

ALEXANDRE QUINTANA CLARÀ

**PROJECCIONS DE CANVI CLIMÀTIC A ANDORRA:
ANÀLISI I CÀLCUL D'INDICADORS EN EL MARC DE
L'ESTRATÈGIA NACIONAL D'ADAPTACIÓ AL CANVI
CLIMÀTIC.**

TREBALL DE FI DE GRAU

Tutoritzat pel Dr. Francisco Javier Sigró Rodríguez

Cotutoritzat per la Dra. Laura Traperó Bagué



**UNIVERSITAT
ROVIRA i VIRGILI**

Grau en Geografia, Anàlisi Territorial i Sostenibilitat

Facultat de Turisme i Geografia

Vila-seca

Juny 2023

Agraïments

Vull expressar el meu agraïment especial al Dr. Francisco Javier Sigró Rodríguez, el meu tutor durant aquest Treball Final de Grau, per la confiança i els coneixements que he adquirit durant aquest estudi i al llarg de la meva etapa educativa amb ell.

També vull agrair a tot l'equip d'Andorra Recerca + Innovació pel seu suport i els coneixements que m'han proporcionat durant la meva estada en aquest centre de recerca científica. Especialment, m'agradaria agrair a la Dra. Laura Traperó Bagué i al Dr. Marc Lemus-Canovas per l'ajuda i la motivació que he rebut des del primer moment, així com per les dades facilitades sense les quals aquesta investigació no hauria estat possible

Finalment, no podia acabar sense agrair a la meva família el suport incondicional que sempre m'ha donat

Resum

Les muntanyes i les regions de gran altitud són especialment sensibles al canvi climàtic, amb nombrosos impactes potencials que afecten a 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) pel territori andorrà, per tal de contextualitzar l'evolució del clima sota diferents escenaris futurs possibles (RCP4.5 i RCP8.5). A més de les projeccions de temperatura i precipitació a diferents horitzons de pronòstic, s'han calculat diferents índex que poden ser utilitzats dins l'estratègia nacional d'adaptació al canvi climàtic per tal de 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 per dues franges altitudinals. Els resultats indiquen que per 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'augment 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 que Andorra disposa i els riscos naturals amb què convivim.

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

Abstract

Mountains and high-altitude regions are particularly sensitive to climate change, with numerous potential impacts affecting almost all levels, natural, economic, and social. This study proposes to use the high-resolution (5 km x 5 km) climate change projections obtained in the framework of the POCTEFA CLIMPY project (Amblar-Francés et al., 2020) for the Andorran territory, to contextualise climate evolution under different probable future scenarios (RCP4.5 and RCP8.5). In addition to temperature and precipitation projections for different forecast horizons, several indices will be calculated that can be used within the national climate change adaptation strategy to characterize Andorra's climate and perform historical monitoring to detect changes. As a result of this procedure, a reflection is made on how to use the information available in high resolution, based on the sectorization of this information by two altitudinal stripes. The results indicate that for temperature, the trends of increase already detected at present will be maintained during this century, being more marked in the case of maximum than minimum temperatures. The climate projections also show how the increase in temperature will be proportional to the increase in emissions of GHG for each of the two scenarios analysed (RCP4.5 and RCP8.5). In contrast to temperature, future precipitation projections do not show a clear trend. Therefore, the socio-economic scenario towards which our near future progresses will define how global warming will intensify, and the impact that climate change will have on the natural resources available to Andorra and the natural risks with which we coexist.

Keywords: Climate change, climate projections, variability, adaptation, Andorra.

ÍNDEX

1. Introducció i motivació	1
2. Objectius i hipòtesis.....	2
2.1 Objectius	2
2.2 Hipòtesis	2
3. Marc teòric	3
3.1 Antecedents Generals	3
3.2 Limitacions de les projeccions i models de canvi climàtic.....	6
4. Àrea d'estudi: el cas d'Andorra	8
4.1 Descripció física	8
4.2 Característiques climatològiques.....	9
5. Metodologia.....	12
5.1 Sèries de dades de l'estudi.....	12
5.1.1 Font de dades	12
5.1.2 Selecció de la xarxa de punts de l'àrea d'estudi	12
5.2 Mètode de treball.....	15
5.3 Evolució de la temperatura i precipitació respecte el període de referència.....	17
5.3.1 Temperatura.....	18
5.3.2 Precipitació.....	21
5.4 Descripció i categorització d'índex climàtics.....	22
5.4.1 Temperatura màxima.....	23
5.4.2 Temperatura mínima.....	24
5.4.3 Precipitació.....	26
5.5 Obtenció d'estadístics descriptius.....	27
6. Resultats	28
6.1 Anàlisi de l'evolució d'anomalies tèrmiques i pluviomètriques.....	28
6.1.1 Temperatura màxima	28
6.1.2 Temperatura mínima.....	35
6.1.3 Temperatura mitjana.....	41
6.1.4 Precipitació.....	43
6.2 Anàlisi d'índex climàtics	48
6.2.1 Temperatura màxima.....	48
6.2.1.1 Summer days (SU25).....	48
6.2.1.2 Icing days (IDO).....	51
6.2.1.3 Cold days (TX10p)	54

6.2.1.4 Warm days (TX90p).....	56
6.2.1.5 Warm spell duration index (WSDI).....	58
6.2.2 Temperatura mínima.....	60
6.2.2.1 Frost days (FD0).....	60
6.2.2.2 Tropical nights (TR20)	62
6.2.2.3 Cold nights (TN10p).....	64
6.2.2.4 Warm nights (TN90p).....	66
6.2.2.5 Cold spell duration index (CSDI).....	68
6.2.3 Precipitació.....	70
6.2.3.1 Days when PRCP \geq 10 mm (R10)	70
6.2.3.2 Days when PRCP \geq 20 mm (R20)	72
7. Discussió	76
8. Conclusions	79
Bibliografia.....	81
Annexos.....	85

Índex de figures

Figura 1. Origen de les emissions de GEH l'any 2017.....	5
Figura 2. Evolució de les emissions de GEH i períodes de revisió per assolir la neutralitat en carboni l'any 2050....	5
Figura 3. Contribucions relatives de les tres fonts principals d'incertesa a les projeccions de clima per a diferents temps en el futur per la temperatura mitjana global.....	7
Figura 4. Mapa hipsomètric d'Andorra.....	9
Figura 5. Mean Yearly Temperature (°C). 1981-2010.....	10
Figura 6. Mean Yearly Precipitation (mm). 1981-2010.....	11
Figura 7. Localització dels punts de l'àmbit d'estudi.....	14
Figura 8. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura màxima diària (°C).....	29
Figura 9. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura màxima diària (°C) estacional.....	30
Figura 10. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura màxima diària (°C) segons sectorització altitudinal....	31
Figura 11. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura màxima diària (°C) segons sectorització altitudinal....	32
Figura 12. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura màxima diària (°C) a través d'un Boxplot.....	33
Figura 13. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura mínima diària (°C).....	35
Figura 14. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura mínima diària (°C) estacional.....	36
Figura 15. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura mínima diària (°C) segons sectorització altitudinal....	37
Figura 16. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura mínima diària (°C) segons sectorització altitudinal....	38
Figura 17. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura mínima diària (°C) a través d'un Boxplot.....	39
Figura 18. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura mitjana diària (°C).....	41
Figura 19. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura mitjana diària (°C) per cada punt del territori.....	42
Figura 20. Evolució del valor mitjà anual de precipitació diària (mm/dia).....	43
Figura 21. Evolució del valor mitjà anual de precipitació diària (mm/dia) estacional.....	44
Figura 22. Evolució del valor mitjà anual de la precipitació diària (mm/dia) per cada punt del territori.....	45
Figura 23. Evolució del valor mitjà anual de la precipitació diària (mm/dia) a través d'un Boxplot.....	46
Figura 24. Evolució del nombre de dies d'estiu (SU25).....	48
Figura 25. Evolució del nombre de dies d'estiu (SU25) estacional	49
Figura 26. Evolució del nombre de dies d'estiu (SU25) per cada punt del territori.....	50
Figura 27. Evolució del nombre de dies glaçats (ID0).....	51
Figura 28. Evolució del nombre de dies glaçats (ID0) estacional.....	52

Figura 29. Evolució del nombre de dies glaçats (ID0) per cada punt del territori.....	53
Figura 30. Evolució del nombre de dies freds (TX10p).....	54
Figura 31. Evolució del nombre de dies freds (TX10p) per cada punt del territori.....	55
Figura 32. Evolució del nombre de dies càlids (TX90p).....	56
Figura 33. Evolució del nombre de dies càlids (TX90p) per cada punt del territori.....	57
Figura 34. Evolució de l'indicador de durada de ratxa càlida (WSDI).....	58
Figura 35. Evolució de l'indicador de durada de ratxa càlida (WSDI) per cada punt del territori.....	59
Figura 36. Evolució del nombre de dies de glaçada (ID0).....	60
Figura 37. Evolució del nombre de dies de glaçada (ID0) per cada punt del territori.....	61
Figura 38. Evolució del nombre de nits tropicals (TR20).....	62
Figura 39. Evolució del nombre de nits tropicals (TR20) per cada punt del territori.....	63
Figura 40. Evolució del nombre de nits fredes (TN10p).....	64
Figura 41. Evolució del nombre de nits fredes (TN10p) per cada punt del territori.....	65
Figura 42. Evolució del nombre de nits fredes (TN90p).....	66
Figura 43. Evolució del nombre de nits fredes (TN90p) per cada punt del territori.....	67
Figura 44. Evolució de l'indicador de durada de ratxa freda (CSDI).....	68
Figura 45. Evolució de l'indicador de durada de ratxa freda (CSDI) per cada punt del territori.....	69
Figura 46. Evolució del nombre de dies de precipitació ≥ 10 mm (R10)	70
Figura 47. Evolució del nombre de dies de precipitació ≥ 10 mm (R10) per cada punt del territori.....	71
Figura 48. Evolució del nombre de dies de precipitació ≥ 20 mm (R20).....	72
Figura 49. Evolució del nombre de dies de precipitació ≥ 20 mm (R20) per cada punt del territori.....	73

Índex de taules

Taula 1. Informació sobre el nombre total de punts dels massissos pirenaics de l'àrea CLIMPY.....	14
Taula 2. Llista de models CMIP5 utilitzats a les projeccions regionalitzades CLIMPY.....	16
Taula 3. Categorització dels índex de temperatura màxima escollits.....	24
Taula 4. Categorització dels índex de temperatura mínima escollits.....	25
Taula 5. Categorització dels índex de precipitació escollits.....	26
Taula 6. Càlcul per cada horitzó de pronòstic i escenari (RCP4.5 i RCP8.5), del valor de la mediana i dels percentils d'interès per a la temperatura màxima.....	34
Taula 7. Càlcul per cada horitzó de pronòstic i escenari (RCP4.5 i RCP8.5), del valor de la mediana i dels percentils d'interès per a la temperatura mínima.....	40
Taula 8. Càlcul per cada horitzó de pronòstic i escenari (RCP4.5 i RCP8.5), del valor de la mediana i dels percentils d'interès per a l'anomalia de la precipitació.....	47
Taula 9. Evolució dels índex climàtics a partir del càlcul de la mediana de dos horitzons de pronòstic i escenaris (RCP4.5 i RCP8.5).....	74

1. Introducció i motivació

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 consegüent 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 la mitjana del període pre-industrial 1850-1900 (IPCC, 2023). Així doncs, els augments observats de les concentracions de GEH des de l'any 1750 són causats inequívocament pels GEH de les activitats humanes, tal com ha constatat de forma unànime la comunitat científica, qui afirma que l'existència d'un canvi climàtic d'origen antropogènic es degut principalment a l'increment continuat de les emissions dels GEH (Anderegg *et al.*, 2010; Cook *et al.*, 2013; Doran & Zimmerman, 2009).

Tot i que s'espera un increment futur en la magnitud dels canvis observats fins a l'actualitat, encara existeix molta incertesa en quin pot ser el grau, la direcció i la variabilitat dels futurs canvis en el clima, pel fet que segons l'escenari socioeconòmic que s'acabi assumint, els impactes a curt, mitjà i llarg termini seran més o menys accentuats, així com segons el grau de compliment i compromís dels diferents estats davant aquesta qüestió.

S'ha de tenir en compte que molts riscos relacionats amb el clima són més elevats que en avaluacions anteriors, provocant que els impactes projectats a llarg termini són fins i tot varies 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 (Diaz *et al.*, 2003).

Aquest estudi es planteja com un document capaç de contextualitzar l'evolució climàtica que tindrà lloc al Principat d'Andorra sota diferents escenaris a partir de l'anàlisi de les projeccions futures de temperatura i precipitació a diferents horitzons de pronòstic (IPCC, 2013) a partir de la utilització dels models climàtics del projecte CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project) utilitzats per l'IPCC al seu Cinquè Informe d'Avaluació l'any 2013 i del càlcul de diferents índex a diferents escales. D'una banda, territorial (Estat i Parroquial) i d'altra banda, altitudinal (> 2000 metres, < 2000 metres) que serveixin com a base per a estudis del clima futur tant d'Andorra com a nivell intraterritorial de les seves parròquies, on els estudis a escala tant petita són gairebé inexistents.

El sentiment de pertinença del territori, la interessant i complexa orografia i el fet de tenir un major coneixement del meu país, m'han motivat a realitzar l'estudi aquí present. Segurament, el fet de poder desenvolupar un estudi que pugui aportar informació útil pel meu país i que no s'hagi tractat mai amb tant de detall també m'ha facilitat la seva elecció.

2. Objectius i hipòtesis

2.1 Objectius

Aquest estudi té com a objectiu principal **caracteritzar l'evolució del canvi climàtic a Andorra mitjançant el càlcul i anàlisi de projeccions climàtiques**. Per a l'assoliment d'aquest objectiu principal, és necessari fer una concreció en diversos objectius específics. Aquests objectius específics són els següents:

- Identificar les àrees geogràfiques del territori més vulnerables als impactes del canvi climàtic.
- Establir una sectorització altitudinal dels punts del territori segons si es troben a fons de vall (< 2000 metres) o a alta muntanya (> 2000 metres)
- Analitzar tendències climàtiques de temperatura i precipitació i avaluar la seva evolució al llarg dels anys per poder identificar futurs impactes i vulnerabilitats.
- Definir un conjunt d'indicadors climàtics en el marc de l'Estratègia Nacional d'Adaptació al Canvi Climàtic.
- Avaluar la vulnerabilitat d'Andorra als impactes del canvi climàtic en funció dels escenaris climàtics futurs escollits (RCP4.5 i RCP8.5).
- Conèixer en quin any s'assoliran l'1.5 i 2.0 graus d'augment de temperatura segons cada escenari climàtic i segons la variable analitzada (temperatura màxima, mínima i mitjana) a partir del període de referència 1986-2005.
- Identificar possibles canvis estacionals en l'anàlisi del comportament mitjà i extrem de les variables analitzades.

Una vegada s'hagin assolit aquests objectius es podrà establir quin és l'impacte que el canvi climàtic podria produir a Andorra i establir mesures d'adaptació que redueixin la vulnerabilitat del territori i que complementin l'Estratègia Nacional d'Adaptació al Canvi Climàtic (2020 – 2050), amb nova informació d'utilitat que serveixi de base per l'estudi d'impacte i adaptació del canvi climàtic en diferents sectors.

2.2 Hipòtesis

Seguint la mateixa estructura que s'ha seguit en els objectius, s'ha formulat la següent hipòtesi general de partida: **El càlcul de tendències i índex del canvi climàtic a Andorra basats en projeccions climàtiques servirà de base per poder identificar en estudis posteriors l'impacte i adaptació del canvi climàtic de diferents sectors, com l'energia, l'agricultura, el turisme o la salut entre d'altres**.

Aquesta hipòtesi es justifica perquè l'avaluació de l'impacte del canvi climàtic en sectors clau com l'energètic, l'agricultura, el turisme i la salut és essencial per entendre la magnitud del problema i posteriorment poder dissenyar estratègies d'adaptació efectives al territori.

3. Marc teòric

S'entén per clima a la mitjana, en una escala de temps relativament llarga (normalment d'almenys 30 anys), de les diverses variables atmosfèriques (IPCC, 2013), com la temperatura i la precipitació. Per tant, la expressió canvi climàtic fa referència a canvis a l'estat del clima que poden ser identificats (normalment mitjançant proves estadístiques) a través de canvis a la mitjana i/o la variabilitat de diferents propietats que perduren durant períodes llargs de temps (IPCC, 2013).

3.1 Antecedents Generals

Si enfoquem el problema del canvi climàtic al territori objecte d'estudi, Andorra, els senyals ja són perceptibles, i és especialment vulnerable degut a la seva dependència de diferents sectors, com l'energètic, els recursos naturals o el turisme de neu. Així doncs, ens trobem davant del problema mediambiental de més abast al qual s'enfronten els entorns de muntanya al segle XXI (Stocker *et al.*, 2013), pel fet que els territoris de gran altitud són especialment sensibles als futurs canvis climàtics, amb nombrosos impactes potencials. Encara així, el canvi climàtic no afecta totes les regions igual: el ritme d'escalfament pot ser diferent i fins i tot oposat entre diferents zones (Brunet *et al.*, 2007), per la qual cosa no podem extrapolar resultats obtinguts en regions de gran altitud com a base pels diferents estudis realitzats en regions de característiques topogràfiques similars.

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 a Andorra, en especial, sobre les precipitacions i les temperatures (entre d'altres, els treballs 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).

Això no obstant, la majoria de treballs presenten conclusions limitades per la seva aproximació únicament regional, especialment francesa i espanyola, és a dir, considerant només una vessant dels Pirineus. Per aquest motiu, un pas fonamental va ser la creació d'una primera base de dades única, amb control de qualitat i homogeneïtzada, del període 1950 - 2010, i seguir una metodologia comuna per a caracteritzar el clima pirinenc i observar-ne la variabilitat.

Amb aquesta informació, generada en el marc de l'OPCC, es van dur a terme les primeres aproximacions al coneixement dels patrons temporals i espacials de les temperatures i precipitacions del conjunt dels Pirineus i l'anàlisi de les seves tendències (Cuadrat *et al.*, 2020).

Altres estudis centrats únicament en el territori en qüestió són els desenvolupats pel grup CENMA de l'antic Institut d'Estudis Andorrans l'any 2017 (actualment Andorra Recerca i Innovació), on es va analitzar el període 1950-2010, mostrant de forma similar al projecte OPCC, l'evolució de les temperatures i les precipitacions així com les seves anomalies utilitzant com a període de referència el trentenni 1971-2000 a partir de l'anàlisi de tres sèries històriques de FEDA (Ransol (1645m), Engolasters (1640m) i Central (1145m)), les quals van permetre extreure resultats útils per Andorra.

També trobem estudis recents, com els generats pel projecte europeu CLIMPY (IPCC, 2013), on es mostra com la tendència de la temperatura mitjana als Pirineus ha estat de +0,24 °C/decenni i la precipitació mitjana anual de -1,87% des del 1950 fins al 2015 (respecte el període de referència 1981-2010), on aquests impactes han estat més notables a l'estiu i la primavera quant a temperatura, i a l'hivern i a la tardor quant a precipitacions.

Malgrat no disposar d'estudis on es tracti amb més detall l'evolució climàtica del territori a escala parroquial, es podrien arribar a generar a partir de la cartografia climàtica del passat existent, la qual permetria poder-li fer un anàlisi espacial amb més detall i a escala més petita, però s'ha de tenir en compte que per treure indicadors referents a l'evolució climàtica se solen utilitzar només les dades de les estacions meteorològiques de referència.

En aquest context, els escenaris de canvi climàtic constitueixen un fonament imprescindible per a la realització d'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 del territori davant d'aquesta realitat.

Al final, tots aquests escenaris són hipotètics i per tant poden arribar a esdevenir-se o no, però aquests estudis són la millor eina per poder valorar quantitativament els efectes del canvi climàtic en els propers anys i què es pot fer per frenar-ho.

Tot i que la contribució d'Andorra a 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, Andorra és 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 (OPCC, 2020).

Si analitzem la distribució de les emissions de GEH a Andorra, la descarbonització profunda del sector energètic és una condició clau per assolir els objectius més exigents de lluita contra el canvi climàtic (EENCC, 2021). Tal com s’observa al gràfic inferior (Fig. 1) el sector de l’energia emet més del 95% de les emissions de GEH, on aproximadament el 56% és produït pel consum de combustibles fòssils de la mobilitat; un 23% correspon al consum de combustibles fòssils dels edificis (sector residencial comercial i institucional), i un 17% al consum elèctric i la producció energètica.

D’altra banda, el sector forestal i altres usos del sòl absorbeixen aproximadament un 23% de les emissions generades, i la massa forestal del país, que cobreix el 40% de la superfície del territori, és la que absorbeix principalment aquestes emissions (-140 Gg de CO₂/any) (EENCC, 2021).

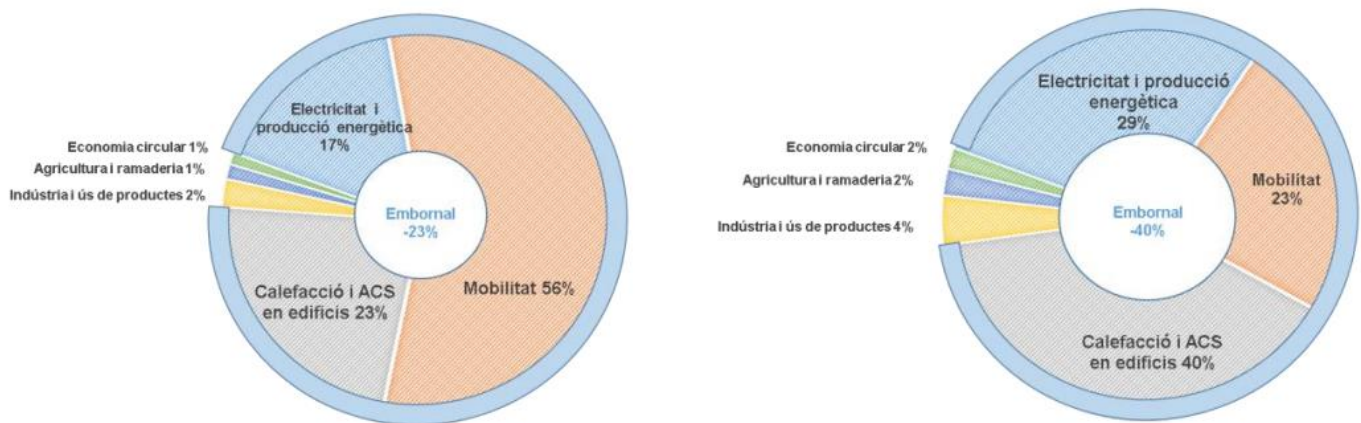


Figura 1. Origen de les emissions de GEH l’any 2017 tenint en compte totes les emissions produïdes per la mobilitat (esquerre) i només la mobilitat interna (dreta). Font: Estratègia Energètica Nacional i de lluita contra el Canvi Climàtic (EENCC), 2021.

Dins d’aquest sector, aproximadament el 56% de les emissions corresponen al consum energètic associat a la mobilitat (un 23% si només es considera la mobilitat interna), i un 24% al consum energètic de l’edificació (un 40% si només considerem la mobilitat interna). El camí cap a la neutralitat en carboni l’any 2050, tenint en compte cada una de ha de ser el que es representa a continuació (Fig. 2).

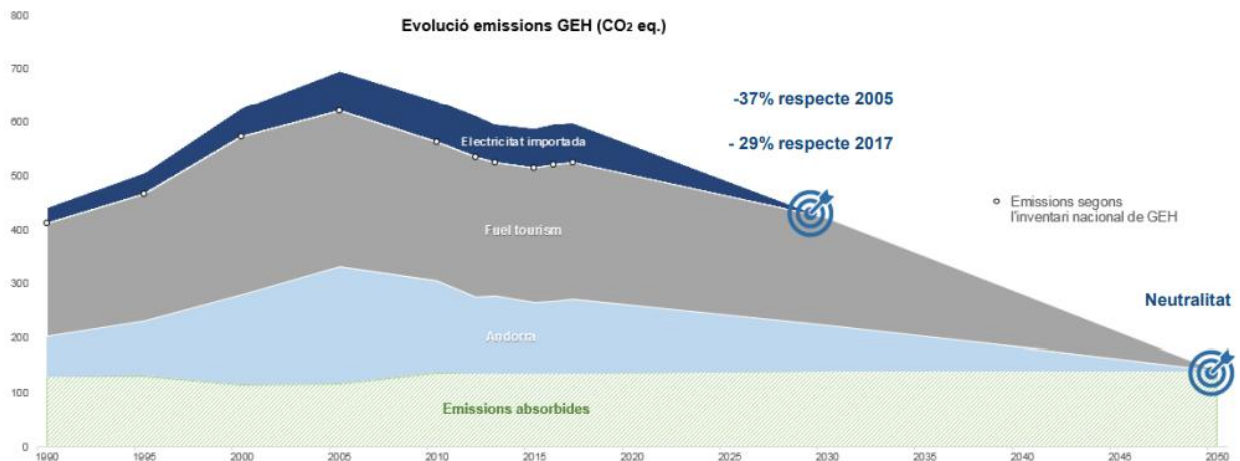


Figura 2. Evolució de les emissions de GEH i períodes de revisió per assolir la neutralitat en carboni el 2050. Font: Estratègia Energètica Nacional i de lluita contra el Canvi Climàtic (EENCC), 2021.

La llei d'impuls de la transició energètica i del canvi climàtic (Litecc, 2018) té l'objectiu d'establir mesures per a la reducció d'emissions de GEH i promoure la transició cap a un model energètic més sostenible i eficient. La llei estableix objectius ambiciosos, com ara la reducció del 37,5% d'emissions de GEH per a l'any 2030 en comparació dels nivells de 2010 i la neutralitat de carboni per a l'any 2050, concretant mesures que permetin assolir aquests objectius, com ara la promoció d'energies renovables, la promoció de l'eficiència energètica, la reducció d'emissions en el transport i la promoció de pràctiques sostenibles al sector empresarial.

Altres estudis realitzats dins el marc d'aquesta estratègia nacional són el projecte Piragua, que ha permès analitzar el recurs hídric a escala del Pirineu i identificar les principals problemàtiques i accions d'adaptació que cal emprendre, especialment sensibles en un territori com Andorra per la multisectorialitat dels usos d'aquest recurs (Domènech *et al.*, 2022).

En aquest estudi s'han obtingut sèries d'anomalies regionals per la precipitació, la temperatura màxima i la temperatura mínima anuals però s'ha volgut ampliar l'escala de l'anàlisi a períodes de temps estacionals; hivern (desembre a febrer), primavera (març a maig), estiu (juny a agost) i tardor (setembre a novembre), (seguint Pérez-Zanón *et al.*, 2016).

3.2 Limitacions de les projeccions i models de canvi climàtic

L'estudi del clima a regions muntanyoses com Andorra, destaca per la llunyania respecte altres entorns, el que dificulta el registre de dades amb mètodes d'observació, per la qual cosa és important incidir en els estudis precedents tant pel que fa al tractament estadístic de mètodes de reducció d'escala (downscaling) per evitar els problemes associats a la distribució no uniforme de dades observacionals in situ com pel que fa la modelització espacial de variables climàtiques (Smid *et al.*, 2018), qüestions claus en què se centra aquesta recerca.

Les projeccions climàtiques estan afectades per diferents fons d'incertesa. Aquestes fons d'incertesa procedeixen de diferents etapes associades a la seva generació, és a dir, si la qualitat de les dades de temperatura i precipitació utilitzades en un model és baixa, això pot afectar la precisió de les projeccions de temperatura i precipitació futures. (Sheridan *et al.*, 2010), provocant que si les suposicions utilitzades per modelar les interaccions entre la temperatura, la humitat i altres factors són incorrectes, poden afectar la precisió de les projeccions.

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 fons d'incertesa poden agrupar-se en tres categories principals (Amblar-Francés *et al.*, 2017):

- Incertesa associada al escenari a conseqüència del desconeixement de les emissions i concentracions futures dels GEH i aerosols.

