



Alexandre Quintana i Clarà

Geògraf, màster en
Geofísica i Meteorologia de
la Universitat de Granada

Resum

Les muntanyes i les regions de gran altitud són especialment sensibles al canvi climàtic, amb nombrosos impactes potencials que afecten pràcticament tots els nivells, tant naturals com econòmics i socials. El present estudi proposa utilitzar les projeccions de canvi climàtic d'alta resolució (5 km x 5 km) obtingudes en el marc del projecte Poctefa Climpy (Amblar-Francés *et al.*, 2020) per al territori andorrà, per tal de contextualitzar l'evolució del clima sota diferents escenaris futurs possibles d'emissions (RCP4.5 i RCP8.5). A més de les projeccions de temperatura i precipitació a diferents horitzons de pronòstic, s'han calculat diversos índexs que poden ser utilitzats dins l'estratègia nacional d'adaptació al canvi climàtic per caracteritzar el clima d'Andorra i fer un seguiment històric per detectar canvis. Fruit d'aquest procediment, es fa una reflexió sobre com utilitzar la informació disponible a alta resolució a partir de la sectorització d'aquesta informació per dues franges altitudinals. Els resultats indiquen que, per a la temperatura, les tendències positives ja detectades actualment es mantindran durant aquest segle, i seran més marcades per la temperatura màxima que per la temperatura mínima. Les projeccions climàtiques també mostren com l'augment de la temperatura serà proporcional a l'increment de les emissions de GEH per cada un dels dos escenaris analitzats (RCP4.5 i RCP8.5). A diferència de la temperatura, les projeccions futures de precipitació no mostren una tendència clara. Així doncs, l'escenari socioeconòmic cap a on avanci el nostre futur pròxim definirà com s'intensificarà l'escalfament global i l'impacte que el canvi climàtic tindrà en els recursos naturals dels quals Andorra disposa i els riscos naturals amb què convivim.



Alexandre
Quintana i Clarà



Laura Traperó i
Bagué



Gerard Grande
i Bartumeu

Projeccions de canvi climàtic a Andorra: anàlisi i càlcul d'indicadors climàtics

Paraules clau: canvi climàtic,
projeccions climàtiques, variabilitat,
adaptació, Andorra.

1. Introducció

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. Per tant, el fet de poder mantenir la qualitat de vida pròpia d'aquests territoris s'està veient amenaçat pels efectes del canvi climàtic i la conseqüent pèrdua de gran part d'aquesta confortabilitat de la qual disposen la major part dels territoris de muntanya, com és el cas d'Andorra.

Les activitats humanes, principalment a través de les emissions de gasos d'efecte hivernacle (GEH), han provocat inequívocament l'escalfament global, amb un augment de la temperatura de la superfície global que ha assolit els 1,1 °C durant el període 2011-2020 respecte a la mitjana del període preindustrial 1850-1900 (IPCC, 2023). S'ha de tenir en compte que molts riscos relacionats amb el clima són més elevats que en avaluacions anteriors, i això provoca que els impactes projectats a llarg termini són fins i tot diverses vegades superiors als observats actualment (IPCC, 2023), fet molt preocupant si tenim en compte que les zones de muntanya són un dels ambients més fràgils del planeta (Díaz *et al.*, 2003).

Diferents estudis valoren, a partir de l'ús de projeccions climàtiques, l'exposició al canvi climàtic que tindran les zones de muntanya (Nogués-Bravo *et al.*, 2007), però hi ha una mancança de treballs que abordin amb detall l'evolució recent del clima a partir de dades observades en estacions situades a altituds mitjanes i altes a causa de la dificultat de disposar de llargues sèries de dades (Esteban *et al.*, 2012).

