconegut la necessitat de mantenir l'escalfament per sota de 2 °C (Copernicus, 2020).

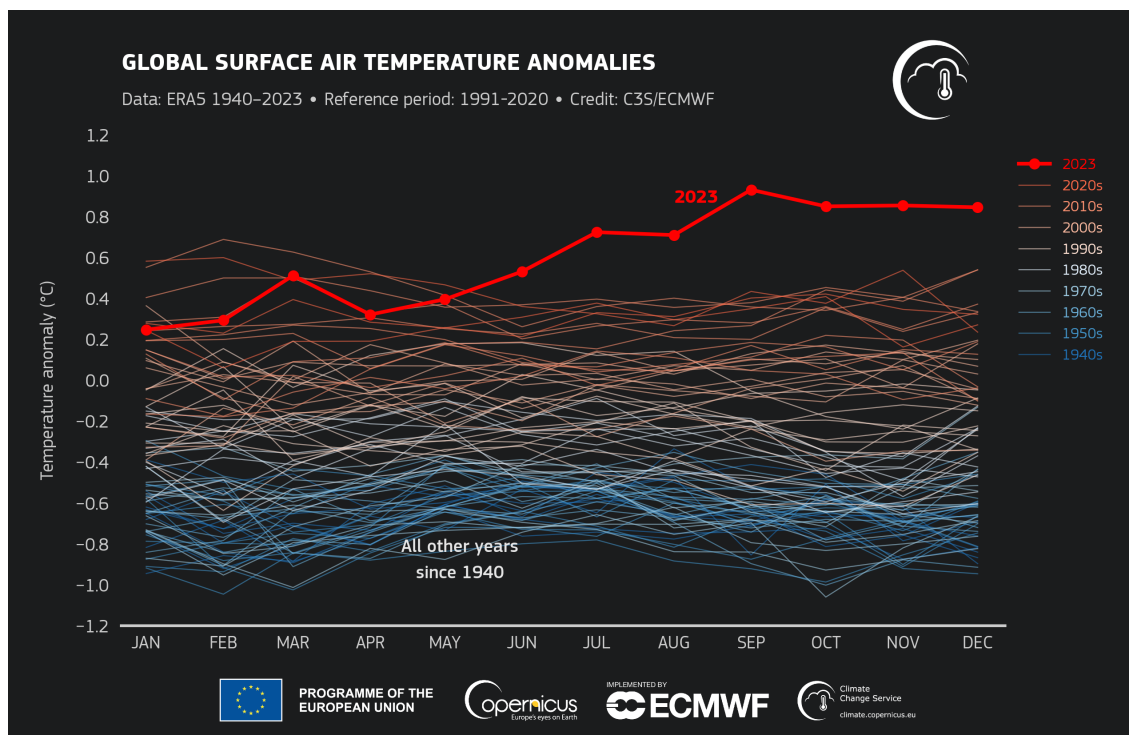


Figura 1.8: Anomalies mensuals de la temperatura superficial global de l'aire [1] (°C) en relació amb el període 1991-2020 des de gener de 1940 fins a desembre de 2023, representades com a sèries temporals per a cada any. L'any 2023 es mostra amb una línia vermella gruixuda, mentre que els altres anys es mostren amb línies fines i ombrejades segons la dècada, des de blau (dècada de 1940) fins a vermell maó (dècada de 2020). Font de dades: ERA5. Crèdits: C3S

1.3.4.2 Andorra

Situada al cor de la zona central de la bioregió alpina dels Pirineus, Andorra presenta un clima de muntanya humit de latitud mitjana amb influència mediterrània a la zona sud, on es manifesten característiques de clima mediterrani continental. Les temperatures a Andorra evolucionen d'acord amb les variacions típiques de l'hemisferi nord, amb una mitjana anual de 7,93 °C (basat en dades del 1950-2019). Gener és el mes més fred, amb una temperatura mitjana de 0,3 °C, mentre que juliol és el mes càlid, aconseguint una mitjana de 11,27 °C. Les temperatures segueixen un patró definit per un gradient mitjà anual negatiu, variant de -0,4°C/100m en els mesos amb més inversió tèrmica (octubre-gener) a -0,6°C/100m la resta de l'any (mitjana anual de - 0,48°C/100m per a tota la regió i de -0,52°C/100m específicament per a Andorra).

Les precipitacions a Andorra són del tipus EAPH, i són més abundants a l'estiu (273 mm), seguides per la tardor (259 mm), la primavera (237 mm) i l'hivern (181 mm). La precipitació mitjana anual és de 840 mm (dades de 1950-2019), influïda per un gradient longitudinal que va de l'Atlàntic al Mediterrani i per un gradient altitudinal positiu, amb

una mitjana d'increment de 11,5 mm de precipitació per cada 100 metres d'altitud als Pirineus. El recurs hídric anual d'Andorra s'estima en 286 Hm³ (1950-2010) utilitzant un enfocament de balanç hídric anual, i en 222 Hm³ en considerar l'ús mensual de la reserva de sòl.

Durant un any climatològicament normal, la reserva hídrica d'Andorra s'omple des de mitjan primavera fins a principis d'estiu i es buida a l'estiu i es recupera a la tardor. En anys secs, aquest cicle s'altera, esgotant les reserves durant l'estiu i recuperant-les només parcialment a la tardor. Això pot comportar dificultats en la gestió de recursos hídrics locals. Per monitorar i comprendre el canvi climàtic als Pirineus, Andorra va participar en l'estudi Climpy, gestionat per l'Observatori Pirinenc del Canvi Climàtic (OPCC-2). Aquest estudi ha mostrat un augment de la temperatura mitjana als Pirineus de +0,24°C per dècada i una disminució de la precipitació anual del -1,87% (1959-2015).

El mateix estudi va predir que la temperatura màxima diària podria augmentar entre 4 i 6,3 °C i la temperatura mínima entre 3,2 i 4,9 °C per al període 1986-2005, depenent dels escenaris d'emissions de gasos amb efecte d'hivernacle. Per a Andorra, les dades de l'Oficina de l'Energia i el Canvi Climàtic indiquen que la temperatura mitjana anual ha augmentat +0,21°C per dècada des del 1950 i +0,36°C per dècada en els darrers 50 anys (1970-2019). La precipitació mitjana anual ha disminuït en -22,1 mm per dècada des del 1950. A més, l'estudi Climpy va avaluar la disminució del mantell nival als Pirineus, especialment a partir dels 2.100 metres d'altitud.

Aquests efectes del canvi climàtic ja són perceptibles a Andorra, afectant tant els ecosistemes com els habitants i les activitats econòmiques del país. Segons el quart informe de l'IPCC, les regions muntanyoses com Andorra són particularment sensibles a les variacions climàtiques, cosa que tindrà implicacions significatives en múltiples aspectes de l'entorn i la societat.

A Andorra la tendència és semblant als canvis mundials i a continuació es presenten les característiques generals de la climatologia del país a escala regional. El clima d'Andorra és molt condicionat pels contrastos d'altitud i per l'orientació de muntanyes i valls. Andorra constitueix la medul·la axial dels Pirineus. Superficialment, amb només 468 km², els contrastos latitudinals són climàticament poc significatius.

La informació que es presenta a continuació ha estat validada per l'Observatori de Muntanya d'Andorra (OMA). L'Observatori de la muntanya d'Andorra és una iniciativa

del Centre d'Estudis de la Neu i de la Muntanya (CENMA) de l'Institut d'Estudis Andorrans (IEA), creada el 2013 amb l'objectiu de fer conèixer l'evolució dels elements físics i biòtics d'Andorra mitjançant indicadors científics. Els indicadors representats en aquesta pàgina web són el resultat de la investigació científica relacionada amb diversos estudis de seguiment que es desenvolupen des d'Andorra Investigació + Innovació en el context andorrà. L'eina de consulta OMA, amb vocació d'ampliar-se, està pensada per aportar coneixements i possibilitar la presa de decisions a tota mena d'usuaris: estudiants, professionals, administració i agents socioeconòmics. Els indicadors ambientals que es presenten permeten avaluar les polítiques ambientals locals, regionals i planetàries, i per això es fan servir a molts països d'Europa i Amèrica. S'utilitzen molts i molt variats, però tots intenten respondre la pregunta clau: Què passa?

L'anàlisi de la temperatura es basa en les anomalies respecte de la mitjana del període de referència. S'ha aplicat un filtre gaussià per suavitzar la mitjana mòbil, obtenint així una representació més clara de les tendències. Els principals resultats són els següents (Taula 1.2):

- Increment de la temperatura mitjana a l'estiu: la temperatura mitjana durant l'estiu s'incrementa a un ritme de 0,29°C per decenni.
- Augment de la Temperatura Mínima: S'observa un augment de la temperatura mínima tant a l'estiu com a la primavera.
- Increment de la temperatura màxima anual: la temperatura màxima anual mostra una tendència d'increment a un ritme de 0,22°C per decenni.
- Increment de la temperatura mitjana anual: hi ha un augment de la temperatura mitjana anual de 0,18 °C per decenni des de 1950, estadísticament significatiu en un nivell de confiança del 95% segons el test de Mann-Kendall.
- Tendència de la Temperatura a l'hivern: L'hivern mostra una tendència positiva a les temperatures màximes de 0,20°C per decenni.

Taula 1.2: Tendències de temperatura a Andorra. Crèdit: Andorra RI.

°C/dec	ANUAL	HIVERN	PRIMAVERA	ESTIU	TARDOR
Temperatura mitjana	0,18*	0,16*	0,20*	0,29*	0,10
Temperatura màxima	0,22*	0,20*	0,22*	0,33*	0,13
Temperatura mínima	0,15*	0,12	0,17*	0,24*	0,07

Aquesta taula mostra la tendència de la temperatura mitjana anual i estacional, expressades en °C per decenni, per al conjunt de les 3 sèries climàtiques considerades

i per al període 1950-2015. Els valors amb asterisc indiquen si l'increment o la disminució és estadísticament significatiu per a un nivell de confiança del 95% segons el test de Mann-Kendall.

Pel que fa a les precipitacions, les dades mostren les tendències següents (Taula 1.3):

- Tendència anual: La precipitació anual per al conjunt d'Andorra mostra una lleugera tendència a la disminució de -2,6% per decenni, però no és estadísticament significativa. Els darrers tres anys han presentat anomalies positives, especialment el 2014 amb una anomalia del 20% respecte a la mitjana climàtica 1981-2010.

- Tendència hivernal: L'hivern, després de l'estiu, mostra una tendència negativa en les precipitacions de -8,7 mm per decenni, i aquesta és estadísticament significativa.

Taula 1.3: Tendències de Precipitació a Andorra. Crèdit: Andorra RI.

	ANUAL	HIVERN	PRIMAVERA	ESTIU	TARDOR
mm/ dec	-19,61	-8,70*	-2,30	-11,00*	1,81
%/ dec	-2,60	-6*	-1,20	-5,2*	-0,80

Aquesta taula mostra la tendència de la precipitació anual i estacional, expressada en mm/decenni i %/decenni, pel conjunt de les 3 sèries climàtiques considerades i pel període 1950-2015. L'asterisc al costat del valor numèric indica que l'increment o la disminució és estadísticament significatiu per a un nivell de confiança del 95% segons el test de Mann-Kendall.

Les dades presentades reflecteixen un clar escalfament global a Andorra, amb increments significatius tant a les temperatures mitjanes com a les màximes anuals. Paral·lelament, es detecta una lleugera tendència a la disminució de les precipitacions anuals, encara que no és significativa. L'estudi continuat i el monitoratge d'aquestes tendències seran essencials per adaptar-se als canvis climàtics futurs i per minimitzar-ne els impactes a la societat i als ecosistemes d'Andorra. Els índexs s'han actualitzat fins al 2015, període per al qual es disposa de les dades homogeneïtzades i amb el control de qualitat necessari per a la correcta avaluació estadística de la variació i les tendències de cada variable treballada en el marc del projecte CLIMPY: Caracterització de l'evolució del clima i la provisió d'informació per a l'adaptació als Pirineus (EFA 081/15).

Pel que fa al seguiment, control i monitoratge, el servei meteorològic andorrà compta actualment amb 33 estacions meteorològiques. D'aquestes, funcionen només a l'hivern

i són de recollida de dades manual: Pal, Arcalís, Arinsal, Grau Roig, Soldeu i Pas de la Casa. La resta està en funcionament tot l'any.

1.4 El risc d'allaus a Andorra. El fenomen, la prevenció i la protecció davant del perill

1.4.1 *Introducció*

El tercer capítol d'aquesta recerca se centra en conceptes teòrics sobre les allaus que han evolucionat molt en la darrera dècada, abordant tant la naturalesa del fenomen com les estratègies de gestió, prevenció i protecció davant d'aquest perill. Es tracta d'un capítol que conté informació bàsica per conèixer els procediments operatius en la gestió de riscos d'allaus, on es mostra l'especificitat, variabilitat i complexitat a l'hora de treballar en el dia a dia de les operatives diàries. A més, no és normal que el públic en general ni els investigadors que no estan centrats al 100% en l'operativa estiguin familiaritzats amb aquests procediments, i és per això que he decidit donar-li un apartat específic per valorar aquestes consideracions que van evolucionant a mesura que el coneixement científic és més gran, en una ciència es considera una ciència relativament nova. La nivologia s'encarrega de l'estudi de la neu, incloent-hi les seves propietats físiques, la seva formació, la seva evolució, i els processos associats, com ara les allaus. Aquesta especialitat ha guanyat importància en les darreres dècades, especialment amb l'increment de la població en zones muntanyoses, l'expansió de les infraestructures i els dominis esquiables, i la necessitat de gestionar els riscos associats amb les allaus per protegir tant les persones com les infraestructures. Tot i que la gent ha estudiat la neu i les allaus des de fa molt de temps, la formalització i el desenvolupament científic d'aquesta disciplina són relativament recents.

El capítol comença amb una descripció sobre conceptes bàsics de les allaus, incloent-hi definicions clau i la caracterització del fenomen. A través de la col·laboració amb els Serveis Europeus d'Alerta d'Allaus (EAWS), s'estableixen estàndards i directrius que permeten una millor comprensió i gestió d'aquests esdeveniments. La història i evolució d'aquests serveis, juntament amb la introducció d'eines com l'Escala de Perill d'Allaus i la Matriu EAWS, han estat fonamentals per millorar la seguretat a les regions muntanyoses d'Europa.

A més, s'analitzen els tipus de problemes d'allaus identificats per EAWS, que ajuden tant a professionals com a recreacionistes a avaluar el perill en terrenys propensos a

aquests desplaçaments. Aquests problemes, juntament amb els patrons de perill, proporcionen un marc clau per a la predicció i gestió d'allaus, i això permet una ràpida identificació de situacions perilloses i la presa de decisions informades per evitar accidents.

Finalment, es destaquen les estratègies de protecció i prevenció implementades a Andorra, que inclouen tant mesures estructurals, com la construcció de barreres i dics, com no estructurals, que abasten des de la reforestació fins al desencadenament artificial d'allaus. El capítol subratlla la importància de l'educació i la conscienciació de la població sobre els riscos associats a les allaus, fet que és essencial per reduir-ne l'impacte i protegir la vida i els béns en aquest entorn muntanyós tan particular.

Per elaborar gran part d'aquest apartat s'han consultat els diferents procediments d'operatius i directrius de l'EAWS.

1.4.2 La protecció davant del perill i les mesures de defensa

A Andorra, hi ha nombrosos serveis operatius que s'activen i es mobilitzen per gestionar el risc d'allaus i respondre a incidents/accidents relacionats amb ells. Aquests serveis inclouen una varietat d'organismes i departaments que treballen en diferents àrees, des del rescat fins a l'observació, la predicció i la formació.

L'assistència tècnica del Govern d'Andorra per a la predicció del risc d'allaus a les carreteres del país té 5 tipus d'accions establerts (Taula 1.4):

Taula 1.4: Accions a desenvolupar per la Assistència Tècnica. Crèdits: Govern d'Andorra.

Accions de l'Assistència tècnica per a la prevenció d'accidents d'allaus a Andorra

Conèixer l'estabilitat del mantell nival a cada zona de sortida (estat inicial)

Preveure l'evolució del perill d'allaus en funció del butlletí niu -meteorològic i de les observacions sobre el terreny.

Efectuar un "peritatge" d'estimació d'un risc localitzat quan la situació és preocupant.

Desencadenar preventivament l'allau després d'evacuar la zona en qüestió prevista pel PIDA.

Prohibició de la circulació o evacuació dels habitatges amenaçats si els trets no són possibles.

L'empresa responsable ha de realitzar els treballs encomanats observant totes les obligacions que li són pròpies, juntament amb les directrius i instruccions que rebí del Ministeri d'Ordenament Territorial, especialment pel que fa a prioritats, terminis i

modalitats d'execució de cadascuna de les operacions previstes (Taula 1.5). En el desenvolupament de les tasques ha de complir totes les Ordenacions, Decrets i Reglaments andorrans vigents sobre seguretat, construcció en general, instal·lacions diverses, etc...

L'assistència tècnica per a la seguretat d'allaus s'efectua per defecte des del dia 1 de novembre fins al 30 d'abril de cada temporada hivernal. Si les condicions meteorològiques ho justifiquen, aquest període és ampliat.

Taula 1.5: Funcions i responsabilitats de cada servei operatiu a Andorra en relació amb la Gestió del Risc d'Allaus. Crèdits: Elaboració pròpia.

Servei/organització	Tasques a realitzar
Servei Meteorològic d'Andorra	Predicció regional Observació nivometeorològica Prevenió i sensibilització per a la població Investigació Formació
Meteo -France	Predicció regional
Andorra Investigació + Innovació	Observació nivometeorològica Investigació Prevenió i sensibilització per a la població Formació
Departament de Protecció Civil i Gestió d'Emergències	Coordinació Plans d'emergència Prevenió i sensibilització per a la població Formació
Pisters -Socorristes de les estacions d'esquí	Suport logístic Rescat i auxili Observació nivometeorològica Predicció local del perill d'allaus Desencadenament artificial d'allaus
Assistència Tècnica COEX - Govern d'Andorra	Observació nivometeorològica Predicció local del perill d'allaus Cartografia Desencadenament artificial d'allaus Assessorament
Banders	Observació nivometeorològica Suport en rescat - socors
Bombers	Rescat - socors Formació Desencadenament artificial d'allaus
Polícia	Diligència judicial Investigació Rescat-auxili
Agents de Circulació dels Comuns	Suport logístic Suport tècnic Suport en rescat-auxili
Servei Andorrà d'atenció Sanitària	Assistència sanitària Rescat-auxili
Heliand	Transport per helicòpter Suport tècnic en rescat, observació nivometeorològica i cartografia Desencadenament artificial d'allaus

Departament d'Ordenació del Territori	Ordenació territorial Cartografia Cadastre d'allaus Zonificació reglamentària de la perillositat d'allaus Transport per cable
Assistència tècnica externa del Govern d'Andorra COEX	Assessorament a la zonificació reglamentària de la perillositat d'allaus Vialitat hivernal Suport logístic Suport tècnic Suport en rescat-auxili
Mitjans propis comunals	Vialitat hivernal Suport logístic Suport tècnic Suport en rescat-auxili
Empreses de l'àmbit privat	Suport tècnic Assessorament
Creu Roja andorrana	Suport logístic Suport en rescat-auxili
Associació club moto de neu d'Andorra	Suport logístic Suport en rescat-auxili
Associació de guies i acompanyants de muntanya d'andorra Estacions d'esquí	Prevenció i sensibilització per a la població Suport en rescat-auxili Suport logístic Transport per cable
Empreses de l'àmbit privat	Suport tècnic Assessorament
Escola de Formació de Professions Esportives i de Muntanya	Prevenció i sensibilització per a la població Suport en rescat-auxili Formació
Empreses de l'àmbit privat	Suport tècnic Assessorament

La mortalitat per allaus a Andorra és baixa (Figura 1.9), si la comparem amb les dades a escala Pirinenca o escala dels Alps o Amèrica del Nord, però a l'hora d'interpretar aquestes dades cal tenir en compte l'extensió d'àrees vulnerables a aquest fenomen, a més d'altres dades com les activitats que es fan a la muntanya, o les poblacions i infraestructures que estan exposades.

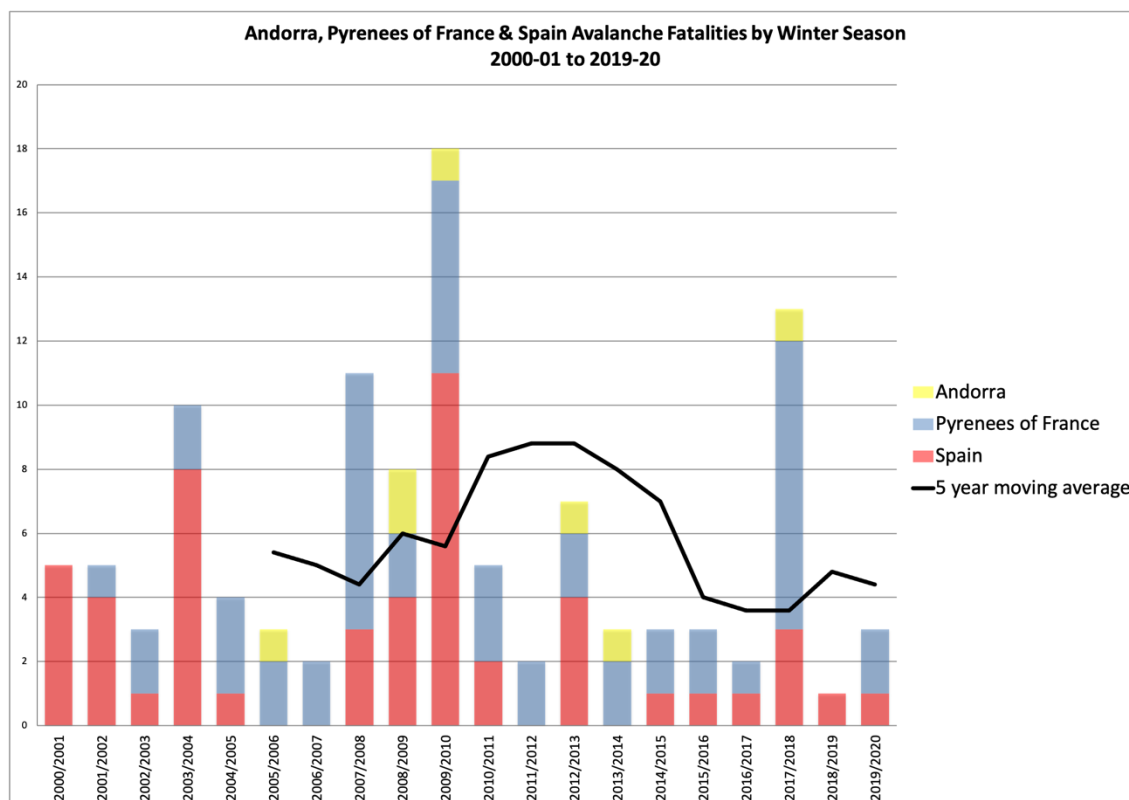


Figura 1.9: Nombre de víctimes mortals per allaus a Andorra, els Pirineus de França i Espanya segons la temporada d'hivern (2000-01 a 2019-20). Crèdits: Elaboració pròpia.

A l'estudi, *Le Risque d'Avalanche à Andorre . Études 1971-1996* (Becat, 2014), es descriuen les allaus, els factors favorables i les situacions de risc, especialment a les zones habitades i dins de les estacions d'esquí i els seus voltants (Figura 1.10 i Figura 1.11). Es tracta d'una obra referent respecte a aquesta perillositat al país.

Històricament, a Andorra s'han fet diferents actuacions vinculades amb la gestió del risc d'allaus. El 1971, una allau mortal al cor de la nova estació d'esquí del Pas de la Casa va fer que es prengués consciència d'aquest perill. Tot i això, després d'alguns estudis puntuals, la cartografia sistemàtica del risc d'allaus no es va iniciar fins al 1981, sota l'impuls del Consell General i d'un Govern de creació recent. La legislació es va aprovar el 1989. En quinze anys, la major part del territori afectat per aquest perill va ser coberta i es va crear un sistema innovador d'informació, vigilància i alerta que va permetre evitar una catàstrofe a Arinsal durant l'episodi més gran d'allaus del 8 de febrer de 1996, que va afectar tot Andorra (Becat, 2014). Es va produir un dels episodis d'allaus més grans d'Europa a una zona habitada (Furdada et al., 2020). Aquell dia van tenir lloc dues allaus, la primera provinent de la zona de Percanella i la segona de la Coma de les Fonts . L'allau de Percanella va tallar la carretera durant aproximadament cent metres, i la gran quantitat de neu dipositada va dificultar la posterior evacuació de les persones.



Figura 1.10: L'allau va cobrir tota la zona del Solà d'Arinsal el febrer del 1996. Crèdits: SFG

Courbe d'altitude 1600m et zones à risque d'avalanche potentiel.

Principales avalanches menaçant les zones urbanisées ou les communications.

Avalanches meurtrières récentes.

Principales zones présentant des instabilités potentielles des versants.

Grands glissements quaternaires.

Mouvements de terrain récents.

Zones affectées par l'aiguat de 1982.

L'allau de les Fonts va ser la que va tenir més impacte, i va causar nombroses destrosses i danys a la zona d'arribada. La zona d'inici de l'allau va abastar gairebé tota la Coma de les Fonts, deixant un tall al mantell nival d'entre 1,2 i gairebé 2 metres d'alçada, mobilitzant un volum extraordinari de neu. S'estima que es van desprendre al voltant d'1.800.000 metres cúbics de neu, aconseguint velocitats de més de 300 km/h i pressions de més de 600 kPa. La catàstrofe no va causar cap víctima mortal perquè més de 300 veïns van ser evacuats a temps, però va deixar la zona sepultada sota un gruix de més de sis metres de neu, troncs i branques, causant nombrosos danys materials als edificis, infraestructures de pistes i atots els vehicles estacionats a la zona.

51

la zona. A la zona d'inici de l'allau de les Fonts, nou Gàzex permeten fer detonacions preventives per desencadenar petites allaus controlades i evitar la formació de grans allaus com la del 1996. A la zona de Percanella es van instal·lar 580 xarxes per estabilitzar i retenir el mantell de neu. Per reforçar aquest efecte, es van plantar arbres entre les xarxes.

Aquest esdeveniment va marcar un abans i un després en la gestió del risc d'allaus a Andorra. Des d'aleshores, el país ha desenvolupat una sèrie d'eines per controlar al màxim el risc d'allaus i conviure amb aquest fenomen per tal de minimitzar els possibles impactes sobre la població.

El 1981, es van començar a realitzar els primers mapes de localització probable d'allaus (CLPA), elaborant mapes per a tot el país i homogeneïtzant-los al Cadastre d'allaus d'Andorra finalitzat el 2002 (Furdada i Ferrer, 2001), una eina fonamental i essencial per a l'Ordenació Territorial del país (Figura 1.12).

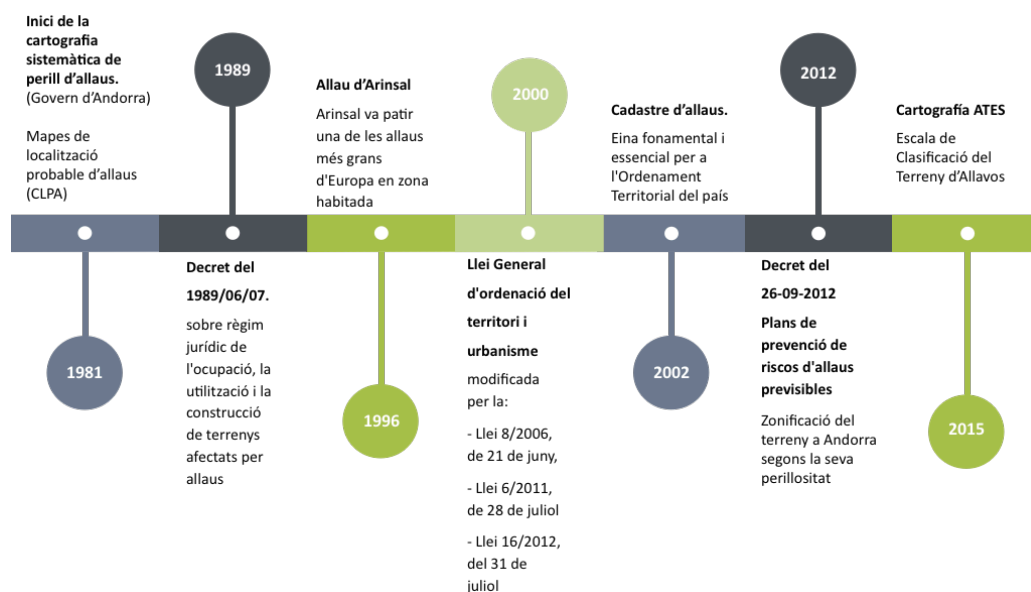


Figura 1.12: Cronologia històrica de les accions principals relacionades amb allaus els darrers anys a Andorra. Crèdits: Elaboració pròpia.

El 1989, es va aprovar el Decret del 17/06/1989 sobre règim jurídic de l'ocupació, la utilització i la construcció de terrenys afectats per allaus.

Del 2000 al 2012, es va elaborar la Llei General d'ordenació del territori i urbanisme, modificada per la Llei 8/2006, del 21 de juny, per la Llei 6/2011, del 28 de juliol, i per la Llei 16/2012, del 31 de juliol, amb la intenció de protegir les persones i els béns de les

conseqüències que es puguin ocasionar en determinades situacions de perill o risc, que preveu a l'article 49, les "Zones exposades a riscos naturals" (Areny et al ., 2004)

El 2012, el Govern, per Decret del 26-09-2012, va publicar l'estudi pel qual s'aprova la zonificació del terreny a Andorra segons la perillositat degut a l'afectació per allaus, titulat "Plans de prevenció de riscos d'allaus previsibles", i la cartografia de la zonificació de la perillositat (Fig.6). A partir de l'any 2015, el CENMA, a petició d'Andorra Turisme, comença a fer la cartografia ATEs, una eina per a la gestió del risc d'allaus en activitats recreatives a la muntanya.

Durant els darrers anys, des de l'Andorra Recerca + Innovació s'han coordinat diferents projectes i informes sobre caracterització silvícola de masses protectores contra allaus de neu a diferents parròquies (Font, 2016).

El Principat d'Andorra és especialment sensible al risc d'allaus, tenint en compte sobretot el grau d'exposició dels assentaments urbans i de les infraestructures vitals; emplaçats en molts casos a la zona natural de trajectòria i darribada de la allau (Taula 1.6). El servei ecosistèmic de regulació del risc d'allaus que ofereixen els boscos de protecció és un dels elements de defensa permanent activa (prevenció del desencadenament) més eficients a l'hora de mitigar vulnerabilitat i garantir la protecció civil de la societat andorrana (Font, 2016).

Aquests estudis sobre boscos donen continuïtat a la metodologia desenvolupada pel CENMA i la Universitat de Lleida durant el 2009, per obtenir un protocol operatiu que va permetre la determinació i classificació de les masses amb funció protectora d'allaus a la parròquia de La Massana (Solé et al., 2009). Des de la publicació d'aquesta metodologia s'han realitzat estudis basant-se en la mateixa metodologia a les parròquies d'Ordino, Canillo i Encamp. Actualment està en procés de redacció l'estudi de la parròquia de Sant Julià de Lòria, quedant només pendent l'estudi de la Vall del Madriu, Perafita i Claror per concloure aquests treballs de boscos protectors a l'àmbit nacional.

Tot i la gran quantitat d'informació disponible i generada pel Govern o altres actors implicats en la gestió del risc d'allaus i la importància que té la neu en el desenvolupament econòmic i turístic del país, hi ha una gran manca de feines científiques sobre neu i allaus a Andorra.

El poc material disponible és el generat per l'Institut d'Estudis Andorrans (Mases, 2005, 2005b; Taillandier, 2001) són de caràcter sobretot divulgatiu i didàctic. També hi

ha alguna comunicació a congressos i jornades tècniques sobre la gestió del risc a carreteres (Meffre, 2001) o sobre l'avaluació de l'impacte dels cursos de formació en seguretat en terreny de neu i allaus a Andorra (Margalef i Esteban, 2013).

Taula 1.6: Zones de seguiment i control per risc d'allaus a Andorra. Crèdits: Govern d'Andorra.

Zones i infraestructures viàries amb seguiment i actuació mitjançant desencadenament controlat d'allaus

- 1.- Allau de la Gavatxa : protegit per barreres de vent, xarxes i dents de fre.
 - 2.- Allau de la Guardiola: afecta la CG-2. Disposa dun dispositiu de desencadenament controlat tipus GAZEX.
 - 3.- Allau de Torradella, situat entre els Plans i l'Aldosa de Canillo, afectant la CG-2. Disposa de xarxes construïdes a l'estiu del 2004.
 - 4.- Allau de l'Armiana : afecta la CG-2 i la zona habitada d'Aina. Disposa de xarxes instal·lades a l'estiu del 2005.
 - 5.- Canal del Tabanell, situat entre els pobles d' Arans i la Cortinada, amb possible afectació a la CG-3. No està protegit.
 - 6.- Canal del Cresp, situat a prop del poble d' Arans, afecta la CG-3. Disposa d'un dic de contenció construït l'estiu de 2004.
 - 7.- Les Salines (allaus de Seig i dels Brossos), situat a prop del poble de Llorts, afecta la CG-3. No està protegit.
 - 8.- Zona de la Guardiola: protegida amb barreres de fusta.
 - 9.- Canal de Nicolau, situat a prop del Serrat, amb possible afectació a la CG-3. Equipat amb barreres de fusta ancorades.
 - 10.- Vessant sud de Laverdú i del bec de Besali, situats a la zona d' Encodina, amb possible afectació a la CG-3. No està protegit.
 - 11.- Pendants dels Basers del Corb i del Tamany, situades a la CG-3 accés a Arcalís . Disposa d'un canó Avalancheur.
 - 12.- Fonts d' Arinsal, situat a prop del poble d' Arinsal, afecta la CG-5. Aquesta zona disposa d'un dic de contenció i està equipada amb diversos GAZEX (dispositiu mecànic de desencadenament controlat d'allaus).
 - 13.- Passadís de l'Avier-Percanela, situat al costat de l'aparcament d' Arinsal .
 - 14.- La carretera de Montaup .
 - 15.- La carretera de la Coma de Ransol . No protegit.
 - 16.- La carretera de la Vall d'Incles . No protegit.
 - 17.- Allau de l'Hortell, situat a la CG-3 zona d' Arcalís, amb incidència entre els PK 20+610 i el PK 23+050. Aquesta zona està equipada amb el sistema GAZEX (dispositiu mecànic de desencadenament preventiu d'allaus).
-

Aquests treballs s'han de fer sempre independentment de la situació hivernal que es presenti. A continuació, es detallen els treballs o les operacions que també s'han de fer però que no es poden quantificar, perquè el nombre d'intervencions depèn de la climatologia de l'hivern (Taula 1.7). Les intervencions s'han de justificar mitjançant una anàlisi del mantell nevós, amb l'obligació de fer un informe després de cada intervenció. En aquest cas, i extrapolant dades d'hiverns anteriors, es poden donar dades de la quantitat d'actuacions que correspondria a un hivern mitjà.

Taula 1.7: Llistat de treballs a l'assistència tècnica per a la gestió del risc d'allaus. Crèdits: Govern d'Andorra.

Treballs i operacions complementàries de l'Assistència Tècnica de Predicció d'Allaus
Sondejos amb interpretació del perfil a Les Salines, Percanela, Les Fonts, etc. S'estima una mitjana total de 20 sondejos.
Trets amb el Canó Avalancheur - gestió de l'estoc inclosa - o purgues amb explosiu. S'estima una mitjana de 10 operacions a tot l'hivern.
Peritatge del risc.
Trets dels GAZEX de Les Fonts - incloent el control del funcionament (S'estima una mitjana de 10 operacions a tot l'hivern)
Trets dels GAZEX de La Guardiola - amb posada en obra del PIDA (S'estima una mitjana de 10 operacions a tot l'hivern)
Intervencions als GAZEX o al FLOWCAPT - detecció d'avaries, etc. (S'estima una mitjana de 4 operacions a tot l'hivern.)
Actuacions des de l'helicòpter - preparació inclosa -. S'estima una mitjana de 2 operacions a tot l'hivern.
Operacions d'identificació d'allaus i avaluació del risc. Aquestes operacions es realitzaran mitjançant vols de reconeixement en helicòpter que permetran identificar, actualitzar i cartografiar les diferents allaus ocorregudes durant la campanya hivernal.
S'emet un informe tècnic de cada vol, així com la cartografia/cadastre de les diferents allaus observades mitjançant l'ús d'un sistema GIS que haurà de ser compatible amb els procediments de cartografia del govern.
L'informe tècnic d'allaus haurà d'identificar les característiques bàsiques de cada fenomen allau observat:
Tipus d'allau
Desencadenament (provocat o natural)
Descripció geomorfològica del vessant (alçada, orientació, pendents, vegetació)
Dimensió de l'allau utilitzant l'escala internacional
Afectació de l'allau (infraestructures, via pública, etc.)
Condicions climàtiques del desencadenament.

En totes aquelles operacions on s'efectuïn trets tant de GAZEX com del Canó Avalancheur i per tant amb afectació a la CG2 (allau de la Guardiola), a la CG3 (allaus del Corb i l'Hortell) i a la zona d' Arinsal (allau de les Fonts), sempre i obligatòriament, el contractista ha de notificar amb la suficient antelació, tant al servei de Policia com als efectius del COEX de la intenció d'efectuar els tirs preventius de desencadenament d'allaus per efectuar la tanca, si escau, de la zona afectada.

Andorra està completament adaptada i compromesa amb la gestió del risc d'allaus i demostra un enfocament integral i multifacètic per abordar aquest risc natural. La gestió d'aquest risc es fa a través de nombrosos passos i mesures que busquen mitigar al màxim possible els efectes negatius de les allaus. En primer lloc, s'han implementat amplis recursos humans i materials, assegurant que hi hagi personal capacitat i equips adequats disponibles per respondre a qualsevol incident relacionat amb les allaus. A més, una varietat de serveis i entitats estan involucrades en aquest esforç, incloent-hi equips de rescat, serveis meteorològics i investigadors. Aquests serveis treballen de manera coordinada seguint procediments i protocols ben definits, garantint una resposta eficaç i eficient davant de qualsevol emergència que s'han de revisar sistemàticament cada pocs anys o després d'un esdeveniment de consideració. Les tasques i accions dutes a terme són variades i abasten des de l'avaluació i el monitoratge constant de les condicions nivometeorològiques fins a l'execució de mesures preventives i d'intervenció directa en rescat en accident amb víctimes per allaus.

El compromís financer també és significatiu, amb un pressupost dedicat a la implementació d'aquestes mesures de defensa, tant les ja executades com les projectades per al futur. Aquest enfocament proactiu permet al país realitzar la majoria dels treballs necessaris per mitigar accidents per allaus, incloent-hi la instal·lació de noves barreres de protecció i la instal·lació de nous sistemes de desencadenament d'allaus.

Gràcies a aquests esforços, Andorra s'ha aconseguit posicionar com un referent a nivell mundial en la gestió del risc d'allaus, gràcies a la gran diversitat de sistemes de desencadenament artificial d'allaus, a les cartografies recreatives com l'ATES o legislatives, com la zonificació reglamentària o els inventaris d'allaus. També per l'interès propi i la repercussió de la neu en el PIB del territori, entre altres. El país s'ha convertit en un laboratori natural on es pot estudiar i aprendre de les nombroses mesures de defensa estructurals, com ara barreres i dics, així com de les mesures no estructurals i

les tècniques de desencadenament artificial d'allaus. Aquesta combinació d'enfocaments estructurals i no estructurals ha demostrat ser altament eficaç en la mitigació del perill associat a les allaus.

Un altre aspecte destacat de la gestió del risc d'allaus a Andorra són les accions de predicció i de previsió. L'emissió d'alertes meteorològiques i butlletins de perill d'allaus, juntament amb la implementació de sistemes d'alerta primerenca com ara radars meteorològics i sismògrafs, permeten a les autoritats anticipar i preparar-se per a possibles incidents. Aquestes accions no només són vitals en l'àmbit preventiu, sinó que també són fonamentals quan passa un accident amb conseqüències potencialment fatals. La capacitat de predir i preveure aquests esdeveniments marca una diferència significativa, protegint vides i reduint l'impacte de les allaus a les comunitats locals.

En resum, Andorra ha adoptat un enfocament holístic i compromès amb la gestió del risc d'allaus, combinant recursos humans i materials, serveis coordinats, procediments ben establerts i un suport financer fort (Taula 1.8). Aquest compromís integral ha permès al país convertir-se en un líder mundial i un laboratori natural per a la investigació i l'aprenentatge en la mitigació d'allaus, demostrant l'efectivitat de les estratègies de predicció i previsió en la protecció de vides i béns.

Taula 1.8: Diferents treballs que acostumen a realitzar-se a les tasques de mitigació del risc d'allaus. En blau s'indiquen els nombrosos treballs fets al Principat d'Andorra, que abasten gairebé la totalitat de les feines necessàries. Crèdits: Elaboració pròpia.

Treballs a fer per mitigar accidents per allaus

1. Prevenció: *Conèixer on es produeix el fenomen i fer actuacions per mitigar-ne els efectes.*

1.1. Mesures de defensa no estructurals.

- 1.1.1. [Avaluació del perill, del risc i de la prevenció d'allaus.](#)
- 1.1.2. [Elaboració de l'inventari i històric d'allaus. Base de dades.](#)
- 1.1.3. [Elaboració de cartografia d'allaus, perillositat, vulnerabilitat, susceptibilitat i risc. S'han de fer a escala de detall prioritzant zones urbanitzades o urbanitzables.](#)
- 1.1.4. [Elaboració de plans d'emergència per perill d'allaus i de protecció civil.](#)
- 1.1.5. [Consideració dels riscos naturals, incloent-hi les allaus, a la reglamentació urbanística: prohibició, evacuació, privació.](#)

1.2. Mesures de defensa estructurals.

- 1.2.1. Protecció passiva permanent.
 - 1.2.1.1. [Desviació: galeries, trampolins, dics de desviació, falques.](#)
 - 1.2.1.2. [Frenada: dents de frenada, obstacles.](#)
-

1.2.1.3. [Atur: mur, dic, zona d'emmagatzematge.](#)

1.2.1.4. [Adaptació: reforçament de les estructures dins la zona d'allaus, evitar zones d'allaus.](#)

1.2.1.5. [Alerta: senyalització del perill, semàfors de detecció d'allaus a la carretera.](#)

1.2.2. Protecció activa permanent.

1.2.2.1. [Modificació de la rugositat del terra: terrasses, sega, drenatges.](#)

1.2.2.2. [Reforestació: plantacions.](#)

1.2.2.3. [Fixació i estabilització del mantell nival: rasclets, paraneus, xarxes.](#)

1.2.2.4. [Utilització de l'acció del vent: paravents, viravents, taules inclinades.](#)

1.3. Desencadenament artificial.

1.3.1. [Ski cut .](#)

1.3.2. [Avalancheur \(Secubex \).](#)

1.3.3. [Tir manual. Explosius \(dinamita, Secubex ...\).](#)

1.3.4. [Gas.](#)

1.3.4.1. [Gazex .](#)

1.3.4.2. [O'bellx .](#)

1.3.4.3. [Avalhex .](#)

1.3.5. [Cable transportador.](#)

1.3.5.1. [Catex .](#)

1.3.6. [Helicòpter.](#)

1.3.6.1. [Daisybell .](#)

1.3.6.2. [Tir manual.](#)

2. Predicció: Conèixer on i quan es produirà.

2.1. [Emissió d'alertes meteorològiques.](#)

2.2. [Emissió de butlletins de perill d'allaus.](#)

2.3. [Sistemes d'alerta primerenca \(radars meteu, sismògrafs...\).](#)

3. Previsió: Disposar el que és convenient per atendre contingències o necessitats previsibles.

3.1. [Rescat i salvament.](#)

3.2. [Protecció civil en emergències.](#)

3.3. [Ajuts i indemnitzacions \(reallotjaments, aliments, declaració de zona catastròfica...\)](#)

Finalment, cal destacar la importància de la comunicació efectiva i la consciència sobre el perill d'allaus per reduir els riscos associats a aquests fenòmens naturals. Això s'aconsegueix mitjançant l'emissió de butlletins d'allaus, la creació de nous productes de pronòstic i l'educació de la població sobre els riscos i les mesures d'autoprotecció que cal prendre.

El "Curs de capacitació bàsica en protecció civil" és una iniciativa molt interessant que es desenvolupa amb la col·laboració del Ministeri d'Educació i Ensenyament Superior, el Departament de Bombers, l'Oficina de l'Energia i el Canvi Climàtic, Andorra Recerca + Innovació i la Creu Roja Andorrana. El curs ofereix una formació global en autoprotecció amb l'objectiu de capacitar els joves del país perquè actuïn de forma correcta en situacions de risc o emergència (Taula 1.9). Des de 2012, en tots els sistemes educatius s'ofereixen formacions en riscos naturals i primers auxilis, impartides per tècnics especialistes de l'Andorra Recerca + Innovació, la Creu Roja Andorrana i Bombers d'Andorra.

Pel que fa al taller de Nivologia i actuació en cas d'allau, es compta amb la col·laboració de les estacions d'esquí, que faciliten tant els professionals de l'estació com un espai adequat per dur a terme el taller. Aquest taller inclou tres activitats simultànies que els alumnes fan de manera rotativa, segons l'estructura següent:

Taula 1.9: Taller de nivologia: Crèdits: Protecció Civil d'Andorra.

Taller de nivologia i actuació en cas d'allau

Taller de nivologia: Els alumnes aprenen sobre la formació i característiques del mantell nival, així com els factors que contribueixen a la formació d'allaus. Es fan observacions pràctiques sobre el terreny per identificar capes de neu i avaluar-ne l'estabilitat.

Taller d'actuació en cas d'allau: es presenten als alumnes les mesures de seguretat que cal prendre si es troben en una zona d'allaus. Això inclou com reaccionar durant una allau, tècniques d'autoprotecció i ús correcte d'equips de seguretat com DVA (Detector de Víctimes d'allaus), sondes i pales.

Simulació i pràctica: Els estudiants participen en simulacions de rescat en situacions d'allaus, on apliquen els coneixements adquirits als tallers anteriors. Aquesta pràctica permet als alumnes experimentar situacions d'emergència de manera controlada, millorant-ne la capacitat de resposta i presa de decisions en cas d'allau real.

Aquest enfocament educatiu no només millora la preparació dels joves davant de les allaus, sinó que també fomenta una cultura de prevenció i seguretat a la societat, reduint significativament el risc d'accidents i augmentant la resiliència davant de desastres naturals.

1.4.2.1 Punts clau del subcapítol

- Els darrers anys, s'han definit i caracteritzat detalladament les allaus gràcies al paper decisiu dels Serveis Europeus d'Alerta d'Allaus (EAWS) en l'establiment

d'estàndards i directrius per a la prevenció i la predicció del risc d'allaus a Europa. Des de la seva fundació el 1983, l'EAWS ha evolucionat fins a convertir-se en un referent per als professionals de la neu, desenvolupant eines com l'Escala de Perill d'Allaus, la Matriu EAWS i la identificació dels problemes d'allaus, que han estat fonamentals per millorar la comprensió i la gestió del risc d'allaus. Aquests avenços proporcionen als recreacionistes i als serveis de previsió informació clau per a la presa de decisions. L'evidència científica i la cooperació internacional han estat essencials en la millora contínua de les pràctiques de predicció i prevenció, destacant l'evolució d'un camp científic relativament recent però vital per a la seguretat en entorns muntanyosos. Els procediments operatius es revisen anualment, i és important estar al corrent dels possibles canvis a l'inici de cada temporada d'hivern.

- Andorra està completament adaptada i compromesa amb la gestió del risc d'allaus i demostra un enfocament integral i multifacètic per abordar aquest desafiament. Aquest compromís es reflecteix en la implementació de recursos humans i materials amplis, així com en la dedicació financera significativa per a la implementació de mesures de defensa.
- Una varietat de serveis i entitats estan involucrades en la gestió del risc d'allaus, incloent-hi grups de rescat, serveis meteorològics i investigadors. Aquests serveis treballen de manera coordinada seguint procediments i protocols ben definits, garantint una resposta eficaç i eficient davant de qualsevol emergència.
- Les tasques i accions dutes a terme abasten des de l'avaluació i el monitoratge constant de les condicions nivometeorològiques fins a l'execució de mesures preventives i d'intervenció directa. Això inclou la instal·lació de barreres de protecció, la instal·lació de sistema per al desencadenament d'allaus i la instal·lació de noves Estacions Meteorològiques Automàtiques.
- Andorra s'ha posicionat com a referent a nivell mundial en la gestió del risc d'allaus. El país ha esdevingut un laboratori natural on es pot estudiar i aprendre de les nombroses mesures de defensa estructurals i no estructurals, així com de les tècniques de desencadenament artificial d'allaus.

- Les accions de predicció i prevenció són també un dels punts forts del principat. L'emissió d'alertes meteorològiques i butlletins de perill d'allaus, permeten a les autoritats anticipar i preparar-se per a possibles incidents.

- En cas d'un accident amb conseqüències potencialment fatals, els protocols de rescat i salvament establerts garanteixen una resposta ràpida i eficient. Aquests protocols es basen en la coordinació entre diversos serveis d'emergències i en la disponibilitat d'equips adequats per intervenir en el menor temps possible. Un aspecte clau d'aquesta resposta ràpida és la utilització d'isòcrones temporals curtes, que són línies imaginàries que representen els temps de viatge des de diversos punts de resposta fins a la ubicació de l'accident. Aquestes isòcrones permeten planificar les rutes més ràpides i eficients per arribar a les víctimes, assegurant que els equips d'emergència puguin actuar de manera immediata, minimitzant així el temps de resposta i millorant les probabilitats de supervivència. A més, la possibilitat de volar en helicòpter i la disponibilitat d'aquest mitjà de transport condiciona significativament l'èxit de les operacions. En situacions on el temps és crític, els helicòpters permeten accedir a zones de difícil accés, afavorint una intervenció més ràpida i augmentant les possibilitats de rescat efectiu.

- Les mesures de defensa no estructurals inclouen l'avaluació del perill, el risc i la prevenció d'allaus, així com l'elaboració d'inventaris històrics i la cartografia detallada. Aquestes mesures són determinants per a la planificació urbana i l'elaboració de Plans d'Emergència i Protecció Civil.

- Les mesures de defensa estructurals abasten des de la protecció passiva, com ara la construcció de galeries, dics i murs, fins a la protecció activa, que inclou la modificació de la rugositat del sòl, la reforestació i l'estabilització del mantell nival mitjançant desencadenaments artificials d'allaus. Aquestes mesures són fonamentals per mitigar l'impacte de les allaus i complementàries a les mesures de defensa no estructurals.

- La millora de la comunicació i la consciència sobre el perill d'allaus és essencial. Això s'aconsegueix mitjançant l'emissió de butlletins d'allaus, la creació de nous productes de pronòstic i l'educació de la població sobre els riscos i les mesures de seguretat que cal prendre en cas d'allaus. El " Curs de capacitació bàsica en

Protecció Civil", desenvolupat amb la col·laboració del Ministeri d'Educació i Ensenyament Superior, el Departament de Bombers, l'Oficina de l'Energia i el Canvi Climàtic, Centre de la Creu Roja Andorrana ofereix una formació integral en autoprotecció amb l'objectiu de capacitar els joves del país per actuar correctament en situacions de risc o emergència.

1.5 Motivació

El meu interès per investigar sobre la neu, les allaus, els riscos naturals i geològics sorgeix per la meva experiència acadèmica i professional en diferents àrees de muntanya del País Basc, Catalunya, Osca, Astúries i Andorra.

Durant la darrera dècada he treballat en diferents projectes i per a diferents administracions públiques, en feines relacionades amb la gestió de riscos naturals. Lauegi, el Centre de Predicció d'Allaus de la Vall d'Aran, A Lurte el centre pirinenc de referència per a la gestió de riscos de muntanya de la Vall de Canfranc, les estacions d'esquí de Tavascan al Pallars Sobirà i Ordino-Arcalís Grandvalira Resorts han estat bressol d'inspiració per fer aquest treball. Aquesta experiència, juntament amb l'oportunitat que em sorgeix en conèixer en un congrés el 2013 a França un dels directors d'aquesta tesi, m'anima a presentar el projecte per poder investigar en aquest camp, i és en definitiva pel que he pogut arribar fins aquí i aportar el meu granet de sorra. Finalment, el suport familiar i les oportunitats laborals han tingut un paper fonamental. Entre elles destaca la beca de tercer cicle proporcionada pel Govern d'Andorra per iniciar la meva tesi, així com l'estabilitat laboral a l'Àrea de Cartografia del Govern d'Andorra. Durant la darrera fase del meu doctorat, he tingut l'oportunitat de treballar a l'Assistència Tècnica de Carreteres del Principat d'Astúries com a predictor i responsable tècnic, servei que es crea després del tràgic accident al port de San Isidro el gener de 2021, on una allau va cobrar la vida de dos operaris de les Brigades de Conservació de Carreteres.

Des dels meus primers anys com a estudiant de geologia, m'ha apassionat entendre els processos naturals i com podem adaptar-nos-hi per reduir-ne l'impacte negatiu. La meva experiència en l'emissió de butlletins de perill d'allaus m'ha demostrat la importància de combinar coneixement científic amb aplicacions pràctiques que beneficiïn la societat. Aquesta tesi doctoral és una oportunitat per avançar en la meva

carrera professional fent un extens projecte aplicat a la indústria de la neu i l'ordenació del territori. I no vull finalitzar aquest apartat sense ressaltar que gràcies a aquesta investigació he tingut l'oportunitat de col·laborar amb estacions d'esquí, Servei de Conservació de Carreteres, Govern i Departament d'Ordenació Territorial, Servei de Meteorologia Protecció Civil, Bombers, Banders, Policia i centres de recerca com Andorra RI o serveis de predicció externs al país amb els quals m'he pogut formar i col·laborar.

Andorra, com altres regions o països muntanyosos, té en gran manera una gran dependència del turisme d'hivern i la seguretat de les persones i les infraestructures és essencial en aquest àmbit. Aquest fenomen representa una amenaça significativa en determinats moments de la temporada hivernal, i malgrat els avenços en el coneixement, les metodologies i les tecnologies, encara hi ha accidents provocats per allaus que afecten persones o infraestructures. Les allaus són un dels riscos naturals que més incideixen actualment al medi natural, les infraestructures i la població que habita en zones de muntanya (McClung and Schaerer, 2006). En el cas d'Andorra, el perill d'allaus és el que més morts ha provocat en els darrers anys, 18 des del 1971 i pel qual s'ha destinat una inversió més gran per a la seva gestió. De la mateixa manera, també és el risc que any rere any requereix més esforços tant humans com econòmics per a la seva gestió.

Poder fer una investigació a escala de país, en un lloc on la neu i les allaus tenen tanta repercussió, és una veritable sort. Mitjançant aquesta investigació pretenc explotar les dades generades en les darreres dècades, conèixer millor la relació entre la neu, les allaus i els tipus de temps meteorològic i proposar millores en les decisions operatives de la gestió del risc d'allaus.

A excepció de la gestió i ordenació de l'urbanisme, com l'aprovació del Pla de Prevenció del Risc d'Allaus Previsible, gran part de les mesures de seguiment, previsió i gestió del risc tant a les estacions d'esquí com a la gestió de les carreteres, van ser implementades durant les dècades dels anys 80 i 90, amb França com a referència (Météofrance, CEMAGREF), sense massa modificacions fins a l'actualitat.

D'altra banda, malgrat la gran quantitat de dades generades en les darreres dècades, hi ha un buit científic en aquest àmbit i la recerca i la innovació que ajuda a la comprensió local d'aquest fenomen i a la generació de nou coneixement. Aquesta recerca facilita i

millora la gestió actual d'aquest fenomen amb una incidència i un impacte tant econòmic com social en àmbits tan diversos com la seguretat ciutadana, l'urbanisme o el turisme.

Generar nou coneixement ha de permetre millorar la gestió del risc d'allaus d'Andorra als diferents actors implicats (especialment el Govern i les estacions d'esquí) des del punt de vista de la gestió de la informació, els protocols i procediments utilitzats, així com les eines i tecnologies utilitzades i així identificar i implementar possibles millores en aquests quatre àmbits.

1.6 Objectius

Atès aquest marc teòric i l'estat de l'art quant a la temàtica i la manca d'estudis d'aquest tipus a Andorra, els objectius principals i secundaris d'aquesta investigació són els següents:

1. Generar patrons espaciotemporals de l'activitat d'allaus a Andorra.

1.1. Recopilar i crear una base de dades geolocalitzada i homogeneïtzada amb informació històrica d'activitat d'allaus (Cadastre, dades dels PIDA i de la gestió de carreteres) i registre de nous esdeveniments.

1.2. Identificar i sectoritzar diferents comportaments nivoclimatològics a Andorra.

1.3. Recopilar els patrons sinòptics coneguts que es produeixen a Andorra

1.4. Identificar els patrons en l'activitat d'allaus segons la nivoclimatologia de cada regió andorrana i els patrons sinòptics predominants.

2. Relacionar els patrons identificats amb la gestió del risc d'allaus a Andorra.

2.1. Relacionar els patrons espacio-temporals nivoclimatològics amb el risc i l'accidentalitat d'allaus.

2.2 Analitzar i relacionar amb l'estat de l'art pel que fa a noves eines, protocols i processos en l'àmbit de l'observació i la gestió de l'activitat nivometeorològica i d'allaus.