- Incertesa associada a la modelització a conseqüència de les limitacions del sistema climàtic i la seva representació en un model.
- Incertesa associada a la variabilitat natural a conseqüència de la variabilitat interna del propi sistema climàtic

A la figura 3 s'observa com afecta la incertesa en la fracció variància de la temperatura. La fracció verda fa referència a la incertesa de l'escenari, la fracció taronja a la interna i la blava a la del model. Per tant, es pot veure com la incertesa associada al propi escenari, incrementa notablement a finals del segle XXI (AEMET, 2017), aglutinant gairebé tot el pes de la incertesa total en la subfigura esquerra i més de la meitat del pes en la subfigura dreta. Això significa que es pot reduir aquesta incertesa escollint el major nombre d'escenaris possibles que tinguin en compte tots els possibles resultats finals d'emissions de GEH i aerosols.

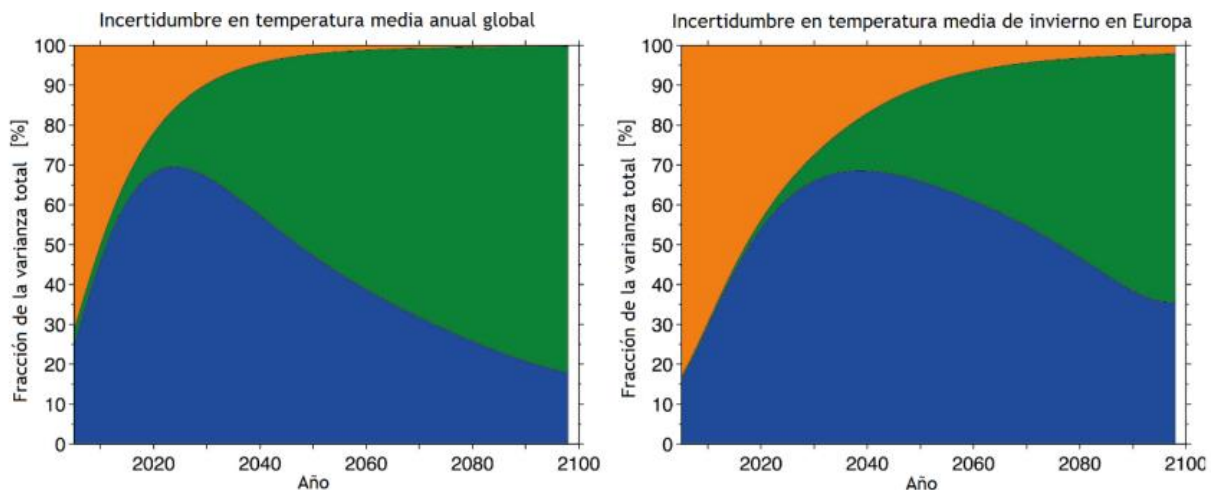


Figura 3. Contribucions relatives de les tres fonts principals d'incertesa a les projeccions de clima per a diferents temps en el futur per la temperatura mitjana global. Font: (Amblar, et al., 2017; IPCC, 2013)

En aquest context, els escenaris de canvi climàtic constitueixen un fonament imprescindible per a la realització d'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 del territori davant aquesta realitat.

Al final, tots aquests escenaris són hipotètics i per tant poden arribar a esdevenir-se o no, però aquests estudis són la millor eina per poder valorar quantitativament els efectes del canvi climàtic en els propers anys i que es pot fer per frenar-ho.

En definitiva, el clima global és la resposta a les estructures a gran escala a la superfície de la Terra (distribució terra-oceà, topografia, etc.) i l'escalfament diferencial per a diferents latituds i èpoques de l'any. Els climes regionals representen el resultat de la interacció del clima a gran escala amb els detalls a escala regional (Brunet *et al.*, 2008). Per tant, es pot simular raonablement bé el clima global encara que no s'arribin a captar a la simulació els detalls del clima a escala regional.

4. Àrea d'estudi: el cas d'Andorra

4.1 Descripció física

L'àrea d'estudi comprèn el conjunt del Principat d'Andorra, en el qual s'inclouen les parròquies d'Encamp, Canillo, Andorra la Vella, Escaldes-Engordany, la Massana, Ordino i Sant Julià. Aquesta àrea es troba al sector més meridional del continent europeu (latitud 42,5° nord) (Trapero *et al.*, 2021). La raó d'aquesta elecció, esmentada breument en la motivació (Pàg. 1), es deu a una vinculació personal d'una banda, i a un interès purament climatològic, com és la irregularitat típica dels climes d'influència mediterrània que fan que al país hi hagi una gran diversitat de microclimes, que matisen el domini general del clima d'alta muntanya. Aquests dos factors, són els elements pels quals s'ha decidit delimitar aquesta àrea d'estudi.

A nivell hidrològic, el territori es creuat principalment per tres rius. El riu Valira d'Orient, que passa per Canillo i Encamp i neix en la part més oriental del territori amb un recorregut de 23 km, el riu Valira del Nord, que passa per Ordino i la Massana i neix als llacs de Tristaina amb un recorregut de 14 km i finalment, conflueixen ambdós rius per formar el Gran Valira, un riu que conflueix a Escaldes-Engordany i que en el seu descens cap al sud del territori, acaba desembocant al riu Segre, a la Seu d'Urgell.

Paisatgísticament, Andorra es troba a l'ecoregió bosc dels Pirineus, que forma part del bioma Bosc temperat de frondoses, on hi ha grans extensions boscoses de pins i bedolls a causa del clima mediterrani d'alta muntanya que té el país (Atlas d'Andorra, 1991), on els boscos ocupen dues cinquenes parts del territori.

La vegetació és típica del vessant meridional dels Pirineus, de tipus continental amb estatges de bosc submediterrani de roure martinenc i alzines. A mesura que pugem en altitud, s'hi troben pinedes de pi roig i de pi negre i avet o prats alpins als cims.

La localització d'Andorra afavoreix que a l'hivern hi predomini l'efecte de la circulació atmosfèrica de latituds mitjanes, amb vents predominants de l'oest de la zona temperada (o westerlies), influenciat per masses d'aire marítimes (Oceà Atlàntic). A l'estiu, en canvi, les altes pressions subtropicals prenen major importància, sent l'anticicló de les Açores el centre d'acció més influent (Trapero *et al.*, 2021).

Pel que fa als factors regionals, cal destacar la seva localització dins el conjunt de la serralada dels Pirineus, entre França i Espanya, la proximitat a la conca mediterrània i la influència Atlàntica a menys de 300 km. A part s'ha de destacar el principal factor local, el relleu, i l'important gradient altitudinal que presenta el territori andorrà.

En els només 468 km² de superfície que té el país, cal destacar com l'altitud varia en pocs quilòmetres dels 830 m al fons de vall més meridional fins al pic més alt amb una altura de 2942 m (pic de Comapedrosa), convertint-lo així amb un dels països europeus amb l'altitud mitjana més alta (2044 m). En el mapa hipsomètric (Fig. 4) es representen aquests elements fisiogràfics.

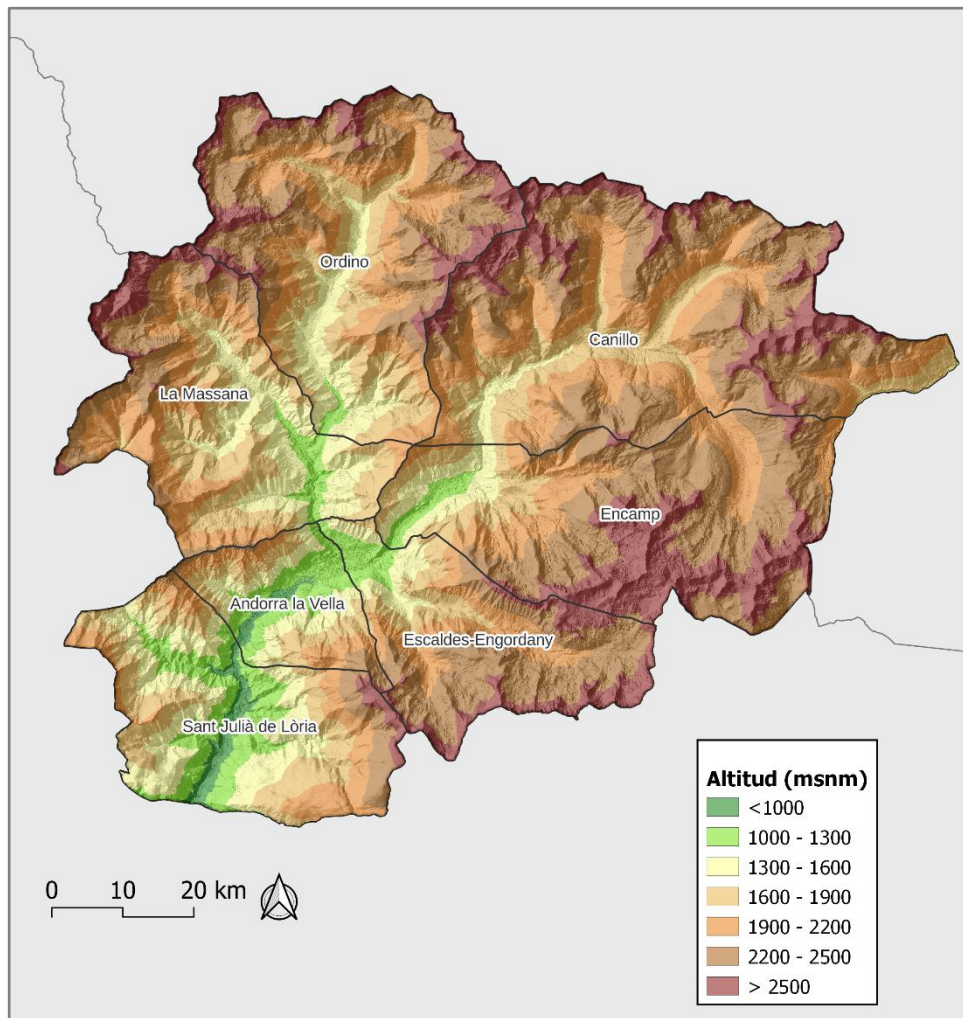


Figura 4. Mapa hipsomètric d'Andorra. Elaboració pròpia a partir del MDE del Sistema d'Informació Geogràfica i Mediambiental d'Andorra.

4.2 Característiques climatològiques

En aquest apartat es presentaran de manera breu, els principals trets climàtics de l'àrea d'estudi, recollits en gran part al treball *Climate setting in Andorra* (Trapero, L., Albalat, A. & Lemus-Cánovas, M. 2021). El clima d'Andorra és mediterrani de muntanya amb clara tendència subcontinental en bona part del territori, tot i que els sectors més alts que pertanyen al vessant nord dels Pirineus tenen una forta influència del clima atlàntic de latituds mitjanes (Esteban *et al.*, 2009). Les temperatures mitjanes anuals es troben entre els 10 i 7 °C als fons de vall, amb un màxim de precipitació a la tardor i finals de primavera, i un període més sec a l'hivern.

La temperatura de l'aire es mesura actualment a gairebé una trentena d'estacions del Servei Meteorològic Nacional (SMN) distribuïdes per tot el territori, a diferència dels tres observatoris climàtics a fons de vall que existien al segle passat, i que estaven gestionats per FEDA (Forces Elèctriques d'Andorra). Tal com es pot consultar a l'atles climàtic d'Andorra ACDA (www.acda.ad; Batalla *et al.*, 2016), les temperatures varien d'acord amb l'orografia local i depenen principalment de l'altitud, encara que la distància al mar hi té una influència rellevant (Fig. 5).

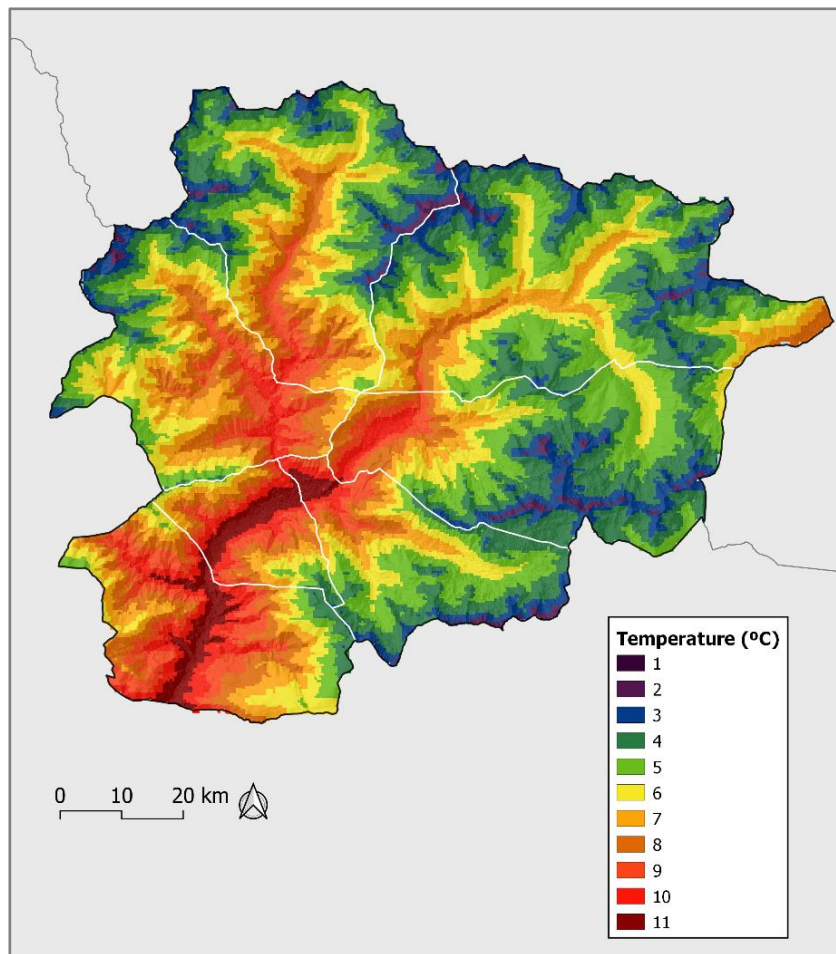


Figura 5. Temperatura mitjana anual (°C) 1981-2010. Elaboració pròpia a partir de l'Atlas Climàtic Digital d'Andorra (Batalla, M., Ninyerola, M., Traperó, L. & Esteban, P. 2016)

Les dades de la figura 5 mostren la importància del gradient vertical de temperatura a causa de l'efecte regional de la variació latitudinal, que implica un augment de la temperatura de nord a sud per zones amb la mateixa altitud.

Si s'utilitza la descripció climàtica de Köppen pel cas d'Andorra, identifiquem una transició gradual de sud a nord. El clima mediterrani característic del nord-est de la península ibèrica, va perdre la seva influència al aproximar-se a la serralada pirinenca, on a l'extrem sud d'Andorra i a la vall central del país evoluciona cap a un clima oceànic temperat (Cfb). Al avançar cap al nord, apareix progressivament el clima continental, amb hiverns freds i estius temperats (Dfb) gràcies a la influència atlàntica, amb només un mes sec a l'estiu. A les cotes més altes, superiors als 2.200 msnm, s'identifica el clima continental subàrtic (Dfc) amb hiverns freds, amb neu, i estius freds i curts.

També cal destacar el fenomen de les inversions tèrmiques a causa de les acumulacions d'aire fred als fons de vall, especialment durant situacions anticiclòniques amb cels serens i vents dèbils. Aquestes situacions són més freqüents a l'hivern, i poden persistir diversos dies, malgrat que a Andorra, al tractar-se d'una vall estreta, les acumulacions d'aire fred no són tant pronunciades com en altres valls pirinenques, més amples i poc profundes, com la Cerdanya, coneguda pels seus records de fred a l'observatori de Das a 1097 msnm (-22.8 °C el 12/02/2018; Udina *et al.*, 2022).

El Pirineu, i per extensió Andorra, està caracteritzat per ser una àrea d'elevada variabilitat espacio-temporal pluviomètrica degut a la seva situació geogràfica i la seva complexa orografia. De fet, són diversos els estudis que analitzen aquesta variabilitat en les diverses àrees del Pirineu (Beguería *et al.*, 2009, 2006; Buisan *et al.*, 2015; Vicente-Serrano *et al.*, 2009).

Les característiques climàtiques descrites anteriorment afavoreixen que a Andorra el règim de precipitacions no segueixi el patró clàssic del clima mediterrani d'hivern plujós i estiu sec, sinó que es distribueixin al llarg de l'any de manera semblant a com ho fan a la resta dels Pirineus. Els màxims de precipitació són precisament de tardor i a finals de primavera o bé estivals amb acumulacions mensuals que superen els 100 mm. Mentre que el període més sec normalment correspon a l'hivern, amb mínims de precipitació mensual durant el mes de febrer (30mm). (Trapero *et al.*, 2021). Així doncs, a l'hivern, en donar-se temperatures més baixes, podem considerar que s'espera neu al sòl de forma gairebé permanent entre desembre i abril a partir dels 2200 metres d'altitud.

L'exposició de l'orografia a les masses d'aire humides dominants (atlàntiques, mediterrànies o fins i tot subtropicals), marca quins seran els vessants més favorables a generar l'ascens dels fluxos humits, el seu refredament i saturació, amb la consegüent condensació del vapor d'aigua. És per aquest motiu que la distribució espacial de la precipitació anual és superior a cotes altes i a la meitat nord del país, on la influència atlàntica és més freqüent (Fig. 6).

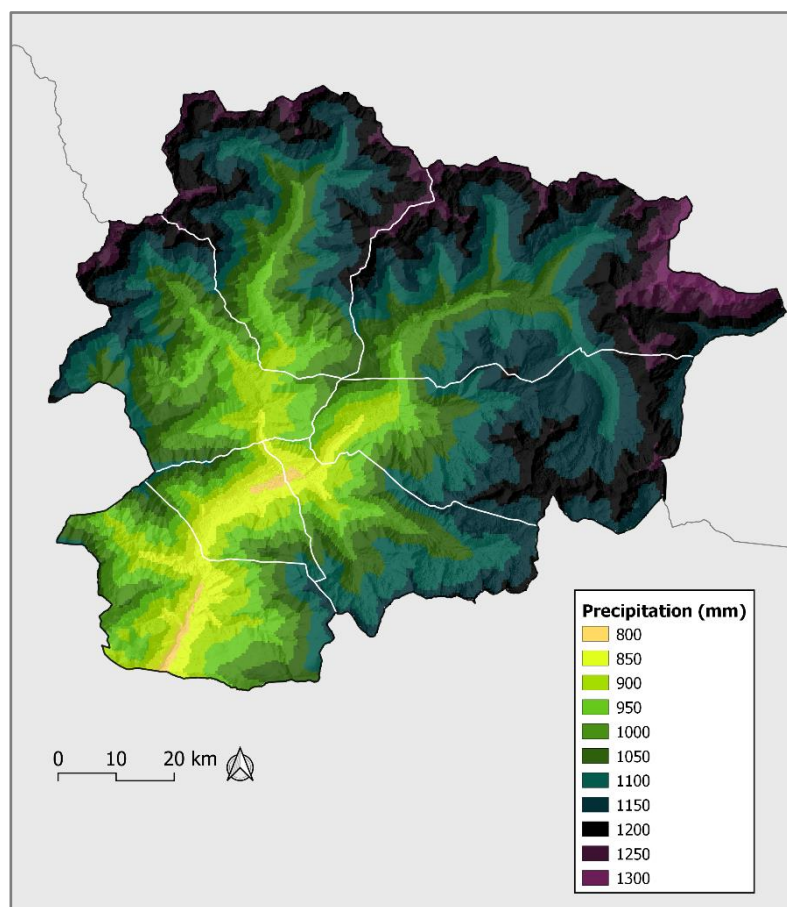


Figura 6. Precipitació mitjana anual (mm) 1981-2010. Elaboració pròpia a partir de l'Atlas Climàtic Digital d'Andorra (Batalla, M., Ninyerola, M., Trapero, L. & Esteban, P. 2016).

5. Metodologia

5.1 Sèries de dades de l'estudi

En aquest estudi s'utilitzen observacions de la Base de Dades Climàtiques de l'AEMET i de la base de dades CLIMPY per desenvolupar correctament la climatologia de la temperatura en superfície de la malla. Les dades diàries, mensuals i anuals de temperatura màxima, temperatura mínima i precipitació de l'any 1961 fins l'any 2100 obtingudes a partir de la malla (5 km x 5 km) s'emmarquen dins el projecte POCTEFA CLIMPY, que conté els 1622 punts de l'àrea CLIMPY, on s'han utilitzat 338 estacions de precipitació i 109 per a la temperatura, entre les que s'inclouen les referents al territori andorrà.

5.1.1 Font de dades

Per aquest treball s'han seleccionats les dades reticulars de l'àrea d'estudi de temperatura diàries (màximes i mínimes) i precipitació acumulada en 24 h ampliades provinents de l'AEMET, on s'han seleccionat les dades addicionals d'Andorra per cobrir completament la zona d'estudi, utilitzant una malla ampliada de 5 km (0,05° lat/lon) de resolució que cobreix tota l'Espanya continental i el sud de França. El mètode utilitzat es una adaptació del codi HIRLAM Surface Analysis (Rodríguez *et al.*, 2003; Navascués *et al.*, 2003), basat en un algoritme d'Interpolació Òptima (Daley, 1991).

Disposar de totes aquestes dades ha estat possibles gràcies al grup de Climatologia i Meteorologia d'Andorra Recerca + Innovació (AR+I), qui m'ha donat accés a aquestes dades de manera acotada pel territori objecte d'estudi, ja que molta d'aquesta informació no es de lliure accés o si ho es té un volum d'informació massa elevat per tractar-les amb un ordinador convencional, en disposar de milions de dades climàtiques d'arreu del territori pirinenc.

5.1.2 Selecció de la xarxa de punts de l'àrea d'estudi

A l'hora d'escollir el conjunt de punts de l'àrea CLIMPY corresponents a Andorra es va haver de fer un procés força complex per aconseguir saber quants i quins punts corresponien al territori objecte d'estudi. Per a fer-ho, vaig haver de treballar amb un arxiu txt proporcionat per AR+I on hi havia recollida la informació bàsica de tots els punts del territori de l'àrea CLIMPY (latitud, longitud i altitud de cada punt) i d'on vaig arribar a extreure els 14 punts que corresponien a Andorra a través del filtratge d'aquest conjunt de dades a Excel.

Els 14 punts seleccionats tenen 139 anys de dades diàries, mensuals i anuals (1961-2100) sense cap llacuna. Pel període històric (1961-2015), totes les dades han passat un procés de control de qualitat i homogeneïtzació per part dels diferents organismes oficials i grups d'investigació d'on provenen. Si es quantifica el total de dades diàries es tenen un total de 710.290, això ens indica el gran volum de dades generades.

Un cop escollits els punts i coneixent la estructura d'aquests, es va poder accedir a la informació corresponent a aquests punts i obtenir tres arxius RDS (Report DataSource File) de 7 columnes cadascun per poder realitzar el seu tractament amb RStudio.

Aquests arxius contenen informació corresponent a la temperatura màxima, un segon arxiu amb les dades corresponents a la temperatura mínima i un darrer arxiu corresponent a la precipitació. En els tres arxius però, s'ha mantingut informació comuna. D'una banda 'geo' (cadascun dels punts del territori), i per altra banda, la seva conseqüent informació: any, mes, dia, Model i Experiment (HISTORICAL, RCP4.5 i RCP8.5), el que indica que cada arxiu conté un total de 15.583.568 de dades diàries, on a cada punt 'geo' (14), li correspon 1.113.112 files.

El nombre de punts total sobre cada massís pirinenc (àrea CLIMPY) s'ha inclòs a la taula 1, on s'observa com a Andorra li corresponen 14 punts, essent així, el segon massís més petit de tota l'àrea analitzada.

Massifs	Number of points
Andorra	14
Arán-Franja Norte Pallaresa	23
Aspe-Ossau	43
Aure Louron	29
Cadí Moixeró	21
Capcir-Puymorens	78
Cerdagne	53
Couserans	111
Ribagorza	105
Gállego	37
Haute Ariège	19
Haute Bigorre	75
Jacétania	77
Luchonnais	14
Navarra-País Vasco	347
Oriu-Saint Barthélemy	91
Pallaresa	97
Pays Basque	69
Perafita-Puigpedrós	12
Prepirineo	90
Ribagorzana-Vall Fosca	64
Sobrarbe	67
Ter-Freser	86

Taula 1. Informació sobre el nombre total de punts dels massissos pirenaics de l'àrea CLIMPY. Elaboració pròpia a partir de dades del projecte POCTEFA CLIMPY (Amblar-Francés *et al.*, 2020).

En el mapa inferior (Fig. 7) es mostra la xarxa de punts escollida que correspon al territori andorrà i la seva localització exacta. En aquest cas però, podem veure la distribució d'aquests a partir de la sectorització dels punts 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) amb un MDE 1x1 m de fons. Tal com marca el límit parroquial en blanc, totes les parròquies es veuen representades per algun punt a excepció de la capital, Andorra la Vella.

També s'ha de destacar el fet que l'altitud dels diferents punts objecte d'estudi que veiem a la figura inferior donada pel projecte prèviament no s'acaba de correspondre amb la realitat, ja que es va comprovar com amb un MDE a escala 1x1 m del territori, és a dir, d'alta resolució (tampoc és exacte), ens dona valors altitudinals diferents als donats per l'àrea CLIMPY a Andorra.

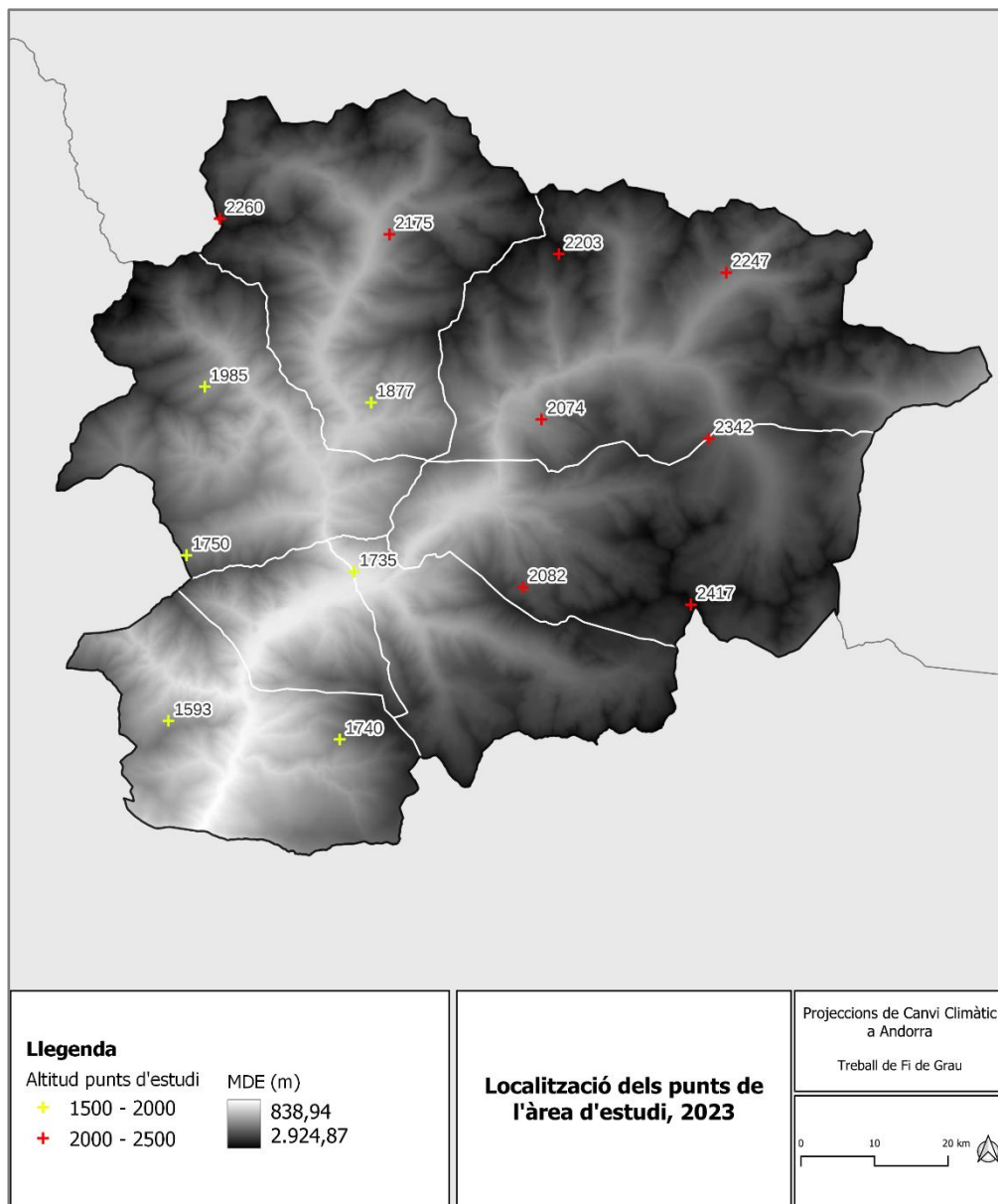


Figura 7. Localització dels punts de l'àmbit d'estudi. Elaboració pròpia a partir del MDE del Sistema d'Informació Geogràfica i Mediambiental d'Andorra

5.2 Mètode de treball

La metodologia dissenyada per aquest estudi es concreta en tres fases que es desenvolupen de forma seqüencial per a l'acompliment dels objectius plantejats. Una primera etapa de la metodologia persegueix poder arribar a caracteritzar l'evolució de la temperatura i precipitació del conjunt de l'àrea d'estudi. En una segona etapa s'exposa la metodologia necessària per a poder realitzar una descripció i categorització dels diferents índex climàtics que es treballen en aquest estudi. Finalment, s'introdueix la metodologia necessària per a l'obtenció d'estadístics descriptius i la definició dels criteris que segueixen.