Malgrat aquestes limitacions, tal com defineix l'informe de l'Observatori Pirinenc del Canvi Climàtic (2018), s'han fet nombrosos estudis del clima dels Pirineus on s'ha inclòs Andorra, en especial sobre les precipitacions i les temperatures (entre altres treballs, els de Creus, 1983; Gottardi, 2009; Pérez Zanón *et al.*, 2017), la variabilitat i el canvi climàtic (Bücher i Dessens, 1991; López Moreno i Vicente Serrano, 2007; Esteban *et al.*, 2012; Buisán *et al.*, 2015) i referents a projeccions climàtiques (López Moreno *et al.*, 2011; Verfaillie *et al.*, 2017 i 2018). En aquest context, els escenaris de canvi climàtic constitueixen un fonament imprescindible per fer estudis sobre els possibles impactes, les vulnerabilitats i les estratègies d'adaptació més adients (UNDP-UNEP-GEF, 2009). Els models climàtics globals (MCG)

proporcionen escenaris de projeccions climàtiques futures i aspectes de la variabilitat climàtica i extrems que poden ser rellevants per als estudis d'impacte i a l'hora de planificar l'adaptació dels territoris davant d'aquesta realitat. Concretament, s'han utilitzat tècniques de reducció d'escala estadística (*downscaling*), pel fet que tenen l'avantatge de permetre obtenir informació climàtica detallada en llocs on les dades observades són limitades, amb l'objectiu de proporcionar informació climàtica a escales més fines, com una estació meteorològica específica (Kitoh et al., 2016).

Quan s'analitzen les projeccions climàtiques s'ha de tenir present quines són les principals fonts d'incertesa que interactuen en la cadena de càlculs, els forçaments naturals del sistema climàtic, les emissions de GEH, les seves concentracions, els aerosols, els mateixos models globals i les tècniques de *downscaling* utilitzades, ja que aquestes últimes es van acumulant en cada pas del procés de *regionalització* estadística. Per tant, s'ha de tenir en compte que tot i la contínua millora en models, metodologies i escenaris cada cop més realistes, l'existència d'incerteses a l'hora d'establir projeccions climàtiques és inevitable (Amblar-Francés et al., 2020), com en tot procés predictiu.

2. Projeccions climàtiques per Andorra basades en models climàtics regionals de CMIP5

Per a aquest treball, s'han utilitzat els resultats obtinguts en el projecte Climpy, que es basen en simulacions derivades de models climàtics globals de la cinquena fase del Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5). Els models climàtics globals (GCM), tot i que són útils per comprendre les grans tendències del canvi climàtic, tenen una resolució espacial insuficient per analitzar regions muntanyoses complexes com Andorra.

Per tant, a Amblar-Francés et al. (2020) es va utilitzar com a punt de partida un conjunt de simulacions de diferents models climàtics regionals (RCM) d'alta resolució del programa Eurocordex, i posteriorment se'ls va aplicar tècniques de regionalització estadística per adaptar els resultats al territori pirinenc, on la variabilitat altitudinal i les condicions orogràfiques afecten fortament la climatologia local.

Aquestes regionalitzacions permeten obtenir projeccions climàtiques específiques per a la regió d'Andorra amb una resolució espacial de 5 km x 5 km, i els patrons locals de

temperatura i precipitació s'hi detallen amb més precisió, la qual cosa és essencial per captar els efectes locals del canvi climàtic, especialment en un territori muntanyós. Els escenaris analitzats inclouen els escenaris d'emissions RCP4.5 i RCP8.5, que representen diferents trajectòries de concentracions de gasos d'efecte hivernacle, tal com observem en la taula següent:

Temperatura i Precipitació		
Escenaris	Models CMIP5	Institució
RCP4.5 / RCP8.5 17 models	BNU-ESM (T°, PP)	Global Change and Earth System Science (GCESS) Beijing University, China
	Bcc-csm1.1 (PP)	Beijing Climate Center, China
	CanESM2 (T°)	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma), Canada
	CMCC-CM (T°, PP)	CMCC, Italy
	CNRM-CM5 (PP)	Centre National de Recherches Météorologiques
	GFDL-ESM2G (T°, PP)	NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), USA
	HadGEM2-CC (PP)	Met Office, UK
	IPSL-CM5A-LR (T°, PP)	Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France
	IPSL-CM5A-MR (T°, PP)	IPSL, France
	IPSL-CM5B-LR (T°, PP)	IPSL, France
	INM-CM4 (T°, PP)	Institute of Numerical Mathematics, Russia
	MIROC-ESM (PP)	AORI NIES JAMSTEC, Japan
	MIROC-ESM -CHEM (PP)	AORI NIES JAMSTEC, Japan
	MIROC5 (T°, PP)	AORI NIES JAMSTEC, Japan
	MPI-ESM-LR (T°, PP)	Max-Planck-Institut (MPI) for Meteorology, Germany
	MPI-ESM-MR (T°, PP)	Max-Planck-Institut (MPI) for Meteorology, Germany
	MRI-CGCM3 (T°, PP)	Meteorological Research Institute, Japan