2.3 Proposar noves estratègies, protocols, eines i tecnologies per a la gestió del risc d'allaus a estacions d'esquí i carreteres d'Andorra a partir dels resultats generats.

Mitjançant el aquest treball, aquestes són algunes de les hipòtesis que es plantegen i a les quals se'ls ha volgut trobar resposta (Taula 1.10).

Taula 1.10: Síntesi de les hipòtesis i respostes del treball de recerca.

HIPÒTESI	RESOLUCIÓ
Ha passat un canvi significatiu en l'evolució dels patrons de precipitació en forma de neu i allaus?	Anàlisi de les tendències climàtiques a partir de dades de neu i allaus a llarg termini a Andorra
Els tipus de temps afecten la distribució temporal i espacial de la neu al país i la seva zonificació climàtica hivernal?	Anàlisi dels tipus de temps i relació espacial i temporal, amb la nivometeorologia i zonificació climàtica hivernal més detallada
El coneixement d'aquestes dinàmiques a través de les dades i les noves tecnologies poden millorar la gestió del risc d'allaus?	Noves estratègies, protocols, eines i tecnologies per a la gestió del risc d'allaus a estacions d'esquí i carreteres d'Andorra

Capítol 2.

2. Caracterització espaciotemporal del mantell de neu i les nevades

2.1 Introducció

La neu acostuma a romandre permanentment des de finals de novembre a maig a les muntanyes del Principat d'Andorra. Entre els mesos de desembre i abril, la neu exerceix d'atracció turística al país i genera importants ingressos econòmics derivats del turisme d'hivern. Estacions d'esquí, hotels, restaurants, lloguers d'equips i escoles d'esquí són alguns dels més grans involucrats en aquest model econòmic, però els beneficis repercuteixen en l'activitat econòmica de la totalitat del país. En moments determinats de la temporada, diferents competicions i esdeveniments esportius internacionals dependents de la neu, atrauen milers de visitants i generen publicitat del país a tot el món.

La neu també actua com a reserva natural d'aigua, alliberant-se gradualment al desglaç de primavera i estiu. Això permet mantenir el flux constant d'aigua als rius i rierols durant tot l'any. El desglaç contribueix significativament a la recàrrega d'aqüífers subterranis, essencials per abastir la població del país durant els mesos secs. I en aquest aspecte, una gestió hídrica correcta cada dia és més necessària, més tenint en compte els períodes de sequeres prolongats que s'han succeït i succeiran. Andorra no compta amb una infraestructura hídrica molt desenvolupada basada en grans embassaments, i com ja s'ha citat en el marc teòric, l'estudi i la gestió és vital.

En el context actual d'emergència climàtica, cal conèixer detalladament com estan afectant els canvis de patrons de nevades, per poder implementar estratègies d'adaptació abans que sigui tard i les conseqüències siguin més grans. També cal conèixer si aquests canvis en els patrons afavoreixen la disminució o l'augment del perill d'allaus.

Els objectius d'aquest capítol són descriure la distribució espacial del mantell de neu al país, analitzant la cobertura de neu a les diferents àrees on tenim un seguiment continu i sistemàtic de la neu.

Alhora, s'analitza la variabilitat temporal del mantell de neu al llarg de les diferents zones, avaluant les tendències a llarg termini de diferents paràmetres: precipitació

mitjana de neu per temporada, precipitació mitjana de neu per mes i temporada, percentil 95% de precipitació de neu, dies totals (neu, +20cm, +30cm, +50cm, +70cm), dies que neva o no neva durant la temporada, dies de nevada de (+10cm, +20cm, +30cm, +50cm) , neu total a 15 de març, mitjana de neu per dècada, mitjana de neu per temporada, dies amb sumatori de neu en 3 dies de més de 60cm.

Per fer-ho, s'utilitza la base de dades harmonitzada de les dades de neu recollides de la sèrie climàtica de les estacions meteorològiques d'Andorra, que formen part de la xarxa nivometeorològica nacional. Es fa una anàlisi estadística per avaluar les tendències a llarg termini de diversos paràmetres relacionats amb la precipitació i l'acumulació de neu. A més, s'estudia la densitat d'estacions meteorològiques, clustering o agrupament, i s'hi aplica una anàlisi de components principals (PCA). S'ha calculat l'Índex de Severitat de l'Hivern (Winter Severity Index, WSI) i realitzat una classificació automàtica dels tipus de temps, així com l'estudi de mètodes per completar sèries temporals incompletes. Finalment, s'ha realitzat la zonificació de la climatologia hivernal d'Andorra amb mètodes estadístics, s'han calculat els períodes de retorn per a les estacions d'estudi, i s'ha determinat la freqüència i distribució de grans nevades.

2.1.1 Base de dades harmonitzada

La investigació s'ha desenvolupat a la totalitat del Principat d'Andorra, abastant el període comprès per la base de dades de registres de neu del país validada al projecte CLIMPY (POCTEFA 2014-2020, Ref. AUEP002-AND / 2015). Aquest projecte, anomenat “Caracterització de l'evolució del clima i provisió d'informació per a l'adaptació als Pirineus”, és una iniciativa de l'Observatori Pirinenc, una cooperació territorial transfronterera de la Comunitat de Treball dels Pirineus (CTP) en matèria de canvi climàtic, iniciada en 2010 sota la presidència de Midi-Pyrénées .

El mapa mostra la ubicació de diverses estacions meteorològiques als Pirineus, diferenciades per tipus: estacions de temperatura (triangles vermells), estacions de precipitació (cercles blaus) i punts de mesura de neu (quadrats blancs) (Figura 2.1). A més, es presenten les anomalies de temperatura hivernal projectades per a l'any 2030 sota l'escenari RCP8.5, fent servir dades del model climàtic CCLM5, per al període de referència 2010-2019. Les anomalies de temperatura s'indiquen mitjançant una escala de colors, que varia de blau a vermell, representant increments de temperatura des de valors més baixos (0,56) fins a més alts (1,02). Aquest mapa és interessant per

visualitzar els possibles canvis climàtics a la regió i el seu impacte en les condicions meteorològiques locals.

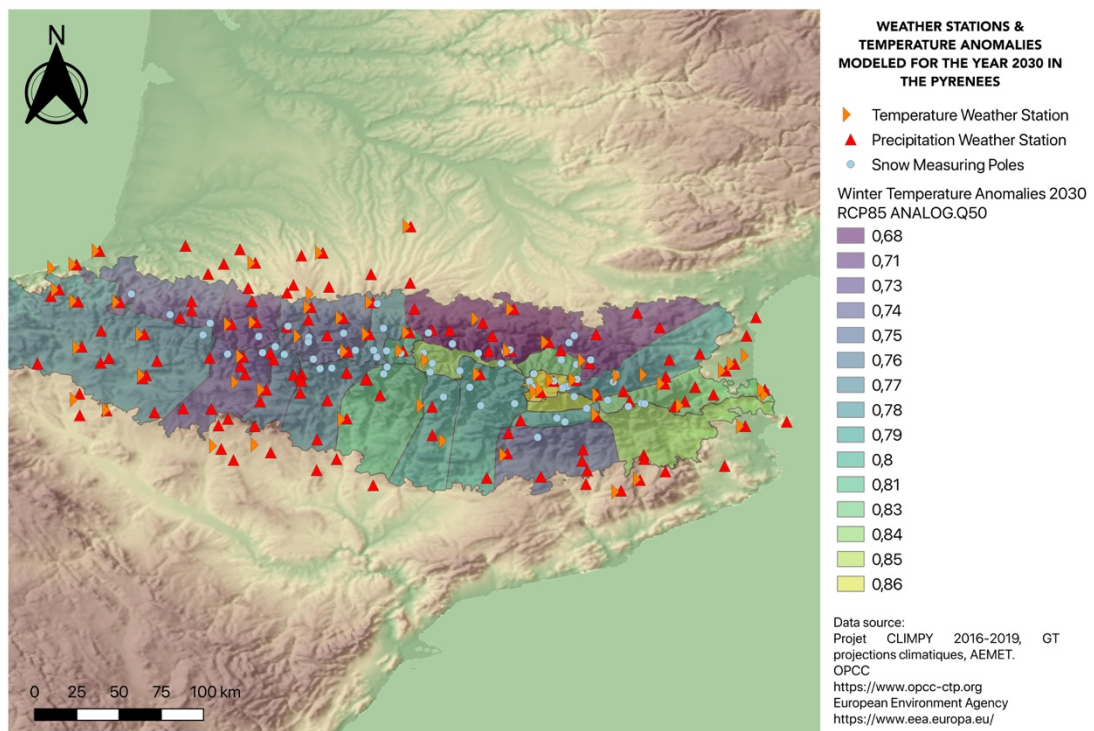


Figura 2.1: Estacions meteorològiques i anomalies de temperatura projectades per a l'any 2030 als Pirineus. Crèdits: Elaboració pròpia.

Per a l'anàlisi de l'espessor de neu a Andorra, es van utilitzar sèries diàries de dades obtingudes de l'estació meteorològica de Ransol i de sis estacions meteorològiques de les estacions esquí, aquestes darreres, durant la recollida de dades manuals durant la temporada hivernal. Aquestes sèries climatològiques van ser sotmeses a un procés de reconstrucció per evitar buits de dades a les nevades primerenques i tardanes, i reconstruint. La metodologia emprada va permetre reconstruir les llacunes presents a les sèries temporals de gruix de neu mitjançant l'aplicació de la cadena SAFRAN (reanàlisi meteorològica) - CROCUS (model d'evolució del mantell de neu) per al període 1980-2016 (Lopez-Moreno et al., 2020) (Figura 2.2). La combinació d'observacions in situ i modelitzacions va millorar la qualitat de les dades i va proporcionar continuïtat a les sèries durant tota la temporada. Aquesta metodologia va permetre capturar tant les primeres nevades amb gruixos escassos com l'època de fusió a finals d'hivern, quan les estacions d'esquí ja estan tancades i no es fan observacions. La gràfica mostra la comparació entre les dades observades (indicades per les fletxes vermelles), les dades

simulades amb el mètode no assimilatiu (indicades per les creuetes verdes) i les dades simulades amb el mètode assimilatiu (indicades per les boles blaves).

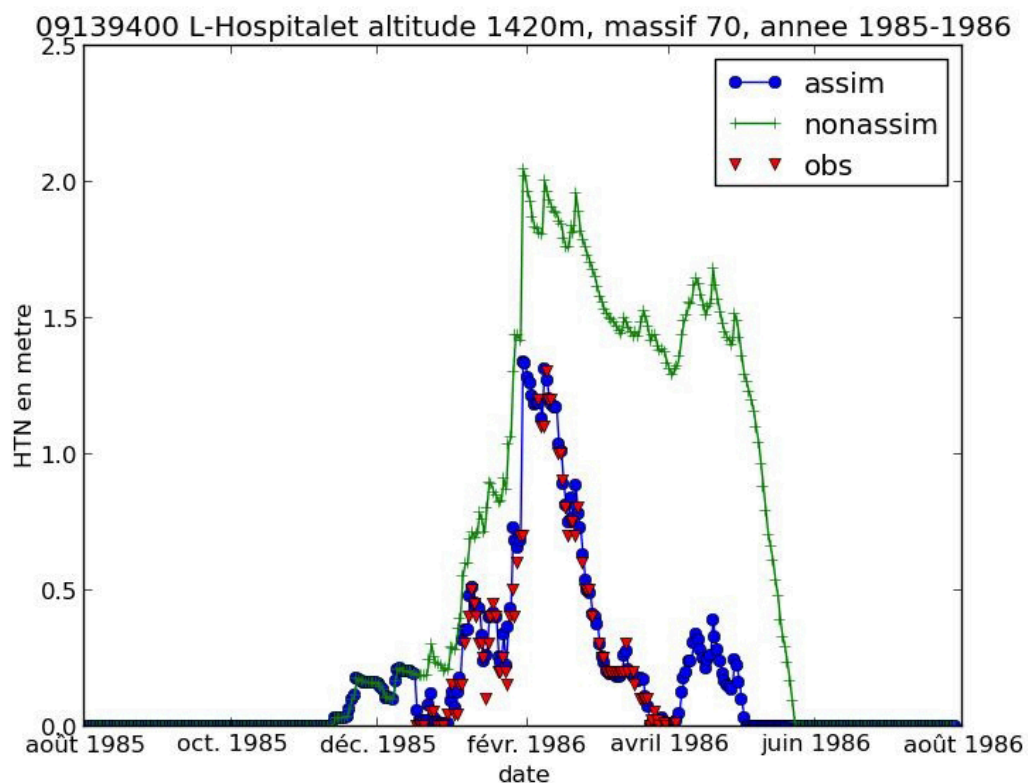


Figura 2.2: Mètode original per estimar les dades que faltaven./ Credits: Météofrance

En la imatge superior, veiem la configuració del model de simulació de neu Safran / Crocus amb una assimilació de gruix de neu observat. Exemple del procés d'estimació de dades per a la sèrie «l'Hospitalet» (1420 m) per a l'hivern 1985-1986: punt vermell per «observació», corba verda per «model sol», corba blava per «model + assimilació».

2.1.2 Estacions meteorològiques a Andorra

Andorra compta actualment amb 33 estacions meteorològiques de caràcter oficial. La densitat d'estacions meteorològiques a Andorra és d'aproximadament 0.071 estacions per quilòmetre quadrat (Figura 2.3). Si comparem aquestes dades amb les recomanacions de l'Organització Mundial Meteorològica (OMM):

- **Zones poc accidentades** : 1 estació per cada 600 km² (0.0017 estacions/km²)
- **Zones muntanyenques** : 1 estació per cada 100 km² (0.01 estacions/km²)

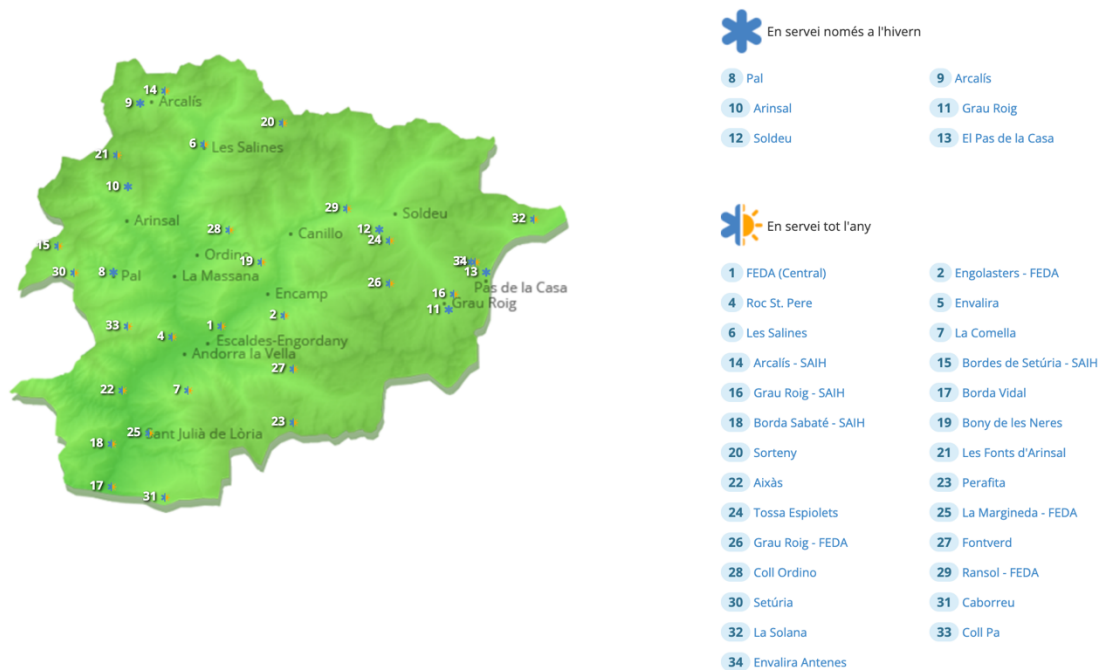


Figura 2.3: Mapa de les estacions meteorològiques a Andorra. Les estacions estan classificades en dues categories: aquelles que només operen a l'hivern (indicades amb un símbol de floc de neu) i aquelles que operen durant tot l'any (indicades amb un símbol de sol). Crèdits: Govern d'Andorra.

Podem observar que Andorra, sent una zona muntanyosa, té una densitat d'estacions meteorològiques significativament superior al recomanat per l'OMM per a àrees muntanyoses (0.071 estacions/km² davant de 0.01 estacions/km²). Això indica que Andorra està ben equipada en termes d'estacions meteorològiques per a la mida i la topografia.

Un cop realitzat aquest petit apèndix, aquesta investigació se centra en les estacions meteorològiques que han alimentat la base de dades del país amb dades específiques sobre neu. De la totalitat d'aquestes 33, 14 són les que registren dades de neu actualment, i els resultats d'aquest capítol se centren només en les dades de 5 estacions meteorològiques d'alçada, que han registrat dades durant la temporada hivernal històricament a partir dels anys 80 i conformen una sèrie meteorològica completa i validada (Figura 2.4).

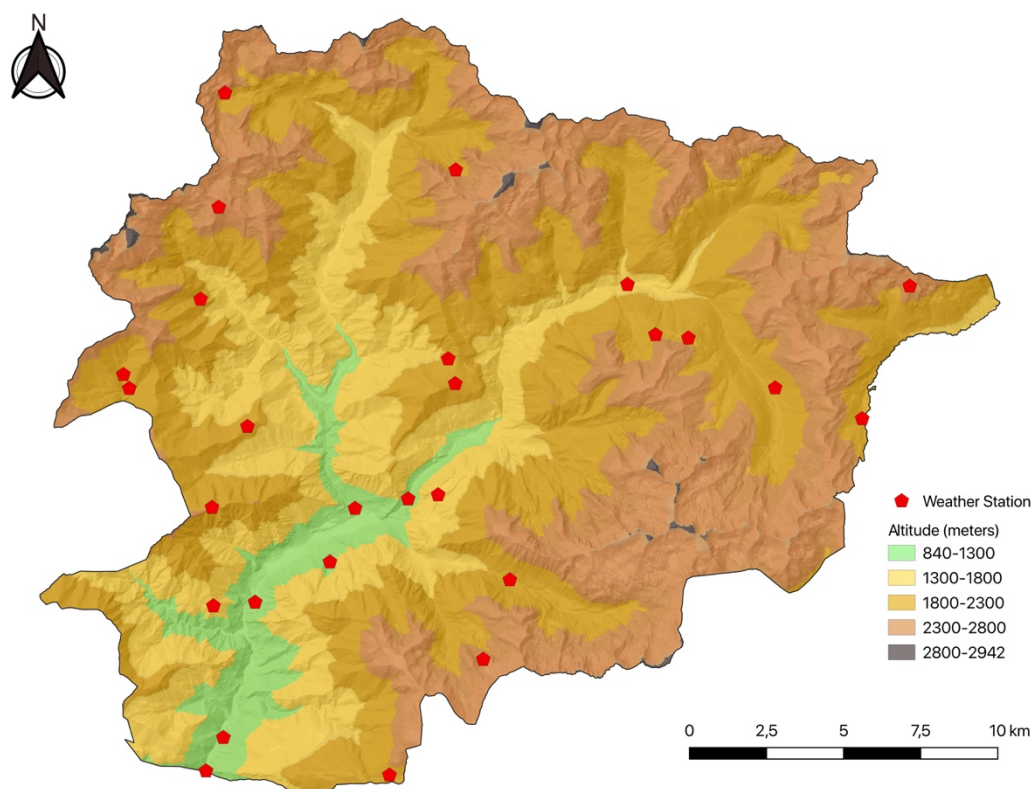


Figura 2.4: Mapa d'estacions meteorològiques d'Andorra segons altitud. Crèdits: Elaboració pròpia.

El mapa mostra la distribució de les estacions meteorològiques a Andorra, indicades amb punts vermells, classificades segons l'altitud. Les diferents elevacions es representen amb colors que van des del verd clar per a les altituds més baixes (840-1300 metres) fins al marró fosc per a les altituds més altes (2800-2942 metres). Aquesta visualització és essencial per comprendre com l'altitud influeix en la recollida de dades meteorològiques i en l'anàlisi de variacions climàtiques al país.

2.1.3 La xarxa nivometeorològica d'Andorra

Les dades sobre el mantell de neu han estat registrades a les tasques d'observació nivometeorològica dels pisters-socorristes de les estacions d'esquí del país des de l'obertura dels diferents dominis esquiables. Tradicionalment, l'observador ha xifrat les observacions esmentades en format NIVOMET (o NIMET, Sistema de Observació Nivometeorològica) i les ha transmès a través de quaderns d'observació, via telefònica o per correu electrònic. Avui dia, aquest procés es realitza mitjançant un programari específic desenvolupat, on l'observador introdueix de manera senzilla les observacions

realitzades, i el programa automàticament codifica el comunicat, emmagatzema les variables i les transmet a un servidor web des d' on els tècnics poden supervisar, difondre i utilitzar a l'operativa. Els comunicats NIVOMET s'elaboren en línies generals a les 9 hores locals en horari d'hivern. Alguns observatoris a les estacions d'esquí realitzen una segona observació de característiques una mica més reduïdes a les 14 hora local en horari d'hivern, però aquesta informació és més limitada a causa de la compatibilitat amb el condicionament i la seguretat de les pistes i els rescats que efectuen a al llarg de la jornada.

Les observacions realitzades s'adapten al format i a la normativa de la clau NIVOMET , una clau regional compartida entre França i Espanya i aprovada per l'Organització Meteorològica Mundial. Aquestes observacions s'han transmès per a la seva explotació i difusió posterior al Servei Meteorològic Nacional i a Météo France , encarregat d'emetre el Butlletí de Perill d'Allaus a Andorra des de 1984. A més, des de l'any 2016, el Servei Meteorològic d'Andorra també emet el Butlletí de Perill d'allaus, adaptat al país tenint en compte els criteris acordats per l'Associació Europea de Serveis d'allaus (EAWS).

2.2 Metodologia

2.2.1 Anàlisi estadística

En aquest treball, es va utilitzar el programari R Studio per generar el codi necessari per a l'anàlisi de diferents variables relacionades amb la variabilitat temporal del mantell de neu a diferents zones d'Andorra. El llenguatge de programació R i el seu entorn de desenvolupament integrat R Studio han sorgit com a eines potents per analitzar grans conjunts de dades, permetent als investigadors i professionals de la indústria obtenir informació útil de les estructures de dades complexes. R, juntament amb R Studio, ofereix un conjunt complet de paquets que faciliten l'anàlisi estadística, la manipulació de dades i la visualització. L'aplicació de R i R Studio va més enllà de la recerca acadèmica, estenent-se a aplicacions pràctiques en la indústria, especialment en l'àmbit de l'anàlisi de grans dades. Les organitzacions recorren cada vegada més a aquestes eines per processar i analitzar grans quantitats de dades no estructurades, cosa que és crucial per a la presa de decisions informades. Per exemple, els estudis han destacat la importància de l'anàlisi de grans dades per millorar les decisions organitzatives mitjançant l'extracció de correlacions i informació de grans conjunts de dades (Kumari & Verma, 2020; Savita & Verma, 2020). A més, la integració de R amb marcs de dades grans, com Hadoop, millora la seva capacitat per gestionar i analitzar fluxos de dades

en temps real, convertint-lo en un recurs inavaluable per a indústries com la salut i el màrqueting (Kim & Lee, 2018; Bhaskar & Reddy, 2022). A mesura que les indústries continuen adoptant estratègies basades en dades, la competència en R i R Studio esdevé essencial per als professionals que busquen aprofitar els grans dades per obtenir avantatges competitius i innovació.

L'anàlisi es va enfocar a avaluar les tendències a llarg termini de diversos paràmetres relacionats amb la precipitació i l'acumulació de neu. Entre els paràmetres considerats es van incloure la precipitació mitjana de neu per temporada, que es va calcular com la quantitat mitjana de neu caiguda durant cada temporada hivernal, i la precipitació mitjana de neu per mes i temporada, on es va desglossar la precipitació mensual i es va analitzar la seva variació al llarg de cada temporada.

A més, es va avaluar el percentil 95% de la precipitació de neu per proporcionar informació sobre els esdeveniments de nevades més intensos. Es van comptabilitzar els dies totals amb neu, específicament aquells amb acumulacions superiors a 20 cm, 30 cm, 50 cm i 70 cm, així com els dies de nevades i els dies sense nevades durant la temporada. També es va parar atenció als dies amb nevades de més de 10 cm, 20 cm, 30 cm i 50 cm. Es va quantificar la neu total acumulada fins al 15 de març de cada any, i es van analitzar la mitjana de neu per dècada i temporada, així com els dies amb un sumatori de neu en tres dies superior a 60 cm. Aquestes anàlisis van permetre una avaluació detallada i precisa de la variabilitat i les tendències de la neu al llarg del temps al país.

Per demostrar estadísticament que la densitat d'estacions meteorològiques a Andorra és significativament superior a la recomanada per l'Organització Meteorològica Mundial (OMM) per a zones muntanyoses, es va partir de les hipòtesis següents: la hipòtesi nul·la (H_0) establiria que la densitat d'estacions meteorològiques a Andorra és igual o inferior a la recomanada per l'OMM, mentre que la hipòtesi alternativa (H_1) plantejava que la densitat és superior a aquesta recomanació.

Amb base al conjunt de dades sobre neu obtingudes de les estacions meteorològiques esmentades, es va realitzar una agrupació estadística basada en condicions climàtiques similars (dades de gruix de neu) amb l'objectiu de regionalitzar climàticament el territori. Els passos principals d'aquesta anàlisi van incloure la preparació i la normalització de les dades, assegurant que les diferents variables

tinguessin una escala comparable. Es va utilitzar el clustering o agrupament, una tècnica que divideix un conjunt de dades en grup d'altres (clusters), de manera que els elements dins de cada grup siguin més similars entre si que als d'altres grups. Això va ajudar a identificar àrees amb patrons climàtics similars i també a detectar estacions meteorològiques amb dades significativament diferents, cosa que podria indicar possibles errors o esdeveniments climàtics extrems.

Finalment, es va aplicar l'Anàlisi de Components Principals (PCA) amb la intenció de reduir-ne la dimensionalitat i visualitzar les similituds i diferències entre estacions. El PCA va transformar el conjunt de dades, possiblement correlacionades, en components principals no correlacionats, capturant la major quantitat possible de variabilitat en les dades originals. Aquest mètode va simplificar l'anàlisi i va millorar la interpretació de les dades. En particular, es va reduir la dimensionalitat i es van generar figures que van facilitar la visualització de dades en 2D, permetent una millor interpretació i una anàlisi exploratòria més efectiva.

2.2.2 Índex de Severitat de l'Hivern (Winter Severity Index, WSI)

Per calcular l'Índex de Severitat de l'Hivern (WSI) a Andorra, es van utilitzar dades meteorològiques específiques que inclouen factors com ara la temperatura i la quantitat de neu caiguda, entre altres paràmetres climàtics que afecten la percepció i els efectes de la severitat de l'hivern. Es van recollir dades climàtiques diàries durant el període hivernal, enfocant-se a la temperatura mínima i màxima diària, així com a la precipitació de neu.

Es van definir llindars específics per identificar un "dia sever". Per exemple, es va considerar sever un dia amb una temperatura màxima per sota de -5°C o amb una acumulació de neu superior a 10 cm. Per a cada dia d'hivern es va assignar un punt si la temperatura o la precipitació de neu superaven els llindars establerts. Posteriorment, es van sumar els punts de tots els dies del període hivernal per calcular el WSI total.

Les variables considerades a l'anàlisi van incloure la data del dia analitzat, utilitzada per identificar i organitzar cronològicament les dades, i la temperatura màxima diària, que representa la temperatura més alta registrada durant cada dia. Aquests elements van permetre una avaluació detallada de la severitat hivernal a la regió d'Andorra, proporcionant un índex quantitatiu per mesurar les condicions hivernals extremes.

Aquesta metodologia proporciona una visió precisa de la severitat de l'hivern, quan es quantifiquen els dies amb condicions extremes de fred i neu. Aquest enfocament ajuda a comprendre millor la variabilitat i l'impacte de les condicions hivernals a Andorra, i pot servir com una eina útil per planificar i preparar respostes davant d'esdeveniments climàtics severos.

2.2.2.1 Explicació del codi

A l'estudi, es van carregar i preparar les dades, incloent-hi la creació de la columna HN, que representa la nevada registrada diària. Aquest pas inicial va ser fonamental per estructurar les dades adequadament i garantir que tota la informació rellevant estigués disponible per a l'anàlisi posterior. A continuació, es van assignar puntuacions a les variables tmax , tmin , HS i HN basant-se en els llindars especificats (Taula 2.1). Aquest procés va permetre classificar les dades segons la severitat o la intensitat de les condicions observades, facilitant la interpretació dels resultats en el context de l'estudi.

Es va calcular l'Índex de Severitat d'Hivern (ISI) de forma diària, i posteriorment es van acumular aquestes dades per obtenir un valor total per temporada. Aquesta mètrica va proporcionar una mesura quantitativa de la severitat de les condicions hivernals, útil per a comparacions interanuals i anàlisi de tendències. Per incloure la variable ' season ' al model de regressió lineal, va ser necessari convertir-la a format numèric. Durant aquest procés, es van manejar adequadament els valors faltants (NA) per assegurar la integritat de les dades i evitar biaixos en els resultats del model.

Es van fer diverses anàlisis estadístiques, incloent-hi el càlcul d'estadístiques descriptives i la realització d'una prova t. A més, es va ajustar un model de regressió lineal per explorar les relacions entre les variables i avaluar-ne la significació estadística. Finalment, els resultats es van visualitzar mitjançant gràfics que van incloure línies de tendència i estadístiques descriptives. Aquestes visualitzacions van facilitar la interpretació de les troballes i van permetre una presentació clara i entenedora de les dades.

Taula 2.1: Llindars per assignar puntuacions, l'Índex de Severitat d'Hivern. Crèdits: Elaboració pròpia.

LLINDARS DE TEMPERATURA MÀXIMA (TMAX):
0 punts: tmax > 4°C
1 punt: -0.5°C < tmax <= 4°C
3 punts: -2°C < tmax <= -0.5°C
6 punts: -3.6°C < tmax <= -2°C

10 punts: $-6.7^{\circ}\text{C} < t_{\text{max}} \leq -3.6^{\circ}\text{C}$
15 punts: $-8^{\circ}\text{C} < t_{\text{max}} \leq -6.7^{\circ}\text{C}$
25 punts: $t_{\text{max}} \leq -8^{\circ}\text{C}$
<i>LLINDARS DE TEMPERATURA MÍNIMA (TMIN):</i>
0 punts: $t_{\text{min}} > -1.7^{\circ}\text{C}$
1 punt: $-4.4^{\circ}\text{C} < t_{\text{min}} \leq -1.7^{\circ}\text{C}$
3 punts: $-7^{\circ}\text{C} < t_{\text{min}} \leq -4.4^{\circ}\text{C}$
6 punts: $-8.6^{\circ}\text{C} < t_{\text{min}} \leq -7^{\circ}\text{C}$
10 punts: $-12^{\circ}\text{C} < t_{\text{min}} \leq -8.6^{\circ}\text{C}$
15 punts: $-13.2^{\circ}\text{C} < t_{\text{min}} \leq -12^{\circ}\text{C}$
25 punts: $t_{\text{min}} \leq -13.2^{\circ}\text{C}$
<i>LLINDARS D'ESPESSOR DE NEU (HS):</i>
0 punts: $\text{HS} < 10 \text{ cm}$
1 punt: $10 \text{ cm} \leq \text{HS} < 34 \text{ cm}$
3 punts: $34 \text{ cm} \leq \text{HS} < 60 \text{ cm}$
6 punts: $60 \text{ cm} \leq \text{HS} < 78 \text{ cm}$
10 punts: $78 \text{ cm} \leq \text{HS} < 165 \text{ cm}$
15 punts: $165 \text{ cm} \leq \text{HS} < 175 \text{ cm}$
25 punts: $\text{HS} \geq 175 \text{ cm}$
<i>LLINDARS DE NEVADA (HN):</i>
0 punts: $\text{HN} < 5 \text{ cm}$
1 punt: $5 \text{ cm} \leq \text{HN} < 9 \text{ cm}$
3 punts: $9 \text{ cm} \leq \text{HN} < 15 \text{ cm}$
6 punts: $15 \text{ cm} \leq \text{HN} < 20 \text{ cm}$
10 punts: $20 \text{ cm} \leq \text{HN} < 35 \text{ cm}$
15 punts: $35 \text{ cm} \leq \text{HN} < 39 \text{ cm}$
25 punts: $\text{HN} \geq 39 \text{ cm}$

Per interpolar les dades de temperatura entre les estacions meteorològiques de Ransol (1641 m) i Arcalís (2059 m), considerant el gradient tèrmic per altura, es va utilitzar el gradient tèrmic adiabàtic sec d'aproximadament -0.65°C per cada 100 metres d'ascens a altitud.

- Calculeu el gradient de temperatura: El canvi d'alçada entre les dues estacions és $2059 \text{ m} - 1641 \text{ m} = 418 \text{ m}$, el canvi esperat en temperatura seria aproximadament -2.717°C
- Interpolar la temperatura per a una alçada específica: Es va utilitzar una interpolació lineal basada en el gradient tèrmic.
- Fórmula per a Interpolació Lineal:

$$T(Z) = T_1 + (T_2 - T_1) \frac{Z - Z_1}{Z_2 - Z_1}$$

on:

- T_1 y T_2 van ser les temperatures registrades a les estacions Ransol i Arcalís , respectivament.
- $Z_1=1641\text{m}$ i $Z_2=2059\text{m}$ van ser les altituds de les estacions Ransol i Arcalís . Z és l'altitud a què es va interpolar la temperatura.

2.2.3 Classificació automàtica dels tipus de temps

La classificació de tipus de temps Jenkinson-Collison, desenvolupada per Jenkinson i Collison l'any 1977, és un mètode reconegut per categoritzar patrons de circulació atmosfèrica basats en dades de pressió a nivell del mar (SLP). Aquest esquema de classificació ha estat fonamental en diversos estudis climatològics, especialment en la comprensió dels fenòmens meteorològics regionals i les seves implicacions per a les condicions ambientals.

L'esquema de classificació original proposat per Jenkinson i Collison es basa en l'anàlisi de mapes diaris de SLP, cosa que permet identificar tipus de temps distintius basats en les condicions atmosfèriques predominants. Aquest mètode ha estat adaptat i refinat en nombrosos estudis, demostrant la seva versatilitat i aplicabilitat a diferents regions geogràfiques. Per exemple, el treball de Linderson (2001) sobre la circulació atmosfèrica al sud de Escandinàvia va utilitzar la classificació de Jenkinson-Collison per avaluar els patrons meteorològics, destacant la seva eficàcia en la climatologia regional. De manera similar, l'estudi de Buchanan et al. (2002) va examinar la influència d'aquests tipus de temps en les concentracions de partícules en suspensió a l'aire a Edimburg, Regne Unit, il·lustrant encara més les aplicacions pràctiques de la classificació en la ciència ambiental.

A més, han sorgit avenços en les metodologies de classificació que han millorat el marc original de Jenkinson-Collison. Per exemple, Schwander et al. (2017) van reconstruir tipus de temps diaris fins al 1763, mostrant la importància històrica i l'adaptabilitat de l'esquema de classificació. Addicionalment, el desenvolupament per part de Lee (2014) d'un esquema de classificació de tipus de temps en quadrícula demostra una transició cap a metodologies més automatitzades i espacialment resoltes, que es poden aplicar universalment en localitzacions de latitud mitjana. Aquesta evolució reflecteix una tendència creixent en la climatologia d'integrar tècniques computacionals modernes amb sistemes de classificació tradicionals.

La rellevància de la classificació Jenkinson-Collison va més enllà de la mera categorització; serveix com una eina fonamental en la climatologia sinòptica, permetent als investigadors establir vincles entre els tipus de temps i diversos fenòmens climàtics. Per exemple, estudis han demostrat que els tipus de temps influeixen significativament en els patrons de precipitació, tal com ho evidencien els treballs de Goodess i Jones (2002), que van explorar les connexions entre els patrons de circulació i les característiques de les precipitacions a la península Ibèrica. A més, el projecte COST Action 733 ha facilitat l'harmonització de les classificacions de tipus de temps a tot Europa, subratllant la importància de la classificació en la recerca climatològica comparativa (Ramos et al., 2015).

En aquest estudi, es van correlacionar les dades de neu de les estacions meteorològiques amb la classificació de sistemes climàtics. Es va determinar els tipus de temps diaris que afecten la península Ibèrica utilitzant el mètode de Jenkinson i Collison (1977) (Figura 2.5). Aquesta classificació es basa en informació baromètrica del nivell del mar a 16 ubicacions, formant una quadrícula de 5 x 5° de resolució de latitud/longitud que abasta la península Ibèrica i les Illes Balears (López-Moreno i Vicente-Serrano, 2007), específicament a la regió compresa entre 50-30° N i 20° W-10° E. Les dades baromètriques del nivell del mar es van obtenir de la base de dades NCEP/NCAR "Reanàlisi" (<http://www.esrl.noaa.gov>), la qual es fonamenta en l'anàlisi retrospectiva de dades atmosfèriques observades i el recàlcul dels valors de pressió atmosfèrica.

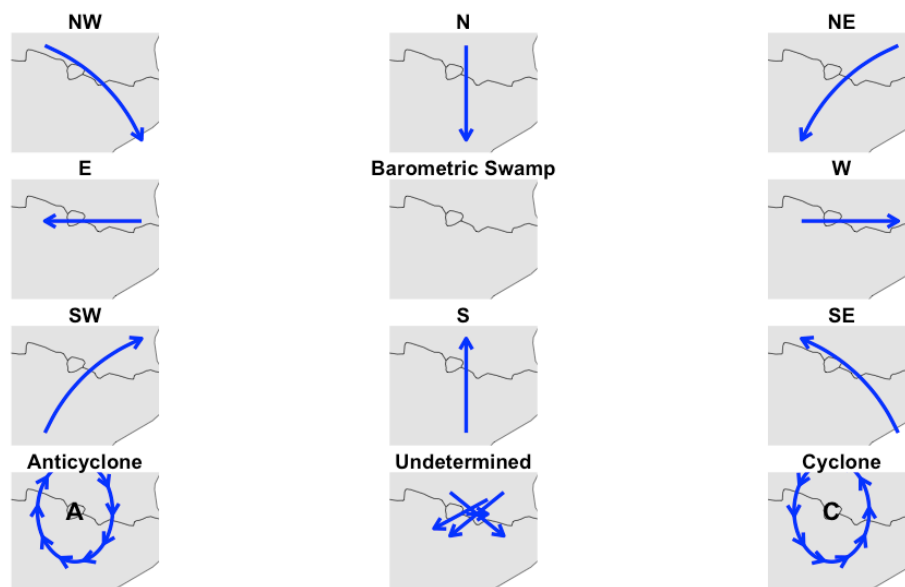


Figura 2.5: Representació simplificada dels tipus de temps o weather types més representatius. Crèdits: Elaboració pròpia.

El mètode de classificació automàtica desenvolupat per Jenkinson i Collison el 1977, originalment implementat per a les Illes Britàniques, ha demostrat ser efectiu, permetent una anàlisi detallada de la relació entre els episodis de precipitació i les condicions sinòptiques que els generen. Aquest enfocament va ser adaptat per a la península Ibèrica per Spellman el 2000 i posteriorment aplicat per Martín Vide el 2002 en estudis similars al present. A l'illa de Mallorca, Llop i Alomar-Garau (2012) van emprar el mètode de classificació sinòptica automàtica de Jenkinson i Collison per investigar la relació entre esdeveniments de precipitació superiors a 200 mm i les condicions sinòptiques associades. De manera similar, Azorín-Molina (2007) va utilitzar aquest mètode per identificar les condicions meteorològiques que afavoreixen el desenvolupament de brises marines a la província d'Alacant.

El mètode de Jenkinson i Collison es fonamenta exclusivament en dades de pressió superficial. Aquestes dades van ser descarregades en format .nc des del portal web <https://dss.ucar.edu>, que conté la base de dades de Daily Northern Hemisphere Sea Level Pressure Grids, amb registres que daten des de 1899. La informació recopilada va ser descodificada després utilitzant el programari ArcGIS per generar una taula de dades manejable, útil per als objectius d'aquest estudi.

La classificació de Jenkinson i Collison es basa en vuit variables deduïdes a partir de la pressió atmosfèrica en superfície: Pressió mitjana en superfície (P), component zonal del vent geostrofic superficial (W), component meridiana del vent geostrofic superficial (S), direcció del vent (D), velocitat del vent (F), component zonal de la vorticitat (ZW), component meridiana de la vorticitat (ZS) i vorticitat total (Z).

Aquest mètode s'ha utilitzat amb èxit per classificar 26 tipus de clima hivernal que afecten la península Ibèrica (Goodess i Palutikof, 1998; Spellman, 2000). Per simplificar els resultats, seguim el mètode proposat per Jones et al. (1993), reduint el nombre de tipus de clima a 10 mitjançant l'eliminació de tipus de clima híbrids, aplicant un llinar de freqüència de 0.5 per als tipus ciclònic (C) i anticiclònic (A), i un altre 0.5 per als tipus direccionals, que inclouen nord (N), nord-est (NE), est (E), sud-est (SE), sud (S), sud-oest (SW), oest (W) i nord-oest (NW). Aquest enfocament ha estat reeixit en diversos estudis sobre el clima dels Pirineus.

Finalment, per relacionar la intensitat de les nevades amb els diferents tipus de clima, es va normalitzar el nombre de nevades en relació amb els dies amb cada tipus de temps. Això va permetre calcular l'ocurrència de certs tipus de clima en funció de

l'extensió de les nevades i, per tant, identificar les situacions sinòptiques que afavoreixen esdeveniments de nevades de diferents intensitats.

2.2.4 Completar sèries temporals incompletes

Per al procés d'emplenar una base de dades de registre de gruix de neu utilitzant mètodes estadístics, es va seguir una sèrie de passos detallats que es descriuen a continuació.

Primer, es va realitzar una inspecció inicial de les dades disponibles per entendre'n l'estructura i la distribució dels valors. Aquesta fase va incloure la verificació de la quantitat de dades que falten al conjunt de dades, així com l'anàlisi d'estadístiques descriptives com la mitjana, mediana i desviació estàndard. A més, es van visualitzar les dades utilitzant gràfics, incloent histogrames i sèries temporals, amb l'objectiu d'identificar patrons i possibles anomalies als registres.

A l'etapa de neteja de dades, es va procedir a eliminar errors i valors extrems que no fossin representatius. Aquest procés va incloure la correcció de dates incorrectes o mal formatades, així com la identificació i tractament d'outliers, que podrien distorsionar les anàlisis estadístiques posteriors.

Per abordar les dades que falten, es van aplicar diversos mètodes estadístics d'imputació. Entre els mètodes simples, es van utilitzar la mitjana, mediana o moda de la sèrie temporal corresponent per emplenar els valors faltants. A més, es van emprar els mètodes de forward fill o backward fill, utilitzant el valor conegut anterior o posterior per completar les dades.

En casos on es van identificar tendències més complexes, es va optar per la imputació per interpolació. Es van fer servir tècniques d'interpolació lineal per estimar valors intermedis entre punts coneguts i, en certs casos, interpolació polinòmica per capturar variacions més detallades. A més, es van implementar models estadístics, com la regressió lineal i els models ARIMA, per preveure els valors que falten basant-se en el temps i altres variables.

Es van explorar també mètodes avançats, com l'ús de K- Nearest Neighbors (KNN), que va permetre utilitzar els valors de les estacions més properes per completar les dades que falten. Es van considerar també algorismes d'aprenentatge automàtic, com

Random Forest i XGBoost , per predir els valors mancants basats en múltiples característiques.

Finalment, es va dur a terme una validació rigorosa de les dades imputades per assegurar la precisió i raonabilitat dels valors emplenats. Aquesta validació va incloure la comparació de la sèrie temporal completa abans i després de la imputació, així com una anàlisi d'estadístiques descriptives per verificar la consistència de les dades. Addicionalment, es van fer proves creuades en una part reservada de les dades per validar l'efectivitat dels mètodes d'imputació aplicats.

2.2.5 Sectorització del país a regions nivoclimàtiques

L'anàlisi realitzada va tenir com a objectiu la sectorització de les principals regions nivoclimàtiques d'Andorra mitjançant la interpolació de dades de neu registrades a estacions meteorològiques. La metodologia emprada es va centrar en la creació d'un mapa ràster que reflectís la variabilitat espacial de la quantitat de neu recent, seguida de la classificació d'aquesta variabilitat en tres franges climàtiques diferents.

Per definir els límits de l'àrea d'estudi, es va utilitzar un shapefile d'Andorra que conté la informació geogràfica de les fronteres. Aquest shapefile va ser carregat i preprocessat per eliminar la dimensió Z, assegurant que contingués únicament les coordenades bidimensionals necessàries per a l'anàlisi. A més, es va verificar que el sistema de referència de coordenades (CRS) del shapefile coincidís amb el del Model Digital d'Elevació (MDE) utilitzat, transformant-lo en cas de ser necessari per garantir la coherència espacial entre les capes.

El MDE va ser utilitzat per representar la topografia d'Andorra, actuant com a base per a la interpolació de dades de neu. Aquest model proporciona una representació en format ràster de l'elevació del terreny, cosa que resulta crucial per entendre la distribució espacial de la neu, atesa la seva relació amb l'altitud. Les dades de neu es van recopilar de cinc estacions meteorològiques ubicades a diferents punts d'Andorra. Per a cada estació, es van registrar les coordenades geogràfiques i la quantitat de neu recent (mesurada en centímetres). Aquestes estacions es van transformar en un objecte espacial per facilitar-ne l'ús en el procés d'interpolació.

Es va aplicar el mètode d'interpolació ponderada inversa a la distància (IDW) per estimar els valors de neu a ubicacions no mostrades dins d'Andorra. Aquest mètode

assigna valors als punts desconeguts en funció de la proximitat a les estacions meteorològiques, ponderant més aquells punts més propers. La interpolació es va fer sobre una malla de punts generada a partir del MDE. El resultat de la interpolació va ser convertit en un mapa ràster que representa la variabilitat espacial de la neu a Andorra. Posteriorment, aquest ràster va ser retallat utilitzant els límits geogràfics d'Andorra, de manera que només es mantingués la informació dins el territori d'estudi.

Per facilitar la interpretació de la variabilitat de la neu, els valors interpolats van ser classificats en tres franges diferents utilitzant percentils. Les franges es van definir en funció dels valors de neu, categoritzant-los en menor quantitat de neu, quantitat de neu moderada, i més quantitat de neu. Finalment, es va generar un mapa visual que mostra la distribució de les tres franges nivoclimàtiques a Andorra, amb colors diferenciats per a cadascuna. Addicionalment, es van superposar els límits geogràfics del país per contextualitzar la distribució espacial de les regions nivoclimàtiques. Aquest enfocament va permetre identificar i sectoritzar les regions nivoclimàtiques principals d'Andorra en funció de la quantitat de neu recent, proporcionant una eina valuosa per a la gestió ambiental i la planificació en l'àmbit de la neu i el clima.

2.2.6 Càlcul de períodes de retorn de nevades

En aquest apartat es busca conèixer la recurrència temporal de determinats gruixos de neu, sigui seca o humida, que generen activitat d'allaus. Per això, va calcular la probabilitat teòrica d'ocurrència de nevades per a diferents períodes de retorn. Atès que no es disposa de la freqüència observada d'activitat d'allaus amb afectació a carreteres o infraestructures, es va estimar la probabilitat d'ocurrència d'allaus a partir de les quantitats de neu previstes a les zones de sortida que es poden desprendre en forma d'allaus.

Conèixer el període de retorn de nevades amb diferents capacitats destructives a Andorra és la base inicial per determinar si cal o no instaurar nous mecanismes de defensa anti-allaus, i si els existents són els més adequats o funcionals. Un cop coneguda la probabilitat d'ocurrència i es podrien estimar els danys potencials, caldria fer un càlcul dels costos econòmics de les pèrdues de vides humanes i materials.

Per dur a terme aquesta anàlisi, es van aplicar tècniques estadístiques avançades basades en dades històriques de diverses estacions meteorològiques. En primer lloc, es van processar les dades de neu històrica, convertint les dates al format adequat i definint

la temporada de neu, que es considera des del desembre fins l'abril de l'any següent. Això va permetre concentrar l'anàlisi en el període crític d'acumulació de neu més rellevant per a l'activitat d'allaus.

Es van calcular els valors de neu recent a cada estació meteorològica, considerant que els valors negatius s'interpreten com a zero, per reflectir adequadament les acumulacions diàries. A continuació, es van sumar aquests valors per a cada temporada, proporcionant un resum del total de neu recent acumulada, cosa que és clau per entendre la càrrega de neu potencial que podria desencadenar allaus.

Un aspecte important de l'anàlisi va ser el càlcul de l'espessor màxim de neu acumulada en un període de 72 hores consecutives. Aquesta anàlisi va permetre identificar els esdeveniments extrems d'acumulació de neu, que són els més propensos a generar allaus. Aquests màxims acumulats es van combinar en una taula amb els totals de neu recent per temporada, proporcionant una visió integral dels períodes de més risc.

Per modelar la distribució d'aquests màxims acumulats, es va ajustar la distribució Generalitzada de Valors Extrems (GEV), específicament la distribució de Gumbel, que és adequada per modelar esdeveniments extrems com les nevades intenses. Amb els paràmetres obtinguts d'aquests ajustaments, es van calcular els valors extrems esperats per a diferents períodes de retorn (5, 10, 50, 100 i 300 anys), proporcionant una base per estimar la probabilitat d'ocurrència d'allaus que podrien impactar a les carreteres o infraestructures d'Andorra.

Finalment, la bondat de l'ajust de la distribució es va avaluar mitjançant el test de Kolmogorov-Smirnov (KS), cosa que va permetre validar l'adequació del model a les dades observades. Aquest test va comparar les dades empíriques amb les simulades sota la distribució ajustada, assegurant la fiabilitat de les estimacions realitzades.

2.3 Resultats

2.3.1 Densitat d'estacions meteorològiques al país

En primer lloc, per demostrar estadísticament que la densitat d'estacions meteorològiques a Andorra era significativament superior a la recomanada per l'Organització Meteorològica Mundial (OMM) per a zones muntanyoses, es va

seleccionar un nivell de significació (α) de 0,05 i es va fer el càlcul del Z-Score, una mesura que indicava quants desviaments estàndard estava una dada per sobre o per sota de la mitjana. Després, es va comparar el valor crític de Z. El valor crític de Z per a un test unilateral (a la cua dreta) amb un nivell de significància de 0,05 era aproximadament 1,645.

Es van realitzar els càlculs següents: Densitat observada a Andorra: 0,07 estacions/km². Densitat recomanada per l'OMM per a zones muntanyenques: 0,01 estacions/km².

Suposició del desviament estàndard (σ): Es va suposar que es feia servir la densitat recomanada com la mitjana (μ) i es va estimar un desviament estàndard raonable. Per fer el càlcul, es va suposar que el desviament estàndard era una fracció de la mitjana recomanada. Es va utilitzar 0.005 com a exemple raonable.

El Z-score calculat va ser aproximadament 12,1, que estava molt per sobre del valor crític de 1,64 per a un nivell de significància de 0,05 en un test unilateral (cua dreta). Això significava que la probabilitat d'obtenir un Z-score tan alt o més gran simplement per atzar era extremadament baixa.

2.3.2 Anàlisi exploratòria i tendències de neu

Les dades de la taula mostren les estadístiques de diverses estacions meteorològiques (arc , pal, gra , ari , pas) mesures en quatre paràmetres: mitjana, desviació estàndard (sd), gruix màxim registrat i mitjana de les 5 estacions meteorològiques estudiades. La 'mitjana' és la mitjana dels valors registrats, la 'desviació estàndard' (sd) indica la variabilitat de les dades, el 'espessor màxim registrat' representa el valor màxim de l'espessor mesurat i la 'mitjana' és el valor mitjà quan les dades estan ordenades (Taula 2.2) (Taula 2.3) i (Figura 2.6)

Taula 2.2: Estadístiques descriptives d'espessor de neu (cm). Crèdits: Elaboració pròpia.

	mitjana	sd	màx	mitjana
arc	87	54	302	83
ari	44	39	303	35
pal	37	32	167	30
pas	78	52	276	72
gra	67	44	255	61

Les dades de la taula mostren les quantitats registrades a cinc estacions meteorològiques de les estacions d'esquí d'Ordino- Arcalís , Pas de la Casa, Arinsal , Pal, Grau Roig) durant els mesos de desembre a abril (Taula 2.3).

Taula 2.3: Mitjanes mensuals de de l'espessor de neu (cm). Crèdits: Elaboració pròpia.

Mes	Ordino- Arcalís	Pas de la Casa	Arinsal	Pal	Grau Roig
Desembre	36	36	26	20	31
Gener	76	69	48	41	60
Febrer	112	103	67	58	88
Març	117	104	51	48	89
Abril	98	80	27	21	68



Figura 2.6: Sèries temporals de l'espessor de neu (HS) per estació meteorològica. Crèdits: Elaboració pròpia.

Aquesta figura mostra les sèries temporals de l'espessor de neu (cm) des de la temporada 1980-81 fins al 2015-16 per a cinc estacions meteorològiques: Ordino-Arcalís (ARC), Arinsal (ARI), Grau Roig (GRA), Pal (PAL) i Pas de la Casa (PAS). Cada gràfic representa el gruix de neu registrat a cada estació al llarg del temps, destacant les variacions i patrons estacionals. L'escala de l'eix és constant per a totes les estacions, facilitant la comparació visual entre elles. L'etiqueta "Data" a l'eix x representa els anys del registre.

Aquesta taula mostra la tendència anual de l'espessor de neu mitjana (en cm) per estació meteorològica durant les temporades hivernals des de 1980-81 fins a 2015-16 (Taula 2.4). Cada temporada hivernal es defineix des de l'1 de desembre fins al 30 d'abril de l'any següent. Els valors es van calcular per mitjà de les dades diàries de gruix de neu per a cada estació i temporada hivernal.

Taula 2.4: Tendència de l'espessor de neu (cm) per estació durant les temporades hivernals.
Crèdits: Elaboració pròpia.

Temporada	arc	pas	ari	pal	gra
1980-1981	103	101	91	87	101
1981-1982	80	77	50	44	77
1982-1983	38	37	28	26	37
1983-1984	75	129	45	45	58
1984-1985	43	45	23	24	38
1985-1986	117	72	44	63	95
1986-1987	103	77	22	28	71
1987-1988	115	141	74	25	93
1988-1989	72	53	47	19	42
1989-1990	32	37	32	5	32
1990-1991	97	94	52	25	91
1991-1992	79	111	46	22	108
1992-1993	54	53	19	10	47
1993-1994	133	122	95	53	112
1994-1995	72	58	45	36	56
1995-1996	123	124	124	76	104
1996-1997	103	88	51	53	87
1997-1998	70	45	48	37	66
1998-1999	98	88	46	49	68
1999-2000	56	75	28	25	53
2000-2001	57	41	22	22	36
2001-2002	68	80	20	34	35
2002-2003	156	87	38	72	94
2003-2004	100	74	24	39	71
2004-2005	103	94	33	26	75
2005-2006	63	87	44	51	68
2006-2007	20	31	15	12	27
2007-2008	62	32	18	38	31

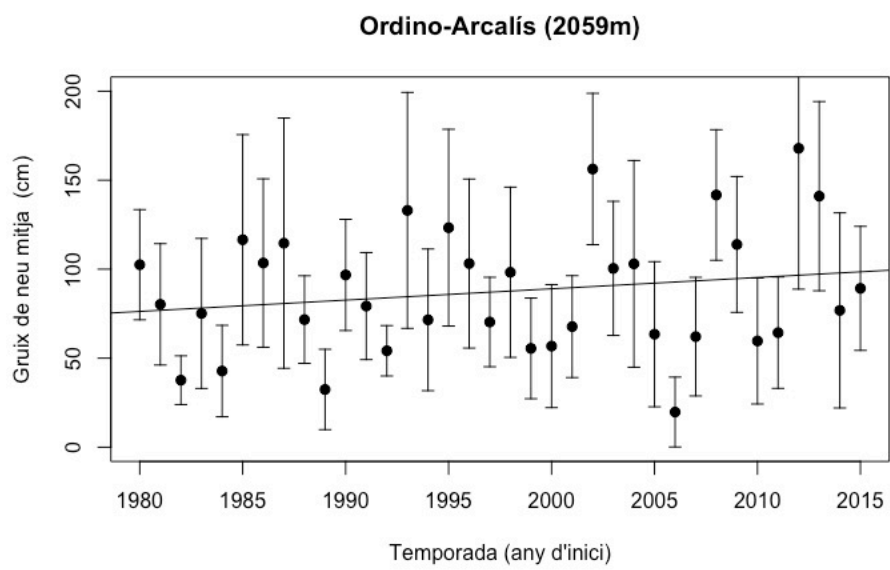
2008-2009	142	107	46	45	80
2009-2010	114	85	47	40	58
2010-2011	60	71	22	8	31
2011-2012	64	45	26	11	24
2012-2013	168	106	57	62	102
2013-2014	141	98	53	61	106
2014-2015	77	86	38	41	73
2015-2016	89	46	57	26	54

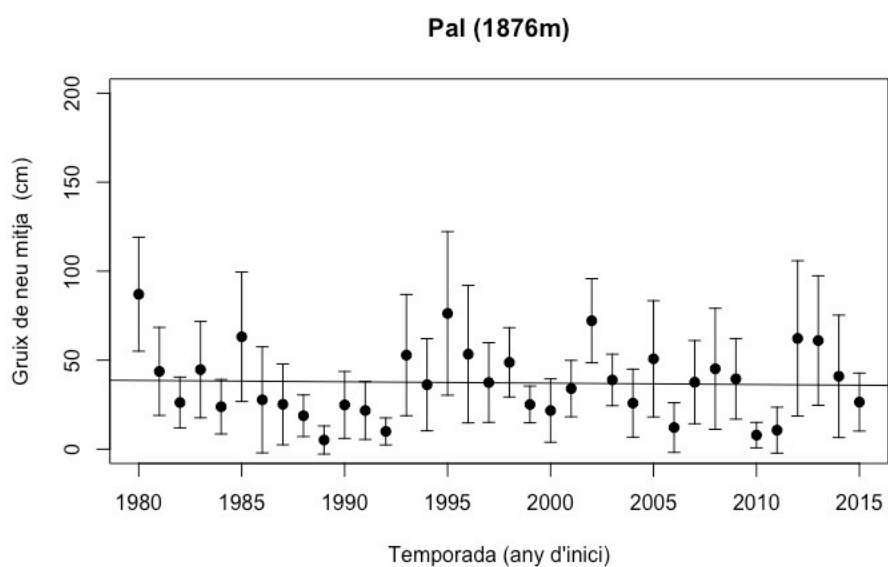
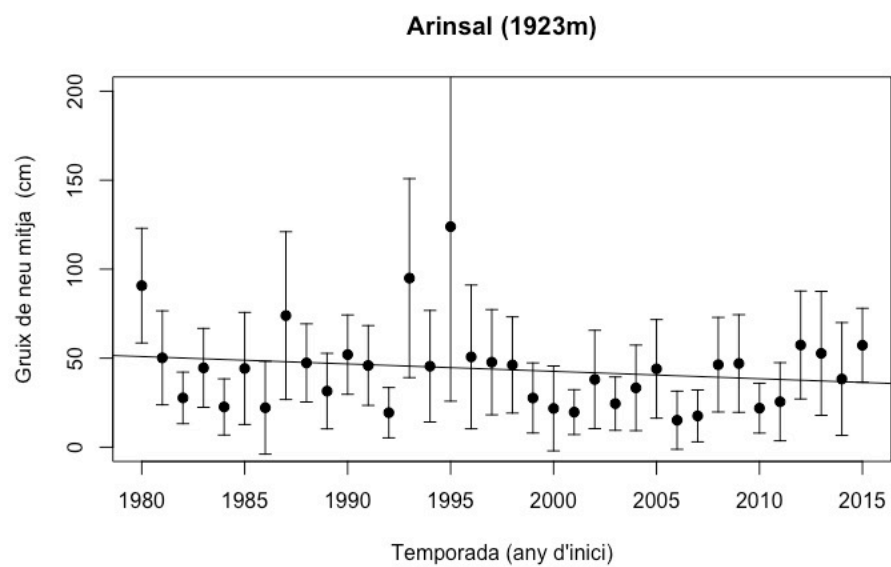
La taula mostra els coeficients de correlació de Pearson entre les sèries temporals de gruix de neu de diferents estacions meteorològiques a Andorra. Un valor de 1 indica una correlació positiva perfecta mentre que un valor de 0 indica cap correlació. Valors propers a 1 indiquen que les estacions tenen patrons de nevades molt semblants (Taula 2.5) (Taula 2.6).

