

Informe d'abast i metodologia

Impactes i vulnerabilitats del canvi climàtic a Andorra

Clima

Equip de treball

Laura Trapero

Anna Albalat

Gerard Grande

Àlex Quintana

Coordinadora de l'equip de ciències de la terra i l'atmosfera de l'Eix Muntanya d'Andorra Recerca + Innovació

Investigadora de l'Eix Muntanya d'Andorra Recerca + Innovació

Investigador de l'Eix Sostenibilitat d'Andorra Recerca + Innovació

Investigador de l'Eix Muntanya d'Andorra Recerca + Innovació

Andorra Recerca + Innovació agraeix el finançament rebut per part de l'Oficina de l'Energia i del Canvi Climàtic d'Andorra en el marc de l'estudi d'impactes i vulnerabilitats del canvi d'Andorra



Oficina de l'Energia i del Canvi Climàtic
Principat d'Andorra



Aquesta obra està subjecta a una llicència de [Reconeixement 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Resum

L'objectiu d'aquest informe és fer un recull de la informació disponible a Andorra per la caracterització del clima actual d'Andorra com també la seva evolució futura durant el s. XXI. A més d'identificar les fonts de dades disponibles, també es documenten les bases de dades i resultats generats en el marc de diferents projectes europeus (POCTEFA) que es troben a disposició de la comunitat científica per abordar l'impacte del canvi climàtic. Alguns d'aquests resultats són públics però han estat analitzats només a escala pirinenca i en aquest informe es mostren alguns dels resultats en clau andorrana.

Aquesta caracterització climàtica servirà per establir les bases dels estudis de vulnerabilitat i impacte del canvi climàtic en diversos sectors que serveixin de cara a l'elaboració per part de l'OECC (Oficina de l'Energia i el Canvi Climàtic) de l'Estratègia d'Adaptació al Canvi Climàtic a Andorra.

Destacar la dificultat de l'estudi dels impactes del Canvi Climàtic en zones geogràficament complexes, bé sigui per la influència de diferents masses d'aire o bé per una orografia molt irregular, com és el cas d'Andorra. Aquest fet posa de manifest la necessitat de disposar tant d'observacions i sèries climàtiques que responguin a la variabilitat climàtica regional, per exemple complementant progressivament les observacions in-situ amb les observacions obtingudes per teledetecció, com també de simulacions del clima futur a una resolució elevada. És en aquest darrer aspecte on rau el repte més gran.

Sumari

1.	Introducció	5
2.	Canvi climàtic a Andorra	10
2.1	Evolució del clima actual als Pirineus i Andorra.....	11
2.1.1	Sèries climàtiques a Andorra: temperatura, precipitació i gruix de neu	11
2.1.2	Resultats del projecte CLIM'PY a Andorra: Tendències 1950-2015 de la temperatura, precipitació i gruix de neu.	13
2.1.3	Tendències actuals a la vall central d'Andorra: estació de Central de FEDA 1950-2024.....	18
2.2	Evolució del clima: projeccions climàtiques a Andorra	20
2.2.1	Temperatura mitjana	23
2.2.2	Temperatura màxima i mínima.....	24
2.2.3	Precipitació	26
3.	Índexs climàtics.....	30
3.1	Evolució observada i projeccions pel segle XXI dels índexs climàtics: resultats del projecte CLIM'PY a Andorra.....	32
3.1.1	Índexs climàtics associats a la temperatura.....	34
3.1.2	Índexs climàtics associats a la precipitació	38
4.	Identificació dels factors climàtics i els impulsors de l'impacte climàtic	40
4.1	Exemple d'aplicació: onada de calor.....	41
	Referències	44
	ANNEX 1: Comparació de les projeccions climàtiques CLIM'PY i PIRAGUA.....	47

1. Introducció

Des de fa uns anys el Govern d'Andorra ha desplegat una sèrie d'estratègies i legislacions en matèria d'adaptació al canvi climàtic que han permès avançar en la gestió d'aquesta problemàtica. El 2 de març del 2011 Andorra va adherir-se al conveni Marc de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic (CMNUCC) per a la implementació de processos relacionats amb el Canvi Climàtic. Posteriorment, al 2014 s'inicia un procés participatiu d'Andorra d'adaptació (PAACC) per identificar les mesures d'adaptació necessàries per disminuir la vulnerabilitat als impactes del CC i dotar al país dels recursos. El 2016 el Govern va aprovar la signatura de l'Acord de París. Al 2018 es va aprovar la Llei d'Impuls a la Transició Energètica i de Canvi Climàtic (LITECC) per potenciar la transició energètica cap a un nou model i estudiar l'impacte i la vulnerabilitat del territori en relació amb el canvi climàtic. Durant el 2021 es va definir l'Estratègia Energètica Nacional i de lluita contra el canvi climàtic per reduir les emissions nacionals i adaptar-se als efectes del canvi climàtic d'acord amb els objectius de l'Acord de París. Aquest desplegament culmina amb la declaració de l'estat d'emergència climàtica i ecològica, aprovada per unanimitat al Consell General, el 23 de gener del 2020, on es reconeix la crisi climàtica i en conseqüència, declara l'estat d'emergència climàtica i ecològica per mobilitzar coherentment els recursos necessaris per reduir les emissions anuals no absorbides de gasos d'efecte d'hivernacle en un mínim de 37% a l'any, a horitzó 2030. Alhora impulsa la transició cap a la neutralitat de carboni al país, en el context de l'Objectiu de desenvolupament sostenible 13.

Mencionar també que en l'àmbit pirinenc i transfronterer més pròxim, el Principat ha participat en diferents projectes europeus que han permès establir les bases dels estudis climàtics pel conjunt de la serralada, així com la creació de l'Estratègia Pirinenca del Canvi Climàtic (EPICC, 2022).

Des de la vessant científica, a la recent publicació de l'informe de síntesi del 6è informe d'avaluació de l'IPCC (AR6 SYR; IPCC, 2023), es presenta un resum de l'estat del coneixement sobre el canvi climàtic recollit ens els darrers informes dels tres grups de treball de l'AR6 i un resum dels tres informes especials de l'AR6 publicats entre els anys 2018 i 2022. En el segon capítol, arrenca amb l'avaluació de les evidències observacionals del canvi del nostre clima, els impulsors històrics i actuals d'aquest canvi climàtic antròpic, com també els seus impactes. També s'avalua l'estat actual de l'aplicació de les opcions de resposta, tant d'adaptació com de mitigació.

A continuació es destaquen algunes de les constatacions claus recollides en el darrer informe AR6 SYR:

1. Les activitats humanes, són la causa inequívoca de l'escalfament global, amb una temperatura global en superfície que durant el 2011-2020 ha assolit 1,1°C per sobre

els nivells preindustrials¹ (Figura 1). Això afecta a molts fenòmens meteorològics i climàtics extrems provocant impactes adversos generalitzats, i causa danys i pèrdues tant a la natura com a les persones {veure *Figure 2.3, AR6 SYR, IPCC 2023*}.

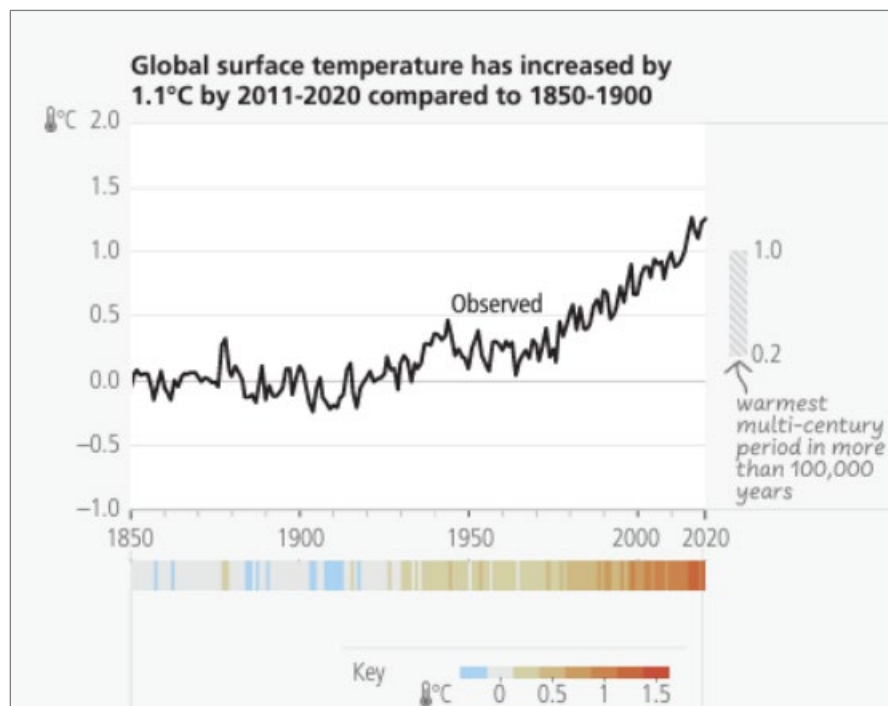


Figura 1: Ritme de creixement de la temperatura global des de l'època pre-industrial (1850-1900) fins a l'actualitat. Font: {*Figure 2.1 (panel c), AR6 SYR, IPCC 2023*}.

2. D'acord amb els compromisos adquirits per part dels estats pel 2030 per a la reducció d'emissions de gasos d'efecte hivernacle (GEH), és probable que l'escalfament global superi els 1,5°C durant el segle XXI i sigui molt difícil limitar l'escalfament per sota dels 2°C (Figura 2). És un fet que amb les polítiques mundials aplicades fins a 2020 anem cap a un escenari d'emissions que provocarà un escalfament de 3,2°C a finals de segle {veure, *Section 3.1.1 Long-term Climate Change, AR6 SYR, IPCC 2023*}.

¹ Període preindustrial 1850-1900

Remaining carbon budgets to limit warming to 1.5°C could soon be exhausted, and those for 2°C largely depleted

Remaining carbon budgets are similar to emissions from use of existing and planned fossil fuel infrastructure, without additional abatement

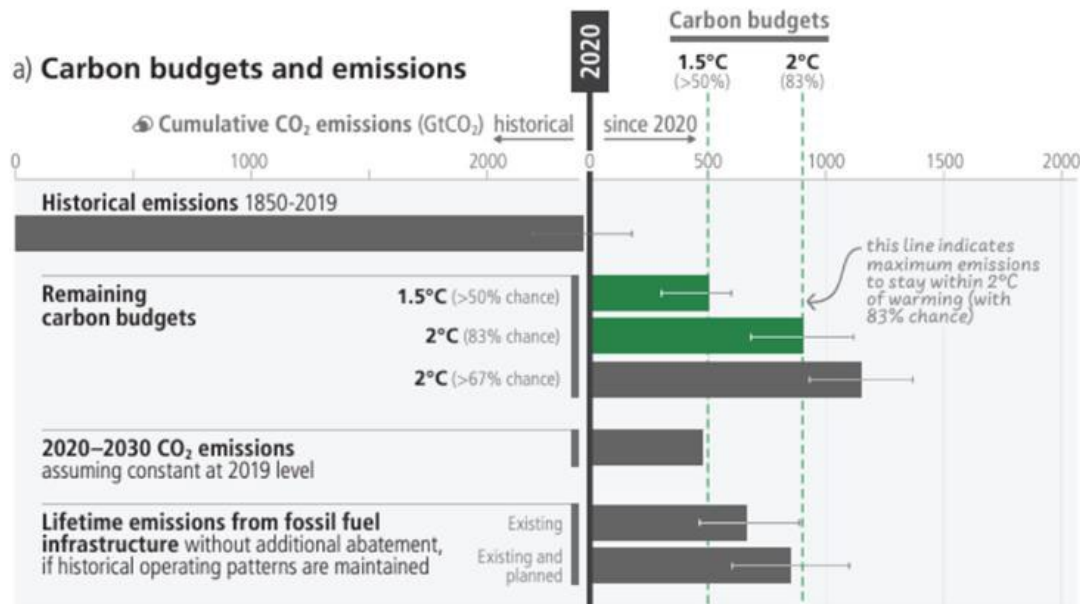


Figura 3: canvis projectats en la temperatura màxima diària anual, la humitat mitjana del sol en columna CMIP i la precipitació màxima diària anual per a diferents nivells d'escalfament global 1.5°C, 2°C, 3°C i 4°C en relació el període 1850-1900. Font: {Figure 3.5 (panel a), Section 3.3.1 Remaining Carbon Budgets, AR6 SYR, IPCC 2023}.

- Per assolir els objectius climàtics, és necessari multiplicar considerablement el finançament dedicat a l'adaptació i a la mitigació {veure, *Figure 4.2, Section 4.2 Benefits of strengthening near-term action*, AR6 SYR, IPCC 2023}.
- Cal prioritzar l'equitat, la justícia social, la inclusió i els processos de transició justos. Només així es podrien tirar endavant accions ambiciosos de reducció de les emissions i un desenvolupament climàtic resilient {veure, *Section 4.4 Equity and inclusion in climate change action*, AR6 SYR, IPCC 2023}.

Tot i que la contribució d'Andorra en les emissions de GEH a nivell mundial és extremadament petita (inferiors al 0,001% l'any 2017), s'ha pres una acció climàtica ferma, decidida i immediata davant l'amenaça dels efectes del canvi climàtic als territoris de muntanya. Mostra d'aquest compromís internacional, comença amb la incorporació d'Andorra a formar part del Conveni Marc de les Nacions Unides del Canvi Climàtic des del 2011 i signatària de l'Acord de París.

Pel que fa a l'Estratègia Nacional d'Adaptació al Canvi Climàtic seguida per Andorra, s'han creat polítiques adreçades al desenvolupament sostenible del territori, que tenen com a objectiu generar un model de societat on el creixement econòmic, la cohesió social i la protecció del medi ambient es tractin conjuntament com un únic repte estratègic. Un exemple clar el trobem amb l'aprovació de la Llei 21/2018, del 13 de setembre, d'impuls de la transició energètica i del canvi climàtic (LITECC).

2. Canvi climàtic a Andorra

Els territoris de muntanya són molt sensibles als efectes del canvi climàtic (Hock et al., 2019; OPCC, 2018). L'increment de les temperatures i de la variabilitat de les precipitacions en són conseqüències directes, i cal fer-ne un seguiment a escala regional per poder donar resposta a les problemàtiques mediambientals de més abast a les que han de fer front els entorns de muntanya (Stocker et al., 2013). El canvi climàtic no afecta a totes les regions per igual: el ritme d'escalfament pot ser diferent i fins i tot oposat entre diferents zones (Brunet et al., 2007). En aquest sentit, cada cop hi ha més proves que el ritme d'escalfament s'amplifica amb l'altitud, de manera que els entorns d'alta muntanya experimenten canvis de temperatura més ràpids que els situats a menys altitud (Pepin et. al., 2015). Aquest escalfament depenent de l'altitud (elevation depending warming, EDW en anglès) pot accelerar el ritme dels canvis en els ecosistemes de muntanya, la criosfera (permafrost), els règims hidrològics i la biodiversitat. A l'àrea dels Pirineus, també s'han iniciat estudis en relació a l'EDW (Sigró et al., 2024).

La localització d'Andorra als Pirineus i les seves característiques geogràfiques i socioeconòmiques, converteixen el país en un territori singular on l'estudi del canvi climàtic té una complexitat important, i en conseqüència també l'anàlisi dels seus impactes en diferents sectors com el turisme, la salut, l'agricultura o als recursos naturals directament.

El principal repte a les zones d'alta muntanya és el coneixement de les tendències de la temperatura a causa de la limitada disponibilitat d'observacions a cotes mitjanes i altes, amb sèries de dades prou llargues i de qualitat. En el cas d'Andorra, existeixen les dades històriques de FEDA des del 1928 (tres estacions -Central, Ransol i Engolasters- situades per sota dels 1700 m) que permeten abordar la caracterització climàtica del Principat i es tenen en compte en els treballs de projeccions de clima futur a la serralada del Pirineu.

S'entén per **clima** la mitjana de les condicions atmosfèriques en una escala temporal relativament llarga (normalment 30 anys), segons l'Organització Meteorològica Mundial (OMM, 1935) de les diverses variables atmosfèriques, com la temperatura i la precipitació. Per tant, l'expressió **canvi climàtic** fa referència a canvis en l'estat del clima que poden ser identificats (a través de càlculs estadístics) en la mitjana i/o la variabilitat de diferents propietats que perduren durant períodes llargs de temps. Per a la caracterització del clima s'utilitzen indicadors que representen l'estat o la tendència d'una determinada condició ambiental en un lloc i moment. El càlcul de la **tendència** de la temperatura permet quantificar la magnitud de l'escalfament global d'un lloc. Aquesta pot analitzar-se tant a escala anual com estacional. L'increment de la temperatura és una de les principals manifestacions del canvi climàtic i es troba

estretament relacionat amb l'alteració de les concentracions dels gasos d'efecte hivernacle a escala global.