Taula 1. Llista de models CMIP5 utilitzats per generar les projeccions regionalitzades executades en el marc del projecte Poctefa Climpy (Amblar-Francés et al., 2020)

2.1. Canvis projectats en el valors climàtics mitjans

En el conjunt de simulacions s'ha analitzat la projecció futura de les variables següents:

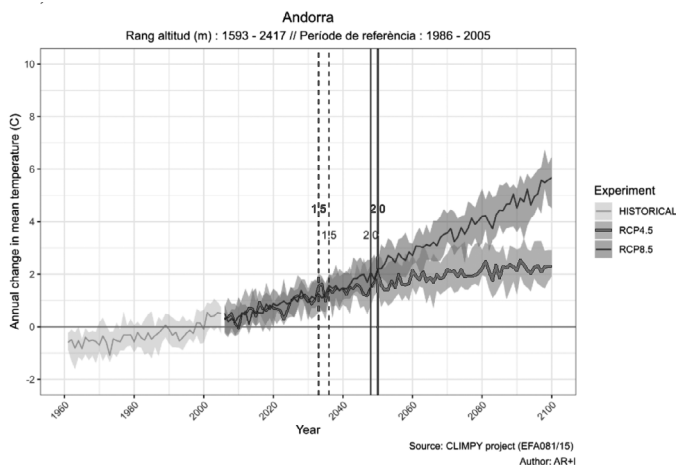
- Temperatura màxima
- Temperatura mínima
- Temperatura mitjana
- Precipitació

El conjunt de simulacions treballat cobreix diversos horitzons temporals, seguint els criteris marcats pel sisè informe de

l'IPCC (IPCC, 2023). Aquests horitzons s'han dividit de la manera següent: període històric de referència (1986-2005), curt termini (2021-2040), mitjà termini (2041-2060) i llarg termini (2081-2100), analitzats per identificar possibles tendències i extrems climàtics futurs sota els escenaris d'emissió RCP4.5 i RCP8.5.

En el cas d'Andorra, el valor mitjà de la temperatura mitjana anual mostra un augment progressiu al llarg del segle XXI sota tots els escenaris analitzats, molt significatiu a finals de segle i sota l'escenari RCP8.5. Fins aproximadament la primera meitat del segle, l'elecció de l'escenari RCP té un impacte més baix en els resultats de les projeccions, ja que en els primers anys les concentracions de GEH a l'atmosfera són relativament similars entre els escenaris RCP, en no haver-se produït una reducció significativa de les emissions de GEH.

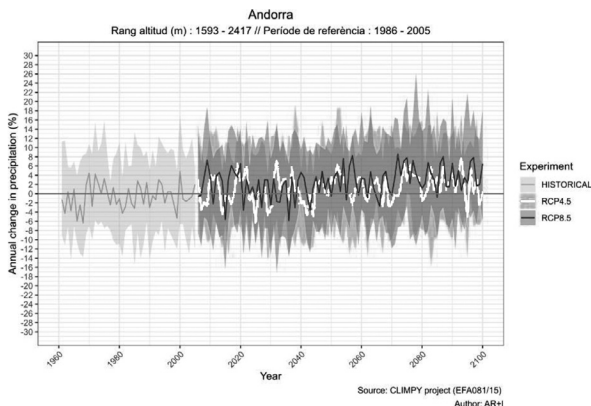
No obstant això, a la segona meitat del segle, les estimacions pels diferents RCP divergeixen notablement, especialment l'escenari RCP8.5 respecte de l'escenari menys emissiu (RCP4.5).



Deixant de banda les variables de temperatura, ja ens podem centrar en l'evolució de les anomalies pluviomètriques d'Andorra. S'observa com el valor mitjà de precipitació anual mostra un comportament molt diferenciat respecte a la temperatura, en què les projeccions futures de precipitació no mostren una tendència clara (figura 2).