Taula 2.5: Matriu de correlació de l'espessor de neu entre estacions meteorològiques. Crèdits: Elaboració pròpia.

	arc	pas	ari	pal	gra
arc	1,00	0,76	0,59	0,69	0,83
pas	0,76	1,00	0,67	0,63	0,85
ari	0,59	0,67	1,00	0,75	0,70
pal	0,69	0,63	0,75	1,00	0,72
gra	0,83	0,85	0,70	0,72	1,00

En la (Figura 2.7) els punts representen el gruix mitjà de neu mesurat cada temporada. Les barres d'error indiquen la desviació estàndard, que mesura la dispersió dels valors de gruix de neu al voltant de la mitjana. Una desviació estàndard àmplia suggereix una variabilitat considerable a l'espessor de neu d'una temporada a una altra, mentre que una desviació estàndard estreta indica que els valors de gruix de neu són més consistents al voltant de la mitjana. S'observa la línia de tendència general de gruix de neu al llarg del període estudiat.





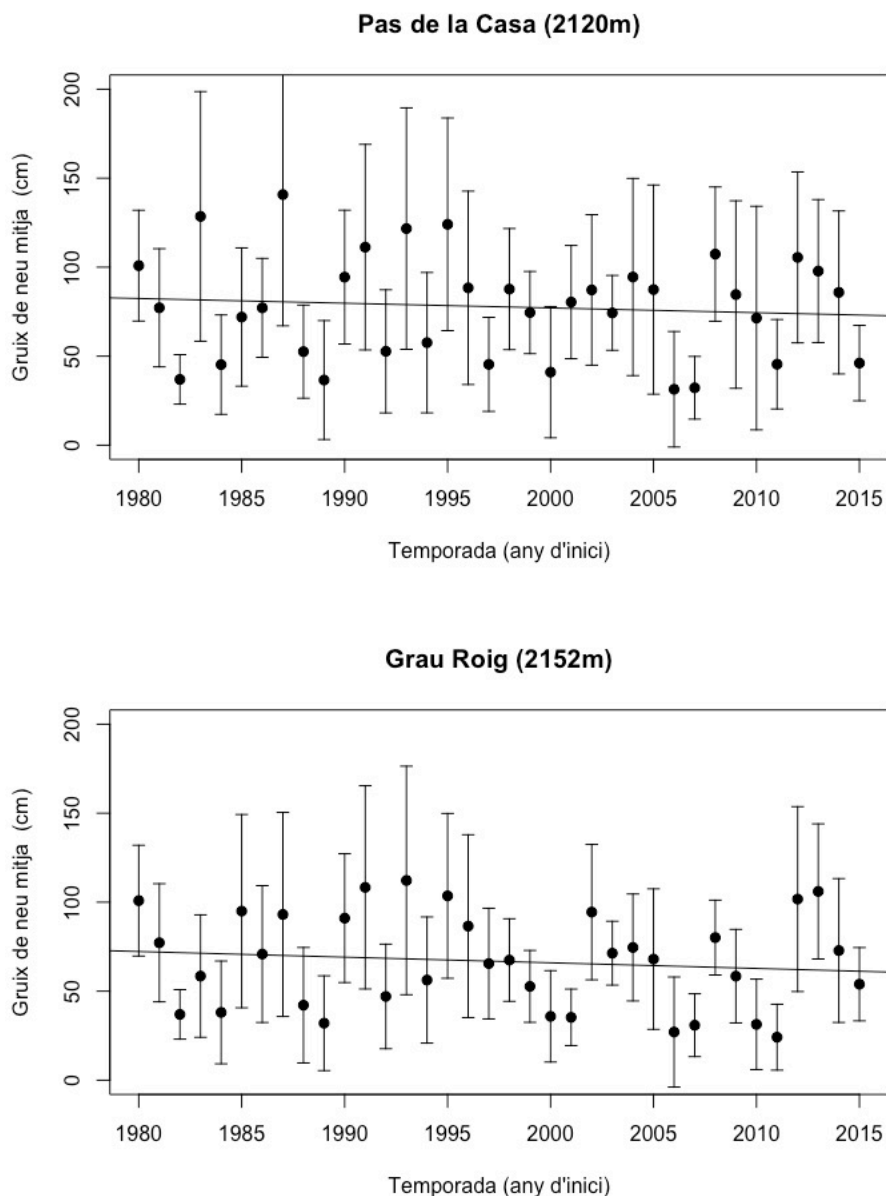


Figura 2.7: Variació de l'espessor de neu a les estacions meteorològiques analitzades durant les temporades de 1980-81 a 2015-16. Crèdits: Elaboració pròpia.

La taula presenta els valors de l'intercepte i el pendent juntament amb els errors estàndard, estadístics i valors p per a cada estació. Els interceptes indiquen l'espessor de neu mitjana a l'inici del període d'estudi, mentre que els pendents representen el canvi a l'espessor de neu per unitat de temps (dies). Un valor p significatiu ($p < 0,05$) indica una tendència significativa a l'espessor de neu al llarg del temps. Els valors p extremadament baixos, arrodonits a 0, s'han d'interpretar com a altament significatius. Les estacions arc, pas, ari i gra mostren tendències significatives, mentre que l'estació

pal no presenta una tendència significativa. Intercepte: Representa l'espessor de neu mitjana a l'inici de l'estudi per a cada estació. Pendent: Indica la taxa de canvi de l'espessor de neu al dia. Un pendent positiu indica un augment al gruix de neu, mentre que una negativa indica una disminució. Error Estàndard: Indica la precisió de l'estimació del pendent o l'intercepte. Estadístic t: És el valor de la prova t, que es fa servir per calcular el valor p. Valor p: Un valor p molt petit (fins i tot arrodonit a 0) indica una alta significança estadística, cosa que suggereix que la tendència observada és molt poc probable que sigui degut a l'atzar (Taula 2.6).

Taula 2.6: Resultats de la regressió lineal per a cinc estacions meteorològiques (arc , pas , ari , pal, gra). Crèdits: Elaboració pròpia.

estació	terme	estimació	std.error	estadística	p.valor
arc	Interceptor	68,51	21	3	1,5E-205
arc	Pendent	0,00	0,00	9,37	9,97E-21
pas	Interceptor	84,97	2,05	41,46	0
pas	Pendent	0,00	0,00	-3,75	0,000178
ari	Intercepte	55,58	1,53	36,33	5,3E-259
ari	Pendent	0,00	0,00	-8,32	1,06E-16
pal	Intercepte	39,47	1,27	31,13	6,8E-196
pal	Pendent	0,00	0,00	-1,90	0,057392
gra	Intercepte	75,42	1,76	42,91	0
gra	Pendent	0,00	0,00	-5,27	1,42E-07

El gràfic següent mostra l'evolució del nombre de dies de nevades durant diferents temporades hivernals, des de 1979-80 fins a 2016-17. La línia negra amb punts representa el nombre de dies de cada temporada, mentre que la línia blava mostra la tendència general. Observant les dades, es pot veure una gran variabilitat interanual, amb temporades en què el nombre de dies de nevades augmenta o disminueix de manera significativa. No obstant això, la línia de tendència blava indica un lleuger augment en el nombre total de dies de nevades al llarg del període estudiat, suggerint que malgrat les fluctuacions, hi ha una lleugera tendència a tenir més dies de nevades en les darreres dècades (Figura 2.8).

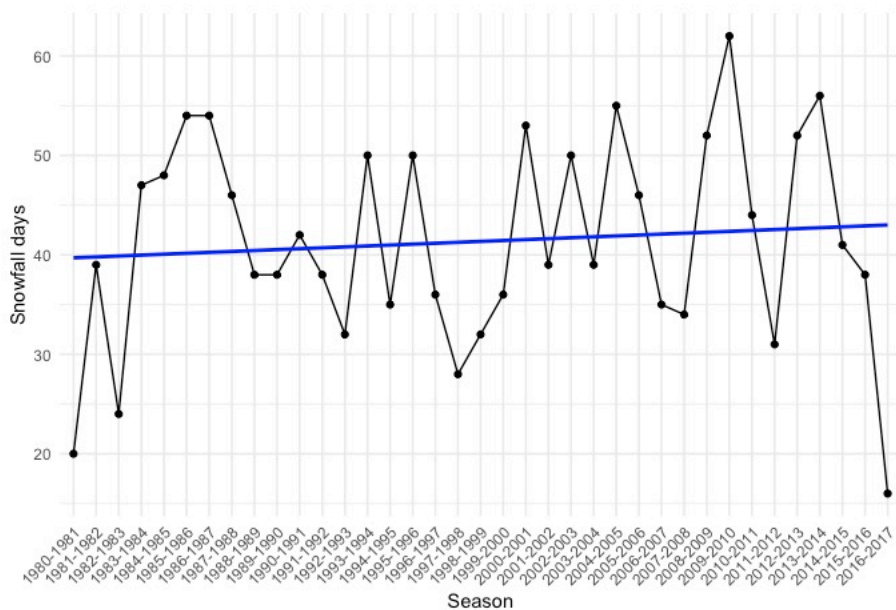


Figura 2.8: Gràfic de dies de nevades per temporada, mostrant una ligera tendència general a l'alça al llarg del temps. La línia blava representa la tendència de les dades. Crèdits: Elaboració pròpia.

2.3.3 Clústering i PCA

A continuació, es presenten els resultats del Clustering i PCA realitzat (Figura 2.9). El gràfic mostra el Mètode del Colze utilitzat per determinar el nombre òptim de clústers (K) en l'anàlisi de clustering. L'eix X representa el nombre de clústers, mentre que l'eix Y mostra la suma dels quadrats dins dels clústers (Total within-clusters sum of squares). La tècnica consisteix a identificar el punt on la disminució a la suma dels quadrats dins dels clústers es torna menys pronunciada. Aquest punt s'anomena "colze". Al gràfic, el "colze" s'observa al voltant de $K = 3$, indicant que tres clústers és un bon balanç entre minimitzar la variabilitat dins dels clústers i mantenir la simplicitat del model. La suma dels quadrats dins dels clústers disminueix ràpidament en augmentar el nombre de clústers de 2 a 3, però la taxa de disminució es redueix considerablement després de $K = 3$.

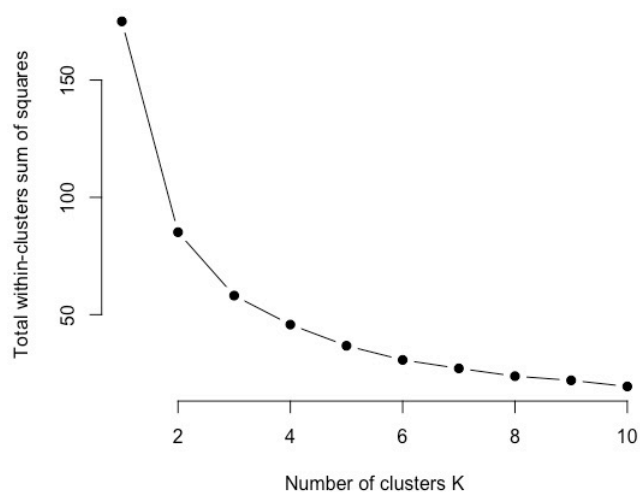


Figura 2.9: Mètode del colze per determinar el nombre òptim de Clústers. Crèdits: Elaboració pròpia.

Serveix per visualitzar la importància de cada component principal i es pot utilitzar per determinar el nombre de components principals que cal conservar. El Scree Plot mostra el percentatge de variància explicada per cadascuna de les components principals (Dimensions) de l'Anàlisi de Components Principals (PCA) (Figura 2.10). La primera dimensió explica el 74,4% de la variància total en les dades, cosa que indica que la major part de la informació sobre les diferències en el gruix de neu entre estacions es captura en aquest component. La segona dimensió explica un 9,6% addicional de la variància i la tercera dimensió explica un 9%. Les dimensions següents expliquen percentatges menors de la variància (3% i 4%). El gràfic suggereix que les dues primeres dimensions són suficients per captar la majoria de la variabilitat en les dades, i és especialment dominant la primera dimensió. Això justifica la reducció de dimensionalitat en considerar només les dues primeres o tres components principals per a l'anàlisi i la visualització de les dades.

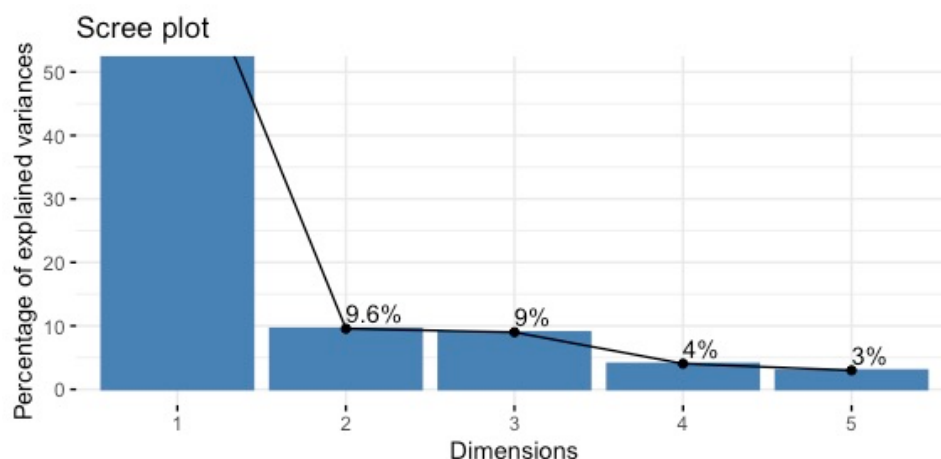


Figura 2.10: Scree Plot de l'Anàlisi de Components Principals. Crèdits: Elaboració pròpia.

Aquest gràfic (Figura 2.11) mostra les variables projectades a l'espai de les dues primeres dimensions principals (Dim1 i Dim2) obtingudes de l'Anàlisi de Components Principals (PCA). Dim1 (74,4%): La primera dimensió principal explica el 74,4% de la variabilitat en les dades, capturant la major part de la informació sobre les diferències en el gruix de neu entre estacions. Dim2 (9,6%): La segona dimensió principal explica un 9,6% addicional de la variabilitat, proporcionant una perspectiva addicional però menys dominant. Les fletxes representen les estacions meteorològiques (arc , pas , ari, pal, gra). La longitud i la direcció de les fletxes indiquen la contribució de cada variable a les dimensions principals. pal i pas tenen les majors contribucions a Dim1, indicant que aquestes estacions són les més influents en la variació al llarg d'aquesta dimensió. arc, ari , i gra també contribueixen significativament, però en menor mesura. Contribució (contrib): L'escala de color indica el nivell de contribució de cada variable a les dimensions principals, on colors més càlids (vermells) indiquen una major contribució.

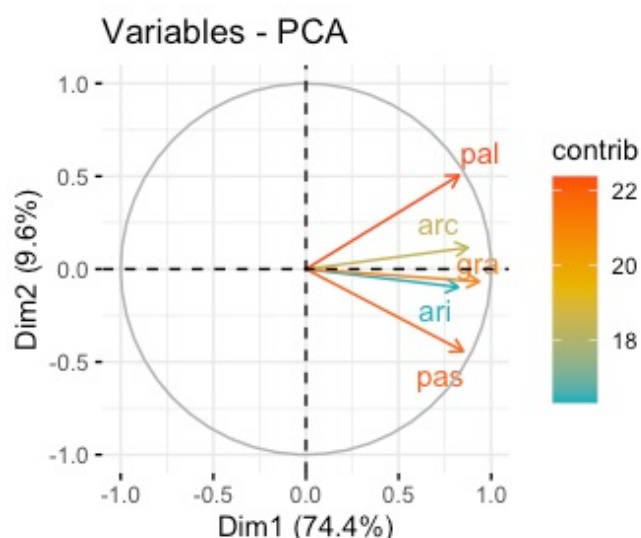


Figura 2.11: Anàlisi de Components Principals (PCA) de les Estacions Meteorològiques analitzades. Crèdits: Elaboració pròpia.

La (Figura 2.12) mostra la projecció de les estacions meteorològiques a l'espai definit per les dues primeres dimensions principals (Dim1 i Dim2) de l'Anàlisi de Components Principals (PCA). Cada punt representa una estació meteorològica en una temporada específica, i els colors indiquen el cluster al que pertany cada estació. Dim1 (74,4%): La primera dimensió principal captura el 74,4% de la variabilitat total en les dades. Dim2 (9,6%): La segona dimensió principal captura un 9,6% addicional de la variabilitat.

Clústers : Clúster 1 (Blau): Representa estacions que estan agrupades en funció de patrons de nevades similars. Aquestes estacions estan alineades principalment al llarg de Dim1. Estacions a Clúster 1: arc , ari . Clúster 2 (Groc): Aquest grup d'estacions mostra patrons distintius de nevades i està separat dels altres clústers a l'espai PCA. Estacions a Clúster 2: pas , gra . Clúster 3 (Gris): Estacions en aquest cluster tenen característiques intermèdies i estan distribuïdes al llarg de totes dues dimensions. Estacions a Clúster 3: pal

El·lipses: Les el·lipses representen les àrees de dispersió dels punts dins de cada clúster, proporcionant una visualització de la variabilitat interna de cada grup i la separació

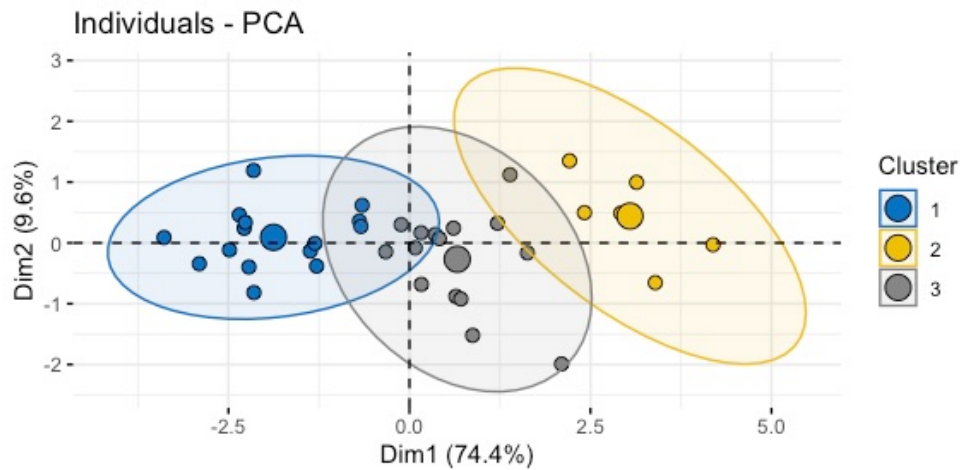


Figura 2.12: Anàlisi de Components Principals (PCA) d'Individus. Crèdits: Elaboració pròpia.

2.3.4 Tipus de temps i nevades

En els resultats de l'estudi, s'observa una varietat de correlacions entre les regions, que oscil·len entre valors positius i negatius. Les correlacions positives, representades en tons vermells al mapa de calor, indiquen que certes regions tendeixen a experimentar condicions similars o seguir tendències conjunes. Això podria reflectir similituds en factors com ara el clima, l'economia o la cultura. D'altra banda, les correlacions negatives, mostrades en tons blaus, suggereixen que aquestes regions presenten patrons oposats a les característiques analitzades, cosa que podria evidenciar diferències significatives en les seves condicions ambientals, econòmiques o socials.

La intensitat de les correlacions es representa mitjançant la tonalitat dels colors al gràfic. Els tons més foscos, tant vermells com blaus, indiquen correlacions més fortes, reflectint relacions més marcades entre regions. En canvi, els tons més clars representen correlacions febles, suggerint relacions menys pronunciades o difuses. Els tons vermells indiquen correlacions positives, on l'augment d'un tipus de temps està associat amb l'augment de l'altre, mentre que els tons blaus representen correlacions negatives, en què l'augment d'un tipus de temps implica una disminució de l'altre. L'escala de color, que va de -1 a 1, permet identificar fàcilment patrons i relacions, oferint una eina valuosa per analitzar la interacció entre els diferents tipus de temps i comprendre millor els patrons climàtics (Figura 2.13).

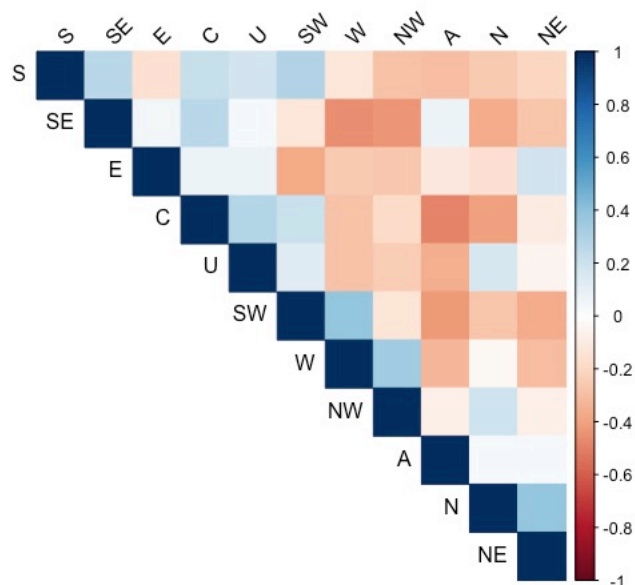


Figura 2.13: Mapa de calor que mostra la matriu de correlació entre diferents tipus de temps, identificats amb les etiquetes S, SE, E, C, U, SW, W, NW, A, N, A i NE. Crèdits: Elaboració pròpia.

Al mapa de calor (Figura 2.14), es mostra la distribució dels dies associats a diferents tipus de temps meteorològic al llarg de diverses temporades. Els eixos horitzontals corresponen a les temporades, mentre que els eixos verticals representen els diferents tipus de temps, etiquetats com W, U, SW, SE, NW, NE, N, E, C i A.

La intensitat del color lilós/blau indica el nombre de dies registrats per a cada tipus de clima a cada temporada: els tons més foscos representen un nombre més alt de dies, mentre que els tons més clars indiquen una menor quantitat. Aquest tipus de visualització permet identificar patrons estacionals o canvis en la freqüència dels diferents tipus de temps al llarg del temps, destacant variacions significatives en determinades temporades o per a tipus de temps específics.

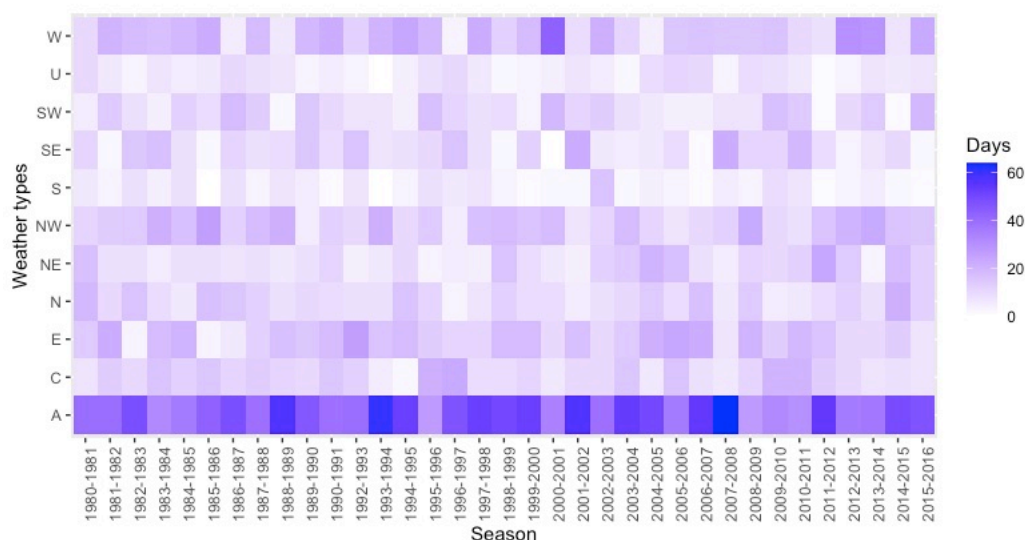


Figura 2.14: Mapa de calor que il·lustra la freqüència de diferents tipus de temps al llarg de diverses temporades, des de 1981-1982 fins a 2015-2016. Crèdits: Elaboració pròpia.

En la (Figura 2.15) es presenta una matriu de correlació entre diferents localitats (arc, pas, ari, pal, gra) en relació amb els dies de nevada. L'eix horitzontal i l'eix vertical llisten les ubicacions, permetent comparar les correlacions entre elles. Els tons de gris representen el grau de correlació, amb una escala que varia des del gris clar (correlació més baixa) fins al negre (correlació més alta, 100%), tal com indica la llegenda de la dreta que cobreix un rang de correlació del 64% al 100%. Aquest gràfic permet visualitzar quines localitats comparteixen patrons de nevades més similars, oferint una comprensió més profunda de la distribució i la sincronització dels dies de nevada entre zones. Aquesta informació és especialment útil per analitzar la coherència espacial dels esdeveniments de nevada i els seus patrons entre diferents localitats.

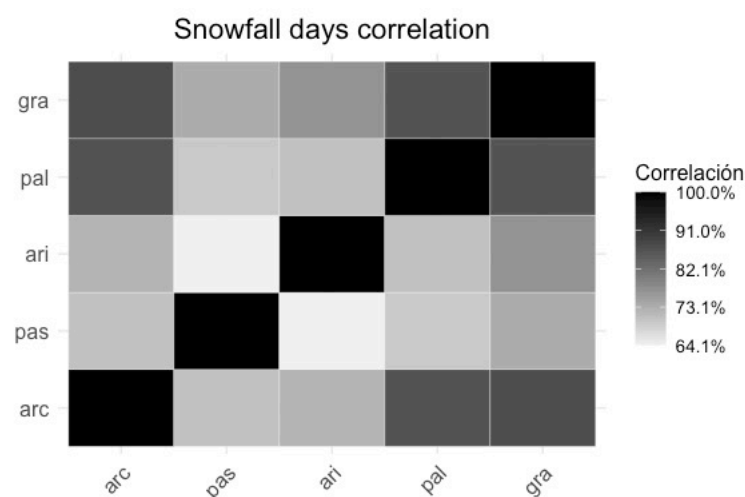


Figura 2.15: Mapa de calor que representa la correlació de dies amb nevades entre diferents ubicacions, etiquetades com a gra , pal, ari , pas , i arc . Crèdits: Elaboració pròpia.

Al Dendrograma de clúster (Figura 2.16), les dades han estat agrupades utilitzant el mètode de Ward i la distància euclidiana al quadrat (D2). A l'eix vertical es representa l'alçada o distància a què s'uneixen els clústers, mentre que a l'eix horitzontal es mostren els diferents grups d'anys. Aquest dendrograma permet observar la similitud o la dissimilitud entre els diferents grups, ajudant a identificar patrons d'agrupament i relacions entre els conjunts de dades.

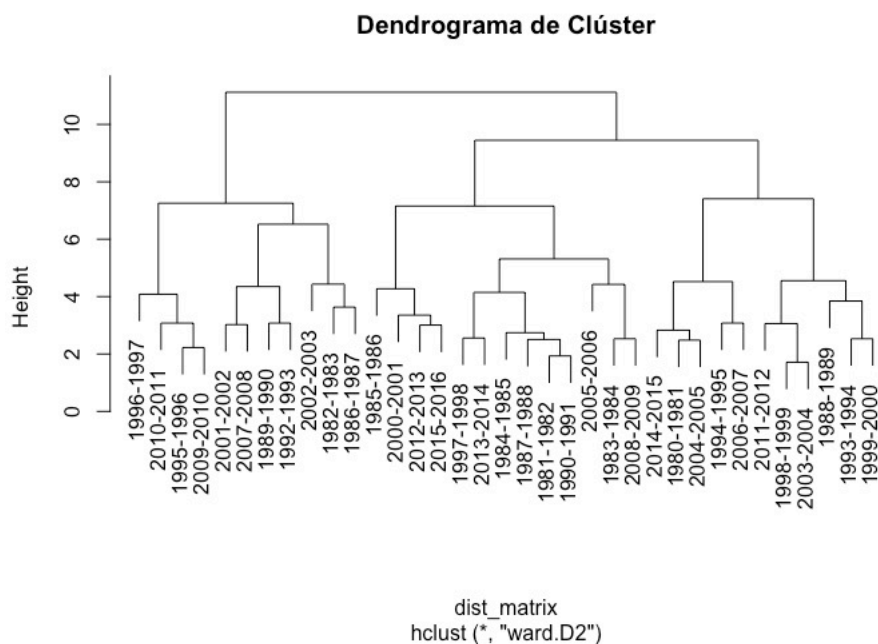
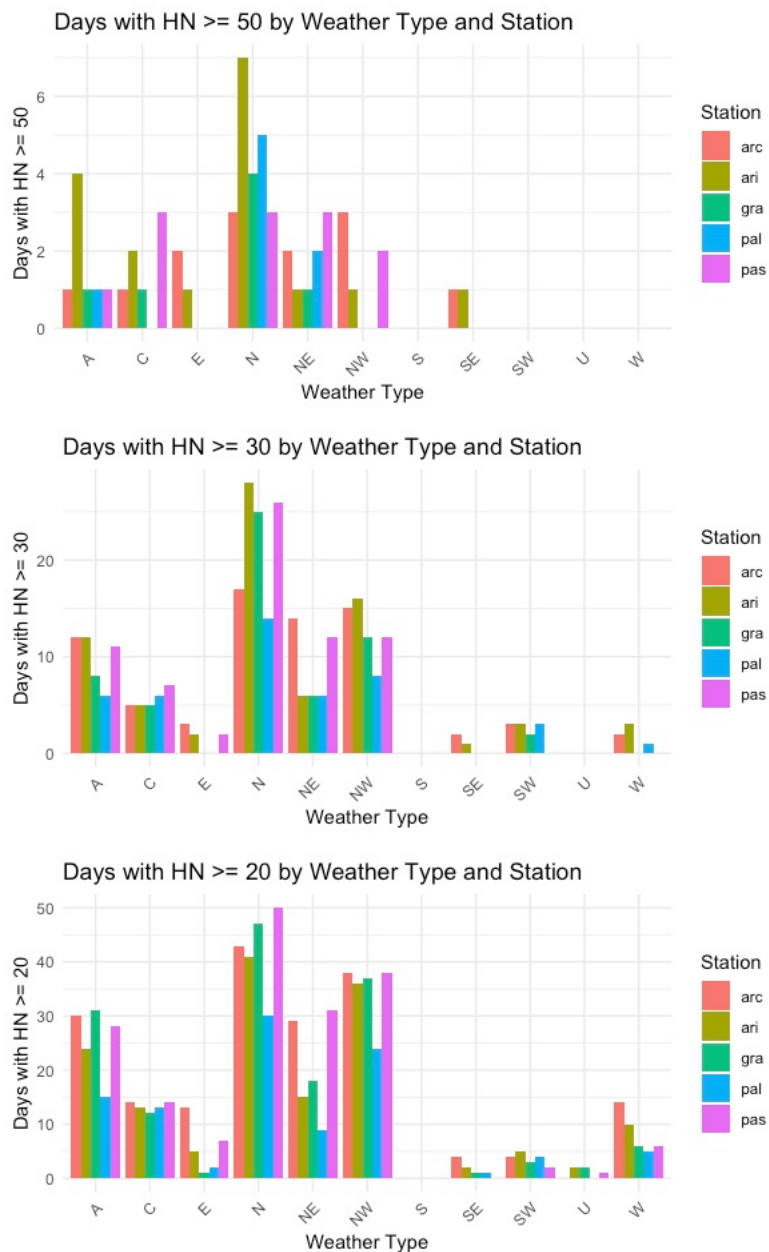


Figura 2.16: Dendrograma de clúster que il·lustra l'agrupació jeràrquica de diferents grups o anys. Crèdits: Elaboració pròpia.

Els tipus de temps es llisten a l'eix horitzontal, mentre que el nombre de dies es representa a l'eix vertical (Figura 2.17). Les diferents estacions estan representades per colors: arc (taronja), ari (verd), gra (blau), pal (morat), i pas (rosat). Aquest gràfic permet comparar la quantitat de dies amb nevades significatives per a cada tipus de temps a cada estació, proporcionant una visió clara de com les diferents condicions meteorològiques afecten l'acumulació de neu a aquestes localitzacions.



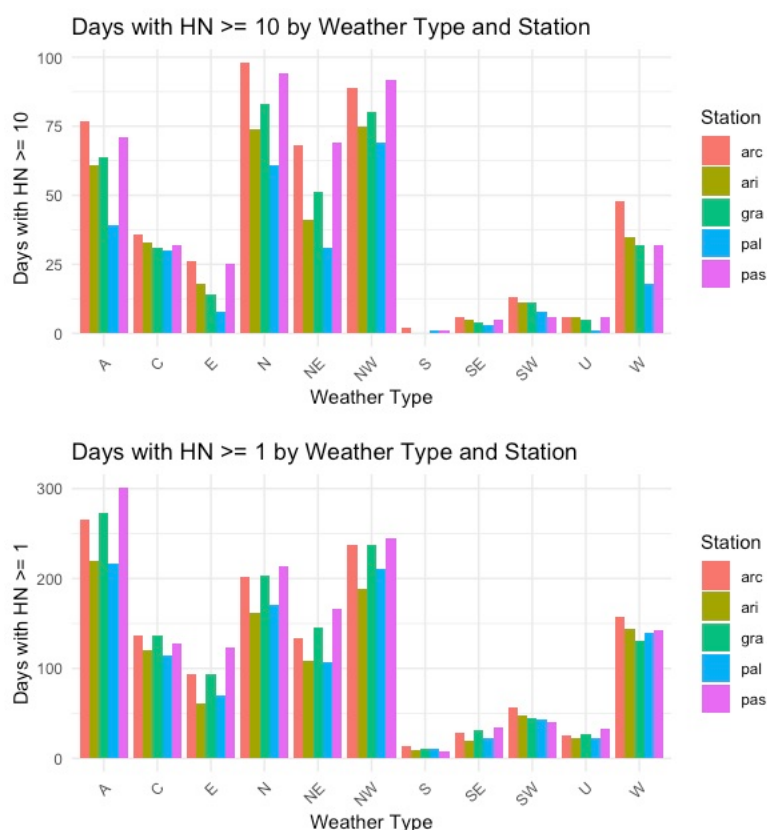


Figura 2.17: Nombre de dies amb una alçada de neu (HN) major o igual a 50, 30, 20 10 i 1cm, classificats per tipus de temps i estació. Crèdits: Elaboració pròpia.

La (Figura 2.18) mostra l'alçada màxima de neu recent (HN) registrada per tipus de temps i per estació meteorològica. A l'eix horitzontal es representen els diferents tipus de temps (A, C, E, N, NE, NW, S, SE, SW, U, W), mentre que l'eix vertical indica l'alçada màxima de neu recent en centímetres. Cada barra del gràfic està codificada per colors, representant les diferents estacions meteorològiques: **arc**, **ari**, **gra**, **pal** i **pas**. Aquest gràfic permet comparar com el tipus de temps influeix en l'acumulació de neu recent en cada estació. Es pot observar que certs tipus de temps, com NE o SE, presenten acumulacions més altes en comparació amb altres. Així mateix, la distribució per estacions revela variacions espacials significatives en l'acumulació màxima de neu, proporcionant informació clau sobre patrons meteorològics locals i els seus efectes en les nevades.

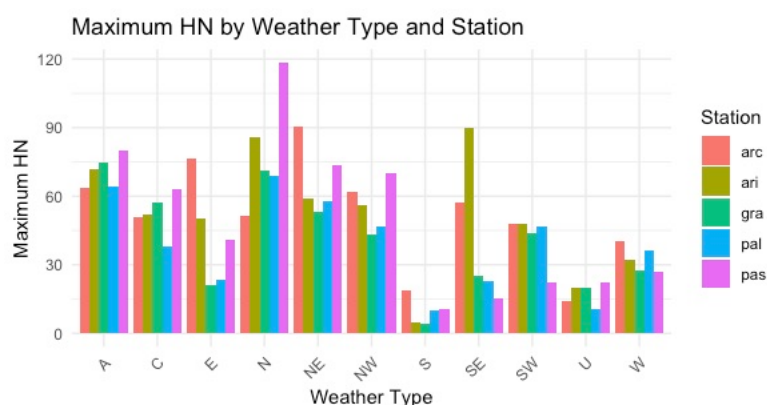


Figura 2.18: Alçada màxima de neu recent (HN) per tipus de temps i estació. Crèdits: Elaboració pròpia.

Els tipus de temps es representen a l'eix horitzontal, mentre que l'alçada màxima de neu s'indica en centímetres a l'eix vertical. Les diferents estacions estan codificades per colors: arc (taronja), ari (verd), gra (blau), pal (morat) i pas (rosat) (Figura 2.19-20-21-22-23-24).

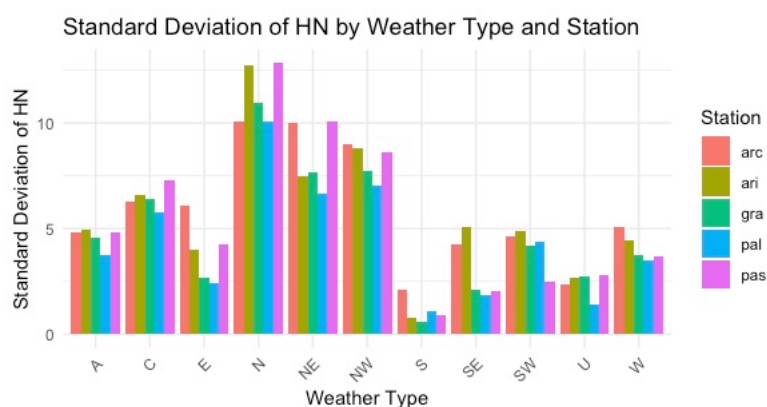


Figura 2.19: Desviació estàndard de l'alçada de neu recent (HN) per tipus de temps i estació

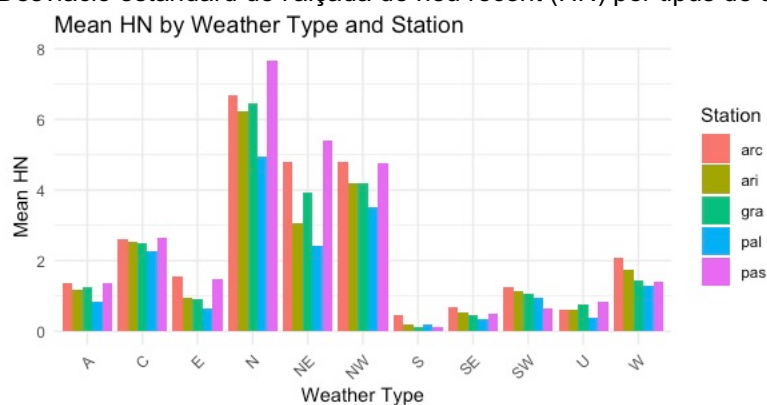


Figura 2.20: Alçada mitjana de neu recent (HN) per tipus de temps i estació.

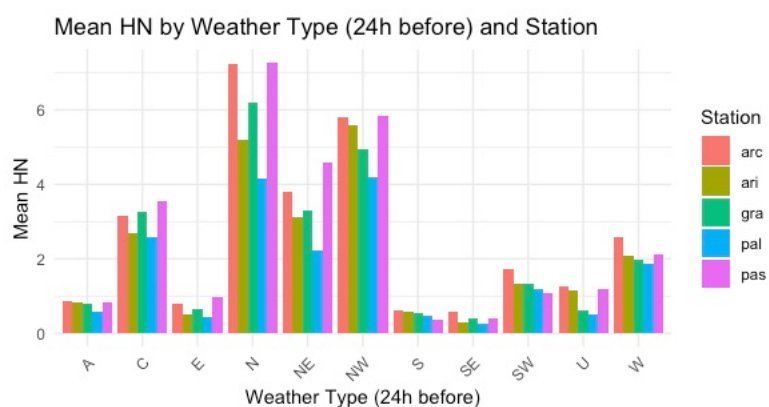


Figura 2.21: Alçada mitjana de neu (HN) per tipus de temps (24 hores abans) i estació.
Crèdits: Elaboració pròpia.

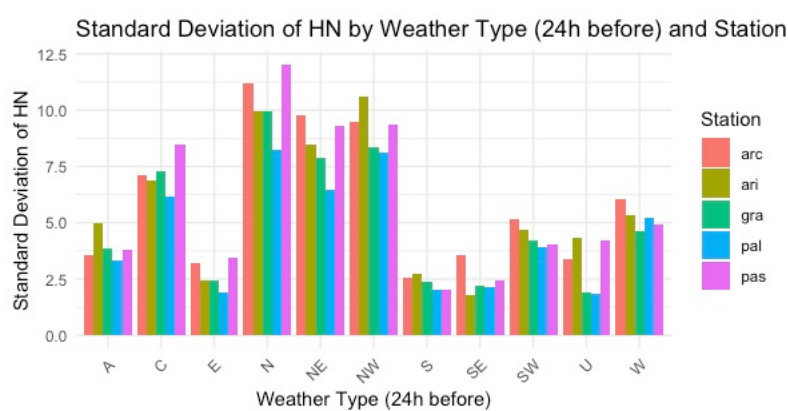


Figura 2.22: Desviació estàndard de l'alçada de neu recent (HN) per tipus de temps (24 hores abans) i estació.

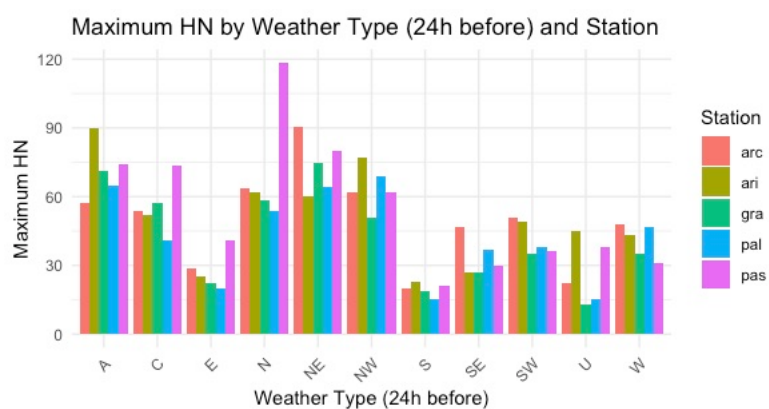
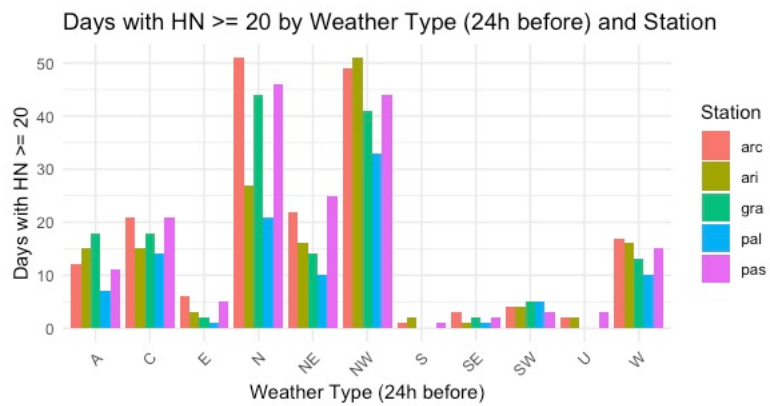
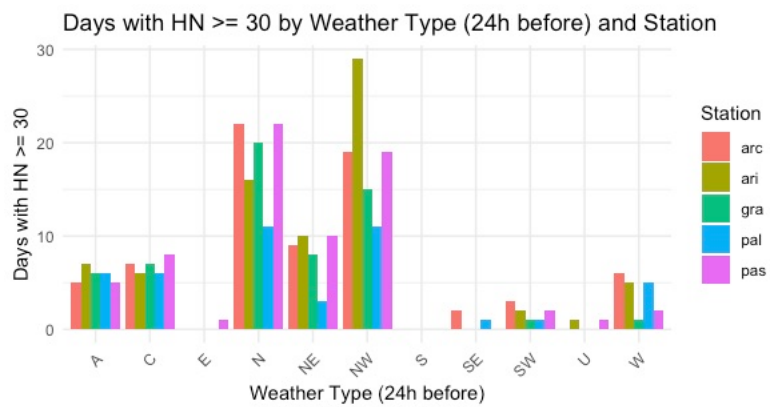
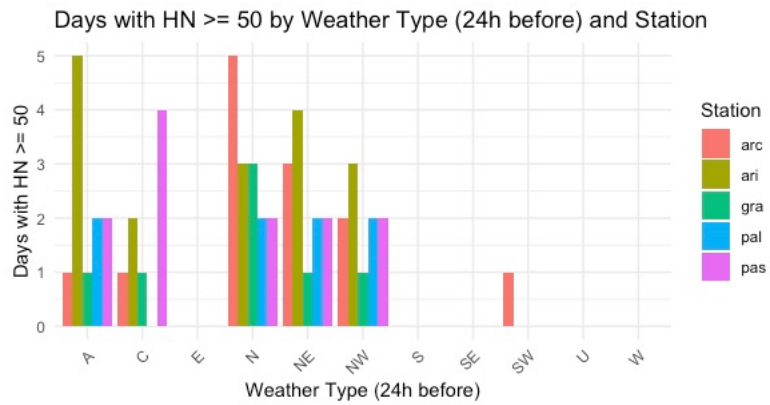


Figura 2.23: Alçada màxima de neu recent (HN) per tipus de temps (24 hores abans) i estació.



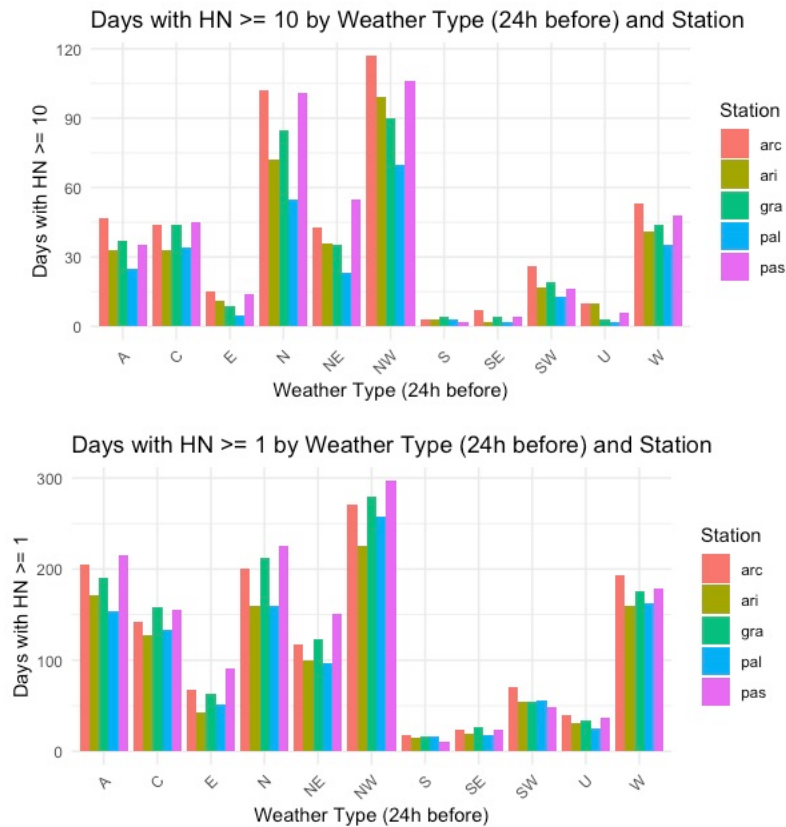


Figura 2.24: Nombre de dies amb una alçada de neu (HN) major o igual a 50,30,20 10 i 1cm, classificats per tipus de temps (24 hores abans) i estació. Crèdits: Elaboració pròpia.

2.3.5 Índex de Severitat Hivernal per temporada a partir de la Base de Dades CLIMPY

El gràfic de barres (Figura 2.25) mostra l'índex de severitat hivernal (ISI) per temporada, juntament amb una línia de tendència lineal representada en blau. L'equació d'aquesta línia és $y=1,98x+2496,78$, la qual reflecteix una tendència molt lleugera a l'alça de l'ISI al llarg de les temporades. No obstant això, el valor de $R^2=0$ indica que el model lineal no explica la variabilitat de les dades, suggerint que no hi ha una relació lineal significativa entre les temporades i l'ISI.

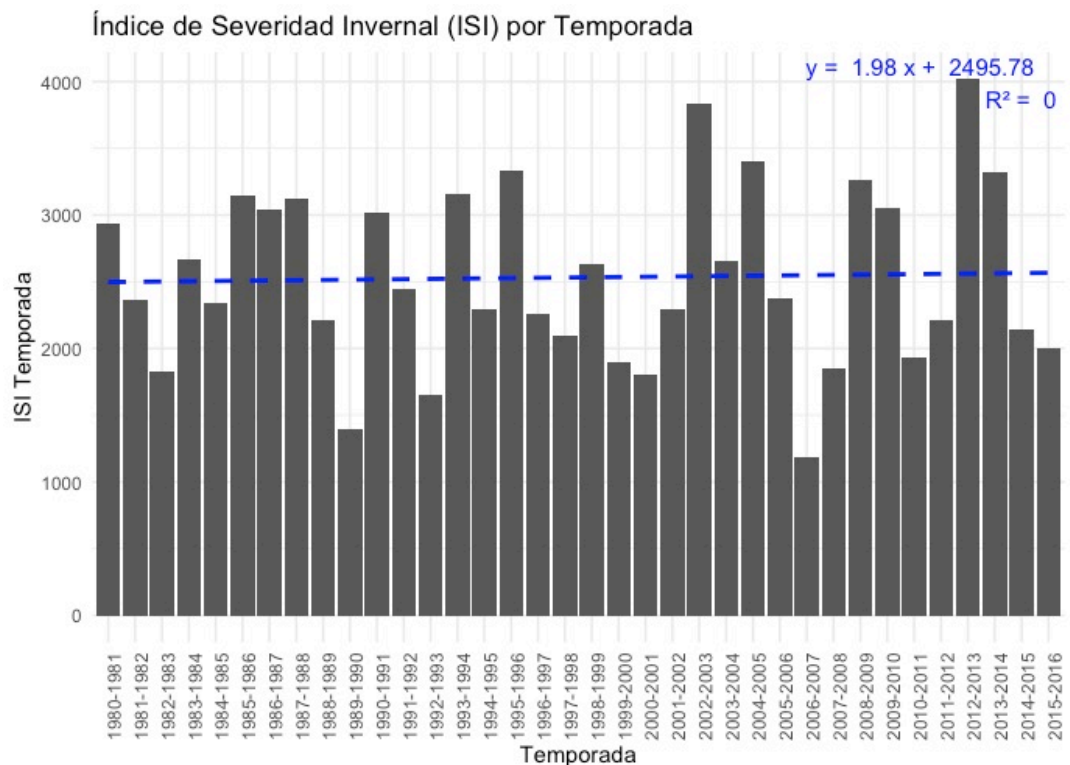


Figura 2.25: índex de Severitat Hivernal (ISI) per temporada. Crèdits: Elaboració pròpia.

L'absència d'un patró clar indica que els residus estan distribuïts de manera aleatòria, cosa que és bona per al model (Figura 2.26). Normal QQ: El gràfic QQ mostra que els residus es distribueixen aproximadament al llarg de la línia de referència, cosa que suggereix que els residus segueixen una distribució normal. Scale- Location : Aquest gràfic mostra la dispersió dels residus estandarditzats en funció dels valors ajustats. No s'observa un patró clar, cosa que és positiva, indicant homocedasticitat (variança constant dels residus). Residuals vs Leverage : Aquest gràfic mostra els residus estandarditzats davant de la palanca (leverage). No s'observen punts amb alta influència (no hi ha valors propers o més enllà de la línia de Cook), indicant que no hi ha observacions influents significatives.

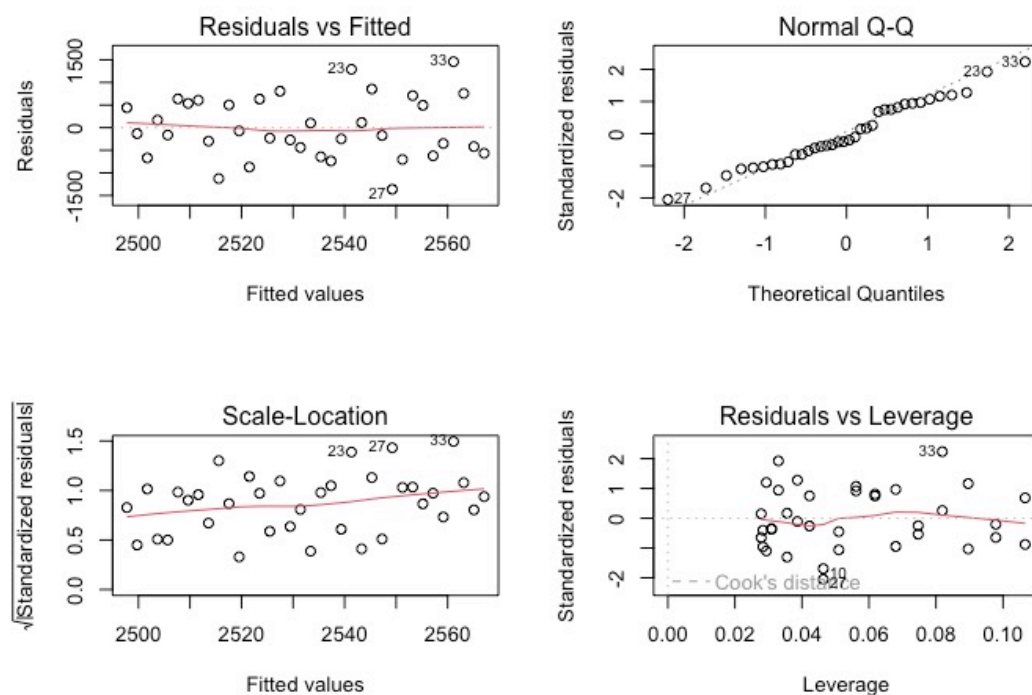


Figura 2.26: Residuals vs Fitted : Aquest gràfic mostra els residus enfront dels valors ajustats.
Crèdits: Elaboració pròpia.