2.1 Evolució del clima actual als Pirineus i Andorra

Per al conjunt del Pirineu, el darrer Butlletí d'Indicadors de Canvi Climàtic dels Pirineus (BICCPiR, 2023²), mostra com la temperatura mitjana anual ha augmentat en 1,9°C des del 1959 (ritme de **+0,30°C/dècada**). La temperatura màxima, que es pot associar a la temperatura del període diürn, s'ha incrementat a un ritme molt superior al que ho ha fet la temperatura mínima associable al període nocturn: 2,3°C envers 1,6°C. No s'aprecien comportaments diferenciats en funció del vessant o la proximitat al Mediterrani o a l'Atlàntic, sinó que les valors són molts similars a tot el massís. Pel que fa a la precipitació mitjana anual al conjunt dels Pirineus es detecta una tendència estadísticament significativa a la disminució pel període 1959-2020: **-1,9 %/dècada**. Tot i que la precipitació mostra una disminució generalitzada, sí que s'aprecien diferències a les sèries ubicades al vessant sud dels Pirineus, i en aquelles més properes a la Mediterrània, amb una tendència significativa a la disminució del -3% i -4% per dècada, respectivament. En canvi, als àmbits atlàntics i del vessant nord mostren variacions menors i no significatives.

2.1.1 Sèries climàtiques a Andorra: temperatura, precipitació i gruix de neu

La informació climàtica històrica disponible a Andorra prové de les estacions meteorològiques que FHASA (actualment FEDA) va instal·lar a partir del 1929. Es tracta de les tres estacions conegudes amb els noms de Central-Encamp, Engolasters i Ransol. Es recullen dades diàries manualment de temperatura màxima, mínima, precipitació diària acumulada i gruix de neu. Aquests registres daten des de l'any 1934 fins a l'actualitat, i les tres sèries climàtiques van ser corregides i homogeneïtzades a escala diària pel període 1950-2015 en el marc del projecte POCTEFA CLIM'PY (Cuadrat et al., 2020; EFA 081/15). Posteriorment, en el marc del projecte POCTEFA OPCC-ADAPYR (EFA 346/19) es van revisar i ampliar les sèries fins l'any 2020; no obstant això, l'estació d'Engolasters es va descartar degut a la baixa qualitat de les seves dades.

A més d'aquestes tres estacions, l'any 1991 el Govern d'Andorra va instal·lar la primera estació meteorològica automàtica a la vall central, en concret al Roc de Sant Pere. Aquell mateix any, es va començar també el registre meteorològic a l'estació de Les Salines, situada a la zona nord del país, que destaca per ser l'única en aquesta regió amb dades històriques des de 1991. Des de llavors, la xarxa d'estacions

² <https://infogram.com/1pkrw0y6e1v1k7b9zvzk0w1qkka367970v7>

meteorològiques s'ha anat ampliant progressivament fins a superar les 30 estacions que hi ha actualment en territori andorrà³.

A continuació, a la taula 1 es presenta un resum de les metadades de les sèries climàtiques disponibles a Andorra:

Taula 1: metadades de les estacions climàtiques de referència al país.

ESTACIÓ-codi	Altitud (m)	Any inici sèrie climàtica	Resolució temporal	Variables	Homogeneïtzacions CLIM'PY	Altres variables
Central-Encamp 99130001	1135 m	1935 1950 (homo)	Diària	Tmax, Tmin, P, gruix neu	Diària, mensual (1950-2015)	Humitat, vent i Patm
Engolasters - 99130002	1638 m	1935 1950 (homo)	Diària	Tmax, Tmin, P, gruix neu	Diària, mensual (1950-2015)	Humitat, vent i Patm
Ransol - 99130004	1641 m	1935 1950 (homo)	Diària	Tmax, Tmin, P, gruix neu	Diària, mensual (1950-2015)	Humitat, vent i Patm
Roc Sant Pere - 99130005	1113 m	1991	Diària, horària	T, P, HR, vent, irradiació	--	
Les Salines - 99130007	1445 m	1991	Diària, horària	T, P, HR, vent, gruix de neu	--	

Pel que fa al seguiment de la precipitació en forma sòlida, a Andorra, es van iniciar les observacions de neu el 1935 a les centrals hidroelèctriques situades al fons de vall (Albalat et. al., 2018), però amb el creixement de les estacions d'esquí del país, a partir dels anys 80 es van iniciar les observacions diàries manuals del mantell de neu a diferents dominis esquiables: Pal, Arinsal, Arcalís, Soldeu, Grau Roig i Pas de la Casa.

Fora de les estacions d'esquí, no és fins l'any 2009, que s'inicien les observacions a diferents punts de muntanya, amb la instal·lació de diverses estacions nivometeorològiques automàtiques (Sorteny, Perafita, Bony de les Neres i Aixàs; Taula 2) i més recentment, amb la instrumentalització de diferents valises o pals de neu.

La metodologia seguida en el projecte CLIM'PY va permetre reconstruir els buits presents a les sèries diàries de gruix de neu de les estacions d'esquí a partir de les simulacions obtingudes d'aplicar la cadena SAFRAN (reàlisi meteorològic) - CROCUS (model d'evolució del mantell de neu) pel període 1980-2016 (Lopez-Moreno et al., 2020). El fet de combinar les observacions in-situ i les modelitzacions, ha permès

³ Més informació: <http://www.meteo.ad/estacions>

donar continuïtat a les sèries durant tota la temporada, i millorar la qualitat de les dades, tot i això existeixen alguns biaixos quantitatius a tenir en compte durant els períodes sense observacions. De forma qualitativa sí que permet capturar tant les nevades primerenques com l'època de fusió a finals d'hivern quan les estacions d'esquí no estan obertes i no es fan observacions.

Taula 2: distribució altitudinal de les estacions nivometeorològiques del país.

Estació	Aixàs	Ransol	Pal	Arinsal	Bony Neres	Arcalís	Pas de la casa	Grau Roig	Sorteny	Perafita	Soldeu
Altitud (m)	1538	1641	1876	1923	2080	2059	2120	2152	2271	2402	2467
Any d'inici sèrie climàtica	2009	1935	1997	1984	2009	1984	1984	1984	2009	2009	1984

2.1.2 Resultats del projecte CLIM'PY a Andorra: Tendències 1950-2015 de la temperatura, precipitació i gruix de neu.

Els resultats del projecte CLIM'PY i l'evolució del clima actual a Andorra pel període 1950-2015, es troben publicats a la pàgina web de l'Observatori de la Muntanya d'Andorra (www.oma.ad). La tendència de la **temperatura mitjana anual** mostra un increment de **0,18°C/dècada**, i es tracta d'un valor estadísticament significatiu en un nivell de confiança del 95% segons el test de Mann-Kendall.

Taula 3: tendència de la temperatura mitjana anual i estacional, expressades en °C/dècada, per al conjunt de les 3 estacions històriques de FEDA (mitjana de Central, Engolasters i Ransol) i per al període 1950-2015. Els valors marcats amb asterisc indiquen si l'increment o disminució és estadísticament significatiu per a un nivell de confiança del 95% segons el test de Mann-Kendall.

ANDORRA					
°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

La temperatura a Andorra és actualment 1,3°C superior a la de l'any 1950. Aquestes tendències de temperatura mostren concordança amb el que es dona en el conjunt de la serralada dels Pirineus. L'increment més destacat s'observa principalment en les temperatures màximes al llarg de tot l'any, és a dir, les temperatures associades al període diürn (Taula 3). Pel que fa a la variació estacional, és a l'estiu quan hi ha l'augment més significatiu, de 0,29°C/dècada des de 1950.

A la figura 4 es mostra l'anomalia de la temperatura mitjana, calculada com la diferència respecte el període climàtic de referència (1981-2010). Quan aquesta diferència és positiva, es tracta d'una anomalia càlida (color vermell), mentre que si és negativa, es tracta d'una anomalia freda (color blau).

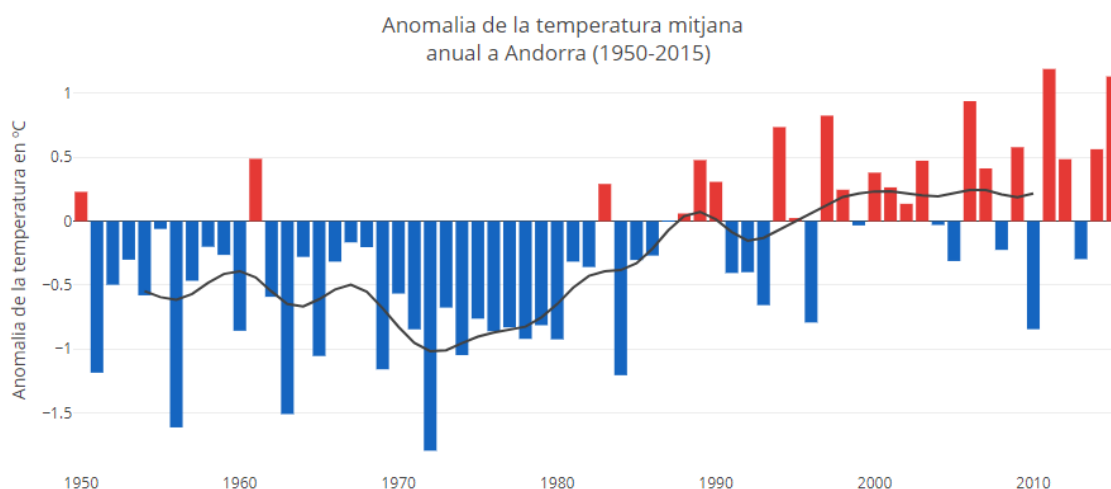


Figura 4: anomalia de la temperatura mitjana anual a Andorra (Central, Ransol i Engolasters) per període 1950-2015. La corba negra correspon a un filtre gaussià de 13 membres per suavitzar la mitjana mòbil. Font: CLIM'PY (EFA 081/15).

Actualment, en zones de muntanya alguns treballs es centren en avaluar el canvi climàtic i els seus patrons altitudinals. Pepin et al. (2022) exposa com la tendència de temperatura en algunes regions de muntanyes mostra un augment més pronunciat des de 1980 en comparació a la mitjana global i com les estacions d'alta muntanya mostren una tendència més pronunciada en comparació a les estacions de mitja o baixa altitud a la mateixa regió (Elevation Depending Warming, EDW). Aquest aspecte serà d'especial interès fer-ne seguiment a escala andorrana i s'abordarà en alguns projectes europeus iniciats recentment com el LIFE Pyrenees4clima (2024-2030). Però els primers treballs fets a la Península Ibèrica on s'analitza l'EDW (Sigró et al., 2024), assenyalen que la temperatura mitjana presenta un EDW nul a causa dels signes oposats observats en les tendències de les temperatures extremes, amb un augment de la màxima de 0.09°C/dec, mentre que la mínima una disminució de -0.10°C/dec.

Pel que fa a les precipitacions no hi ha un comportament tant marcat i homogeni com en el cas de la temperatura. La precipitació varia molt en el temps i en l'espai. En aquest sentit, la precipitació anual pel conjunt d'Andorra mostra una lleugera tendència a la disminució al voltant de **-2,6 %/dècada** però no és estadísticament significativa (Taula 4). Aquesta tendència és propera a la que s'ha detectat a la zona més mediterrània del vessant sud del Pirineu.

L'època de l'any amb el descens de precipitació més pronunciat i estadísticament significatiu és l'estiu, amb una disminució d'11 mm/decenni, seguit de l'hivern que també mostra una disminució de les precipitacions estadísticament significativa segons el test de Mann-Kendall amb una disminució de 8,7 mm/decenni. Les anomalies anuals de la precipitació es representen a la figura 5, on s'observa la variabilitat interanual entre els anys humits (indicats en verd) i els anys secs (indicat en groc).

Taula 4: la tendència de la precipitació anual i estacional, expressada en %/decenni, per al conjunt de les 3 sèries climàtiques considerades i per al període 1950-2015. L'asterisc al costat del valor numèric indica que l'increment o disminució és estadísticament significatiu per a un nivell de confiança del 95% segons el test de Mann-Kendall.

ANDORRA					
	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

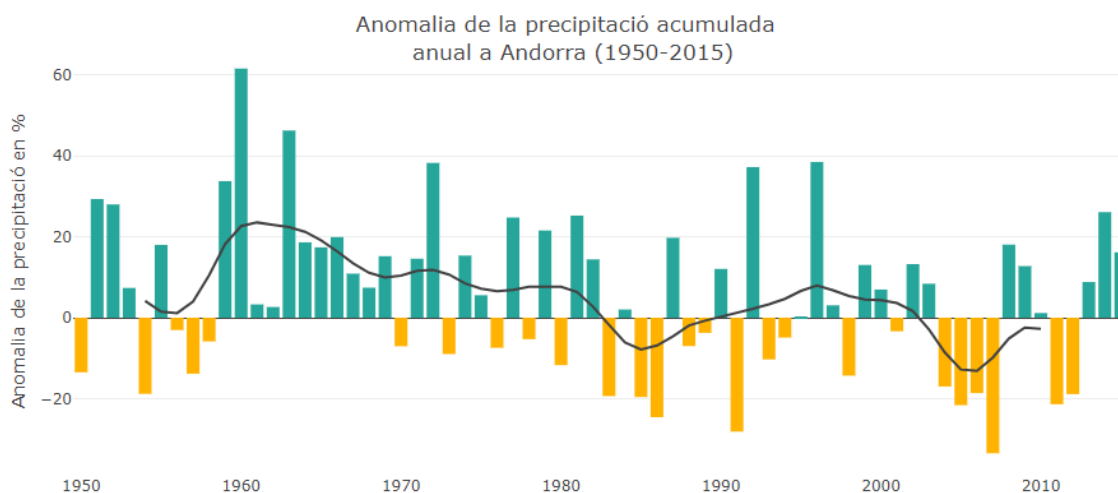


Figura 5: anomalia de la precipitació anual a Andorra (Central, Ransol i Engolasters) 1950-2010. La corba negra correspon a un filtre gaussià de 13 membres per suavitzar la mitjana mòbil. Font: CLIM'PY (EFA 081/15).

El 2015 es va presentar el primer estudi climatològic de **coberta de neu** als Pirineus a partir de dades de satèl·lit, pel període comprès des de l'any 2000 fins l'any 2015 (Gascoin et. al., 2015). Aquesta climatologia ha permès calcular la durada mitjana mensual de la coberta de neu, expressada en nombre de dies, per diferents franges de cotes altitudinals (Fig. 6). Els resultats mostren que, entre desembre i abril trobem neu al terra almenys el 50% del temps per sobre dels 1600 m i gairebé el 100% dels dies per sobre dels 2400 m.

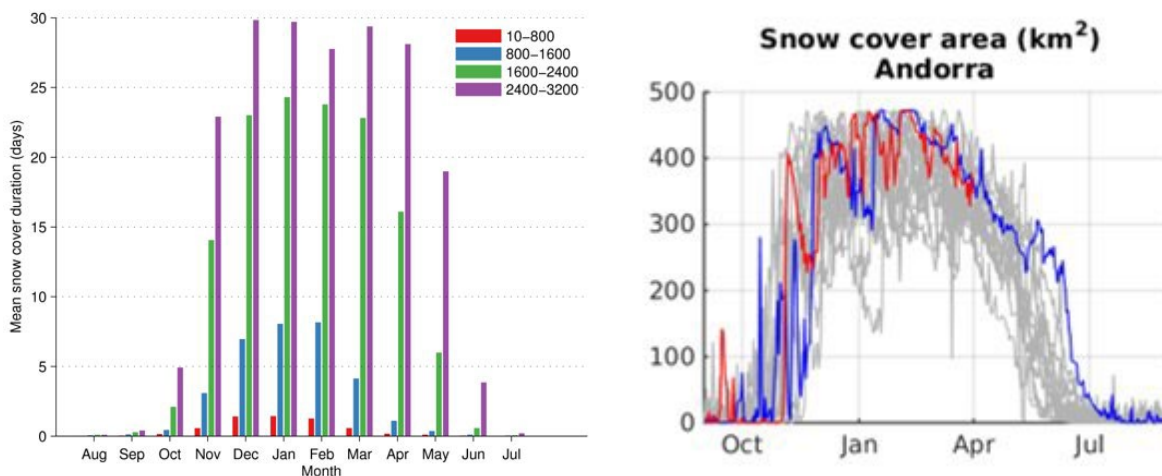


Figura 6: durada mitja mensual (dies) de la coberta de neu a Andorra per diferents franges altitudinals i pel període 2000-2015 a partir de dades de satèl·lit. Evolució temporal de la superfície de coberta de neu (km²). Font: CLIM'PY.