Figura 1. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura mitjana diària (°C) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83

Figura 2. 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 gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83



3. Canvis projectats en els extrems climàtics

Finalment, també s'han analitzat les projeccions de diferents extrems climàtics, utilitzant la mateixa base de dades de simulacions de CMIP5. S'han avaluat les variacions en la temperatura i les precipitacions extremes, prenent com a referència els mateixos escenaris climàtics (RCP4.5 i RCP8.5) i horitzons temporals (curt, mitjà i llarg termini). Les variables analitzades inclouen indicadors d'extrems com:

- Dies d'estiu (*SU25*)

Nombre de dies en què la temperatura màxima > 25 °C

- Dies glaçats (*ID0*)

Nombre de dies en què la temperatura màxima < 0 °C

- Dies freds (*TX10p*)

Percentatge de dies en què la temperatura màxima < percentil 10.

- Índex de durada de ratxa càlida (*WSDI*)

Nombre de dies en què, com a mínim hi ha sis dies consecutius amb una temperatura màxima < percentil 90

- Dies de glaçada (*FD0*)

Nombre de dies en què la temperatura mínima < 0 °C

- Nits tropicals (*TR20*)

Nombre de dies en què la temperatura mínima > 20 °C

- Nits fredes (*TN10p*)

Nombre de dies en què la temperatura mínima < percentil 10

- Dies de PPT ≥ 10mm (*R10*)

Nombre de dies en un any en què PPT és igual o superior a 20 mm

A continuació, es presenten els resultats de les projeccions dels extrems climàtics més rellevants, utilitzant els indicadors descrits prèviament. En primer lloc, l'índex Dies d'estiu (SU25) segueix una tendència d'increment força destacada, tal com mostra la figura 3.

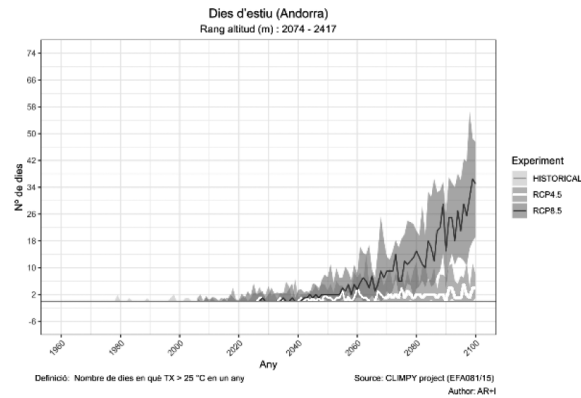
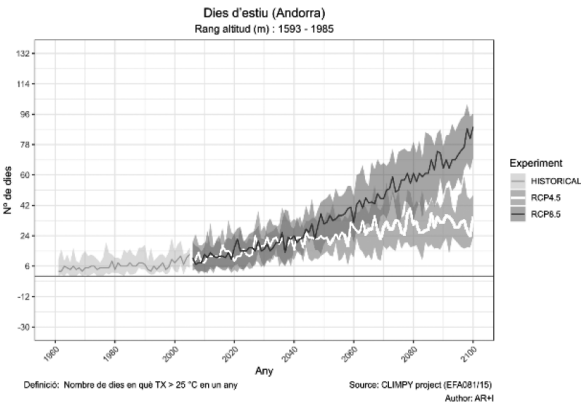


Figura 3. Evolució del nombre de dies d'estiu (SU25) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83

L'indicador SU25 mostra com en els darrers anys s'ha incrementat notablement el nombre de dies en què la temperatura màxima supera els 25°C; durant el 2022 es van registrar fins a 84 dies, el màxim de la sèrie. En la projecció de l'evolució de l'SU25 es mostra un augment progressiu al llarg

del segle XXI per als dos escenaris analitzats del conjunt d'Andorra. Aquest comportament és coherent amb l'evolució dels valors mitjans de la temperatura màxima mostrats anteriorment, en què a finals de segle, pel que fa a 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 al període de referència, i en 15 dies respecte l'escenari d'estabilització RCP4.5.

Per a 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.