2.3.6 Completar sèries temporals

La (Figura 2.27) presenta nou gràfics que comparen diferents mètodes d'imputació de dades aplicades a una sèrie temporal del gruix de neu. L'eix vertical mostra l'HS (alçada de neu en centímetres), mentre que l'eix horitzontal representa les dates. Cada gràfic visualitza com cada mètode d'imputació afecta la representació de les dades al llarg del temps. Aquesta comparació permet analitzar la precisió i l'adequació de cada tècnica en la reconstrucció de dades mancants, destacant-ne les diferències i patrons.

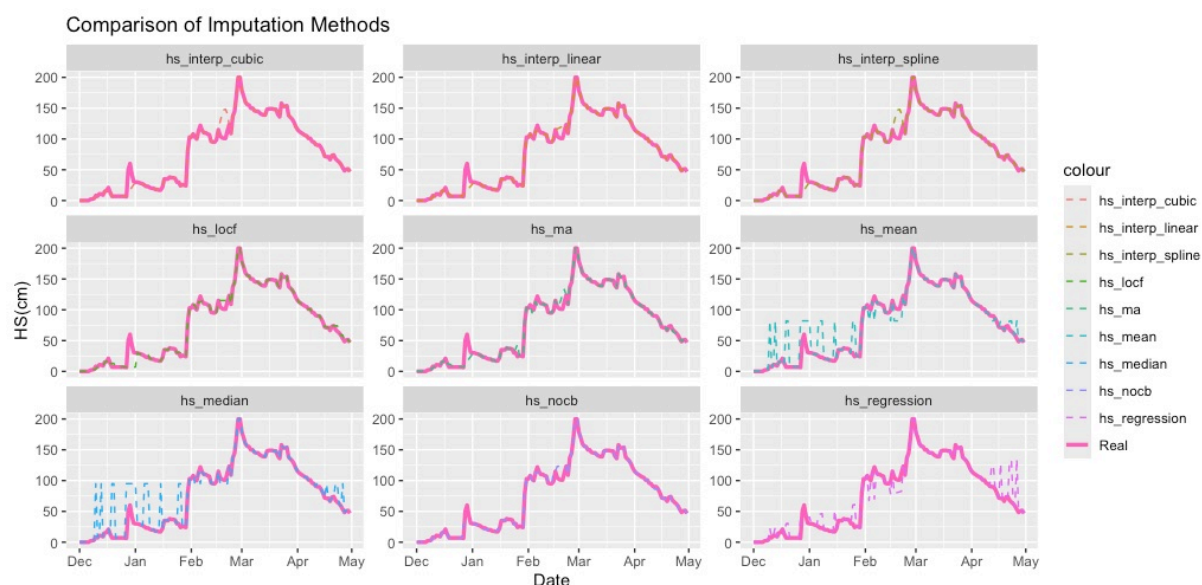


Figura 2.27: Gràfics que comparen diferents mètodes d'imputació de dades aplicades a una sèrie temporal de gruix de neu, amb la variable HS (alçada de neu en centímetres) a l'eix vertical i la data a l'eix horitzontal. Crèdits: Elaboració pròpia.

La (Figura 2.28) mostra la sèrie climàtica de l'Índex de Severitat Hivernal (WSI) per a les temporades compreses entre 1980-1981 i 2019-2020. Les barres representen els valors de WSI per temporada, mentre que la línia puntejada blava indica la tendència lineal al llarg del període. Els valors faltants a la sèrie han estat emplenats utilitzant càlculs estadístics. L'equació de la línia de tendència, representada a la cantonada superior dreta, és $y = -4,03x + 2577,95$, i el valor de $R^2 = 0$ evidencia que no hi ha una relació lineal significativa entre les temporades i el WSI. Aquesta representació mostra l'evolució temporal de l'índex, però sense destacar una tendència clara.

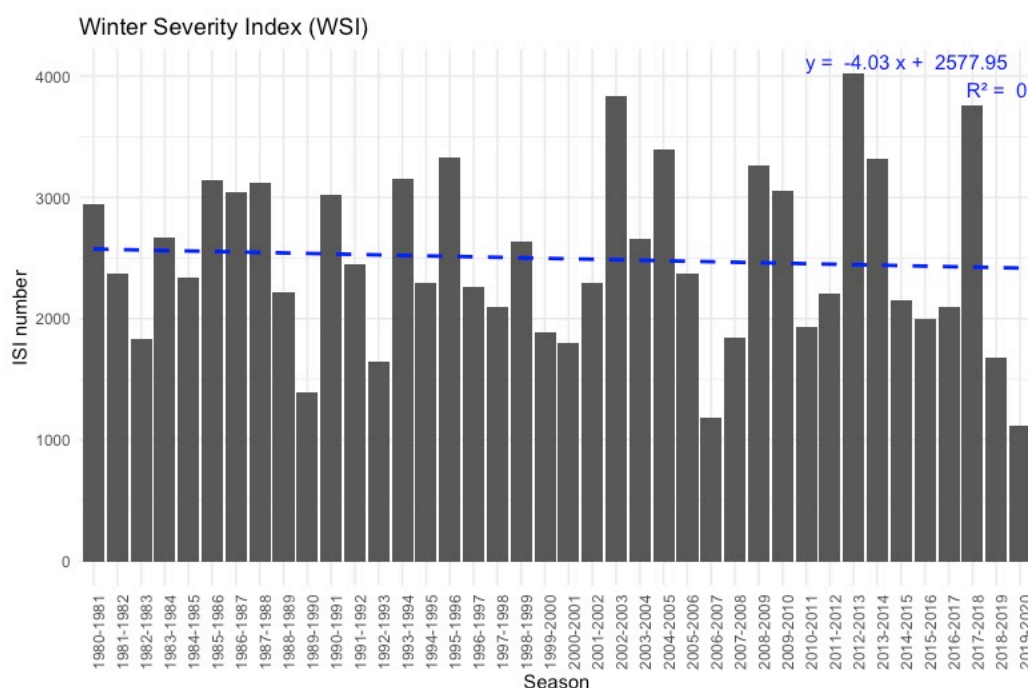


Figura 2.28: Sèrie climàtica de l'Índex de Severitat Hivernal (WSI) per a les temporades de 1980-1981 a 2019-2020. Crèdits: Elaboració pròpia.

Es van calcular estadístiques descriptives de l'ISI, incloent-hi la mitjana, la mediana, la desviació estàndard, els valors mínims i màxims, el rang i l'IQR (Interquartile Range) (Figura 4.29). A més, es va dur a terme una prova t per comparar la mitjana de l'ISI amb la mitjana observada. També es va ajustar un model de regressió lineal per analitzar la tendència al llarg del temps, i els resultats del model es van avaluar mitjançant un resum dels coeficients i gràfics diagnòstics dels residus. L'equació de la línia de tendència i el valor de R^2 es van calcular i incorporar al gràfic. Aquestes anàlisis es van realitzar per garantir la precisió en el tractament de les dades faltants i per avaluar la consistència i l'adequació del model estadístic utilitzat. Aquesta figura presenta quatre gràfics diagnòstics d'un model estadístic, cadascun amb variables específiques representades a l'eix d'abcisses. Al gràfic Residuals vs Fitted, l'eix d'abcisses mostra els valors ajustats pel model (fitted values), mentre que l'eix d'ordenades representa els residus (residuals). Al gràfic Normal Q-Q, l'eix d'abcisses correspon als quantils teòrics d'una distribució normal (theoretical quantiles), i l'eix d'ordenades mostra els residus estandarditzats (standardized residuals). En el gràfic Scale-Location, l'eix d'abcisses també representa els valors ajustats pel model, però l'eix d'ordenades indica l'arrel quadrada dels residus estandarditzats (square root of standardized residuals). Finalment, al gràfic Residuals vs Leverage, l'eix d'abcisses mostra la influència de cada observació en l'ajust del model (leverage), mentre que l'eix d'ordenades representa els residus estandarditzats. Aquests

gràfics són útils per avaluar l'ajust del model, la normalitat dels residus, la homogeneïtat de la variància i la presència de dades influents.

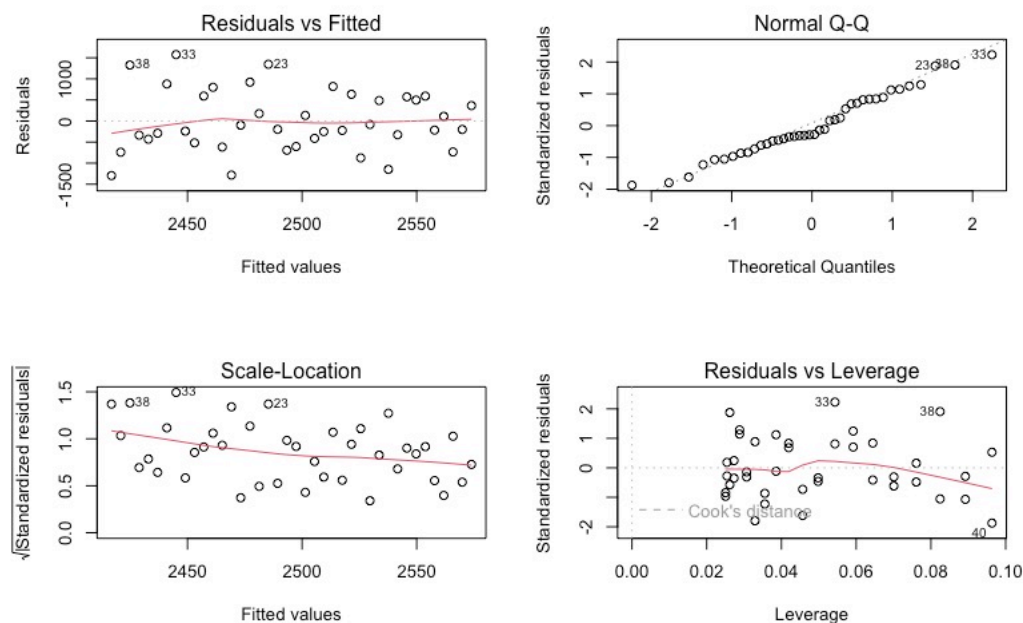


Figura 2.29: La figura presenta els resultats de diverses anàlisis estadístiques i diagnòstics realitzats per emplenar els buits a la sèrie de dades de l'Índex de Severitat Hivernal (ISI). Crèdits: Elaboració pròpia.

2.3.7 Sectorització de regions nivoclimàtiques i càlcul de períodes de retorn

S'ha dut a terme una sectorització de les principals regions nivoclimàtiques d'Andorra, amb l'objectiu de classificar el territori segons les seves característiques climàtiques i nivològiques. Aquest procés ha permès identificar tres zones diferenciades que varien en funció de la severitat de les condicions hivernals. La (Figura 2.30) mostra aquesta classificació, amb una llegenda que utilitza una escala numèrica i tonalitats de blau per representar la intensitat de les condicions hivernals. El blau clar (1.0 - 1.5) identifica zones amb condicions menys severes, el blau mitjà (1.5 - 2.5) correspon a zones amb severitat moderada, i el blau fosc (2.5 - 3.0) indica zones amb les condicions hivernals més severes. La (Figura 2.31), mostra la sectorització subjectiva actual d'Andorra en tres regions climàtiques o subdivisions, establertes a partir de l'experiència del Servei de Meteorologia d'Andorra. Les divisions entre aquestes regions es representen amb

una línia negra, que delimita clarament les diferents zones del país. En aquesta sectorització també s'indica el perill d'allaus a escala regional, utilitzant l'escala europea de perill d'allaus, que inclou cinc nivells: feble (1), moderat (2), marcat (3), fort (4) i molt fort (5).

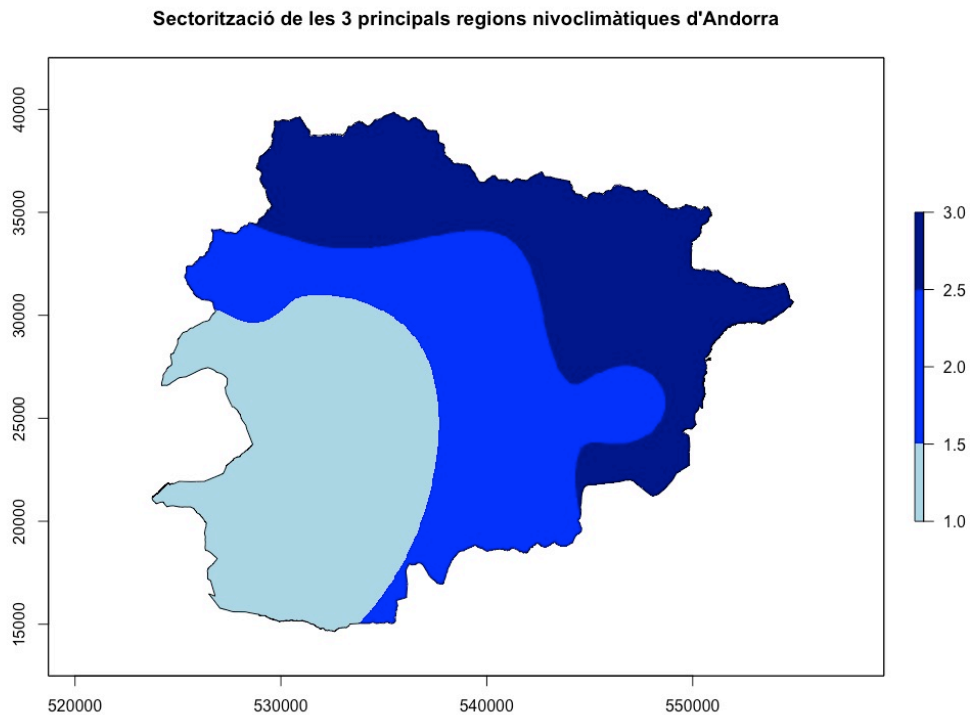
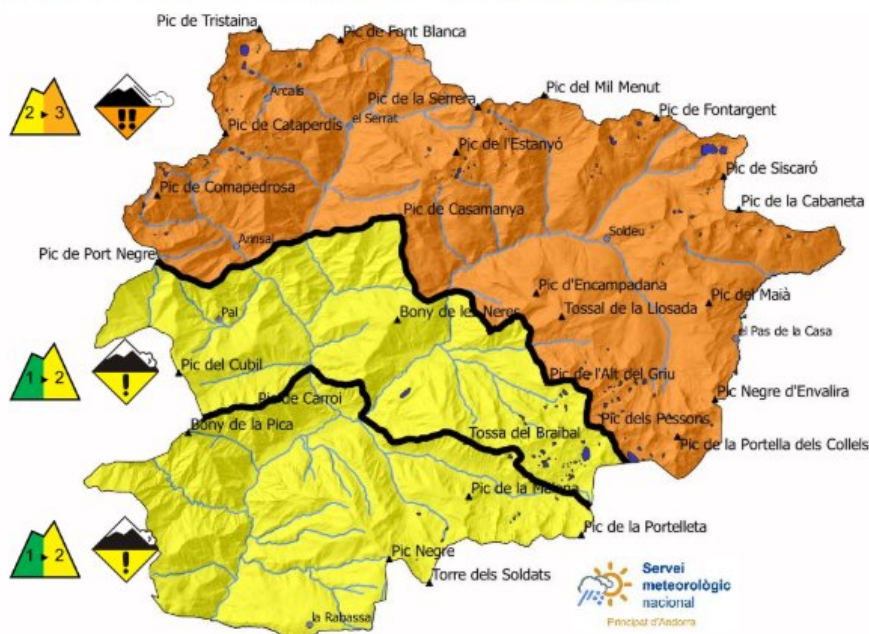


Figura 2.30: Sectorització de les principals regions nivoclimàtiques d'Andorra. Crèdits: Elaboració pròpia.

La (Figura 2.31) mostra la sectorització subjectiva actual d'Andorra en tres regions climàtiques o subdivisions, establertes a partir de l'experiència del Servei de Meteorologia d'Andorra. Les divisions entre aquestes regions es representen amb una línia negra, que delimita clarament les diferents zones del país. En aquesta sectorització també s'indica el perill d'allaus a escala regional, utilitzant l'escala europea de perill d'allaus, que inclou cinc nivells: feble (1), moderat (2), marcat (3), fort (4) i molt fort (5).

Perill marcat 3 al nord i moderat 2 al centre i sud a partir del migdia



1: Feble, 2: Moderat, 3: Marcat, 4: Fort, 5: Molt fort | Llegenda | Escala Europea de Perill d'Allaus

Figura 2.31: Un dels objectius de la tesi era validar o proposar una zonificació climàtica d'hivern. En l'actualitat el país es divideix en tres franges o regions climàtiques de manera arbitrària Crèdits: Servei Meteorològic Nacional

Els resultats obtinguts a l'hora de calcular els períodes de retorn mostren una anàlisi detallada de l'espessor màxim de neu acumulada en un període de 72 hores consecutives, important per entendre els esdeveniments d'acumulació extrema de neu que podrien desencadenar allaus. Al llarg de 36 temporades, es van calcular tant la suma total de neu recent com el gruix màxim acumulat en 72 hores per a cada estació meteorològica. Aquesta anàlisi va revelar variacions significatives en els valors màxims de neu acumulada entre les estacions i les temporades (Taula 2.7).

Taula 2.7: Períodes de retorn de grans nevades (gruix de neu en cm). Crèdits: Elaboració pròpia.

Període de retorn (anys)	Arcalís	Pas de la Casa	Arinsal	Pal	Grau Roig
5	74	87	80	66	73
10	85	103	94	78	85
50	110	138	126	106	111
100	121	152	140	118	122
300	137	175	161	137	140

Les mitjanes dels gruixos màxims acumulats en 72 hores van ser calculades per a cada estació, mostrant que l'estació " pas " va presentar la major mitjana (68 cm), seguit

per " ari " (62 cm) i " arc " (59 cm), cosa que suggereix que aquestes àrees podrien estar més exposades a esdeveniments d'acumulació extrema de neu. Les desviacions estàndard, particularment altes en " pas " (28 cm) i " ari " (25 cm), indiquen una variabilitat considerable en l'acumulació de neu en aquestes estacions, cosa que reforça la necessitat d'una anàlisi acurada en aquestes zones.

L'ajust de la distribució de Gumbel, un tipus particular de distribució Generalitzada de Valors Extremes (GEV), va permetre modelar els gruixos màxims de neu i estimar els valors esperats per a diferents períodes de retorn, cosa que és essencial per a la planificació de mesures de mitigació de riscos. Els resultats dels períodes de retorn van mostrar que, per exemple, per a un retorn de 100 anys, l'estació " pas " podria experimentar un gruix màxim de neu acumulada de 152 cm, cosa que representa un risc significatiu per a la infraestructura i la seguretat.

El test de Kolmogorov-Smirnov (KS) es va utilitzar per avaluar la bondat de l'ajust de la distribució de Gumbel a les dades observades. Els resultats indiquen que l'ajust va ser adequat per a totes les estacions, amb p-valors superiors a 0,05, cosa que significa que no hi ha evidència suficient per rebutjar la hipòtesi que les dades s'ajusten a la distribució de Gumbel. Aquest resultat és fonamental ja que valida l'ús d'aquest model per predir els esdeveniments extrems d'acumulació de neu i aporta confiança a les estimacions realitzades per als diferents períodes de retorn.

2.3.8 Sèrie climàtica de Ransol - FEDA 1641m

2.3.8.1 Metodologia

El primer pas en la metodologia va consistir a fer una introducció detallada a la geografia i geologia del Principat. Aquesta anàlisi va considerar els aspectes més rellevants de l'entorn físic, incloent-hi l'estructura geològica i les característiques geomorfològiques del territori. Especial atenció es va prestar als components del paisatge que podrien influir significativament en la dinàmica de la neu i les allaus, com la topografia, la vegetació i els pendents. Aquest enfocament es justifica, a més, per la preocupació creixent davant la possibilitat de grans incendis forestals, una amenaça que s'espera que incrementi als Pirineus a causa de l'augment de les temperatures els últims anys.

Un altre aspecte clau de l'anàlisi va ser la revisió socioeconòmica del país. Es van examinar les característiques econòmiques i demogràfiques principals d'Andorra, per tal d'entendre contextualitzar l'àrea d'estudi

Finalment, es van fer estudis detallats utilitzant la sèrie climatològica de referència d'Andorra. Les observacions meteorològiques a Andorra es remunten a 1935, impulsades per la construcció de la central hidroelèctrica a la vall de Ransol. Aquestes dades, emmagatzemades i mantingudes per l'estació de Ransol, han estat sotmeses a un procés exhaustiu de control de qualitat. Això ha portat els gestors d'aquesta àmplia base de dades a la revisió dels fitxers històrics i la identificació de valors anòmals de temperatura, precipitació i gruix de neu. Les dades inconsistents o sospitoses han estat revisades i, quan va ser necessari, es van corregir o excloure de l'anàlisi per assegurar la precisió dels resultats.

Per contextualitzar les dades i permetre una comparació significativa, es van fer servir dos períodes de referència climàtica definits per l'Organització Meteorològica Mundial (OMM): 1981-2010 i 1991-2020. Aquests períodes van ser seleccionats perquè proporcionen una representació fiable del clima durant aquestes dècades i permeten avaluar com han canviat les condicions climàtiques al llarg del temps.

Es van dur a terme anàlisis estadístiques detallades per a la temperatura i la precipitació durant la temporada hivernal (desembre a abril) a l'estació de Ransol. Aquestes anàlisis van incloure:

- **Càlcul d'anomalies climàtiques:** Es van calcular les anomalies de temperatura i precipitació per a cada temporada hivernal, comparant les mitjanes observades amb les mitjanes dels períodes de referència.
- **Proves d'hipòtesi:** Es van fer proves estadístiques com la prova t de Welch per comparar les mitjanes de temperatura entre els dos períodes de referència, i una anàlisi de variància (ANOVA) per avaluar les diferències entre diversos intervals de temps.
- **Models de regressió lineal:** es va ajustar un model de regressió lineal per analitzar la tendència de les temperatures mitjanes al llarg del temps. També es va fer una anàlisi de correlació de Pearson per explorar la relació entre la temperatura mitjana i la precipitació.

Per facilitar la interpretació dels resultats, es van generar gràfics d'anomalies de temperatura i precipitació, així com mapes de calor que il·lustren les tendències estacionals i les variacions interanuals. Aquests gràfics permeten una comprensió visual clara de com ha canviat el clima hivernal a Andorra des del 1935 fins al 2023.

Finalment, es van fer anàlisis de residus i proves de diagnòstic del model per validar la qualitat de l'ajust dels models estadístics utilitzats. Es van generar gràfics de residus vs, valors ajustats, gràfics QQ i anàlisi d'heteroscedasticitat per assegurar que les inferències i prediccions siguin fiables. El programari R, utilitzant la interfície RStudio, va ser emprat per realitzar tots els càlculs estadístics i visualitzacions.

Aquest enfocament metodològic no només garanteix la robustesa de les anàlisis fetes, sinó que també proporciona una base sòlida per interpretar les tendències climàtiques i comprendre els canvis observats en el context de l'escalfament global i les variacions naturals del clima a Andorra.

2.3.8.2 Anàlisis

Les observacions meteorològiques a Andorra van començar el 1935, impulsades per la construcció de la central hidroelèctrica a la vall de Ransol per l'antiga FHASA, ara coneguda com a FEDA. Des de llavors, s'han dut a terme nombrosos controls de qualitat i obtenció de dades als arxius per identificar valors anòmals de temperatura, precipitació i gruix de neu, consolidant l'estació de Ransol com a referència essencial per al país.

Mentre que el nostre clima canvia d'una hora a una altra, l'escalfament global induït per l'home i les variacions naturals d'un any a l'altre, i de dècada a dècada, modelen el nostre clima. Per això, els climatòlegs, inclosos els del Servei de Canvi Climàtic de Copernicus (C3S), utilitzen períodes de referència estàndard, definits per l'Organització Meteorològica Mundial (OMM), per crear "normals climàtiques" mitjana que representen el que es pot considerar un clima típic per a aquest període. Aquestes normals climàtiques es fan servir per comparar dades a curt termini a nivells local, nacional o global. Fins a finals del 2020, el període de referència estàndard més actual i àmpliament utilitzat per calcular normals climàtiques va ser el període de 30 anys de 1981-2010.

Tot i això, en entrar en una nova dècada, l'OMM recomana calcular les noves normals climàtiques com més aviat millor, encara que és comú que les organitzacions adoptin

una fase de transició, durant la qual produeixen els seus informes habituals basats en ambdós períodes de referència, l'antic i el nou. L'OMM advoca per fer servir un període base històric (1961-1990) per avaluar el canvi climàtic, així com el període més recent de 30 anys, per estandarditzar i harmonitzar entre institucions. Tot i això, el període de 1961-1990 comença diversos anys abans de l'era satel·litària i la majoria dels conjunts de dades de C3S no s'estenen tan enrere. Per tant, per comparar una àmplia gamma de variables, el C3S farà servir el període de referència climàtica de 1991-2020 com el principal període de referència per als butlletins climàtics mensuals des de gener de 2021 en endavant. És important destacar que el canvi de període de referència no afecta els canvis a llarg termini en relació amb els valors preindustrials.

A continuació, es presenten anàlisis estadístiques sobre la temperatura i precipitació a l'estació de referència de Ransol, per al període considerat de temporada hivernal que va des de desembre a abril. Aquestes anàlisis permeten una comprensió detallada de les variacions climàtiques a aquesta estació durant els mesos més freds de l'any, proporcionant dades importants per a l'estudi del clima a Andorra i la seva evolució al llarg del temps.

En els gràfics d'anomalies de temperatura per temporada hivernal, corresponents als períodes de referència 1981-2010 i 1991-2020 (Figura 2.32), l'eix X mostra les temporades hivernals, ordenades cronològicament des de la temporada 1934-1935 fins a la temporada 2022-2023. L'eix Y representa les anomalies de temperatura en graus Celsius (°C). Les anomalies indiquen la desviació de la temperatura mitjana de la temporada hivernal respecte a la mitjana del període de referència. En color blau, es representen anomalies negatives (temperatures per sota de la mitjana del període de referència) i en vermell, anomalies positives (temperatures per sobre de la mitjana del període de referència).

Pel que fa a les observacions generals, tots dos gràfics mostren una tendència que les anomalies de temperatura es tornin més positives (vermelles) en els anys més recents, indicant un augment de les temperatures mitjanes hivernals en les darreres dècades. A les primeres dècades (1930s-1950s), hi ha més variabilitat amb anomalies tant positives com negatives. Des d'aproximadament 1950 fins a 1980, les anomalies tendeixen a ser predominantment negatives, especialment al gràfic amb el període de referència 1991-2020. A partir del 1980, s'observa un canvi amb més anomalies positives, reflectint un augment en les temperatures hivernals.

En comparar tots dos gràfics, es pot veure que l'elecció del període de referència afecta la magnitud de les anomalies. El gràfic amb el període de referència 1991-2020 mostra anomalies més negatives els anys anteriors a 1980 en comparació amb el gràfic amb el període de referència 1981-2010. Això suggereix que les temperatures en el període de referència 1991-2020 van ser de mitjana més alta que en el període de referència 1981-2010.

Tenint en compte aquests resultats, es pot interpretar que La tendència general cap a anomalies positives en les darreres dècades és consistent amb l'evidència del canvi climàtic global, que ha resultat en un augment de les temperatures mitjanes hivernals. Les fluctuacions d'anomalies positives i negatives en els primers anys reflecteixen la variabilitat natural del clima, influenciada per factors com l'activitat solar, erupcions volcàniques i fenòmens com El Nen i La Nena. La comparació entre els dos gràfics mostra com la selecció del període de referència pot influir en la percepció de les anomalies. Un període de referència més recent (1991-2020) tendeix a mostrar anomalies més negatives en el passat a causa de l'augment de les temperatures en les darreres dècades (Figura 2.32).

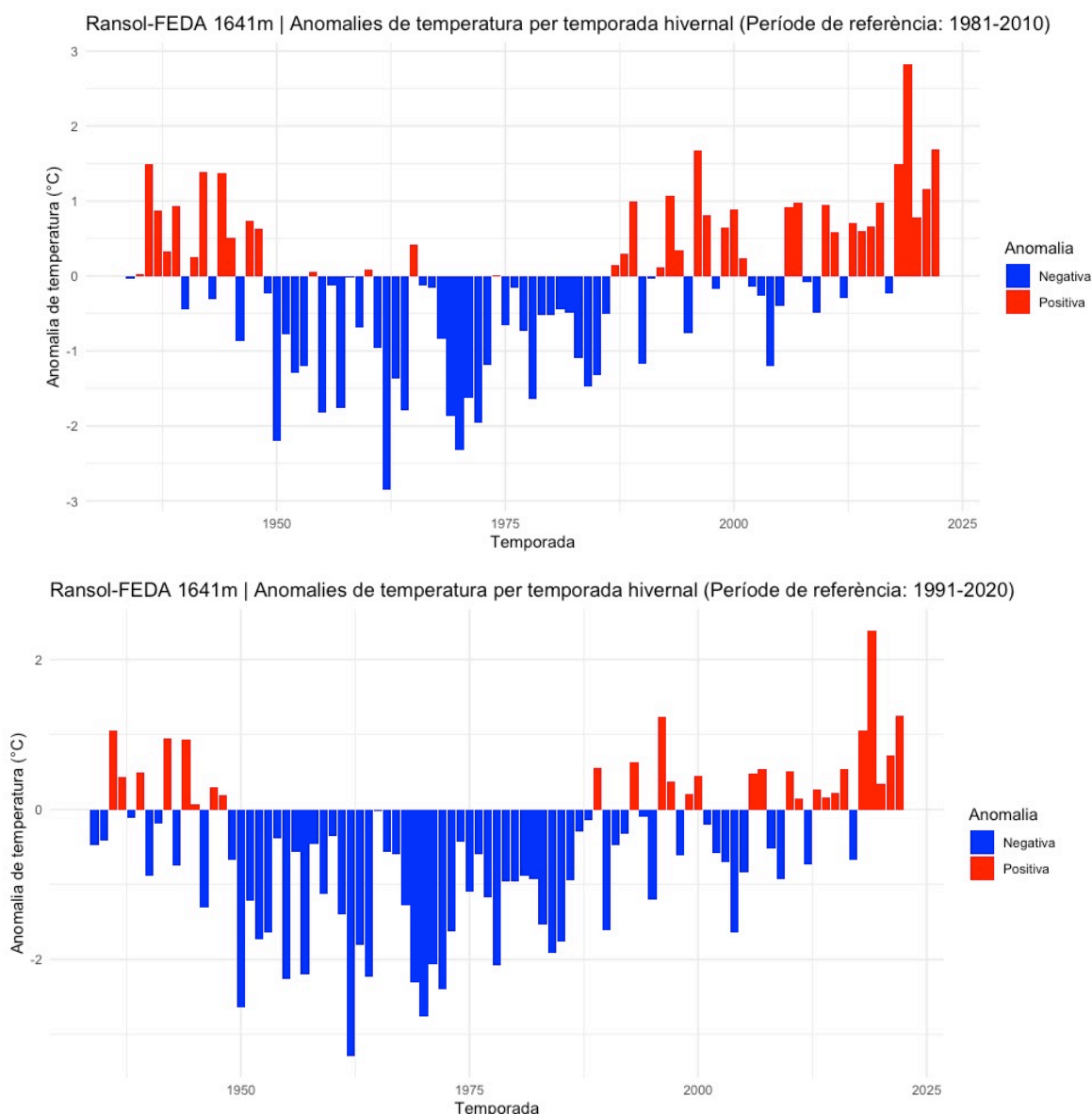


Figura 2.32: Gràfics d'anomalies de temperatura per temporada hivernal. Període de referència 1981-2010 i 1991-2020). Crèdit: Elaboració pròpia.

En conclusió, tots dos gràfics proporcionen una visualització clara de com les temperatures hivernals han variat respecte a les mitjanes històriques. La tendència cap a anomalies positives en els darrers anys suggereix un escalfament significatiu de les temperatures hivernals, consistent amb les observacions globals de canvi climàtic. La variabilitat a les anomalies també destaca la importància de considerar tant les tendències a llarg termini com les variacions naturals del clima.

Pel que fa a la visualització de les anomalies de precipitació per al període de referència 1991-2020, al gràfic que es presenta a continuació a l'eix X es representa les temporades hivernals, ordenades cronològicament des de la temporada 1934-1935 fins

a la temporada 2022-2023 i a l'eix Y es representa les anomalies de precipitació en mil·límetres (mm). Les anomalies indiquen la desviació de la precipitació mitjana de la temporada hivernal respecte a la mitjana del període de referència. En aquest cas els colors, verds representen anomalies positives (precipitació per sobre de la mitjana del període de referència) i marró, negatives (precipitació per sota de la mitjana del període de referència).

Al llarg del gràfic, s'observa una alternança entre anomalies positives (verda) i negatives (marró) en les diferents temporades hivernals. No hi ha una tendència clara i sostinguda cap a un augment o disminució de la precipitació a llarg termini, indicant una variabilitat considerable en la precipitació hivernal.

A les dècades anteriors a 1950, s'observen algunes temporades amb anomalies positives significatives, superant els 200 mm. Des de la dècada del 1950 fins a la dècada del 1970, hi ha una barreja d'anomalies positives i negatives, amb una tendència a tenir més anomalies positives que negatives. A partir de la dècada de 1970 fins ara s'observa un patró més mixt amb anomalies positives i negatives alternant, però amb algunes temporades recents mostrant anomalies negatives més pronunciades. Diverses temporades mostren precipitacions extremes, tant positives com negatives. Per exemple, algunes temporades hivernals mostren precipitacions significativament superiors a la mitjana (més de 300 mm), mentre que d'altres mostren dèficits significatius (més de -100 mm).

Tenint en compte aquests resultats, podem interpretar que l'alternança d'anomalies positives i negatives al llarg del temps suggereix una alta variabilitat natural en la precipitació hivernal. Aquesta variabilitat pot estar influenciada per fenòmens climàtics com El Niño i La Niña, patrons de vent i altres variabilitats atmosfèriques. Les anomalies negatives més pronunciades a les temporades recents podrien indicar un possible canvi en els patrons de precipitació, amb algunes temporades hivernals experimentant dèficits significatius de precipitació.

Utilitzar el període de referència del 1991-2020 és desitjable per interpretar correctament les anomalies. Aquest període inclou anys de precipitacions variables, cosa que afecta com es representen les anomalies en anys anteriors i posteriors.

Definitivament, podem indicar que el gràfic proporciona una visualització de la variabilitat a les precipitacions hivernals des de la temporada 1934-1935 fins a la

temporada 2022-2023. L'alta variabilitat de les anomalies suggereix que, encara que no hi ha una tendència clara a llarg termini, hi ha temporades recents amb dèficits significatius de precipitació (Figura 2.33).

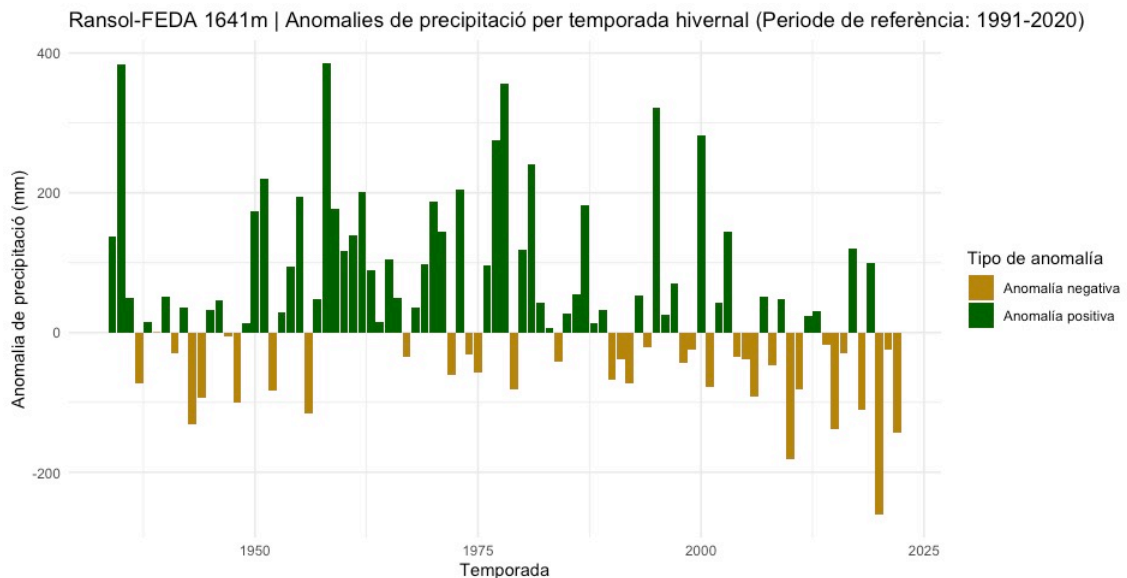


Figura 2.33: Anomalies de precipitació per temporada hivernal (PR:1991-2020) Ransol-FEDA 1641m. Crèdit: Elaboració pròpia.

Per tal de complementar la representació gràfica de les dades de l'EMA de Ransol-FEDA, els gràfics següents representen la temperatura mitjana i la precipitació total per temporada hivernal i mes, visualitzats en format mapa de calor (*heatmap*). Aquest tipus de gràfic és útil per identificar patrons i tendències al llarg del temps de manera visualment intuïtiva. La visualització destaca tant la variabilitat interanual com les tendències a llarg termini. La clara diferenciació de colors facilita la identificació de períodes d'anomalies i tendències generals, proporcionant una eina poderosa per a l'anàlisi i la comunicació d'aquestes dades. L'eix X representa les temporades hivernals, ordenades cronològicament des del 1934-1935 fins al 2022-2023 i l'eix Y representa els mesos de desembre a abril.

S'observa una clara variació estacional amb els mesos de desembre i gener presentant temperatures més baixes (blaves) i els mesos de març i abril mostrant temperatures més altes (vermelloses) (Figura 2.34). Al llarg del temps, especialment a les darreres dècades, es pot veure un augment en la freqüència i la intensitat de les temperatures positives (colors més vermells), indicant un escalfament hivernal.

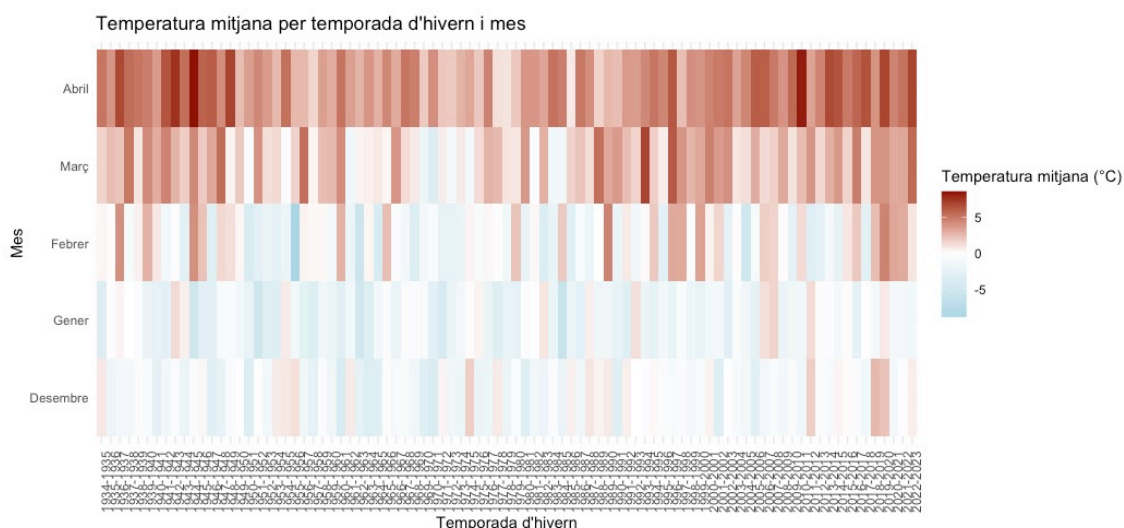


Figura 2.34: Heatmap de la temperatura mitjana per temporada d'hivern i mes. Ransol-FEDA 1641m. Crèdit: Elaboració pròpia.

La precipitació no segueix un patró estacional tan definit com la temperatura. Tot i així, es poden distingir períodes amb més o menys precipitació (Figura 2.11). No s'observa una tendència definida d'increment o disminució al llarg del temps, cosa que reflecteix una variabilitat alta d'un any a l'altre.

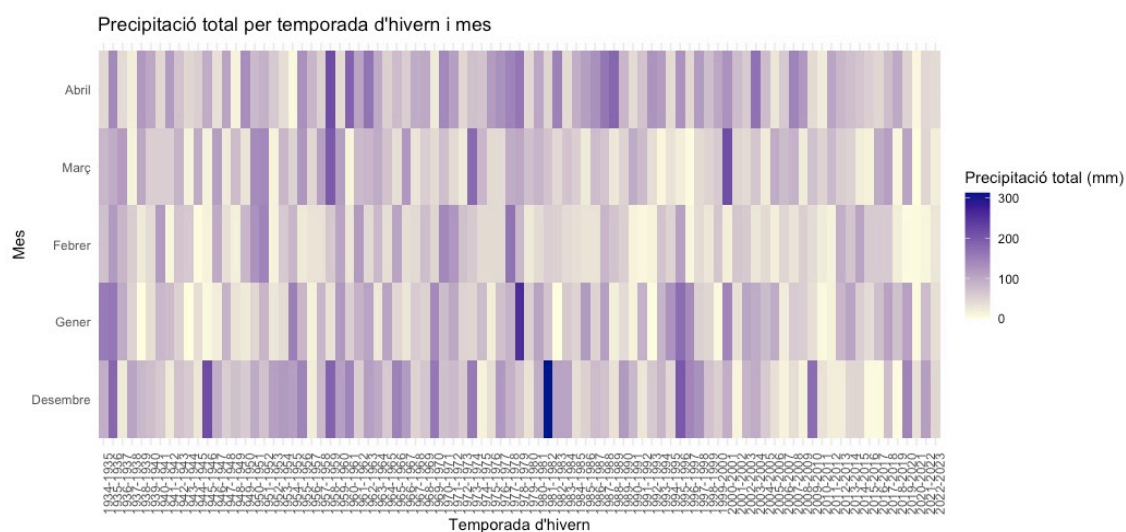


Figura 2.35: Heatmap de la precipitació mitjana per temporada d'hivern i mes. Ransol-FEDA 1641m. Crèdit: Elaboració pròpia.

2.3.8.3 Resultats estadístics: Interpretació i conclusions de les anàlisis estadístiques

Finalment, s'ha fet una anàlisi exhaustiva d'un conjunt de dades climàtiques per a la temporada hivernal, filtrant les dades de desembre a abril i creant una columna que

identifica cada temporada hivernal. Es van calcular estadístiques descriptives (mitjana, mitjana, màxims, mínims, desviació estàndard i quartils) per temporada hivernal (Taula 2.8), i es van fer proves t per comparar dos períodes específics, així com un ANOVA per comparar quatre períodes diferents. A més, es va fer una prova de correlació entre la temperatura mitjana i la precipitació, i es va ajustar un model de regressió lineal per analitzar la tendència de la temperatura mitjana al llarg del temps.

Taula 2.8: Taula amb estadístiques descriptives (mitjana, mitjana, màxims, mínims, desviació estàndard i quartils). Crèdits: Elaboració pròpia.

mediana_temp	max_temp	min_temp	mitjana_temp	desviacio_estandar	quartil_1	quartil_3
1	14	-18	0,72	9,24	-2	4

Welch Two Sample t-test

La prova t de Welch ha demostrat que hi ha una diferència significativa en les temperatures mitjanes entre els dos períodes comparats. La temperatura mitjana en el període més recent (1991-2020) és significativament més gran que en el període anterior (1981-2010), cosa que podria indicar una tendència a l'escalfament en les temperatures hivernals durant les darreres dècades. Aquesta diferència és estadísticament significativa amb un valor p molt baix i l'interval de confiança confirma que aquesta diferència és positiva.

ANOVA

El resultat de l'ANOVA mostra que hi ha diferències significatives en les temperatures mitjanes entre els quatre períodes analitzats (1941-1960, 1961-1980, 1981-2000 i 2001-2020). La variabilitat entre els períodes és significativament més gran que la variabilitat dins dels períodes, com ho indica l'alt valor F (60,37) i l'extremadament baix valor p ($<2e-16$). Això suggereix que els canvis a la temperatura mitjana al llarg del temps no són aleatoris, sinó que hi ha una tendència clara de variació significativa entre els diferents períodes històrics.

Correlació de Pearson

La prova de correlació de Pearson mostra una correlació negativa molt feble entre la temperatura mitjana i la precipitació, amb un valor de correlació de -0,03. Tot i que aquesta correlació és estadísticament significativa (p-valor = 0,0002961), la magnitud de la correlació és molt baixa, cosa que suggereix que la relació entre aquestes dues variables és mínima. Això implica que, en el conjunt de dades analitzades, la

temperatura mitjana i la precipitació no estan fortament relacionades i qualsevol canvi en una de les variables té un efecte molt petit a l'altra.

Regressió lineal

El model de regressió lineal suggereix que hi ha una relació positiva i significativa entre la temporada hivernal i la temperatura mitjana, on la temperatura mitjana augmenta lleugerament amb el temps. Tot i això, la magnitud d'aquesta relació és molt petita, com ho indica el coeficient de temp_invernal (0,01). A més, el baix valor de R-quadrat (0,004681) indica que la temporada hivernal explica només una petita fracció de la variabilitat a la temperatura mitjana, suggerint que altres factors no inclosos en aquest model també influeixen significativament en les temperatures mitjanes .

Els resultats de l'anàlisi mostren una tendència ascendent a la temperatura mitjana durant les temporades d'hivern cada 10 anys des del 1940 fins al 2020 (Figura 2.36). El pendent positiu de 0,03 °C per dècada és significatiu, cosa que suggereix que la temperatura mitjana ha augmentat significativament al llarg del temps. El model explica aproximadament el 57,6% de la variació en la temperatura mitjana, cosa que indica un ajustament moderat. En conjunt, aquests resultats proporcionen una forta evidència que la temperatura mitjana ha augmentat en les darreres dècades (Figura 2.37).

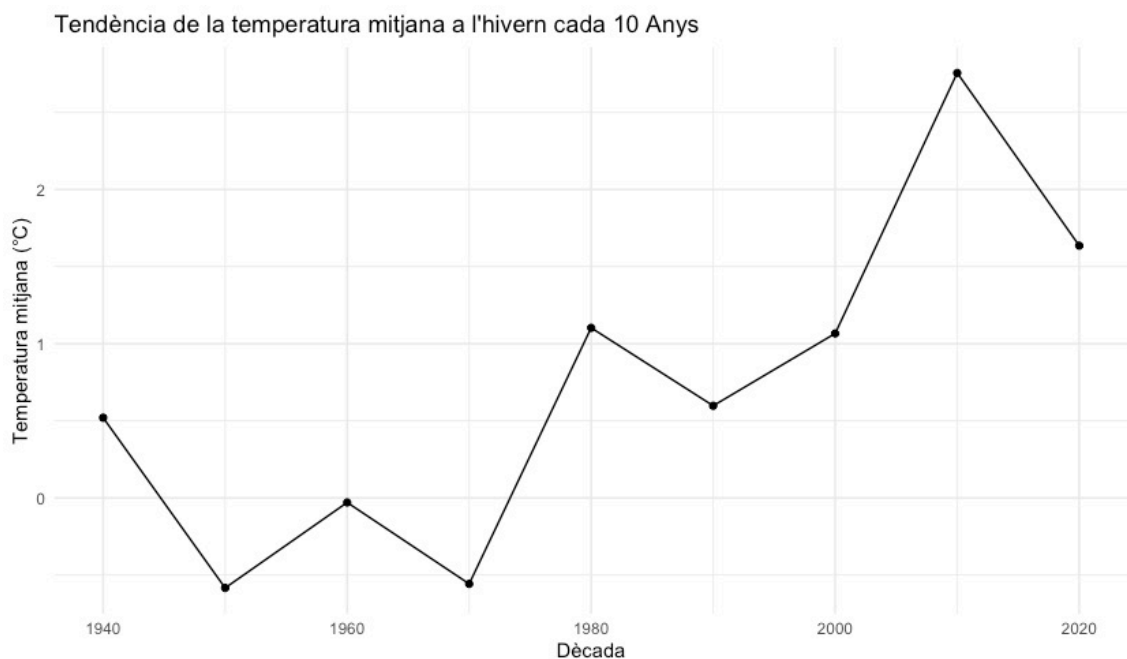


Figura 2.36: Temperatura mitjana a l'hivern cada 10 anys. Crèdits: Elaboració pròpia.

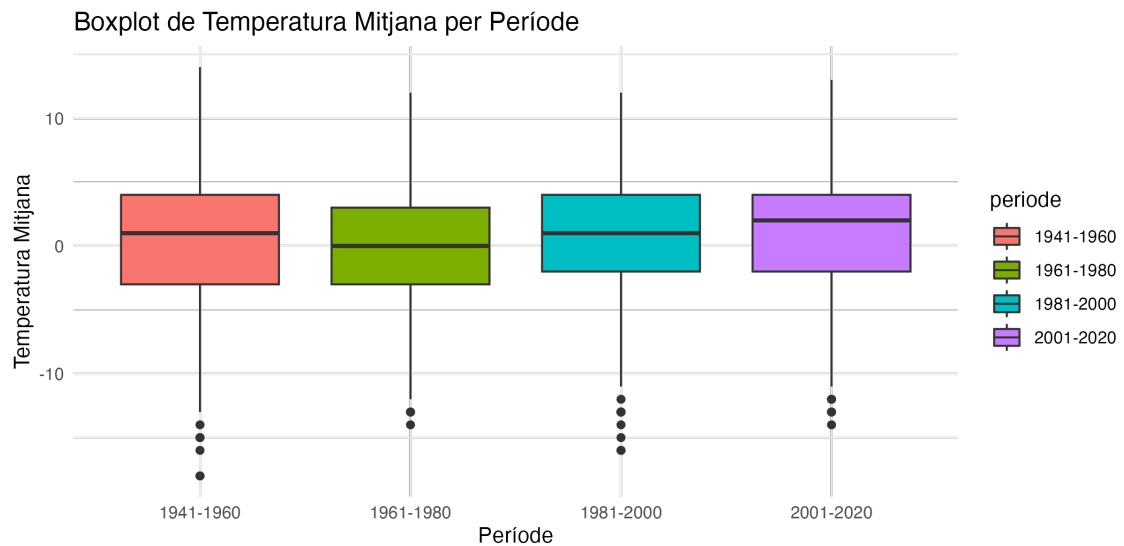


Figura 2.37: Gràfics de caixes amb temperatura mitjana per període. Crèdits: Elaboració pròpia.

Finalment, s'han generat gràfics de residus i diagnòstic del model per avaluar la qualitat de l'ajust i validar els supòsits del model estadístic utilitzat. Aquests gràfics inclouen el gràfic de Residus vs. Valors Ajustats, Normal QQ, Escala-Ubicació i Residus vs. Palanquejament (Figura 2.38). A través d'aquests gràfics, es pot identificar la no-linealitat, l'heterocedasticitat, les desviacions de la normalitat i els punts influents, permetent així determinar si el model és adequat per a les dades i si els resultats són fiables. El propòsit de generar gràfics de residus i diagnòstic del model és avaluar la qualitat de l'ajust d'un model estadístic i validar-ne els supòsits fonamentals. Aquests gràfics permeten detectar problemes com no linealitat, heterocedasticitat (variança no constant), desviacions de la normalitat en els residus i la presència de punts influents od'alt palanquejament. En visualitzar aquests aspectes, es pot determinar si el model és adequat per a les dades i si les inferències i les prediccions derivades del model són fiables.

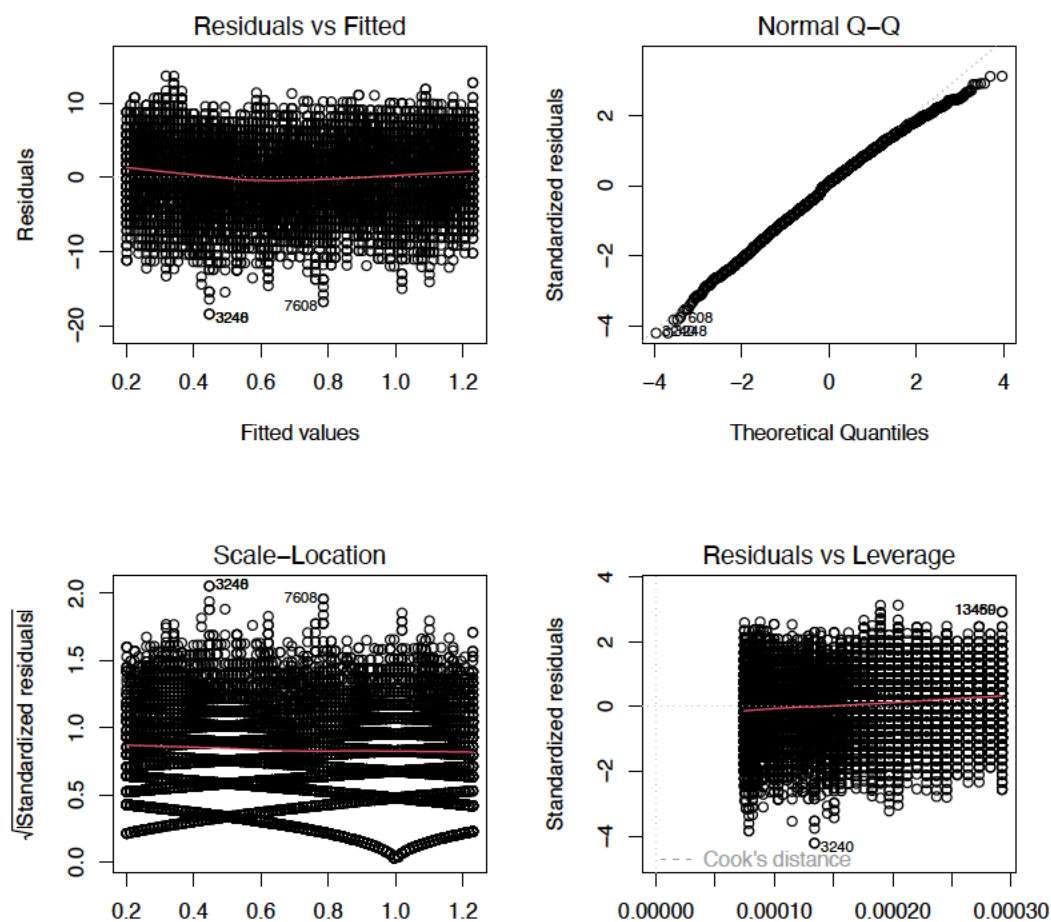


Figura 2.38: Gràfics de residus i diagnòstic. Crèdits: Elaboració pròpia.

El model sembla ajustar-se raonablement bé a les dades. Encara que hi ha algunes lleugeres preocupacions, com la petita corba en els residus vs. valors ajustats i les desviacions als extrems del gràfic QQ, aquests no semblen ser problemes greus. L'homocedasticitat i la manca de punts altament influents també són senyals positius.

2.3.9 Resum dels resultats estadístics

Els resultats d'aquesta anàlisi confirmen de manera inequívoca una tendència significativa cap a l'escalfament hivernal en les darreres dècades. Aquesta evolució es reflecteix en un increment constant i sostingut de les anomalies positives de temperatura, amb un punt d'inflexió especialment marcat a partir de la dècada de 1980. Aquestes troballes són coherents amb estudis anteriors que han destacat l'increment de temperatures hivernals a les regions muntanyoses d'Europa, com els Alps i els Pirineus (Monteiro i Morin, 2023; López-Moreno et al., 2020). Els resultats obtinguts milloran la comprensió i coherència en la representació dels mateixos, en el període 1991-2020, les anomalies negatives de temperatura són menys freqüents, suggerint un augment

generalitzat de les temperatures mitjanes hivernals, una observació que ressona amb la tendència a llarg termini d'escalfament percebuda en altres estudis climàtics com (Notarnicola, 2022; Marty et al., 2023).

En comparar les anomalies de precipitació, no s'observa una tendència clara i sostinguda, cosa que indica una elevada variabilitat interanual. Aquesta variabilitat ha estat documentada en altres estudis que han mostrat patrons mixts de precipitació a les regions muntanyoses, on la manca d'una tendència clara en la precipitació reflecteix la complexitat dels processos atmosfèrics locals i globals que influeixen en aquestes regions (Pons-Pons et al., 2012). És important assenyalar que, malgrat aquesta variabilitat, les temporades més recents mostren anomalies negatives més pronunciades en precipitació, cosa que podria indicar canvis en els patrons de precipitació, possiblement vinculats a l'augment de les temperatures i les seves conseqüències sobre el cicle hidrològic com ja s'ha conegut en altres treballs de recerca (Ballesteros-Cánovas et al., 2018).

2.4 Discussió

En aquesta investigació, s'ha avaluat la densitat d'estacions meteorològiques a Andorra i la seva conformitat amb les recomanacions de l'Organització Meteorològica Mundial (OMM) per a zones muntanyoses. Els resultats han mostrat una densitat significativament superior a la recomanada, amb un Z-score de 12,1, molt per sobre del valor crític de 1,645 per a un nivell de significació de 0,05. Això indica que la probabilitat que aquest resultat sigui degut a l'atzar és extremadament baixa. Un Z-Score tan elevat suggereix que la densitat d'estacions és considerablement més gran que el que s'esperava sota la hipòtesi nul·la de distribució aleatòria. Aquest resultat destaca la importància d'una alta resolució espacial i temporal en l'obtenció de dades meteorològiques, especialment en regions amb alta variabilitat climàtica i influència de factors locals. Això indica que la probabilitat que aquest resultat sigui degut a l'atzar és extremadament baixa. Un Z-Score tan elevat suggereix que la densitat d'estacions és considerablement més gran que el que s'esperava sota la hipòtesi nul·la de distribució aleatòria. La interpretació d'aquests resultats suggereix que la densitat d'estacions meteorològiques al àrea d'estudi és alta, superant les recomanacions típiques per a una cobertura adequada. Això és particularment rellevant per a la precisió i la confiabilitat de les dades meteorològiques recopilades, ja que una major densitat d'estacions permet una millor resolució espacial i temporal en les dades obtingudes. L'alta densitat

d'estacions pot, per tant, facilitar anàlisis més detallades i precises en estudis climàtics i meteorològics.