En conjunt, i seguint Lemus-Canovas (2016): la metodologia aplicada en el present estudi deriva de la climatologia quantitativa, ja que aquest se centra en l'anàlisi de les dades climàtiques utilitzant tècniques matemàtiques i estadístiques, on l'anàlisi de projeccions climàtiques implica l'ús d'aquestes tècniques per processar i analitzar grans volums de dades a llarg termini. Per tant, s'han emprat mètodes estadístics per descriure i quantificar les característiques del clima en un període específic així com per calcular les tendències de les series.

Si entrem en detall amb els mètodes estadístics mencionats breument al marc conceptual, s'han utilitzat tècniques de reducció d'escala estadística (downscaling), pel fet que aquestes 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). Per tant, pot semblar una alternativa avantatjosa per a projectes on la capacitat computacional, l'experiència tècnica o fins i tot el temps representen restriccions importants (Trzaska *et al.*, 2014).

En termes generals, s'ha emprat el software RStudio per a l'anàlisi estadística de dades i la generació de cartografia climàtica. Aquest ha servit per poder calcular tant els indicadors de temperatura màxima, temperatura mínima i precipitació com l'anàlisi dels diferents índex climàtics que exposarem posteriorment (Els paquets d'R utilitzats i el procés s'exposarà posteriorment). També s'ha utilitzat l'eina QGIS per a poder generar els gràfics introductoris utilitzats per explicar la distribució de la temperatura i precipitació al territori, així com per localitzar els punts objecte d'estudi.

A l'hora d'elaborar les projeccions climàtiques multi-model de l'estudi s'ha utilitzat l'experiment HISTORICAL, com a escenari de referència o històric i els escenaris d'emissions RCP4.5 i RCP8.5 del projecte CMIP5 pel segle XXI. La taula 2 recull les simulacions disponibles en el moment de desenvolupament del estudi que han estat descarregades i utilitzades pel càlcul d'índex i indicadors climàtics.

Els períodes climàtics considerats són 1986-2005 per a l'experiment HISTORICAL malgrat disposar de dades des del 1961 i 2006-2100. Això s'explica perquè en el projecte POCTEFA CLIMPY es van fer projeccions del mantell nival (gruix neu) i es van trobar que per aquesta variable només es disposava de prou dades des del 1986 pel conjunt dels Pirineus, provocant aquesta particularitat a l'hora de definir el període de referència.

CMIP5 models		
Models	Institution	Considered scenarios
BNU-ESM (<i>T^o</i> , <i>PP</i>)	Global Change and Earth System Science (GCESS) Beijing University, China	HISTORICAL / RCP4.5 / RCP8.5
Bcc-csm1.1 (<i>PP</i>)	Beijing Climate Center, China	HISTORICAL / RCP4.5 / RCP8.5
CanESM2 (<i>T^o</i>)	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma), Canada	HISTORICAL / RCP4.5 / RCP8.5
CMCC-CM (<i>T^o</i> , <i>PP</i>)	CMCC, Italy	HISTORICAL / RCP4.5 / RCP8.5
CNRM-CM5 (<i>PP</i>)	Centre National de Recherches Météorologiques	HISTORICAL / RCP4.5 / RCP8.5
GFDL-ESM2G (<i>T^o</i> , <i>PP</i>)	NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), USA	HISTORICAL / RCP4.5 / RCP8.5
HadGEM2-CC (<i>PP</i>)	Met Office, UK	HISTORICAL / RCP4.5 / RCP8.5
IPSL-CM5A-LR (<i>T^o</i> , <i>PP</i>)	Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France	HISTORICAL / RCP4.5 / RCP8.5
IPSL-CM5A-MR (<i>T^o</i> , <i>PP</i>)	IPSL, France	HISTORICAL / RCP4.5 / RCP8.5
IPSL-CM5BLR (<i>T^o</i> , <i>PP</i>)	IPSL, France	HISTORICAL / RCP4.5 / RCP8.5
INM-CM4 (<i>T^o</i> , <i>PP</i>)	Institute of Numerical Mathematics, Russia	HISTORICAL / RCP4.5 / RCP8.5
MIROC-ESM (<i>PP</i>)	AORI NIES JAMSTEC, Japan	HISTORICAL / RCP4.5 / RCP8.5
MIROC-ESM - CHEM (<i>PP</i>)	AORI NIES JAMSTEC, Japan	HISTORICAL / RCP4.5 / RCP8.5
MIROC5 (<i>T^o</i> , <i>PP</i>)	Atmosphere and Ocean Research Institute (AORI). National Institute for Environmental Studies (NIES). JAMSTEC, Japan	HISTORICAL / RCP4.5 / RCP8.5
MPI-ESM-LR (<i>T^o</i> , <i>PP</i>)	Max-Planck-Institut (MPI) for Meteorology, Germany	HISTORICAL / RCP4.5 / RCP8.5
MPI-ESM-MR (<i>T^o</i> , <i>PP</i>)	Max-Planck-Institut (MPI) for Meteorology, Germany	HISTORICAL / RCP4.5 / RCP8.5
MRI-CGCM3 (<i>T^o</i> , <i>PP</i>)	Meteorological Research Institute, Japan	HISTORICAL / RCP4.5 / RCP8.5

Taula 2. Llista de models CMIP5 utilitzats a les projeccions regionalitzades CLIMPY. Elaboració pròpia a partir de dades del projecte POCTEFA CLIMPY (Amblar-Francés et al., 2020).

Abans d'exposar els punts que conformen la metodologia del present estudi, s'ha de destacar que no hi ha una metodologia específica ni un mètode concret per desenvolupar aquest tipus de treballs, sinó que hi ha antecedents que utilitzen mètodes similars però sense entrar a l'escala parroquial. Per aquesta raó, en aquest treball s'ha optat per dissenyar una metodologia pròpia per tal d'aconseguir resultats d'alta resolució.

5.3 Evolució de la temperatura i precipitació respecte el període de referència 1986-2005

En aquesta primera fase es pretén assolir l'objectiu d'avaluar la vulnerabilitat d'Andorra als impactes del canvi climàtic en funció dels escenaris socioeconòmics futurs escollits (RCP4.5 i RCP8.5), així com poder respondre a l'objectiu de saber quan s'assoliran l'1.5 i 2.0 graus d'augment de temperatura segons cada escenari i segons la variable analitzada (temperatura màxima, mínima i mitjana) a partir del període de referència 1986-2005.

El darrer objectiu que es vol assolir i que es compartit per les altres fases exposades a l'inici de la metodologia fa referència a poder establir una sectorització altitudinal dels punts del territori segons si es troben a fons de vall (< 2000 metres) o a alta muntanya (> 2000 metres). Per a donar resposta a aquests dos objectius s'exposarà el procés seguit amb RStudio que s'ha desenvolupat fins a arribar a generar la cartografia climàtica corresponent.

Abans d'explicar el procés específic utilitzat pel càlcul de la temperatura i la precipitació, exposarem el procés previ realitzat que aplica al conjunt de les variables analitzades.

Després d'iniciar la sessió amb RStudio, cal crear una carpeta de treball i instal·lar els paquets necessaris mitjançant:

```
if(!require (tidyverse)){install.packages('tidyverse')}
```

```
if(!require (fs)){install.packages('fs')}
```

```
if(!require (ggthemes)){install.packages('ggthemes')}
```

A continuació, s'han carregat els paquets instal·lats prèviament per tal d'utilitzar les seves funcions.

```
library (tidyverse)
```

```
library (fs)
```

```
library (ggthemes)
```

La funcionalitat d'aquests paquets es la següent:

- **'tidyverse'** és un conjunt de paquets que inclou ggplot2, dplyr, tidyr, entre d'altres, i s'utilitza comunament per a l'anàlisi de dades. Dels paquets que conté, cal fer menció al 'ggplot2', pel fet que permet crear i visualitzar gràfics.
- **'fs'** proporciona una interfície de programació per al sistema de fitxers de l'ordinador.
- **'ggthemes'** és un paquet que proporciona una varietat de temes addicionals per a ggplot2.

A continuació, ja es pot començar amb l'anàlisi individual de cada fitxer, on s'observa com el procés d'anàlisi de la temperatura màxima i mínima es molt similar, però que en el cas de la temperatura mitjana i precipitació pateix certes modificacions.

5.3.1 Temperatura

Per començar l'anàlisi de la temperatura, exposarem un resum del codi seguit pel càlcul de la temperatura màxima per tal de veure un exemple sobre el procediment seguit fins a poder arribar a generar els gràfics corresponents, donada la seva gran importància.

En primer lloc, es carrega el fitxer rds que conté la informació referent a aquesta variable i s'analitza la seva estructura i contingut. S'ha de tenir en compte que els fitxers carregats no son poca cosa, en ocupar més d'1GB.

```
Tmax <- read_rds (file = "data/climpy_projections_andorra/tmax_climpy_CMIP5.rds")
```

```
Tmax
```

A continuació, s'obté la informació corresponent als models, per tal de veure quins i quants estem utilitzant així com els experiments disponibles a les dades:

```
unique (Tmax$Model)
```

```
length (unique(Tmax$Model))
```

```
unique (Tmax$Experiment)
```

Se seleccionen els models i experiments necessaris per a l'anàlisi i es representa en una taula.

```
model_experiment <- select (tmax, Model, Experiment) %>%
```

```
distinct (Model,Experiment)
```

```
disponibilitat <- table(model_experiment)
```

Per a la realització d'aquest treball només cal treballar amb HISTORICAL, RCP4.5 i RCP8.5.

```
experiments_desitjats <- as_data_frame (disponibilitat) %>%
```

```
pivot_wider (names_from = Experiment, values_from = n) %>%
```

```
filter (HISTORICAL == 1 & RCP4.5 == 1 & RCP8.5 == 1)
```

```
models_complets <- experiments_desitjats$Model
```

Es sobreescriu l'objecte Tmax per tal de buidar la taula només amb els models que són del nostre interès perquè compleixen Experiment: HISTORICAL, RCP4.5 i RCP8.5. A part, ens carreguem el RCP6.0

```
Tmax <- Tmax %>%
```

```
filter (Model % in % models_complets) %>%
```

```
filter (Experiment != "RCP60") %>%
```

S'aplica la funció *mutate* perquè les dades tinguin els valors correctes, ja que sinó ens apareixen en dècimes de grau i s'analitzen quants models finals compleixen els requeriments.

```
mutate (tmax=tmax/10)
```

```
unique (Tmax$Model)
```

A continuació, s'agrupen les dades per ubicació geogràfica 'geo', any i Experiment, i es calcula la temperatura mitjana de la temperatura màxima (temp_mean) per a cada grup. Després s'agrupen les dades només per ubicació geogràfica i experiment, i es calcula la desviació estàndard (temp_SD) i els quartils 17 i 83 (temp_q17 i temp_q83, respectivament) per a cada grup. Finalment s'eliminen les agrupacions i el resultat final és un conjunt de dades (absolut_tmax) que conté la temperatura mitjana de la temperatura màxima per a cada ubicació geogràfica i experiment del conjunt d'Andorra.

```
absolut_tmax <- Tmax %>% group_by (geo,any,Experiment) %>%
```

```
summarise (temp_mean = mean(tmax)) %>%
```

```
group_by (geo,Experiment) %>%
```

```
mutate (temp_SD = sd(temp_mean),
```

```
temp_q17 = quantile (temp_mean,0.17),
```

```
temp_q83 = quantile (temp_mean,0.83)) %>%
```

```
ungroup()
```

Dintre d'aquest codi, cal comentar com el primer i tercer quartil, són substituïts pels percentils 17 i 83 respectivament, rang utilitzat també per altres autors (Jacob *et al.*, 2014; Amblar-Francés *et al.*, 2020). Això es deu a que en aquest interval es trobarien el 66% de les projeccions situades al voltant de la mitjana (en una distribució gaussiana el 68 % dels casos es troben en un interval +/- sigma a torn del valor mitjà) (Amblar-Francés *et al.*, 2017).

Tot seguit, es calcula la mitjana de les temperatures màximes (tmax) per cada any (any) i per a cada ubicació geogràfica (geo) a l'experiment "HISTORICAL". Per fer-ho es calcula la mitjana de les mitjanes de la temperatura màxima (temp_ref) i els quartils de les mitjanes de les temperatures màximes per avaluar la dispersió de les mitjanes.

```
mean_ref <- tmax %>% filter (Experiment == "HISTORICAL") %>%
```

```
group_by (geo,any) %>%
```

```
summarise (temp_mean = mean(tmax)) %>%
```

```
group_by (geo) %>% summarise (temp_ref = mean (temp_mean), temp_ref_SD = sd (temp_mean),
```

```
temp_ref_q17 = quantile (temp_mean,0.17),
```

```
temp_ref_q83 = quantile (temp_mean,0.83)) %>%
```

```
ungroup()
```

A continuació es realitza un *inner_join* entre les dades d'absolut_tmax i mean_ref per calcular les anomalies de temperatura (anom_temp) i es calculen els quartils de les anomalies de temperatura, desplaçant les anomalies en relació amb la referència (temp_ref) perquè estiguin centrades a zero.

```
change_max <- inner_join(absolut_tmax, mean_ref, by = c('geo')) %>%
mutate (anom_temp = temp_mean-temp_ref,
anom_temp_q17 = anom_temp + (temp_ref_q17 - temp_ref),
anom_temp_q83 = anom_temp + (temp_ref_q83 - temp_ref))
```

Es repeteix el procés anterior adaptat al conjunt d'Andorra i no per a cada punt geo, sinó que es calcula un resum de les anomalies de temperatura per any i per experiment.

```
change_max_and <- change_max %>% group_by (any,Experiment) %>%
summarise (anomaly_temp = mean (anom_temp),
anomaly_temp_q17 = mean (anom_temp_q17),
anomaly_temp_q83 = mean (anom_temp_q83))
```

Finalment, es calcula l'any en què la temperatura mitjana supera els 1,5 i 2 graus als experiments RCP4.5 i RCP8.5. A continuació, s'exposa un exemple sobre el codi seguit per calcular el primer any segons l'escenari socioeconòmic RCP4.5 on s'arriba al 1.5°C d'increment. Pel càlcul dels 2 graus i del escenari RCP8.5 únicament s'ha de fer una substitució al valor del Experiment, segons l'escenari i en la formulació final del càlcul de l'índex.

```
change_max_rcp45 <- change_max_and %>% filter (Experiment == "RCP4.5")
# Obtenim l'índex del primer any en el que l'anomalia supera els 1.5 graus
index_rcp45_1.5 <- which (change_max_rcp45$anomaly_temp >= 1.5)[1]
# Obtenim l'any corresponent
any_rcp45_1.5 <- change_max_rcp45$any [index_rcp45_1.5]
any_rcp45_1.5
```

Així doncs, amb totes aquestes dades es realitza el gràfic corresponent al conjunt d'Andorra i posteriorment es realitzen els gràfics restants (segons la sectorització altitudinal, estacional i individual).

En termes generals, el codi fa una sèrie d'operacions per processar i analitzar dades climàtiques i generar informació útil sobre el canvi climàtic a Andorra a través de l'anàlisi de les projeccions de la temperatura màxima a Andorra segons diferents models climàtics i diferents escenaris socioeconòmics.

En el cas de la temperatura mínima, únicament s'ha de substituir l'arxiu rds inicial pel corresponent a aquesta variable i substituir Tmax per Tmin als passos explicats anteriorment.

```
Tmin <- read_rds (file = "data/climpy_projections_andorra/tmin_climpy_CMIP5.rds")
```

Pel que fa a la temperatura mitjana, si que es produeixen alguns canvis que s'han de comentar. En primer lloc, no hi ha un arxiu corresponent a aquesta variable, per tant, el que es va haver de fer va ser crear un nou dataframe a partir de les variables tmax i tmin dels seus arxius rds corresponents filtrant el nombre de models comuns en ambdues variables, ja que el nombre de dades totals de l'arxiu de la temperatura màxima es de 15.583.568 i el de la temperatura mínima de 15.583.562. Malgrat que sigui pràcticament igual, en el software RStudio, no podem ajuntar dues columnes en un dataframe que tinguin un nombre de files diferent.

Per a resoldre aquesta problemàtica, durant el tractament dels arxius rds es va haver de realitzar un pas complementari al comentat anteriorment; analitzar i comparar el nombre de files de cadascun dels models climàtics per ambdues variables, per veure en quin d'ells hi havia variacions i poder extreure'l de l'anàlisi. Un cop extret, vam carregar el codi amb els models corresponents, tal com s'observa a continuació:

```
models_complets <- c ("BNU-ESM", "GFDL-ESM2G", "IPSL-CM5A-LR", "IPSL-CM5A-MR", "IPSL-CM5B-LR", "MIROC5", "MPI-ESM-LR", "MPI-ESM-MR", "MRI-CGCM3", "INM-CM4").
```

Aquest pas implica que els models utilitzats per l'anàlisi de les dues variables siguin exactament el mateix i per tant, es tingui el mateix nombre de files i es puguin ajuntar en un nou dataframe. Així doncs, ja es pot començar el procés per calcular la temperatura mitjana.

Un cop realitzat el pas previ anterior, es va crear un dataframe anomenat 'agrupacio' amb les columnes ("geo", "any", "dia", "mes", "Experiment"), comunes per tots els arxius i es van unir els dataframes de tmax i tmin per fila amb la funció *cbind*. A continuació, es van afegir les columnes corresponents al valor de temperatura màxima i mínima al dataframe conjunt i es va fer un filtratge de les columnes que realment es necessiten per aquest càlcul amb la funció *subset*. Finalment, es va crear una nova columna corresponent a la temperatura mitjana. Es pot observar el càlcul d'aquesta variable generada en aquest últim pas al codi inferior:

```
agrupacio$Tmean <- (agrupacio$Tmax + agrupacio$Tmin) / 2
```

Així doncs, en tenir enllestit el dataframe d'aquesta variable, es segueixen els mateixos passos seguits per la temperatura màxima i la temperatura mínima per poder calcular les anomalies de la temperatura mitjana per any i per experiment, és a dir, pel conjunt d'Andorra, així com a nivell individual, sectorial i estacional.

5.3.2 Precipitació

Un cop s'ha explicat el procés per arribar a calcular l'evolució de la temperatura respecte el període de referència 1986-2005, s'exposa el procés seguit pel càlcul de la precipitació, el qual es pràcticament idèntic al realitzat en el càlcul de la temperatura, però pateix algunes variacions en la darrera part del codi. Principalment, pel fet que els valors diaris donats de precipitació estan expressat en mm/dia.

Així doncs, els primers passos del seu càlcul són idèntics als exposats anteriorment, on únicament s'ha de substituir l'arxiu inicial pel corresponent a aquesta variable i substituir T_{min} per P_{cp} als passos explicats anteriorment.

```
Pcp <- read_rds (file = "data/climpy_projections_andorra/pcp_climpy_CMIP5.rds")
```

La primera diferència doncs, recau a l'hora de realitzar el codi final per poder obtenir l'evolució pel conjunt del territori andorrà, on es calcula un resum de les anomalies de precipitació per any i per experiment sense tenir en compte els punts de l'àrea d'estudi, però amb la particularitat que s'ha de multiplicar per 10, tal com s'observa al codi inferior:

```
change_pcp_and <- change_pcp = group_by (any, Experiment) %>%
```

```
summarise(anomaly_temp = mean (anom_temp)*10,
```

```
anomaly_temp_q17 = mean (anom_temp_q17)*10,
```

```
anomaly_temp_q83 = mean (anom_temp_q83)*10)
```

La segona diferència recau en el fet que no s'ha calculat en quin any s'arriba a un cert valor de precipitació, pel fet que com es veurà a l'apartat de resultats, l'evolució de la precipitació al llarg dels anys es molt poc significativa com per arribar a definir un criteri de creixement o decreixement d'aquesta variable com el exposat anteriorment per la temperatura.

5.4 Descripció i categorització d'índex climàtics

En aquesta segona fase, es pretenen assolir diferents objectius. En primer lloc, es vol identificar les àrees geogràfiques del territori més vulnerables als impactes del canvi climàtic. En segon lloc, es vol analitzar les principals tendències climàtiques de temperatura i precipitació i avaluar la seva evolució al llarg dels anys per poder identificar futurs impactes i vulnerabilitats i finalment, tal com remarca el títol d'aquesta fase, es pretén descriure i categoritzar els diferents índex climàtics que s'han treballat en aquest estudi que s'han considerat de més interès de cara a definir un conjunt d'indicadors climàtics en el marc de l'Estratègia Nacional d'Adaptació al Canvi Climàtic.

En aquest cas i a diferència del realitzat en la primera fase, no s'exposarà el procés seguit amb RStudio, ja que s'han analitzat 11 índex climàtics, i el procés seguit pel càlcul individual de cadascun d'ells no es un dels principals objectius que es persegueixen en la realització d'aquest estudi. Així doncs, s'exposarà a través de diferents taules els diferents índex analitzats per cada variable (temperatura màxima, temperatura mínima i precipitació), la seva definició i la unitat final amb la qual s'han calculat.

També cal explicar el fet que tots els càlculs i processos realitzats s'han dut a terme per mi al software RStudio, és a dir, únicament s'han seguit els criteris que defineix l'ETCCDI (Peterson, 2005) per definir els índex. Això es deu a que totes les dades històriques (1986-2005) de cada estació del territori i de tot el Pirineu han passat un procés de control de qualitat i homogeneïtzació amb RCLimDex previ abans de generar la malla ampliada de 5 km que inclou les dades diàries de tota l'àrea CLIMPY (Taula. 1).

El seguiment del procés, el control de qualitat i el postprocessament s'ha realitzat prèviament (Amblar-Francés *et al.*, 2020). Així doncs, en aquest estudi s'ha generat el codi des del inici per tal que posteriorment pugui ser modificat i adaptat al càlcul de nous indicadors climàtics que permetin identificar en estudis posteriors, l'impacte i l'adaptació del canvi climàtic de diferents sectors, com l'energia o l'agricultura entre d'altres.

En definitiva, els índex seleccionats són aquells que poden tenir més utilitat per donar resposta a l'objectiu principal del estudi tot i ser conscient que hi ha altres indicadors de temperatura màxima, temperatura mínima i precipitació definits per l'ETCCDMI que també ho són, per la qual cosa, s'ha d'entendre la limitació que suposa un treball de fi de grau, on no es pot arribar a fer un anàlisi de tots els índex d'interès.

A continuació, s'exposarà breument la utilitat de cadascun d'ells en termes d'adaptació i vulnerabilitat del canvi climàtic, és a dir, per entendre com els canvis de tendència d'aquests índex afecten un territori de muntanya tant característic com Andorra. Totes les taules i els gràfics generats posteriorment s'han realitzat amb anglès, per tal que els resultats puguin ser interpretats per un públic major.

5.4.1 Temperatura màxima

En primer lloc, s'analitza l'índex *Summer days (SU25)*, que mesura el nombre de dies en què la temperatura màxima és més gran o igual a 25°C. El seu interès respon al fet que un augment del nombre de dies d'estiu pot tenir un impacte negatiu sobre la salut humana, l'agricultura i la biodiversitat, on en entorns de muntanya com Andorra, les temperatures solen ser més baixes, i per tant, un augment dels dies d'estiu pot tenir un impacte especialment significatiu en els seus ecosistemes i les comunitats que en depenen.

En segon lloc, l'índex *Icing days (IDO)* mesura el nombre de dies en què la temperatura màxima és inferior a 0°C. Aquest índex és important perquè a Andorra la neu i el manteniment del seu gruix són recursos molt importants, i els canvis en la freqüència de les gelades poden tenir impactes greus en la hidrologia, l'agricultura i l'economia local derivada del turisme de neu

A continuació, l'índex *Cold days (TX10p)* mesura el percentatge de dies en què $T_x <$ percentil 10. La seva importància recau en el fet que en països de muntanya, on les temperatures acostumen a ser baixes, l'augment de dies freds pot afectar la qualitat del sòl, la productivitat agrícola i la distribució d'espècies animals i vegetals. Així doncs, pot tenir impactes significatius en la seguretat alimentària, l'economia i la salut del medi biòtic

Pel que fa a l'índex *Warm days (TX90p)*, aquest mesura el percentatge de dies en què $T_x >$ percentil 90, és a dir, els dies més calorosos de l'any. Aquest índex es important perquè les temperatures extremadament caloroses poden afectar la productivitat i qualitat dels cultius, i poden alterar els ecosistemes naturals, fet que alhora pot afectar la biodiversitat i la salut de les espècies del territori.

Finalment, el darrer índex analitzat correspon al *Warm speel duration index (WSDI)*, el qual mesura el nombre de dies en un any en què, com a mínim hi ha 6 dies consecutius amb $TX >$ percentil 90, és a dir, al nombre de dies anuals en què es registren altes temperatures i baixa humitat relativa de l'aire.

Aquest índex es clau, ja que les onades de calor, a part dels efectes comentats a l'índex anterior, poden afectar a la disponibilitat d'aigua, accelerant la fusió de la neu i poden fer augmentar el risc de malalties relacionades amb la calor, com la insolació. A més, les sequeres poden augmentar el risc d'incendis forestals i poden provocar que la baixa humitat relativa de l'aire contribueixi a la formació d'alts nivells de contaminants atmosfèrics, com l'ozó, que poden afectar la salut humana i la qualitat de l'aire, donant resposta amb el seu càlcul, a un dels objectius específics plantejats.

La taula 3 recull els diferents índex analitzats per la temperatura màxima, la seva definició i la unitat final amb la qual s'han calculat.

MAXIMUM TEMPERATURE (°C)			
Nº	Indices (ETCCDMI)	Meaning	Unit
X1	Summer days (SU25)	Annual count of days when TX (daily maximum temperature) > 25°C.	Days
X2	Icing days (ID0)	Annual count of days when TX (daily maximum temperature) < 0°C.	Days
X3	Cold days (TX10p)	Frequency of days when TX < 10th percentile	%
X4	Warm days (TX90p)	Frequency of days when TX > 90th percentile	%
X5	Warm speel duration index (WSDI)	Annual count of days with at least 6 consecutive days when TX > 90th percentile	Days

Taula 3. Categorització dels índex de temperatura màxima escollits. Elaboració pròpia a partir dels criteris establerts pel ETCCDMI (Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices).

5.4.2 Temperatura mínima

En primer lloc, s'analitza l'índex *Frost days (FD0)*, que mesura el nombre de dies per any en què la temperatura mínima diària és inferior a 0°C. Aquest índex és important perquè les gelades poden provocar greus danys a l'agricultura i la disponibilitat d'aigua a les zones de muntanya, ja que les gelades poden fer malbé els cultius i poden afectar el cicle hidrològic, en reduir la quantitat d'aigua disponible als rius.