La tercera variable analitzada en el projecte CLIM'PY ha estat **la neu**. En aquest sentit s'ha elaborat una base de dades de neu de qualitat i continua de les estacions d'esquí del conjunt dels Pirineus i per tant, del país. A partir de les sèries nivològiques registrades des del 1980 (Lopez-Moreno et al., 2020; disponible a www.oma.ad) es pot extreure informació per analitzar el comportament del mantell nival, de les nevades a cotes altes i analitzar episodis i temporades concretes. Els resultats de l'anàlisi de les sèries de neu indiquen que tot i la forta dispersió dels resultats, per Andorra la tendència del gruix de neu pel període 1979-2015, mostra un augment significatiu de uns 5 cm/dècada a cotes altes 2100-3000m, però en canvi no s'observa cap tendència en la variació del gruix de neu (ni augment ni disminució) a cotes mitges i fons de vall (<1800m) (Figura 7).

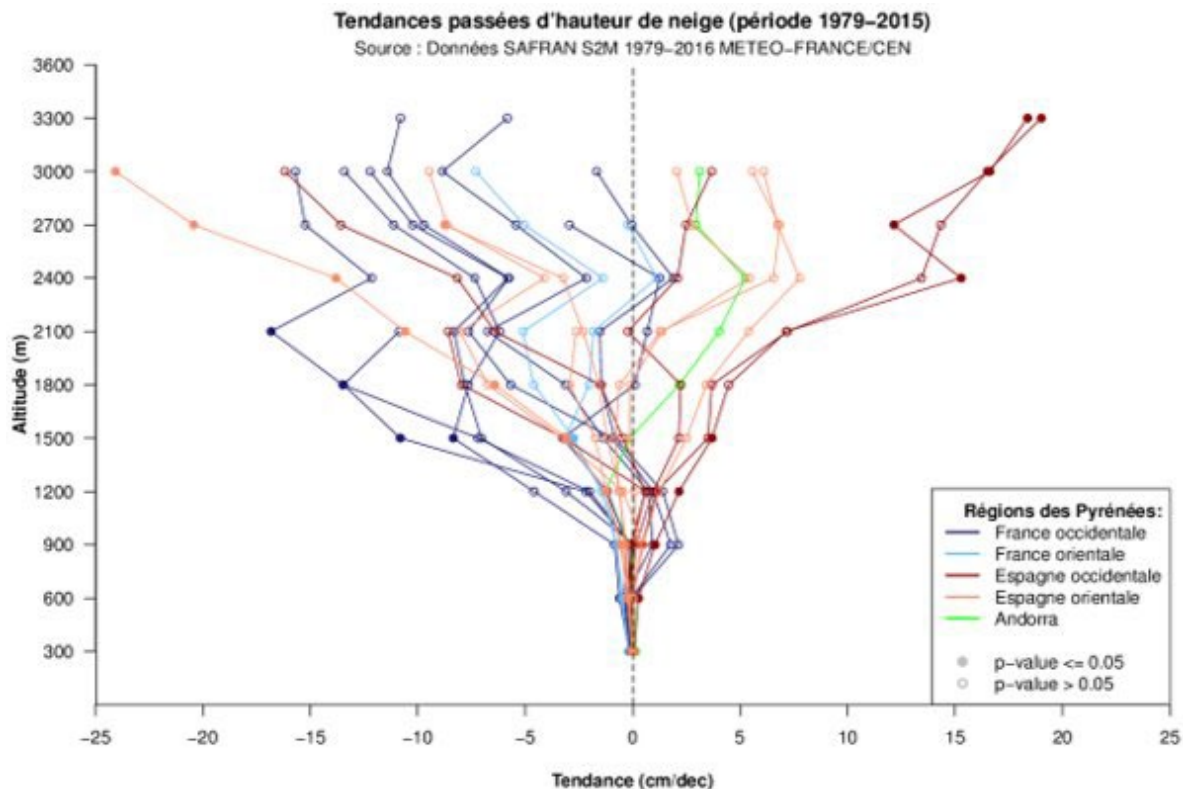


Figura 7: anàlisi de la tendència de l'evolució del gruix de neu als diferents massissos pirinencs, Andorra en verd, i en funció de la cota altitudinal pel període 1979-2016. Font: CLIM'PY.

Analitzant el comportament estacional, s'identifica com a finals d'hivern (febrer, març o abril, depenent de la ubicació) els gruixos de neu assoleixen els seus màxims amb valors (de mediana, p50) que es situen entre:

- 40 cm a 1600 m a.s.l als fons de vall del nord del país (Ransol)
- 50-60 cm a 1900 m a.s.l a cotes mitges de la vall central (Pal i Arinsal)
- 80-85 cm a 2100 m a.s.l al centre del país (Bony de les Neres) i fons de vall del nord del país (Grau Roig, Soldeu),
- 100-105 cm a 2100 m a.s.l al nord del país (Arcalís i Pas de la Casa), com també a cotes altes del sud del país (Perafita 2400 m a.s.l)

En conjunt, els màxims gruixos de neu es situen a la meitat nord del país, i en funció de les condicions geomorfològiques locals i el transport de neu pel vent, poden arribar assolir gruixos superiors als 4 m, com és el cas de l'estació de Sorteny el març de 2014, després d'una temporada amb nevades molt freqüents.

Algunes de les nevades més abundants mesurades a Andorra, han acumulat gruixos en 24h de fins a 90 cm (Arinsal 23/3/2012 o Ransol 82 cm 20/2/2015). A les cotes més baixes del fons de vall, durant situacions meteorològiques molt concretes, les acumulacions de neu diàries poden arribar a superar els 30 cm en 24h (Central-FEDA 9/12/1990, 9/12/2021).

Les acumulacions anuals de neu nova entre 1980 i 2015 (Figura 8) mostren una marcada variabilitat interanual a totes les estacions, igual com s'ha observat per la precipitació. Les estacions que registren les acumulacions més elevades són les més septentrionals del país, com Arcalís i el Pas de la Casa (3-6 m), seguides per Grau Roig i Arinsal (2-5 m). Per contra, l'estació més meridional, Pal, presenta acumulacions anuals inferiors (1-4 m). És important ressaltar que pel període analitzat, no es detecta cap tendència significativa de disminució en l'acumulació de neu nova.

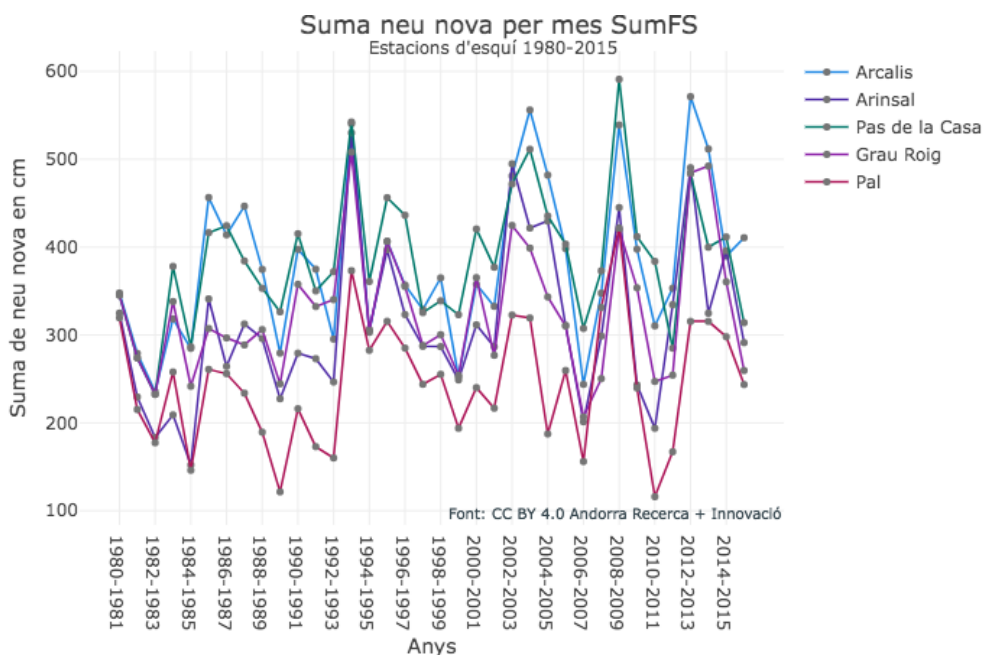


Figura 8: acumulacions anuals de neu nova mesurades a diferents punts del país des del 1980, entre les cotes 1900 i 2400 a.s.l. Font: CLIM'PY.

2.1.3 Tendències actuals a la vall central d'Andorra: estació de Central de FEDA 1950-2024

Des d'un punt de vista socioeconòmic i local, la vall central d'Andorra és la zona amb més interès a l'hora de conèixer les tendències del canvi climàtic. Això és possible gràcies a la sèrie històrica Central-Encamp de FEDA que s'utilitza com a referència climàtica i en aquest apartat es mostra un resum de les principals tendències climàtiques. Els resultats complets i l'anàlisi més detallat per totes les estacions històriques i a diferents escales temporals es poden consultar a la web d'Andorra Recerca + Innovació⁴.

⁴ https://ari.ad/images/projectes/evicc/evolucio_climatica_andorra.html

La figura 9 mostra com la temperatura mitjana anual ha anat incrementant inequívocament a l'estació de Central de FEDA amb un ritme d'increment de $0,25^{\circ}\text{C}/\text{dècada}$. Malgrat que el 2024 es va confirmar com el més càlid a escala planetària, a Andorra ho va ser el 2022, per davant del 2024⁵.

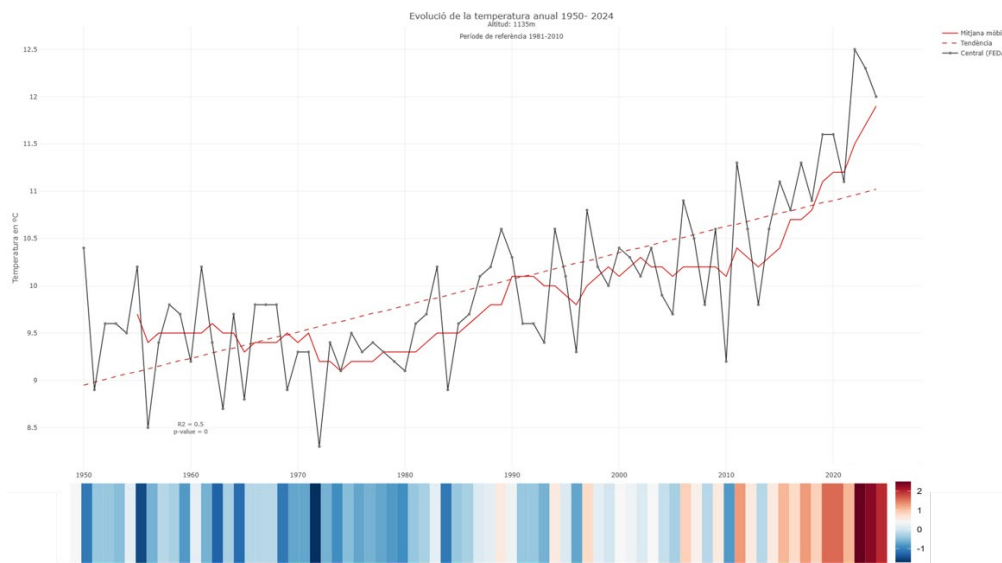


Figura 9: la corba negra mostra el ritme de creixement de la temperatura anual a l'estació de Central pel període 1950-2024. La línia contínua en vermell mostra la mitjana mòbil i la discontinua mostra la tendència. A més, el gràfic de barres (stripes) mostra l'anomalia de la temperatura anual pel mateix període. Font: elaboració pròpia. Dades homogeneïtzades en el marc projecte CLIM'PY: Caracterització de l'evolució del clima i provisió d'informació per l'adaptació als Pirineus (EFA 081/15) i actualitzades a partir de les dades rebudes de FEDA amb control de qualitat RClindex.

La temperatura mitjana anual de l'estació Central de FEDA assolida el 2022 va ser la més càlida des del 1950 amb un valor de $12,5^{\circ}\text{C}$, el segueix de molt a prop l'any 2023 amb una temperatura de $12,3^{\circ}\text{C}$, el 2024 amb $12,1^{\circ}\text{C}$ i el 2020 i 2019 amb $11,6^{\circ}\text{C}$ i el 2011 amb $11,3^{\circ}\text{C}$. Aquests records de temperatures representen localment una anomalia positiva de temperatura de més de 2°C respecte el període 1981-2010 (Figura 10). En els darrers anys no s'ha registrat cap temperatura mitjana anual per sota de la mitjana climàtica (1981-2010), l'últim any el trobem al 2013.

Pel que fa al comportament mensual durant el 2022, l'any més càlid, es van superar fins a cinc rècords de mesos més càlids i es van registrar cinc mesos entre els 10 més càlids des del 1950. Per més detall, es pot consultar el rànquing mensual de temperatures mitjanes⁶.

Si analitzem les precipitacions (Figura 10), tot i que el 2024 va ser humit, els darrers tres anys s'han registrat anys secs. Tanmateix, hi ha un caràcter molt irregular i el comportament pot variar molt mensualment. Des del 1950 el ritme de decreixement

⁵ Més informació: <https://www.ari.ad/noticies/resum-climatic-2024>

⁶ Més informació: https://ari.ad/images/actualitat/noti_bc_anual_2023/MTRANK_RANK5023.png

de la precipitació ha estat de -16 mm/decenni. Aquest darrer decreixement en la precipitació però no és estadísticament significatiu segons el test de Mann-Kendall.

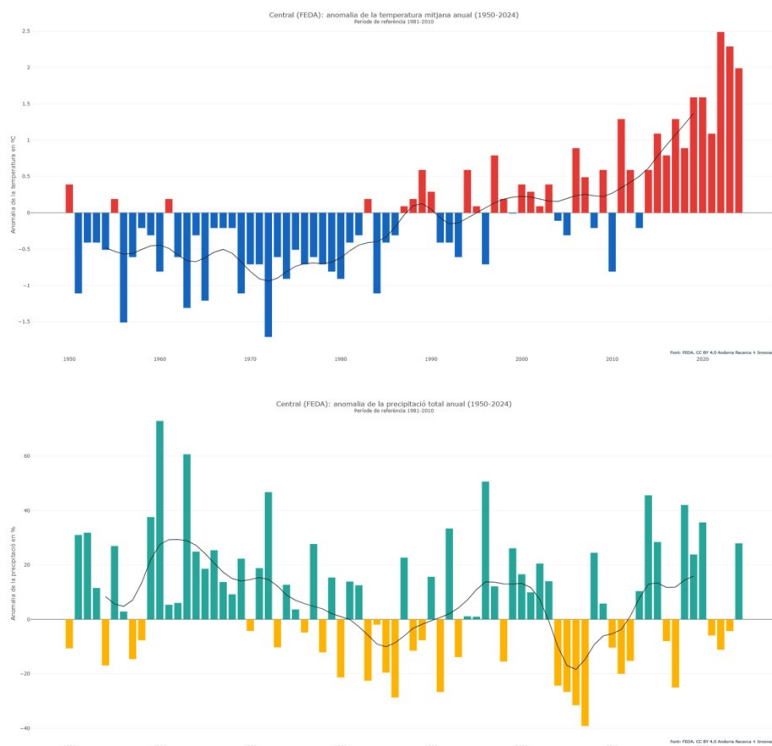


Figura 10: anomalia de la temperatura (esquerra) i de la precipitació (dreta) a l'estació de Central de FEDA pel període 1950-2024. La corba negra correspon a un filtre gaussià de 13 membres per suavitzar la mitjana mòbil. Font: elaboració pròpia. Dades homogeneïtzades en el marc projectes CLIM'PY (EFA 081/15) i ADAPYR i actualitzades fins 2024 a partir de les dades rebudes de FEDA amb control de qualitat RCLimdex.

2.2 Evolució del clima: projeccions climàtiques a Andorra

L'anàlisi estadístic de les dades climàtiques del passat ens permeten evidenciar canvis que ja s'han produït. No obstant això, per poder anticipar els canvis futurs i estimar el comportament climàtic per als propers anys, és imprescindible obtenir i analitzar projeccions climàtiques. Els models climàtics globals constitueixen el punt de partida per poder generar projeccions regionalitzades mitjançant mètodes de descens d'escalas estadístic o dinàmics (downscaling, en anglès). Aquest és un pas clau per proporcionar informació a escala regional i local, indispensable per als estudis d'impacte i la definició d'estratègies d'adaptació.