Diversos estudis han documentat una disminució significativa de la capa de neu als Pirineus, atribuïda a l'escalfament global i als canvis en els patrons de precipitació (López-Moreno et al., 2020; Vidaller et al., 2021). Aquestes troballes es reflecteixen en l'anàlisi de les dades de neu a Andorra, que revela una variabilitat considerable en el gruix de neu i en el nombre de dies amb nevades al llarg del temps. Tot i que s'observa una lleugera tendència a l'alça en el nombre de dies de nevades, aquesta variabilitat interanual continua sent alta, indicant que factors locals com les variacions en els patrons de vent i la topografia podrien jugar un paper important en la distribució de la neu.

L'anàlisi de la correlació entre estacions meteorològiques mostra que certes regions comparteixen patrons de nevades similars, la qual cosa coincideix amb els resultats d'altres investigacions sobre la influència de la circulació atmosfèrica en la variabilitat de la neu als Pirineus (López-Moreno i Vicente-Serrano, 2007). Aquestes similituds suggereixen que la proximitat geogràfica i les condicions atmosfèriques compartides són factors clau en la distribució de les nevades.

D'altra banda, en comparació amb altres regions muntanyenques on s'ha documentat una disminució sostinguda de la capa de neu (Beniston et al., 2018), els resultats a Andorra mostren una certa estabilitat en alguns paràmetres, com la mitjana d'espessor de neu. Aquesta estabilitat, però, no descarta possibles canvis a llarg termini a causa del canvi climàtic, que podrien alterar significativament la dinàmica de la neu en el futur, tal com anticipen projeccions per altres serralades de latituds mitjanes (Sanmiguel-Valladolid et al., 2019; Tennant et al., 2017). Per aquest motiu, és essencial continuar amb el monitoratge i l'anàlisi de les dades per adaptar les estratègies de gestió dels recursos hídrics i la mitigació dels riscos climàtics.

Entre les estacions, Ordino- Arcalis es destaca amb el gruix més gran de neu mitjana, especialment notable al març amb 117 cm, seguit per Pas de la Casa amb 104 cm. Grau Roig també presenta nivells de neu elevats i consistents, amb un bec de 89 cm al març. En comparació, Arinsal i Pal mostren gruixos de neu menors, particularment a l'abril.

La matriu de correlació entre les estacions meteorològiques indica que totes les estacions tenen patrons de gruix de neu positivament correlacionats. Les correlacions

més altes s'observen entre Pas de la Casa i Grau Roig, seguides per Ordino - Arcalís i Grau Roig, cosa que suggereix patrons de nevades molt similars en aquestes estacions.

Sobre la quantitat de dies de nevades per temporada al llarg de diversos anys. A simple vista, es pot observar una considerable variabilitat interanual, amb algunes temporades mostrant un nombre significativament més gran de dies de nevades en comparació amb altres. Tot i aquesta variabilitat, la línia de tendència blava indica una lleugera tendència a l'alça en el nombre de dies de nevades amb el pas del temps. Aquesta tendència a l'alça podria ser deguda a diversos factors. Un podria ser el canvi climàtic, que en algunes regions ha portat a hiverns més llargs o a un augment de la precipitació en forma de neu. Tot i això, també és possible que hi hagi altres factors locals o regionals, com canvis en els patrons de vent o en la topografia que podrien estar influïent en el nombre de dies de nevades. És important tenir en compte que, malgrat la tendència general, les variacions anuals continuen sent altes, cosa que suggereix que altres factors estacionals o climàtics també juguen un paper important en la determinació del nombre de dies de nevades cada temporada. A més, la tendència observada al gràfic pot no ser representativa d'altres regions, ja que les condicions meteorològiques i climàtiques poden variar significativament. Caldria una anàlisi més detallada i més recollida de dades per determinar les causes subjacents d'aquesta tendència i per avaluar-ne la significació en un context més ampli.

L'Anàlisi de Components Principals (PCA) i la matriu de correlació presenten diferències en l'agrupació de les estacions degut a les metodologies emprades. Mentre que la matriu de correlació se centra en la relació lineal entre les estacions, el PCA transforma les dades en components principals, que capturen la major part de la variabilitat. Aquest mètode de reducció de dimensionalitat pot agrupar estacions que no semblen similars a l'espai original però que comparteixen patrons de variabilitat similars.

Per exemple, encara que la correlació entre Ordino - Arcalís i Grau Roig és alta (0,83), el PCA les pot situar en clúster diferents pel fet que la PCA s'enfoca a maximitzar la variància i altres estacions poden influir de manera diferent en els components principals. Així mateix, encara que Pas de la Casa i Grau Roig presenten la correlació més alta (0,85), el PCA les pot assignar a clúster diferents si altres components principals destaquen diferències significatives.

Aquestes diferències ressalten la importància de considerar múltiples enfocaments analítics per obtenir una visió comprensiva dels patrons de nevades i la seva variabilitat

a diferents estacions meteorològiques. La combinació d'anàlisi de correlació i PCA proporciona una perspectiva més completa sobre les relacions i diferències entre les estacions en termes dels seus patrons de gruix de neu.

A l'anàlisi del mapa de calor de la matriu de correlació, es poden identificar diversos clústers regionals basats en les correlacions positives destacades entre certes regions. Un dels clústers observats inclou les regions S, SE, E, C i U, que mostren correlacions positives fortes entre si. Aquest grup suggereix la presència de característiques comunes que poden abastar factors geogràfics, climàtics, econòmics o socioculturals. La proximitat geogràfica o una economia integrada i polítiques comunes podrien ser factors que contribueixen a aquestes similituds, com ara una zona climàtica compartida o estructures econòmiques comparables.

Un altre clúster inclou les regions W, NW, N i A, que també presenten correlacions positives, encara que amb una intensitat una mica menor que el primer clúster. Aquestes correlacions suggereixen que aquestes regions podrien compartir condicions ambientals, físiques o estar connectades a través de xarxes de comerç o comunicacions que influeixen els seus comportaments de manera semblant. A més, s'observa una relació particular entre les regions NE i E. Encara que E pertany al primer clúster, NE mostra una correlació positiva diferent amb E, cosa que podria indicar una connexió econòmica, cultural o influències geogràfiques compartides.

El dendrograma obtingut (Figura 2.16) ofereix una visualització detallada de l'estructura jeràrquica de les dades de temporades, agrupant diferents anys segons les similituds en els patrons dels tipus de temps observats. Utilitzant el mètode de Ward i la distància euclidiana al quadrat (D^2), es van identificar diversos clústers que reflecteixen tendències comunes a l'acumulació de neu i esdeveniments meteorològics relacionats. A més, el mètode de Ward va ser elegit per la seva capacitat per minimitzar les variàncies dins dels clústers, facilitant la identificació de grups homogenis en termes de classificació de temporades.

És notable la presència de correlacions negatives significatives entre alguns d'aquests clusters, com entre el cluster que inclou S, SE, E, C i U i certes zonificacions del cluster compost per tipus de temps W i NW. Aquestes correlacions negatives podrien assenyalar diferències marcades en condicions com el clima, l'economia o les polítiques, cosa que resulta un punt interessant per a investigacions futures.

A l'anàlisi de la classificació automàtica de tipus de temps per temporada, s'utilitza un mapa de calor per representar la freqüència amb què diferents tipus de clima es presenten al llarg de diverses temporades, des de 1981-1982 fins a 2015-2016. Aquesta classificació automàtica permet identificar patrons i tendències a les dades climàtiques, facilitant l'estudi de com varien les condicions meteorològiques en diferents èpoques de l'any i al llarg de diverses dècades. La figura que es presenta és un resultat visual d'aquest procés de classificació (Figura 2.15), mostrant la distribució de dies associats amb cada tipus de temps identificat per a cada temporada específica. Una de les observacions més destacades és l'heterogeneïtat en l'ocurrència d'aquests tipus de temps, cosa que suggereix fluctuacions significatives en les condicions climàtiques al llarg del temps. Per exemple, es poden identificar certs tipus de temps que presenten pics de freqüència en algunes temporades específiques, mentre que altres temporades s'observen pocs o cap dia registrat d'aquests mateixos tipus de temps.

Aquestes fluctuacions poden estar vinculades a fenòmens climàtics globals, com El Niño i La Niña, que afecten les condicions meteorològiques regionals i poden influir en la prevalença de certs patrons climàtics. A més, la variació en la freqüència d'aquests tipus de temps també podria reflectir canvis a llarg termini al clima, possiblement relacionats amb l'escalfament global i altres factors ambientals.

L'anàlisi d'aquests patrons pot proporcionar informació valuosa per entendre com el clima canvia a la regió i com podrien evolucionar aquestes tendències en el futur. A més, la identificació de temporades amb freqüències inusuals de certs tipus de clima pot ser decisiu per a la planificació i gestió de recursos, així com per a la preparació davant d'esdeveniments climàtics extrems. La variabilitat i les tendències observades en aquest mapa de calor subratllen la importància de continuar monitoritzant i analitzant les dades climàtiques per millorar la nostra comprensió dels sistemes climàtics regionals i globals.

En la discussió dels resultats obtinguts de l'anàlisi de la correlació de dies amb nevades entre diferents ubicacions, s'observa que hi ha variacions notables a les correlacions presentades al mapa de calor. El gràfic, que fa servir una escala de grisos per representar la magnitud de la correlació (Figura 2.15), revela que algunes ubicacions mostren una alta correlació, indicada per tons més foscos, mentre que altres exhibeixen correlacions més baixes, representades per tons més clars.

Les ubicacions amb correlacions altes suggereixen que experimenten patrons similars en la ocurrència de dies amb nevades. Això podria ser degut a factors compartits

com la proximitat geogràfica, similituds en altitud, o la influència de sistemes climàtics comuns que afecten aquestes regions de manera comparable. Per exemple, les altes correlacions entre les ubicacions etiquetades com Grau Roig i Pal, o entre Pas de la Casa i Arcalís, indiquen que aquestes regions tenen una tendència a registrar dies de neu en sincronicitat, possiblement a causa de la seva ubicació a la mateixa cadena muntanyenca o sota la influència dels mateixos sistemes meteorològics.

D'altra banda, les ubicacions que mostren correlacions més baixes poden estar experimentant condicions locals o microclimes que resulten en una coincidència menor en els dies amb nevades. Això podria indicar diferències en l'exposició a factors meteorològics, com la influència de vents dominants o variacions a la topografia que afecten l'acumulació de neu. Per exemple, una baixa correlació entre Arinsal i les altres ubicacions podria suggerir que aquesta regió té característiques climàtiques o geogràfiques distintives que la diferencien de les altres.

Finalment, s'ha aconseguit sectoritzar el país nivoclimàticament, i els resultats obtinguts mostren una alta concordança amb la regionalització perceptiva que presenta el Servei Meteorològic d'Andorra en els seus Butlletins de Perill d'Allaus. En aquests butlletins, el país es divideix en franges on es caracteritza la perillositat per allaus de manera diària. Aquesta coincidència suggereix que la sectorització realitzada és robusta i reflecteix fidelment les condicions nivoclimàtiques reals del territori, cosa que reforça la validesa de la metodologia emprada i la seva aplicabilitat en la gestió del risc d'allaus.

2.5 Conclusions

- Aquest estudi proporciona una avaluació detallada de la densitat d'estacions meteorològiques a Andorra, mostrant que supera significativament les recomanacions de l'Organització Meteorològica Mundial (OMM) per a àrees muntanyoses. L'anàlisi, recolzada per un Z- score de 12.1, que està molt per sobre del valor crític del 1.645, permet rebutjar amb confiança la hipòtesi nul·la. Això indica que la cobertura d'estacions meteorològiques al país és més que adequada per a la recollida de dades precises i rellevants, especialment en el context d'un clima muntanyós altament variable.
- Les dades recopilades mostren que les estacions d'esquí, com Ordino- Arcalis i Pas de la Casa, registren els gruixos de neu més grans durant els mesos de febrer i

març. Aquestes àrees, caracteritzades per una notable acumulació de neu, suggereixen una susceptibilitat més gran a fortes nevades, probablement a causa de la seva altitud i característiques geogràfiques. Aquesta troballa és important per a la planificació i la gestió de recursos turístics, ja que aquestes estacions atrauen nombrosos visitants durant la temporada d'esquí.

- Les anàlisis mitjançant Components Principals (PCA) i correlació revelen resultats complementaris. Mentre que la correlació se centra en la relació lineal directa entre estacions, PCA proporciona una visió més àmplia de la variabilitat climàtica, agrupant estacions en funció de múltiples dimensions de variabilitat. Aquest enfocament dual permet una comprensió més completa dels patrons de nevades, destacant-ne tant les similituds com les diferències entre les estacions. Per exemple, s'observa una alta variabilitat interanual a l'espessor de neu a totes les estacions, amb temporades de nevades excepcionals, com 1995-1996 i 2012-2013, contrastant amb temporades d'escassa neu, notablement la de 2006-2007.
- L'índex de severitat hivernal (ISI), calculat per a les diferents temporades, mostra una tendència ascendent marginal al llarg dels anys estudiats. Tot i que aquesta tendència no és estadísticament significativa, suggereix un lleu increment en la severitat de les condicions hivernals. Els gràfics de diagnòstic del model utilitzat indiquen que els residus es distribueixen normalment sense evidència de problemes d'heteroscedasticitat o influències anòmales. Això suggereix que encara que s'ha ajustat un model lineal, la relació entre la severitat de les temporades i l'ISI no és prou forta per ser considerada concloent.
- A més, la classificació automàtica de tipus de temps per temporada revela una notable variabilitat i heterogeneïtat en l'ocurrència de diferents tipus de clima al llarg de les dècades estudiades. L'anàlisi de correlació de dies amb nevades revela una alta correlació entre estacions com Grau Roig i Pal, i Pas de la Casa i Arcalís, cosa que indica una sincronització en els patrons de nevades probablement deguda a factors meteorològics comuns o característiques geogràfiques similars, com l'alçada i l'orientació. No obstant això, estacions com Arinsal presenten una menor correlació amb les altres, cosa que podria ser indicativa de microclimes específics o influències locals que afecten de manera diferent la freqüència de nevades.
- La sectorització nivoclimàtica del país ha permès identificar tres zones diferenciades que coincideixen significativament amb la regionalització perceptiva utilitzada pel

Servei Meteorològic d'Andorra en els seus Butlletins de Perill d'Allaus. A més, s'han obtingut els períodes de retorn de nevades que podrien ocasionar allaus per a intervals de 5, 10, 50, 100 i 300 anys.

- És fonamental no perdre la continuïtat en la recol·lecció de sèries climàtiques, com lamentablement va passar el març del 2020 a causa de la pandèmia de COVID-19, que va interrompre importants activitats de monitorització i recol·lecció de dades. Aquesta interrupció compromet la precisió dels estudis a llarg termini i dificulta la capacitat de resposta davant d'esdeveniments climàtics extrems.. A això s'hi afegeix la importància de realitzar estudis específics sobre el comportament de la neu davant del previsible augment de les temperatures i com això afecta l'estabilitat del mantell nival. Cal avaluar si aquest escalfament incrementa la incidència d'esdeveniments d'allaus de tipus lliscament basal o si, per contra, les condicions més càlides podrien estabilitzar certs tipus de plaques de neu, com ara les plaques de vent, que podrien desencadenar-se naturalment amb més facilitat a causa de l'augment de densitat. Alternativament, aquest escalfament podria afavorir la cohesió d'estrats en arrodonir els grans de neu i enfortir les capes febles, reduint així la probabilitat d'allaus.
- La implementació de noves tecnologies, com telenivòmetres i altres eines de monitoratge avançat a les estacions d'esquí, poden garantir la precisió i la continuïtat de les dades. Això permetrà una gestió més eficaç i adaptativa davant de la realitat climàtica canviant, assegurant que es puguin prendre decisions informades per a la protecció i ús sostenible dels recursos de neu a Andorra.
- El registre sistemàtic d'observacions meteorològiques a Andorra va començar el 1935 amb la construcció de la central hidroelèctrica a la vall de Ransol per FHASA, ara FEDA. Des de llavors, s'han realitzat nombrosos controls de qualitat i d'obtenció de dades per consolidar l'estació de Ransol com a referència climàtica essencial.
- L'OMM recomana calcular noves climàtiques normals a l'inici de cada dècada. Tot i que moltes organitzacions adopten una fase de transició. L'elecció del període de referència afecta la magnitud de les anomalies de temperatura i precipitació. Per exemple, les anomalies de temperatura tendeixen a ser més negatives en el passat quan es fa servir el període 1991-2020 a causa de l'augment de temperatures en les darreres dècades.

- Tot i que la Terra ha experimentat cicles naturals d'escalfament i de refredament, aquests processos prenen milions d'anys. Actualment, a causa de l'activitat humana, estem experimentant un canvi climàtic molt més ràpid, semblant al ritme de variacions que en el passat van portar a extincions en uns dos-cents anys. La temperatura mitjana mundial és actualment 0,85°C superior a la de finals del segle XIX, amb cadascuna de les darreres tres dècades sent més càlida que qualsevol de les anteriors des de 1850.

- Les anàlisis estadístiques d'Andorra mostren un augment de les anomalies positives de temperatura en les darreres dècades, consistent amb l'escalfament global. La precipitació mostra alta variabilitat sense una tendència clara a llarg termini, destacant la importància de considerar tantes tendències a llarg termini com a variacions naturals del clima.

Capítol 3.

3. Generació de patrons espaciotemporals de l'activitat d'allaus

3.1 Introducció

La necessitat de comprendre i gestionar adequadament l'activitat d'allaus a Andorra ha portat a la implementació de diverses estratègies i programes destinats a monitoritzar, prevenir i mitigar aquests esdeveniments. En aquest capítol, es fa una anàlisi exhaustiva dels patrons espaciotemporals de l'activitat d'allaus a Andorra, basant-se en tres fonts de dades principals que ofereixen una perspectiva àmplia i detallada d'aquest fenomen.

En primer lloc, s'examinen els registres històrics dels dies en què s'ha activat el Pla de Desencadenament d'allaus a les estacions d'esquí (Figura 3.1) i a les carreteres del país, un sistema gestionat pel COEX (Conservació i Explotació de Carreteres). Aquesta informació, proporcionada per les estacions d'esquí mateixes i el Departament d'Ordenació del Territori, permet analitzar la freqüència i les condicions sota les quals s'adopten mesures preventives. Aquest tipus de dades és essencial per entendre com les autoritats locals responen a les amenaces d'allaus i com han evolucionat aquestes respostes al llarg del temps.



Figura 3.1: Imatges d'observacions nivometeorològiques i desencadenament artificial d'allaus durant l'operació de PIDA (Pla d'Intervenció i Desencadenament d'Allaus). Crèdits: Grandvalira Resorts Andorra.

En segon lloc, s'exploren els registres d'accidents mortals causats per allaus, que són un indicador crític dels riscos associats a aquests esdeveniments. La recopilació d'aquestes dades ha estat històricament incompleta a causa de la manca d'un sistema de registre sistemàtic; no obstant això, des de 1971, la Base de Dades de Riscos Geològics d'Andorra Recerca i Innovació ha estat recopilant informació sobre incidents mortals, cosa que proporciona una base important per a l'anàlisi.

Finalment, també es té en compte l'activitat d'allaus al sector fronterer de l'Hospitalet d'Andorre, a prop de Pas de la Casa. Aquesta zona és particularment vulnerable a causa de la geografia i la proximitat a rutes d'accés. Les dades utilitzades provenen del projecte SAPYRA (Seguretat dels accessos pirinencs davant el risc d'allaus), una iniciativa transfronterera que té com a objectiu millorar la seguretat i la viabilitat de les infraestructures de transport als accessos pirinencs davant del risc d'allaus, cobrint el període 2016-2019. SAPYRA ha implementat diverses mesures, incloent la instal·lació de sistemes para-allaus, la reforestació estratègica d'àrees crítiques i la col·locació de noves estacions meteorològiques.

La rellevància d'aquest estudi rau en la contribució al coneixement dels patrons d'allaus, la qual cosa és necessària per a la planificació i l'execució d'estratègies de gestió de riscos. Un coneixement detallat i actualitzat d'aquests patrons permet a les autoritats locals i als responsables de la gestió d'emergències prendre decisions informades per a la prevenció i mitigació d'allaus. A més, l'enfocament proactiu i adaptatiu del projecte SAPYRA destaca com un model d'adaptació al canvi climàtic, implementant solucions que busquen minimitzar l'impacte de les allaus a la infraestructura i la vida humana, alhora que s'anticipen a possibles canvis futurs en el comportament fenòmens.

Aquest capítol, per tant, no només ofereix una visió retrospectiva de l'activitat d'allaus a Andorra, sinó que també proporciona una base per desenvolupar estratègies futures d'adaptació i mitigació, subratllant la importància d'una gestió de riscos basada en dades precises i anàlisis rigoroses. En fer-ho, s'espera contribuir al desenvolupament d'un marc més segur i resiliència per a les comunitats que habiten i visiten aquesta regió muntanyenca.

3.2 Metodologia

Per dur a terme una anàlisi detallada i exhaustiva dels patrons espaciotemporals de l'activitat d'allaus a Andorra, es va seguir una metodologia estructurada que va abastar diverses etapes. Aquestes etapes van incloure la recopilació de dades de diverses fonts, el processament i la neteja d'aquestes dades, i finalment l'anàlisi d'aquestes mitjançant diverses tècniques estadístiques i computacionals. Cada fase del procés va ser dissenyada per assegurar la màxima precisió i fiabilitat dels resultats obtinguts.

A la primera fase, es va realitzar una extensa recopilació de dades. Els registres històrics dels dies en què es va activar el Pla de Desencadenament d'allaus a les estacions d'esquí i a les carreteres del país van ser una de les fonts d'informació principals. Aquestes dades van ser facilitades per les mateixes estacions d'esquí, l'assistència tècnica de predicció d'allaus de carreteres i el Departament d'Ordenació del Territori d'Andorra, incloent-hi detalls com la data d'activació, la ubicació, i les condicions meteorològiques i nivològiques presents al moment de l'activació, així com les accions preventives portades a terme.

A més, es van recopilar dades sobre accidents mortals causats per allaus, abastant un període des de 1971 fins avui. Aquesta informació va ser obtinguda de la Base de Dades de Riscos Geològics d'Andorra Recerca i Innovació, proporcionant detalls sobre la data i el lloc de l'incident, el nombre de víctimes i les circumstàncies de l'accident. Tot i això, va ser complicat tenir una sèrie sòlida de dades a causa de la incompletud de molts registres històrics, ja que la recopilació sistemàtica d'informació sobre accidents no va ser constant al llarg dels anys. Les condicions desfavorables en la majoria d'operacions de desencadenament d'allaus no fan fàcil el registre de totes les dades que serien òptimes per a una anàlisi completa.

D'altra banda, es va accedir a les dades del projecte SAPYRA, les quals van ser essencials per entendre l'activitat d'allaus a la regió fronterera de l'Hospitalet d'Andorre i el Pas de la Casa.

La següent fase va implicar el processament i neteja de les dades recopilades, un procés que va resultar ser complex a causa de la naturalesa dispar i sovint incompleta dels registres disponibles. Es va dur a terme una exhaustiva homogeneïtzació de les sèries de dades, cosa que va incloure la normalització de formats, especialment quant a dates, ubicacions i unitats de mesura. A més, es va procedir a l'eliminació de duplicats

i la correcció d'inconsistències als registres, un treball que va requerir una revisió meticulosa i, de vegades, la inferència de dades mancants basant-se en informació contextual. Aquest procés de neteja va ser essencial per assegurar que les dades finals fossin coherents i precises, cosa que és fonamental per a l'anàlisi quantitativa i qualitativa posterior.

Un cop completada la fase de neteja de dades, es va dur a terme l'anàlisi de dades, que es va dividir en diverses etapes. Inicialment, es va fer una anàlisi descriptiva per oferir una visió general de la distribució temporal i espacial dels esdeveniments d'allaus. S'han utilitzat eines estadístiques bàsiques i visualitzacions gràfiques per representar la freqüència d'activació del pla d'allaus, així com la incidència d'accidents mortals i la implementació de mesures preventives i de mitigació.

Tot seguit, es van aplicar tècniques d'anàlisi espai-temporal utilitzant programari de Sistemes d'Informació Geogràfica (SIG). Aquesta eina va permetre mapejar la ubicació dels esdeveniments d'allaus i les intervencions realitzades, cosa que va facilitar la identificació d'àrees d'alt risc i l'avaluació de l'eficàcia de les mesures de mitigació.

A la fase final de l'anàlisi, es van desenvolupar models predictius mitjançant tècniques de machine learning . Aquests models es van entrenar utilitzant variables clau com ara les condicions meteorològiques, la cobertura de neu i l'historial d'allaus. El propòsit d'aquests models va ser preveure la probabilitat de futurs esdeveniments d'allaus i millorar la gestió del risc a les àrees més vulnerables. La validació d'aquests models es va fer utilitzant un subconjunt de les dades històriques, assegurant que les prediccions fossin precises i fiables.

Finalment, els resultats van ser interpretats i discutits en el context de les polítiques de gestió de riscos d'allaus a Andorra i les àrees circumdants. Es van discutir les implicacions de les troballes per a la planificació i la resposta davant d'emergències, així com per a futures investigacions i monitorització.

3.3 Resultats

Les temporades es mostren a l'eix X, des de 1980-1981 fins a 2015-2016, i el nombre de dies d'activitat d'allaus s'indica a l'eix Y (Figura 3.2). Els diferents colors representen els mesos de desembre, gener, febrer, març i abril. El gràfic ressalta la variabilitat

interanual en l'activitat d'allaus, amb un augment notable en la freqüència dels esdeveniments en temporades més recents (Figura 3.3).

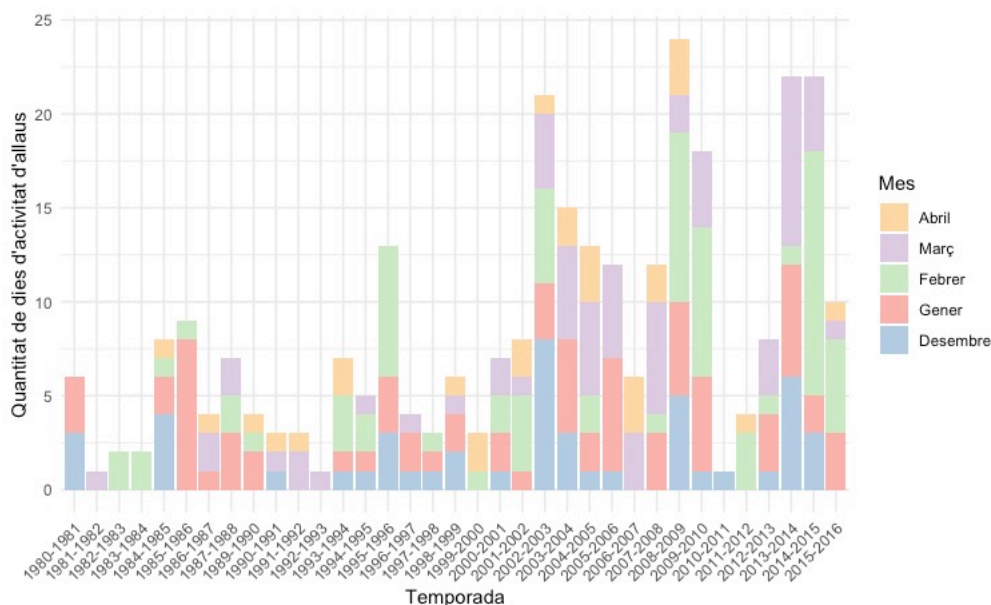


Figura 3.2: Gràfic de barres apilades que mostra la quantitat de dies d'activitat d'allaus per temporada i mes. Crèdits: Elaboració pròpia.

El gràfic mostra el total de dies d'activitat d'allaus (eix Y) davant de l'any d'inici de la temporada (eix X) des de la temporada 1980-1981 fins a la temporada 2015-2016. La línia blava indica la tendència lineal amb el corresponent interval de confiança en gris. S'observa una tendència creixent en el nombre de dies d'activitat d'allaus al llarg dels anys, cosa que suggereix un increment de la freqüència d'aquests esdeveniments en les darreres dècades.

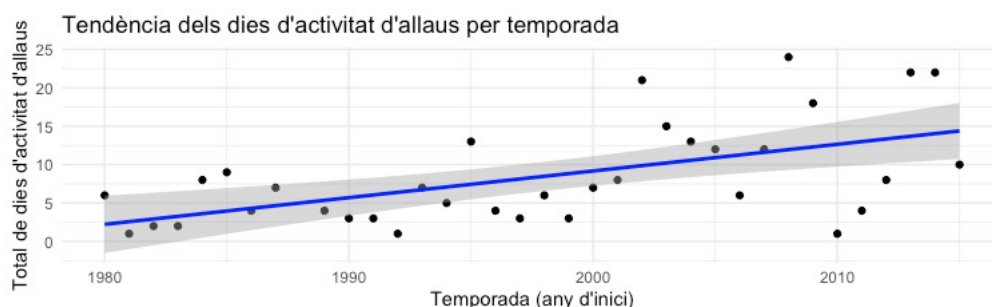


Figura 3.3: Tendència dels dies d'activitat d'allaus per temporada. Crèdits: Elaboració pròpia.

El model de regressió lineal ajustat per analitzar la relació entre el nombre de dies d'activitat d'allaus i els anys de la temporada mostra els resultats següents. Els residus del model tenen un rang que varia entre -11,65 i 12,04, amb un primer quartil (1Q) de -3,41, una mitjana de -1,26 i un tercer quartil (3Q) de 4,08. Aquests valors indiquen la

diferència entre els valors observats i els predits pel model, suggerint la presència d'alguna variabilitat no explicada pel model. El coeficient d'intersecció (Intercept) és -686,05, amb un error estàndard de 178,24. El valor t associat és -3.85, amb un valor p molt baix (0,000516), cosa que indica que és altament significatiu. El coeficient per a season_year és 0,35 amb un error estàndard de 0,09. El valor t per a aquest coeficient és 3,90, amb un valor p de 0,000451. Això indica una relació positiva i estadísticament significativa entre l'any de la temporada i el nombre de dies d'activitat d'allaus. De mitjana, cada any d'increment a la temporada està associat amb un augment d'aproximadament 0,35 dies d'activitat d'allaus. El model és estadísticament significatiu amb un F- statistic de 15,18 (p- value = 0.0004515) sobre 1 i 33 graus de llibertat. Això suggereix que almenys un dels coeficients del model és diferent de zero, indicant que la variable independent (season_year) té un efecte significatiu en la variable dependent (total_dias_allaus) . aproximadament el 31,51% de la variabilitat en el nombre de dies d'activitat d'allaus es pot explicar pel model. El R^2 ajustat és 0,29, que és lleugerament menor i té en compte el nombre de predictors al model. Encara que aquests valors no són extremadament alts, sí que suggereixen una relació moderada entre l'any de la temporada i el nombre de dies d'activitat d'allaus.

El gràfic de barres mostra la freqüència de cada tipus de temps classificat per lletres, on A representa el tipus de temps més comú abans dels esdeveniments d'allaus, seguits per N i NW (Figura 3.4). Els colors representen cada tipus de temps específic, amb un nombre significatiu d'ocurrències per als tipus de temps A, N i NW, cosa que suggereix una correlació amb l'activitat d'allaus.

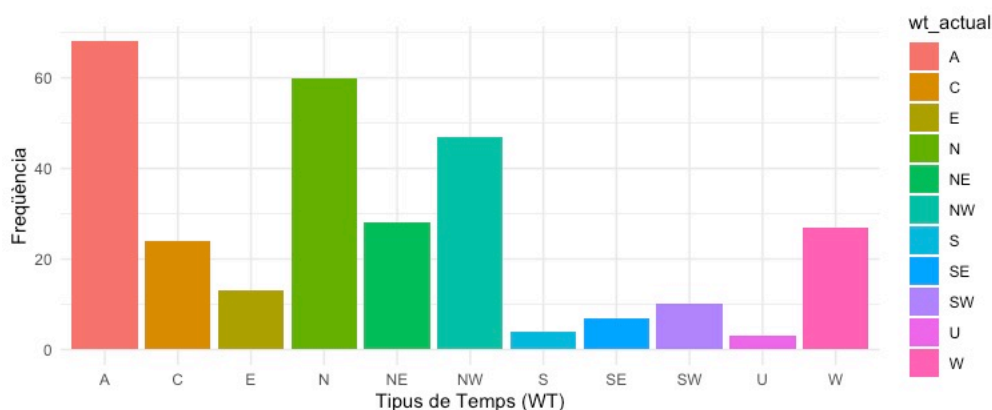


Figura 3.4: Freqüència de tipus de temps (WT) observats els dies d'activitat d'allaus. Crèdits: Elaboració pròpia.

El gràfic de barres mostra la freqüència de cada tipus de temps classificat per lletres, on A representa el tipus de temps més comú abans dels esdeveniments d'allaus (Figura 3.5), seguits per N i NW. Els colors representen cada tipus de temps específic, amb un nombre significatiu d'ocurrències per als tipus de temps A, N i NW, cosa que suggereix una correlació amb l'activitat d'allaus.

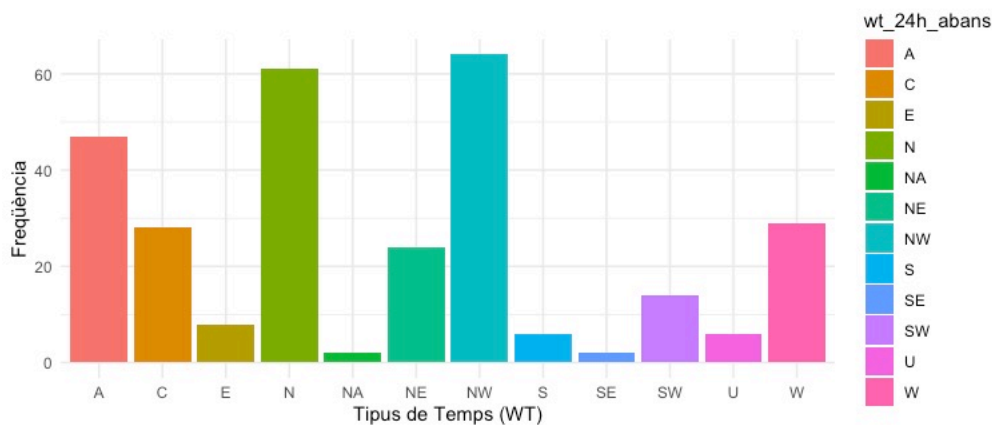


Figura 3.5: Freqüència de tipus de temps (WT) observats 24 hores abans dels dies d'activitat d'allaus. Crèdits: Elaboració pròpia.

L'eix vertical representa els diferents tipus de temps, mentre que l'eix horitzontal representa els mesos de desembre a abril (Figura 3.6). Els colors més foscos indiquen més freqüència d'ocurrència, destacant els tipus de temps A, N i NW com els més comuns durant els mesos de febrer i març. Aquest patró suggereix més susceptibilitat a l'activitat d'allaus durant aquests mesos específics sota certs tipus de condicions meteorològiques.

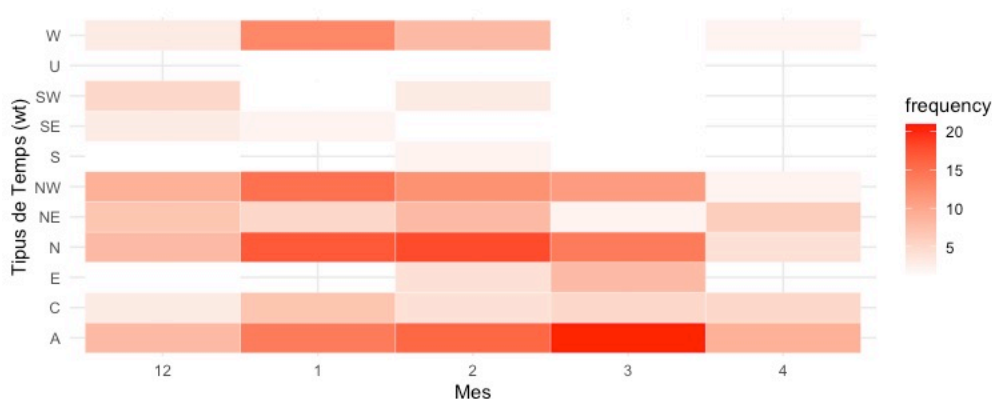


Figura 3.6: Mapa de calor que mostra la freqüència de tipus de temps (WT) per mes durant els dies d'activitat d'allaus. Crèdits: Elaboració pròpia.

La matriu mostra la relació de correlació entre els tipus de temps actuals (`wt_num_actual`), els observats 24 hores abans (`wt_num_24h_abans`) i els observats 48 hores abans (

wt_num_48h_abans) (Figura 3.7). Les cel·les de la matriu estan acolorides segons el coeficient de correlació, amb una escala de colors que va del blau (correlació negativa) al vermell (correlació positiva). S'observa una correlació moderada a alta entre els tipus de temps actuals i els de 24 hores abans (0,42), i una correlació menor amb els de 48 hores abans (0,13), cosa que indica una relació més forta entre els tipus de temps de un dia d'antelació amb esdeveniments d'allaus.

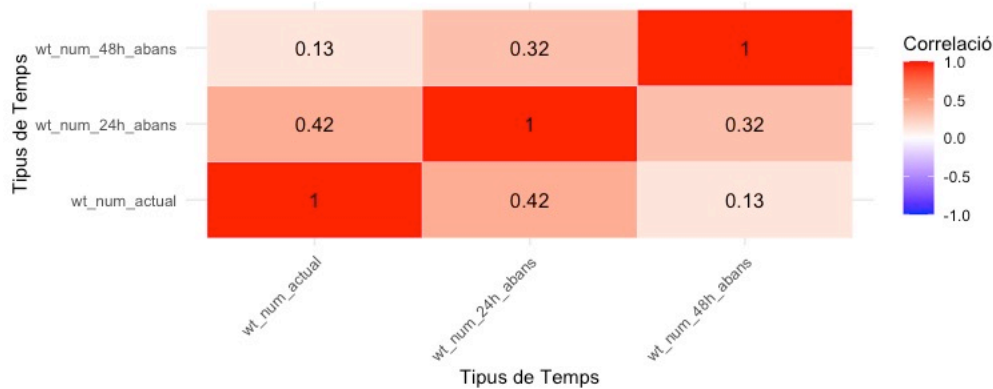


Figura 3.7: Matriu de correlació dels tipus de temps (WT) actuals i dels dos dies anteriors. Crèdits: Elaboració pròpia.

Es va realitzar un exercici de machine learning utilitzant un model de regressió lineal per predir el nombre de dies d'activitat d'allaus (`total\_dies\_allaus`) en funció de l'any de la temporada (`season\_year`). Els resultats obtinguts de l'ajust del model són els següents (Figura 3.8):

Els residus del model reflecteixen la diferència entre els valors observats i els predits, i presenten una variabilitat moderada al voltant de zero. Els residus tenen un valor mínim de -12,61, un primer quartil (1Q) de -3,28, una mitjana de -0.96, un tercer quartil (3Q) de 3,70 i un valor màxim de 11,05. Pel que fa als coeficients del model, l'intercepte és de -655,12 amb un error estàndard de 160,78 i és altament significatiu ($p < 0,001$). El coeficient per a `season\_year` és 0,33 amb un error estàndard de 0,08, també significatiu ($p < 0,001$). Això indica que hi ha una tendència creixent en el nombre de dies d'activitat d'allaus al llarg dels anys, amb un increment mitjà d'aproximadament 0,33 dies per any addicional.

Les mètriques d'ajustament del model mostren un error estàndard residual de 5,47, un R^2 múltiple de 0,39 i un R^2 ajustat de 0.36. El valor de l'estadística F és de 17,1 amb un p-valor inferior a 0,001, fet que suggereix que el model és significatiu. El R^2 ajustat indica que el 36,51% de la variabilitat en els dies d'activitat d'allaus es pot explicar pel model, cosa que suggereix que hi ha altres factors no considerats en aquesta anàlisi que també influeixen en l'activitat d'allaus.

A l'avaluació del model utilitzant el conjunt de prova, es van obtenir un RMSE (Root Mean Square Error) de 5,10 i un MAE (Mean Absolute Error) de 4,34, que indiquen la mitjana dels errors de predicció. El R^2 al conjunt de prova va ser de 0.44, la qual cosa implica que el model explica aproximadament el 43,76% de la variabilitat en les dades de prova.

Aquests resultats indiquen que, encara que el model de regressió lineal captura una tendència general creixent en els dies d'activitat d'allaus amb el pas dels anys, encara hi ha una quantitat significativa de variabilitat que no s'explica, cosa que suggereix la presència d'altres factors rellevants que no van ser inclosos al model actual.

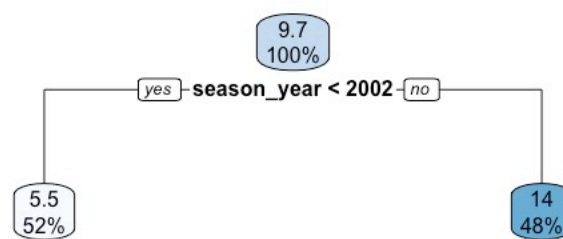


Figura 3.8: Aquesta figura mostra un model d'arbre de decisió utilitzat per predir el nombre de dies d'activitat d'allaus en funció de l'any de temporada. Es tracta d'un esquema visual que divideix les dades en funció de condicions establertes per al factor analitzat, en aquest cas, el llinar temporal. Crèdits: Elaboració pròpia.

El gràfic mostra que el RMSE és de 4,38 dies i el MAE és de 3,34 dies, indicant la magnitud mitjana dels errors en les prediccions del model, mentre que el R^2 de 0,51 suggereix que el model explica aproximadament el 51,23% de la variabilitat en les dades. La divisió principal a l'arbre passa l'any 2002: per als anys anteriors a 2002, el model prediu una mitjana de 5,5 dies d'activitat d'allaus, i per als anys a partir del 2002, la mitjana és de 14 dies. Això revela un increment significatiu a l'activitat d'allaus a partir del 2002, proporcionant una visió clara de com ha canviat l'activitat al llarg del temps.

El model d'arbre de decisió utilitzat per predir el nombre de dies d'activitat d'allaus (total_dies_allaus) en funció de l'any de la temporada (season_year) va donar diversos resultats interessants. Les mètriques d'avaluació van indicar un RMSE (Root Mean Square Error) de 4,38, cosa que suggereix que, de mitjana, les prediccions del model

difereixen dels valors reals per aproximadament 4,38 dies. A més, el MAE (Mean Absolute Error) va ser de 3,34, indicant que les prediccions són a 3.34 dies dels valors reals de mitjana. D'altra banda, el R^2 (R-squared) va ser de 0,52, la qual cosa significa que el model explica aproximadament el 52% de la variabilitat en les dades de dies d'activitat d'allaus. Això suggereix que hi ha una moderada capacitat explicativa del model, encara que queda un 48% de la variabilitat sense explicar.

Pel que fa a la interpretació de l'arbre de decisió, l'anàlisi revela que el node arrel representa el conjunt total de dades, amb un valor mitjà de 9,7 dies d'activitat d'allaus. La primera divisió significativa es basa en l'any de la temporada, diferenciant entre els anys anteriors al 2002 i els anys posteriors o iguals a aquest. Per als anys abans del 2002, el model prediu una mitjana de 5,5 dies d'activitat d'allaus, que representa el 52% del total de dades. En canvi, a partir del 2002, es detecta un augment considerable, amb una predicció mitjana de 14 dies d'activitat d'allaus, que cobreix el 48% restant de les dades. Aquest patró posa de manifest un increment notable en l'activitat d'allaus des de l'any 2002 i reflecteix possibles canvis en les condicions climàtiques o altres factors relacionats. Aquestes troballes ajuden a entendre com ha evolucionat l'activitat d'allaus al llarg del temps i ofereixen una base sòlida per explorar amb més profunditat les causes subjacents o per millorar les prediccions del model.

Finalment, es presenta un gràfic que forma part d'un treball en desenvolupament a Andorra Recerca i Innovació. En aquest treball, s'ha representat la variabilitat espacial dels accidents registrats a la Base de Dades d'Allaus Accidentals d'Andorra, proporcionant una anàlisi més detallada sobre la distribució geogràfica de la seva ocurrència. El gràfic mostra la distribució espacial dels accidents d'allaus a Andorra (Figura 3.9), evidenciant que les zones més afectades per aquests fenòmens es troben al nord-oest i al sud-est. La intensitat dels colors vermellors suggereix una major concentració d'accidents en aquestes àrees, possiblement degut a condicions orogràfiques i meteorològiques més favorables per a la formació d'allaus, així com una major presència d'activitat humana o esportiva en aquestes zones. Les àrees de menor intensitat, de color groc clar, indiquen una menor incidència d'accidents.

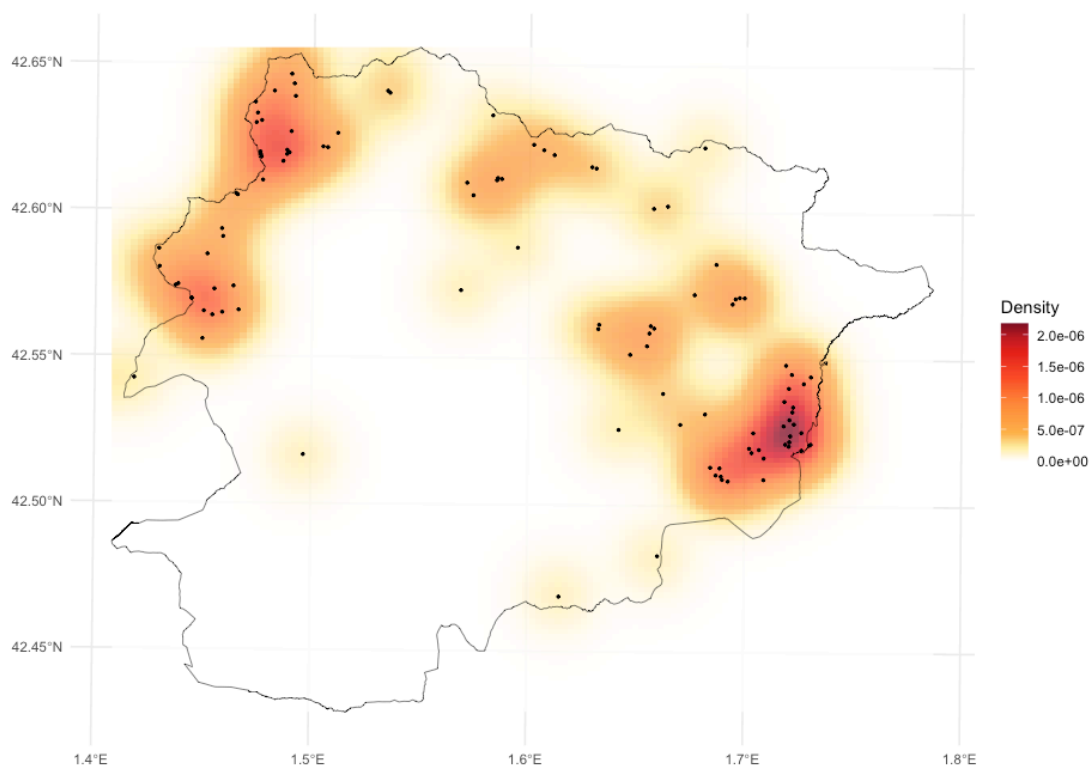


Figura 3.9: Mapa de densitat dels accidents totals d'allaus registrats a Andorra, segons les dades de la Base de Dades d'Allaus Accidentals d'Andorra. Crèdits: AR+I

3.4 Discussió

Els resultats de la regressió lineal confirmen una tendència creixent en el nombre de dies d'activitat d'allaus al llarg de les temporades d'estudi. El coeficient per a l'any de la temporada (*season_year*) és de 0,35, indicant un augment mitjà d'aproximadament 0,35 dies d'activitat d'allaus per cada any addicional. Aquest resultat és molt significatiu ($p < 0,001$), suggerint que la relació observada és robusta i no és atribuïble a l'atzar.

Aquesta troballa és coherent amb altres estudis que apunten a una tendència similar d'increment en l'activitat d'allaus associada amb el canvi climàtic. Per exemple, l'estudi de Castebrunet et al. (2012) als Alps francesos mostra una correlació clara entre els patrons climàtics i la intensificació de l'activitat d'allaus, fent èmfasi en com les fluctuacions climàtiques afecten directament la formació d'allaus, especialment durant l'hivern i la primavera. Igualment, Schauer et al. (2019) als EUA detecten una relació entre els canvis en els patrons atmosfèrics i la freqüència d'allaus, atribuïble també a l'augment de les temperatures globals. Per tant, els resultats del model de regressió

lineal encaixen amb aquesta literatura, que vincula l'augment de l'activitat d'allaus amb l'escalfament global.

No obstant això, el R^2 ajustat de 29,43% en el model presentat és relativament baix en comparació amb altres estudis que han utilitzat mètodes més sofisticats i models més complexos. Per exemple, (Oller, 2021), en el seu estudi al Pirineu Català, va aconseguir un R^2 molt més alt (0,81) en un model empíric noruec ajustat per calcular distàncies d'abast d'allaus "extrems". Això indica que altres factors, com la composició del mantell nival o les condicions topogràfiques, poden tenir un paper molt important a l'hora de predir l'activitat d'allaus, aspectes que no són capturats de manera adequada per un simple model de regressió lineal.

Pel que fa a l'impacte del canvi climàtic en l'activitat d'allaus, la regressió lineal obtinguda mostra una relació significativa, cosa que és coherent amb la hipòtesi que l'escalfament global i els canvis en els patrons de precipitació poden augmentar la inestabilitat del mantell de neu. Aquest efecte s'ha observat en diverses regions muntanyoses. En aquest sentit, l'estudi de García (2021) sobre la variabilitat espai-temporal de grans allaus al Pirineu Oriental també subratlla la influència del canvi climàtic en l'augment del risc d'allaus, especialment en relació amb els canvis en la temperatura i la humitat. No obstant això, García destaca que aquests efectes no són uniformes i varien segons la regió i la temporada, la qual cosa suggereix que els models locals haurien d'incloure més variables climàtiques per millorar la predicció.

A més, mentre que els resultats de la regressió indiquen una tendència creixent al llarg del temps, l' R^2 ajustat mostra que una gran part de la variabilitat en l'activitat d'allaus no s'explica únicament per l'any. Això és similar a les troballes de Martin i Germain (2017), que en el seu estudi a New Hampshire van trobar que altres factors com les teleconnexions climàtiques a gran escala (per exemple, NAO i ENSO) també poden influir en l'activitat d'allaus. Això reforça la necessitat d'incloure més variables meteorològiques i geogràfiques en els models predictius, una proposta que també es veu recolzada per les investigacions de Techel et al. (2022), on s'emfatitza que l'ús de tècniques de modelatge més avançades, com el machine learning, podria ajudar a captar millor les relacions complexes entre les variables.

En aquest context, és essencial considerar que els avenços tecnològics, com ara els sensors remots i els sistemes de monitorització meteorològica, poden estar influint en els resultats. La millora en la qualitat i freqüència de les dades, tal com s'esmenta en

aquesta discussió, pot estar incrementant el registre d'allaus, un punt que ja va ser destacat per Techel et al. (2022) en el seu treball sobre la importància de les observacions recents i el monitoratge. Aquesta millora en la recollida de dades també podria explicar parcialment l'augment aparent dels dies d'activitat d'allaus, independentment del canvi climàtic.

En resum, mentre que la tendència creixent detectada en els dies d'activitat d'allaus s'alinea amb la literatura, la investigació posa de manifest la necessitat d'ampliar els models predictius, tal com indiquen estudis anteriors. Incorporar més variables i utilitzar tècniques avançades permetria refinar les prediccions i proporcionar eines més robustes per gestionar el risc d'allaus en un context de canvi climàtic.

3.5 Conclusions

- Les dades mostren una correlació clara entre certs tipus de temps (WT) i l'activitat d'allaus. En particular, els tipus de temps A, N i NW es presenten amb més freqüència tant el dia de l'activitat d'allaus com les 24 hores prèvies. Això suggereix que aquests patrons meteorològics específics podrien estar directament relacionats amb les condicions que afavoreixen la formació d'allaus, cosa que ressalta la importància de monitoritzar aquests tipus de temps per a la predicció i la prevenció d'allaus.
- L'anàlisi de tendències revela un augment gradual en el nombre de dies amb activitat d'allaus des de la dècada del 1980 fins al 2015. Aquest increment constant podria estar relacionat amb factors climàtics com l'escalfament global o els canvis en els patrons de precipitació.
- La distribució mensual de l'activitat d'allaus mostra una concentració clara amb un pic notable al febrer i al març. Aquesta concentració estacional suggereix que les condicions meteorològiques típiques d'aquests mesos, com l'acumulació de neu i les fluctuacions de temperatura, tenen un paper crucial en la inestabilitat del mantell de neu, cosa que incrementa la probabilitat d'allaus en aquestes èpoques de l'any.
- Els models de regressió lineal i arbre de decisió utilitzats a l'anàlisi han demostrat ser estadísticament significatius i han confirmat la rellevància de la variable temporada en la predicció del nombre de dies d'activitat d'allaus. Tot i això, la moderada precisió del model, amb un R^2 ajustat que explica entre el 36% i el 44%

de la variabilitat, suggereix que hi ha factors addicionals que no van ser considerats. Això indica la necessitat d'integrar més variables predictores per millorar l'exactitud i la comprensió del fenomen.

- L'anàlisi destaca la importància de continuar monitoritzant i estudiant les condicions meteorològiques. La identificació de tendències i factors contribuents és determinant per a la planificació de mesures de mitigació i la preparació davant de desastres en regions muntanyoses, suggerint que futures investigacions haurien d'incloure una gamma més àmplia de variables per captar la complexitat de l'activitat d'allaus.
- El mapa de densitat dels accidents d'allaus a Andorra permet identificar clarament les zones amb major risc, especialment concentrades al nord-oest i al sud-est del país.

Capítol 4.

4. Avaluació i mitigació del risc d'allaus: Proposta de noves estratègies, protocol, eines i tecnologies per a la gestió del risc d'allaus

4.1 Introducció

La gestió del risc d'allaus, un fenomen natural que planteja perills seriosos per a la vida humana, la propietat i la infraestructura, experimenta una transformació significativa gràcies als avenços en tecnologia i metodologia. Aquest capítol s'enfoca a proposar noves estratègies, protocols, eines i tecnologies per millorar l'avaluació i la mitigació del risc d'allaus. En particular, s'exploren innovacions que combinen tecnologies emergents amb mètodes col·laboratius per a una gestió més eficient i efectiva del risc associat a les allaus.

Primer començaré presentant els resultats d'un DAFO , (Eina estratègica utilitzada per identificar els factors interns i externs que poden afectar a una situació concreta, amb l'objectiu de prendre decisions més informades i estratègiques) per a la valoració de l'estat actual del coneixement i la gestió del risc a Andorra. Aquesta anàlisi ha permès identificar les fortaleeses, debilitats, oportunitats i amenaces en relació amb l'enfocament actual per gestionar el risc d'allaus, oferint una visió general de la situació actual i establint les bases per a la millora i innovació en les estratègies de gestió.

A continuació, s'aprofundeix en les proves experimentals realitzades, centrades en l'ús de noves tecnologies com els UAS (drons), la teledetecció i la modelització Snowpack, així com altres eines que s'han provat per millorar la predicció i gestió del risc d'allaus. Aquestes proves tenen com a objectiu avaluar l'eficàcia d'aquestes tecnologies en comparació amb els mètodes tradicionals i explorar noves oportunitats per millorar la seguretat en zones de risc.

La gestió eficaç del risc d'allaus requereix un enfocament detallat i sistemàtic per registrar, modelar i inventariar els esdeveniments passats amb la màxima precisió possible. En els darrers anys, els avenços en tecnologia han revolucionat la manera com es recullen i analitzen les dades relacionades amb les allaus. L'ús de drons/UAS (Sistemes Aeris No Tripulats) i tècniques avançades de fotogrametria ha demostrat ser d'interès en aquest procés i possible a un cost econòmic reduït. Aquestes eines

permeten obtenir imatges aèries d'alta resolució que faciliten una anàlisi més precisa de les propietats geomètriques d'un lliscament, desprendiment o allau. Aquesta informació detallada és important per a l'avaluació de riscos i la planificació de mesures de mitigació efectives.

L'ús de drons per a la creació ràpida de mapes ofereix beneficis significatius a diverses àrees de la gestió del risc d'allaus i l'avaluació de danys relacionats amb desastres. La seva capacitat per proporcionar informació geoespacial actualitzada en temps semireal és inavaluable no només per a la gestió immediata d'emergències, sinó també per actualitzar cadastre d'allaus i registrar peritatges detallats en accidents que afecten infraestructures i persones.