El canvi projectat per aquest índex també es interessant observar-lo segons el seu comportament diferenciat amb l'altitud, de manera que els píxels a fons de vall (<2.000 m) mostren un increment superior als que se situen per sobre dels 2.000 m.

En segon lloc, l'índex Dies de glaçada (FD0) segueix una tendència descendent molt marcada.

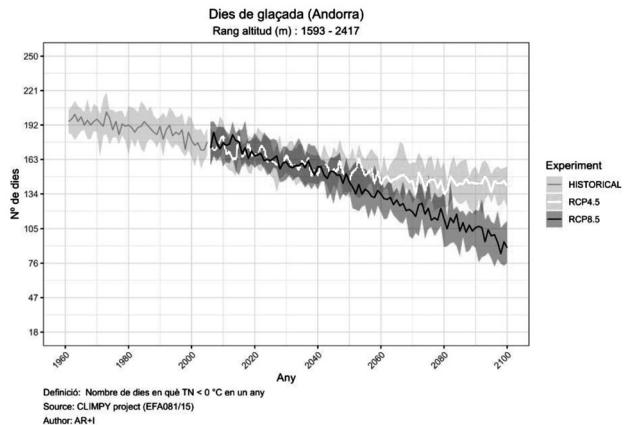


Figura 4. Evolució del nombre de dies de glaçada (FD0) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83

Pel que fa als índexs de temperatures mínimes, mostren una tendència totalment oposada a la temperatura màxima. Per tant, els dies de glaçada (FD0) han disminuït notablement;

l'any 2022 se'n van registrar 38 dies, quan la mitjana per al període de referència és de 80 dies a l'any. A finals de segle s'espera que el nombre de dies de glaçada disminueixi en gairebé 90 dies i de manera constant per a l'escenari més emissiu RCP8.5 respecte al període de referència, i en aproximadament 35 dies respecte a 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. 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 (R10).

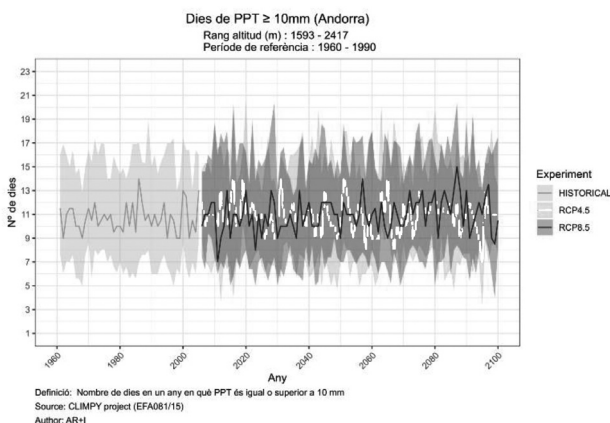


Figura 5. Evolució del nombre de dies de precipitació ≥ 10 mm (R10) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83

Referències

- AMBLAR-FRANCÉS, M. P., RAMOS, P., SANCHIS, J., HERNANZ, A., PERAL, M. C., NAVASCUÉS, B., DOMÍNGUEZ, 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.
- AR+I, Andorra Recerca + Innovació (2022). *Observatori de la Muntanya d'Andorra. Índex Climàtics*. [En línia a: <https://www.oma.ad/ca/index-climatic>]
- 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-NOTIVOLI, R., LLABRÉS, A., PROHOM, M., SÁNCHEZ, M. A., TEJEDOR, E., CUNILLERA, J., TRAPERÓ, L., PONS, M., COPONS, R., LÓPEZ-MORENO, J. I., LUNA, Y.,

L'evolució en el nombre de dies en què la precipitació és igual o superior a 10 mm mostra una estabilitat al llarg del segle XXI per als dos escenaris analitzats. Aquest comportament és coherent amb l'evolució dels valors mitjans de precipitació mostrats a l'apartat anterior. En els altres indicadors, com la ratxa seca o en la ratxa humida, es mostra molta variabilitat interanual i la tendència no és marcada.