Actualment als Pirineus, i també Andorra, gràcies a projectes europeus com CLIM'PY (EFA081/15) i PIRAGUA (EFA210/16), es disposa de projeccions climàtiques regionalitzades ajustades al context pirinenc per a diferents variables. A la taula 5 es presenta un resum amb la informació més rellevant derivada d'aquests treballs. Els

resultats complets i l'anàlisi més detallat de les projeccions disponibles en territori andorrà es poden consultar a la web d'Andorra Recerca + Innovació⁷ i a l'ANNEX 1: Comparació de les projeccions climàtiques CLIM'PY i PIRAGUA.

Com es descriu a Amblar-Francés et al. (2020) i Quintana-Seguí & Vidal (2022), la metodologia de regionalització climàtica utilitzada tant a CLIM'PY com PIRAGUA s'ha aplicat a un nombre diferent de projeccions climàtiques globals (GCM) publicades a través del projecte CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project – phase 5) del programa mundial de investigacions climàtiques (WCRP). Actualment el programa WCRP ja ha posat a disposició els resultats del CMIP6, i en el marc del projecte LIFE-Pyrenees4clima (2024-2030) està prevista una tasca per generar les projeccions regionalitzades als Pirineus, que permetran revisar i actualitzar aquestes projeccions.

Cal destacar que les projeccions climàtiques estan afectades per diferents fonts d'incertesa. Aquestes fonts d'incertesa procedeixen de les etapes associades a la seva generació, com per exemple, si la qualitat de les dades de temperatura i precipitació (reanàlisi) utilitzades durant la fase inicial d'ajust del període històric d'un model és baixa, això pot afectar la precisió de les projeccions futures (Sheridan et al., 2010).

Per tant, és important reconèixer que cada pas en la generació de projeccions climàtiques hereta les incerteses dels passos anteriors. Això vol dir que les incerteses s'acumulen al llarg del procés i poden afectar la precisió de les projeccions finals. Aquestes fonts d'incertesa poden agrupar-se en tres categories principals (Amblar-Francés et al., 2017).

- Incertesa associada a l'escenari socioeconòmic futur a conseqüència del desconeixement de les emissions i concentracions futures dels GEH i aerosols.
- Incertesa associada a la modelització climàtica a conseqüència de les limitacions de coneixement del sistema climàtic i la seva representació en un model.
- Incertesa associada a les metodologies de downscaling utilitzades i el seu ajust respecte les observacions.
- Incertesa associada a la variabilitat natural a conseqüència de la variabilitat interna del propi sistema climàtic.

Taula 5: resum de les característiques més rellevants de les projeccions climàtiques regionalitzades disponibles a Andorra, generades en el marc de diferents projectes europeus. S'indiquen les diferents variables atmosfèriques disponibles que es podran utilitzar per als estudis sectorials. [on GCM: model climàtic global; RCM: model climàtic regional].

⁷ https://ari.ad/images/projectes/evicc/projeccions_climatiques_andorra.html

PROJECCIONS CLIMÀTIQUES REGIONALITZADES als PIRINEUS			
Projecte EU	CLIM'PY- EFA 081/15 Amblar-Francés et al. (2020)	PIRAGUA - EFA210/16 Quintana-Seguí & Vidal (2022)	CLIM'PY – EFA 081/15 Verfaille et al. (2018)
Regionalització	24 GCMs CMIP5	6 GCMs CMIP5	- ADAMONT2017: 20 RCM (de EURO-CORDEX) Verfaille et al. (2017) - ADAMONT2020: 14 RCM (de EURO-CORDEX)
Metodologia	Regionalització estadística (2 mètodes): regressió per Tx i Tn, i anàlegs per Ptot) Reanàlisi de referència (see Peral et al.,2017)	Regionalització estadística: tècnica de remostreig d'anàlegs basada en tres variables (CLIM'PY) i acoblament SAFRAN Reanàlisi de referència (see Quintana-Seguí & Cointe, 2022)	Regionalització dinàmica: mètode de correcció de biaix ADAMONT + acoblament sistema SAFRAN-ISBA-CROCUS Reanàlisi de referència SAFRAN-Nivo (S2M; Vernay et al., 2019)
Resolució espacial	5 km	2.5 km	Escala massís: Andorra (cada 300 m d'altitud)
Període	1986-2005 (HIST)-2100	1981-2010 (HIST)-2100	1980-2010 (HIST) -2100
Escenaris	HIST, RCP4,5, RCP6,0, RCP8,5	HIST, RCP4,5, RCP8,5	RCP2,6, RCP4,5, RCP8,5
Variables	Tx, Tn i Ptot	Tx,Tn,Tm, Ptot, P_liq, P_sol, Evaporació_potencial, HR (x, n, m), Vent_vel, Rad_solar_net (desc), Rad_IR_net (desc)	Gruix_neu, i altres ⁸
Més info ...	https://www.opcc-ctp.org/es/geoportal	https://digital.csic.es/handle/10261/270632	https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/215

En aquest sentit, l'anàlisi de les projeccions climàtiques proveïdes pels projectes europeus a Andorra s'han abordat considerant la diversitat més gran de font de dades. Per fer èmfasi a l'anàlisi de la incertesa. S'han seleccionat:

- Dos RCP's (RCP4,5 i RCP8,5)
- Totes les regionalitzacions disponibles (RCM's)
- Horitzons de pronòstics definits per l'IPCC (2023): 2021-2040 (curt termini), 2041-2060 (mitjà termini), 2081-2100 (llarg termini)

⁸ Més informació a: https://drias-prod.meteo.fr/serveur/simulations_climatiques/metadonnees/Adamont2/Liste_indicateurs_ADAMONT20_20_2023-12-04_Pub.pdf

Una forma directa de resumir i caracteritzar la variabilitat present en les projeccions climàtiques és mitjançant estadístiques descriptives aplicades a una finestra mòbil. Un exemple d'aquesta aproximació és el càlcul del quantils (Q17, Q25, Q75, Q83), on l'interval probable es defineix com el rang comprès entre Q17 i Q83, que representa el 66% de les dades (Jacob et al., 2014; Amblar-Francés, et al., 2020).

2.2.1 Temperatura mitjana

Els principals resultats de les projeccions CLIM'PY obtingudes pel mètode estadístic de regressió (Tmax i Tmin) mostren un augment progressiu de la temperatura mitjana anual al llarg del segle XXI (figura 11). L'increment detectat és més ràpid i pronunciat per a l'escenari RCP8.5 i més lent i estable per a l'escenari RCP4.5, encara que aquest últim, pateix oscil·lacions tèrmiques anuals força destacades.

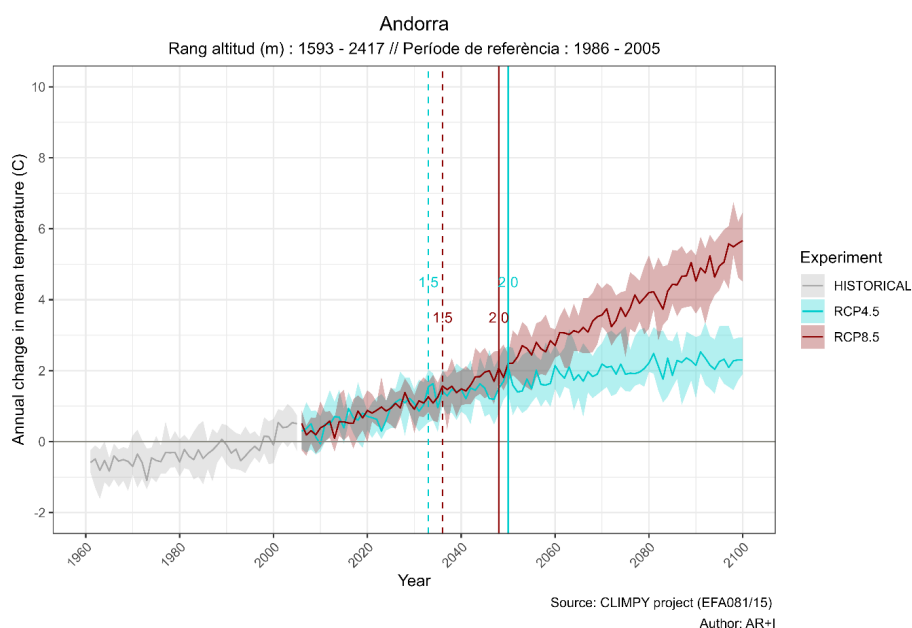


Figura 11: Evolució de l'anomalia anual de la temperatura mitjana diària (°C) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats (RCP4.5 en blau i RCP8.5 en vermell). La mediana de tots els RCM es representa per una línia sòlida i l'ombra representa els percentils 17 i 83 de tots els models utilitzats. En gris, s'indica el període HISTORIC.

Es detecta com a finals de segle XXI l'impacte de l'escenari RCP4.5 en la variació del valor mitjà de temperatura mitjana anual es situaria al voltant dels 2,5 °C per sobre del període de referència (1986-2005). Pel que fa a l'escenari més emissiu, les variacions estarien compreses entre 4,0 °C i 5,5 °C a finals de segle. La incertesa, vinculada als escenaris RCP's (separació entre les línies sòlides) augmenta amb el temps, en canvi la relacionada amb els models, interval probable es manté (amplada de la zona ombrejada, Q17-Q83).

D'una banda, l'escenari menys emissiu, assolirà el grau i mig i els dos graus d'increment de temperatura l'any 2034 i 2050 respectivament. D'altra banda en l'escenari més emissiu, s'assoliran aquests increments de temperatura l'any 2028 i 2038 respectivament. Malauradament aquests escenaris d'escalfament a escala local ja s'han assolit, per tant sembla que estem davant unes projeccions que podrien presentar un biaix respecte el període històric o bé les tècniques de regionalització aplicades presentin mancances, cal fer un seguiment de si s'està subestimant l'increment de l'escalfament per l'horitzó de pronòstic a més curt termini. Per tant, com ja apunta l'IPCC (2023) caldrà tenir en compte que cada increment addicional que pateixi l'escalfament global intensificarà els perills, creant riscos compostos i en cascada; això els fa més complexos i difícils de gestionar, de manera que les opcions d'adaptació que actualment són viables i efectives, ho seran menys en els propers anys.

2.2.2 Temperatura màxima i mínima

Si ens centrem en la descripció de l'evolució temporal de la mitjana anual de les temperatures màximes i mínimes, s'identifica el mateix patró que per la temperatura mitjana anual. Amb un augment progressiu sota l'escenari futur menys emissiu RCP4.5 i més pronunciat per l'escenari RCP8.5.

La taula 6 mostra per cada horitzó de pronòstic i per cada escenari (RCP4.5 i RCP 8.5), el valor de la mediana i dels percentils 25 i 75, i dels percentils 17 i 83 (interval probable) de la temperatura màxima.

A curt termini (2021–2040), es pot observar una tendència similar entre els dos escenaris, ja que els valors tant de la mediana com dels percentils calculats són gairebé els mateixos, patint una variació de només 0,2 en favor de l'escenari més emissiu pel que fa als percentils.

Taula 6: càlcul per cada horitzó de pronòstic i escenari (RCP4.5 i RCP8.5), del valor de la mediana i dels percentils corresponents a la temperatura màxima (°C). Els horitzons s'han aplicat els criteris marcats pel sisè informe de l'IPCC (IPCC, 2023).

TEMPERATURA MÀXIMA				
Període	Escenari	Mediana (°C)	P25 / P75 (°C)	P17 / P83 (°C)
Curt termini (2021-2040)	RCP 4.5	10,0	9,6 / 10,2	9,5 / 10,4
	RCP 8.5	10,1	9,9 / 10,4	9,6 / 10,4
Mig termini	RCP 4.5	10,6	10,1 / 11,0	10 ,0/ 11,2

(2041-2060)	RCP 8.5	11,3	11,0 / 11,4	10,8 / 11,6
Llarg termini (2081-2100)	RCP 4.5	11,2	10,8 / 11,7	10,7 / 12,0
	RCP 8.5	14,3	13,3 / 14,7	13,1 / 14,9

A mig termini (2041 – 2060) s'observa un escalfament destacat en l'escenari més emissiu, amb un increment de gairebé un grau en el valor de la mediana respecte el període anterior, així com als percentils 75 i 83. També s'identifica com els dos escenaris comencen a divergir: l'escenari menys emissiu (RCP4.5) mostra un increment moderat, mentre que l'escenari més emissiu (RCP8.5) supera en més de mig punt els valors de l'escenari RCP4.5.

El darrer període analitzat, llarg termini (2081 – 2100), manté un increment moderat per l'escenari RCP4.5, amb valors de la mediana i dels percentils que no superen un grau d'increment respecte el curt termini. En canvi, l'escenari més emissiu presenta l'increment més accentuat, amb un augment aproximat de 3 punts tant en el valor de la mediana com en els percentils calculats respecte al període 2021-2040.

Anàlogament, la taula 7 presenta els mateixos estadístics per a les projeccions de la temperatura mínima anual. Pel que fa al curt termini (2021–2040), s'observa una tendència similar a la de la temperatura màxima, amb valors estables entre els dos escenaris. La principal diferència la trobem en els percentils 17 i 25, que mostren una reducció de 0,2 graus (menys refredament) a favor de l'escenari més emissiu, mentre que els percentils més elevats (75 i 83) es veuen augmentats en la mateixa proporció.

A mig termini (2041 – 2060), s'observa una disminució més destacada pel que fa a l'escenari més emissiu, en situar el valor de la mediana 0,7 per sobre que l'anterior període, així com pel que fa als percentils 17 i 25. L'escenari menys emissiu presenta un increment poc destacat, en superar en menys de mig grau els valors de l'anterior període, on els percentils més grans segueixen la tendència d'increment anterior.

Taula 7: càlcul per cada horitzó de pronòstic i escenari (RCP4.5 i RCP8.5), del valor de la mediana i dels percentils corresponents a la temperatura mínima (°C). Els horitzons s'han aplicat els criteris marcats pel sisè informe de l'IPCC (IPCC, 2023).

TEMPERATURA MÍNIMA				
Període	Escenari	Mediana (°C)	P25 / P75 (°C)	P17 / P83 (°C)
Curt termini (2021-2040)	RCP 4.5	1,4	1,1 / 1,6	1,0 / 1,7
	RCP 8.5	1,5	1,3 / 1,7	1,1 / 1,8
Mig termini (2041-2060)	RCP 4.5	1,9	1,5 / 2,1	1,4 / 2,4
	RCP 8.5	2,4	2,2 / 2,5	2,0 / 2,6

Llarg termini (2081-2100)	RCP 4.5	2,3	2 ,0/ 2,8	1,9 / 2,9
	RCP 8.5	4,7	3,9 / 5,0	3,7 / 5,1

El darrer període analitzat, corresponent al llarg termini (2081 – 2100), manté la mateixa tendència d'increment moderat respecte l'escenari RCP4.5, en no arribar-se a incrementar ni la mediana ni els valors dels percentils en més d'un grau. Per contra, l'escenari més emissiu mostra l'increment més accentuat respecte el període de referència, en reduir-se al voltant de 2 graus tant el valor de la mediana com el dels percentils 17 i 25. Els percentils més elevats (75 i 83) experimenten un increment de gairebé 3 graus.

Es pot concloure que les tendències d'augment detectades per la temperatura es mantindran durant aquest segle i seran més accentuades per la temperatura màxima que per la temperatura mínima.

2.2.3 Precipitació

Les projeccions per a la precipitació mitjana anual no mostren un comportament tant robust com el de la temperatura, ja que aquesta variable presenta una gran variabilitat interanual. Això dificulta identificar una tendència clara en aquesta variable. Per fer-ho, s'ha analitzat l'evolució temporal de la mediana de l'anomalia relativa de precipitació (%) (Figura 12).

En el cas d'aquesta variable, la concordança entre models és inferior que pel cas de les temperatures, de manera que les incerteses associades als models (àrea fons color), és més alta que la incertesa lligada als escenaris d'emissió (separació entre les línies d'evolució, vermell i blau) durant tot el període considerat. Tot el contrari que el comportament trobat per a les temperatures, on la incertesa associada als escenaris domina davant les incerteses dels models (Amblar-Francés et al., 2020). Així doncs, la seva evolució és molt incerta, i sembla no haver-hi una tendència clara, amb una senyal molt dèbil sobre quin tipus de canvi de la precipitació mitjana anual es podria produir en el futur.