Una de les aplicacions més rellevants del mapatge ràpid mitjançant drons és l'actualització del cadastre d'allaus. El cadastre d'allaus és un registre important que documenta l'ocurrència i les característiques de les allaus a una regió determinada. Mantenir aquest cadastre actualitzat és essencial per millorar la gestió del risc i planificar estratègies de mitigació efectives, sent la base per ordenar el sòl de manera compatible amb el seu entorn territorial. Els drons permeten l'adquisició ràpida d'imatges aèries que es poden processar per identificar noves àrees de risc, actualitzar els mapes d'allaus existents i avaluar canvis en les característiques del terreny causats per esdeveniments recents. La capacitat dels drons per capturar imatges detallades i generar models 3D proporciona una visió precisa i actualitzada que és fonamental per a la correcta classificació i anàlisi dels riscos d'allaus.

En casos d'accidents provocats per allaus que afecten infraestructures o persones, la utilització de drons és igualment eina amb moltes possibilitats. Els peritatges, que impliquen l'avaluació de danys i la determinació de les causes de l'accident, es beneficien enormement de la tecnologia de drons. Aquests dispositius permeten capturar imatges detallades de l'escena de l'accident, tot facilitant una avaluació precisa del dany a infraestructures i el seu impacte sobre les persones. Les dades obtingudes a través dels drons poden ser utilitzades per generar informes detallats, que són essencials per a les investigacions, compensació de danys i planificació de reparacions. La capacitat de documentar l'estat de les infraestructures i el terreny amb alta resolució ajuda a proporcionar proves visuals clares i completes que es poden utilitzar en procediments legals i tècnics.

La implementació de drons a l'actualització del cadastre d'allaus i al registre de peritatges ofereix diversos avantatges addicionals. La rapidesa en l'adquisició i el processament de dades permet als equips d'emergència i a les autoritats respondre de manera més àgil als canvis en el terreny i als impactes de les allaus. A més, la visualització en temps real i la generació de mapes necessaris faciliten la presa de decisions informades i la planificació de les intervencions.

A Andorra, la normativa sobre l'ús de drons estableix una diferenciació clara entre vols recreatius i professionals. Els vols recreatius amb drons de categoria A0 (pes inferior a 1 kg) dins de la categoria *open* no requereixen permís, sempre que es realitzin en zones extraurbanes com valls, muntanyes, rius, llacs o cims, mantenint el contacte visual amb l'aeronau, en horari diürn, sense sobrevolar persones, propietats privades o carreteres, i a una alçada màxima de 50 metres sobre el terreny. En cas de sentir un helicòpter, és obligatori fer baixar immediatament el dron.

Per als vols professionals, comercials o de promoció, es requereixen autoritzacions específiques. Aquests es consideren activitats no regulades per l'EASA (*vols d'estat*) només en determinades circumstàncies, com ara operacions de rescat, lluita contra incendis o altres serveis d'interès públic sota la responsabilitat d'organismes oficials. No obstant això, els vols destinats al seguiment, observació i estudi de la neu i els allaus no es classificarien com a activitats no regulades per l'EASA (*vols d'estat*), sinó com operacions comercials o professionals estàndard. En aquest cas, el pilot i l'aeronau han d'estar degudament identificats, i cal presentar una sol·licitud d'autorització, incloent-hi un informe d'avaluació i mitigació de riscos elaborat per un enginyer andorrà, així com una assegurança de responsabilitat civil específica per Andorra.

Aquesta diferenciació és important, ja que mentre les activitats no regulades per l'EASA es regeixen per procediments específics d'organismes públics, operacions com les destinades a la investigació sobre la neu o els allaus segueixen un marc més general que assegura el compliment de les normatives de seguretat i responsabilitat aplicables.

En aquest context, es presenta una proposta metodològica innovadora anomenada Natural Hazards Information Modeling (NHIM), que representa una evolució del tradicional inventari de fenòmens de risc basat en plans, transformant-lo en un model digital col·laboratiu. Aquesta metodologia, inspirada en el modelatge d'informació de construcció (BIM, per les sigles en anglès), busca centralitzar tota la informació rellevant sobre esdeveniments de riscos naturals en un únic model digital. L'enfocament

col·laboratiu de NHIM permet integrar dades proporcionades per diversos agents multidisciplinaris, creant un historial complet i detallat que facilita una gestió i anàlisi geoespacial-estadístic més eficient dels esdeveniments de risc. La implementació de NHIM té el potencial de transformar la manera com es registren els esdeveniments d'allaus. A Andorra, s'han fet experimentacions amb UAS que demostren la seva capacitat per calcular gruixos de neu, modelar allaus en 3D i estimar volums amb una bona precisió, tot i que encara persisteixen desafiaments relacionats amb el tractament d'imatges i la variabilitat dels programaris disponibles.

La teledetecció mitjançant satèl·lits com el Sentinel 2 ofereix una visió àmplia i detallada de l'activitat d'allaus. La capacitat de detectar allaus de mida considerable i automatitzar la identificació d'esdeveniments d'allaus de mida molt gran i extremadament gran (Mida 4 i 5) és un avantatge significatiu. Tot i això, la detecció d'allaus més petites continua sent un desafiament que requereix més desenvolupament i que augmenti la resolució de les imatges. Les imatges satel·litàries complementen les tècniques dels UAV, i a mesura que les resolucions tant de la imatge com espai-temporals millorin, seran implantant cada vegada més en les operatives de gestió del risc.

Les plataformes digitals per a la gestió de dades nivològiques, com la implementada a Andorra per AR+I, representen un avenç important en la recollida i l'intercanvi d'informació sobre neu i allaus. Aquesta eina facilita la recopilació sistemàtica de dades, integrant informació de diversos actors clau com a pistes, guies de muntanya i altres professionals del sector. La plataforma millora la precisió i l'eficiència en el registre d'esdeveniments d'allaus. A escala internacional, el sistema regObs, una eina mòbil i oberta per al registre en temps real de dades sobre perills naturals, representa un recurs valuós per a l'avaluació del perill d'allaus i la col·laboració. La seva estructura permet la recopilació de dades al camp i la presa de decisions basades en informació actualitzada, demostrant ser una eina eficaç per a la gestió de riscos. Utilitza una aplicació mòbil i un lloc web on els usuaris, com guies de muntanya, autoritats de carreteres i altres professionals, poden pujar observacions des del camp, que estan disponibles immediatament per al seu ús en l'avaluació i el pronòstic de riscos. Desenvolupat per la Direcció Noruega de Recursos Hídrics i Energia (NVE), el sistema millora la presa de decisions en situacions de perill i és accessible per al públic en general i per a organitzacions professionals. A més, regObs fomenta la col·laboració internacional en proporcionar accés a les dades en temps real a través d'una API (Engeset et al., 2018).

El programari de modelització SNOWPACK, que simula el desenvolupament del mantell de neu a partir de dades meteorològiques, ha estat en procés de calibratge per adaptar-se a les característiques específiques d'Andorra. Aquest model té un gran potencial per a la predicció i la gestió d'allaus, en descriure la microestructura de la neu i els processos físics que afecten el mantell nevat. SNOWPACK és un model de codi obert que té un paper significatiu en la simulació i predicció de les dinàmiques del mantell nival, un aspecte crucial per a la modelització hidrològica i la gestió dels recursos hídrics. Aquest model s'ha utilitzat en diversos estudis per entendre els processos físics que regeixen l'acumulació de neu, el desglaç i les respostes hidrològiques en diferents regions climàtiques.

Un dels aspectes clau de SNOWPACK és la seva calibració i validació amb dades empíriques. Per exemple, Gouttevin et al. van calibrar SNOWPACK utilitzant dades de la regió d'Alptal, fet que ha estat essencial per comprendre les dinàmiques de la neu en boscos boreals i de muntanya (Todt et al., 2018). Aquesta calibració permet simulacions més precises del comportament del mantell nival sota condicions ambientals variables, com demostren Dai et al., que van utilitzar la radiometria de microones per analitzar les característiques del mantell nival, destacant la importància de la mida dels grans en la dispersió volumètrica de la neu (Dai et al., 2022). Aquestes validacions empíriques són crucials per millorar les capacitats predictives del model.

A més, SNOWPACK s'ha integrat en marcs més amplis amb l'objectiu de millorar les estratègies de gestió de l'aigua. Per exemple, el marc SnowCloud aprofita el computació al núvol per oferir mapatge en temps real de la neu i modelització hidrològica, demostrant el potencial de SNOWPACK en entorns operatius (Sproles et al., 2018). Aquesta integració és especialment rellevant en regions on l'escassetat de dades suposa un repte per a una gestió eficaç dels recursos hídrics, com han destacat Polo et al. en el seu treball sobre el Sistema Global de Monitoratge SNOWMED, que pretén proporcionar informació sobre la neu de manera oportuna al públic (Polo et al., 2022).

La versatilitat del model es posa de manifest amb la seva aplicació en diversos estudis centrats en la distribució de la profunditat de la neu i la seva evolució. Investigacions de Revuelto et al. indiquen que incorporar mesures de profunditat de la neu en marcs de modelització millora significativament la simulació de l'evolució del mantell nival, cosa que reforça la comprensió dels processos hidrològics (Revuelto et al., 2020). A més, estudis sobre la percolació d'aigua líquida dins del mantell nival, com els de Pflug et al., subratllen l'adaptabilitat del model a diferents condicions climàtiques,

demostrant la seva rellevància per predir el cabal i l'equivalent en aigua de neu (Pflug et al., 2019).

Finalment, els avenços continus en tecnologies de teledetecció i tècniques d'assimilació de dades han augmentat les capacitats de SNOWPACK. Per exemple, s'ha explorat l'ús d'observacions LIDAR per inferir la distribució de la profunditat de la neu, complementant les prediccions del model i millorant la resolució espacial (Pflug & Lundquist, 2020). Aquesta integració de fonts de dades diverses no només millora la precisió de les avaluacions del mantell nival, sinó que també facilita una millor presa de decisions en la gestió dels recursos hídrics, com demostra l'eina Fish Water Management Tool, desenvolupada per a la gestió en temps real del flux d'aigua (Marmorek et al., 2019).

A més, en aquesta fase d'experimentació i de proposta de millores, s'han obtingut els resultats d'enquestes realitzades a experts en allaus, que van proporcionar una perspectiva valuosa sobre els canvis en els patrons d'allaus i l'impacte del canvi climàtic. Aquestes enquestes van revelar un alt consens entre els experts respecte als canvis ocorreguts els darrers anys i les implicacions del canvi climàtic per a l'activitat d'allaus.

En aquest capítol, encara que es complementarà via annexos, es presenta una estratègia integral per gestionar emergències causades per allaus, enfocant-se a la proposta d'uns procediments operatius detallats. Aquests accidents requereixen una resposta organitzada i eficient. La proposta inclou la planificació i la coordinació necessàries per enfrontar incidents derivats d'allaus, integrant observació, rescat i auxili. La mobilització de recursos humans i materials ha d'estar clarament definida i coordinada per assegurar una intervenció eficaç amb el mínim esforç. Inclou una metodologia per classificar i prioritzar recursos i serveis i un catàleg actualitzat que avalua la capacitat de resposta en diferents aspectes. Cal una coordinació efectiva entre tots els actors involucrats. L'estructura tàctica del pla proporciona directrius per a la gestió de recursos segons el tipus d'incident i la fase d'emergència, maximitza l'eficàcia i minimitza l'impacte de les allaus.

Per a una anàlisi més detallada i exhaustiva sobre l'estat de l'art relacionat amb aquest capítol, es recomana consultar el primer capítol d'aquesta investigació doctoral, on es presenten de manera més extensa les fonaments teòrics, les tendències actuals i les línies d'investigació més rellevants en aquest àmbit. Aquest capítol ofereix una visió general de les aportacions clau i els estudis previs que han influït en el desenvolupament

d'aquest treball, proporcionant el context necessari per entendre els elements que s'exposen en els capítols posteriors.

4.2 DAFO. Valoració de l'estat actual del coneixement i la gestió del risc

Els impactes de les allaus a Andorra, incloses les morts, es concentren en activitats recreatives i esports de muntanya, així com en àrees de muntanya i esquí, carreteres i infraestructures. Per a la gestió del perill d'allaus, s'hi inclouen estructures de defensa, zonificació, predicció i control. S'identifiquen problemes amb el desenvolupament de noves tecnologies i serveis especialitzats en la gestió i la mitigació del perill.

En aquest apartat, s'analitzen les fortaleeses i les oportunitats juntament amb les debilitats i amenaces del coneixement científic i tècnic, així com la gestió del risc i la mitigació d'accidents per allaus. Andorra, malgrat la seva petita extensió, posseeix zones muntanyoses vulnerables a aquest risc natural, però la cultura de la neu i les allaus continua sent limitada o inexistent a moltes àrees. Fins ara, s'han fet importants canvis en els darrers anys en la gestió del perill per allaus, però encara són possibles moltes millores, justificades per l'augment d'activitats hivernals a la muntanya, així com per l'increment del nombre de practicants. S'identifiquen avenços en la solució d'aquests problemes, amb èmfasi a les àrees habitades, àrees d'estacions d'esquí i annexes, i en entorns naturals on les activitats de muntanya a l'hivern han crescut exponencialment a la darrera dècada. En revisar el passat i la situació actual, cal tenir en compte diversos objectius i complir-los en el futur.

L'anàlisi DAFO (o matriu DAFO) és una tècnica de planificació estratègica que s'utilitza per ajudar una persona o organització a identificar les debilitats, amenaces, fortaleeses i oportunitats relacionades amb la competència empresarial o la planificació de projectes. Es pretén especificar els objectius i identificar els factors interns i externs que són favorables i desfavorables per assolir aquests objectius.

Una anàlisi DAFO es pot fer servir per explorar noves solucions a problemes, identificar les barreres que limitaran els objectius per decidir la direcció més efectiva i revelar les possibilitats i limitacions per canviar alguna cosa. Aquest apartat presenta una anàlisi DAFO adaptada a la gestió i perill d'allaus de neu a Andorra. Conèixer el perill d'allaus i persistir en l'estudi de les allaus i àrees més vulnerables a aquest risc és

un treball que l'administració ha de continuar abordant. Les administracions no han d'esperar que passi un esdeveniment catastròfic o un accident per aplicar polítiques preventives. El creixement i la pressió urbana mai no han de convertir-se en un obstacle per aplicar el coneixement científic, elaborar cartografies detallades, regular i aplicar les normatives existents.

4.2.1.1 Factors de l'anàlisi DAFO

Les Debilitats i Fortaleses estan sovint relacionades amb factors interns, mentre que les Amenaces i Oportunitats comunament se centren en l'entorn.

Fortaleses: característiques que li donen un avantatge sobre altres.

Debilitats: característiques en desavantatge en relació amb els altres.

Oportunitats: elements a l'entorn que podria explotar a favor seu.

Amenaces: elements a l'entorn que podrien causar problemes.

4.2.1.2 Coneixement i fortaleses

4.2.1.2.1 Coneixement científicotècnic

El Servei de Meteorologia d'Andorra té la responsabilitat d'avaluar la perillositat d'allaus, així com de dur a terme tasques de prevenció relacionades amb aquest fenomen al país. Aquesta tasca es complementa amb el Servei d'Assistència Tècnica Externa del COEX-Govern d'Andorra, que també s'encarrega de la gestió del risc d'allaus, però amb un enfocament específic en les infraestructures viàries.

D'altra banda, Andorra Recerca i Innovació té la funció de documentar i inventariar sistemàticament els esdeveniments d'allaus, recopilant informació valuosa per a l'estudi i la prevenció. Diversos organismes i institucions del Govern d'Andorra, com els Departaments d'Ordenació Territorial i Protecció Civil i Gestió d'Emergències, també participen activament en la realització d'estudis tècnics i projectes relacionats amb la gestió de les allaus.

El 1981, es van crear les primeres Cartes de Localització Probable d'Allaus (CLPA), amb la redacció de mapes per identificar les zones amb major risc d'allaus, inicialment a regions com el Serrat, el Pas de la Casa i la vall del Madriu. Durant els següents 10 a

15 anys, aquestes cartes es van completar per cobrir tot el país. A més, els respectius Plans d'Ordenació i Urbanisme Parroquial (POUP) inclouen la classificació de terrenys no urbanitzables en zones de perill alt d'allaus, per garantir una planificació segura.

A nivell legislatiu, a Andorra hi ha una Normativa Reglamentària específica per a la gestió del risc d'allaus, que inclou els Plans de Prevenció de Riscos d'Allaus Previsibles (PPR d'allaus). Aquests documents, juntament amb les memòries corresponents, constitueixen una eina clau per a la prevenció. El Decret del 7 de juny de 1989 va establir el règim jurídic per a l'ocupació, ús i construcció en terrenys afectats per allaus, oferint una regulació clara sobre com manejar aquestes àrees de risc.

La Base de Dades d'Allaus d'Andorra (BDAA), gestionada per Andorra Recerca i Innovació, és de caràcter privat i no està disponible per al públic general, tot i que el govern d'Andorra introdueix les allaus més rellevants en la Base de Dades del Risc Geològic (BDRG). A més, la freqüència d'emissió dels Butlletins de Perill d'Allaus està ajustada a les dimensions del país, proporcionant informació oportuna i detallada sobre el risc d'allaus.

Finalment, a Andorra hi ha un bon nivell de coneixement científic i tècnic en els serveis de predicció i altres serveis vinculats als riscos per allaus, gràcies a la col·laboració entre diversos organismes i institucions governamentals.

4.2.1.2.2 Gestió del risc i mitigació

El 1998 es va crear el Cadastre d'allaus d'Andorra, unificant en un sol mapa les zones de localització probable d'allaus per tot el país. Aquest mapa va permetre millorar la coherència i l'actualització dels diferents CLPA (Cartes de Localització Probable d'Allaus) existents fins aleshores. A Andorra, hi ha un total de 111 Mapes de Localització d'Allaus, que cobreixen tot el territori nacional, oferint una visió completa de les àrees de risc.

Entre els anys 2000 i 2012, es van fer diverses modificacions a la Llei General d'Ordenació del Territori i Urbanisme amb l'objectiu de protegir les persones i els béns davant possibles situacions de perill. L'article 49 de la llei defineix les "zones exposades a riscos naturals" com aquelles que han estat identificades mitjançant estudis geològics, geotècnics i la cartografia d'allaus i altres riscos naturals. Aquesta classificació també inclou la distinció de zones segons el seu nivell de perillositat, amb l'objectiu de determinar quins terrenys són urbanitzables o no urbanitzables.

El 2012, es va publicar el Decret del 26 de setembre, juntament amb l'estudi de zonificació dels terrenys segons la perillositat d'allaus, sota el títol de "Plans de prevenció de riscos d'allaus previsibles". La zonificació va classificar les àrees en quatre categories (Figura 4.1).

- Sense restriccions: Terrenys sense perill.
- Amb possibles mesures de protecció: Terrenys amb perill baix.
- Amb mesures de protecció: Terrenys amb perill mitjà.
- Amb restriccions: Terrenys amb perill alt.

La cartografia de zonificació inclou 49 mapes que cobreixen gairebé tot el territori nacional, i més concretament, les zones urbanitzables previstes en els Plans d'Ordenació i Urbanisme Parroquial (POUP).

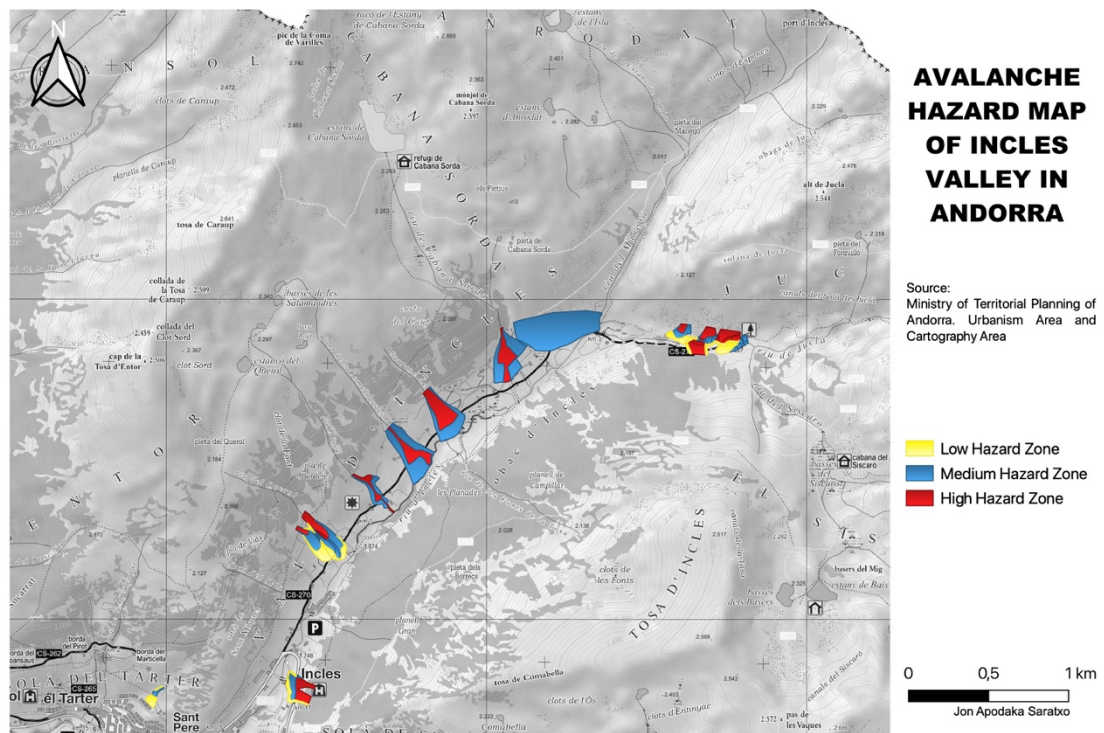


Figura 4.1: Mapa de Perill d'allaus a la Vall d'Incles. Crèdits: Elaboració pròpia.

A més de la gestió preventiva, hi ha també prediccions locals en algunes vies de comunicació clau, i es realitzen previsions especials en esdeveniments com el Freeride World Tour i la ISMF World Cup. També hi ha un conjunt de mesures permanents i temporals de defensa contra els allaus. A nivell legislatiu, la Llei Forestal permet la qualificació de boscos de protecció amb l'objectiu de reduir el risc d'allaus.

Andorra també manté convenis de col·laboració amb entitats internacionals, assegurant que el país estigui alineat amb les millors pràctiques en gestió de riscos d'allaus. El risc d'allaus es contempla en el sistema educatiu, fomentant la conscienciació i el coneixement sobre el tema des de joves. Un exemple d'aquesta consciència és l'EDNA (Espai de Neu i Allaus), una entitat que promou el coneixement del risc d'allaus i que s'ha consolidat com a referent en el país. L'espai de neu i allaus és un entorn de divulgació format per l'eix muntanya d'Andorra Recerca + Innovació (antic CENMA), el GRM dels Bombers d'Andorra i l'EFPEM (Escola de Formació de Professions Esportives i de MuntanyaPOUP

Aquest conjunt d'iniciatives i col·laboracions mostren com Andorra s'ha anat adaptant al llarg dels anys per gestionar i mitigar el risc d'allaus, amb un enfocament basat en la previsió, la regulació, la col·laboració internacional i l'educació.

4.2.1.3 Debilitats i amenaces

4.2.1.3.1 Coneixement científicotècnic

Actualment, no existeixen guies tècniques oficials que assegurin i estandarditzin la qualitat dels treballs d'observació nivometeorològica publicats, ni tampoc es disposa de cap referència concreta en aquest àmbit. Aquest fet implica una manca d'homogeneïtzació en els procediments de recollida i anàlisi de dades sobre les allaus a Andorra.

A més, la Base de Dades d'Allaus d'Andorra (BDAA), gestionada per Andorra Recerca i Innovació (AR+I), és de caràcter privat i no és accessible al públic general, cosa que limita l'accés a informació crítica per a la recerca i la gestió pública del risc. També es constata la manca d'un Registre Estatal d'Allaus oficial, públic i homogeni, que inclogui dades sobre danys materials, pèrdues econòmiques i impactes socioculturals. Aquest buit fa difícil la quantificació real de les conseqüències de les allaus al país.

El Cadastre d'Allaus no ha estat actualitzat des de fa anys, cosa que limita l'eficàcia d'aquesta eina per a la prevenció i gestió del risc. A més, hi ha una manca d'estudis en profunditat sobre la influència del canvi climàtic en la severitat i freqüència de les allaus, un tema cada vegada més rellevant en el context actual.

Finalment, la publicació d'estudis sobre allaus accidentals que hagin afectat edificacions i infraestructures, especialment aquells on s'han registrat danys econòmics significatius o víctimes mortals, és limitada. Aquesta manca de documentació afecta la capacitat de millorar la prevenció i resposta davant futurs esdeveniments similars.

4.2.1.3.2 Gestió del risc i mitigació

No existeix una guia bàsica de planificació de la Protecció Civil davant allaus que sigui pública, fet que deixa una mancança en la disponibilitat d'informació clara i accessible per a la planificació i gestió del risc per part de la ciutadania i altres actors implicats. A més, s'han detectat casos en què es sol·liciten i, en alguns casos, es concedeixen llicències per construir o ampliar edificis i infraestructures en zones on prèviament s'han registrat allaus significatives, la qual cosa posa en risc tant les construccions com les persones que les habiten, encara que, en aquest aspecte hi ha que dir que s'exigeix mesures per minimitzar el risc.

D'altra banda, hi ha una falta d'un pla d'actuació coordinat que permeti una resposta eficaç i eficient davant situacions d'emergència causades per allaus. Això inclou la necessitat de definir clarament les responsabilitats i accions de les diferents entitats i serveis implicats. El rescat pot estar molt coordinat i ben executat, però falta realitzar sistemàticament l'anàlisi tècnic per millorar el coneixement i estudiar a detall la problemàtica.

També es constata la manca de definició del risc residual, és a dir, aquell risc que persisteix després d'haver aplicat mesures de protecció o mitigació, o almenys no és fàcil trobar aquesta informació. La manca d'una definició clara d'aquest risc complica la planificació i la presa de decisions, especialment en zones amb antecedents d'allaus.

4.3 Metodologia

Durant la tesi doctoral s'han realitzat diverses proves experimentals de camp, com ara l'ús de drons per a la captura d'imatges aèries d'allaus, complementades amb l'obtenció d'imatges satel·litàries per ampliar la cobertura i precisió al monitoratge. A més, s'ha experimentat amb l'ús de plataformes de registre de dades en temps real, com amb la plataforma creada per AR+I o regObs, per millorar la recollida i l'anàlisi d'informació al camp. Paral·lelament, s'ha fet un seguiment de la modelització del mantell de neu en diversos períodes de les temporades hivernals.

Tot seguit, es presenta informació sobre algunes de les principals experimentacions realitzades.

4.4 Noves estratègies, protocols, eines i tecnologies

4.4.1 *Experimentació amb UAS, teledetecció i modelització Snowpack*

4.4.1.1 *UAS: Proposta NHIM i Rapid Mapping*

4.4.1.1.1 Introducció

L'augment de la comercialització de vehicles aeris no tripulats (UAV) ha possibilitat l'obtenció d'imatges aèries a un cost reduït per a la documentació de localitzacions mitjançant fotogrametria. A Andorra, el vol d'UAV està subjecte a regulacions per part de Transports del Govern d'Andorra, que exigeix un certificat d'operacions especial per a ús comercial. En aquesta revisió s'han examinat diverses tècniques d'obtenció d'imatges i els programes utilitzats per registrar les dades, establint un procediment de treball basat en la literatura revisada. També es presenten exemples de casos pràctics sobre l'ús de la fotogrametria, especialment en la captura i el processament de dades, i es mostra com aquesta tecnologia pot contribuir al registre sistemàtic d'activitat d'allaus.

Durant la recerca, hem experimentat amb UAV en fase experimental, explorant diverses possibilitats que poden oferir aquestes tecnologies en l'àmbit de la nivologia i les allaus. Hem abordat la creació d'ortofotografies (A), el càlcul de gruixos de neu i canvis d'altura (B), modelatge 3D en allaus ocorregudes al desembre de 2019 (C), i l'obtenció d'informació sobre mesures de protecció (D), així com el càlcul de superfícies i volums, amb el cas pràctic de l'església de Sant Vicenç d'Enclar (Figura 4.2).

La informació detallada sobre la distribució espacial i temporal dels gruixos de neu és fonamental per a aplicacions en àrees com la hidrologia, climatologia, ecologia i l'estudi d'allaus. Actualment, aquesta distribució es calcula combinant dades recollides en estacions meteorològiques i per observadors al camp, amb algorismes d'interpolació espacial. La producció de mapes permet avaluar la viabilitat d'aplicar aquesta tecnologia en operacions com l'inventari o informes d'allaus. No obstant això, les limitacions actuals inclouen l'altura de vol (segons la legislació vigent) i la qualitat d'imatge. Les proves realitzades amb un dron bàsic estan mostrant que és possible fer aixecaments fotogramètrics de manera ràpida i fiable.

Aquesta nova tecnologia de mesurament ofereix un mètode eficient, flexible, repetible i econòmic per al control de la neu en grans extensions, sempre que les normatives ho permetin. Tanmateix, un dels principals reptes és la gestió d'imatges i dades, i la gran varietat de programaris disponibles, la majoria dels quals tenen un cost elevat de llicència.

En el context actual de canvi climàtic, hi ha la possibilitat que esdeveniments com desprendiments, lliscaments, inundacions, incendis i erosió costanera siguin més probables i que es produeixin amb períodes de tornada més curts. Per tot això, els inventaris i les bases de dades de riscos naturals es presenten com a eines essencials per a l'avaluació del risc. Realitzar inventaris d'esdeveniments de forma sistemàtica, coordinada i uniforme per a una mateixa regió, generant una base de dades integrada i geolocalitzada, afavoreix el coneixement dels llocs més vulnerables, l'estudi de la distribució espai-temporal dels fenòmens, les litologies i les àrees més afectades i la caracterització dels incidents/accidents que puguin ocórrer.

Gràcies a l'evolució tecnològica en l'última dècada de la indústria dels drons i de les tècniques de fotogrametria, s'han obtingut avenços molt favorables i la seva aplicabilitat a la resposta ràpida d'emergències s'ha convertit en un element fonamental, essent nombrosos els articles científics publicats al respecte (Ajmar et al., 2015; Antoine et al., 2020; Colomina & Molina, 2014; Gallo et al., 2021; Kucharczyk & Hugenholtz, 2021; Mandirola et al., 2021).

preparació, reducció de riscos i recuperació (Copernicus , 2021a). Els productes CEMS es creen utilitzant dades satel·litàries, in situ (terrestres) i de models. Aquests mostren informació sobre un esdeveniment de desastre en una escala, línia de temps i perspectiva que només geoespacial informació pot proporcionar. Els productes es poden compartir ràpidament entre totes les agències involucrades en un incident per permetre accions de resposta consistents (Copernicus , 2021b).

Taula 4.1: Comparativa entre l'ús de drons i satèl·lits per a la catalogació de fenòmens de riscos naturals. Crèdits: Elaboració pròpia.

	UAS/ drone	Satèl·lit
Tamany de l'àrea d'estudi	Específic	Àmpli
Resolució (cm/píxel)	Submètrica. GSD <6cm/ px	Mètrica. (Sentinel 2: 10 m/ px ; Plèiades : 0.5m/ px)
Preu (equip)	700-22.550 €	Imatges gratuïtes i de pagament
Anàlisi contínua de dades	No	Sí
Restriccions de l'espai aeri	Sí	No
Possibilitats d'error humà	Sí	No
Canals/Bandes	Depèn del sensor	Sí. Nombroses opcions
Valor Z, DEM-DSM-DTM o creació de Models de Núvols de Punts	Alta resolució amb RTK - punts de control de terra (GCP)	Baixa resolució

La informació presentada a la Taula 4.1 sobre les diferències entre drons i satèl·lits és fonamental per comprendre les eines disponibles per a l'inventariat de fenòmens de riscos naturals i com aquestes poden ser integrades en el model d'informació digital proposat per la metodologia Natural Hazards Information Modeling (NHIM). Aquesta metodologia, inspirada en el Building Information Modelling (BIM), requereix una combinació de dades d'alta qualitat i resolució per crear un model col·laboratiu que permeti gestionar i monitoritzar els riscos de manera eficient.

A escala regional i local, amb l'objectiu de centralitzar tota la informació de l'esdeveniment en un model d'informació digital creat mitjançant la informació obtinguda a partir de diferents agents multidisciplinaris, es presenta la metodologia Natural Hazards Information Modeling (NHIM), una proposta de treball col·laboratiu per a l'inventariat i la gestió d'esdeveniments de riscos naturals. Es tracta d'un procés adaptat del modelatge d'informació de construcció, Building Information Modelling (BIM), també anomenat modelatge d'informació per a l'edificació. Suposa l'evolució dels inventaris de

fenòmens de riscos tradicionals basats en el pla, ja que pot incorporar informació cartogràfica (2D), geomètrica (3D), temporal (4D), de danys i costos directes i indirectes (5D), de meteorologia (6D) i gestió administrativa i monitorització (7D) (Figura 4.3). Aquest és un conjunt de processos que utilitzen models digitals compartits entre diferents actors de la cadena de valor. L'objectiu és aglutinar la informació més gran possible sobre l'esdeveniment reduint el temps i els recursos en la gestió de futurs fenòmens de riscos naturals. La majoria dels successos i processos perillosos es poden seguir, traçar i predir, basant-se en la freqüència de successos passats, pautes de la seva incidència i els successos precursors relacionats. Es fonamenta en la col·laboració interdisciplinària i intercanvi d'informació amb eines SIG, WebMapping, etc.

La proposta de Metodologia NHIM concerneix tant la geometria del fenomen ocorregut com la relació amb l'espai, la informació geogràfica, els danys i la gestió (per exemple, afecció en infraestructures o edificis, danys ocasionats, costos, mitjans humans mobilitzats, etc.). NHIM pot ser utilitzat per il·lustrar l'històric complet de l'esdeveniment inventariat tenint en compte els factors condicionants, la legislació i l'ordenació territorial, els programes i els plans de mitigació, les mesures de defensa, etc. Mitjançant aquest procés o metodologia es genera un històric complet per a una gestió i anàlisi geoespacial-estadística correcta de l'esdeveniment.

4.4.1.1.2 Material i metodologia

Partint de la idea d'inventariar en alta resolució esdeveniments de risc natural (despreniment, lliscament, allau, incendi, inundació, etc.), al llarg dels darrers mesos en el marc d'una tesi doctoral que s'està desenvolupant al Principat de Andorra s'han generat diferents mapes ràpids i models 3D de diversos esdeveniments de riscos naturals que han afectat persones, infraestructures o mesures de protecció.

Aquests models i mapes ràpids d'escala submètrica es presenten com la base central de la proposta de metodologia NHIM que concerneix tant la geometria del fenomen ocorregut com la relació amb l'espai, la informació geogràfica, els danys i la gestió. (per exemple, afecció en infraestructures o edificis, danys ocasionats, costos, mitjans humans mobilitzats, etc.). En definitiva, es vincula tota la informació de l'esdeveniment de riscos natural a aquest model 3D i ortomosaic ràpid d'alta resolució.

Diferents fases del model d'informació:

1. Planificació

En ser activats per l'esdeveniment d'un esdeveniment de risc natural, en un primer moment cal estudiar l'entorn i la informació preliminar sobre l'àrea d'estudi. Es realitza la planificació de vol tenint en compte l'equip (dron multirotor o d'ala fixa), entorn, dades d'interès a obtenir, condicions meteorològiques, etc. Hi ha diferents programaris que permeten realitzar aquest treball. La interconnectivitat amb el dron /UAS dependrà de l'SDK i el desbloqueig per poder utilitzar diferents programaris aliens a la marca comercial de l'aeronau. La missió consisteix a realitzar el desplaçament al lloc dels fets i realitzar una operació de vol on obtenir un mapa ràpid i un model 3D del lloc amb què es registrarà la major informació possible sobre el fenomen. Cada país compta amb la seva respectiva legislació sobre usos de drons a l'espai aeri. Tenint en compte tot el que s'ha indicat anteriorment, l'operador habilitat planificarà els vols per a la presa de dades, i haurà de sol·licitar els permisos que es requereixin a l'autoritat aèria (només si l'autoritat pública responsable és requerit, volar drons en situacions de greu risc, catàstrofe o calamitat pública està permès).

2. Disseny conceptual

Es fan les missions de vol i s'obtenen les dades per generar el mapa ràpid i el model 3D, juntament amb productes complementaris en cas de ser necessaris: DEM, DSM, DTM, etc. Depenent dels sensors que es disposin les dades que cal obtenir poden ser molt diversos.

3. Disseny de detalls

Es processen les imatges obtingudes a les diferents missions de vol generant els productes de Mapa Ràpid i Model 3D. Hi ha una àmplia oferta de programari per al processament d'imatges, generalment cal adquirir llicències per projecte, mensuals, anuals o de per vida (Pix4D, DronDeploy, ESRI Dron2Map, Agisoft, etc.) però també hi ha programari open source (Open Dron Map) amb què obtenir bons resultats.

4. Anàlisi

Es fa una anàlisi de la informació obtinguda. L'anàlisi pot ser qualitativa realitzada de forma descriptiva o quantitativa, comparant imatges i valors utilitzant eines geoestadístiques a SIG o fotointerpretació. La informació obtinguda en aquest apartat pot afavorir la presa de decisions a l'operativa d'intervenció.

5. Documentació

Un cop generat el Model 3D i el Mapa Ràpid, es vincula tota la documentació relacionada: informe de l'accident/incident; peritatge; dades meteorològiques; informes relacionats; cartografia recent; ortofotografies/fotografies aèries històriques, etc.



Figura 4.3: Disseny conceptual de les diferents fases del Model d'informació de Riscos Naturals (NHIM); basat en BIM, metodologia de treball col·laborativa per a la creació i la gestió d'un projecte de construcció. El seu objectiu és centralitzar tota la informació del projecte en un model d'informació digital creat per tots els seus agents. Crèdits: Adaptat de la Càmera Argentina de la Construcció.

6. Fabricació/Solucions

En aquesta fase es genera tota la informació relacionada amb el risc i la recuperació: rescat, estabilització, pla de tornada a la normalitat, proposta de retirada i neteja, disseny i dimensionament de mesures de defensa, etc.

7. Reconstrucció 4D/5D

Informació relacionada amb el temps 4D: Seqüenciació de la gestió de l'esdeveniment accidental del risc natural. Diagrames de Gantt de l'operativa i les línies de temps. Anàlisi de costos 5D: gestió de costos, estimació de costos de reconstrucció, pressupostos, etc.

8. Logística de recuperació

Avaluació de la susceptibilitat i de la perillositat geològica preliminar per a la planificació territorial; Modelització del fenomen geològic; Zonificació de la perillositat geològica per a la planificació urbanística; Anàlisi i quantificació del risc; Seguiment

temporal de la perillositat/risc, monitorització, auscultació; Presa de dades sobre el terreny; Estudi d'identificació de riscos geològics (EIRG); Mapa per a la Prevenció dels Riscos Geològics (MPRG); Estudi de Zonificació del Terreny Segons Perillositat Geològica (EZTPS),

9. Manteniment i operació

Revisió de la perillositat i del risc; control i manteniment de les mesures de protecció, requalificació urbanística, etc.

10. Renovació / actualització

Sistemàticament, a mesura que passa el temps, es va vinculant al projecte informació actualitzada, informació de seguiment, noves fotografies aèries i la resta de documentació d'interès.

A l'hora de planificar i fer el vol, una de les característiques més importants a tenir en compte serà la distància de mostra del terra, GSD. És una mètrica que és útil per a fotogrametria i mesuraments en projectes de cartografia i topografia amb drons. GSD es defineix com la distància entre els centres de dos píxels adjacents mesurats a terra. Aquesta mètrica està relacionada amb la distància focal de la càmera, la resolució del sensor de la càmera i la distància de la càmera al subjecte. En general, es descriu en centímetres per píxel (cm/ px). Un GSD de 10 cm/ px significa que un píxel a la imatge representa un quadrat de 10 x 10 centímetres (100 cm²) a terra. Un quadrat més petit es tradueix en més detalls dins la imatge. GSD escalarà linealment amb l'alçada del dron si porta una càmera amb una lent de distància focal fixa. El GSD escalarà linealment amb la distància focal si la càmera té una lent variable. Si un dron vola més a prop del terra, el GSD millorarà i els detalls més petits seran més clars a la imatge (Taula 4.2).

Taula 4.2: Comparativa de GSD en diferents drons/UAS. Es tracta de la mida del món real capturat per un píxel en una imatge digital, basat en l'altitud de vol i els paràmetres de la càmera, que discutim tot seguit. Quan entén GSD com una relació de cm per píxel, és fàcil calcular la mida del terra i les característiques capturades en una imatge de dron La columna DRON-UAV-UAS-RPAS indica els diferents models de dron analitzats. Crèdits: Elaboració pròpia.

	GSD cm/ píxel		
	ALTURA DE VUELO		
DRONE-UAV-UAS-RPAS	120m	50m	20m
DJI Mavic Air 2	1,85	0,77	0,31
DJI Matrice 300 RTK (Zenmuse P1 24mm)	2,20	0,92	0,37
DJI Mavic 2 PRO	3,05	1,27	0,51

DJI Phantom 4Pro RTK	3,29	1,37	0,55
DJI Inspire 2 (X4S)	3,54	1,48	0,59
DJI Mavic Air	5,69	2,37	0,95
Parrot Anafi AI	1,85	0,77	0,31
Parrot Anafi/ Anafi USA	4,01	1,67	0,67
Ebee (Sensefly S.O.D.A)	2,76	1,15	0,46
Ebee (Sony WX100)	3,41	1,42	0,57
Ebee (Canon S110)	4,38	1,83	0,73

Un projecte on les mesures exactes no són importants no requerirà punts de control. Això no obstant, si cal conèixer distàncies, àrees o volums, o bé que la localització de cada detall hagi de ser exacta, l'ús de punts de control serà necessari. Els punts de control de terra (o GCP) són punts a terra amb coordenades conegudes. En un aixecament de mapeig aeri, els GCP són punts que el topògraf pot identificar amb precisió: amb un grapat de coordenades conegudes, és possible mapejar amb precisió grans àrees. Cal tenir un GPS d'alta precisió (RTK, PPK). Els drons que tenen RTK/PPK poden donar bons resultats de precisió si les connexions d'enllaç de dades són estables i sense obstacles, però se segueix aconseguint la millor precisió quan el processat es fa tenint en compte almenys 5 GCP ben distribuïts. En cas d'utilitzar un dron amb RTK/PPK caldrà verificar si es té accés a l'estació base local oa la xarxa VRS, en cas contrari, caldrà mesurar les teves pròpies estacions base.

4.4.1.1.3 Resultats

A continuació es presenta una síntesi dels resultats obtinguts en relació amb la generació de Mapes Ràpids i Models 3D en el disseny de l' inventari d'alta resolució basat en NHIM, i una comparativa de resolucions en relació amb l'alçada d'obtenció de fotografies aèries (Figura 4.4, Figura 4.5, Figura 4.6).

Les imatges òptiques del satèl·lit del Sentinel 2 (10m/ px) poden ser molt valuoses a l'hora d'estudiar i inventariar fenòmens de gran extensió que no requereixen una alta resolució com ara grans lliscaments, àrees afectades per inundacions, incendis forestals, colades de lava com les de l'erupció a La Palma o l'estudi de la superfície innivada en un domini esquiable o àrea muntanyosa de cara a l'explotació turística o estimació del recurs hídric. Imatges satèl·lit de sensors radar o multiespectrals, també ofereixen infinitat de dades i poden ser de gran utilitat depenent del fenomen i l'escala de treball.

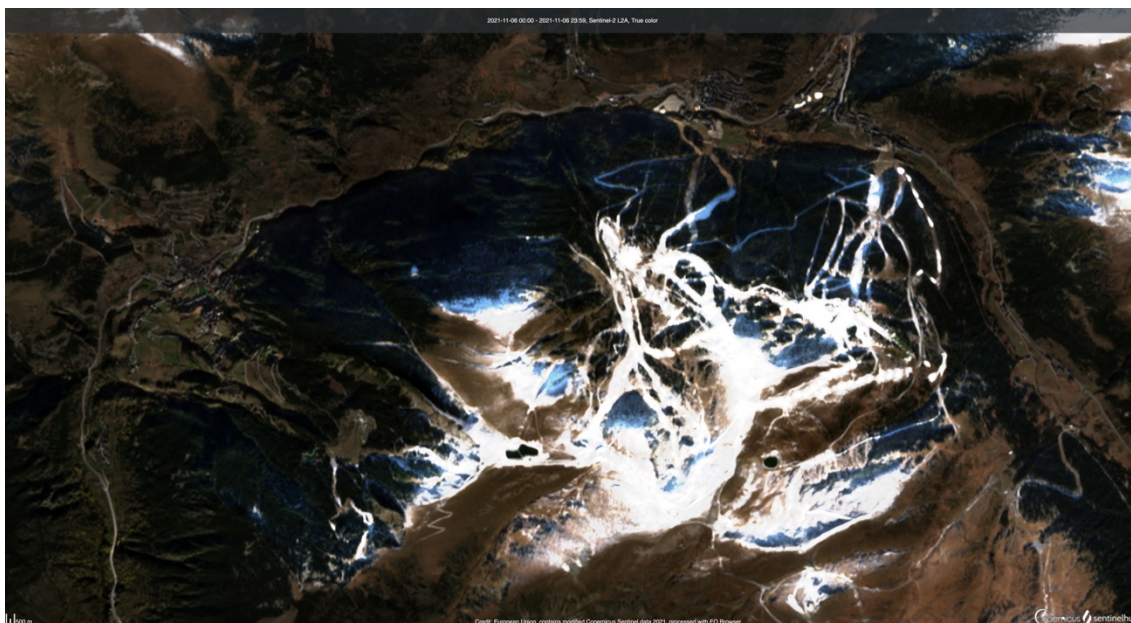


Figura 4.4: Imatge òptica obtinguda pel satèl·lit Sentinel-2 (10 m/píxel). Crèdits: EO Browser – Copernicus .

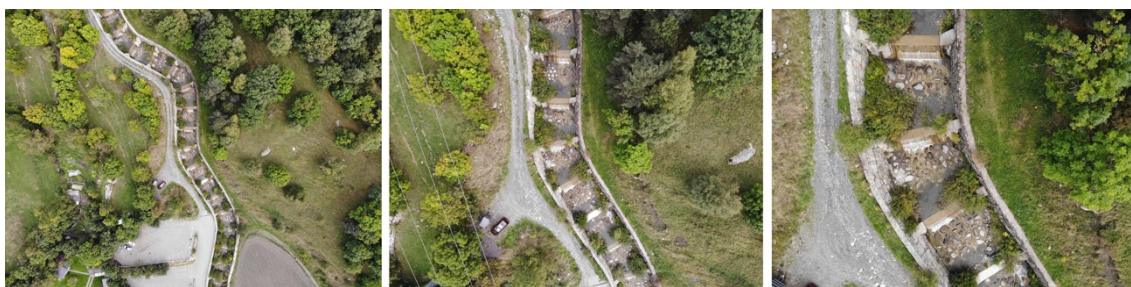


Figura 4.5: Imatges captades a 120, 50 i 20 metres realitzades amb un dron /UAS DJI Mavic Air de 430g de pes, amb un sensor 1/2,3" CMOS de 12 MP efectius i un angle focal equivalent a 24mm. Crèdits: Elaboració pròpia.



Figura 4.6: Comparativa de resolució d'imatges en una mateixa àrea: Ortofoto a color del Govern d'Andorra 2019 (10cm/ px); vol dron a 120m d'alçada (6cm/ px); 50m d'alçada (2cm/ px) i 20m d'alçada (1cm/ px). Crèdits: Elaboració pròpia.

Els productes principals que es poden generar a l'hora d'iniciar l'inventari d'alta resolució de riscos naturals són(Figura 4.7):

- Ortomosaics : Mapes georeferències i ortorrectificats
- Núvols de punts: Núvols de punts denses georeferències, filtrades i classificades
- Models d'elevació: models digitals d'elevació georeferenciats (MDE, MDS, MDT)
- Models 3D: Models 3D texturitzats en format OBJ.
- Mesuraments: Realitzar mesuraments de volums i àrees, i creació de perfils topogràfics amb facilitat.

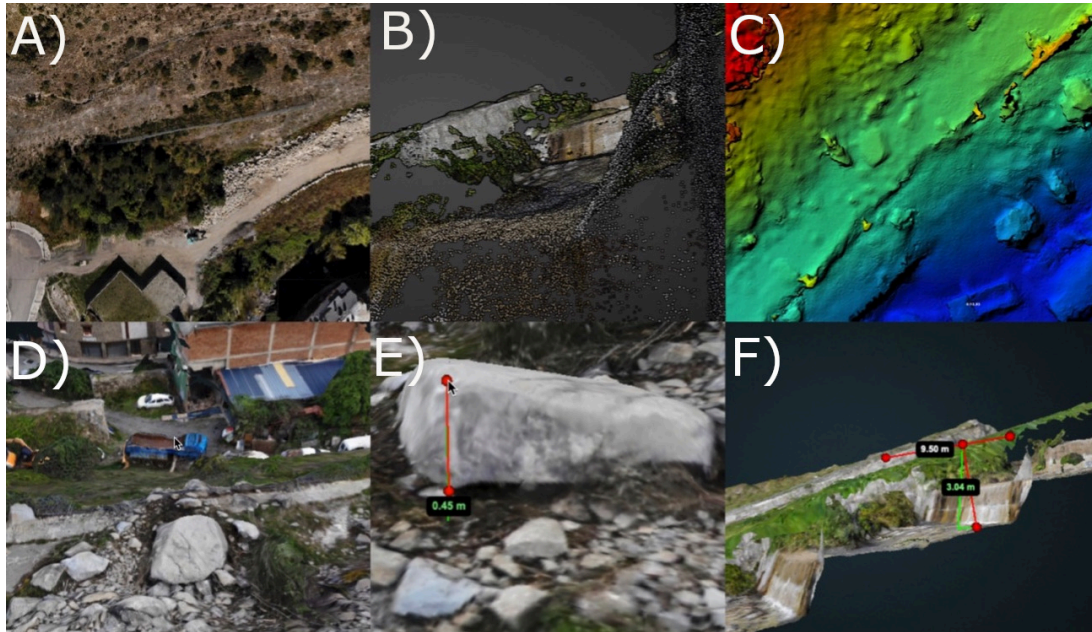


Figura 4.7: Alguns exemples dels productes generats a partir de vols amb dron i processat d'imatges. /UAS: A) Ortomosaics per a l'elaboració de Mapes Ràpids; B) model de núvols de punts; C) Model Digital de Superfície ;D) Model 3D; E) mesuraments i F) perfils topogràfics. Crèdits: Elaboració pròpia.

4.4.1.1.4 Discussió i conclusions

Són diverses les bases de dades sobre riscos naturals publicades en els darrers anys per diferents agents. Generalment aquests inventaris se solen realitzar a partir d'informació a premsa i hemeroteques mitjançant la revisió històrica per a informes a les Administracions Públiques com ara projectes de manteniment i gestió de carreteres, o a través d'investigacions de tipus Treball Final de Grau, Treball Final de Màster o Tesis Doctorals. La base de dades de desprendiments a l'espai Alpino (Interreg Alpine Space, 2019), l'Observatori Ciutadà de Desprendiments de Canàries (AGEO Interreg - Atlantic, 2021) o l'inventari de lliscaments de Gipuzkoa realitzat per (Bornaetxea et al., 2018) són clars exemples en què la participació ciutadana i la investigació són part fonamental en aquest tipus de treballs.

L'aportació de les noves tecnologies en la gestió dels riscos naturals és significativa. En el context actual d'emergència climàtica i les previsions a futur que augmentin els esdeveniments relacionats amb els riscos naturals, estem obligats a desenvolupar noves estratègies més eficaces en totes les fases de la sèrie, és a dir, en la prevenció, en la resposta i en la restauració. Millorar la detecció del risc en temps real, millorar l'eficiència i l'eficàcia durant les intervencions, així com la seguretat dels intervinents o facilitar el rescat de persones. L'ús de drons avui en dia permet obtenir imatges de més resolució respecte a les obtingudes mitjançant satèl·lit. L'ús de tècniques de fotogrametria mitjançant dron permet fer mapes ràpids i generar models 3D d'alta resolució i són complementaris a l'ús d'imatges satèl·lit. Alhora, tenint en compte la relació qualitat/preu, moltes vegades no són necessàries tècniques tan costoses com les relacionades amb els sensors LIDAR i mitjançant treballs fotogramètrics és possible obtenir interessants resultats.

Els Servei de Prevenció, Extinció d'Incendis i Salvament, en ser serveis que treballen 24 hores, els 365 dies de l'any i tenen les competències per realitzar la primera intervenció en cas que es produeixi un fenomen de risc natural, haurien de tenir entre els seus equips d'intervenció drons/UAS, operadors i formació tècnica per poder realitzar les missions de vol i obtenir dades, per poder posteriorment generar els mapes ràpids i models 3D a l'hora de realitzar el registre/inventari sistemàtic d'alta resolució dels esdeveniments.

Tenint en compte l'escala de treball i si cal una alta resolució, els productes derivats de les missions de vols poden ser de gran interès en l'operativa. És possible generar informació per a assessorament en les tasques de rescat o tornada a la normalitat, calibrar models matemàtics, dimensionar mesures de defensa, fer diferents cartografies com les de susceptibilitat o la zonificació reglamentària, entre d'altres.

Mitjançant aquest procés o metodologia és possible generar un historial complet per a una correcta gestió i anàlisi geoespacial-estadístic dels esdeveniments de riscos naturals, millorant la col·laboració i comunicació entre agents (Figura 4.8), visualitzant l'evolució del projecte, permetent l'intercanvi de informació, fent estimació de costos de reconstrucció i tornada a la normalitat basada en els models, millorant en la programació i seqüenciació. Alhora, la productivitat pot ser més gran en vincular tota la informació a un model 3D i Mapa Ràpid que faciliten la compressió de la situació.

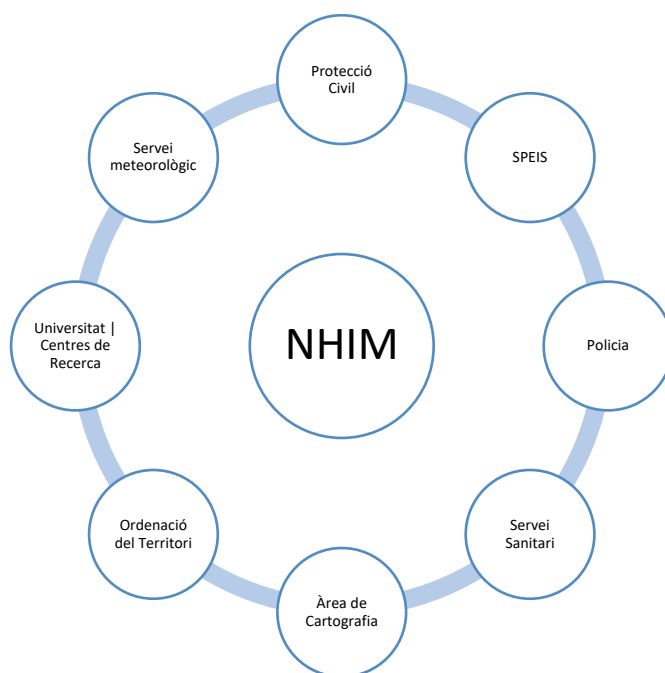


Figura 4.8: Diagrama d'agents multidisciplinaris que poden aportar informació al Model d'Informació sobre Riscos Naturals plantejat, millorant la comunicació i la col·laboració entre diferents agents. Crèdits: Elaboració pròpia.

En conclusió, es tracta d'un canvi de metodologia que té com a finalitat abastar una quantitat important d'informació mitjançant un mètode multidimensional. No es tracta de generar una simple geometria i és un treball multidisciplinari que abasta diferents agents. Permet una gestió i presa de decisions ràpida, estalvi en el temps, realitzar models més ben calibrats i la possibilitat d'optimitzar els processos i compartir fàcilment la informació per WebMapping o en plataformes web.

4.4.1.2 Teledetecció

Al llarg del doctorat, s'han fet diversos exercicis de detecció d'allaus utilitzant imatges satel·litàries d'accés obert, com les proporcionades pels satèl·lits Sentinel-1 i Sentinel-2. Tot i que aquests intents han permès explorar el potencial de la teledetecció per a la identificació d'allaus, els resultats obtinguts no han estat de gran rellevància. En particular, la baixa resolució espacial de Sentinel-2 i la detecció limitada d'allaus petites a Sentinel-1 han restringit significativament la precisió i l'aplicabilitat de les dades en els contextos estudiats.

Malgrat tot, durant el desenvolupament de la investigació, s'han dut a terme diverses proves esporàdiques i paral·leles per a explorar la utilitat i les aplicacions de les imatges

satèl·lit en l'àmbit de la neu. Aquestes proves han estat enfocades a valorar la capacitat de les imatges per oferir informació detallada sobre esdeveniments d'allaus i canvis en el paisatge. A la (Figura 4.9) **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), es mostren exemples clars dels resultats obtinguts durant aquestes proves.

Les imatges A i B, captades pel satèl·lit Sentinel 2 amb una resolució de 30 metres per píxel, corresponen a l'abril de 2018 i permeten identificar amb claredat l'allau basal que va tenir lloc al Parc Natural del Comapedrosa. Aquest allau va ser de tal magnitud que va sepultar completament el Refugi del Pla de l'Estany, i la seva extensió és visible al centre de les imatges.

D'altra banda, la imatge C, presa l'1 de gener de 2020, és una fotografia satèl·lit que mostra el perímetre fronterer d'Andorra, delimitat segons la Cartografia del Govern d'Andorra. Aquesta imatge proporciona una perspectiva útil per a la delimitació de fronteres i l'anàlisi territorial en relació amb els esdeveniments naturals.