En segon lloc, s'ha escollit l'índex *Tropical nights (TR20)*, el qual mesura el nombre de nits per any en què la temperatura mínima diària és superior a 20°C. Aquest índex és important perquè les nits tropicals poden tenir un impacte significatiu en la salut humana i la qualitat de vida de les persones que viuen en zones de muntanya, en poder fer augmentar el risc de malalties i alterar els ecosistemes dels que disposa.

A part, es un índex que fins al moment de l'elaboració d'aquest estudi, no s'ha registrat cap dada a Andorra. Així doncs, es interessant poder comprovar dependent del escenari socioeconòmic al que s'acabi arribant a finals de segle, si s'assolirà més d'un dia a l'any on la temperatura mínima sigui superior als 20°C.

A continuació, l'índex *Cold nights (TN10p)*, es refereix al nombre de nits per any en què la temperatura mínima diària es troba dins del 10% més fred de les temperatures mínimes diàries registrades del període de referència. Aquest índex és important perquè les nits fredes poden provocar greus problemes per la salut humana i la qualitat de vida de les persones d'Andorra, ja que obliguen a augmentar la temperatura de les llars i, per tant, fer augmentar la despesa de les famílies de manera molt notable. A part, les nits fredes poden propiciar l'aparició de malalties respiratòries i cardiovasculars, i per tant, perjudicar el benestar de la població.

Pel que fa a l'índex *Warm nights (TN90p)*, mesura el nombre de nits per any en què la temperatura mínima diària es troba dins del 10% més càlid de les temperatures mínimes diàries. Aquest índex és important perquè les nits càlides poden augmentar el risc de malalties relacionades amb la calor, com la deshidratació o empitjorar la qualitat del son i el benestar general.

Finalment, el darrer índex analitzat correspon al *Cold spell duration index (CSDI)*, el qual mesura el nombre de dies en un any en què, com a mínim hi ha 6 dies consecutius amb $TN < \text{percentil } 10$, és a dir, mesura la durada dels períodes de clima fred en un any. Aquest índex és important perquè les gelades poden disminuir la productivitat agrícola. A més, l'increment d'aquest índex podria requerir un augment en la demanda d'energia per a la calefacció, cosa que podria augmentar la dependència de combustibles fòssils i tenir un impacte negatiu en el medi ambient i en l'economia familiar.

La taula 4 recull els diferents índex analitzats per la temperatura mínima, la seva definició i la unitat final amb la qual s'han calculat.

MINIMUM TEMPERATURE (°C)			
Nº	Indices (ETCCDMI)	Meaning	Unit
X6	Frost days (FD0)	Annual count of days when TN (daily minimum temperature) < 0°C.	Days
X7	Tropical nights (TR20)	Annual count of days when TN (daily minimum temperature) > 20°C.	Days
X8	Cold nights (TN10p)	Frequency of days when TN < 10th percentile	%
X9	Warm nights (TN90p)	Frequency of days when TN > 90th percentile	%
X10	Cold spell duration index (CSDI)	Annual count of days with at least 6 consecutive days when TN < 10th percentile	Days

Taula 4. Categorització dels índex de temperatura mínima escollits. Elaboració pròpia a partir dels criteris establerts pel ETCCDMI (Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices).

5.4.3 Precipitació

El Pirineu, i per extensió Andorra, està caracteritzat per ser una àrea d'elevada variabilitat espacio-temporal pluviomètrica degut a la seva situació geogràfica i la seva complexa orografia (Lemus-Canovas *et al.*, 2021), per la qual cosa es d'especial d'interès poder analitzar el comportament futur d'aquesta variable. A continuació s'exposaran els índex calculats.

En primer lloc, s'analitza l'índex *Days when PRCP \geq 10mm (R10)*, que mostra el nombre de dies en què la precipitació supera els 10 mm. L'augment en la freqüència i la magnitud dels esdeveniments de precipitació és una de les conseqüències del canvi climàtic que s'espera que afecti moltes regions del món, incloent-hi les zones muntanyoses. Això pot tenir impactes significatius en l'erosió del terra, la qualitat de l'aigua i les infraestructures d'un país de muntanya com Andorra. Per tant, el càlcul d'aquest índex és important per avaluar i prevenir riscos d'inundacions i altres perills associats a esdeveniments extrems de precipitació i per prendre mesures d'adaptació adequades per reduir aquests riscos.

A continuació, s'analitza l'índex *Days when PRCP \geq 20mm (R20)*, que mostra el nombre de dies en què la precipitació supera els 20 mm. Aquest índex és particularment important perquè la precipitació d'alta intensitat pot provocar lliscaments de terra i altres desastres naturals a les zones muntanyoses, cosa que pot tenir un impacte significatiu en la seguretat de les persones. Per tant, el càlcul d'aquest índex és essencial per prevenir riscos associats a esdeveniments extrems de precipitació.

Finalment, el darrer índex analitzat *Annual total PRCP when RR > 95p (R95p)*, es refereix a la quantitat total de precipitació que cau els dies més plujosos de l'any. El càlcul d'aquest índex es important per avaluar els riscos d'inundacions i altres perills associats a esdeveniments extrems de precipitació. A més, l'augment en la precipitació els dies més plujosos de l'any també pot tenir impactes significatius en l'agricultura i la ramaderia, cosa que fa que aquest índex sigui important per a l'avaluació dels riscos en aquests sectors.

La taula 5 recull els diferents índex de precipitació analitzats, la seva definició i la unitat final amb la qual s'han calculat.

PRECIPITATION (mm/day)			
Nº	Indices (ETCCDMI)	Meaning	Unit
X11	Days when PRCP \geq 10mm (R10)	Annual count of days when PRCP \geq 10mm (R10)	Days
X12	Days when PRCP \geq 20mm (R20)	Annual count of days when PRCP \geq 20mm (R20)	Days
X13	PRCP when RR > 95p (R95p)	Annual total PRCP when RR > 95p (R95p)	mm

Taula 5. Categorització dels índex de precipitació escollits. Elaboració pròpia a partir dels criteris establerts pel ETCCDMI (Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices).

5.5 Obtenció d'estadístics descriptius

Pel que fa a la darrera fase del treball, s'exposa la metodologia seguida per a l'obtenció de diferents estadístics descriptius i la definició dels criteris que segueixen. En aquesta fase s'explica el procés realitzat fins a obtenir els diagrames de caixa (Boxplots), els quals permeten visualitzar, a través dels quartils, com és la distribució, el seu grau d'asimetria, els valors extrems o la posició de la mitjana entre d'altres, tenint en compte que el valor mínim i màxim s'han fixat prèviament del nostre arxiu de dades.

Tal com s'ha introduït anteriorment, a l'hora de realitzar el procés de generació d'aquests estadístics, el primer i tercer quartil, han estat substituïts pels percentils 17 i 83 respectivament, rang utilitzat també per altres autors (Jacob *et al.*, 2014; Amblar-Francés, *et al.*, 2020).

En aquest cas, s'ha realitzat el càlcul i generació dels gràfics corresponents als estadístics per les variables de temperatura màxima, tempera mínima, temperatura mitjana i precipitació del conjunt d'Andorra i complint amb l'objectiu d'establir una sectorització altitudinal, també s'ha realitzat el càlcul d'aquests estadístics segons si es troben a fons de vall (< 2000 metres) o a alta muntanya (> 2000 metres).

Si ens centrem en la descripció d'aquests, els horitzons de pronòstic que s'han elegit segueixen els criteris marcats pel sisè informe de l'IPCC (IPCC, 2023). Aquests horitzons s'han dividit de la següent manera: període històric de referència (1986-2005), curt termini (2021-2040), mitjà termini (2041-2060) i llarg termini (2081-2100) pels escenaris RCP4.5 i RCP8.5.

A part, el gràfic corresponent d'aquests *boxplots* pel conjunt d'Andorra, s'ha acompanyat d'una taula que analitza 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, és a dir, els corresponents al primer i tercer quartil i finalment dels percentils 17 i 83, en ser els intervals on es trobarien el 66% de les projeccions situades al voltant de la mitjana (en una distribució gaussiana el 68 % dels casos es troben en un interval +/- sigma a torn del valor mitjà) (Amblar *et al.*, 2017).

Quelcom que considero d'interès destacar, recau en el fet que els diagrames de caixa de la precipitació no tenen en compte l'horitzó referent al període històric, fet lògic si tenim en compte que el període històric de referència (1986-2005), com el seu propi nom indica no té un valor de referència i per tant, no es pot calcular la seva anomalia.

Finalment, a l'hora de realitzar el procés per arribar a generar aquests estadístics descriptius, s'ha seguit una metodologia similar a la seguida en les altres dues fases del present estudi, on s'ha utilitzat el software RStudio per tractar cada arxiu rds segons la variable que li correspon i acabar generant gràfics en valor absolut pel cas de la temperatura i segons l'anomalia (%) en el cas de la precipitació, en tenir dades en mm/dia. El procediment derivat s'exposarà dins el primer punt de l'anàlisi de resultats, corresponent a l'anàlisi de l'evolució de les anomalies tèrmiques i pluviomètriques per a cada variable analitzada.

6. Resultats

En aquest apartat, s'aborda l'anàlisi de les projeccions de canvi climàtic desenvolupades al Principat d'Andorra, posant especial èmfasi en el càlcul d'anomalies de temperatura màxima, temperatura mínima i precipitació. Els resultats es presenten pel període d'estudi 2006-2100 a través dels escenaris d'emissions RCP4.5 i RCP8.5 del projecte CMIP5 pel segle XXI, on s'ha utilitzat l'experiment HISTORICAL, com a període de referència (1986-2005).

Els resultats s'estructuren en dos blocs. Per començar, es realitza l'estudi de l'evolució de la temperatura i precipitació, anual i estacional, dels valors mitjans anuals dels models climàtics per cada escenari, així com el càlcul de les seves anomalies mitjançant diagrames de caixes (boxplots), on s'exposen els resultats dels diferents índex climàtics calculats. En definitiva, s'introdueixen els resultats derivats de l'execució de tots els passos exposats anteriorment a l'apartat metodològic, i de la recerca d'informació relacionada amb el present treball.

Encara així, i abans de començar amb l'anàlisi dels resultats d'aquest estudi, tal com hem introduït al punt 2.2 del treball, s'ha de tenir present el fet que les principals fonts d'incertesa són els forçaments naturals, les emissions de GEH, les seves concentracions, els aerosols, els models globals i les tècniques downscaling, ja que aquestes es van acumulant en cada pas del procés de regionalització estadística. Per tant, a l'hora d'avaluar els resultats que s'exposin en aquest estudi, 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.

6.1 Anàlisi de l'evolució d'anomalies tèrmiques i pluviomètriques

6.1.1 Temperatura màxima

En el cas d'Andorra, el valor mitjà de la temperatura màxima anual mostra un augment progressiu al llarg del S. XXI sota tots els escenaris analitzats, sent molt significatiu a finals de segle i sota l'escenari RCP8.5 (Fig. 8). Fins aproximadament la primera meitat del segle, l'elecció de l'escenari RCP té un impacte menor 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 l'escenari menys emissiu (RCP4.5). Tal com va remarcar l'IPCC l'any 2013: "Els canvis projectats de la temperatura màxima futura sota diferents escenaris d'emissió indiquen un patró d'escalfament a gran escala sobre Europa que s'intensifica al llarg del segle XXI". Així doncs, sigui quin sigui l'escenari considerat, l'augment de la temperatura màxima es una realitat que s'ha d'afrontar.

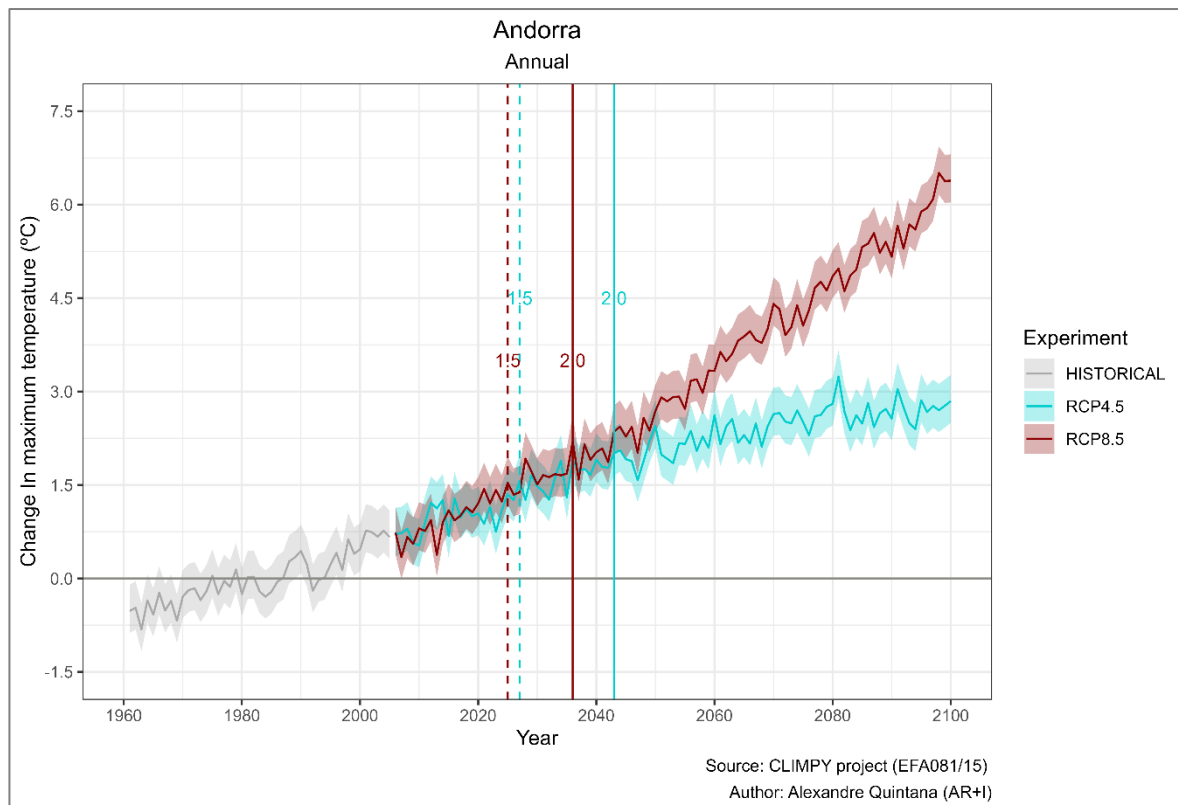


Figura 8. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura màxima diària (°C) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

La projecció generada de la temperatura màxima, mostra un augment progressiu d'aquesta variable durant aquest segle més ràpid per a l'escenari RCP8.5 i més lent per a l'escenari menys emissiu. A finals de segle, l'impacte de l'escenari RCP4.5 en la variació del valor mitjà de temperatura màxima serà d'uns 3 °C aproximadament, mentre que per l'escenari més emissiu, les variacions estarien compreses entre 4.5 °C i 6.4 °C a finals de segle, és a dir, un augment molt marcat respecte el període de referència.

Els rangs amb valors més baixos corresponen als escenaris on el seu pic d'emissions es produeix abans de l'any 2100, augmentant a mesura que aquest pic es desplaça cap al futur. La magnitud d'aquests rangs dona informació sobre la incertesa associada als models globals utilitzats (Taula 2), la qual va augmentant amb l'abast de la projecció.

Així doncs, es pot respondre a l'objectiu de saber quan s'assoliran l'1.5 i 2.0 graus d'increment de temperatura als escenaris RCP4.5 i RCP8.5. D'una banda, l'escenari menys emissiu assolirà el grau i mig i els dos graus d'increment de temperatura l'any 2027 i 2043 respectivament. D'altra banda, l'escenari més emissiu, assolirà aquests increments de temperatura l'any 2025 i 2036 respectivament.

Això demostra el que s'ha comentat amb anterioritat, és a dir, que l'augment progressiu de les temperatures màximes durant aquest segle es més ràpid per l'escenari RCP8.5 que per l'escenari RCP4.5, provocant com es lògic, que s'assoleixen els 2 graus d'increment en l'escenari més emissiu.

Centrant-nos en el comportament estacional, la figura 9 ens mostra l'evolució que ha experimentat la temperatura màxima a nivell estacional, on l'increment és més gran a l'estiu, destacant així la sensibilitat específica dels territoris de muntanya davant les condicions climàtiques globals (Amblar-Francés *et al.*, 2020).

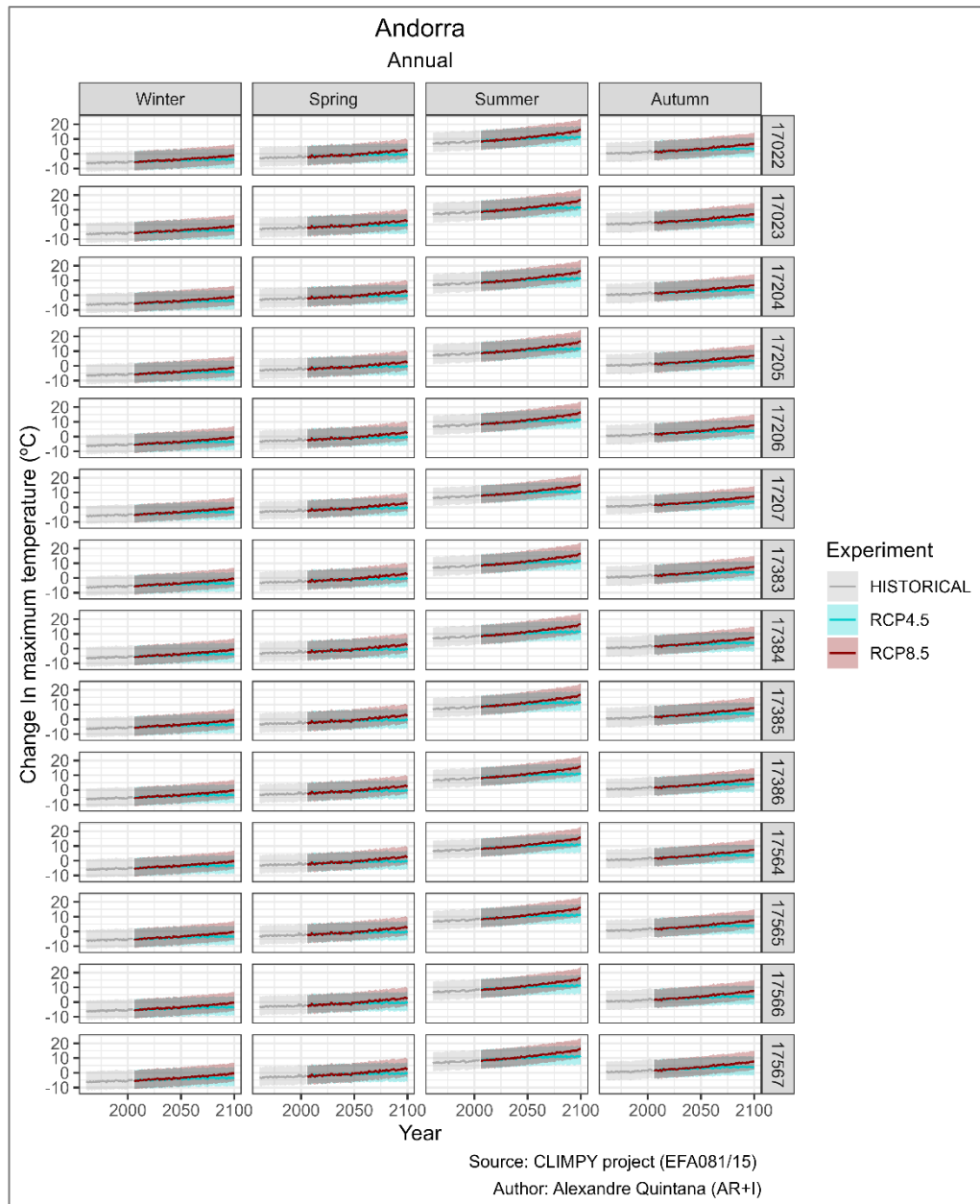


Figura 9. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura màxima diària (°C) estacional segons cada punt del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

Així doncs, tant l'hivern com la primavera segueixen una tendència similar entre els diferents punts del territori, amb increments poc destacats a finals del segle XXI, on l'estiu i la tardor son les estacions amb increments més grans de temperatura màxima. L'increment destacat d'aquestes dues estacions, conduirà als increments en els valors mitjans d'aquesta variable, provocant que la incertesa més gran estigui marcada en el cas de l'estiu i la tardor.

A continuació, per acabar amb l'anàlisi d'aquesta variable, s'exposa la sectorització altitudinal dels punts del territori segons si es troben a fons de vall (< 2000 metres) o a alta muntanya (> 2000 metres), tal com es pot veure amb les figures 10 i 11 respectivament, on a més, s'ha realitzat un procés previ per nombrar cada punt del territori segons la localització geogràfica (parroquial) on es troba ubicat dins el territori i la seva altitud.

Pel que fa a l'anàlisi altitudinal d'aquesta variable, i tal com remarca Trapero (2021): "la importància del gradient vertical en un territori de muntanya com Andorra es de vital importància. Principalment, a causa de l'efecte regional de la variació latitudinal, que implica un augment de la temperatura de nord a sud per zones amb la mateix altitud".

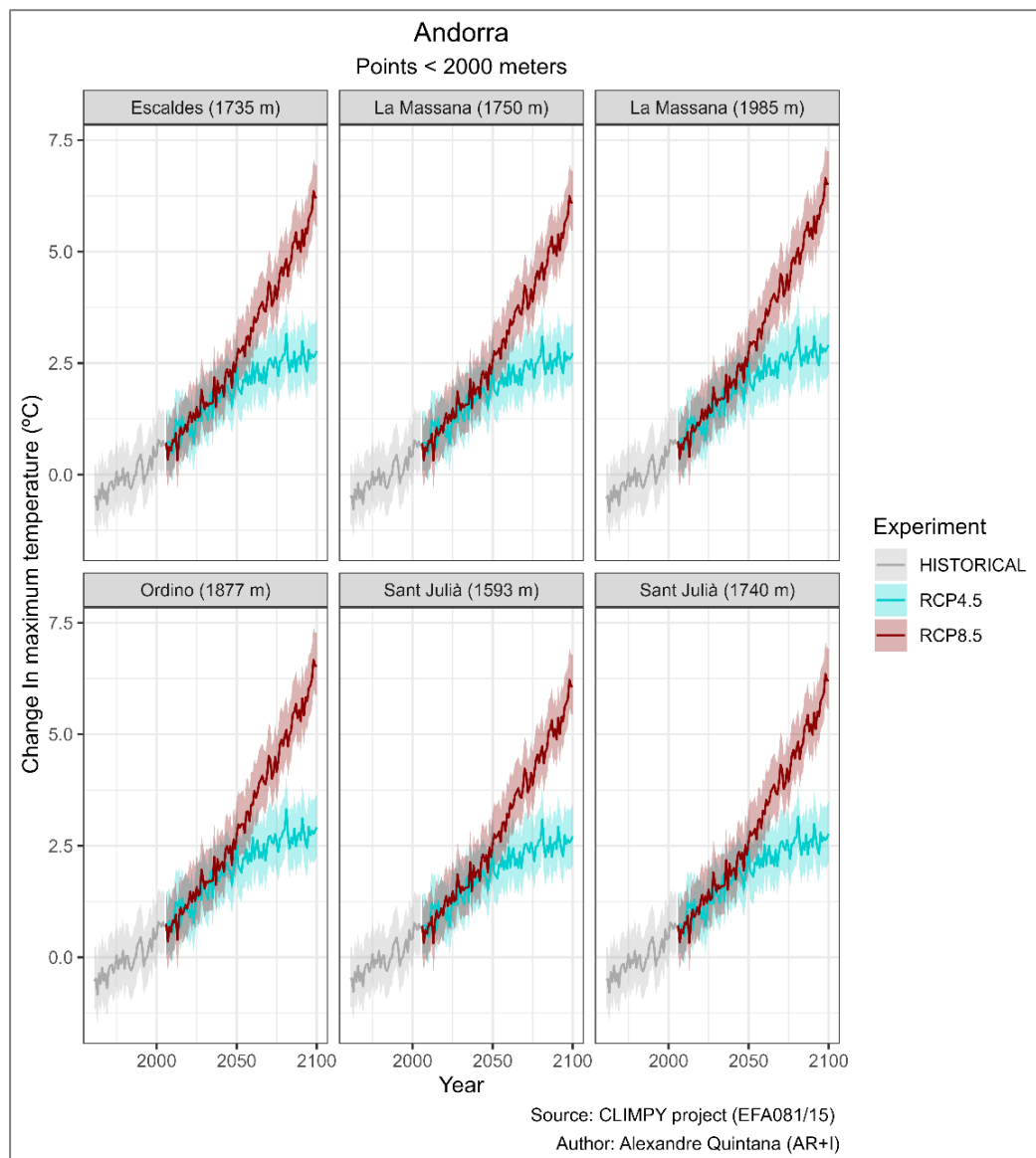


Figura 10. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura màxima diària (°C) a partir de la sectorització altitudinal dels diferents punts del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

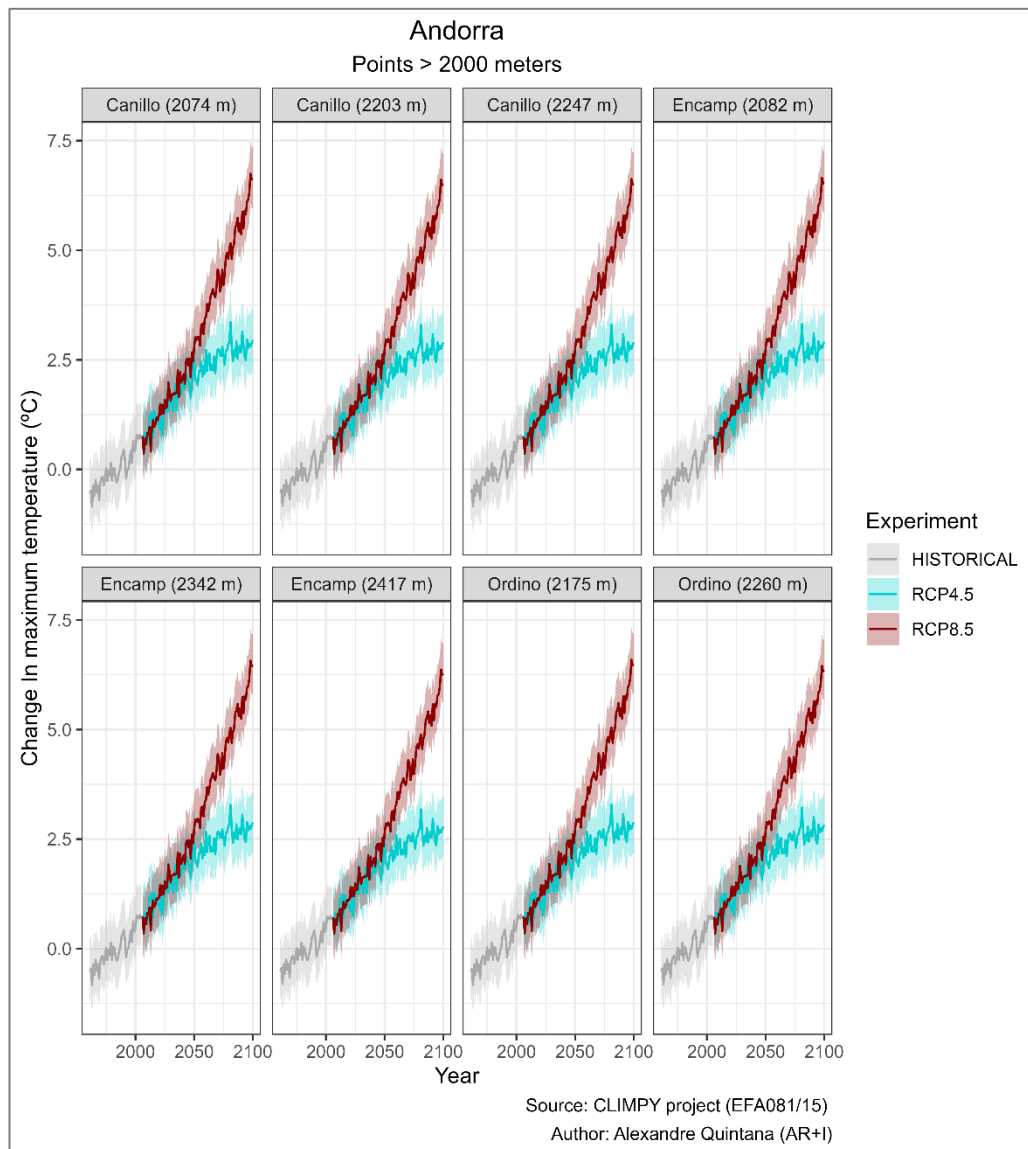


Figura 11. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura màxima diària (°C) a partir de la sectorització altitudinal dels diferents punts del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

Un cop exposades les figures 10 i 11, es pot observar com els punts localitzats a les parròquies situades a l'extrem sud del territori i la vall central (Sant Julià de Lòria i Escaldes-Engordany) son aquells de menys altitud i on, l'evolució de la temperatura màxima es lleugerament menor respecte els punts situats a alta muntanya, com es el cas d'aquells situats a Encamp i Canillo.