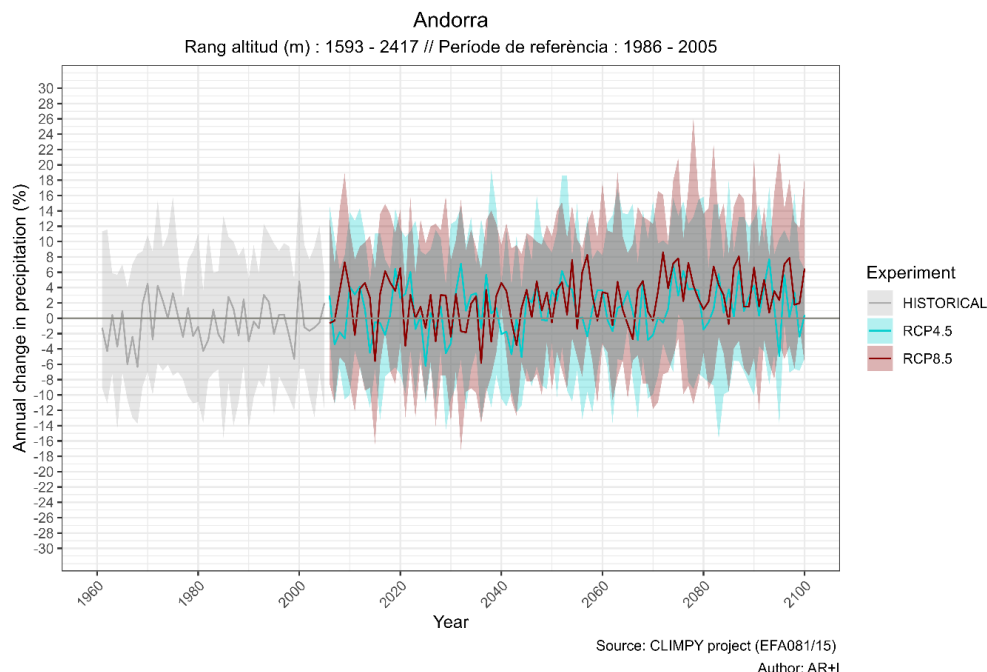


Figura 12: evolució del valor mitjà anual de precipitació diària (%) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia grisa i l'ombra representa l'interval probable (els percentils 17 i 83).

A través de la taula 8 podem veure que al primer període (2021 – 2040) s'observa exactament la mateixa tendència pels dos escenaris d'emissió, fet diferenciador si ho comparem amb les altres dues variables analitzades, les quals presentaven una diferenciació més destacada. Això ens indica una clara estabilitat d'aquesta variable entre els dos escenaris i per tot el període ja que els valors de la mediana i els percentils calculats són els mateixos per ambdós escenaris.

Si ens centrem en el període a mig termini (2041 – 2060), aquest manté gairebé els mateixos valors i per tant, la mateixa tendència respecte l'escenari RCP4.5, amb l'única diferència pel que fa al increment d'una dècima en el cas de la mediana i dels percentils 75 i 83. L'escenari més emissiu, presenta un petit increment de 0,1 en augmentar en la mateixa proporció tant el valor de la mediana com el dels percentils 17 i 25. L'augment dels altres dos percentils es gairebé inexistent.

Taula 8: Càlcul per cada horitzó de pronòstic i escenari (RCP4.5 i RCP8.5), del valor de la mediana i dels percentils corresponents a l'anomalia de la precipitació. Elaboració pròpia a partir dels criteris marcats pel sisè informe de l'IPCC (IPCC, 2023)

PRECIPITACIÓ				
Període	Escenari	Mediana (mm/dia)	P25 / P75 (mm/dia)	P17 / P83 (mm/dia)
Curt termini (2021-2040)	RCP 4.5	0.8	0.5 / 3.8	0.2 / 5
	RCP 8.5	1.0	0.4 / 3.8	0.2 / 5
Mig termini (2041-2060)	RCP 4.5	1.1	0.5 / 3.8	0.2 / 5
	RCP 8.5	1.3	0.5 / 3.9	0.2 / 5.1
Llarg termini (2081-2100)	RCP 4.5	1.5	0.5 / 3.9	0.2 / 5.1
	RCP 8.5	1.9	0.4 / 4.0	0.2 / 5.3

Pel que fa al període a llarg termini (2081 – 2100), manté exactament els mateixos valors i per tant, la mateixa tendència respecte l'escenari RCP4.5. D'altra banda, l'escenari més emissiu, presenta un estancament, en disposar dels mateixos valors tant pel que fa al valor de la mediana com el dels percentils 17 i 25, on fins i tot, en aquest darrer període veu reduït el seu valor.

Pel que fa a la precipitació sòlida en forma de neu, l'estudi Verfaillie et al. (2017) analitza l'evolució futura del gruix de neu utilitzant la metodologia ADAMONT, on s'aplica una tècnica de regionalització dinàmica. Les projeccions climàtiques per la neu als massissos pirinencs indiquen una disminució contínua del gruix del mantell nival, tot i que amb una forta variabilitat interanual. Això implicarà temporades amb nevades abundants, però amb una tendència general a una innivació que tendirà a ser cada vegada més dèbil a finals del segle XXI.

Al Principat d'Andorra, les cotes més vulnerables a les variacions en la innivació i amb un impacte més marcat seran les situades al voltant dels 1800 m (Figura 13). Al portal DRIAS de MeteoFrance⁹, es possible consultar l'evolució estimada del gruix mitjà de neu durant l'estació hivernal al llarg del segle XXI per a tres escenaris d'emissions (RCP4.5, RCP6.0 i RCP8.5) a diferents massissos del Pirineu i a Andorra.

⁹ Més informació a: <http://drias-climat.fr/>

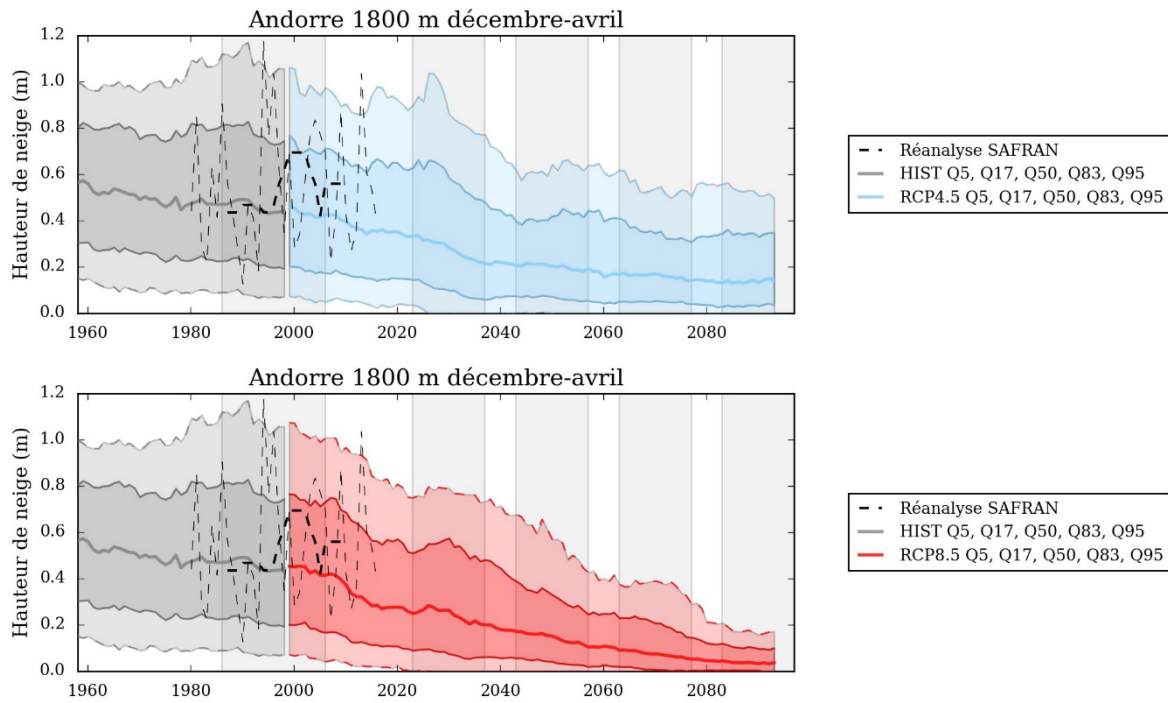


Figura 13. Evolució estimada del gruix mitjà de neu durant l'estació hivernal al llarg del segle XXI per tres escenaris d'emissions (RCP4.5 en blau i RCP8.5 en vermell) a la cota 1800m d'Andorra. Font: CLIM'PY; <http://drias-climat.fr/>

3. Índexs climàtics

A més de les tendències de temperatura i precipitació anual per a la caracterització de l'evolució del clima i detectar la senyal climàtica es important incorporar diferents índexs climàtics d'interès. S'ha escollit una selecció dels índexs climàtics termopluiuomètrics més rellevants seguint les recomanacions de l'Organització Meteorològica Mundial (OMM). Des del grup d'experts l'ETCCDMI (Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices) de l'OMM han estat establerts 27 índex amb el principal objectiu d'ajudar a caracteritzar el clima i fer un seguiment històric per detectar canvis a escala diària i dels extrems, així com posar en context les variacions projectades pels diferents horitzons de pronòstic per tot el segle XXI. Aquests índexs són estàndards i permeten la comparació de les tendències per a diferents climes del món (veure a la taula 9 els considerats més rellevants).

Taula 9: Principals índexs climàtics termo-pluiuomètrics seleccionats.

TEMPERATURA MÀXIMA (ETCCDMI)			
Codi	Nom índex	Definició	Unitats
SU25	Dies d'estiu	Nombre de dies en què TX > 25°C en un any	Dies
ID0	Dies glaçats	Nombre de dies en què TX < 0°C en un any	Dies
TX10p	Dies freds	Percentatge de dies en què TX < percentil 10	%
TX90p	Dies càlids	Percentatge de dies en què TX > percentil 90	%
WSDI	Indicador de durada de ratxa càlida	Nombre de dies en un any en què, com a mínim, hi ha 6 dies consecutius amb TX > percentil 90	Dies
TEMPERATURA MÀXIMA (ETCCDMI)			
FD0	Dies de glaçada	Nombre de dies en què TN < 0°C en un any	Dies
TR20	Nits tropicals	Nombre de dies en què TN > 20°C en un any	Dies
TN10p	Nits fredes	Percentatge de dies en què TN < percentil 10	%
TN90p	Nits càlides	Percentatge de dies en què TN > percentil 90	%
CSDI	Indicador de durada de ratxa freda	Nombre de dies en un any en què, com a mínim, hi ha 6 dies consecutius amb TN < percentil 90	Dies
PRECIPITACIÓ			
R10	Dies PPT ≥ 10mm	Nombre de dies en un any en que PPT és igual o superior a 10mm	Dies
R20	Dies PPT ≥ 20mm	Nombre de dies en un any en que PPT és igual o superior a 20mm	Dies
R50	Dies PPT ≥ 50mm	Nombre de dies en un any en que PPT és igual o superior a 50mm	Dies
R95p	PPT total anual en els dies molt plujosos	Precipitació total anual considerant els dies amb PPT superior al percentil 95	mm
CDD	Longitud màxima de la ratxa seca	Màxim nombre anual de dies consecutius en un any amb PPT igual o inferiors a 1.0mm	Dies

L'observatori de la muntanya d'Andorra¹⁰, és el portal creat per Andorra Recerca Innovació amb la col·laboració del Govern d'Andorra de consulta i seguiment de l'evolució observada dels 27 índexs climàtics al Principat (Figura 14 i 15). Aquests índexs s'han elaborat a partir de les 3 sèries diàries de temperatura màxima, mínima i precipitació des de 1950, que prèviament han estat sotmeses a un control de qualitat i homogeneïtat (Cuadrat et al., 2020).

A mode de resum, a Andorra s'observa que des del 1950:

🌡️ Hi ha hagut un increment del nombre de dies on la temperatura supera els 25°C.

🌡️ L'evolució del nombre de dies amb temperatures màximes inferior a 0°C és negativa. Han disminuït els dies gèlids a Andorra.

🌡️ L'evolució de les nits càlides és positiva sobretot a partir del decenni 1980.

☁️ Hi ha una disminució de la precipitació anual acompanyada per un increment de la intensitat.

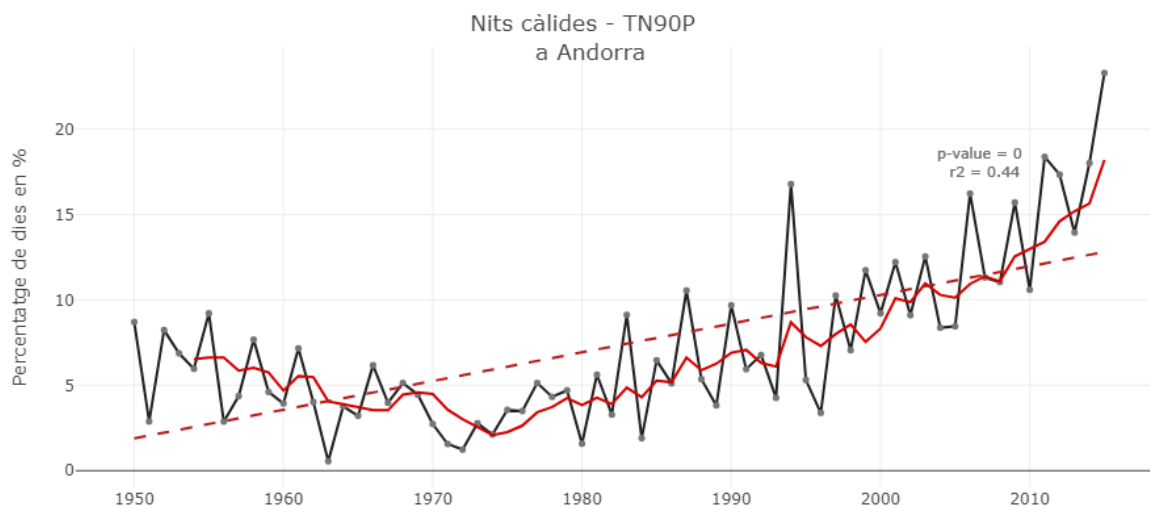


Figura 14: Percentatge de l'evolució observada de les nits càlides ($TN > TN90P$) (%) al Principat d'Andorra. Font: CLIM'PY.

¹⁰ Més informació: www.oma.ad/index-climatic

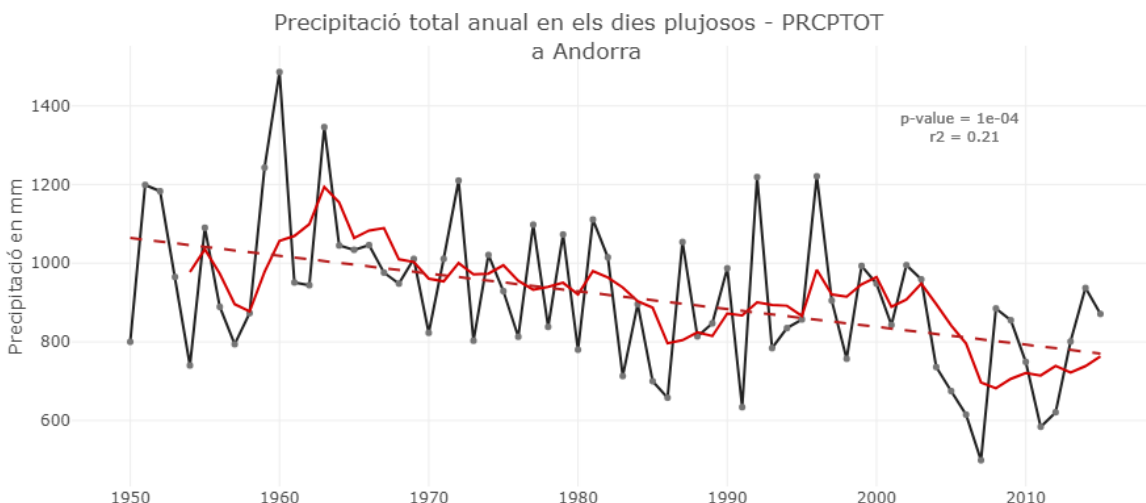


Figura 15: Evolució observada de la precipitació total anual durant els dies plujosos (PPT > 1 mm) al Principat d'Andorra. Font: CLIM'PY.

3.1 Evolució observada i projeccions pel segle XXI dels índexs climàtics: resultats del projecte CLIM'PY a Andorra

Per tal de conèixer l'evolució futura i les projeccions dels diferents índexs climàtics en territori andorrà sota diferents escenaris futurs possibles (RCP4.5 i RCP8.5), s'han utilitzat les projeccions de la temperatura i la precipitació a alta resolució (5 km x 5 km) obtingudes en el marc del projecte POCTEFA CLIM'PY (Amblar-Francés et al., 2020) per poder calcular-los.

En aquest apartat es mostra un resum dels canvis projectats dels principals índexs climàtics. Els resultats complets i l'anàlisi més detallat d'aquestes projeccions en territori andorrà es poden consultar a l'ANNEX 1.