Finalment, les imatges D i E presenten dues allaus de mida 3. La imatge D, capturada amb satèl·lit, manté la resolució de 30 metres per píxel, mentre que la imatge E, obtinguda amb un UAV a una alçada de 100 metres, ofereix una resolució més detallada de 3 metres per píxel. Aquestes imatges, preses a la Coma de Ransol (Andorra), permeten comparar l'observació aèria amb la detecció satèl·lit, oferint una valuosa informació per a la comprensió i documentació dels esdeveniments d'allaus.

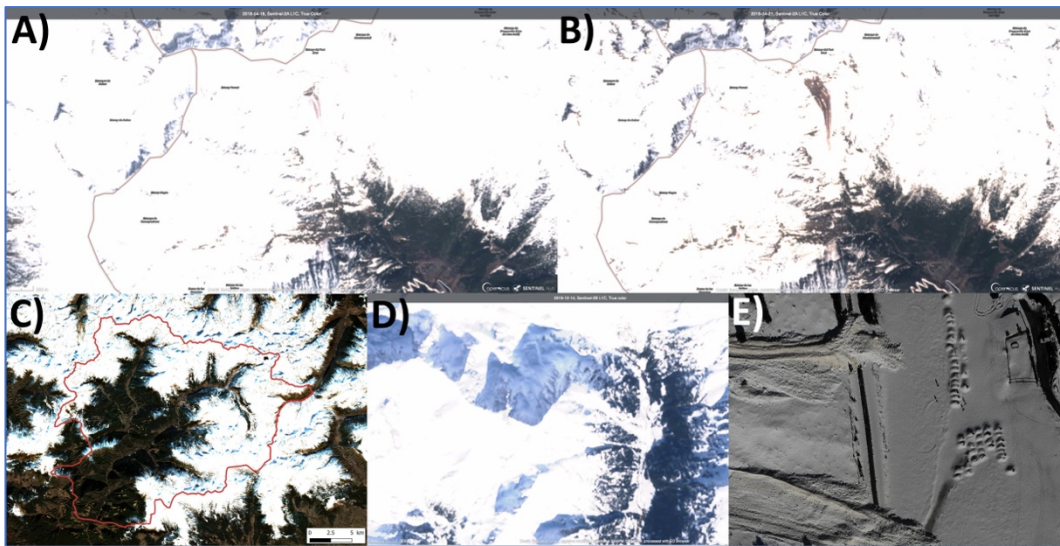


Figura 4.9: Les imatges A) i B) corresponen a la identificació de l'allau de lliscament basal del Pla de l'Estany amb imatges de Satèl·lit Sentinel 2, de l'abril al Parc Natural del Comapedrosa. La imatge C) correspon a una foto Satèl·lit de l'1 de gener de 2020 per observar la zona innivada a escala d'Andorra. Imatges D) i E) corresponen a l'observació de dues allaus de mida 3 mitjançant imatge satèl·lit i una resolució de 30m / píxel i fotografia aèria obtinguda amb UAV a 100m d'alçada i una resolució de 3 m / píxel a la Coma de Ransol (Andorra). Crèdits: Elaboració pròpia.

4.4.1.3 *Snowpack*

De la mateixa manera, els exercicis realitzats al llarg del doctorat amb la modelització del mantell nival mitjançant SNOWPACK, una eina de codi obert que simula el desenvolupament del mantell de neu a partir de dades meteorològiques, tampoc han donat resultats de gran interès. Tot i la capacitat de SNOWPACK per modelar detalladament l'estructura de la neu i les seves interaccions amb l'entorn, les limitacions en la disponibilitat de dades meteorològiques precises i la complexitat inherent dels models no han permès obtenir simulacions que millorin significativament la detecció i la predicció d'allaus. Tot i que SNOWPACK és una eina potent, emprada en estudis de climatologia, permafrost i gestió del risc d'allaus a diversos països, els resultats en el context del doctorat han estat limitats quant a la seva aplicabilitat pràctica a les àrees estudiades (Figura 4.10).

En la figura es presenta la representació modelitzada del mantell nival a l'àrea de Sorteny, diferenciant dues orientacions: nord (N) i sud (S). Es representen dos tipus de gràfics per a cadascuna de les orientacions: els gràfics temporals, que mostren l'evolució

diària del mantell nival, i els perfils verticals, que detallen l'estructura interna del mantell en moments específics.

Els gràfics temporals, situats a l'esquerra, il·lustren l'evolució del mantell nival entre novembre de 2019 i gener de 2020. L'eix vertical mostra l'altura del mantell en centímetres, mentre que l'eix horitzontal cobreix el temps en dies. Els colors utilitzats representen diferents estats del mantell nival:

- Blau clar: neu feble o amb baixa cohesió.
- Vermell: neu consolidada i estable.
- Verd: neu nova o recent acumulada.
- Rosa i blau intens: representen situacions específiques, com capes de fusió o gel.

Aquests gràfics mostren com l'acumulació i l'estructura del mantell nival canvien amb el temps. Per exemple, en l'orientació sud, es pot observar una fusió més ràpida de les capes superficials, especialment a finals de desembre, mentre que en l'orientació nord l'evolució és més homogènia i amb capes més gruixudes i estables.

Els perfils verticals, situats a la dreta, ofereixen una visió detallada de l'estructura interna del mantell en un moment concret. Els perfils indiquen:

- Duresa: representada a l'eix superior amb unitats com "K", "P" o "F", que assenyalen la resistència de les capes.
- Temperatura: mostrada a l'eix inferior amb una línia vermella, que reflecteix la variació de temperatura en profunditat.
- Capes de neu: codificades amb colors similars als gràfics temporals per identificar zones febles (blau clar) o consolidacions estables (vermell).

En comparar les dues orientacions, es pot veure que l'orientació nord (N) presenta capes més gruixudes i una major estabilitat, gràcies a una menor exposició solar i temperatures més fredes. Per contra, l'orientació sud (S) mostra més capes febles i una fusió accelerada, degut a la major irradiació solar. Aquesta figura proporciona informació clau sobre l'evolució temporal i la composició interna del mantell nival, utilitzant codis de color i mètriques precises. Això permet analitzar les condicions d'estabilitat del mantell i avaluar millor el risc d'allaus, facilitant la presa de decisions en activitats de muntanya i la planificació de mesures preventives.

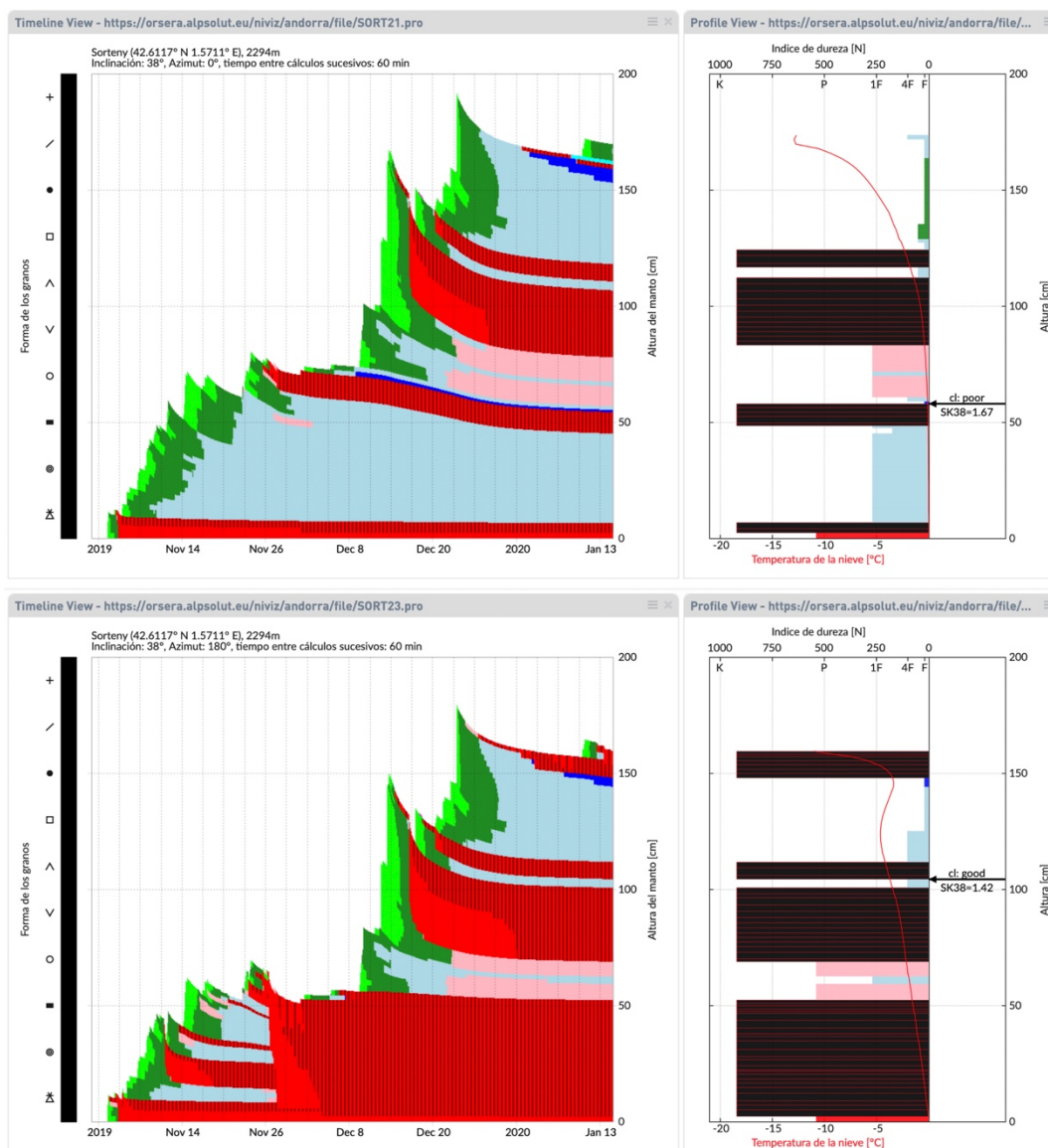


Figura 4.10: Modelització del mantell nival a Sorteny en orientació N i S. Crèdits: Snowpack.

4.5 Base de dades unificada

A continuació, es presenta una proposta de metadades per a la Base d'Allaus Accidentals d'Andorra, dissenyada amb l'objectiu de consolidar un sistema integral de registre i documentació d'esdeveniments d'allaus al territori. Aquesta estructura de metadades permetrà organitzar, estandaritzar i facilitar l'accés a la informació clau, com la ubicació geogràfica, les característiques de l'allau, les condicions meteorològiques associades i l'impacte registrat. La base de dades es concep com una eina essencial per a la gestió del risc d'allaus, donant suport tant a les activitats de prevenció com a les tasques d'investigació i mitigació a Andorra.

El disseny de la Base d'Allaus Accidentals d'Andorra s'ha basat en el compliment de la Directiva INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in the European Community), que estableix normes per crear una infraestructura europea d'informació espacial. Aquesta directiva és essencial per garantir que la informació sobre allaus sigui accessible i interoperable amb altres bases de dades europees, fet especialment rellevant en un context transfronterer amb països com Espanya i França. A més, INSPIRE promou l'ús d'estàndards comuns per al registre i compartició de dades geoespacial, assegurant que la informació sigui comprensible i útil tant per a experts com per a autoritats internacionals.

La integració de les bases de dades sobre riscos naturals amb la Directiva INSPIRE és crucial per millorar la reducció del risc de desastres i l'accessibilitat a les dades espacials a tota Europa. La Directiva INSPIRE (Infraestructura d'Informació Espacial a Europa), establerta el 2007, té com a objectiu facilitar l'intercanvi de dades espacials entre els estats membres de la UE per donar suport a polítiques ambientals i a la gestió de desastres (Cho & Crompvoets, 2018). Aquesta directiva aborda desafiaments significatius relacionats amb l'accessibilitat i la interoperabilitat de les dades espacials, elements essencials per a una avaluació i gestió efectiva dels riscos naturals (Tomáš et al., 2015). Mitjançant l'establiment d'estàndards per a metadades, interoperabilitat i intercanvi de dades, la Directiva INSPIRE promou un enfocament més cohesionat per a la gestió dels riscos naturals, permetent una millor coordinació entre els diferents actors, incloent-hi agències governamentals i investigadors (Sjoukema et al., 2022). L'èmfasi en la interoperabilitat és especialment rellevant, ja que possibilita l'harmonització de dades de diferents àmbits, aspecte crític per a una avaluació completa dels riscos i per a l'elaboració d'estratègies de resposta efectives (Kotsev et al., 2020).

El compliment d'aquesta normativa també millora l'eficàcia en la gestió del risc, facilitant l'accés a dades precises i actualitzades, fonamentals per desenvolupar estratègies de prevenció i resposta davant emergències. Alhora, fomenta la cooperació científica a nivell europeu, permetent compartir informació rellevant amb institucions i investigadors especialitzats. Finalment, l'estandardització afavoreix la transparència i l'accessibilitat, assegurant que les dades estiguin disponibles tant per als ciutadans com per als professionals, promovent així una gestió més informada i participativa.

Introducció:

La Base de Dades d'allaus d'Andorra recopila informació essencial sobre la incidència d'allaus a les muntanyes i les carreteres del país. Aquesta base de dades és una eina fonamental per a gestors d'infraestructures, planificadors d'emergències i qualsevol persona involucrada en la seguretat viària i gestió de riscos a Andorra.

Dates de referència:

- Creació: Data que indica quan es va crear el recurs.
- Revisió: Data que indica quan el recurs va ser examinat, millorat o modificat.

Informació Temporal:

- Edició: Número de l'edició.
- Paraules Clau: allaus, seguretat viària, gestió de riscos, infraestructures vials, Andorra, emergències, prevenció, anàlisi de riscos, manteniment de carreteres, dades geoespacials.

Sistema de Coordenades:

El codi EPSG: 27563 és el sistema de coordenades oficial d'Andorra, que correspon a la projecció Lambert Sud França. Aquest sistema es fa servir per a la cartografia detallada del país, ja que permet una representació precisa de la regió situada als Pirineus. Es tracta d'una projecció cònica conforme amb doble estàndard, molt adequada per a la cartografia regional de França i Andorra. És important destacar que l'EPSG: 27563 indica que es fa servir una projecció Lambert, però aquesta pot utilitzar qualsevol datum o sistema de referència. Concretament, el sistema utilitza el datum NTF de Paris, que fa servir l'el·lipsoide de Clarke 1880. Sense especificar el datum, la projecció cartogràfica per si sola no és suficient per determinar la posició o georeferenciació correcta en un mapa, ja que la precisió depèn directament del sistema de referència utilitzat. A més, també es fa servir el sistema de coordenades global EPSG: 4326 (WGS84), que és el referent per a aplicacions de webmapping i sistemes de navegació GPS. Tot i que el WGS84 és més universal, l'EPSG: 27563 és més recomanable per a projectes locals, ja que ofereix una major precisió per a la cartografia i topografia d'Andorra.

Per tant, mentre que per a aplicacions globals o de webmapping el sistema EPSG: 4326 és el més comú, per a treballs cartogràfics locals, el sistema EPSG: 27563 continua sent el de referència principal a Andorra. Els receptors GNSS (Global Navigation

Satellite System) o els receptors GPS (Global Positioning System) d'alta precisió poden ser utilitzats amb mètodes de precisió variable, com el mètode GPS absolut, que no sempre garanteix alta exactitud. D'altra banda, els mètodes RTK (Real-Time Kinematic) i PPK (Post-Processed Kinematic) són tècniques d'observació que utilitzen aquests receptors per a la recopilació de dades, però cal entendre que no són receptors per si mateixos. A més, la VRS (Virtual Reference Station) és una estació virtual que envia correccions al receptor GPS o GNSS, però no s'ha de confondre amb una xarxa de receptors.

Les coordenades límit d'Andorra en el sistema WGS84 són:

Extrem Nord: 42.6563°N

Extrem Sud: 42.4285°N

Extrem Est: 1.7865°E

Extrem Oest: 1.4086°E

Informació de contacte:

- Entitat responsable: Nom de l'entitat gestora.
- Adreça: Adreça completa.
- Responsable Tècnic del Projecte (RTP): Nom i contacte del responsable.
- Tècnic SIG: Nom i contacte del tècnic de sistemes d'informació geogràfica.

Informació Tècnica:

- Drets de propietat intel·lectual: declaracions sobre drets de propietat i restriccions d'ús.
- Tipus de Representació Espacial: Dades vectorials per a la representació de dades geogràfiques.
- Resolució Espacial: Denominador d'escala, per exemple, 5000.
- Llinatge: Descripció de l'origen de les dades i compliment de paràmetres de qualitat.

Camps de la Taula d'Atributs:

- Id: Identificador únic.
- Data: Format aaaa-mm-dd .
- Hora: Format hhmm .
- Sector: Divisió de l'àrea en sectors específics.
- Canal/loc.: Canal d'allaus/localització.
- Pk : Marcador de posició en metres.
- Grandària: Potencial destructiva de l'allau (p. ex., persona, cotxe, camió).
- Tipus de fractura: tipus de fractura de l'allau (p. ex., placa, puntual).

- Afecció: Àrees afectades (p. ex., zona sortida, trajecte, arribada).
- Desencadenament: Tipus de desencadenament (p. ex., natural, accidental, artificial).
- Altitud: Altitud en metres.
- Orientació: orientació en graus.
- Inclinació: Inclinació del pendent.
- CPAL/BPA: Comunicat de Perill d'Allaus Local / Butlletí de Perill d'Allaus
- Problema: Tipologia de problemes d'allaus (p. ex. neu recent, neu ventada).
- Patró de Perill: Descripció dels patrons de perill.
- Profunditat de Neu (HS): Profunditat de la neu en cm.
- Neu Recent (HN1d, HN2d, HN3d): Quantitat de neu recent a 24h, 48h i 72h.
- Pluja: Indicador de si ha plogut (0 No, 1 Sí).
- Fotografia: Indicador de disponibilitat de fotografies (0 No, 1 Sí).
- Fitxer: Nom del fitxer associat.
- Comentari: Observacions addicionals.

4.6 Exploració del potencial de les dades de telèfons mòbils per al rastreig i analitzar la dinàmica d'esquiadors.

4.6.1 Introducció

La tecnologia moderna ha ampliat enormement les nostres capacitats per recopilar i analitzar dades de comportament humà, fins i tot en entorns desafiadors com les zones d'allaus en àrees muntanyenques. Les dades proporcionades pels operadors de telefonia mòbil, especialment els registres de detalls de trucades (CDR, per les seves sigles en anglès, "Call Detail Record"), s'han convertit en una eina valuosa per analitzar dinàmiques en diverses disciplines, com ara el turisme, la mobilitat urbana i la gestió de riscos. Aquest capítol explora una aplicació innovadora d'aquestes dades per estudiar el comportament dels esquiadors de travessia en terrenys d'allau, amb un enfocament específic a la vall de Sorteny, a Andorra, durant el mes de febrer del 2018..

Les dades dels operadors de telefonia mòbil s'han fet servir en els darrers anys en una gran varietat d'àmbits. Les aplicacions més destacades es troben en camps com les dinàmiques del turisme (Ahas et al., 2007; Tiru et al., 2010; Girardin et al., 2009; Raun et al., 2016), la mobilitat intel·ligent (González et al., 2008; Kung et al., 2014), el transport (von Mörner, 2017), la seguretat pública o l'anàlisi de l'ús del sòl (Soto et al., 2011; Mamei et al., 2016), amb un enfocament principalment en zones urbanes.

El format més comú per a l'anàlisi de dades de telefonia mòbil és el CDR, que registra les activitats del telèfon mòbil cada vegada que un usuari utilitza un servei (com trucades, missatges SMS, dades 3G i 4G). En general, els CDR inclouen com a mínim: un número de telèfon d'origen i destinació amb hash, ubicació de l'activitat (geolocalització o cel·la associada), data, hora de l'activitat i la seva durada.

En àrees muntanyoses, aquest tipus de dades podria ser molt útil en àmbits com la gestió del risc d'allaus o l'inventari de les rutes més utilitzades per al freeride, l'esquí fora pista o l'alpinisme.

4.6.1.1 Metodologia

4.6.1.1.1 Recol·lecció de Dades

La base de dades principal d'aquest estudi prové de CDR proporcionats per l'única companyia de telecomunicacions a Andorra, abastant el període de l'1 al 20 de febrer del 2018. Els CDR inclouen informació anonimitzada, com ara la identificació de l'usuari, marca temporal (en format UNIX). El timestamp és una marca de temps que s'expressa en segons des de l'època Unix (també coneguda com a Unix Epoch), que és el 1 de gener de 1970 a les 00:00:00 UTC. Aquesta informació permet identificar el moment exacte en què es va registrar un esdeveniment.

Per exemple, en el cas de la taula presentada, el timestamp 1517439600 correspon al moment en què es va registrar una dada específica. Per convertir aquest valor a una data i hora llegible, cal transformar-lo del format Unix a una data convencional. Això dependrà de la zona horària associada a les dades (normalment UTC o adaptada al lloc d'estudi). També es representen les coordenades de latitud i longitud, que proporcionen la ubicació geogràfica precisa on es va registrar l'activitat de la persona. Aquestes dades permeten localitzar de manera precisa els moviments o posicions associades als timestamps.

L'MCC (Mobile Country Code, en anglès) és el codi de país mòbil que identifica de manera única el país d'origen d'un operador de xarxa mòbil. Es tracta d'un número de tres dígitos que forma part de l'identificador global del sistema mòbil (IMSI) i que, juntament amb el codi d'operador mòbil (MNC), permet identificar una xarxa específica dins d'un país. A més, aquest codi pot ajudar a inferir la nacionalitat de l'usuari.

Per exemple:

- 213 correspon a Espanya.
- 234 correspon al Regne Unit.
- 208 correspon a França.

La combinació d'aquestes dades amb altres fonts, com ara butlletins d'allaus i dades meteorològiques, proporciona una perspectiva multidimensional del comportament dels usuaris, millorant així la comprensió i gestió de les seves activitats en contextos específics (Taula 4.3).

Taula 4.3: Mostra de la base de dades utilitzada en l'anàlisi. Crèdits: Elaboració propia.

id	timestamp	lat	long	mcc
135	1517439600	42,54223	1,732572	234
170	1517439600	42,50396	1,521486	213
170	1517439602	42,50396	1,521486	213
252	1517439603	42,54873	1,497054	213
379	1517439600	42,54396	1,732851	208
379	1517439602	42,54396	1,732851	208
423	1517439600	42,53955	1,732694	213
562	1517439601	42,50531	1,513455	213
562	1517439603	42,50531	1,513455	213
902	1517439600	42,54129	1,733509	234

4.6.1.1.2 Anàlisi del Terreny

Es va utilitzar la cartografia de l'Escala d'Exposició de Terreny d'allaus (ATES) per classificar el terreny en tres categories: simple, desafiador i complex. Aquest sistema, recentment implementat a Andorra, permet una avaluació detallada del risc associat a diferents tipus de terreny. La cartografia en format de fitxer shapefile facilita la cruïlla amb les dades de CDR, cosa que permet quantificar el nombre de persones que es van desplaçar per cada tipus de terreny durant el període d'estudi.

4.6.1.1.3 Integració de Dades i Anàlisi

Es va fer una anàlisi integral que va combinar els CDR amb dades meteorològiques històriques de l'estació de Sorteny i la informació de butlletins d'allaus. Es va comptabilitzar el nombre de persones presents a la vall diàriament i es va comparar amb les condicions meteorològiques i el nivell de perill d'allaus. Es va prestar una atenció

especial a dos episodis: el 3 de febrer, amb perill moderat d'allau i mal temps, i el 15 de febrer, amb un perill alt d'allau i bon clima.

4.6.1.1.4 Resultats i discussió

4.6.1.1.4.1 Patrons Generals de Comportament

L'anàlisi va revelar que la freqüència de visitants a la vall de Sorteny varia considerablement en funció dels dies de la setmana i les condicions d'allau. Els caps de setmana van mostrar més afluència de persones, fins i tot durant dies amb nivells de perill moderat a considerable. En contrast, la presència d'esquiadors va disminuir notablement durant i després de dies amb perill d'allaus alt, així com durant condicions meteorològiques adverses (Figura 4.11).



Figura 4.11: Freqüència diària de persones a la vall de Sorteny estimada amb dades de CDR i el perill d'allaus durant el període d'estudi. La línia vermella representa el perill d'allaus.. Crèdits: AR+I

4.6.1.1.4.2 Elecció del Terreny i Resposta a les Condicions

Durant el període d'estudi, es va observar una preferència constant pels terrenys desafiadors, fins i tot sota condicions meteorològiques i variables d'allau. Tot i això, durant l'episodi del 15 de febrer, quan es va registrar un nivell alt de perill d'allau (4), la majoria dels esquiadors es van limitar a terrenys simples, indicant una clara resposta a la percepció de risc (Figura 4.12).

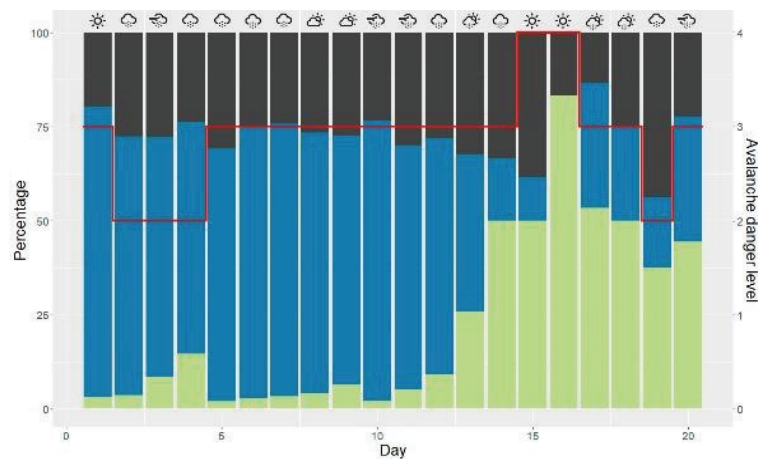


Figura 4.12: Quota diària de persones en cada tipus de terreny i perill d'allau. La línia vermella representa el perill d'allaus. Crèdits: AR+I

4.6.1.1.4.3 Episodis Específics

Episodi A (3 de febrer): Aquest dia es va caracteritzar per condicions meteorològiques adverses, amb neu i vent, i un nivell de perill moderat d'allau (2). Les dades de CDR van mostrar que els esquiadors es van moure principalment en terrenys desafiadors i complexos, amb una concentració en àrees menys exposades al vent (Figura 4.13).

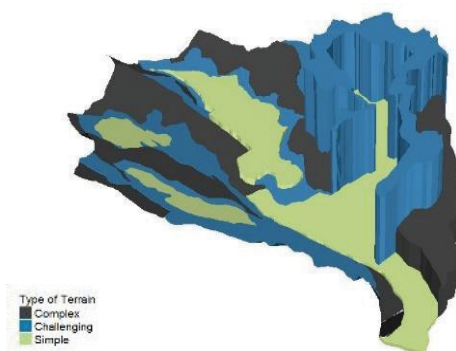


Figura 4.13: Representació tridimensional del model ATES (Avalanche Terrain Exposure Scale) extruït segons el percentatge de persones que es troben en cada tipus de terreny durant l'episodi A. Crèdits: AR+I

Episodi B (15 de febrer): En contrast, aquest dia assolellat va experimentar una alta activitat d'allaus espontànies. Inicialment, el butlletí d'allaus indicava un nivell moderat, que posteriorment es va enlairar. En resposta, la majoria dels esquiadors es van mantenir en terrenys simples, evitant àrees de més risc (Figura 4.14).

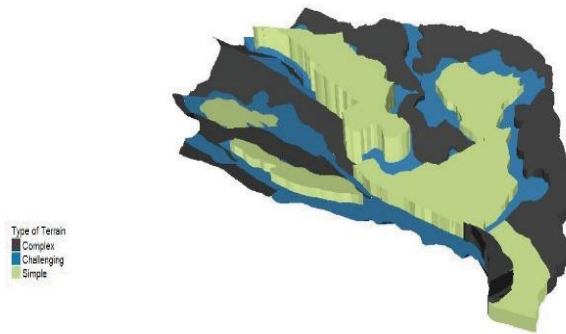


Figura 4.14: Representació tridimensional del model ATEs extruït segons el percentatge de persones en cada tipus de terreny durant l'episodi B. Crèdits: AR+I

4.6.1.1.5 Conclusions

L'ús de dades de CDR per analitzar la dinàmica d'esquiadors a terrenys d'allau ofereix una visió valuosa sobre els patrons de comportament i la presa de decisions en contextos de risc. Aquest mètode permet una recol·lecció de dades passiva i menys invasiva en comparació amb mètodes tradicionals com enquestes o seguiment GPS. Tot i les limitacions actuals en la precisió de la geolocalització, que és més gran en àrees muntanyoses a causa del senyal de les antenes, els CDR representen una font de dades prometedora per a futures investigacions.

Les generacions futures de tecnologia mòbil prometen millores en la precisió i la resolució espacial, cosa que podria augmentar significativament la utilitat dels CDR en estudis d'activitats de muntanya. A més, la combinació de CDR amb enquestes i rastreig GPS podria proporcionar una comprensió més completa dels perfils d'usuaris i els seus patrons de comportament, permetent una millor gestió de riscos i el disseny de campanyes de prevenció.

El treball futur se centrarà a integrar aquestes metodologies per validar la precisió de les dades de CDR i millorar l'anàlisi de patrons de circulació i dinàmiques en terrenys

d'allau, considerant factors com ara el perill d'allau, les condicions meteorològiques i els perfils dels usuaris de muntanya.

4.7 Enquesta sobre la Influència del Canvi Climàtic a les Allaus de Neu

4.7.1 Introducció

Avaluar els canvis als patrons d'allaus i l'impacte del canvi climàtic a l'activitat d'allaus és una àrea de recerca crítica. Tot i això, l'avaluació objectiva d'aquests canvis és desafiant a causa de l'escassetat de dades i la complexitat del fenomen. En aquest estudi, es va buscar explorar les opinions, les observacions i les expectatives d'experts en allaus de neu utilitzant un enfocament d'enquesta. L'objectiu va ser comprendre millor les dificultats d'avaluar objectivament els canvis als patrons d'allaus i el possible impacte del canvi climàtic. Estudis recents havien destacat la necessitat d'explorar les opinions dels experts al camp per complementar els estudis empírics.

Comprendre la complexa dinàmica de les allaus i la resposta al canvi climàtic és un aspecte crític de la seguretat en muntanyes i la conservació ambiental. L'estudi va explorar les percepcions i prediccions d'experts en allaus sobre els canvis en els patrons d'allaus i la influència del canvi climàtic, especialment a la regió dels Pirineus. Aquesta investigació es va basar en enquestes a professionals amb una àmplia experiència en l'àmbit de la neu i les allaus.

4.7.2 Metodologia

4.7.2.1 Disseny de l'estudi

Aquesta enquesta científica va tenir com a objectiu investigar les percepcions, observacions i prediccions dels professionals de la neu i experts en allaus en relació amb l'impacte del canvi climàtic sobre la neu i la dinàmica d'allaus. L'estudi es va dur a terme en col·laboració amb la Universitat d'Andorra, Andorra Recerca + Innovació i el Servei Meteorològic Nacional d'Andorra, amb la finalitat d'establir una comprensió completa dels canvis observats i anticipats durant les estacions d'hivern. La investigació es va basar en una metodologia similar a la utilitzada per (Wilbur i Kraus, 2018) en

estudis realitzats als Estats Units i Canadà, amb l'objectiu de cobrir les llacunes de coneixement existents sobre la relació entre el canvi climàtic i l'activitat d'allaus.

4.7.2.2 Participants

Els participants d'aquest estudi van ser professionals implicats en sectors relacionats amb la neu i les allaus (Figura 4.15). Això incloïa, però no es limitava, a experts en neu, investigadors d'allaus, guies de muntanya, patrulles d'esquí, educadors, rescatadors, consultors i membres de serveis civils de protecció i emergències (Figura 4.16). L'estudi va buscar recollir aportacions d'experts tant novells com experimentats, reconeixent que tots podien oferir perspectives valuoses. A més, l'enquesta va tenir un abast internacional, amb l'objectiu de cobrir diverses regions muntanyoses per garantir que les conclusions fossin aplicables en una àmplia gamma de contextos.

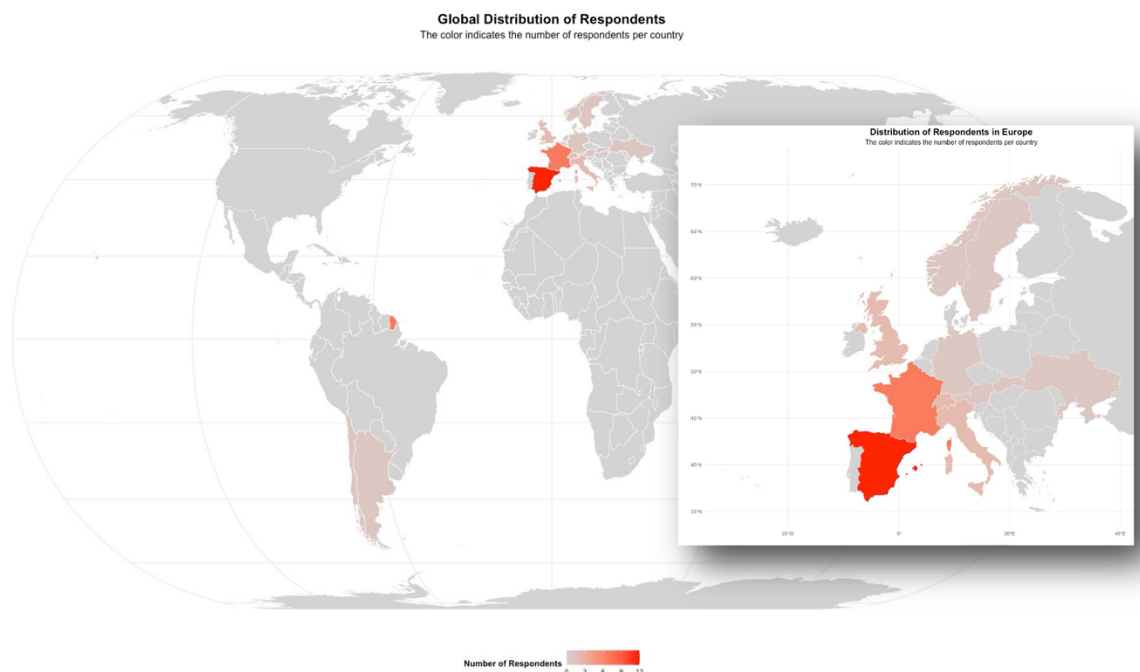


Figura 4.15: Localització dels participants a l'enquesta. Crèdits: Elaboració pròpia.

4.7.2.3 Instrument d'enquesta

El qüestionari utilitzat en aquesta investigació va constar de 31 preguntes distribuïdes en dues seccions principals: la primera va incloure tres preguntes demogràfiques i la segona es va centrar en 28 preguntes relacionades amb les observacions, prediccions i percepcions de l'impacte del canvi climàtic sobre la neu i les allaus. L'enquesta va ser dissenyada per ser ràpida i concisa, amb un temps estimat de finalització de 5 minuts aproximadament, fet que va facilitar la participació de professionals ocupats en el sector.

Les respostes dels participants es van codificar sistemàticament per facilitar anàlisis estadístiques rigoroses. El sistema de codificació va permetre comparacions a través de diverses dimensions, incloses les regions geogràfiques, les categories d'ocupació i els anys d'experiència (Figura 4.16). Aquest enfocament sistemàtic va garantir l'exploració de patrons, les variacions i les tendències dins del conjunt de dades.

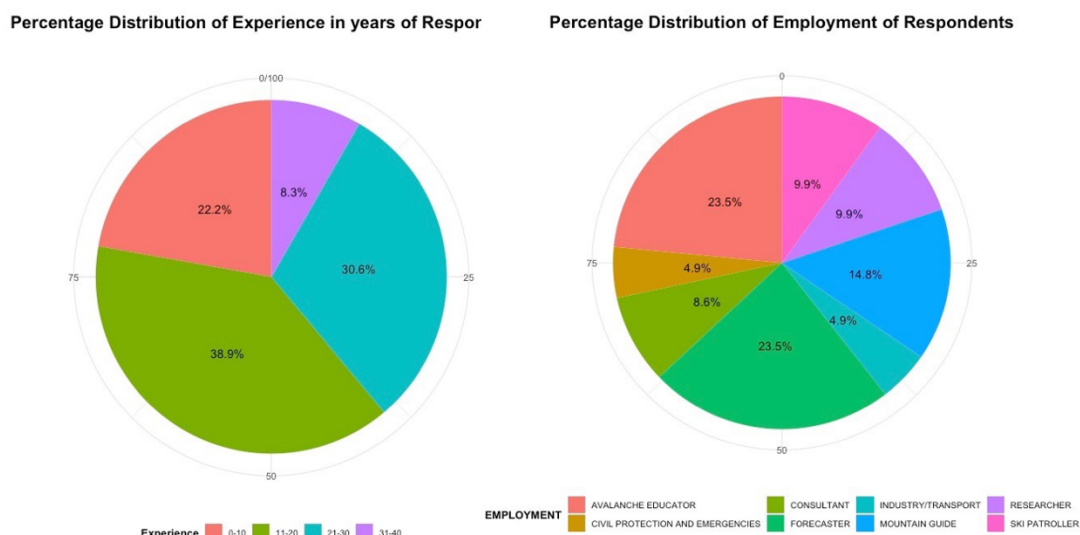


Figura 4.16: Experiència i ocupació dels enquestats. Crèdits: Elaboració pròpia.

4.7.3 Resultats

L'enquesta inicial va incloure les perspectives de 36 professionals, destacant un canvi observable als patrons d'allaus i una varietat de punts de vista dins del sector. Tot i que les dades van revelar canvis impulsats pel clima, també van fer palesa la varietat d'opinions professionals i l'absència de tendències clares. Això va subratllar la importància d'ampliar la participació per obtenir resultats més representatius.

Es van obtenir respostes mínimes respecte a tendències d'augment o disminució significatives, cosa que va indicar que els extrems de les dades estaven infrarepresentats. Es van notar canvis descriptius entre les observacions dels darrers anys i les projeccions futures dels professionals de la neu. Hi va haver un consens general en què no s'havien observat canvis notables en problemes relacionats amb allaus de placa de vent, allaus en altituds elevades, situacions sense problemes distintius d'allaus, la capacitat destructiva de les allaus, els efectes als boscos i l'activació artificial d'allaus. Les projeccions futures també es van alinear consistentment que no s'anticipen canvis en aquests aspectes.

Comprendre les perceptions professionals pot facilitar la planificació d'estratègies d'adaptació i mitigació davant dels impactes del canvi climàtic, sempre que el coneixement adquirit es transfereixi amb precisió a nivell local, segons allò adquirit per cada professional. L'absència de notables tendències podria canviar amb una mostra d'enquestats més àmplia.

A continuació, es presenten les principals conclusions de l'enquesta:

- Necessitat urgent de més participació: És essencial que més professionals de la neu i allaus participin a l'enquesta per obtenir resultats més representatius i robustos.
- Infrarepresentació de respostes a escenaris extrems: Cal una major representació de dades als extrems per a una comprensió més completa.
- Canvis observables i futures expectatives: Les observacions recents i les projeccions futures van indicar canvis en patrons d'allaus que s'han de monitoritzar.
- Percepcions professionals i planificació estratègica: La comprensió de les percepcions dels professionals pot ser clau per planificar estratègies efectives de resposta als impactes del canvi climàtic.
- En resum, aquesta enquesta va proporcionar una visió preliminar valuosa dels impactes del canvi climàtic en la dinàmica de les allaus, encara que es requereix una participació més gran per obtenir una comprensió més completa i representativa d'aquests fenòmens.

4.8 Proposta per a la Gestió d'Allaus a Andorra

En cas d'una allau, es produeix una situació d'emergència que altera la normalitat. La resposta immediata busca rescatar i assistir les víctimes, limitar els danys i restaurar els serveis essencials. Aquestes accions requereixen la mobilització de diversos serveis, que han d'estar ben coordinats per aconseguir l'objectiu comú amb la màxima eficàcia.

La resposta a una allau ha d'estar basada en un Pla d'Emergència prèviament elaborat, ajustat a les característiques i riscos del territori andorrà. Aquest pla inclou la intervenció de diversos mitjans i recursos per a una actuació ràpida i efectiva, garantint una resposta estructurada i eficient davant la gravetat de l'emergència.

Concepte de Tàctiques Operatives

Les tàctiques operatives constitueixen el mecanisme de resposta davant d'emergències provocades per allaus. Aquestes tàctiques inclouen la identificació de l'incident, l'avaluació del risc i la mobilització de mitjans de rescat, sempre en funció de la gravetat de l'allau i el seu impacte. A través d'aquest enfocament, s'assegura una resposta ràpida i coordinada per a minimitzar els danys i millorar la seguretat de les persones afectades. Aquest procediment operatiu està basat en el Sistema Basc de Gestió d'Emergències. Les tàctiques operatives estan dissenyades per donar resposta a un suposat accidental tipificat i són l'instrument bàsic que utilitza el Centre de Coordinació d'Emergències per donar resposta a les emergències. Aquesta proposta presenta diverses tàctiques relacionades amb les allaus a Andorra, que podrien millorar els protocols d'intervenció i registre de dades.

Estructura de les Tàctiques Operatives

Les tàctiques operatives estan basades en un pla detallat que inclou diversos elements essencials:

- Identificació i avaluació del risc en temps real: Monitoreig constant de les condicions meteorològiques i nivells per identificar riscos imminents d'allaus.
- Mobilització de recursos segons la fase de l'emergència: Assignació immediata d'equips de rescat especialitzats, segons la gravetat de l'allau.
- Coordinació de serveis: Inclou bombers, protecció civil, equips de rescat de muntanya, nivòlegs, operaris de carreteres i altres serveis clau.

Catàleg de mitjans i recursos

Andorra disposa d'un catàleg complet i actualitzat de mitjans i recursos que inclouen equips especialitzats en el rescat de muntanya, maquinària per a desplaçar la neu de les carreteres, helicòpters i sistemes de monitoratge meteorològic. Les entitats involucrades estan obligades a proporcionar informació actualitzada sobre els seus recursos disponibles, garantint una resposta eficient i ràpida.

Activació de la tàctica

Quan es rep una alerta d'allau, el Centre de Coordinació d'Emergències d'Andorra activa immediatament el protocol corresponent. Es recopilen dades sobre l'incident, es realitza una avaluació inicial i es mobilitzen els recursos necessaris segons la magnitud de l'allau i les condicions del terreny.

Mobilització de recursos

La mobilització dels recursos s'organitza en dues fases:

Fase automàtica: Mobilització immediata d'equips predefinits, com ara els equips de rescat de muntanya i les màquines llevaneus.

Fase diferida: Si l'emergència ho requereix, es mobilitzen recursos addicionals sota la direcció del tècnic coordinador, ajustant els recursos a les necessitats específiques del cas.

Desenvolupament de la Tàctica Operativa

La coordinació tècnica és essencial i està a càrrec del Centre de Coordinació d'Emergències d'Andorra, que centralitza tota la informació i coordina les actuacions dels diferents serveis d'emergència implicats. En cas que la situació requereixi la intervenció de diversos serveis, s'instal·la un Centre de Comandament Avançat a la zona afectada, amb l'objectiu de dirigir les operacions i garantir una unitat d'acció eficient.

Fi de l'Incident

L'incident es dona per finalitzat quan el Director d'Operacions determina que els riscos han estat eliminats i que la situació està sota control. En aquest moment, es procedeix a la desactivació del dispositiu d'emergència i a la restauració de la normalitat.

Aquesta proposta integra diverses tàctiques operatives dissenyades per fer front a situacions d'allaus en diferents àrees i entorns (Taula 4.4). El pla inclou:

- Observació Nivometeorològica: NIVOOBS
- Plans de Rescat Especialitzats (Rescat 1 al 5): Tàctiques específiques adaptades a les diferents situacions, com el rescat en zones de muntanya (R1), estacions d'esquí (R2), carreteres (R3), zones urbanes (R4), i rescats transfronterers en col·laboració amb altres països (R5).
- Pla d'Intervenció per al Desencadenament d'Allaus): PIDA Desencadenament controlat d'allaus en zones crítiques per mitigar el risc.
- Pla d'Emergència Específic (PEE): Un pla adaptat a cada zona, amb protocols d'actuació segons el nivell de risc, garantint una resposta adequada i coordinada en cas d'allaus.

Taula 4.4: Proposta de Tàctiques Operatives per a les Allaus a Andorra. Crèdits: Elaboració pròpia.

Anàlisi tècnica d'allaus registrats per nivòlegs	NIVOOBS
Rescat per allau en zona de muntanya	RA 1
Rescat per allau en estacions d'esquí	RA 2
Rescat per allau en carretera	RA 3
Rescat per allau en zones urbanes	RA 4
Rescat per allau transfronterer	RA 5
Pla d'intervenció per al desencadenament d'allaus	PIDA
Pla d'emergència específic per allaus	PPE

Aquest conjunt de tàctiques proporciona un enfocament integral per garantir la seguretat davant d'allaus a Andorra, amb la capacitat de reaccionar de manera ràpida i coordinada en diversos escenaris d'emergència, i registrar informació rellevant durant el procediment operatiu de rescat o anàlisi de la situació i en la fase post-accident.

4.9 Recomanacions

Finalment, es presenta una sèrie de recomanacions amb l'objectiu de millorar el servei de predicció d'allaus. Aquestes recomanacions inclouen la necessitat d'estandarditzar els procediments de recollida de dades, actualitzar els mapes de risc i el cadastre d'allaus, així com implementar tecnologies avançades. A més, es destaca la importància de la coordinació entre els diferents organismes implicats en la gestió del risc i la creació de plans d'actuació més eficaços i coordinats, per al registre d'esdeveniments unificat i sistemàtic.

ACTUALITZACIÓ DEL CADASTRE D'ALLAUS

Mantenir un registre actualitzat d'esdeveniments d'allaus per a una gestió efectiva.

BASE DE DADES ACCESSIBLE I PÚBLICA

Crear una base de dades accessible per al públic, que inclogui detalls sobre incidents d'allaus.

FOMENT DE LA CIÈNCIA CIUTADANA I OPEN DATA

Involucrar la ciutadania a la recopilació de dades i promoure la transparència en l'accés a la informació.

COMPARTIR I ACCEDIR A DADES D'ALLAUS DE FORMA PÚBLICA

Facilitar l'accés a dades sobre allaus per a investigadors i públic en general.

UNIFICACIÓ DE CRITERIS PER OMPLIR BUIITS EN BASES DE DADES

Establir protocols per a la recopilació de dades uniformes i consistents.

MILLORA DE PROTOCOLS OPERACIONALS

Optimitzar els protocols de resposta per tal d'agilitzar la mobilització d'equips d'emergència i obtenció de dades.

IMPLEMENTACIÓ DE NOVES TECNOLOGIES PER A LA MONITORITZACIÓ

Utilitzar tecnologies avançades per a la detecció i monitorització d'allaus. Exemple: drons, imatges satèl·lit.

CAPACITACIÓ I FORMACIÓ CONTÍNUA

Proporcionar capacitat constant als equips de resposta i tècnics especialitzats.

DESENVOLUPAMENT DE PLANS D'EMERGÈNCIA LOCALITZATS

Elaborar plans d'emergència específics per a zones d'alt risc. Exemple: Competicions

COL·LABORACIÓ INTERNACIONAL

Fomentar l'intercanvi de coneixements i tecnologies amb altres països.

SENSIBILITZACIÓ I EDUCACIÓ PÚBLICA

Realitzar campanyes de conscienciació i educació sobre el risc d'allaus i les mesures de prevenció.

INVESTIGACIÓ I DESENVOLUPAMENT (R+D)

Invertir en investigació per millorar les tècniques de prevenció i mitigació d'allaus.

AVALUACIÓ D'INFRAESTRUCTURES EXISTENTS

Inspeccionar i avaluar la seguretat d'infraestructures crítiques en àrees propenses a allaus.

DESENVOLUPAMENT DE SISTEMES D'ALERTA PRIMERENCA

Implementar sistemes d'alerta primerenca per notificar a les comunitats en risc. Exemple: EU-Alert, 112 invers, el sistema europeu d'alertes públiques basat en tecnologia de difusió cel·lular (*cell broadcast*), que permet enviar missatges d'emergència als telèfons mòbils de les persones dins d'una àrea afectada. Aquest sistema s'utilitza per alertar la població en situacions de perill greu, com desastres naturals, emergències meteorològiques o incidents de seguretat. Tot i que és una iniciativa impulsada per la Unió Europea, països fora de la UE, com Andorra, podrien implementar una versió similar adaptada a les seves necessitats, ja que la tecnologia i l'enfocament són universals i proporcionen una eina crucial per protegir la ciutadania en moments crítics.

POLÍTIQUES D'ÚS DE SÒL I ZONIFICACIÓ

Continuar implementant polítiques de zonificació que restringeixin el desenvolupament en àrees d'alt risc.

ENFORTIMENT DE LA COORDINACIÓ INTERINSTITUCIONAL

Millorar la coordinació entre diferents agències i organitzacions en la gestió de riscos.

REVISIÓ I ACTUALITZACIÓ DE NORMATIVES

Revisar i actualitzar les normatives i les regulacions relacionades amb la gestió de riscos d'allaus.

FINANÇAMENT I RECURSOS ADEQUATS

Garantir recursos financers i materials suficients per a la gestió de riscos.

PARTICIPACIÓ DE LA COMUNITAT

Involucrar les comunitats locals en la planificació i l'execució de mesures de prevenció.

MONITORITZACIÓ POST-ESDEVENIMENT I AVALUACIÓ

Establir procediments per al monitoratge i l'avaluació després d'esdeveniments d'allaus per millorar-ne la resposta futura

4.10 Punts clau del capítol

- S'ha realitzat una anàlisi DAFO de la gestió del risc d'allaus a Andorra i, tot i que el país es troba a l'avantguarda en aquest àmbit, encara s'han identificat oportunitats de millora.
- S'ha elaborat una base de dades bàsica per al registre d'allaus i s'ha experimentat amb diferents aplicacions per a l'emmagatzematge i tractament de dades.
- S'ha experimentat amb l'ús de drons per a l'anàlisi d'accidents per allaus, creant models 3D, mapes ràpids i obtenint molts beneficis en la seva implementació operativa.
- També s'ha experimentat amb l'ús de fotografies satèl·lit gratuïtes, obtenint resultats només quan les allaus són de mida igual o superior a 4.
- S'ha utilitzat el model Snowpack sense obtenir resultats rellevants per a la seva implementació operativa, cosa que requeriria una major calibració per millorar-ne els resultats.
- S'ha experimentat amb l'ús de dades mòbils per al seguiment de persones i l'estudi de comportaments en terrenys d'allaus, amb resultats exitosos però amb marge de millora.
- S'ha realitzat una enquesta per avaluar els canvis en els patrons d'allaus i l'impacte del canvi climàtic. Tot i que la mostra era petita i no conclouent, ofereix una orientació sobre la percepció dels professionals.
- Es proposen uns procediments operatius relacionats amb els allaus per millorar la coordinació i la recollida de dades.
- Finalment, es presenten una sèrie de recomanacions que poden millorar la gestió del risc d'allaus a Andorra.

Capítol 5.

5. Consideracions finals

5.1 Resum i conclusions

A través d'una anàlisi detallada del registre històric de nevades i allaus, s'ha aconseguit una caracterització espaciotemporal dels fenòmens nivoclimàtics a Andorra. El país ha estat sectoritzat en diferents regions nivoclimàtiques, cosa que ha permès identificar comportaments específics de l'activitat d'allaus segons les característiques climàtiques de cada sector. A més, s'han identificat i documentat els patrons sinòptics predominants que influeixen en l'activitat d'allaus a cadascuna d'aquestes regions, i han proporcionat una base sòlida per a la predicció i la gestió d'aquests fenòmens en el futur.

S'ha creat una base de dades geolocalitzada, homogènia i exhaustiva, que compila informació històrica sobre l'activitat d'allaus, incloent-hi dades de cadastre, el Pla d'Intervenció i Defensa d'allaus (PIDA), i la gestió de carreteres. Aquesta base de dades ha estat utilitzada per fer anàlisis estadístiques que han permès una millor comprensió dels patrons d'activitat d'allaus en el passat, així com la seva distribució espacial i temporal a tot el país. Aquests resultats són fonamentals per millorar la planificació i presa de decisions en la gestió del risc d'allaus.

S'ha dut a terme una avaluació exhaustiva dels protocols, eines i fluxos d'informació utilitzats actualment en la gestió del risc d'allaus a Andorra. Aquesta anàlisi ha identificat àrees de millora en la coordinació entre els diferents actors involucrats en la gestió del risc, i ha proposat ajustaments i optimitzacions que podrien augmentar l'eficàcia i la rapidesa de les intervencions davant de situacions d'emergència.

En el marc d'aquest estudi, s'han provat i experimentat amb els darrers avenços internacionals en eines, protocols i procediments per a l'observació i la gestió de la nivometeorologia i de l'activitat d'allaus. Aquestes proves han demostrat l'efectivitat de noves tecnologies en la millora de la precisió de les prediccions i l'optimització de la gestió de riscos, cosa que suggereix que la seva adopció podria ser beneficiosa per a Andorra en el futur. Basant-se en els resultats obtinguts al llarg de l'estudi, s'han proposat noves estratègies, protocols, eines i tecnologies per a la gestió del risc d'allaus, amb un enfocament particular a les estacions d'esquí i carreteres d'Andorra. Aquestes propostes estan dissenyades per millorar la seguretat i reduir l'impacte de les allaus a

les infraestructures i a la població, integrant els darrers avenços científics i tecnològics en la gestió del risc d'allaus.

5.2 Aplicacions pràctiques

La tesi ***Caracterització espai-temporal de l'activitat d'allaus a Andorra: nous coneixements, eines i tecnologies per a la presa de decisions en la gestió del risc*** se centra en la generació de patrons espaciotemporals de l'activitat d'allaus mitjançant l'homogeneïtzació, l'avaluació i l'anàlisi de les dades disponibles. Aquest procés inclou la revisió i l'actualització de protocols i fluxos d'informació dels diferents sectors involucrats en la gestió de riscos d'allaus. A més, s'exploren noves eines i tecnologies que puguin complementar els enfocaments tradicionals i proporcionen una base més sòlida per a la presa de decisions.

Una de les aplicacions pràctiques més importants d'aquesta investigació és la millora en la predicció i el monitoratge d'allaus. En entendre millor els patrons i les condicions que desencadenen aquests esdeveniments, els responsables poden desenvolupar sistemes d'alerta primerenca més precisos i eficaços. Això no només ajuda a prevenir accidents i salvar vides, sinó que també optimitza la planificació i la gestió d'infraestructures crítiques, com ara carreteres i estacions d'esquí.

A més, l'estudi ofereix beneficis en la gestió d'emergències, proporcionant informació per a la resposta ràpida i coordinada davant d'incidents d'allaus. Això inclou la preparació d'equips de rescat i la implementació de mesures preventives durant períodes d'alt risc.

En resum, la tesi no només contribueix al coneixement científic sobre l'activitat d'allaus a Andorra, sinó que també té un impacte directe en la seguretat i el benestar dels seus habitants. En integrar noves tecnologies i millorar els processos de gestió de riscos, es poden minimitzar les pèrdues econòmiques i humanes, enfortint la resiliència de la regió davant aquest fenomen natural.

5.3 Limitacions

S'identifiquen diverses limitacions que poden influir en els resultats i les aplicacions pràctiques de l'estudi. Entre les més destacades hi ha:

Homogeneïtzació de dades: Una de les principals dificultats és la variabilitat en la qualitat i el format de les dades disponibles sobre l'activitat d'allaus. La necessitat d'homogeneïtzar aquestes dades, que poden provenir de diferents fonts i ser recol·lectades amb diferents mètodes, complica la creació d'una base de dades coherent i fiable. La manca d'estandardització en la recol·lecció d'informació pot portar a inconsistències i biaixos que afectin les anàlisis i les conclusions de l'estudi.

Manca de dades: L'absència de registres complets i detallats sobre esdeveniments d'allaus, especialment en períodes històrics, limita la capacitat d'identificar patrons a llarg termini i fer prediccions precises. Aquesta mancança de dades es veu agreujada en àrees remotes o menys monitoritzades, on els incidents poden no haver estat documentats adequadament.

Pressupost i recursos per a programari específic: El desenvolupament i l'aplicació de tecnologies avançades per a l'anàlisi de dades i el modelatge d'allaus requereixen inversions significatives en software especialitzat i personal capacitat. Les limitacions pressupostàries poden restringir l'accés a aquestes eines i dificulta la implementació de solucions tecnològiques d'última generació, afectant la precisió i l'eficiència dels estudis i les mesures preventives.

Experimentació a camp: La realització d'estudis de camp és essencial per validar models i teories desenvolupades a partir de dades. Tot i això, aquests estudis sovint enfronten desafiaments logístics i financers, així com riscos inherents a l'entorn muntanyós i perillós on ocorren les allaus. L'experimentació en camp requereix no només recursos econòmics, sinó també un equip humà especialitzat i equips tècnics adequats.

Condicions meteorològiques i ambientals: Les condicions canviants de la meteorologia i l'entorn natural també representen una limitació, ja que poden influir en la freqüència i la magnitud de les allaus. Les projeccions futures han de considerar aquestes variables, que són difícils de predir amb precisió i que poden introduir un grau

d'incertesa en els models de risc. Això és un factor que també condiciona molt el treball de camp.