4. Conclusions

En aquest treball s'han utilitzat els resultats generats en el marc del projecte Climpy, basat en simulacions regionals derivades de CMIP5, per obtenir projeccions climàtiques específiques per a Andorra. Aquestes dades ens han permès

RODRÍGUEZ, E., GASCOIN, S., & SOUBEYROUX, J.M. (2020). *Creación de un sistema de indicadores para la caracterización del clima de los Pirineos. Desafíos y oportunidades de un mundo en transición: una interpretación desde la Geografía*. ISBN 978-84-9133-305-0, p. 53-66, doi:10.5281/zenodo.3611127

DIFFENBAUGH, N. S., SINGH, D., MANKIN, J. S., HORTON, D. E., SWAIN, D., TOUMA, D., CHARLAND, A., LIU, Y., HAUGEN, M., TSIANG, M., & RAJARATNAM, B. (2017). *Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate events*, doi:10.1073/pnas.1618082114

DOMÈNECH, M., TRAVESSET, O., ALBALAT, A., TRAPERO, L., & PONS, M. (2022). *Identifying water supply tensions between competing users in extreme future scenarios: a case study from the Pyrenees - International Mountain Conference. Synthesize Mountains of Knowledge*.

ESTEBAN, P., PROHOM, M., & AGUILAR, E. (2012). Tendencias recientes e índices de cambio climático de la temperatura y la precipitación en Andorra, Pirineos (1935-2008). *Pirineos. Revista de Ecología de Montaña*, vol. 167, p. 87-106, doi:10.3989/Pirineos.2012.167005

ESTEBAN, P., PROHOM, M., CUNILLERA, J., & TRAPERO, L. (2017). Tendencias recientes del clima a Andorra (1950-2010): Resultats del projecte acció clima – OPCC. *Revista del CENMA*, 9.

IPCC. (2023). *Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6). Longer Report*. [En línia a: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>] LRECC, 2018. Llei 21/2018 d'impuls de la transició energètica i del canvi climàtic.

OPCC, 2018: *El canvi climàtic als Pirineus: impactes, vulnerabilitats i adaptació*. [En línia a:

<<https://www.opcc-ctp.org/>>]

TRAPERO, L., ALBALAT, A., & LEMUS-CANOVAS, M. (2021). *AR+I, Andorra Recerca + Innovació* (2022). *Climate setting in Andorra*. Document intern.

analitzar les tendències projectades de temperatura i precipitació, així com diversos indicadors d'extrems climàtics. L'anàlisi ha estat aplicada a 14 punts representatius del territori andorrà, cobrint diferents altituds i condicions geogràfiques. Els resultats obtinguts indiquen un augment significatiu de la temperatura mitjana anual per als propers anys, especialment sota l'escenari d'emissions elevat (RCP8.5). En concret, es preveu un increment de la temperatura màxima que oscil·la entre 2,2 °C i 5,1 °C a llarg termini (2071-2100). Les projeccions també mostren que els mesos d'estiu seran els més afectats, amb augments més intensos en la temperatura màxima, que arribaran fins als 6 °C en l'escenari més extrem. Pel que fa a les precipitacions, les projeccions no són tan concloents. Tot i que no es preveu cap tendència clara en el total anual de precipitacions, els canvis estacionals varien segons l'escenari i especialment en els mesos d'estiu.

A partir d'aquestes dades, s'han calculat també indicadors d'extrems climàtics, en què destaca un augment significatiu dels dies d'estiu i de les nits tropicals, així com una reducció progressiva dels dies gèlids. Aquestes tendències d'extrems climàtics subratllen la necessitat de planificar estratègies d'adaptació, especialment en sectors com la salut, el turisme i la gestió de l'aigua.

En conclusió, les projeccions climàtiques indiquen que Andorra experimentarà un escalfament progressiu al llarg del segle XXI, amb augments de temperatura més accentuats durant els mesos d'estiu. Les precipitacions no mostren una tendència clara, però es preveu un increment de les temporades seques.

Aquest treball ha permès identificar les àrees geogràfiques més vulnerables d'Andorra en funció de les variables climàtiques analitzades. Així mateix, s'han pogut establir diferències altitudinals importants entre fons de vall i alta muntanya, amb tendències més marcades en les zones elevades (> 2.000 m). Els resultats proporcionen una visió més detallada sobre els impactes futurs del canvi climàtic a Andorra i faciliten la planificació de mesures d'adaptació efectives per mitigar-ne els efectes sobre la societat i el medi natural.