L'anàlisi de les projeccions climàtiques s'ha abordat considerant tres aspectes importants, la globalitat, la estacionalitat i l'altitud:

- Analitzar l'evolució climàtica per tot el territori andorrà (14 píxels)
- Identificar possibles canvis estacionals en l'anàlisi del comportament mitjà de les variables
- Avaluar la idoneïtat d'incorporar criteris altitudinals durant l'anàlisi de les projeccions: fons de vall (<2000m) o alta muntanya (>2000m)

També s'han discriminat els píxels segons un criteri altitudinal, on tal com s'observa a la llegenda s'han classificat segons si es troben a fons de vall (< 2000 metres) o a alta muntanya (> 2000 metres). De fons s'ha representant un MDE 1x1 m que permet identificar les limitacions de treballar amb un pas de malla de 5x5km a l'hora de copsar la complexitat orogràfica del país. Tal com marca el límit parroquial en blanc, podríem

dir que totes les parròquies es veuen representades per algun píxel a excepció de la capital, Andorra la Vella. Això evidència les dificultats de poder donar resposta a escala parroquial de l'evolució del clima pel segle XXI.

Taula 10: Localització i classificació altitudinal dels píxels corresponents al territori andorrà del projecte CLIM'PY.

Píxel	Localització	Altitud (m)
17022	Sant Julià de Lòria	1740
17023	Sant Julià de Lòria	1593
17204	La Massana	1750
17205	Escaldes-Engordany	1735
17383	La Massana	1985
17384	Ordino	1877
17206	Encamp	2082
17207	Encamp	2342
17385	Canillo	2074
17386	Encamp	2417
17564	Ordino	2260
17565	Ordino	2175
17566	Canillo	2203
17567	Canillo	2247

A la figura 16a es mostra la distribució dels 14 píxels (taula 10) situats en territori andorrà i pels quals es disposa dels resultats de les projeccions climàtiques CLIM'PY.

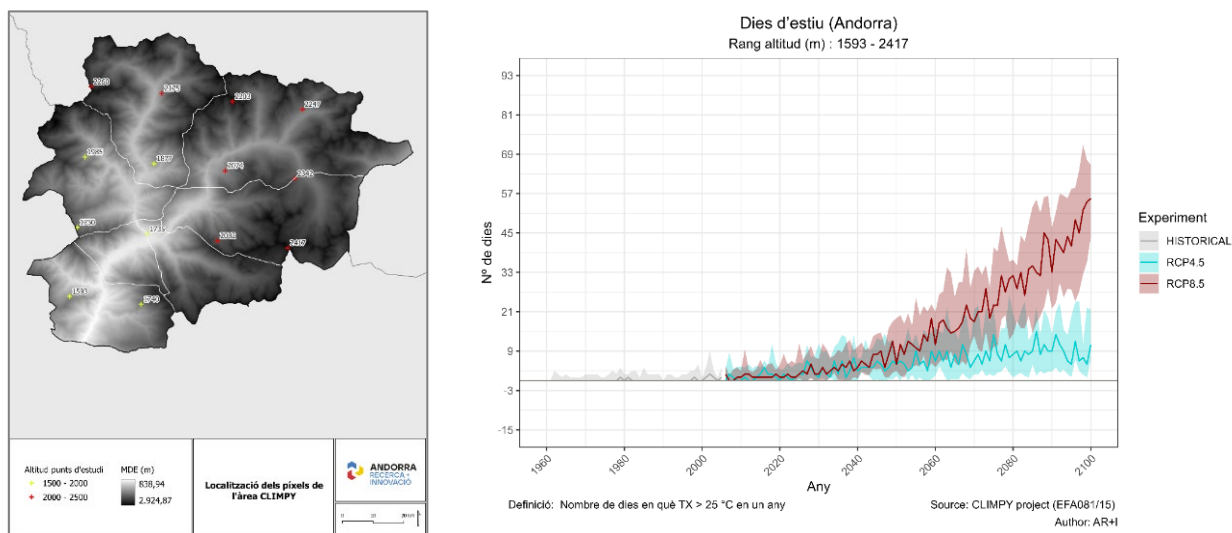


Figura 16: a) Localització de la malla de punts CLIM'PY que cobreix l'àmbit d'estudi a Andorra i la seva altitud associada. b) Evolució projectada del nombre de dies d'estiu (TX > 25°C) a Andorra per a cadascun

dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia grisa i l'ombra representa els percentils 17 i 83. Font: CLIM'PY.

3.1.1 Índexs climàtics associats a la temperatura

L'indicador SU25 mostra com en els darrers anys han incrementat notablement el nombre de dies on la temperatura màxima supera els 25°C, durant el 2022 es van registrar fins a 84 dies sent el màxim de la sèrie. En la projecció de l'evolució del SU25 es mostra un augment progressiu al llarg del S. XXI pels dos escenaris analitzats pel conjunt d'Andorra (Figura 16b). Aquest comportament és coherent amb l'evolució dels valors mitjans de la temperatura màxima mostrats anteriorment, on a finals de segle, a nivell de tot el territori andorrà s'espera que el nombre de dies d'estiu arribi a augmentar en gairebé 50 dies per a l'escenari més emissiu respecte el període de referència, i en 15 dies respecte l'escenari d'estabilització RCP4.5, observant-se un augment de la incertesa al llarg del segle, i una diferenciació entre ambdós escenaris molt accentuada.

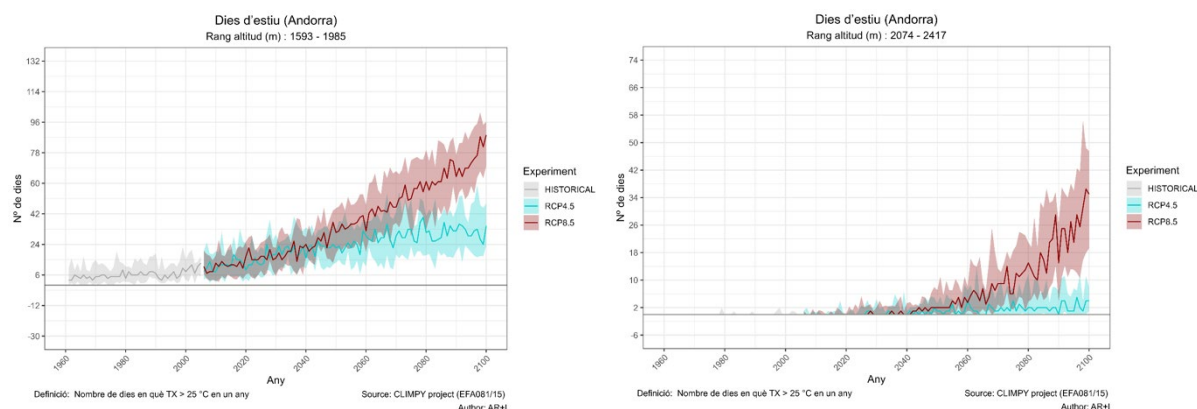


Figura 17: Evolució altitudinal projectada pels dies d'estiu per a 2 rangs diferents: agrupació del píxels per sota dels 2000m i per sobre dels 2000m. La mediana està representada per una línia grisa i l'ombra representa els percentils 17 i 83. Font: CLIM'PY.

Per alguns índexs climàtics té especial interès identificar també el seu comportament estacional. Aquest és el cas dels dies d'estiu SU25. S'identifica que a banda de l'estiu, l'augment de les temperatures màximes serà especialment rellevant a la tardor i es manifesta amb un magnitud superior a la projectada a la primavera (Figura 18). A més del canvi estacional projectat per aquest índex, també es interessant observar el seu comportament diferenciat amb l'altitud, de manera que els píxels a fons de vall (<2000m) mostren un increment superior als que es situen per sobre dels 2000m, sigui quina sigui l'estació de l'any.

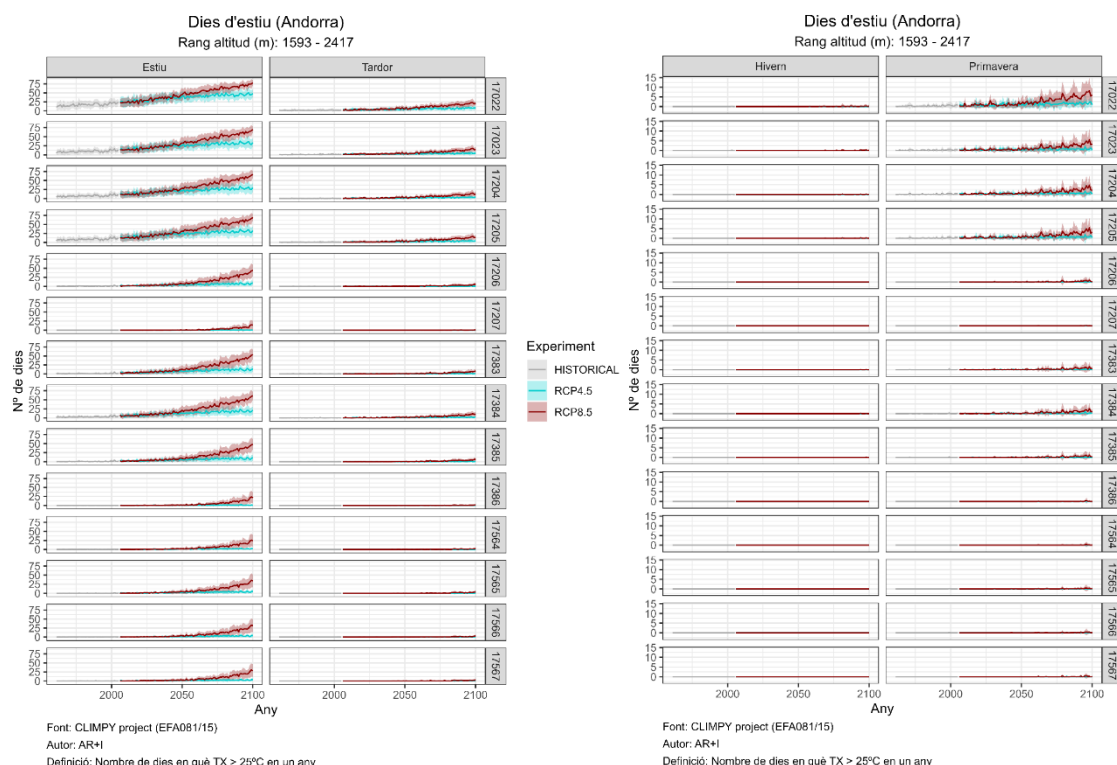


Figura 18: Evolució estacional projectada del nombre de dies d'estiu (TX > 25°C) per a cadascun dels RCP analitzats en territori andorrà. La mediana està representada per una línia grisa i l'ombra representa els percentils 17 i 83. Font: CLIM'PY.

Pel que fa als **dies glaçats (ID0)** on la temperatura màxima no supera els 0°C, els darrers els trobem a l'any 2017 amb dos dies a l'any. Pel que fa als dies freds només 1% la temperatura màxima diària es troba per sota del percentil 10. A finals de segle s'espera que el percentatge de dies freds disminueixi aproximadament fins el 2.5 % i de manera constant per l'escenari més emissiu RCP8.5 respecte el període de referència, i fins al 7.5 % respecte l'escenari d'estabilització RCP4.5, encara que la disminució que es produeix en aquest darrer escenari, es manté de manera força estable la segona meitat del segle, patint petites oscil·lacions anuals. En els dos escenaris però, s'observa una tendència decreixent.

En canvi, els **dies càlids (TX90p)** són un 27% de dies a l'any, on la temperatura màxima supera el percentil 90. A finals de segle s'espera que la freqüència de dies càlids augmenti aproximadament un 55 % i de manera constant per l'escenari RCP8.5 respecte el període de referència, i fins al 30 % respecte l'escenari d'estabilització RCP4.5, encara que l'augment que es produeix en aquest darrer escenari, es manté de manera força estable la segona meitat del segle, patint petites oscil·lacions anuals. El 2022 va ser l'any més càlid a l'estació de Central de FEDA on el nombre de dies en

ratxa càlida es va elevar fins a 33 dies consecutius, molt a prop del 2015 amb 33 dies consecutius.

Pel que fa als índexs de temperatures mínimes aquests mostren una tendència totalment oposada a la temperatura màxima. Per tant, els **dies de glaçada (FD0)** han disminuït notablement, en aquest 2022 s'ha registrat 38 dies quant la mitjana pel període de referència és de 80 dies a l'any (Figura 19). A finals de segle s'espera que el nombre de dies glaçats disminueixi en gairebé 90 dies i de manera constant per l'escenari més emissiu RCP8.5 respecte el període de referència, i en aproximadament 35 dies respecte l'escenari d'estabilització RCP4.5, encara que la disminució que es produeix en aquest darrer escenari, es manté de manera estable la segona meitat del segle, patint petites oscil·lacions interanuals.

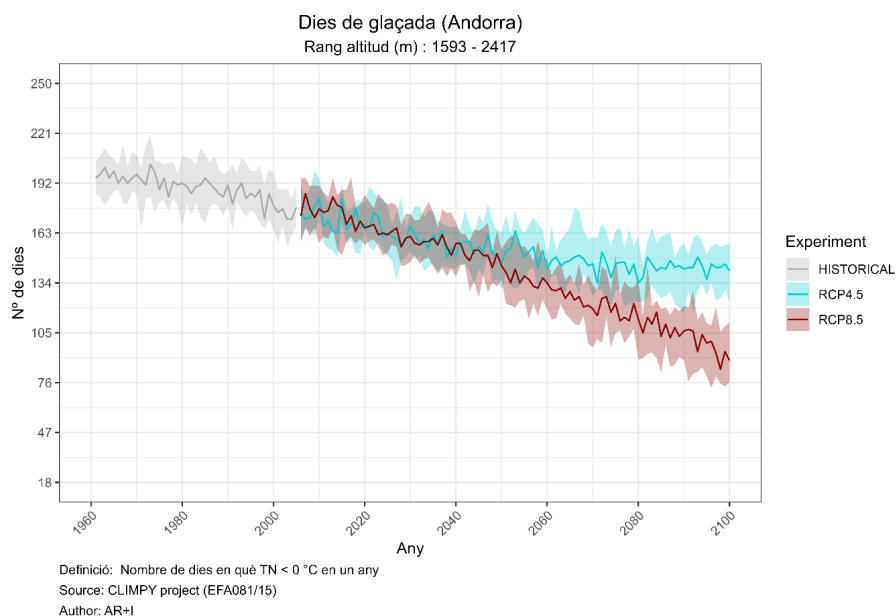


Figura 19: Evolució projectada del nombre de dies de glaçada ($TN < 0^{\circ}C$) a Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia grisa i l'ombra representa els percentils 17 i 83. Font: CLIM'PY.

Pel que fa a les **nits tropicals (TR20)** el passat 2022 encara no se n'havia registrat cap superior als $20^{\circ}C$ a l'estació de Central (1100m). En canvi, en altres estacions com Aixàs (1450m) s'han registrat nits tropicals en diferents episodis al juliol del 2015 i a l'agost del 2012 i 2021. Aquest indicador serà d'especial interès ja que mostra un comportament atípic respecte als altres indicadors. Serà important fer el seguiment tant a l'alta muntanya com a fons de vall. I sobretot identificar si **les nits tropicals observades s'estan produint abans del que preveien les projeccions, fins i tot les dels escenaris més emissius** (Figura 20).

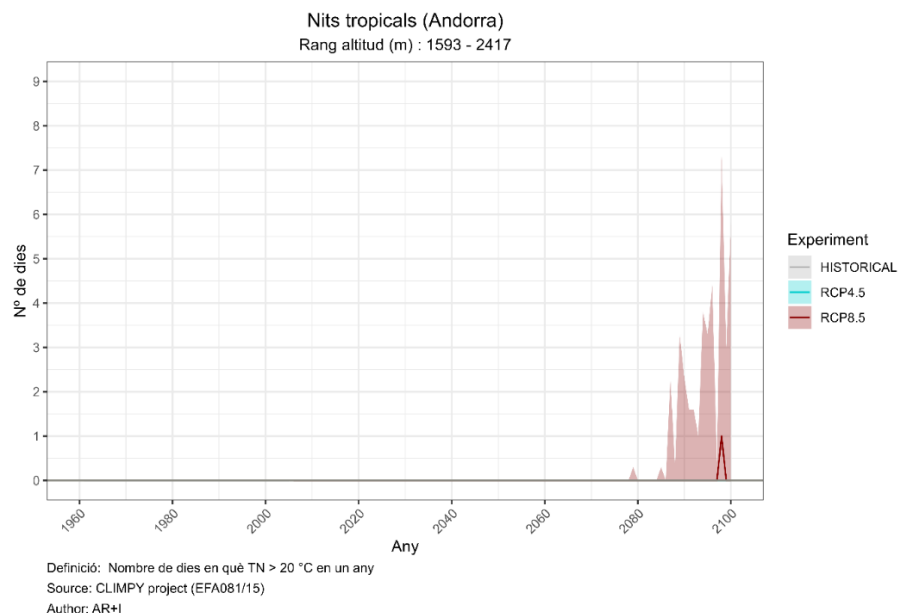


Figura 20: Evolució projectada del nombre de nits tropicals ($TN > 20^{\circ}\text{C}$) a Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia grisa i l'ombra representa els percentils 17 i 83. Font: CLIM'PY.