Col·laboració interinstitucional: La gestió efectiva del risc d'allaus requereix la cooperació entre múltiples institucions i sectors. La manca de coordinació o l'existència d'enfocaments divergents dificulta la implementació d'estratègies unificades i efectives. La compartició de dades i recursos, així com l'alineació de protocols i polítiques, són desafiaments que cal superar per optimitzar la resposta davant d'emergències.

5.4 Futures línies de recerca

Les futures línies de recerca derivades de la tesi poden abastar una àmplia gamma de temes rellevants per millorar la comprensió i la gestió del risc d'allaus. Algunes de les àrees més prometedores inclouen:

Canvi climàtic i allaus: Investigar com el canvi climàtic està afectant la freqüència, magnitud i patrons espaciotemporals de les allaus. Aquesta línia de recerca podria incloure l'anàlisi de dades històriques i les projeccions climàtiques per identificar tendències i desenvolupar models predictius que ajudin a anticipar futurs escenaris de risc.

Factor humà i accidents per allaus: Explorar el paper del comportament humà en l'ocurrència d'accidents relacionats amb allaus. Això inclou estudiar com les decisions dels esquiadors, els alpinistes i altres usuaris d'àrees muntanyenques poden influir en la seva exposició al risc. A més, investigar l'efectivitat dels programes de formació i conscienciació sobre seguretat a la muntanya.

Divulgació de la informació i dades obertes: Avaluar estratègies per millorar l'accessibilitat i la transparència de la informació relacionada amb el risc d'allaus. Això inclou el desenvolupament de plataformes de dades obertes que permetin a investigadors, gestors de riscos i al públic en general accedir a informació actualitzada sobre condicions de neu, alertes d'allaus i registres històrics. La promoció de la ciència ciutadana també pot ser una via per recopilar dades addicionals i fomentar la participació comunitària.

Desenvolupament i aplicació de noves tecnologies: Investigar la integració de tecnologies emergents, com sensors remots, drons i models de simulació avançats, en

la detecció, monitorització i gestió d'allaus. L'ús d'intel·ligència artificial i aprenentatge automàtic per analitzar grans volums de dades pot oferir també noves perspectives i eines per a la predicció de riscos.

Interacció de factors geogràfics i ecològics: Estudar com els canvis en l'ús del sòl, la vegetació i altres factors ecològics afecten la dinàmica de les allaus. Aquesta línia de recerca podria abordar la influència de la desforestació, el canvi de cobertures vegetals i les intervencions humanes a l'estabilitat dels vessants, així com les possibles afeccions derivades de grans incendis forestals, que poden canviar de manera determinant l'actual paradigma.

5.5 Reflexió final

En aquest apartat vull ressaltar diversos aspectes clau que han contribuït a l'èxit i la rellevància de l'estudi. Un punt clau ha estat la disponibilitat i l'ús de dades reals i no modelitzades (només per emplenar manca de dades a la sèrie harmonitzada), cosa que ha permès obtenir un panorama precís i detallat de la neu i l'activitat d'allaus al territori. Aquestes dades empíriques han estat fonamentals per validar les hipòtesis i oferir conclusions sòlides, allunyades de la mera especulació.

Un altre aspecte destacat és la involucració de diferents actors i entitats. La col·laboració entre institucions científiques, governamentals, grups de rescat ha estat essencial per recopilar dades, validar models i desenvolupar estratègies de gestió del risc. Aquest enfocament col·laboratiu ha garantit que el treball sigui integral i contempli múltiples perspectives.

A més, s'ha posat en valor que aquesta és una feina a escala de país. Donada la geografia i les dimensions d'Andorra, el país actua com un laboratori a l'aire lliure a la natura, cosa que permet estudiar de manera exhaustiva i detallada els fenòmens.

En conclusió, la combinació de dades empíriques, la col·laboració interinstitucional i el context geogràfic particular d'Andorra han fet aquest estudi un esforç integral i representatiu. Aquest enfocament no només enforteix la gestió del risc d'allaus a Andorra, sinó que també estableix un model de referència per a altres països que enfronten reptes similars.

Referències

- AGEO Interreg - Atlantic. (2021). Observatori Ciutadà de Despreniments de Canàries.
- Aasen, H., Honkavaara, E., Lucieer, A., & Zarco-Tejada, P. J. (2018). Quantitative remote sensing at ultra-high resolution with UAV spectroscopy: A review of sensor technology, measurement procedures, and data correction workflows. *Remote Sensing*, 10(7), 1091. <https://doi.org/10.3390/rs10071091>
- Abegg, B., Agrawala, S., Crick, F., & De Montfalcon, A. (2007). Climate change impacts and adaptation in winter tourism. In OECD (Ed.), *Climate change in the European Alps: Adapting winter tourism and natural hazards management* (pp. 25-60). OECD Publishing.
- Ahas, R., Aasa, A., Mark, Ü., Pae, T., & Kull, A. (2007). Seasonal tourism spaces in Estonia: Case study with mobile positioning data. *Tourism Management*, 28(3), 898–910.
- Ajmar, A., Boccardo, P., Brovelli, M. A., & Giulio Tonolo, F. (2015). Earthquake damage assessment using high-resolution satellite images: The Haiti case study. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-7/W3, 17-22.
- Alonso-González, E., López-Moreno, J. I., Navarro-Serrano, F., Sanmiguel-Valladolid, A., Revuelto, J., Domínguez-Castro, F., & Ceballos, A. (2019). Snow climatology for the mountains in the Iberian Peninsula using satellite imagery and simulations with dynamically downscaled reanalysis data. *International Journal of Climatology*, 39(13), 4992-5006.
- Antoine, J.-P., Cambon, G., & Leclerc, S. (2020). Advances in avalanche hazard and risk management: The lessons of the French experience. *Cold Regions Science and Technology*, 170, 102927.
- Areny, F., Ministeri, —, & Govern, E. (2004). *La legislació i la normativa d'Allaus a Andorra*.

Aydin, M. C., Birincioglu, E. S., Ulu, A. E., & Buyuksarac, A. (2023). Snow Avalanche Risk Assessment using GIS-Based AHP for Bitlis Province. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 104-114.

Ballesteros-Cánovas, J. A., Trappmann, D., Madrigal-González, J., Eckert, N., & Stoffel, M. (2018). Contrasting avalanche activity at the Western and Central Himalayas linked to differential monsoon variability. *Geophysical Research Letters*, 45(23), 12,765-12,774.

Bebi, P., Kulakowski, D., & Rixen, C. (2009). Snow avalanche disturbances in forest ecosystems—State of research and implications for management. *Forest Ecology and Management*, 257(9), 1883-1892. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.050>

Becat, J. (2014). Le risque d'avalanche en Andorre. Études 1971-1996. RECERC - Ouvrages référence - 2014 - Collect. Andorre no6.

Bellaire, S., Jamieson, J. B., & Fierz, C. (2011). SNOWPACK: A forecasting tool for avalanche warning services. *The Cryosphere Discussions*, 5(3), 2253-2278. <https://doi.org/10.5194/tcd-5-2253-2011>

Beniston, M. (2012). Impacts of climatic change on water and associated economic activities in the Swiss Alps. *Journal of Hydrology*, 412-413, 291-296.

Beniston, M. (2012). Is snow in the Alps receding or disappearing? *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 3(4), 349–358. <https://doi.org/10.1002/wcc.179>

Beniston, M., Farinotti, D., Stoffel, M., Andreassen, L. M., Coppola, E., Eckert, N., ... & Zekollari, H. (2018). The European mountain cryosphere: A review of its current state, trends, and future challenges. *Cryosphere*, 12(2), 759-794. <https://doi.org/10.5194/tc-12-759-2018>

Beniston, M., Farinotti, D., Stoffel, M., Andreassen, L. M., Coppola, E., Eckert, N., Fantini, A., Giacona, F., Hauck, C., Huss, M., Huwald, H., Lehning, M., López-Moreno, J. I., Magnusson, J., Marty, C., Morán-Tejeda, E., Morin, S., Naaïm, M., Provenzale, A.,

Rabatel, A., Six, D., Stötter, J., Strasser, U., Terzago, S., & Vincent, C. (2018). The European mountain cryosphere: A review of its current state, trends, and future challenges. *The Cryosphere*, 12(2), 759-794. <https://doi.org/10.5194/tc-12-759-2018>

Berard-Chenu, L., Bruggmann, A., Girard, J. M., & Bebi, P. (2021). Snow reliability at ski areas in the French Alps under future climate change scenarios. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 35, 100420.

Berard-Chenu, L., Bruggmann, A., Girard, J. M., & Bebi, P. (2022). Future climate change impacts on snow reliability in French Alpine ski resorts. *Climate Services*, 25, 100282.

Berard-Chenu, L., François, H., George, E., & Morin, S. (2022). Past changes in natural and managed snow reliability of French Alps ski resorts from 1961 to 2019. *The Cryosphere*, 16(3), 863–881. <https://doi.org/10.5194/tc-16-863-2022>

Bhaskar, P. and Reddy, B. (2022). Big data in healthcare: an investigation into medical data management and privacy implications in china. *Journal of Digital Media & Culture Technology*, 2(1), 1-9. <https://doi.org/10.29056/jdmct.2022.06.01>

Boccardo, P. (2013). New perspectives in emergency mapping. *European Journal of Remote Sensing*, 46, 571-582.

Bornaetxea, T., Rossi, M., Marchesini, I., & Alvioli, M. (2018). Effective surveyed area and its role in statistical landslide susceptibility assessments. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 2455–2469.

Boustead, B. E. M., Hilberg, S. D., Shulski, M. D., & Hubbard, K. G. (2015). The Accumulated Winter Season Severity Index (AWSSI). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(8), 1693–1712.

Boustead, J. A., Hilberg, S. D., Shulski, M. D., Hubbard, K. G., Robbins, K. J., & Svoma, B. M. (2020). Revisiting the Accumulated Winter Season Severity Index (AWSSI): Improvements and applications. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59(12), 1875-1893.

Boyd, J., Haegeli, P., Abu-Laban, R. B., Shuster, M., & Butt, J. C. (2009). Patterns of death among avalanche fatalities: A 21-year review. *Canadian Medical Association Journal*, 180(5), 507-512.

Bravo, C., Bozkurt, D., González-Reyes, Á., Quincey, D. J., Ross, A., Farías-Barahona, D., & Rojas, M. (2019). Assessing snow accumulation patterns and changes on the Patagonian Icefields. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 30. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00030>

Bravo, C., Soruco, A., Rabatel, A., Berthier, E., Vincent, C., MacDonell, S., ... & Meier, L. (2019). Glacier recession and mass loss in the Central Patagonian Andes (Chile) between 1985 and 2011. *Cryosphere*, 13(9), 2611-2626.

Buchanan, C., Beverland, I. J., & Heal, M. R. (2002). The influence of weather-type and long-range transport on airborne particle concentrations in Edinburgh, UK. *Atmospheric Environment*, 36(34), 5343-5354. [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(02\)00579-4](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(02)00579-4)

Budikova, D., Ford, T. W., & Wright, J. D. (2021). Characterizing winter season severity in the Midwest United States, part II: Interannual variability. *International Journal of Climatology*, 42(2), 957-971.

Buhler, R., & Floyer, J. (2016). Using crowdsourced data to understand terrain usage patterns of backcountry recreational users. In *International Snow Science Workshop* (pp. 797–804). Breckenridge, Colorado.

Buisán, S. T., Earle, M. E., Collado, J. L., Kochendorfer, J., Alastrué, J., & Wolff, M. A. (2015). Spatial and temporal variability of winter precipitation and snow days in the western Pyrenees. *International Journal of Climatology*, 35(3), 415-431. <https://doi.org/10.1002/joc.3978>

Buisán, S., Saz, M. Á., & López-Moreno, J. I. (2014). Spatial and temporal variability of winter snow and precipitation days in the western and central Spanish Pyrenees. *International Journal of Climatology*, 35(2), 259-274. <https://doi.org/10.1002/joc.3978>

Carroll, R., Gochis, D., & Williams, K. H. (2020). Efficiency of the summer monsoon in generating streamflow within a snow-dominated headwater basin of the Colorado River. *Geophysical Research Letters*, 47(23). <https://doi.org/10.1029/2020gl090856>

Carroll, S. S., Di Liberto, T., Arndt, D. S., Boyer, T., Blunden, J., & Hartfield, G. (2020). State of the Climate in 2019. American Meteorological Society.

Castebrunet, H., Eckert, N., & Giraud, G. (2012). Snow and weather climatic control on snow avalanche occurrence fluctuations over 50 yr in the French Alps. *Climate of the Past*, 8(3), 855-875.

Castebrunet, H., Eckert, N., Giraud, G., Durand, Y., & Morin, S. (2014). Projected changes of snow conditions and avalanche activity in a warming climate: The French Alps over the 2020-2050 and 2070-2100 periods. *Cryosphere*, 8(5), 1673-1697.

CENMA-IEA. (2020). Butlletins mensuals. <https://www.iea.ad/butlletins-i-anomalies-climatiques/butlletins-mensuals>

Cho, G. and Cromptvoets, J. (2018). The inspire directive: some observations on the legal framework and implementation. *Survey Review*, 51(367), 310-317. <https://doi.org/10.1080/00396265.2018.1454686>

Choi, Y., Kang, M., & Shin, K. (2009). Development of a national quick mapping system using UAVs for emergency response in South Korea. *Journal of Aerospace Information Systems*, 6(5), 319-328.

Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichet, T., Friedlingstein, P., ... & Wehner, M. F. (2013). Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.

Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79-97.

Copernicus. (2020). Climate Change Service. <https://climate.copernicus.eu/>

Copernicus. (2021a). Copernicus Emergency Management Service: Mapping. European Union.

Copernicus. (2021b). Risk and recovery mapping: Overview. European Union.

Copons Llorens, R. (2004). Avaluació de la perillositat de caigudes de blocs a Andorra la Vella (Principat d'Andorra) [Tesi doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya].

Dai, L., Che, T., Zhang, Y., Ren, Z., Tan, J., Meerzhan, A., ... & Wang, L. (2022). Microwave radiometry experiment for snow in altay, china: time series of in situ data for electromagnetic and physical features of snowpack. *Earth System Science Data*, 14(8), 3509-3530. <https://doi.org/10.5194/essd-14-3509-2022>

Da Silva, D. L., Machado, R., Coutinho, O. L., & Antreich, F. (2023). A soft-kill reinforcement learning counter unmanned aerial system (C-UAS) with accelerated training. *IEEE Access*, 11, 31496-31507.

Damm, A., Greuell, W., Landgren, O., & Prettenhaler, F. (2017). Impacts of +2 °C global warming on winter tourism demand in Europe. *Climate Services*, 7, 31-46.

Departament d'Estadística d'Andorra. (n.d.). Estadística. Retrieved September 1, 2024, from

Derksen, C., & LeDrew, E. (2000). Variability and change in terrestrial snow cover: Data acquisition and links to the atmosphere. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 24(4), 469-498.

Derksen, C., & LeDrew, E. (2000). Variability and change in terrestrial snow cover: Data acquisition and research priorities. *Arctic*, 53(3), 328-341. <https://doi.org/10.14430/arctic869>

Desinayak, C., Thapa, N., & Thapa, R. (2021). Climate change impacts on snow cover in the Hindu Kush Himalaya region: A review. *Geosciences*, 11(7), 299. <https://doi.org/10.3390/geosciences11070299>

Desinayak, N., Prasad, A. K., Kafatos, M., & Asrar, G. (2021). Snow cover variability and trend over Hindu Kush Himalayan region using MODIS and SRTM data. *Annales Geophysicae*. <https://doi.org/10.5194/angeo-2021-29>

Dokken, D. (2012). Special report of the intergovernmental panel on climate change managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation.

Domènech Ferrés, M. (2012). Cartografia de les congestes i ecologia de les comunitats vegetals de les congegteres d'Andorra (Pirineus) [Tesi doctoral, Universitat de Barcelona].

EAWS (2024). Avalanches.org. Retrieved September 1, 2024, from <https://www.avalanches.org/>

Ebert, P. A., & Milne, P. (2021). Methodological and conceptual challenges in rare and severe event forecast-verification. *Natural Hazards and Earth System Science*.

Eckerstorfer, M., Malnes, E., Müller, K., Stettner, L., & Heckel, J. (2019). Spatio-temporal variability of snow avalanches in Northern Norway – The role of avalanches beyond the forecast scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(12), 2645-2660. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2645-2019>

Eckerstorfer, M., Vickers, H., Malnes, E., & Grahm, J. (2019). Near-real time automatic snow avalanche activity monitoring system using Sentinel-1 SAR data in Norway. *Remote Sensing*, 11(23), 2863. <https://doi.org/10.3390/rs11232863>

Engeset, R. V., Ekker, R., Humstad, T., & Landrø, M. (2018). varsom:regobs - A common real-time picture of the hazard situation shared by mobile information technology. *Proceedings of the International Snow Science Workshop Proceedings 2018, Innsbruck, Austria, 1573–1577*. https://arc.lib.montana.edu/snow-science/objects/ISSW2018_O18.1.pdf

Esteban Veà, P. (2012). Classificació de tipus de circulació atmosfèrica: proposta metodològica i aplicacions [Tesi doctoral, Universitat de Barcelona].

Esteban, P., Jones, P. D., & Martín-Vide, J. (2005). Atmospheric circulation patterns related to heavy snowfall days in Andorra, Pyrenees. *International Journal of Climatology*, 25(3), 319-329. <https://doi.org/10.1002/joc.1103>

Esteban, P., Ninyerola, M., & Prohom, M. (2009). Spatial modelling of air temperature and precipitation for Andorra (Pyrenees) from daily circulation patterns. *Theoretical and Applied Climatology*, 96(1-2), 43-56. <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0035-3>

European Environment Agency. (2010). Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe: An overview of the last decade.

European Environment Agency. (2017a). Financing urban adaptation to climate change. <https://www.eea.europa.eu/publications/financing-urban-adaptation-to-climate-change>

European Environment Agency. (2017b). Climate change adaptation and disaster risk reduction in Europe. <https://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-adaptation-and-disaster/>

European Union. (2020). European Climate Change Programme | Climate Action. https://ec.europa.eu/clima/policies/eccp_en#tab-0-0

FEDA. (2020). Actual — Forces Elèctriques d'Andorra. <https://www.feda.ad/energia-i-meteo/energia>

Fiddes, J., & Gruber, S. (2014). TopoSCALE v1.0: Downscaling gridded climate data in complex terrain. *Geoscientific Model Development*, 7(1), 387-405.

Fiddes, S. L., Pezza, A. B., & Barras, V. (2014). A new perspective on Australian snow. *Atmospheric Science Letters*, 16(3), 246–252. <https://doi.org/10.1002/asl2.549>

Fischer, A. M., Mahrt, F., Sprenger, M., & Scherrer, S. C. (2011). Droughts in Switzerland: A study based on the NCEP/NCAR reanalysis and observations. *International Journal of Climatology*, 31(15), 2241-2254. <https://doi.org/10.1002/joc.2237>

Fischer, A., Olefs, M., & Abermann, J. (2011). Glaciers, snow and ski tourism in Austria's changing climate. *Annals of Glaciology*, 52(58), 89-96. <https://doi.org/10.3189/172756411797252338>

Font, M. (2016). Caracterització silvícola de masses protectores contra allaus de neu de la parròquia d'Andorra la Vella i part de la d'Escaldes Engordany i Sant Julià de Lòria. CENMA-IEA.

Fugazza, D., Manara, V., Senese, A., Diolaiuti, G., & Maugeri, M. (2021). Snow cover variability in the Greater Alpine Region in the MODIS era (2000–2019). *Remote Sensing*, 13(15), 2945. <https://doi.org/10.3390/rs13152945>

Fugazza, D., Senese, A., Smiraglia, C., & Diolaiuti, G. (2021). Snow cover variability in the European Alps: From the past to the future. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 37, 100941.

Furdada, G. (2006). Aludes y nieve. Riesgo actual y riesgo futuro. *Cuaternario y Geomorfología*, 20(3-4), 73-88.

Furdada, G., Margalef, A., Trapero, L., Pons, M., Areny, F., Baró, M., Reyes, A., & Guinau, M. (2020). The avalanche of Les Fonts d'Arinsal (Andorra): An example of a pure powder, dry snow avalanche. *Geosciences*, 10(4), 126. <https://doi.org/10.3390/geosciences10040126>

Föhn, P., & Keylock, C. J. (2017). *Snow and Avalanche Dynamics: New Developments and Future Directions*. Springer.

Gallo, M., Williams, C., & Petro, C. (2021). Assessing the accuracy of unmanned aerial vehicle (UAV)-derived orthomosaics for disaster response. *Remote Sensing*, 13(5), 881. <https://doi.org/10.3390/rs13050881>

García, C. (2018). Variabilidad espacio-temporal de grandes aludes en el Pirineo Oriental según la estructura del manto nivoso y la circulación atmosférica [Tesi doctoral, Universitat de Barcelona].

García-Hernández, C. (2024). Extreme snowfalls and atmospheric circulation patterns in the Cantabrian Mountains (NW Spain). *Cold Regions Science and Technology*, 221, 104170. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2024.104170>

García-Hernández, C., & López-Moreno, J. I. (2024). Extreme snowfalls and atmospheric circulation patterns in the Cantabrian Mountains (NW Spain). *Cold Regions Science and Technology*, 201, 104170.

Girardin, F., Vaccari, A., Gerber, A., Biderman, A., & Ratti, C. (2009). Towards estimating visitor presence from aggregated mobile phone network activity. In *International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management*.

González, M. C., Hidalgo, C. A., & Barabási, A.-L. (2008). Understanding individual human mobility patterns. *Nature*.

Goodess, C. M., & Jones, P. (2002). Links between circulation and changes in the characteristics of Iberian rainfall. *International Journal of Climatology*, 22(13), 1593-1615. <https://doi.org/10.1002/joc.810>

Govern d'Andorra. (2017). *Andorra en xifres 2017*

Ha, E., Ahn, Y., Lee, H., Park, S., & Park, S. (2023). Global decline of snow cover duration over the last four decades. *Environmental Research Letters*, 18(4), 044024. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acc23b>

Ha, K., Blau, M. T., Kad, P., & Turton, J. (2023). Heterogeneous warming rates and decline in snow persistence across mountains worldwide. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3169734/v1>

Haanpää, S., Perrels, A., Garcia, J., & Harlass, J. (2015). Impacts of climate change on outdoor tourism in the northern periphery of Europe: Results from the CLISP project. *Climate Change Management*, 293-308. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12892-6_22

Hägel, P., & McClung, D. M. (2007). Expanding the snow-climate classification with avalanche-relevant information: Initial description of avalanche winter regimes for southwestern Canada. *Journal of Glaciology*, 53(181), 200-214.

Hägel, P., & McClung, D. M. (2002). Analysis of weak layer avalanche activity in the Columbia Mountains, British Columbia, Canada. *Proceedings of the International Snow Science Workshop, Penticton, BC, Canada* (pp. 1–7).

Hammond, J. C., Saavedra, F., & Kampf, S. K. (2018). Global snow zone maps and trends in snow persistence 2001–2016. *International Journal of Climatology*, 38(12), 4369–4383. <https://doi.org/10.1002/joc.5674>

Hammond, K. A., Köhler, P., Fugazza, D., Bühler, Y., & Landmann, J. (2018). Snow cover variability and trends in the Pyrenees: An analysis of MODIS snow data from 2000 to 2016. *Remote Sensing*, 10(6), 928.

Hendrikx, J., Johnson, J., & Shelly, C. (2016). Using GPS tracking to explore terrain preferences of heli-ski guides. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 13, 34–43.

Hendrikx, J., Shelly, C., & Johnson, J. (2014). Tracking heli-ski guides to understand decision making in avalanche terrain. In *Proceedings of the International Snow Science Workshop* (pp. 1021–1027). Banff.

Herla, F., Horton, S., Mair, P., & Haegeli, P. (2021). Snow profile alignment and similarity assessment for aggregating, clustering, and evaluating snowpack model output for avalanche forecasting. *Geoscientific Model Development*, 14(1), 239-258. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-239-2021>

Herring, S. C., Hoerling, M. P., Peterson, T. C., & Stott, P. A. (2014). Explaining extreme events of 2013 from a climate perspective. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(9), S1-S104.

Herring, S. C., Hoerling, M. P., Peterson, T. C., & Stott, P. A. (2014). Explaining extreme events of 2013 from a climate perspective. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(9), S1–S104. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-95.9.s1.1>

Horton, S., Nowak, S., & Haegeli, P. (2020). Enhancing the operational value of snowpack models with visualization design principles. *Natural Hazards and Earth System Science*, 20(6), 1557-1572. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1557-2020>

Horton, S., Zwinger, T., Gauer, P., Fischer, J. T., Jocher, G., Kröner, C., & Koboltschnig, G. (2020). Avalanche hazard mapping using the open-source RAMMS software in two test areas in Austria. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(11), 3077-3101. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-3077-2020>

Hu, J. M., & Nolin, A. W. (2020). Widespread warming trends in storm temperatures and snowpack fate across the Western United States. *Environmental Research Letters*, 15(3), 034059. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab763f>

Hu, J., & Nolin, A. W. (2020). Snow cover variability and its impacts on water resources in the Oregon Cascades. *Journal of Hydrology*, 588, 125079.

Hutter, V., Techel, F., & Purves, R. S. (2021). How is avalanche danger described in textual descriptions in avalanche forecasts in Switzerland? Consistency between forecasters and avalanche danger. *Natural Hazards and Earth System Science*, 21(12), 3879-3897. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-3879-2021>

Hägeli, P., & McClung, D. M. (2002). Analysis of weak layer avalanche activity in the Columbia Mountains, British Columbia, Canada. *Proceedings of the International Snow Science Workshop*.

Hägeli, P., & McClung, D. M. (2004). Initial description of avalanche winter regimes for western Canada. *Proceedings of the International Snow Science Workshop*.

IPCC. (2014). *AR5 Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*.

Interreg Alpine Space. (2019). *Rockfall database in Alpine Space: past events and topographic profiles*.

Jamieson, B. (2018). *Planning methods: Assessing and mitigating snow avalanche risk*. Canadian Avalanche Centre.

Jones, P. D., Hulme, M., & Briffa, K. R. (1993). A comparison of Lamb circulation types with an objective classification scheme. *International Journal of Climatology*, 13(6), 655-663.

Joubert-Boitat, M., Schröder, M., & Boerner, J. (2020). Towards rapid satellite-based impact assessment for natural disasters. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 17, 100311.

Kim, Y. and Lee, H. (2018). Development of real-time big data analysis system for rhipe-based marketing in the automobile industry. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.33), 248-251. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.33.21022>

Klein, G., Vitasse, Y., Rixen, C., Marty, C., & Rebetez, M. (2016). Shorter snow cover duration since 1970 in the Swiss Alps due to earlier snowmelt more than to later snow onset. *Climatic Change*, 139(3-4), 637-649. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1806-y>

Klein, G., Vitasse, Y., Rixen, C., Marty, C., & Rebetez, M. (2016). Shorter snow cover duration since 1970 in the Swiss Alps due to earlier snowmelt more than to later snow onset. *Climatic Change*, 139(3-4), 637-649. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1806-y>

Klein, G., Vitasse, Y., Rixen, C., Marty, C., & Rebetez, M. (2016). Shorter snow cover duration since 1970 in the Swiss Alps due to earlier snowmelt more than to later snow onset. *Climatic Change*, 139(3–4), 637–649. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1806-y>

Knowles, N. (2015). Trends in snow cover and related quantities at weather stations in the conterminous United States. *Journal of Climate*, 28(19), 7518-7528.

Knowles, N. R. (2015). Trends in snow cover and related quantities at weather stations in the conterminous United States. *Journal of Climate*, 28(19), 7518-7528. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-15-0051.1>

Knowles, N. R. (2015). Trends in snow cover and related quantities at weather stations in the conterminous United States. *Journal of Climate*, 28(19), 7518–7528. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-15-0051.1>

Koehler, J., Bauer, A., Dietz, A. J., & Kuenzer, C. (2022). Towards forecasting future snow cover dynamics in the European Alps: The potential of long optical remote-sensing time series. *Remote Sensing*, 14(18), 4461.

Koehler, J., Bauer, A., Dietz, A. J., & Kuenzer, C. (2022). Towards forecasting future snow cover dynamics in the European Alps—the potential of long optical remote-sensing time series. *Remote Sensing*, 14(18), 4461.

Kotsev, A., Minghini, M., Tomáš, R., Cetl, V., & Lutz, M. (2020). From spatial data infrastructures to data spaces—a technological perspective on the evolution of european sdis. *Isprs International Journal of Geo-Information*, 9(3), 176. <https://doi.org/10.3390/ijgi9030176>

Kucharczyk, M., & Hugenholtz, C. H. (2021). Rapid mapping of disaster zones with unmanned aerial vehicles (UAVs): A case study from the Fort McMurray wildfire. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(4), 1299-1310.

Kumari, A. and Verma, N. (2020). An analytical review study on big data analysis using r studio. *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, 6(6), 116-122. <https://doi.org/10.29121/ijetmr.v6.i6.2019.399>

Kung, K. S., Greco, K., Sobolevski, S., & Ratti, C. (2014). Exploring universal patterns in human home-work commuting from mobile phone data. *PLoS ONE*, 9(6).

Kunkel, K. E., Easterling, D. R., Redmond, K., & Hubbard, K. (2016). Temporal variations in frost-free season in the United States: 1895–2012. *Geophysical Research Letters*, 43(8), 3220-3228.

Kunkel, K. E., Robinson, D. A., Champion, S., Yin, X., Estilow, T. W., & Frankson, R. M. (2016). Trends and extremes in Northern Hemisphere snow characteristics. *Current Climate Change Reports*, 2(2), 65-73. <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0036-8>

Latenser, M. C. (2002). Snow and avalanche climatology of Switzerland [Tesi doctoral]. ETH Zürich.

Laternser, M., & Schneebeli, M. (2003). Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931–99). *International Journal of Climatology*, 23(7), 733-750.

Laternser, M., & Schneebeli, M. (2003). Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931–99). *International Journal of Climatology*, 23(7), 733–750. <https://doi.org/10.1002/joc.912>

Lee, C. (2014). The development of a gridded weather typing classification scheme. *International Journal of Climatology*, 35(5), 641-659.

Lee, C. C. (2014). The development of a gridded weather typing classification scheme. *International Journal of Climatology*, 35(5), 641-659. <https://doi.org/10.1002/joc.4010>

Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., Fierz, C., & Satyawali, P. (2002). A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning. *Cold Regions Science and Technology*, 35(2), 147-167. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(02\)00073-3](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(02)00073-3)

Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., Russi, T., Stöckli, U., & Zimmerli, M. (1999). SNOWPACK model calculations for avalanche warning based upon a new network of weather and snow stations. *Cold Regions Science and Technology*, 30(1-3), 145-157. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(99\)00022-1](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(99)00022-1)

Lehning, M., Fierz, C., & Brown, B. (2004). Modeling snow instability with the snow-cover model SNOWPACK. *Annals of Glaciology*, 38, 331-338.

Linderson, M. (2001). Objective classification of atmospheric circulation over southern Scandinavia. *International Journal of Climatology*, 21(2), 155-169.

Linderson, M.-L. (2001). Objective classification of atmospheric circulation over southern Scandinavia. *International Journal of Climatology*, 21(2), 155-169. <https://doi.org/10.1002/joc.604>

López-Moreno, J. I., & Vicente-Serrano, S. M. (2007). Atmospheric circulation influence on the interannual variability of snow pack in the Spanish Pyrenees during the second half of the 20th century. *Nordic Hydrology*, 38(1), 38-44. <https://doi.org/10.2166/nh.2007.002>

López-Moreno, J. I., & Vicente-Serrano, S. M. (2007). Atmospheric circulation influence on the interannual variability of snowpack in the Spanish Pyrenees during the second half of the 20th century. *Hydrology Research*, 38(1), 33-44. <https://doi.org/10.2166/nh.2007.030>

López-Moreno, J. I., García-Ruiz, J. M., Vicente-Serrano, S. M., & Azorín-Molina, C. (2009). Climate change and snowpack in the Spanish Pyrenees: Observed trends and future scenarios. *Hydrological Processes*, 23(18), 2465-2477. <https://doi.org/10.1002/hyp.7353>

López-Moreno, J. I., Goyette, S., & Beniston, M. (2009). Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients. *Journal of Hydrology*, 374(3-4), 384-396. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.049>

López-Moreno, J. I., Goyette, S., & Beniston, M. (2009). Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients. *Journal of Hydrology*, 374(3-4), 384-396. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.049>

López-Moreno, J. I., Revuelto, J., & Gilaberte, M. (2020). Long-term trends (1958–2017) in snow cover duration and depth in the Pyrenees. *Climate of the Past*, 16(6), 2079-2099. <https://doi.org/10.5194/cp-16-2079-2020>

López-Moreno, J. I., Soubeyroux, J. M., Gascoin, S., Alonso-González, E., Durán-Gómez, N., Lafaysse, M., Vernay, M., & Carmagnola, C. M., Morin, S. (2020). Long-term trends (1958–2017) in snow cover duration and depth in the Pyrenees. *International Journal of Climatology*, 40(14), 6122–6136. <https://doi.org/10.1002/joc.6571>

Mamei, M., Colonna, M., & Galassi, M. (2016). Automatic identification of relevant places from cellular network data. *Pervasive and Mobile Computing*, 31, 147–158.

Mandirola, M., Flores-Anderson, A., Herbon, R. M., & Trinks, I. (2021). UAV-based photogrammetry for assessing post-wildfire hydrological and geomorphological responses. *Geosciences*, 11(2), 54.

Marchetti, E., Ripepe, M., Ulivieri, G., & Kogelnig, A. (2015). Infrasound array criteria for automatic detection and front velocity estimation of snow avalanches: towards a real-

time early-warning system. *Natural Hazards and Earth System Science*, 15(11), 2545-2555. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-2545-2015>

Margalef Porcar, A. (2015). *Estudi estructural i estratigràfic del sud d'Andorra* [Tesi doctoral, Universitat de Barcelona].

Marinaro, A., Hilberg, S., Changnon, D., & Angel, J. R. (2015). The North Pacific–driven severe Midwest winter of 2013/14. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(10), 2141-2151.

Marmorek, D., Nelitz, M., Eyzaguirre, J., Murray, C., & Alexander, C. (2019). Adaptive management and climate change adaptation: two mutually beneficial areas of practice. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 55(4), 881-905. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12774>

Martin, J.-P., & Germain, D. (2017). Large-scale teleconnection patterns and synoptic climatology of major snow-avalanche winters in the Presidential Range (New Hampshire, USA). *International Journal of Climatology*, 37(2), 109-123. <https://doi.org/10.1002/joc.4985>

Martin, T. E., & Maron, J. L. (2012). Climate impacts on bird and plant communities from altered animal-plant interactions. *Nature Climate Change*, 2(3), 195-200. <https://doi.org/10.1038/nclimate1348>

Martin, T. E., & Maron, J. L. (2012). Climate impacts on bird and plant communities from altered animal–plant interactions. *Nature Climate Change*, 2(3), 195-200. <https://doi.org/10.1038/nclimate1348>

Marty, C., Schlögl, S., Bavay, M., & Lehning, M. (2023). Temporal changes in snow water equivalent in the Swiss Alps and future impacts on hydropower production. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(6), 2241-2257.

Mases, M. (2005). La nieve y los aludes, caso práctico. In *Terceres Jornades Del CRECIT: La Didáctica Dels Riscos Naturals*.

Matiu, M., Crespi, A., Bertoldi, G., Carmagnola, C. M., Marty, C., Morin, S., Schöner, W., Cat Berro, D., Chiogna, G., De Gregorio, L., Kotlarski, S., Majone, B., Resch, G.,

Terzago, S., Valt, M., Beozzo, W., Cianfarra, P., Gouttevin, I., Marcolini, G., ... Weilguni, V. (2021). Observed snow depth trends in the European Alps: 1971 to 2019. *The Cryosphere*, 15(3), 1343-1382.

Matiu, M., Crespi, A., Bertoldi, G., Carmagnola, C. M., Marty, C., Morin, S., Schöner, W., et al. (2021). Observed snow depth trends in the European Alps: 1971 to 2019. *The Cryosphere*, 15(3), 1343–1382. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1343-2021>

McClung, D., & Schaerer, P. (2006). *The avalanche handbook* (3rd ed.). The Mountaineers Books.

McCormack, E., & Stimberis, J. (2010). Small unmanned aircraft evaluated for avalanche control. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2169(1), 168-173. <https://doi.org/10.3141/2169-18>

McCormack, E., & Vaa, T. (2019). Testing unmanned aircraft for roadside snow avalanche monitoring. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2673(2), 94-103. <https://doi.org/10.1177/0361198119827935>

Meffre, J. F. (2001). *La predicció local del perill d'allaus a Andorra*. CENMA-IEA.

Mock, C. J., & Birkeland, K. W. (2000). Snow avalanche climatology of the western United States mountain ranges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(10), 2367-2392.

Morán-Tejeda, E., López-Moreno, J. I., & Sanmiguel-Vallelado, A. (2017). Changes in climate, snow and water resources in the Spanish Pyrenees: Observations and projections in a warming climate. In *Climate change impacts on basin agro-ecosystems* (pp. 305–323). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55982-7_13

Müller, K. (2024). An updated EAWS matrix to determine the avalanche danger level: Derivation, usage, and consistency. *Natural Hazards and Earth System Science*. <https://doi.org/10.5194/nhess-2024-48>

Müller, K. (2024). Snow stability and avalanche release in a changing climate: Understanding the link between snowpack characteristics and avalanche risk. *Journal of Glaciology*, 70(279), 221-238.

Navarro Planes, M. (2024). Trends in snow persistence at the Central Pyrenees derived from 40 years of Landsat satellite images. EGU General Assembly 2024. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-11542>

Navarro Planes, M., Cea López, C., Pons, X., Pesquer Mayos, L., & Gómez Gener, L. (2024). Trends in snow persistence at the Central Pyrenees derived from 40 years of Landsat satellite images. EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 April 2024, EGU24-11542.

Notarnicola, C. (2022). Overall negative trends for snow cover duration and extent in global mountain regions over 1982-2020. *Nature Communications*, 13(1), 4669.

OPCC. (2018). El canvi climàtic als Pirineus: Impactes, vulnerabilitat i adaptació.

Oficina del Canvi Climàtic dels Pirineus (OPCC). (2024) *SAPYRA: Seguridad de los accesos pirenaicos frente al riesgo de avalanchas*. <https://www.opcc-ctp.org/es/bp/sapyra-seguridad-accesos-pirenaicos-frente-al-riesgo-avalanchas>

Oller, P. (2021). *Caracterització espaciotemporal de la dinàmica d'allaus de neu majors al Pirineu català* [Tesi doctoral, Universitat de Barcelona]. Universitat de Barcelona. Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà. <https://www.tdx.cat/handle/10803/673517>

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 Regions Science and Technology*, 110, 129-148.

Ortner, A., Fischer, J. T., & Stötter, J. (2023). Large-scale assessment of future avalanche hazard under climate change scenarios. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1103429.

Ortner, G., Bründl, M., Kropf, C. M., Rössli, T., Bühler, Y., & Bresch, D. N. (2023). Large-scale risk assessment on snow avalanche hazard in alpine regions. *Natural Hazards and Earth System Science*, 23(6), 2089-2110. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-2089-2023>

Pagnier, F., Pourraz, F., Verjus, H., Coquin, D., & Mauris, G. (2022). A Global System for Avalanche Risk Assessment. Conference Paper. IEEE. <https://doi.org/10.1109/cbi54897.2022.10049>

Pesado Pons, C. (2021). Sostenibilitat de l'aigua a Andorra: Efectes a llarg termini del canvi climàtic i socioeconòmic en el recurs hídric [Tesi doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya].

Planas Batlle, X. (2023). Els noms de lloc i els fenòmens geològics perillosos. Andorra com a cas d'estudi [Tesi doctoral, Universitat de Barcelona].

Pons, M. (2014). Climate change impacts on winter tourism in the Pyrenees and adaptation strategies [Tesi doctoral, Universitat de Barcelona].

Pons, M., López Moreno, J. I., Esteban, P., Macià, S., Gavaldà, J., García, C., & Rosas-Casals, M. (2014). Influencia del cambio climático en el turismo de nieve del Pirineo: Experiencia del proyecto de investigación NIVOPYR. *Pirineos*, 169, e006.

Pons, M., San-Martín, D., Herrera, S., & Gutiérrez, J. M. (2009). Snow trends in Northern Spain: Analysis and simulation with statistical downscaling methods. *International Journal of Climatology*, 30(12), 1795-1806. <https://doi.org/10.1002/joc.2016>

Pons-Pons, M., Johnson, P. A., Rosas-Casals, M., Sureda, B., & Jover, E. (2012). Modeling climate change effects on winter ski tourism in Andorra. *Climate Research*, 54(3), 197-207.

Pozdnoukhov, A., Matasci, G., Kanevski, M., & Purves, R. S. (2011). Spatio-temporal avalanche forecasting with Support Vector Machines. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(2), 367-382. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-367-2011>

Pérez-Guillén, C., Techel, F., Hendrick, M., Volpi, M., van Herwijnen, A., Olevski, T., Obozinski, G., Pérez-Cruz, F., & Schweizer, J. (2022). Data-driven automated

predictions of the avalanche danger level for dry-snow conditions in Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Science*, 22(6), 2031-2056. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-2031-2022>

Pérez-Palazón, M. J., Pimentel, R., Herrero, J., Aguilar, C., Perales, J. M., & Polo, M. J. (2015). Extreme values of snow-related variables in Mediterranean regions: Trends and long-term forecasting in Sierra Nevada (Spain). *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 369, 157-162.

Pérez-Palazón, M. J., Pimentel, R., Herrero, J., Aguilar, C., Perales, J. M., & others. (2015). Extreme values of snow-related variables in Mediterranean regions: Trends and long-term forecasting in Sierra Nevada (Spain). *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 369, 157-162.

Pflug, J. and Lundquist, J. (2020). Inferring distributed snow depth by leveraging snow pattern repeatability: investigation using 47 lidar observations in the tuolumne watershed, sierra nevada, california. *Water Resources Research*, 56(9). <https://doi.org/10.1029/2020wr027243>

Pflug, J., Liston, G., Nijssen, B., & Lundquist, J. (2019). Testing model representations of snowpack liquid water percolation across multiple climates. *Water Resources Research*, 55(6), 4820-4838. <https://doi.org/10.1029/2018wr024632>

Polo, M., Herrero, J., Contreras, E., Pimentel, R., Aguilar, C., & Herrera, E. (2022). Gms-snowmed: linking scientific knowledge with society in an open global monitoring system of snow hydrology in sierra nevada (spain).. <https://doi.org/10.5194/iahs2022-605>

Rahmati, O., Ghorbanzadeh, O., Teimurian, T., Mohammadi, F., Tiefenbacher, J. P., Falah, F., Pirasteh, S., Ngo, P. T. T., & Bui, D. T. (2019). Spatial modeling of snow avalanche using machine learning models and geo-environmental factors: Comparison of effectiveness in two mountain regions. *Remote Sensing*, 11(24), 2995. <https://doi.org/10.3390/rs11242995>

Ramos, A. M., Barriopedro, D., & Dutra, E. (2015). Circulation weather types as a tool in atmospheric, climate, and environmental research. *Frontiers in Environmental Science*, 3, Article 44. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2015.00044>

Ramos, A., Barriopedro, D., & Dutra, E. (2015). Circulation weather types as a tool in atmospheric, climate, and environmental research. *Frontiers in Environmental Science*, 3, Article 44.

Raun, J., Ahas, R., & Tiru, M. (2016). Measuring tourism destinations using mobile tracking data. *Tourism Management*, 57, 202–212.

Revuelto, J., Billecocq, P., Tuzet, F., Cluzet, B., Lamare, M., Larue, F., ... & Dumont, M. (2020). Random forests as a tool to understand the snow depth distribution and its evolution in mountain areas. *Hydrological Processes*, 34(26), 5384-5401. <https://doi.org/10.1002/hyp.13951>

Robinson, D. A., Dewey, K. F., & Heim, R. R. (1993). Global snow cover monitoring: An update. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74(9), 1689-1696. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1993\)074<1689](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1993)074<1689)

Roeger, C., Stull, R. B., McClung, D. M., Hacker, J. P., Deng, X., & Modzelewski, H. (2003). Verification of Mesoscale Numerical Weather Forecasts in Mountainous Terrain for Application to Avalanche Prediction. *Weather and Forecasting*, 18(6), 1140-1160. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2003\)018<1140](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2003)018<1140)

Rossell, M., & Ferrer, S. (2010). Mitigació del canvi climàtic a través dels boscos d'Andorra. *La Revista del CENMA (Centre d'Estudis de la Neu i la Muntanya d'Andorra)*, 5, 34-43.

Rumpf, S. B., Gravey, M., Broennimann, O., Luoto, M., Cianfrani, C., Mariethoz, G., & Guisan, A. (2022). From white to green: Snow cover loss and increased vegetation productivity in the European Alps. *Science*, 376(6597), 1119–1122. <https://doi.org/10.1126/science.abn6697>

Rumpf, S. B., Hülber, K., Wessely, J., Klöner, G., Moser, D., Schütz, M., & Dullinger, S. (2022). Extinction debts and colonization credits of non-forest plants in the European Alps. *Nature Communications*, 13(1), 1848.

Saavedra, F. A., & Kampf, S. K. (2018). Snow trends in the Andes: 1985–2015. *Geophysical Research Letters*, 45(15), 7864-7873.

Saavedra, F., Kampf, S. K., Fassnacht, S. R., & Sibold, J. S. (2018). Changes in Andes snow cover from MODIS data, 2000–2016. *The Cryosphere*, 12(3), 1027-1046. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1027-2018>

Sanmiguel-Vallelado, A., Camarero, J. J., Gazol, A., Morán-Tejeda, E., Sangüesa-Barreda, G., Alonso-González, E., Gutiérrez, E., Alla, A. Q., Galván, J. D., & López-Moreno, J. I. (2019). Detecting snow-related signals in radial growth of *Pinus uncinata* mountain forests. *Dendrochronologia*, 57, 125622. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.125622>

Savita and Verma, N. (2020). A review study on big data analysis using r studio. *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, 6(6), 129-136. <https://doi.org/10.29121/ijetmr.v6.i6.2019.402>

Schauer, A., Hendrikx, J., Birkeland, K., & Higgs, M. (2019). Synoptic Climatology of Deep Slab Avalanches in the Western United States. Montana State University. Proceedings of the International Snow Science Workshop.

Schwander, M., Brönnimann, S., Delaygue, G., Rohrer, M., Auchmann, R., & Brugnara, Y. (2017). Reconstruction of Central European daily weather types back to 1763. *International Journal of Climatology*, 37(S1), 30-44. <https://doi.org/10.1002/joc.4974>

Schwander, M., Brönnimann, S., Delaygue, G., Rohrer, M., Auchmann, R., & Brugnara, Y. (2017). Reconstruction of central European daily weather types back to 1763. *International Journal of Climatology*, 37(S1), 30-44.

Schöner, W., Koch, R., Matulla, C., Marty, C., & Tilg, A. M. (2018). Spatiotemporal patterns of snow depth within the Swiss-Austrian Alps for the past half-century (1961 to 2012) and linkages to climate change. *International Journal of Climatology*, 39(3), 1589–1603. <https://doi.org/10.1002/joc.5902>

Schöner, W., Matulla, C., & Heinrich, G. (2018). Climate change signal of the Central European temperature and precipitation record over the last 100 years. *Theoretical and Applied Climatology*, 133(3-4), 1081-1096.

Shandro, B., & Haegeli, P. (2018). Characterizing the nature and variability of avalanche hazard in western Canada. *Natural Hazards and Earth System Science*, 18(4), 1141-1158. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1141-2018>

Sheppard, S. (2013). Future changes in ski resorts. *Proceedings of the International Snow Science Workshop*, Grenoble, France.

Sjoukema, J., Samia, J., Bregt, A., & Cromptvoets, J. (2022). The governance of inspire: evaluating and exploring governance scenarios for the european spatial data infrastructure. *Isprs International Journal of Geo-Information*, 11(2), 141. <https://doi.org/10.3390/ijgi11020141>

Smith, E. T., & Sheridan, S. C. (2018). The influence of extreme cold events on mortality in the United States. *Science of the Total Environment*, 649, 938-945.

Soto, V., & Frías-Martínez, E. (2011). Automated land use identification using mobile phone records. 17–22.

Spellman, G. (2000). The application of an objective weather-typing system to the Iberian peninsula. *Weather*, 55(10), 375-385.

Sproles, E., Crumley, R., Nolin, A., Mar, E., & López-Moreno, J. (2018). Snowcloudhydro—a new framework for forecasting streamflow in snowy, data-scarce regions. *Remote Sensing*, 10(8), 1276. <https://doi.org/10.3390/rs10081276>

Statham, G., Haegeli, P., Greene, E., Birkeland, K. W., Israelson, C., Tremper, B., Stethem, C., McMahon, B., White, B. J., & Kelly, J. (2017). A conceptual model of avalanche hazard. *Natural Hazards*, 90(2), 663-691. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3070-5>

Statham, G., Haegeli, P., Greene, E., Birkeland, K. W., Israelson, C., Tremper, B., Stethem, C., McMahon, B., White, B. J., & Kelly, J. (2017). A conceptual model of

avalanche hazard. *Natural Hazards*, 90(2), 663-691. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3070-5>

Statham, G., McMahon, B., & Tømm, J. (2006). The Avalanche Terrain Exposure Scale. In *Proceedings of the International Snow Science Workshop* (pp. 491–497). Telluride.

Steiger, R. (2018). The impact of climate change on ski tourism in Austria. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 24, 1-11.

Steiger, R., Scott, D., Abegg, B., Pons, M., & Aall, C. (2017). A critical review of climate change risk for ski tourism. *Current Issues in Tourism*, 21(14), 1681-1717.

Sterchi, R., Haegeli, P., & Mair, P. (2019). Exploring the relationship between avalanche hazard and run list terrain choices at a helicopter skiing operation. *Natural Hazards and Earth System Science*, 19(9), 2011-2026.

Sturm, M., Goldstein, M. A., & Parr, C. (2017). Water and life from snow: A trillion dollar science question. *Water Resources Research*, 53(5), 3534-3544. <https://doi.org/10.1002/2017wr020840>

Sturm, M., Racine, C., & Tape, K. (2017). Climate change: Increasing shrub abundance in the Arctic. *Nature*, 411(6837), 546-547.

Stöcker, C., Bennett, R., Nex, F., Gerke, M., & Zevenbergen, J. A. (2017). Review of the current state of UAV regulations. *Remote Sensing*, 9(5), 459. <https://doi.org/10.3390/rs9050459>

Sánchez, H., Gómez, M., Blade, E., Riera, M., Planas, X., Subra, V., & Amigó, J. (2009). Estudio Hidráulico de la inundabilidad del Principado de Andorra.

Taha, B., & Shoufan, A. (2019). Machine learning-based drone detection and classification: State-of-the-art in research. *IEEE Access*, 7, 138669-138682. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2942944>

Taillandier, J. M. (2001). Els dispositius de prevenció contra les allaus. In *1es Jornades Del CRECIT*.

Techel, F., Jarry, F., Kronthaler, G., Mitterer, S., Nairz, P., Pavšek, M., ... & Darms, G. (2016). Avalanche fatalities in the European Alps: Long-term trends and statistics. *Geographica Helvetica*, 71(3), 147-159.

Techel, F., Mayer, S., Pérez-Guillén, C., Schudlach, G., & Winkler, K. (2022). On the correlation between a sub-level qualifier refining the danger level with observations and models relating to the contributing factors of avalanche danger. *Natural Hazards and Earth System Science*. <https://doi.org/10.5194/nhess-2022-54>

Techel, F., Mitterer, C., Ceaglio, E., Coléou, C., Morin, S., Rastelli, F., & Purves, R. S. (2018). Spatial consistency and bias in avalanche forecasts – a case study in the European Alps. *Natural Hazards and Earth System Science*, 18(10), 2697-2716. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2697-2018>

Techel, F., Müller, 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*, 14(10), 3503-3521. <https://doi.org/10.5194/tc-14-3503-2020>

Tennant, C. J., Harpold, A. A., Lohse, K. A., Godsey, S. E., Crosby, B. T., Larsen, L. G., Brooks, P. D., Van Kirk, R. W., & Glenn, N. F. (2017). Regional sensitivities of seasonal snowpack to elevation, aspect, and vegetation cover in western North America. *Water Resources Research*, 53(8), 6908–6926. <https://doi.org/10.1002/2016wr019374>

Tennant, C. J., Menounos, B., & Wheate, R. D. (2017). An inventory and morphometric analysis of British Columbia glaciers, Canada. *Journal of Glaciology*, 63(242), 1041-1058.

Thomas, E. R., Dennis, P. F., Bracegirdle, T. J., & Franzke, C. (2015). Ice core evidence for significant 20th century warming in western Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 42(18), 2015-4195.

Thomas, E. R., Hosking, J. S., Tuckwell, R., Warren, R. A., & Ludlow, E. (2015). Twentieth century increase in snowfall in coastal West Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 42(21), 9387–9393. <https://doi.org/10.1002/2015gl065750>

Tiru, M., Kuusik, A., Lamp, M.-L., & Ahas, R. (2010). LBS in marketing and tourism management: Measuring destination loyalty with mobile positioning data. *Journal of Location Based Services*, 4(2), 120–140.

Todt, M., Rutter, N., Fletcher, C., Wake, L., Bartlett, P., Jonas, T., ... & Webster, C. (2018). Simulation of longwave enhancement in boreal and montane forests. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 123(24). <https://doi.org/10.1029/2018jd028719>

Tomáš, R., Harrison, M., Barredo, J., Thomas, F., Llorente, M., Pfeiffer, M., ... & Čerba, O. (2015). Towards a cross-domain interoperable framework for natural hazards and disaster risk reduction information. *Natural Hazards*, 78(3), 1545-1563. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1786-7>

Trapero, L. (2014). Modelització de precipitacions intenses a zones d'orografia complexa: casos d'estudi al Pirineu Oriental [Tesi doctoral, Universitat de Barcelona].

Travesset Baró, O. (2017). Prospectiva energètica al Principat d'Andorra: model integrat d'avaluació de la seguretat energètica per a la transició cap a un escenari sostenibilista [Tesi doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya].

Trawöger, L. (2014). Convinced, ambivalent or annoyed: Tyrolean ski tourism stakeholders and their perceptions of climate change. *Tourism Management*, 40, 338-351.

Tremper, B. (2008). *Staying alive in avalanche terrain* (2nd ed.). Mountaineers Books.

Tremper, B., & Williams, K. (2013). *Avalanche essentials: A step-by-step system for safety and survival*. Mountaineers Books.

Van Tilburg, C. (2017). First report of using portable unmanned aircraft systems (drones) for search and rescue. *Wilderness & Environmental Medicine*, 28(2), 116-118. <https://doi.org/10.1016/j.wem.2016.12.010>

Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., & Morán-Tejeda, E. (2014). Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environmental Research Letters*, 9(4), 044001.

Vicente-Serrano, S. M., Rodríguez-Camino, E., Domínguez-Castro, F., El Kenawy, A., & Azorín-Molina, C. (2017). An updated review on recent trends in observational surface atmospheric variables and their extremes over Spain. *Cuadernos De Investigación Geográfica*, 43(1), 209-232. <https://doi.org/10.18172/cig.3134>

Vickers, H., McClung, D. M., & Öberg, L. (2016). Avalanche fatalities in Iceland: A study of human factors in avalanche incidents. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(4), 1135-1143.

Vidaller, I., Pomeroy, J. W., & Essery, R. (2021). Impact of climate change on snow processes in a Pyrenean catchment using a distributed snow model. *Water*, 13(15), 2042.

Vidaller, I., Revuelto, J., Izagirre, E., Rojas-Heredia, F., Alonso-González, E., Gascoin, S., Renè, P., Rico, I., Moreno, A., Serrano, E., Serreta, A., & López-Moreno, J. I. (2021). Toward an ice-free mountain range: Demise of Pyrenean glaciers during 2011–2020. *Geophysical Research Letters*, 48(18). <https://doi.org/10.1029/2021gl094339>

Von Mörner, M. (2017). Application of Call Detail Records – Chances and Obstacles. *Transportation Research Procedia*, 25, 2233–2241.

Vorkauf, M., Marty, C., Kahmen, A., & Hiltbrunner, E. (2021). Past and future snowmelt trends in the Swiss Alps: The role of temperature and snowpack. *Climatic Change*, 165(3–4). <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03027-x>

Vorkauf, M., Stoffel, M., & Stähli, M. (2021). Snowpack changes in the Swiss Alps: Impacts of climate change on snow reliability in ski resorts. *Climate*, 9(9), 131.

Wang, X., Cui, Z., Liu, S., Ding, Y., Zhang, Y., & Xu, J. (2017). Snow cover variability and change in the western Tien Shan Mountains, Central Asia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 9, 144-157.

Wang, Y., Thomas, E. R., Hou, S., Huai, B., Wu, S., Sun, W., Qi, S., Ding, M., & Zhang, Y. (2017). Snow accumulation variability over the West Antarctic Ice Sheet since 1900: A comparison of ice core records with ERA-20C reanalysis. *Geophysical Research Letters*, 44(22). <https://doi.org/10.1002/2017gl075135>

Wilbur, C., & Kraus, S. (2018, October 7). Looking to the future: Predictions of climate change effects on avalanches by North American practitioners. ISSW2018_P06.7.pdf.

van Herwijnen, A., Heck, M., & Schweizer, J. (2016). Forecasting snow avalanches using avalanche activity data obtained through seismic monitoring. *Cold Regions Science and Technology*, 132, 68-80. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.09.014>