A més a més, cal recordar que al avançar cap al nord, apareix progressivament el clima continental, amb hiverns freds i estius temperats que provoquen que les temperatures màximes siguin menors a les registrades a fons de vall. Això indica que es pot arribar a produir un canvi de tendència a finals del S. XXI que redueixi aquesta diferenciació.

Encara així, l'evolució de la temperatura màxima anual entre els punts situats a fons de vall (Fig. 15) i els situats a alta muntanya (Fig. 16) es molt similar, indicant així una tendència positiva (d'increment) entre els diferents punts del territori.

En definitiva, l'increment de la temperatura màxima es molt semblant als 14 punts del territori analitzats i no permet establir una diferenciació clara a escala altitudinal. Això queda clar si comparem el punt més alt analitzat (Encamp, 2417 metres) amb el més baix (Sant Julià, 1593 metres), on la diferenciació en l'increment progressiu de la temperatura màxima anual registrada es molt similar, deixant clar com la tendència en l'augment de temperatura màxima diària al llarg d'aquest segle per tots els punts analitzats condueix a increments del seu valor mitjà anual per a finals de segle respecte als valors mitjans del període de referència.

Un cop s'han exposat els resultats gràfics corresponents a l'anàlisi evolutiu de la temperatura màxima, ja podem comentar els resultats corresponents a l'obtenció de l'estadístic descriptiu corresponen a aquesta variable, realitzat a partir d'un diagrama de caixa (*Boxplot*). Aquest permetrà visualitzar a través dels quartils, diferent informació d'interès per l'anàlisi d'aquesta variable, tenint en compte que el valor mínim i màxim, com s'ha indicat a la metodologia, s'ha fixat prèviament (17 i 83 respectivament).

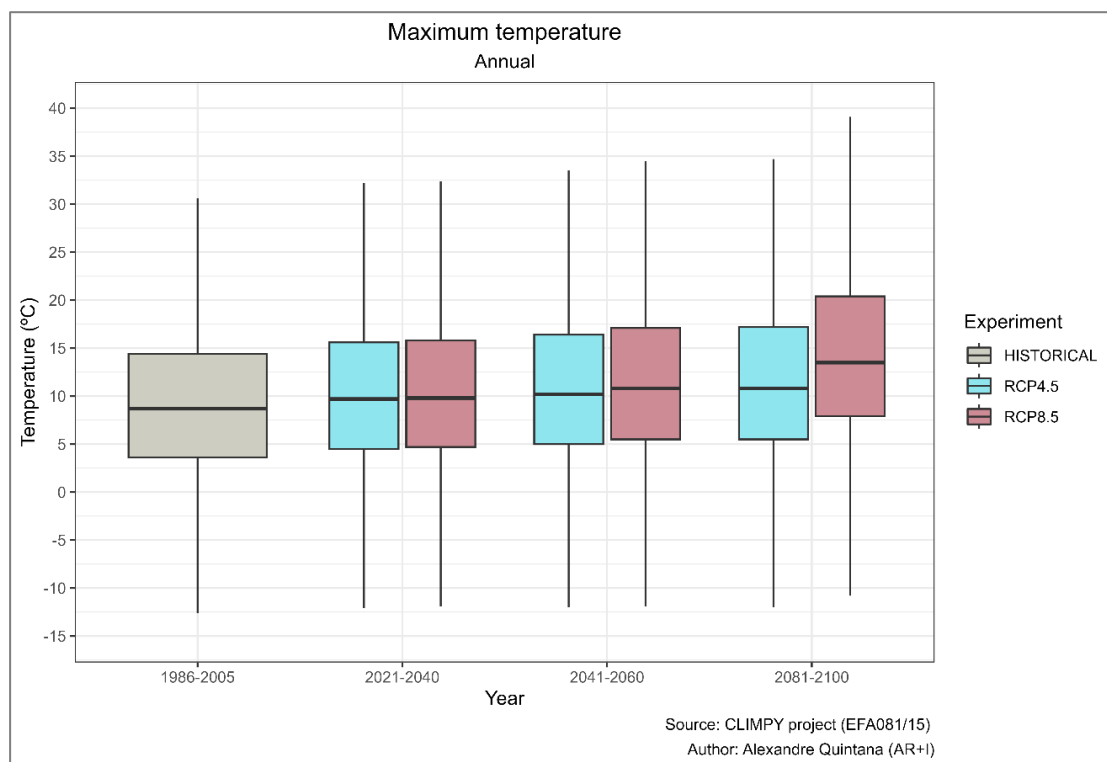


Figura 12. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura màxima diària (°C) al Principat d'Andorra a través d'un Boxplot per a cadascun dels RCP analitzats. Els horitzons de pronòstic que s'han elegit segueixen els criteris marcats pel sisè informe de l'IPCC (IPCC, 2023).

En el diagrama de caixa anterior es pot observar com el rang interquartílic varia a mesura que s'avança en els període IPCC corresponents, ja que els valors del primer i tercer quartil varien segons el període escollit, seguint així una tendència d'increment, que com s'ha comentat amb les figures anteriors es diferenciada entre ambdós escenaris, on el més emissiu, cada cop que avancem en el temps té un increment major respecte l'escenari RCP4.5, el qual malgrat incrementar en cada període, ho fa de manera molt més estable. També considero important destacar que al codi s'han descartat els valors atípics (outliers), és a dir, aquells punts que estan mas enllà del límit inferior o superior.

Maximum temperature (°C)				
Period IPCC	Scenario	Median	P25 / P75	P17 / P83
Near Term (2021 - 2040)	RCP4.5	9.7	4.5 / 15.6	2.6 / 17.8
	RCP8.5	9.8	4.7 / 15.8	2.8 / 18.0
Medium Term (2041 - 2060)	RCP4.5	10.2	5.0 / 16.4	3.0 / 18.7
	RCP8.5	10.8	5.5 / 17.1	3.5 / 19.4
Long Term (2081 - 2100)	RCP4.5	10.8	5.5 / 17.2	3.5 / 19.5
	RCP8.5	13.5	7.9 / 20.4	5.8 / 22.9

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. Elaboració pròpia a partir dels criteris marcats pel sisè informe de l'IPCC (IPCC, 2023)

Un cop realitzat un resum genèric del diagrama, aquest anàlisi s'ha acompanyat d'una taula que analitza 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, els quals corresponen al primer i tercer quartil, tal com s'ha especificat a la metodologia (Amblar *et al.*, 2017).

Pel que fa al primer període (2021 – 2040), es pot observar una tendència força estable entre els dos escenaris, ja que els valors de la mediana i dels percentils calculats es molt similar, patint una variació de 0,2 en favor de l'escenari més emissor pel que fa als percentils.

Si ens centrem en el període a mig termini (2041 – 2060), s'observa un augment destacat en el cas de l'escenari més emissor, en situar el valor de la mediana gairebé un punt per sobre que l'anterior període, així com els percentils 75 i 83. Pel que fa l'escenari menys emissor, presenta un increment més moderat, encara que destacat, en superar en més de mig punt els valors de l'anterior període.

El darrer període analitzat, és el referent a llarg termini (2081 – 2100). Aquest manté la mateixa tendència respecte l'escenari RCP4.5 d'increment moderat, en no arribar-se a incrementar ni la mediana ni els valors dels percentils en més d'un punt. D'altra banda, l'escenari més emissor, presenta l'increment més accentuat, en augmentar aproximadament 3 punts tant el valor de la mediana com el dels percentils calculats.

Finalment, considero que amb el càlcul del *Boxplot*, s'han pogut identificar tendències i patrons referents a la temperatura màxima, on a mesura que s'avança en el temps i en el període estudiat, l'increment ha sigut constant, destacant-hi els canvis significatius que l'escenari RCP8.5 experimenta. En conjunt, tal com corrobora clarament la figura 8, la temperatura màxima presenta una tendència ascendent respecte el període de referència que varia segons l'escenari escollit.

6.1.2 Temperatura mínima

Un cop s'ha analitzat la temperatura màxima, la projecció generada pels mètodes de regionalització estadística mostra un augment progressiu de les temperatures mínimes al llarg del segle, amb un increment més ràpid i pronunciat per l'escenari RCP8.5 i més lent i estable per a l'escenari RCP4.5 (Fig.13). Aquest augment però, és menor que l'observat en el cas de les temperatures màximes.

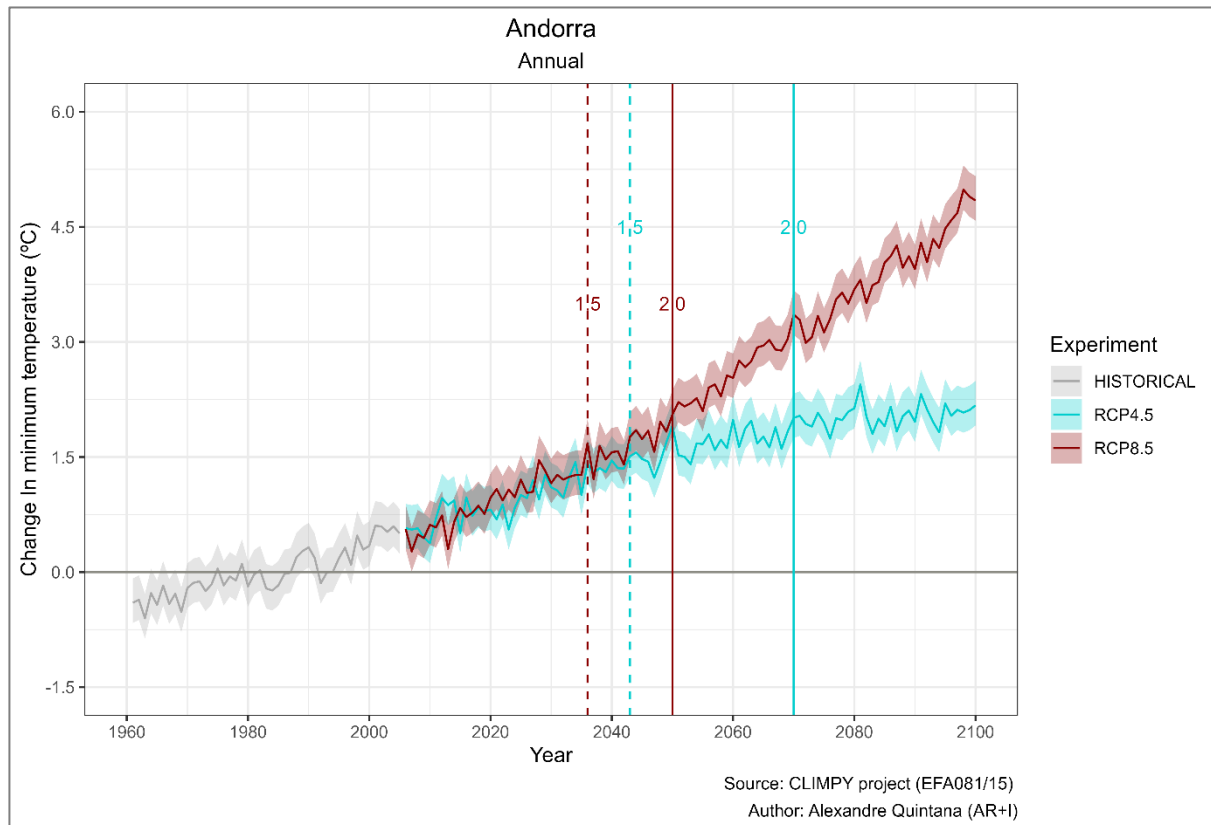


Figura 13. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura mínima diària (°C) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

Les projeccions generades mostren a finals de segle com l'impacte de l'escenari RCP4.5 en la variació del valor mitjà anual de temperatura mínima no superaria els 2.2 °C respecte el període de referència. Pel que fa a l'escenari més emissiu, les variacions estarien compreses entre 3.7 °C i 5.0 °C a finals de segle, és a dir, un augment molt marcat respecte el període de referència, especialment pel que fa a les dues darreres dècades, on es superarien els 4.5 °C d'increment.

Com succeïa en el cas de la temperatura màxima, els augments sota l'escenari més emissiu (RCP8.5) es diferencien clarament de l'augment de l'altre escenari, amb increments anuals majors i molt destacats respecte l'escenari RCP4.5, on s'observa una estabilitat en l'increment de la temperatura mínima d'entre 1.5 °C i 2.2 °C a partir de la dècada de 2060, mostrant petites oscil·lacions d'increment en anys aïllats.

Així doncs, i tal com s’ha fet amb la variable anterior, es pot respondre a l’objectiu de saber quan s’assoliran l’1.5 i 2.0 graus d’increment de temperatura mínima segons els escenaris RCP4.5 i RCP8.5. D’una banda, l’escenari menys emissiu assolirà el grau i mig i els dos graus d’increment de temperatura l’any 2043 i 2070 respectivament. D’altra banda, l’escenari més emissiu assolirà aquest increment de temperatura l’any 2036 i 2050 respectivament.

Si es compara amb la temperatura màxima, s’aprecia com l’increment de la temperatura mínima es menor, ja que s’arriba al grau i mig i dos graus per sobre el període de referència més tard que en la temperatura màxima (2027 i 2043) pel escenari menys emissiu i (2025 i 2036) pel escenari més emissiu.

Centrant-nos en el comportament estacional, la figura 14 mostra l’evolució que ha experimentat la temperatura mínima a nivell estacional, la qual segueix una tendència força similar a l’exposada anteriorment per la temperatura màxima

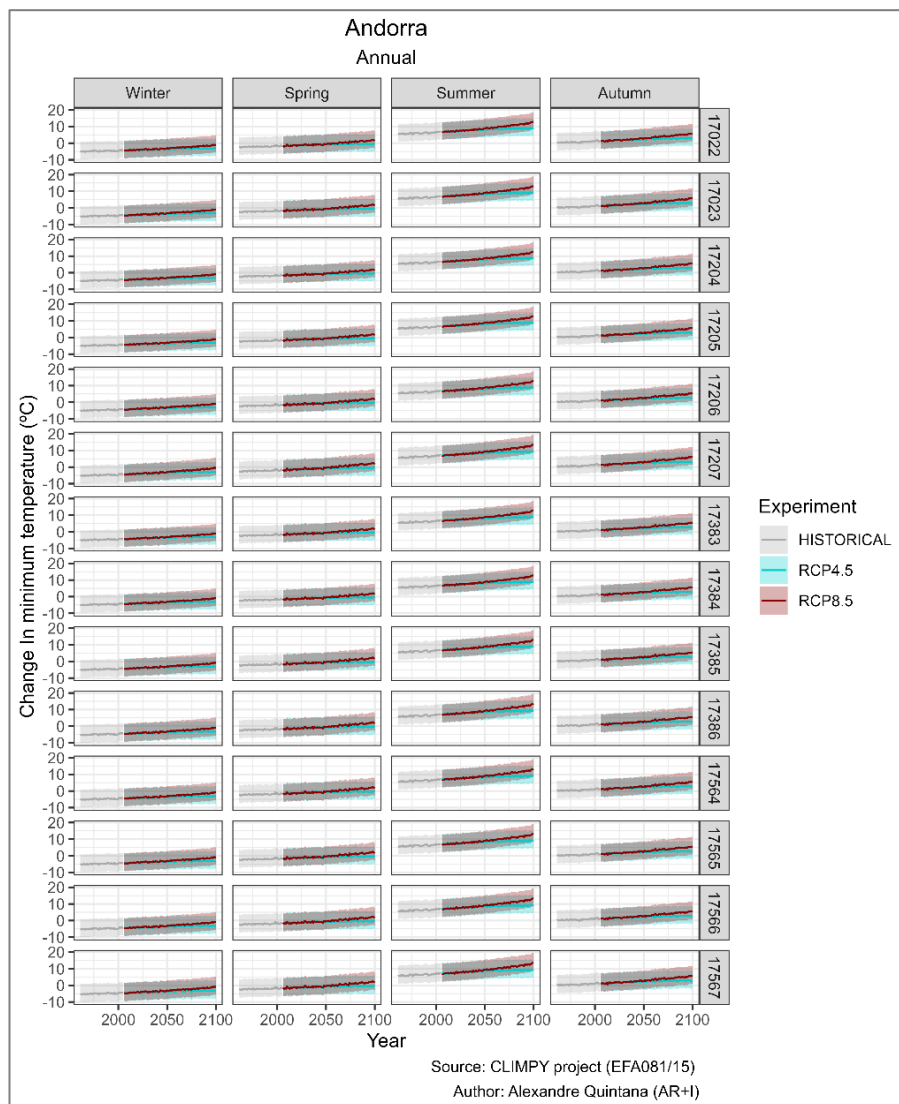


Figura 14. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura mínima diària (°C) estacional segons cada punt del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l’ombra representa els percentils 17 i 83.

Així doncs, l'hivern i la primavera segueixen una tendència bastant homogènia entre els diferents punts del territori, amb increments similars a finals del segle XXI.

Tot i això, i com passava amb la temperatura màxima, a l'estiu es produeix la major variació de temperatura amb una diferenciació entre escenaris més destacada, fenomen que en menor proporció també trobem a la tardor, esdevenint així, les dues estacions amb increments més grans de temperatura mínima respecte el període de referència. En definitiva, amb major o menor proporció en totes les estacions es produeix un augment del valor mitjà anual de la temperatura mínima diària.

A continuació, es realitza la sectorització altitudinal dels punts del territori segons si es troben a fons de vall (< 2000 metres) o a alta muntanya (> 2000 metres) per poder analitzar si el comportament altitudinal de la temperatura mínima entre els diferents punts del territori es homogeni o manté una tendència d'increment que determini que un dels dos sectors pateix variacions, tal com es pot veure amb les figures 15 i 16 respectivament.

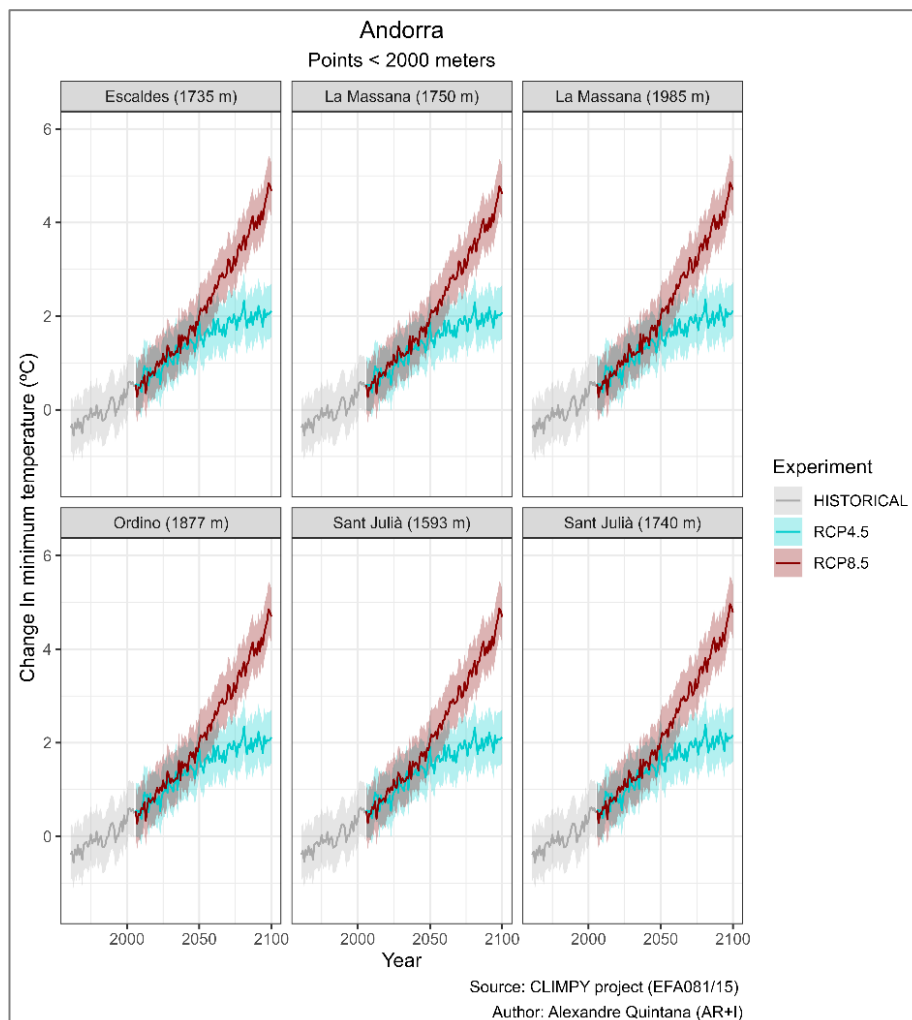


Figura 15. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura mínima diària (°C) a partir de la sectorització altitudinal dels diferents punts del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

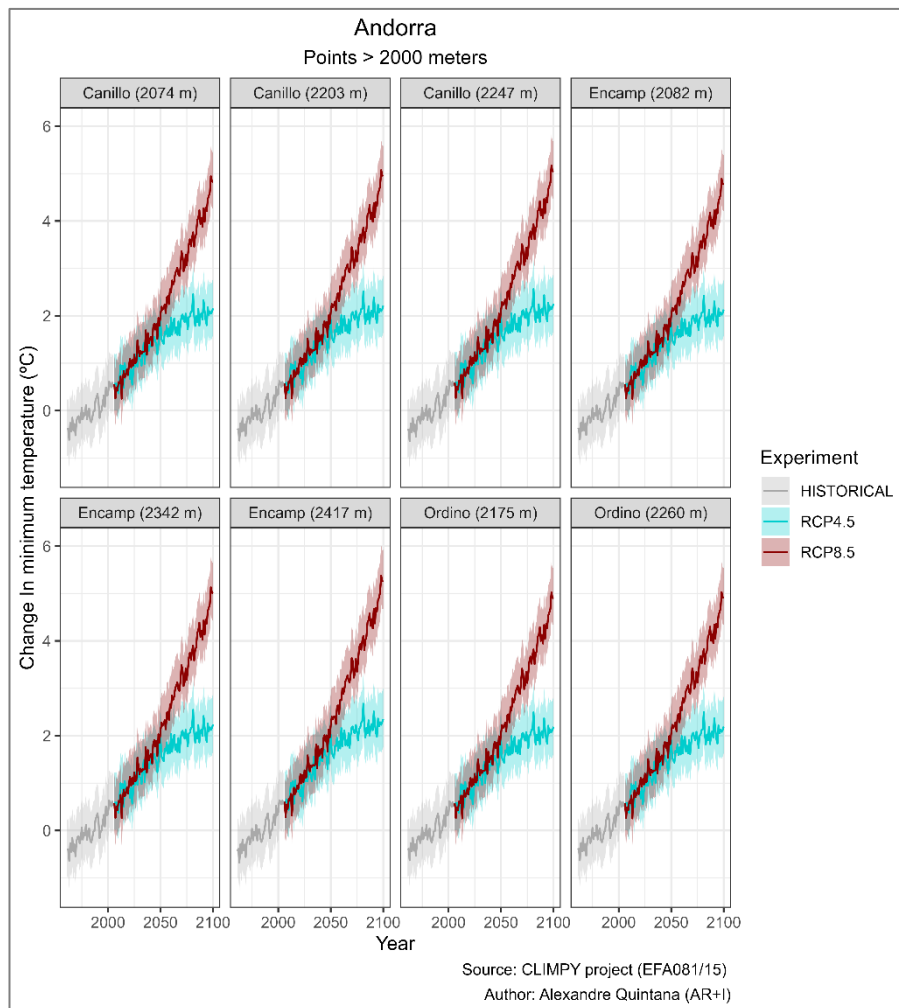


Figura 16. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura mínima diària (°C) a partir de la sectorització altitudinal dels diferents punts del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

A partir de les dues figures anteriors es pot observar com la gran majoria dels punts situats a menys de 2000 metres (localitzats a l'extrem sud i vall central del territori), tenen una evolució de la temperatura mínima lleugerament menor respecte els punts situats a alta muntanya, i com aquesta diferenciació s'accentua a mesura que puja l'altitud on es troba el punt al territori, augmentant així de manera més accentuada la temperatura mínima en els punts situats a major altitud.

La variació tèrmica dels punts situats al nord del territori es deu a que veuen reduïda la influència del clima continental, amb hiverns i estius més càlids, provocant aquesta tendència

Encara així, l'evolució de la temperatura mínima anual que es produeix entre els punts situats a fons de vall (Fig. 15) i els situats a alta muntanya (Fig. 16) torna a ser molt similar, indicant així la mateixa tendència positiva entre els diferents punts del territori, essent aquesta molt elevada i diferenciada entre l'escenari més i menys emissiu.

En definitiva, en l'increment de la temperatura mínima als 14 punts del territori i com s'ha comentat anteriorment, no es pot establir una diferenciació clara a escala altitudinal. Cal destacar però, que l'increment d'aquesta variable a fons de vall i alta muntanya es més diferenciada que en el cas de la temperatura màxima, on la seva diferenciació era menor.

Encara així, es deixa clar que la tendència en l'augment de temperatura mínima diària al llarg d'aquest segle per tots els punts analitzats, condueix a increments del seu valor mitjà anual a finals de segle respecte els valors mitjans del període de referència.

Un cop s'han exposat els resultats gràfics corresponents a l'anàlisi evolutiu de la temperatura mínima, ja podem comentar els resultat corresponent a l'obtenció d'estadístics descriptius, en concret del diagrama de caixa (Boxplot) d'aquesta variable. Això permetrà visualitzar a través dels quartils, diferent informació d'interès per l'anàlisi d'aquesta variable.