Pel que fa al percentatge de **nits fredes (TN10p)**, només el 1.37% ha comportat temperatures mínimes que no han superat el percentil 10. A finals de segle, s'espera que el percentatge de dies freds disminueixi aproximadament fins el 2.5 % i de manera constant per l'escenari més emissiu RCP8.5 respecte el període de referència, i fins al 7.5 % en l'escenari d'estabilització RCP4.5, encara que la disminució que es produeix en aquest darrer escenari es manté de manera força estable les darreres dues dècades del S. XXI. En els dos escenaris però, s'observa una tendència decreixent.

En canvi, per a les **nits càlides (TN90p)** aquestes s'han donat en un 28.2% a l'any, quant de mitjana n'hi hauria d'haver un 7.7% a l'any. A finals de segle s'espera que la freqüència de nits càlides augmenti aproximadament un 50 % i de manera constant per l'escenari més emissiu RCP8.5 respecte el període de referència, i fins al 30 % respecte l'escenari d'estabilització RCP4.5, encara que l'augment que es produeix en aquest darrer escenari, es manté més estable la segona meitat del segle, patint un increment més moderat. En els dos escenaris però, s'observa un augment de la incertesa al llarg del segle.

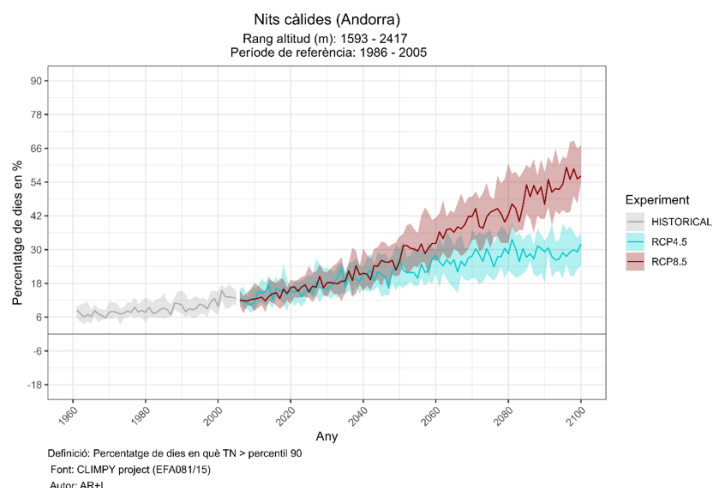


Figura 21: Evolució projectada del nombre de nits tropicals (TN > percentil 90) a Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia grisa i l'ombra representa els percentils 17 i 83. Font: CLIM'PY.

3.1.2 Índexs climàtics associats a la precipitació

Pel que fa a la [precipitació](#), l'evolució projectada del nombre de dies amb una precipitació diària superior a 10 mm no mostra cap tendència (indicador R10; Figura 22). En els altres indicadors, com la ratxa seca o en la ratxa humida es mostra molta variabilitat interanual i la tendència no és marcada.

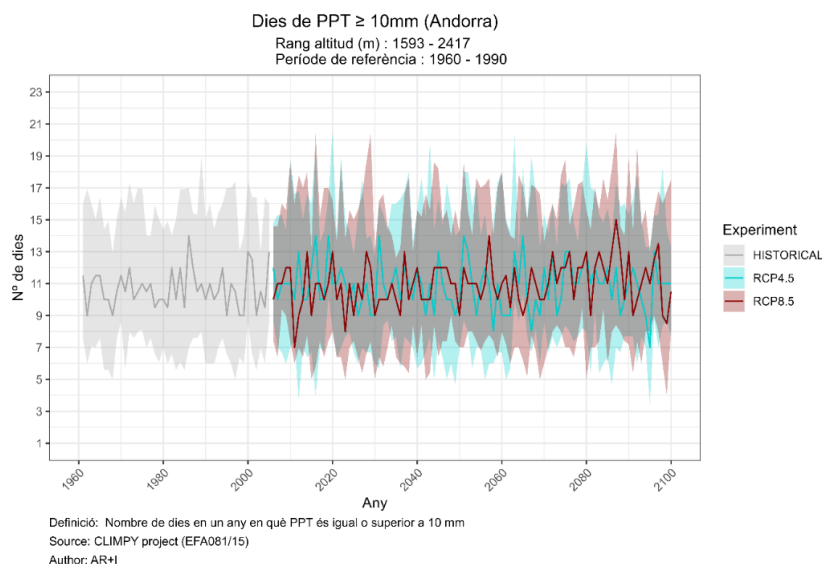


Figura 22: Evolució projectada del nombre de dies amb precipitació diària superior a 10 mm (PPT > 10 mm) a Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia grisa i l'ombra representa els percentils 17 i 83. Font: CLIM'PY.

A continuació es mostra una taula resum amb l'evolució futura projectada a finals del segle XXI d'alguns dels ETCCDI més rellevants. Es mostra l'evolució de la mediana (Q50) de totes les regionalitzacions del projecte CLIM'PY i pels dos escenaris analitzats RCP4.5 i RCP8.5.

Tauia 11: La taula mostra el càlcul de l'evolució de la mediana (Q50) de totes les regionalitzacions del projecte CLIM'PY i per cada uns dels 2 escenaris RCP's projectada a finals del segle XXI d'alguns dels ETCCDI més rellevants. Elaboració pròpia a partir dels criteris marcats pel sisè informe de l'IPCC (IPCC, 2023).

Canvis en els Índex Climàtics					
Nom índex (ETCCDMI)	Escenari	Període històric (1986-2005)	Escenari	Llarg termini (2081-2100)	Unitat
Dies d'estiu (SU25)	HISTORICAL	1,4	RCP4.5	10,7	Dies
			RCP8.5	39,7	
Dies glaçats (ID0)	HISTORICAL	37,8	RCP4.5	20,9	Dies
			RCP8.5	10,1	
Nombre de dies freds(TX10p)	HISTORICAL	8,7	RCP4.5	3,1	%
			RCP8.5	1,0	
Nombre de dies càlids(TX90p)	HISTORICAL	13,5	RCP4.5	34,2	%
			RCP8.5	57,4	
Indicador de durada de ratxa càlida (WSDI)	HISTORICAL	8.3	RCP4.5	13,0	Dies
			RCP8.5	30,3	
Dies de glaçada (FD0)	HISTORICAL	183,2	RCP4.5	142,7	Dies
			RCP8.5	102,1	
Nombre de nits tropicals (TR20)	HISTORICAL	Sense valor	RCP4.5	Sense valor	Dies
			RCP8.5	1,0	
Nombre de nits fredes(TN10p)	HISTORICAL	8,7	RCP4.5	3,1	%
			RCP8.5	1,0	
Nombre de nits càlides(TN90p)	HISTORICAL	13,4	RCP4.5	33,3	%
			RCP8.5	55,0	
Indicador de durada de ratxa freda (CSDI)	HISTORICAL	3,1	RCP4.5	1,9	Dies
			RCP8.5	0,3	

4. Identificació dels factors climàtics i els impulsors de l'impacte climàtic

Després de fer l'anàlisi purament climàtic a partir de les tendències, i les projeccions de la temperatura i la precipitació com també d'alguns índexs climàtics, cal identificar quins són els aspectes del sistema climàtic que estan canviant i està previst que continuïn variant i poden influir en els components d'un sistema humà o natural.

En aquest sentit, tal com s'ha descrit a l'informe "Canvi climàtic: components del risc"¹¹, s'enumeraran quins són els principals impulsors de l'impacte climàtic classificats per l'IPCC (CID) identificats a Andorra i que poden afectar als diferents sectors considerats en aquest treball (sector primari, salut, turisme i energia). Es tracta d'una taula preliminar, que es completarà a mesura que sectorialment s'identifiquin els CID's específics per cadascun d'ells (taula 12).

Taula 12: Tipologia d'indicadors climàtics requerits per als diferents sectors.

Categoria CID	Factors climàtics	Definició/indicador	Salut	Energia	Turisme	Sector primari
Calor	Onada de calor	Caracterització dels episodis de temperatura màxima extrema				
Calor	Calor intensa	Superació de llindars				
Fred	Onada de fred	Caracterització dels episodis de temperatura mínima extrema				
Sequera	Sequera extrema	SPI - SPEI				
Humitat	Precipitació extrema	Superació de llindars				
Neu	Precipitació en forma de neu	Durada d'una temporada				
Temps sever	Episodis extrems	European Extreme Events Climate Index (E3CI)				
Temps sever	Calamarsa	European Extreme Events Climate Index (E3CI) Hail leading condition				

L'objectiu principals d'aquests indicadors es proporcionar informació de quin és l'impacte i la gravetat del efectes del canvi climàtic en els diferents sector. Les

¹¹ Per més informació: https://ari.ad/images/projectes/evicc/components_risc.pdf

característiques principals d'aquests indicadors és que es puguin calcular pel present i que es pugui garantir el càlcul en un futur. A més, aquest indicadors s'han d'alimentar de les dades disponibles i descrites a la taula 1.

Per tant, es desenvoluparan els indicadors de la taula 12 (possiblement aquesta taula al final del treball serà molt més extensa), s'aplicarà la metodologia definida per a cada indicador i quines dades s'han utilitzat per ajustar-se a cada sector. A banda de treballar amb les tendències observades dels indicadors, també es podrà calcular la seva evolució futura gràcies a les projeccions climàtiques.

4.1 Exemple d'aplicació: onada de calor

Per caracteritzar les onades de calor s'ha utilitzat la metodologia definida en el marc del projecte Extremoscope (Soubeyroux et al., 2016) a partir dels següents paràmetres:

- La duració de l'episodi a partir del nombre de dies que es manté la MT per sobre del percentil 97.5, tenint en compte la interrupció de l'onada, és a dir, tot i tenir un dia en que la temperatura mitjana baixa del percentil 90 es manté l'onada de calor, en canvi, si la MT és inferior al percentil 90 durant més de dos dies es dona per acabat l'episodi.
- La severitat, que es calcula a partir de la diferència positiva de la temperatura mitjana diària d'un dia a l'altre durant l'episodi d'onada de calor.
- La intensitat, que es defineix com la temperatura mitjana màxima de l'episodi.

Les dades utilitzades han estat:

- Per a l'anàlisi històric i càlcul de percentils pel període de referència climàtic 1981-2010 s'han utilitzat les dades de la temperatura mitjana diària de l'estació de Central de FEDA (1935-2023).
- Per les projeccions climàtiques s'han utilitzat els resultats del projecte CLIM'PY (Amblar et al., 2020), on dins del territori andorrà disposem de 14 punts, 6 dels quals es troben per sota de 2000m.

L'adopció d'aquesta metodologia per la caracterització dels episodis extrems d'onades de calor, permet fer l'anàlisi i comparació de l'evolució de la seva severitat (sumaGraus), intensitat (MTx) i duració, això és clau pels estudis d'impacte i adaptació (Albalat et. al., 2023)¹².

Com es mostra a la figura 23, la seva aplicació ha permès elaborar un inventari de les 137 onades de calor esdevingudes a Andorra des del 1935 fins a l'actualitat, establir-ne un climatologia i analitzar-ne les tendències. Es confirma un increment en la

¹² Més informació: <https://ari.ad/noticies/ari-presenta-barcelona-lanalisi-onades-calor>

freqüència de les onades de calor, així com de la seva severitat i durada, especialment rellevant durant la última dècada.

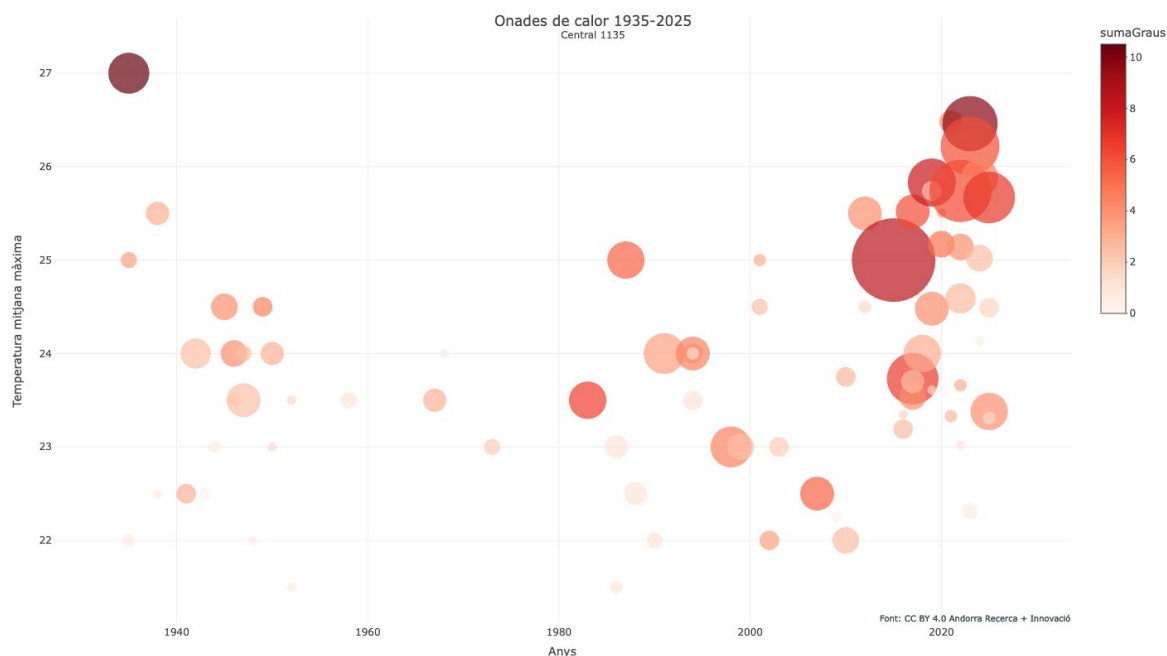


Figura 23: Inventari dels episodis d'onada de calor a l'estació de Central de FEDA (137 únics). En l'eix horitzontal es mostren els anys des del 1935 fins al 2025 i en l'eix vertical la intensitat (MT màxima). Cada punt representa un episodi, el color de la bombolla representa els graus acumulats (severitat), la grandària de la bombolla el nombre de dies (duració) i la posició en l'eix vertical, la intensitat

Com s'havia descrit a la secció 2.2.1, es detecta que a escala regional en zones de muntanya, els models climàtics subestimen les anomalies de temperatura (històric), i en conseqüència la caracterització de les onades de calor. El ritme de creixement de la temperatura (models climàtics) mostra que al 2034 s'assoliran els 1,5°C i el 2,0°C al 2050 per l'escenari RCP4.5 (Fig. 11). Les observacions indiquen que aquest límit ja és una realitat, el 2020 es va superar per primera vegada 1,5°C i el 2022 es van superar els 2,5°C a l'estació de Central de FEDA (Fig.9).

Pel que fa a les projeccions (Figura 24), hi haurà un increment del nombre de dies en situació d'onada de calor sobretot per l'escenari RCP8.5 i per tant, menys freqüència d'episodis (any 2059 amb + de 70 dies en onada de calor). En canvi, l'escenari RCP4.5 mostra més freqüència d'episodis amb menys duració. En les projeccions no s'ha detectat cap onada de calor fora dels mesos de juny a setembre. Es confirma un increment en la freqüència de les onades de calor, així com de la seva severitat i durada, especialment rellevant durant la última dècada del segle XXI.