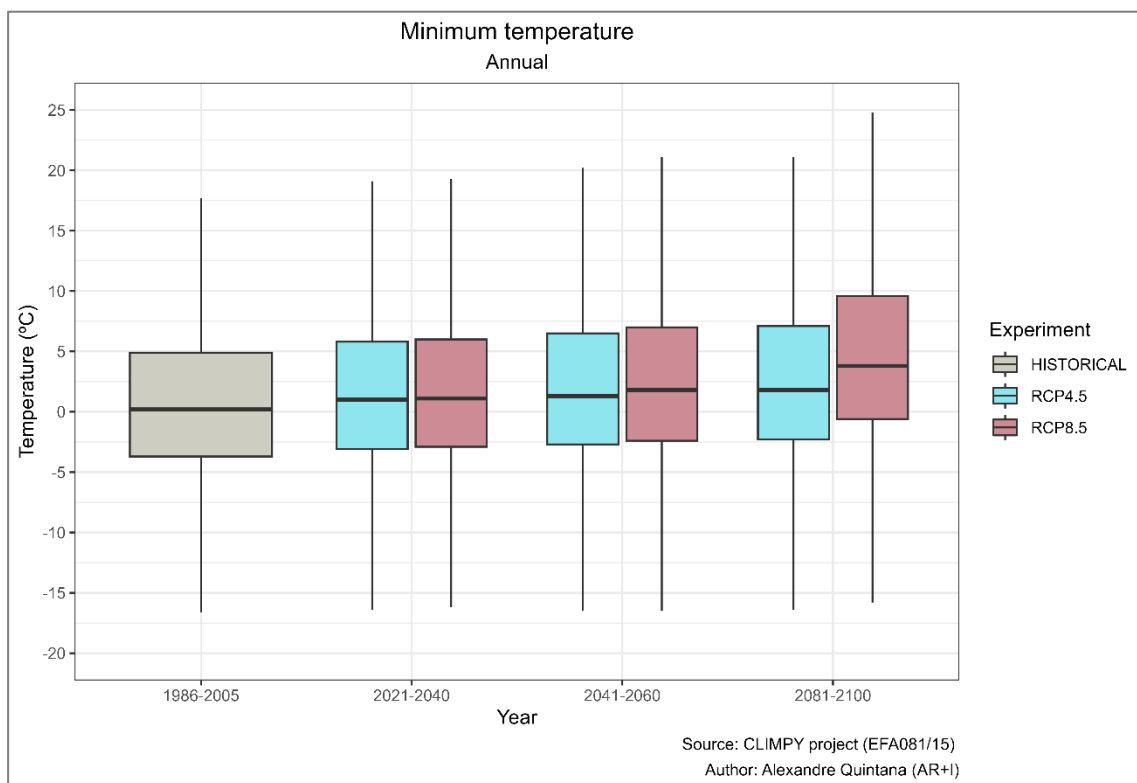


Figura 17. Evolució del Valor Mitjà Anual de la Temperatura Mínima Diària (°C) al Principat d'Andorra a través d'un Boxplot per a cadascun dels RCP analitzats. Els horitzons de pronòstic que s'han elegit segueixen els criteris marcats pel sisè informe de l'IPCC (IPCC, 2023).

En el diagrama de caixa anterior podem observar com el rang interquartílic varia a mesura que avancem en els període IPCC corresponents, ja que els valors del primer i tercer quartil varien segons el període escollit, seguint així una tendència d'increment que com s'ha comentat amb el diagrama anterior es força diferenciada entre ambdós escenaris, on el més emissiu, cada cop que avancem en el temps té un increment major respecte l'escenari RCP4.5, el qual malgrat incrementar en cada període, es manté de manera molt més estable.

Minimum temperature (°C)				
Period IPCC	Scenario	Median	P25 / P75	P17 / P83
Near Term (2021 - 2040)	RCP45	1.0	-3.1 / 5.8	-4.5 / 7.7
	RCP85	1.1	-2.9 / 6.0	-4.3 / 7.9
Medium Term (2041 - 2060)	RCP45	1.3	-2.7 / 6.5	-4.2 / 8.3
	RCP85	1.8	-2.4 / 7.0	-3.9 / 9.0
Long Term (2081 - 2100)	RCP45	1.8	-2.3 / 7.1	-3.8 / 9.0
	RCP85	3.8	-0.6 / 9.6	-2.2 / 11.7

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. Elaboració pròpia a partir dels criteris marcats pel sisè informe de l'IPCC (IPCC, 2023)

Un cop realitzat un resum genèric del diagrama, podem observar a través de la taula 7 cada horitzó de pronòstic, els escenaris d'emissió (RCP4.5 i RCP8.5), el valor de la mediana i dels percentils corresponents.

Pel que fa al primer període (2021 – 2040), s'observa exactament la mateixa tendència que en el cas de la variable anterior, en disposar d'una tendència força estable entre els dos escenaris, ja que els valors de la mediana i els percentils calculats son molt similars, amb una reducció de 0.2 en favor de l'escenari més emissiu pel que fa als percentils 17 i 25. La diferència recau en el fet que els percentils més elevats (75 i 83) es veuen augmentats en la mateixa proporció.

Si ens centrem en el període 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 punt els valors de l'anterior període, on els percentils més grans segueixen la tendència d'increment anterior.

El darrer període analitzat, és a llarg termini (2081 – 2100). Aquest manté la mateixa tendència respecte l'escenari RCP4.5 d'increment moderat, en no arribar-se a incrementar ni la mediana ni els valors dels percentils en més d'un punt. D'altra banda, l'escenari més emissiu presenta l'increment més accentuat respecte el període de referència, en reduir-se al voltant de 2 punts tant el valor de la mediana com el dels percentils 17 i 25. Els percentils més elevats es veuen incrementat en gairebé 3 punts.

Finalment, considero que s'han pogut identificar tendències i patrons referents a la temperatura mínima destacat, els quals malgrat ser similars als de la variable anterior, presenten la particularitat de tenir una tendència oposada pel que fa al valor dels percentils més elevats. En conjunt però, tal com també demostra la figura 13, la temperatura mínima presenta una tendència d'increment respecte el període de referència.

6.1.3 Temperatura mitjana

Per tal d'acabar l'anàlisi referent a l'evolució de les anomalies tèrmiques, i un cop exposats els resultats de la temperatura màxima i mínima, ja es pot analitzar la temperatura mitjana, que com es lògic, segueix la mateixa tendència que les dues variables exposades anteriorment.

En concret, les projeccions generades pels mètodes de regionalització estadística mostren un augment progressiu de la temperatura mitjana al llarg del segle, amb un increment 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 (fig.18).

Aquest augment però, és menor que l'observat en el cas de les temperatures màximes i superior al de la temperatura mínima, en ser un valor promig d'ambdues variables. Encara així, s'assimila més als valors de temperatura mínima que no pas de temperatura màxima, tal com es pot observar si es fa la comparativa entre la figura 13 i la figura 18, on les valors de temperatura de l'eix Y son iguals que els adoptats en el càlcul de la temperatura mínima.

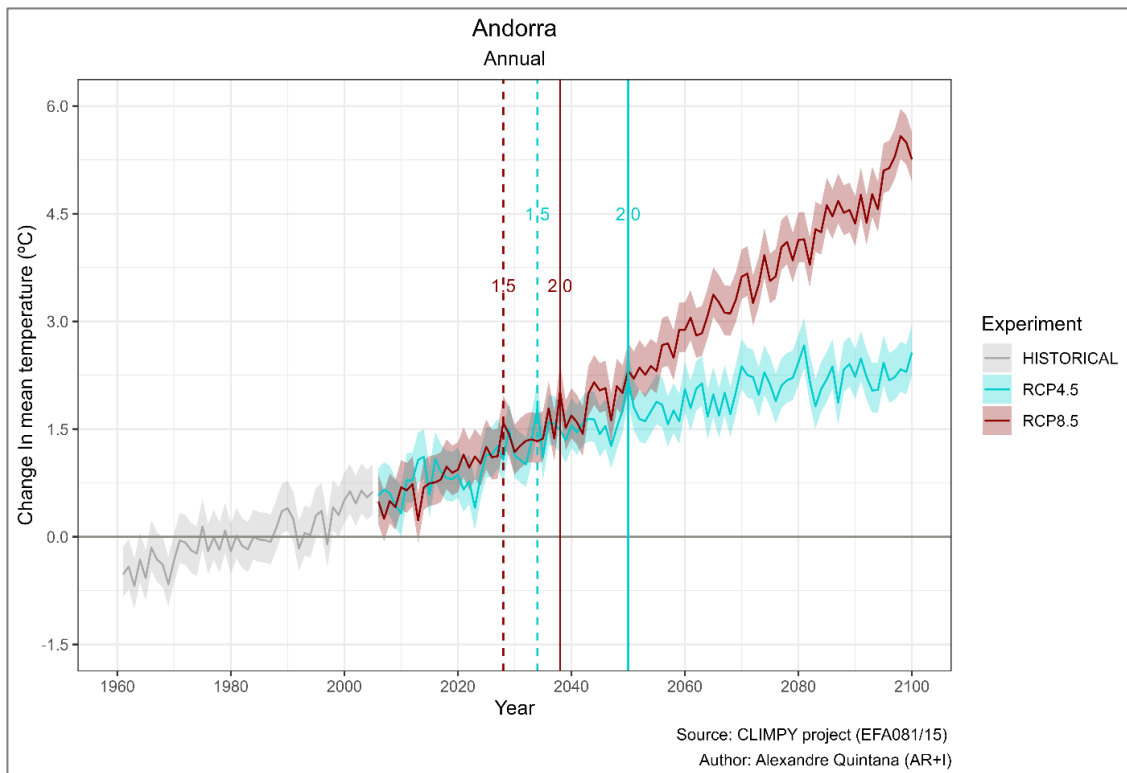


Figura 18. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura mitjana diària (°C) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

Les projeccions generades mostren a finals de segle com l'impacte de l'escenari RCP4.5 en la variació del valor mitjà anual de temperatura mitjana es situaria al voltant dels 2.5 °C per sobre del període de referència. Pel que fa a l'escenari més emissor, les variacions estarien compreses entre 4.0 °C i 5.5 °C a finals de segle, demostrant una vegada més, la tendència seguida per totes les variables de temperatura, d'increment respecte el període de referència.

Finalment, tal com s'ha fet amb les variables anteriors, es dona resposta a l'objectiu de saber quan s'assoliran l'1.5 i 2.0 graus d'increment de temperatura pels escenaris RCP4.5 i RCP8.5. 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, l'escenari més emissiu, assolirà aquests increments de temperatura l'any 2028 i 2038 respectivament, tenint lloc en anys molts similars als descrits per la temperatura màxima.

Per tal de no allargar aquest punt del treball, i donat que s'ha exposat i comentat la variabilitat de la temperatura màxima i mínima a nivell estacional i altitudinal, únicament s'exposarà (Fig. 19) l'increment de la temperatura mitjana entre els 14 punts del territori, on tal com succeeix amb les dues variables anteriors de temperatura analitzades, no es pot establir una diferenciació clara a escala altitudinal a part de petites variacions.

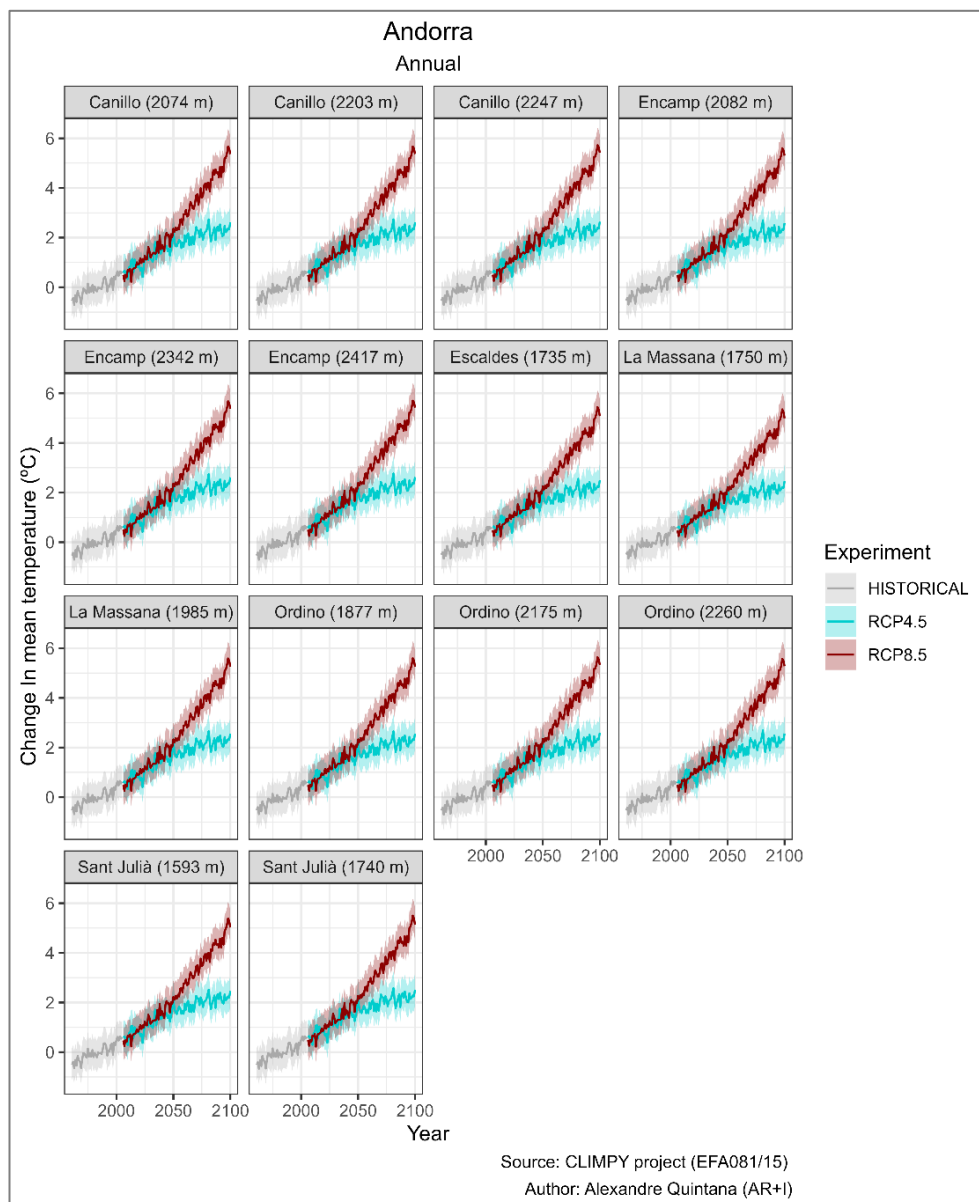


Figura 19. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura mitjana diària (°C) segons cada punt del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

6.1.4 Precipitació

Deixant de banda les variables de temperatura exposades als apartats anteriors, ja ens podem centrar en l'evolució de les anomalies pluviomètriques d'Andorra. Abans d'aprofundir en els resultats d'aquesta variable, s'ha de recordar que els valors diaris donats per aquest arxiu estan en mm/dia a diferència dels valors de temperatura descrits anteriorment, els quals són diaris.

Un cop recordat això, s'observa com el valor mitjà de precipitació anual mostra un comportament molt diferenciat respecte la temperatura, on les projeccions futures de precipitació no mostren una tendència clara (Fig. 20).

Encara així, la projecció d'evolució del canvi relatiu a la precipitació apunta a un lleuger creixement, tot i que amb incerteses que en alguns casos són apreciables. En el cas d'aquesta variable, les incerteses associades, per exemple, als models i tècniques de regionalització predominen sobre la incertesa associada a les emissions, el que difereix aquest comportament del trobat per a les temperatures, on la incertesa associada als escenaris domina sobre les altres incerteses de les projeccions. (Amblar-Francés *et al.*, 2020).

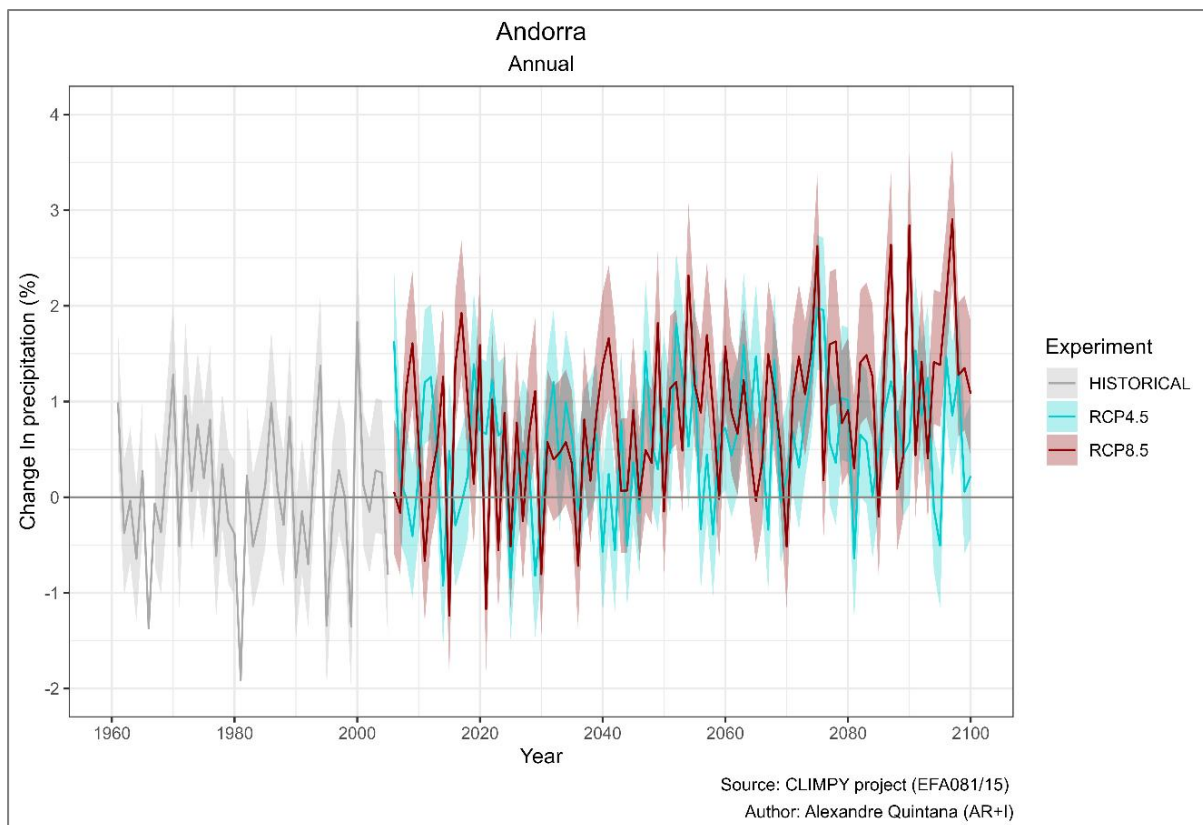


Figura 20. Evolució del valor mitjà anual de precipitació diària (%) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

A nivell europeu, els canvis en la precipitació (expressada percentualment respecte al valor de referència) mostren unes variacions geogràfiques pronunciades que tendeixen a intensificar-se al final del segle (IPCC, 2013). Això deixa clar que malgrat tenir les particularitats d'un territori pirinenc, Andorra no escapa dels fenòmens que tenen lloc al seu entorn.

Les projeccions generades mostren un petit augment de la precipitació durant aquest segle, més pronunciat per a l'escenari RCP8.5 i més lent per a l'escenari RCP4.5. L'impacte de l'escenari RCP4.5 en la variació del valor mitjà de precipitació es molt similar al del període de referència. Pel escenari RCP8.5, les variacions superarien lleugerament les del escenari menys emissiu. Encara així, es tracta d'una variable amb moltes oscil·lacions entre ambdós escenaris, sense que l'escenari més emissiu destaquí molt per damunt de l'altre.

Si s'analitza el comportament estacional, la figura 21 mostra l'evolució que ha experimentat la precipitació, la qual segueix una tendència diferent a l'exposada anteriorment per la temperatura.

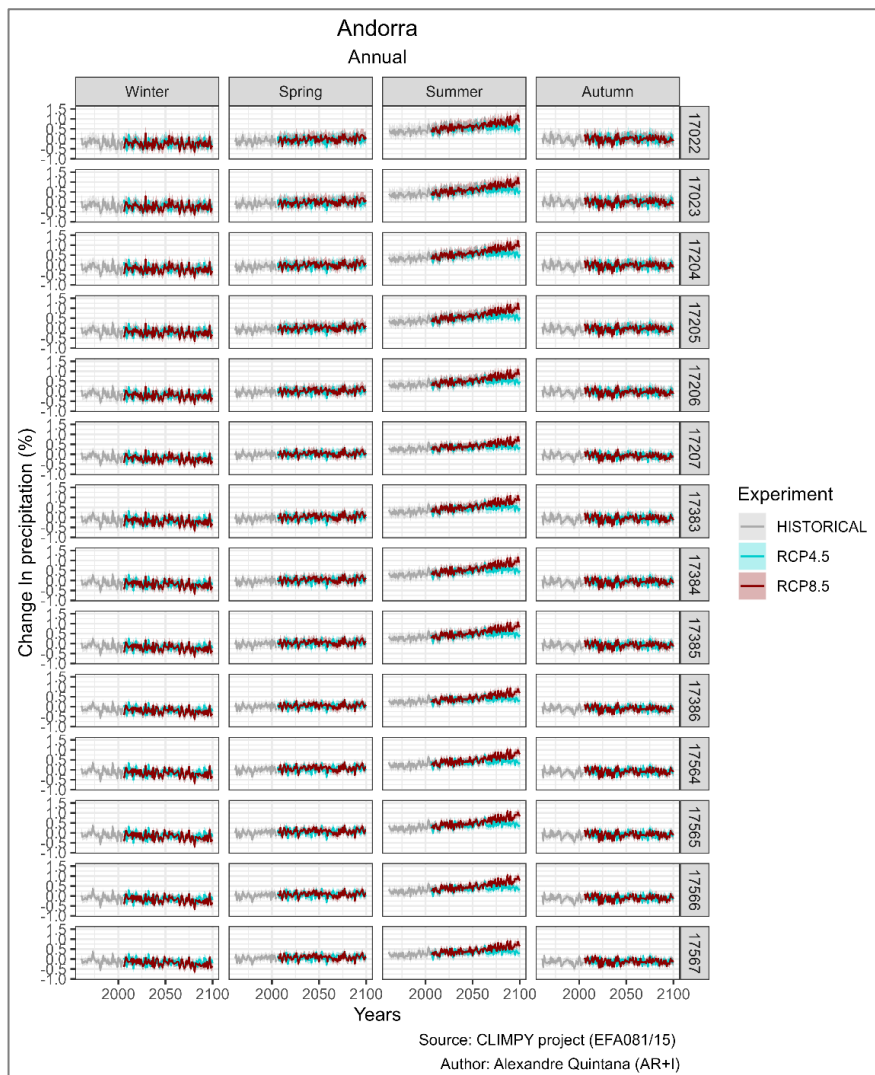


Figura 21. Evolució del valor mitjà anual de precipitació (%) estacional segons cada punt del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

Així doncs, la primavera i l'hivern segueixen una tendència bastant homogènia entre els diferents punts del territori, sense cap increment i fins i tot reduint-se en certs punts d'alta muntanya a l'hivern. Tot i això, i com passava amb la temperatura màxima i mínima, a l'estiu es produeix la major variació, amb una diferenciació entre escenaris més destacada, esdevenint així, l'estació amb l'increment més gran de precipitació respecte el període de referència. En definitiva, pel que fa al comportament estacional a finals de segle, s'aprecia una lleugera disminució a la primavera i hivern i un augment més significatiu a l'estiu.

Per tal de no allargar aquest punt del treball, i donat que no es produeix cap tendència clara a nivell estacional i altitudinal, únicament s'exposarà (Fig. 22), l'evolució pluviomètrica entre els 14 punts del territori, on no es pot establir una diferenciació clara a escala altitudinal a part de petites variacions. Encara així, s'aprecia un dèbil augment de la precipitació anual en punts de fons de vall (Escaldes-Engordany, 1735 metres) respecte punts d'alta muntanya (Encamp, 2342 metres).

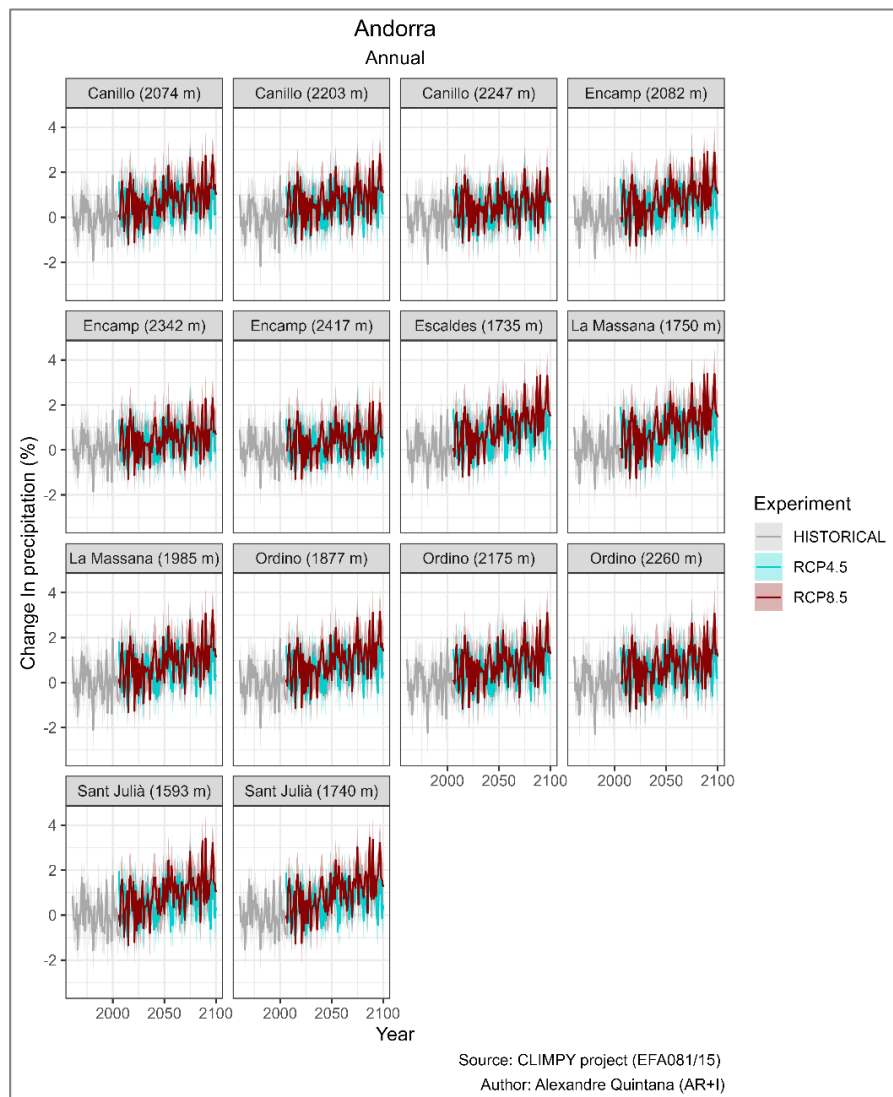


Figura 22. Evolució del valor mitjà anual de la temperatura mitjana diària (°C) segons cada punt del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

Un cop s'han exposat els resultats gràfics corresponents a l'anàlisi evolutiu de la temperatura, ja podem comentar els resultats corresponents a l'obtenció d'estadístics descriptius, a partir d'un diagrama de caixa (Boxplot) d'aquesta variable. Això permetrà visualitzar a través dels quartils, diferent informació d'interès per l'anàlisi de la precipitació.

Abans d'entrar en l'anàlisi, considero d'interès recalcar el fet que els diagrames de caixa de la precipitació no tenen en compte l'horitzó referent al període històric, fet lògic si tenim en compte que el període històric de referència (1986-2005), com el seu propi nom indica no té un valor de referència i per tant, no es pot calcular la seva anomalia.

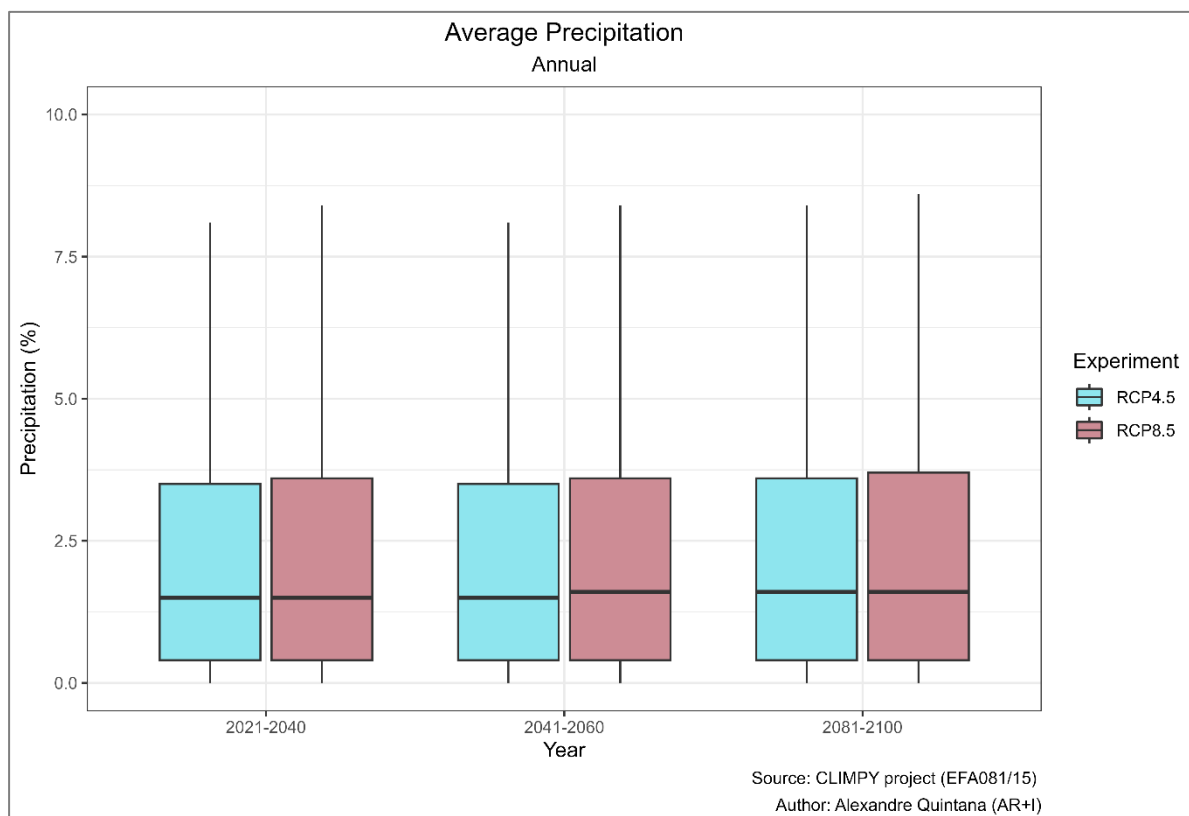


Figura 23. Evolució en l'anomalia de precipitació al Principat d'Andorra a través d'un Boxplot per a cadascun dels RCP analitzats. Els horitzons de pronòstic que s'han elegit segueixen els criteris marcats pel sisè informe de l'IPCC (IPCC, 2023).

En el diagrama de caixa anterior podem observar com a diferència de la temperatura, el rang interquartílic es manté estable pels tres períodes analitzats. En aquesta variable, a mesura que avancem en els període IPCC corresponents, els valors del primer i tercer quartil únicament pateixen un molt reduït increment, seguint així una tendència encara que d'increment, molt diferent a la comentada en els diagrames anteriors. Pel que fa a la diferenciació entre escenaris, el més emissiu, a mesura que avancem en el temps, pateix un increment major respecte l'escenari RCP4.5, el qual es manté de manera molt més estable.

També s'ha de destacar que la caixa del diagrama se situa molt a prop del límit inferior, indicant així, que la majoria de dades es troben concentrades en valors més baixos, és a dir, que la distribució de les dades està esbiaixada cap a l'extrem inferior.

Precipitation				
Period IPCC	Scenario	Median	P25 / P75	P17 / P83
Near Term (2021 - 2040)	RCP45	1.6	0.5 / 3.8	0.2 / 5
	RCP85	1.6	0.4 / 3.8	0.2 / 5
Medium Term (2041 - 2060)	RCP45	1.6	0.5 / 3.8	0.2 / 5
	RCP85	1.7	0.5 / 3.9	0.2 / 5.1
Long Term (2081 - 2100)	RCP45	1.7	0.5 / 3.9	0.2 / 5.1
	RCP85	1.7	0.4 / 4.0	0.2 / 5.3

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 l'anomalia de la precipitació. Elaboració pròpia a partir dels criteris marcats pel sisè informe de l'IPCC (IPCC, 2023)

Un cop s'ha realitzat un resum genèric del diagrama, podem observar a través de la taula 7 cada horitzó de pronòstic, els escenaris d'emissió (RCP4.5 i RCP8.5), el valor de la mediana i dels percentils corresponents.

Pel que fa 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'aquest variable entre els dos escenaris i per tot el període ja que els valors de la mediana i els percentils calculats son 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.

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.

Finalment, considero que s'ha identificat una clara tendència diferenciada totalment de la temperatura, ja que en el cas de la precipitació, a mesura que s'avança en el temps, presenta la particularitat de mantenir una tendència constant que ni incrementa ni descendeix al llarg dels anys. En conjunt doncs, tal com demostra la figura 20, la precipitació no presenta una tendència clara, a part de petites oscil·lacions d'increment en anys aïllats.

6.2 Anàlisi d'índex climàtics

En aquesta segona fase, s'exposaran els resultats dels diferents índex climàtics descrits al segon punt de l'apartat metodològic, és a dir, aquells índex que s'han considerat de més interès de cara a definir un conjunt d'indicadors climàtics en el marc de l'Estratègia Nacional d'Adaptació al Canvi Climàtic. Amb l'objectiu de no estendre aquest apartat del treball, s'han representat les figures que engloben el conjunt de punts del territori en una figura que recull tots els punts, substituint a les dues figures corresponents a la sectorització altitudinal.

6.2.1 Temperatura màxima

Pel que fa als resultats corresponents als índex de l'ETCCDMI utilitzats per l'anàlisi de la temperatura màxima, s'han tractat 5 índex principals: Summer days (SU25), Icing days (ID0), Cold days (TX10p), Warm days (TX90p) i finalment, Warm spell duration index (WSDI). En conjunt, 5 índex que permetran avaluar si l'afectació d'onades de calor a escala local (Andorra) s'assimila a la esperada a escala global, així com ajuda a avaluar la vulnerabilitat d'Andorra als impactes del canvi climàtic en funció dels escenaris climàtics futurs escollits (RCP4.5 i RCP8.5).

6.2.1.1 Summer days (SU25)

En primer lloc, l'índex *Summer days (SU25)* mesura el nombre de dies en què la temperatura màxima és més gran o igual a 25 °C, on tal com mostra la figura 23, segueix una tendència d'increment força destacada.

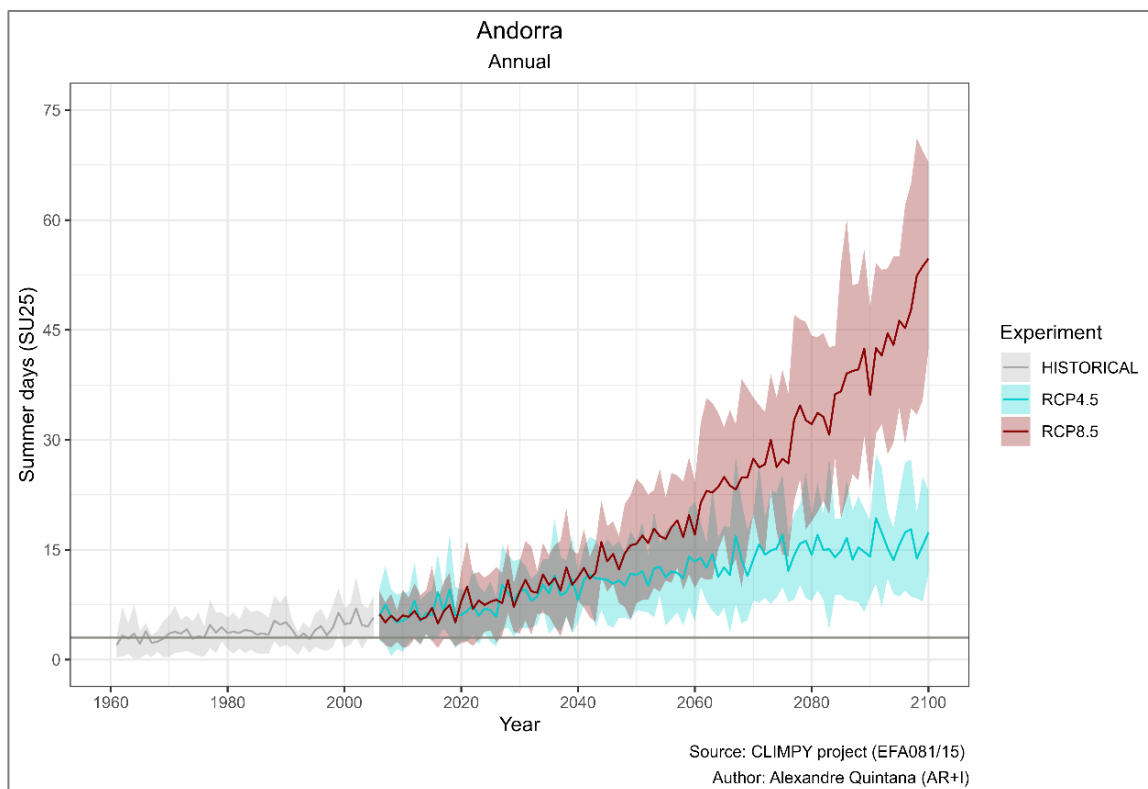


Figura 24. Evolució del nombre de dies d'estiu (SU25) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

L'evolució del nombre de dies d'estiu (SU25) mostra un augment progressiu al llarg del S. XXI pels dos escenaris analitzats. 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.

Centrant-nos en el comportament estacional, la figura 24 ens mostra l'evolució que ha experimentat aquest índex a nivell estacional, on pel que fa a l'estiu i la tardor, segueix una tendència d'increment força similar, mentre que a l'hivern i la primavera, es tenen uns increments gairebé inexistent.

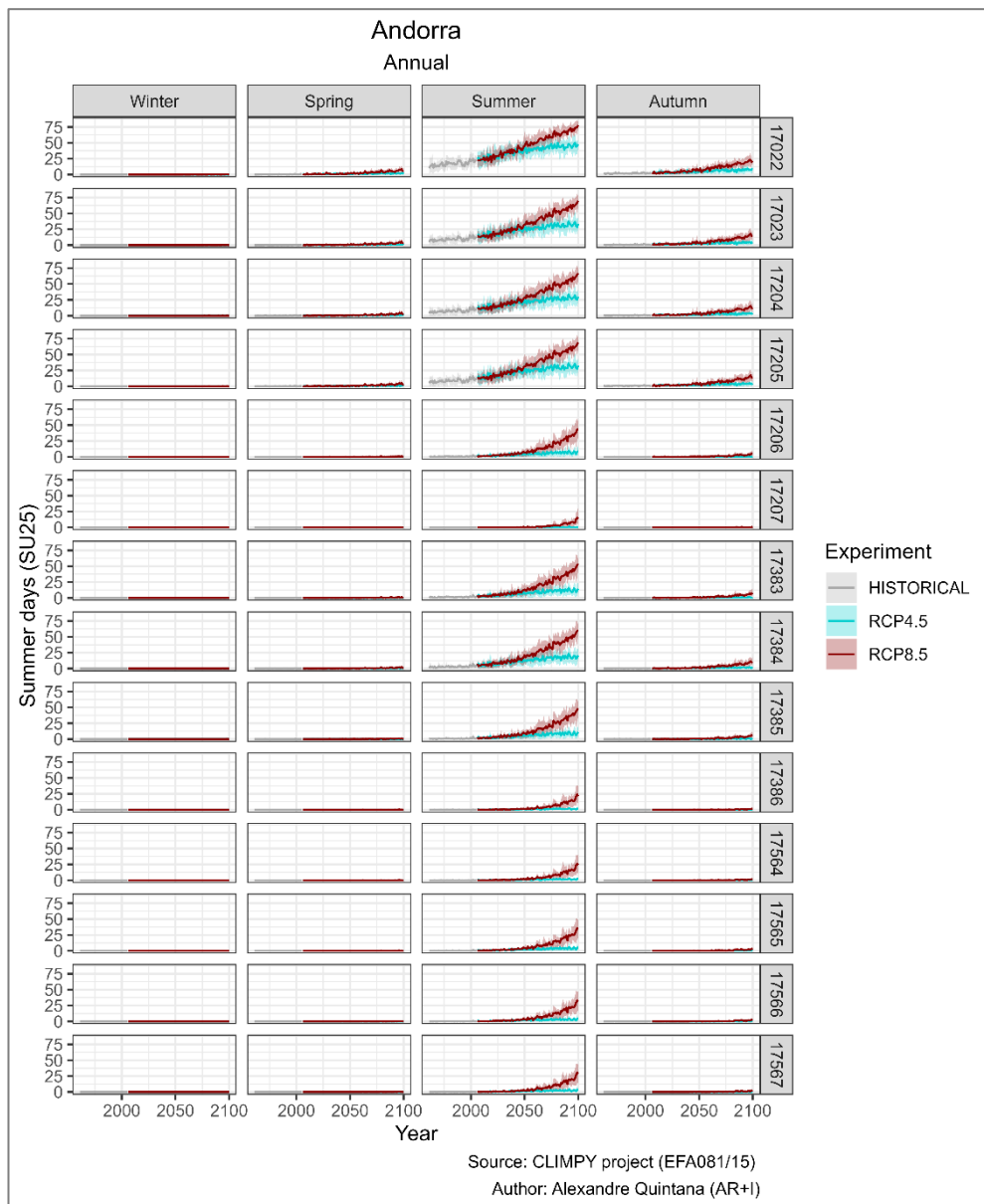


Figura 25. Evolució del nombre de dies d'estiu (SU25) a nivell estacional segons cada punt del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

Així doncs, tant l'hivern com la primavera segueixen una tendència bastant homogènia entre els diferents punts del territori, destacant-hi el lleuger increment a la primavera dels punts situats a menys altitud (17022 i 17023). Pel que fa a l'estiu, com s'ha observat en l'anàlisi evolutiu anterior de la temperatura, es l'estació que pateix un increment més accelerat a finals de segle, encara que els punts situats a fons de vall, també patiran un augment a la tardor que considero molt rellevant destacar, especialment per l'escenari més emissiu (RCP8.5). Pel que fa a aquesta diferenciació altitudinal, s'aprofundirà en més detall en les posteriors figures.

Si analitzem els punts localitzats a les parròquies situades a l'extrem sud del territori i la vall central, és a dir, aquells de menys altitud, tenen una evolució en el nombre de dies d'estiu clarament superior respecte els punts situats a alta muntanya, situats majoritàriament a la vessant nord del territori, destacant així, la importància del gradient vertical en l'anàlisi d'aquest índex

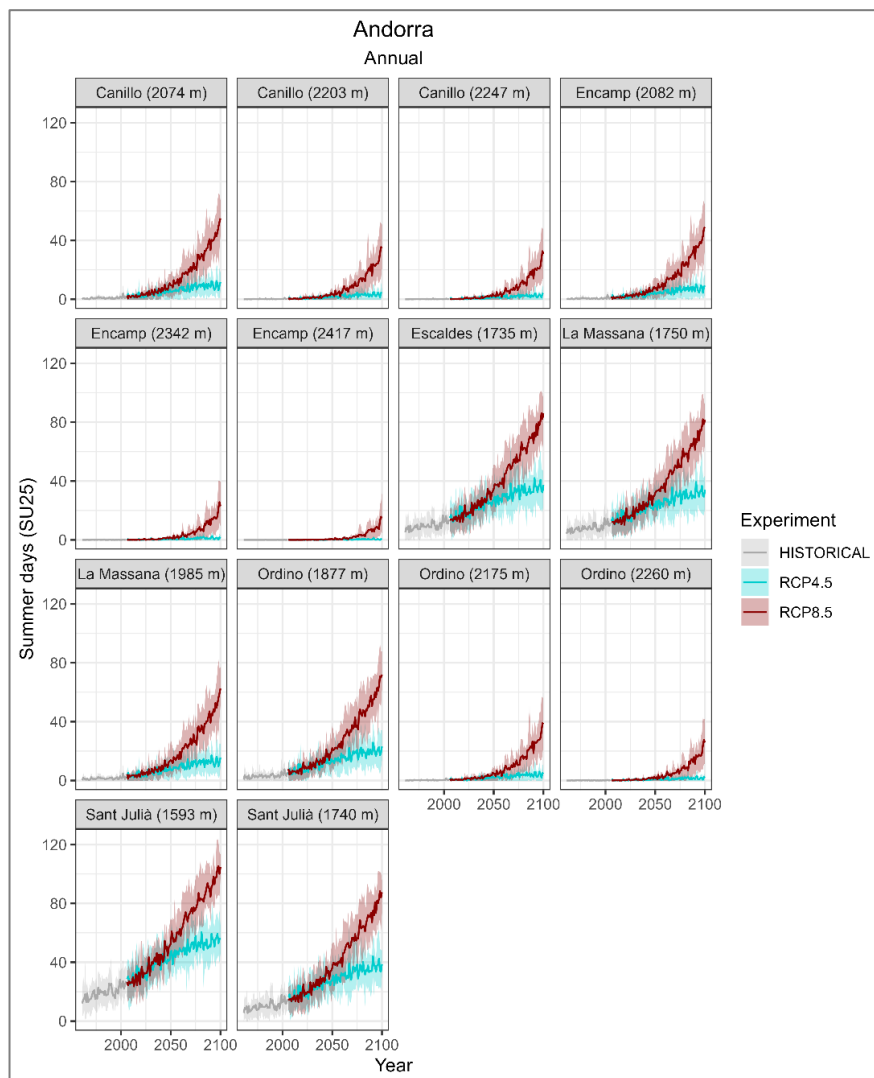


Figura 26. Evolució del nombre de dies d'estiu (SU25) segons cada punt del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83. Elaboració pròpia a partir de dades del CLIMPY project proporcionades per Andorra Recerca + Innovació (AR + I).

Per tant, a diferència dels comentat anteriorment amb l'evolució de les anomalies tèrmiques, es pot observar com el gradient altitudinal determina clarament l'evolució d'aquest índex, especialment accentuat amb aquells punts situats a més de 2.200 metres d'altitud, on l'increment d'aquesta variable, malgrat ser positiu es molt menor al observat en els punts situats a fons de vall.

6.2.1.2 Icing days (ID0)

En un país de muntanya com Andorra, la freqüència de les glaçades no només augmenta amb l'altitud sinó que també depèn de les formes que pren el relleu (orientació dels vessants, valls, circs, etc.). A continuació, s'exposa el resultat de l'índex *Icing days (ID0)*, que mesura el nombre de dies en què la temperatura màxima és inferior a 0 °C, on tal com es mostra la figura 28, segueix una tendència decreixent.

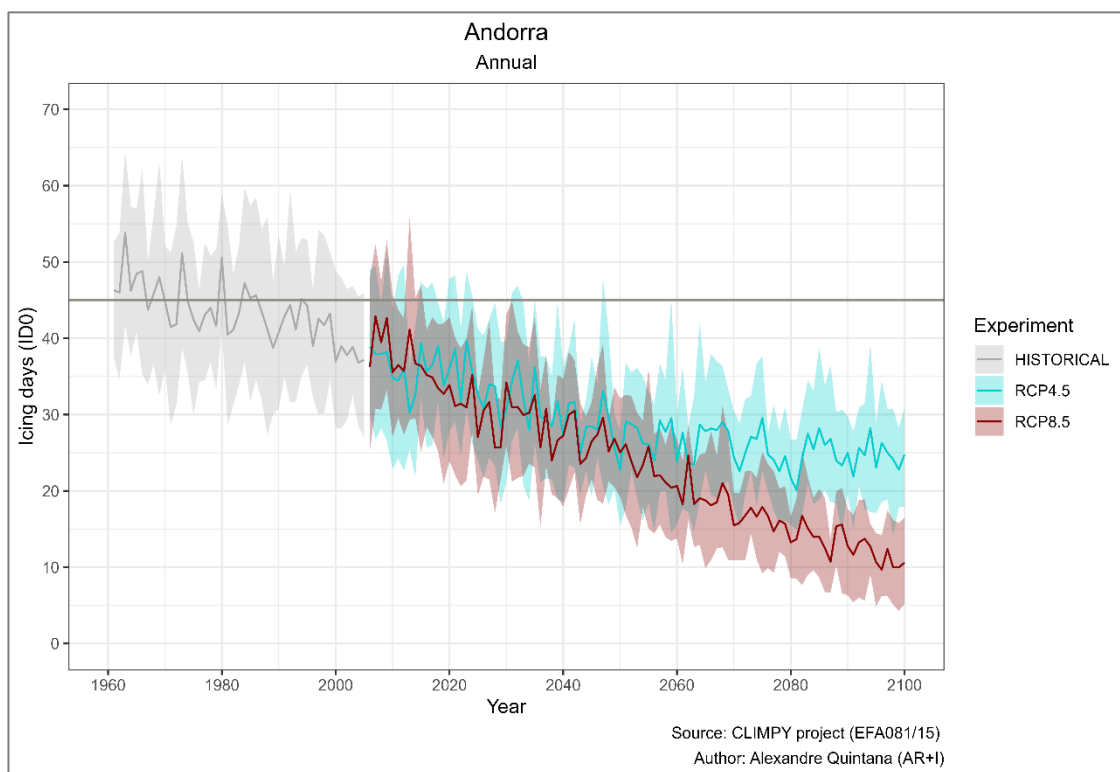


Figura 27. Evolució del nombre de dies glaçats (ID0) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

L'evolució del nombre de dies glaçats (ID0) mostra una disminució progressiva al llarg del S. XXI pels dos escenaris analitzats. Aquest comportament és coherent amb l'evolució dels valors mitjans de la temperatura màxima mostrats anteriorment. A finals de segle, s'espera que el nombre de dies glaçats disminueixi en gairebé 35 dies i de manera constant per l'escenari més emissiu RCP8.5 respecte el període de referència, i en 20 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.

Centrant-nos en el comportament estacional, la figura 28 mostra l'evolució que ha experimentat aquest índex, on pel que fa a l'estiu i la tardor, segueix una tendència de reducció en el nombre de dies glaçats poc significativa, encara que superior en el cas de la tardor. A l'hivern i la primavera, es produeixen les reduccions més destacades, especialment en els punts situats a més altitud.

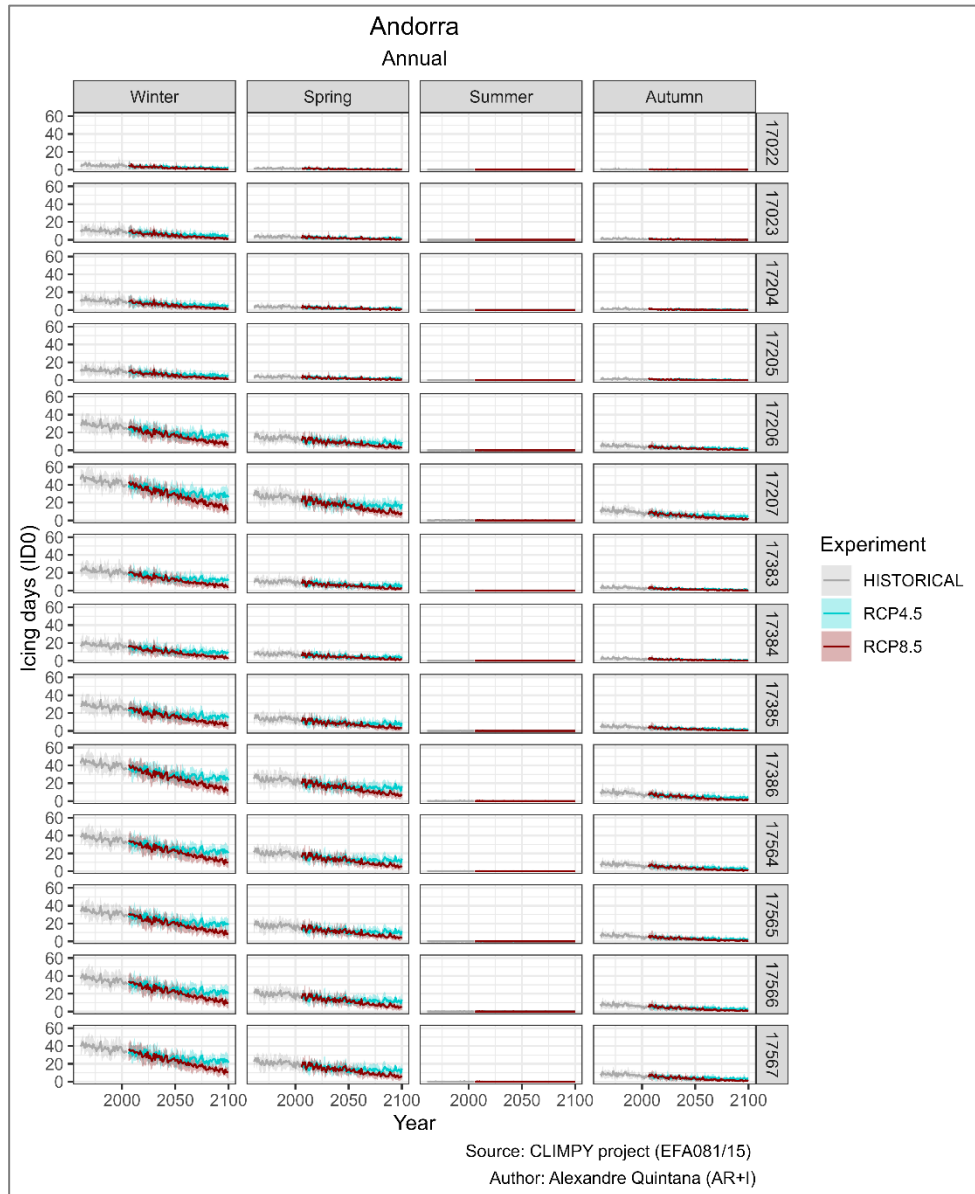


Figura 28. Evolució del nombre de dies glaçats (ID0) a nivell estacional segons cada punt del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

Tant a l'hivern com a la primavera, se segueix una tendència bastant homogènia entre els diferents punts del territori, amb una reducció més accentuada a l'hivern, en ser el mes amb valors diaris més baixos de tot l'any, especialment als punts d'alta muntanya. A diferència del comentat fins al moment, a l'estiu no s'assolirà cap dia amb temperatures màximes inferiors a 0 °C, en ser el mes més càlid de l'any. Finalment, a la tardor s'aprecia una lleugera disminució en el nombre de dies glaçats a finals de segle en punts situats a alta muntanya.

Entre ubicacions que tenen la mateixa altitud, el nombre de dies glaçats pot variar de manera que la freqüència és més alta als fons de vall, que als vessants o pics, a conseqüència de les inversions tèrmiques que tenen lloc al territori, on les acumulacions d'aire fred durant les nits són un fenomen habitual.

Un cop comentat el caràcter estacional d'aquest índex, es pot observar com els punts localitzats a les parròquies situades a l'extrem sud del territori i la vall central, és a dir, aquells de menys altitud, tenen una evolució en el nombre de dies glaçats inferior respecte els punts situats a alta muntanya, els quals pateixen una disminució més accelerada a finals de segle a mesura que augmenten en altitud.

Per tant, el gradient altitudinal determina clarament l'evolució d'aquest índex, on la disminució es molt significativa. A la figura inferior, es pot veure clarament aquesta diferenciació altitudinal segons el gradient vertical.