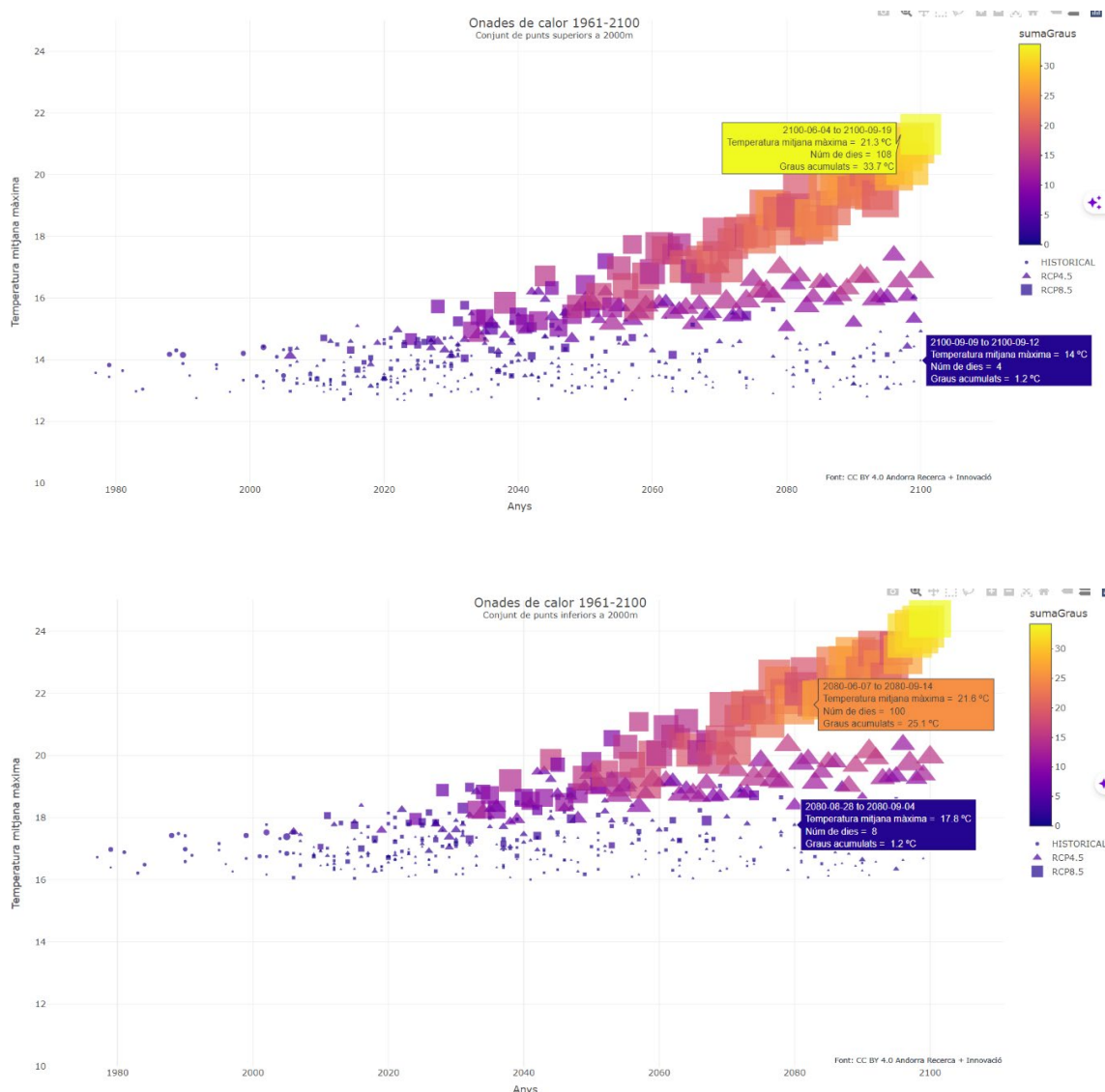


Figura 24: Anàlisi de les onades de calor per als escenaris RCP4.5 i RCP8.5 per Andorra en altituds per sota de 2000m (esquerra) i pel conjunt de punts per sobre 2000. (dreta). En l'eix horitzontal es representa els anys període 1960-2100 i en l'eix vertical la temperatura mitjana màxima (intensitat). Cada símbol representa un escenari, el color la severitat i en grandària la duració dels episodis. Font: CLIM'PY.

Les onades de calor són un dels factors climàtics amb més impacte en termes de salut planetària. Les tendències són inequívokes, però les limitacions actuals de les projeccions climàtiques en territoris de muntanya, no permeten determinar l'abast dels possibles impacte. L'AR6 SYR de l'IPCC, ja afirma que aquests episodis són més freqüents i succeeixen amb nivells d'escalfament global més baix del que es pensava prèviament.

Referències

Albalat A., Trapero L., Pons M., (2018). Climatic trends and projections of snow observations over Andorra: the case of Ransol (1645m). Poster in International Snow Science Workshop 2018, Innsbruck. https://arc.lib.montana.edu/snow-science/objects/ISSW2018_P06.15.pdf

Albalat, A., Trapero, L., Quintana, A., Lemus, M. (2023). Anàlisi dels episodis d'onada de calor en una zona d'orografia complexa: el cas d'Andorra. Poster in XXIX jornades Eduard Fontserè, 2023, Barcelona.

Amblar-Francés, M.P., Ramos, P., Casado, M.A., Pastor, A. & Rodriguez, E. (2017). Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5, doi:10.31978/014-17-010-8.

Amblar-Francés, M.P., Ramos, P., Sanchis, J., Hernanz, A., Peral, M.C., Navascués, B., Dominguez, M., Pastor, M.A. & Rodríguez, E. (2020). High resolution climate change projections for the Pyrenees region, *Advances in Science and Research*, 17, 191–208, doi:10.5194/asr-17-191-2020.

BICCPir, 2023: <https://infogram.com/1pkrw0y6e1v1k7b9zvzk0w1qkka367970v7> ; <https://www.opcc-ctp.org/ca/contenido/butlleti-climatic-biccpir>

Brunet, M., Casado, M.J., Castro, M., Galán, M., López, P., Martín, J., Pastor, J., Petisco, A., Ramos, E., Ribalaygua, P., Rodríguez, E. & Torres, L. (2007). Generación de Escenarios Regionalizados de Cambio Climático para España. Primera Fase.

Cuadrat, J.M., Serrano-Notivol, R., Tejedor, E., Saz, M.A., Prohom, M., Cunillera, J., Lladrés, A., Trapero, L., Pons, M., López-Moreno, J.I., Copons, R., Gascoin, S., Luna, Y., Rodríguez, E., Ramos, P., Amblar, P., & Soubeyroux, J-M. (2020). CLIM'PY: Climate of the Pyrenees (1.0) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3611127>

IPCC. (2013). Technical Summary. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.

IPCC. (2022). High Mountain Areas. In *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. NY, USA, pp. 131-202, doi:10.1017/9781009157964.004.

Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 37–118, doi:10.1017/9781009325844.002.

AR6, IPCC (2023). Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6). Longer Report. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf

IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, (in press).

Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., et. al., (2014). EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, doi: 10.1007/s10113-013-0499-2.

López-Moreno, J.I., Soubeyroux, J.M., Gascoin, S., Alonso-Gonzalez, E., Durán-Gómez, N., Lafaysse, M., Vernay, M., Carmagnola, C., Morin, S., 2020. Long-term trends (1958–2017) in snow cover duration and depth in the Pyrenees. *Int J Climatol*. 2020; 40: 6122–6136. <https://doi.org/10.1002/joc.6571>

OECC, 2019: <https://www.mediambient.ad/indicadors>.

<https://www.mediambient.ad/canvi-climatic/adaptacio-andorra-canvi-climatic>

USGCRP, 2016: The Impacts of Climate Change on Human Health in the United States: A Scientific Assessment. Crimmins, A., J. Balbus, J.L. Gamble, C.B. Beard, J.E. Bell, D. Dodgen, R.J. Eisen, N. Fann, M.D. Hawkins, S.C. Herring, L. Jantarasami, D.M. Mills, S. Saha, M.C. Sarofim, J. Trtanj, and L. Ziska, Eds. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, 312 pp. <http://dx.doi.org/10.7930/J0R49NQX>

Pepin, N.C., Bradley, R., Diaz, H., Baraer, M., Cáceres, B., Forsythe, N., Fowler, H., Greenwood, Gregory., Hashmi, M., Liu, X., Miller, J., Ning, L., Ohmura, A., Palazzi, E., Rangwala, I., Schöner, W., Severskiy, I., Shahgedanova, M., Wang, M. & Yang, D. (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*. num. 5, pp. 424–430, doi: 10.1038/nclimate2563.

Pepin, N.C., Arnone, E., Gobiet, A., Haslinger, K., Kotlarski, S., Notarnicola, C., et al. (2022). Climate changes and their elevational patterns in the mountains of the world. *Reviews of Geophysics*, 60, doi:10.1029/2020RG000730

Peral, C., Navascués, B., and Ramos, P.: Serie de precipitación diaria en rejilla con fines climáticos, Nota Técnica no. 24, AEMET, available at: http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/NT_24_AEMET/NT_24_AEMET.pdf

Quintana-Seguí P; Vidal J-P; PIRAGUA_atmos_climate [Dataset]; Observatori de l'Ebre (URL – CSIC); <https://digital.csic.es/handle/10261/270632>

Quintana-Seguí P; Le Cointe P; 2022; PIRAGUA_atmos_analysis [Dataset]; Observatori de l'Ebre (URL – CSIC); <http://digital.csic.es/handle/10261/271111>; <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14665>

Quintana, A. (2023). Projeccions de canvi climàtic a Andorra: anàlisi i càlcul d'indicadors en el marc de l'estratègia nacional d'adaptació al canvi climàtic. [Universitat Rovira i Virgili]. <http://hdl.handle.net/20.500.11797/TFG6035>

Sigró, J., Cisneros, M., & Pérez Luque, A.J., Pérez-Martínez, C & Vegas-Vilarrúbia, T. (2024). Trends in temperature and precipitation at high and low elevations in the main mountain ranges

of the Iberian Peninsula (1894–2020): The Sierra Nevada and the Pyrenees. *International Journal of Climatology*. 44. n/a-n/a. 10.1002/joc.8487.

Soubeyroux, J.-M., Ouzeau, G., Schneider, M., Cabanes, O., & Kounkou-Arnaud, R. (2016). Les vagues de chaleur en France: analyse de l'été 2015 et évolutions attendues en climat futur. *La Météorologie*, 8(94), 45. <https://doi.org/10.4267/2042/60704>.

Vernay, M., et al. 2022 : The S2M meteorological and snow cover reanalysis over the French mountainous areas: description and evaluation (1958–2021), *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 1707–1733, <https://doi.org/10.5194/essd-14-1707-2022>.

Verfaillie, D., et al. 2018 : Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500/m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps, *The Cryosphere*, 12, 1249-1271.

Verfaillie, D., et al. 2017 : The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models, *Geosci. Model Dev.*, 10, 4257-4283.

ANNEX 1: Comparació de les projeccions climàtiques CLIM'PY i PIRAGUA

Durant el desenvolupament del projecte EVICC, per caracteritzar l'evolució projectada del clima al llarg segle XXI s'utilitzaran preferiblement les projeccions generades pel projecte CLIM'PY (Tx, Tn i P). Si bé, es complementarà amb l'ús de les projeccions de PIRAGUA quan es requereixin altres variables climàtiques essencials (ECV), com humitat relativa, velocitat del vent, insolació o radiació, o d'altres fonts com Adamont o Copernicus principalment per variables nivològiques¹³. És important mostrar l'evolució temporal i els resultats obtinguts per les projeccions de les variables comunes en els dos projectes. Cal contextualitzar aquesta comparació, ja que com s'ha descrit a la Taula 5, tant les metodologies de regionalització, com els GCM utilitzats, com els reanàlisis i períodes històrics de referència utilitzats per cada projecte poden diferir.

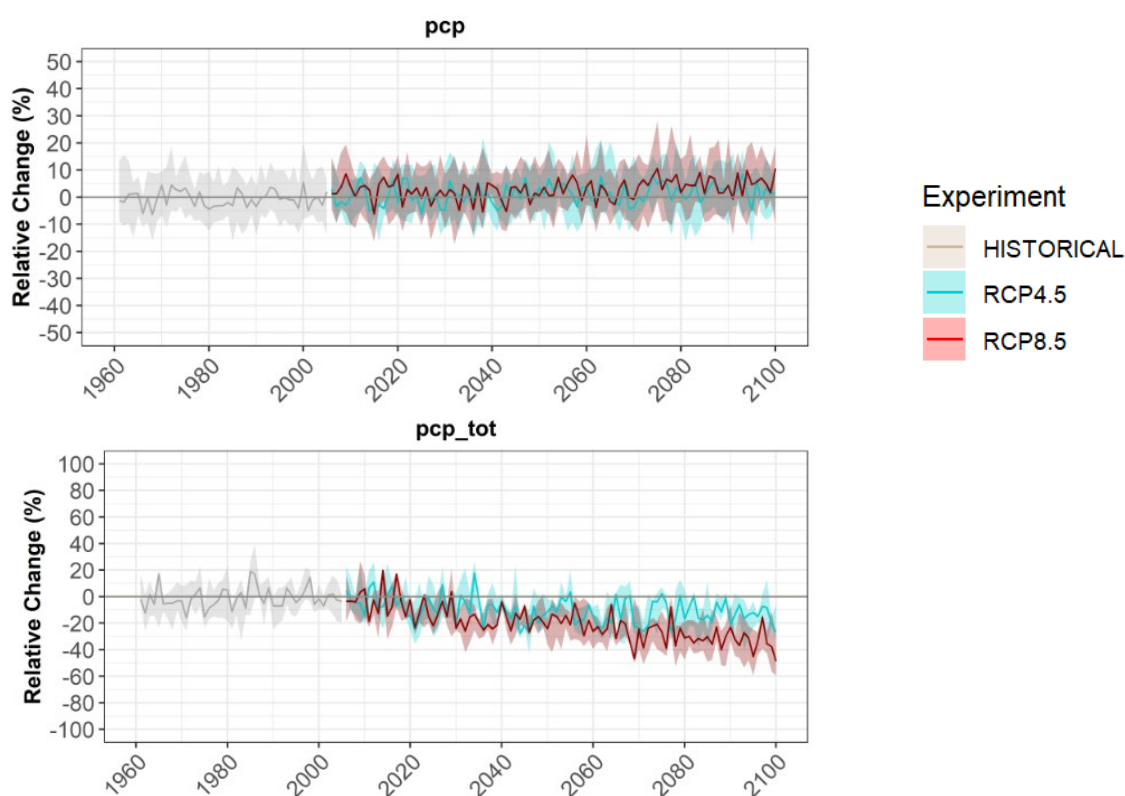


Figura A1: Evolució projectada de la variació relativa de la precipitació total mitjana anual respecte al període de referència 1986-2005 pels escenaris RCP4.5 i RCP 8.5: a) resultats del projecte CLIM'PY; b)

¹³ Veure major detall de les projeccions climàtiques disponibles en territori andorrà a https://ari.ad/images/projectes/evicc/projeccions_climatiques_andorra.html

resultats del projecte PIRAGUA. La mediana està representada per una línia grisa i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

En particular, es mostra l'anàlisi per la variable precipitació en els píxels associats al territori andorrà. A partir dels resultats del projecte PIRAGUA, s'ha calculat el canvi relatiu (%) de la precipitació sòlida, líquida i total mitjana anual (període 1960-2100) en relació amb la mitjana corresponent durant el període de referència (1986-2005), per cada model considerat. Pel projecte CLIMPY només es disposa del canvi relatiu (%) de la precipitació total mitjana anual. Com s'observa a la Fig. A1, l'evolució projectada per CLIMPY no mostra cap tendència i es manté constant al voltant del 0% amb un lleuger augment a partir de l'any 2070 (segons l'experiment RCP8.5), mentre que, en el cas dels canvis projectats per PIRAGUA, la variació presenta valors negatius (mediana inferior al 0% durant bastants anys) i una disminució més marcada entre els anys 2060 i 2100 (experiment RCP8.5).

Pel que fa a les fases sòlides i líquides de la precipitació, a partir dels resultats de PIRAGUA a la figura A2 es pot veure un exemple de com evolucionaria la precipitació sòlida, amb un descens pronunciat que succeiria a finals de segle.

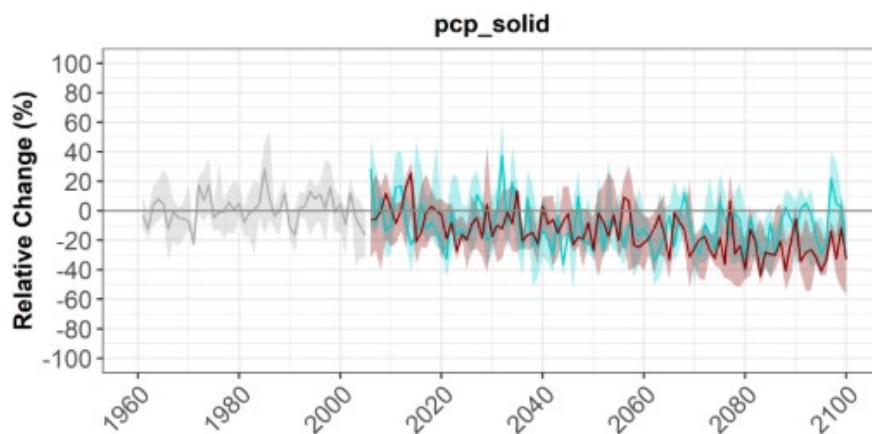


Figura A2: Evolució projectada de la variació relativa de la precipitació sòlida anual respecte al període de referència 1986-2005 pels escenaris RCP4.5 i RCP 8.5. La mediana està representada per una línia grisa i l'ombra representa els percentils 17 i 83. Font: PIRAGUA.