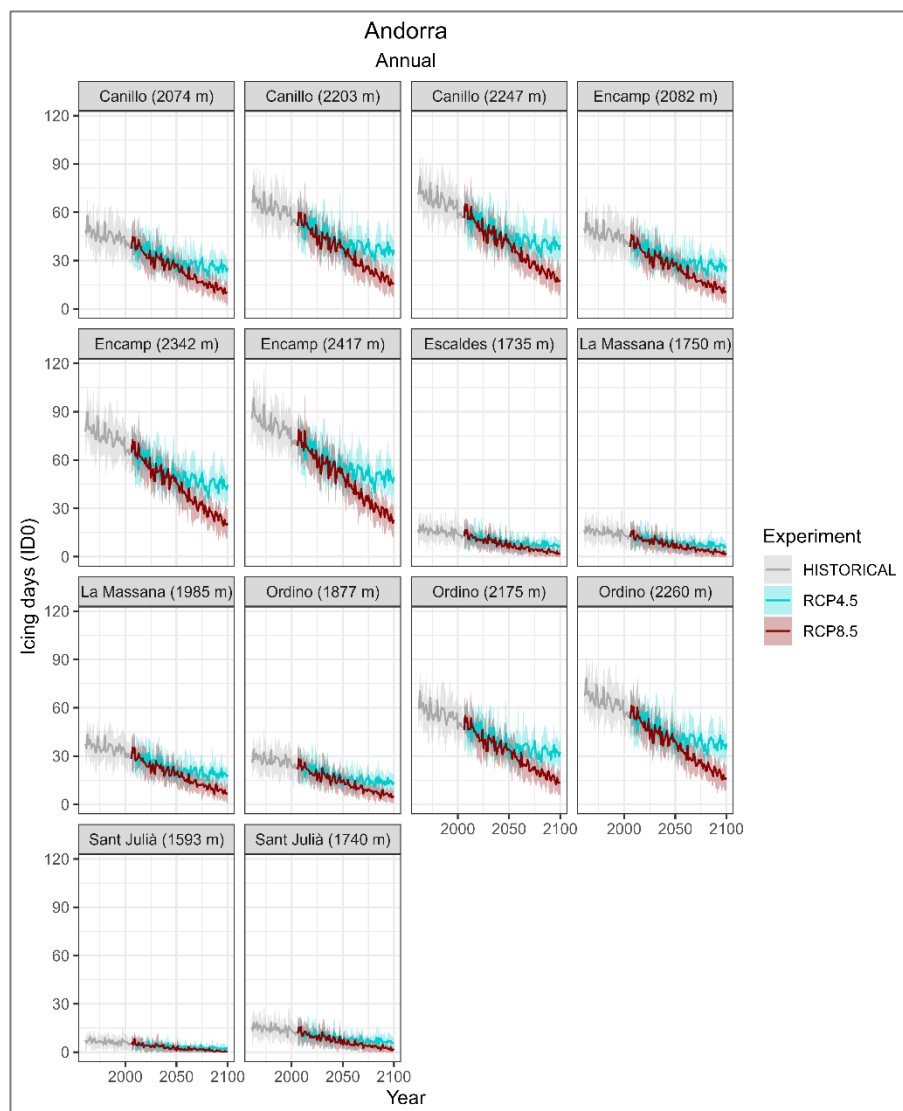


Figura 29. Evolució del nombre de dies glaçats (ID0) segons cada punt del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83. Elaboració pròpia a partir de dades del CLIMPY project proporcionades per Andorra Recerca + Innovació (AR + I).

La distribució espacial dels punts del territori permet observar perfectament com les acumulacions d'aire fred durant les nits serenes, per exemple a punts de fons de vall com Sant Julià (1593 metres), provoca que els dies glaçats siguin més freqüents que a punts situats a mig vessant com Canillo (2074 metres). Encara així, hi ha punts del territori que es troben al mateix vessant però a altituds diferents, on malgrat dominar els dies glaçats a cotes altes, trobem anys en què la freqüència de dies glaçats és la mateixa als dos punts, posant de manifest la major presència de dies amb inversió tèrmica i temperatures més fredes al fons de vall.

6.2.1.3 Cold days (TX10p)

Tot seguit s'exposa el resultat de l'índex *Cold days (TX10p)*, que mesura la freqüència (%) de dies on la temperatura màxima es troba per sota del percentil 10. A través de la figura 30 es pot apreciar com segueix una tendència similar a la que té lloc en l'índex comentat anteriorment, malgrat que en aquest cas, el càlcul es fa amb percentatge en comptes de fer-ho a partir del nombre de dies, com s'ha realitzat en els dos índex anteriors.

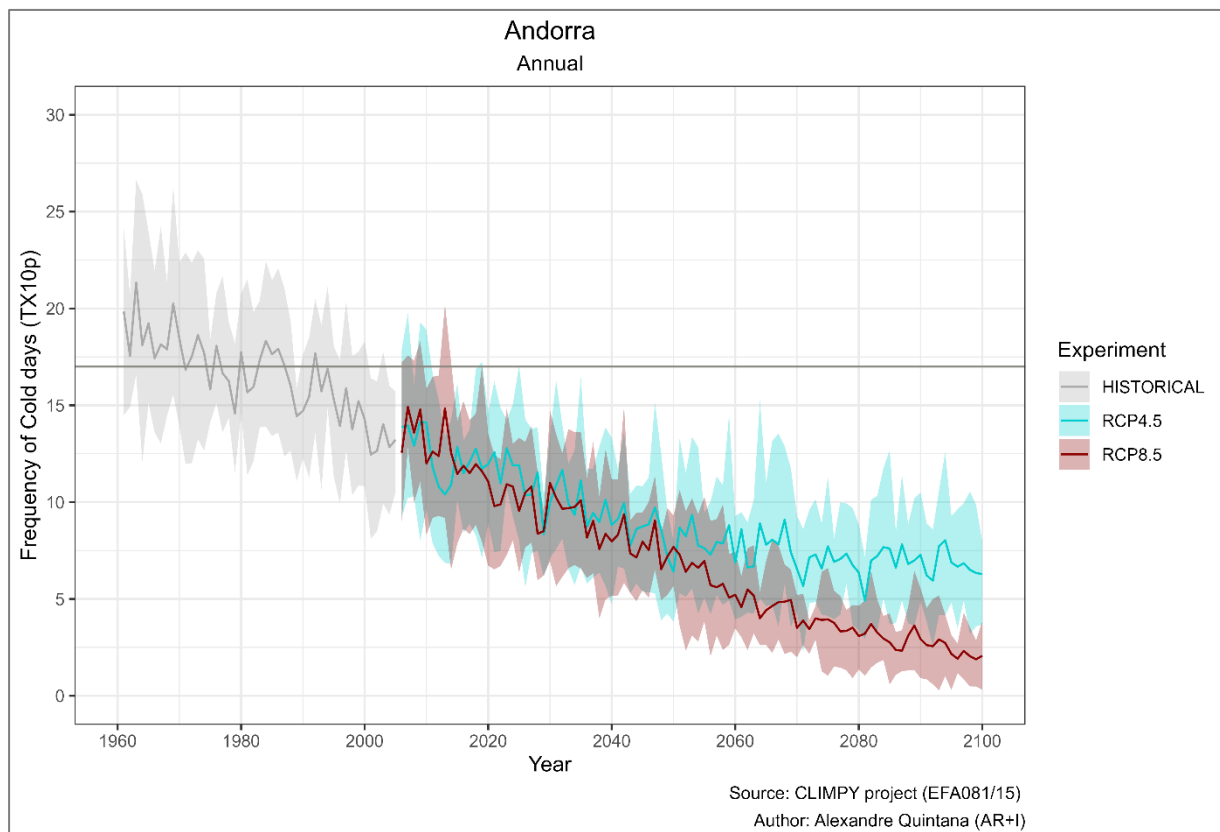


Figura 30. Evolució del nombre de dies freds (TX10p) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

L'evolució del nombre de dies freds (TX10p) mostra un comportament molt similar al comentat pels dies glaçats (ID0), en produir-se una disminució progressiva al llarg del S. XXI pels dos escenaris analitzats. Aquest comportament també és coherent amb l'evolució dels valors mitjans de la temperatura màxima mostrats anteriorment.

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

Pel que fa al comportament estacional, l'evolució que ha experimentat aquest índex es molt similar al comentat anteriorment, ja que l'estiu i la tardor segueixen una tendència de reducció en el nombre de dies freds poc significativa, encara que superior en el cas de la tardor. A l'hivern i la primavera és on es produeixen les reduccions més destacades.

Si ens centrem en la distribució espacial dels punts del territori, s'observa perfectament com la reducció dels dies freds (expressada en %) es gairebé idèntica pels 14 punts del territori analitzats, on no es pot establir una diferenciació clara a escala altitudinal, tal com s'ha comentat amb l'anàlisi evolutiu de la variable tèrmica.

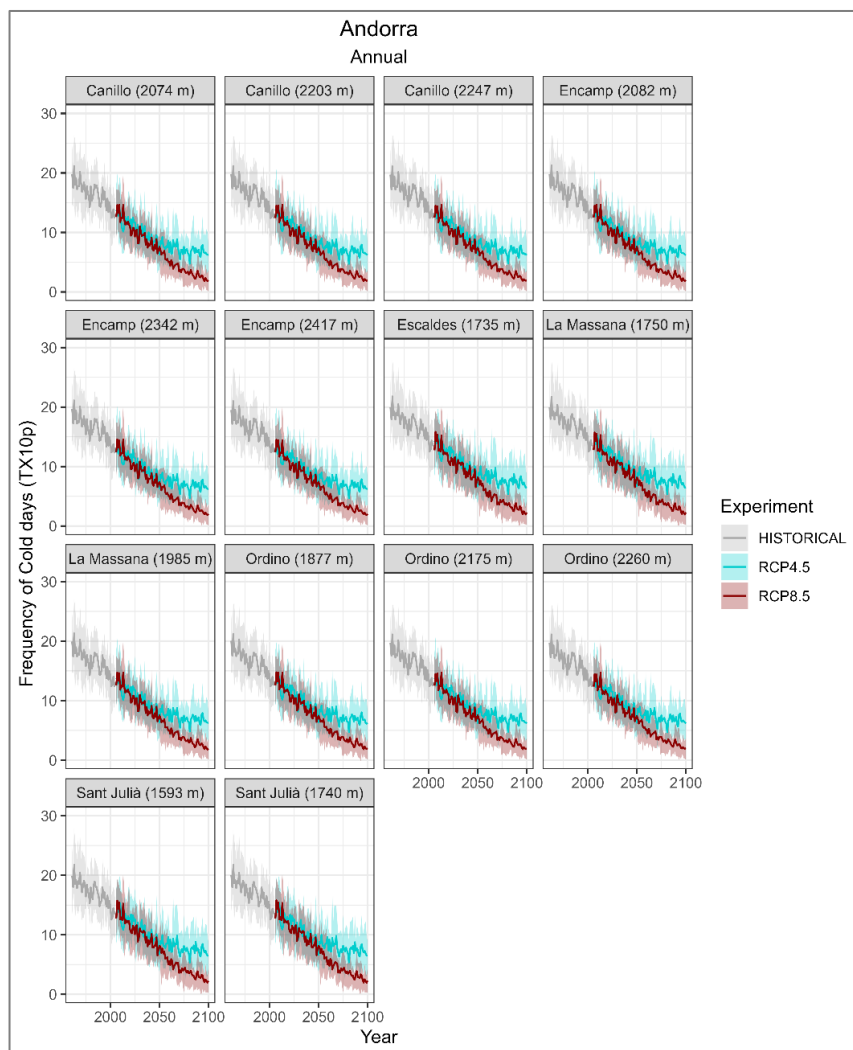


Figura 31. Evolució del nombre de dies freds (TX10p) segons cada punt del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83. Elaboració pròpia a partir de dades del CLIMPY project proporcionades per Andorra Recerca + Innovació (AR + I).

Això queda demostrat si comparem el punt més alt (Encamp, 2417 metres) amb el més baix (Sant Julià, 1593 metres), on la diferenciació en la reducció progressiva de dies freds es molt similar. Per tant, l'evolució del nombre de dies freds al llarg del S. XXI per tots els punts analitzats, condueix a un descens anual a finals de segle molt significatiu respecte els valors mitjans del període de referència, tal com s'observa a la figura inferior.

6.2.1.4 Warm days (TX90p)

A continuació, comentarem el resultat de l'índex *Warm days (TX90p)*, que mesura la freqüència (%) de dies on la temperatura màxima es troba per damunt del percentil 90. Tal com s'observa a la figura 32, segueix una tendència similar a la seguida per l'índex referent als dies d'estiu (SU25), malgrat que en aquest cas, el càlcul es fa amb percentatge en comptes de fer-ho a partir del nombre de dies.

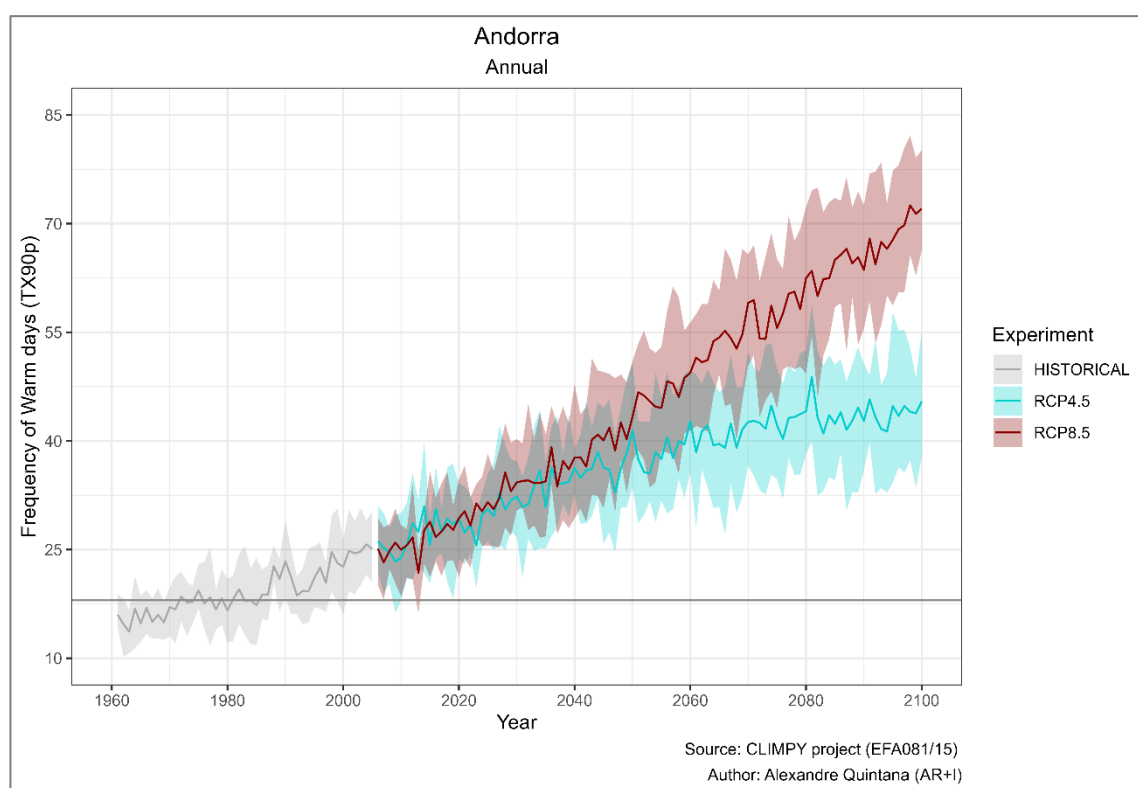


Figura 32. Evolució del nombre de dies càlids (TX90p) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

Si analitzem l'evolució en el nombre de dies càlids (TX90p), trobem un increment progressiu al llarg del S. XXI pels dos escenaris analitzats, comportament coherent amb l'evolució dels valors mitjans de la temperatura màxima mostrats anteriorment.

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. En els dos escenaris però, s'observa un augment de la incertesa al final del segle.

Pel que fa al comportament estacional, l'evolució que ha experimentat aquest índex destaca especialment a l'estiu i la tardor, en seguir una tendència d'augment en el nombre de dies càlids significativa a finals de segle, encara que molt superior en el cas de l'estiu, en ser l'estació més càlida de l'any. A l'hivern i la primavera, es on hi trobem els increments més moderats.

La distribució espacial dels punts del territori permet observar perfectament com l'augment de dies càlids (expressat en %) es molt semblant entre els 14 punts analitzats, i per tant, no es pot arribar a establir una diferenciació clara a escala altitudinal, tal com s'ha comentat amb l'anàlisi evolutiu dels dies freds. Encara així, si comparem un punt situat a alta muntanya (Ordino, 2260 metres) amb un situat a fons de vall (Sant Julià, 1740 metres), la diferenciació en l'increment progressiu de dies càlids es lleugerament superior en els punts d'alta muntanya.

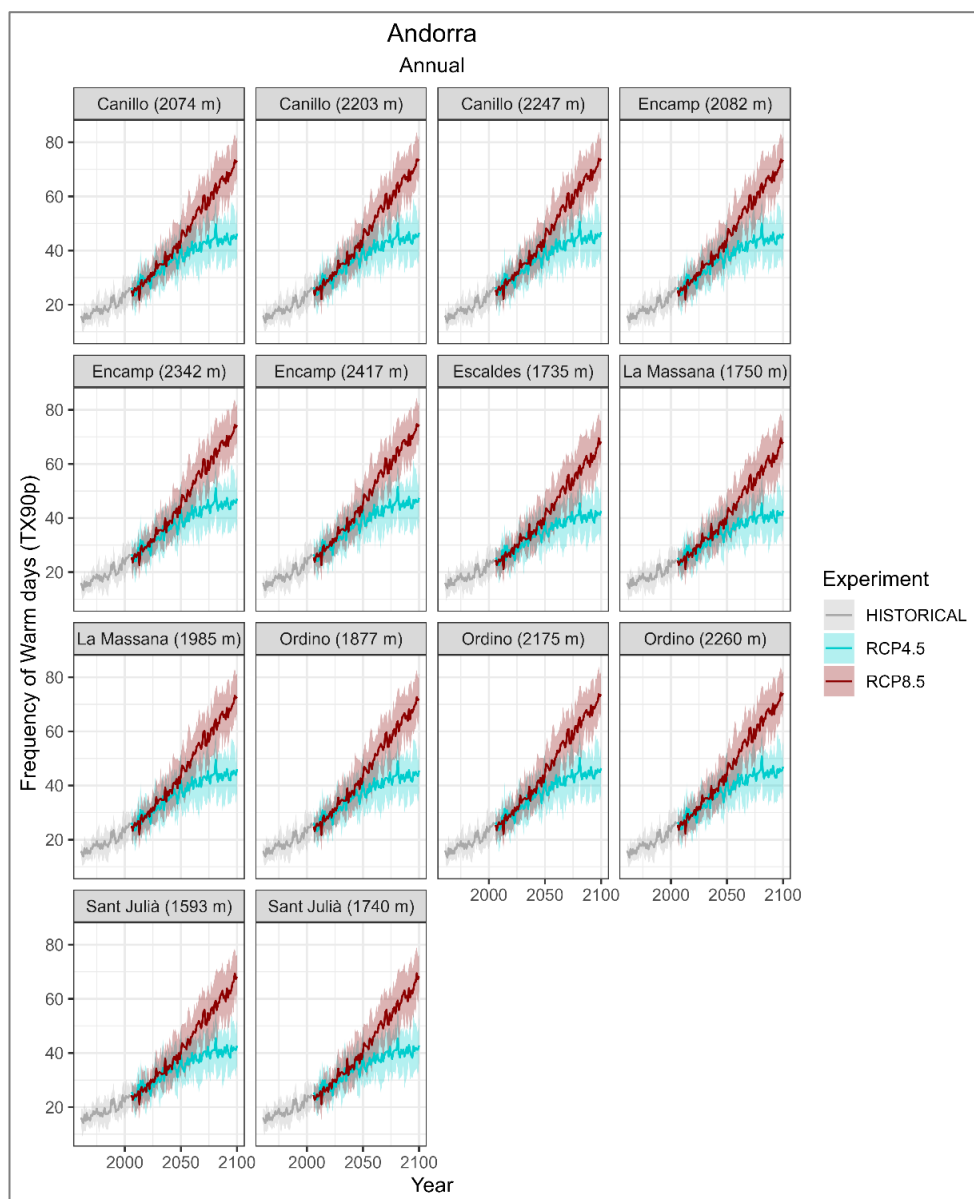


Figura 33. Evolució del nombre de dies càlids (TX90p) segons cada punt del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83. Elaboració pròpia a partir de dades del CLIMPY project proporcionades per Andorra Recerca + Innovació (AR + I).

En termes generals, l'evolució del nombre de dies càlids al llarg d'aquest segle per tots els punts analitzats, condueix a un augment anual respecte els valors mitjans del període de referència, encara que amb una diferència segons l'escenari d'emissió molt elevada.

6.2.1.5 Warm speel duration index (WSDI)

A continuació, comentarem el resultat de l'índex *Warm speel duration index (WSDI)*, el qual realitza un recompte anual de dies, amb almenys 6 dies consecutius de temperatura màxima situada per sobre del percentil 90. Tal com s'observa a la figura 34, l'indicador de durada de ratxa càlida segueix una tendència positiva. En aquest cas, la configuració del gràfic es diferent pel fet que les dades obtingudes a partir dels models i tècniques de regionalització dona lloc a un augment dels valors probables a finals de segle.

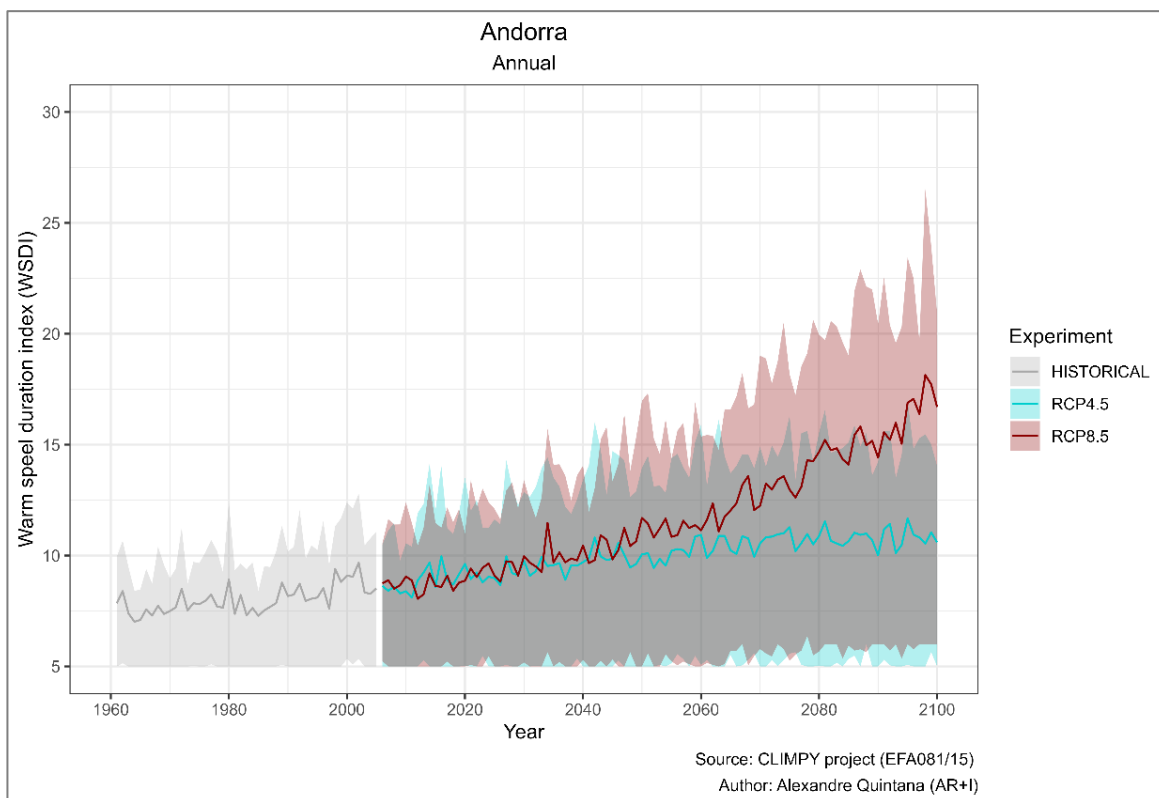


Figura 34. Evolució de l'indicador de durada de ratxa càlida (WSDI) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

L'evolució de l'indicador de durada de ratxa càlida (WSDI) mostra un augment al llarg del S. XXI pels dos escenaris analitzats, establint un comportament coherent amb l'evolució dels valors mitjans de la temperatura màxima comentats en detall al primer punt dels resultats.

A finals de segle, s'espera que el nombre de dies amb almenys 6 dies consecutius de temperatura màxima situada per sobre del percentil 90 s'incrementi aproximadament en 10 dies i de manera constant per l'escenari RCP8.5, i en 5 dies respecte l'escenari d'estabilització RCP4.5, encara que l'augment que es produeix en aquest darrer escenari, es manté de manera estable la segona meitat del segle.

La distribució espacial dels punts del territori permet observar perfectament com l'increment d'aquest índex es força similar entre els 14 punts del territori analitzats i per tant, no es pot establir una clara diferenciació a escala altitudinal. Encara així, si agafem l'exemple anterior i comparem un punt situat a alta muntanya (Ordino, 2260 metres) amb un situat a fons de vall (Sant Julià, 1740 metres), la diferenciació en l'increment d'aquest índex es lleugerament superior en els punts d'alta muntanya.

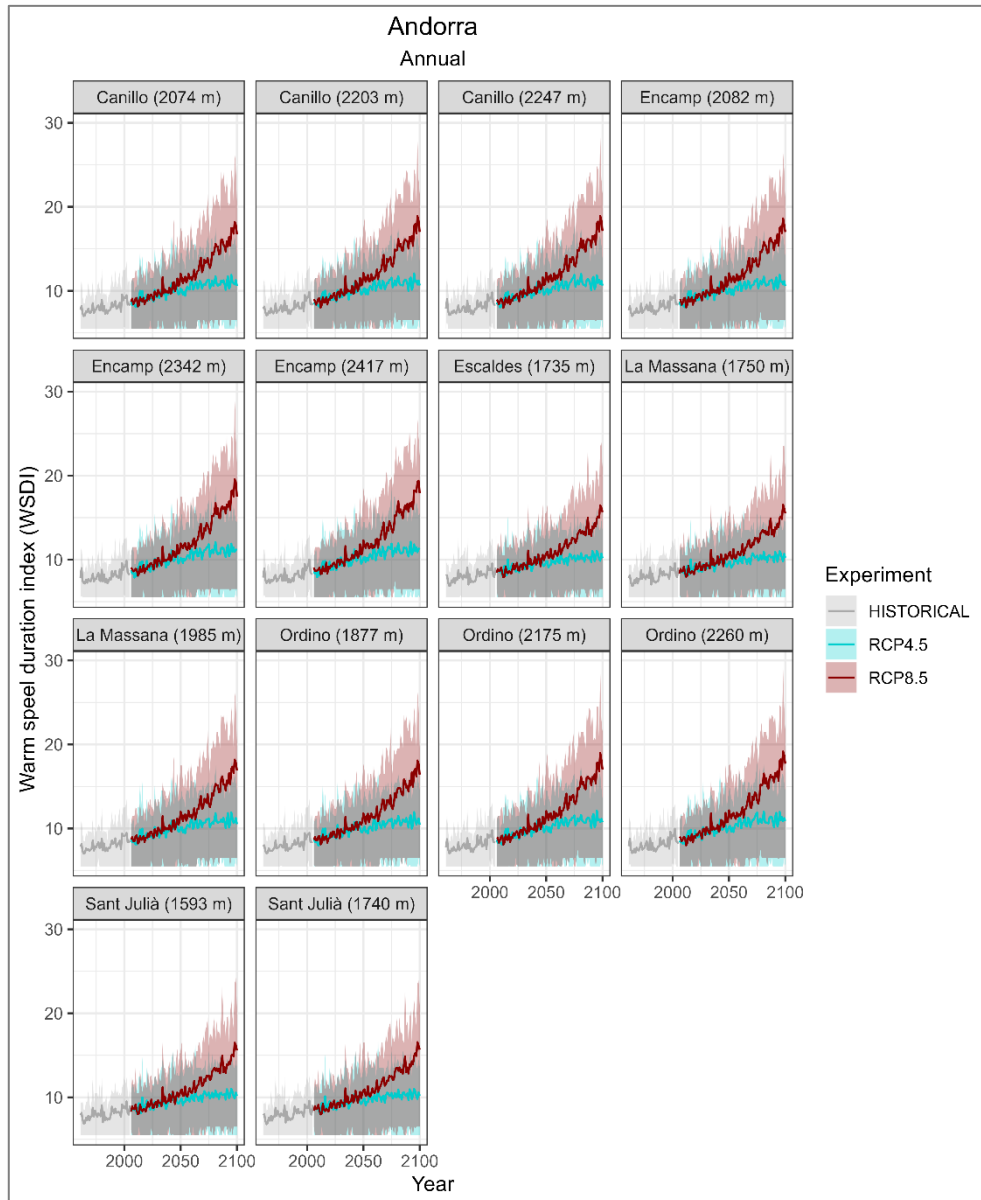


Figura 35. Evolució de l'indicador de durada de ratxa càlida (WSDI) segons cada punt del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

El nombre de dies amb almenys 6 dies consecutius de temperatura màxima situada per sobre del percentil 90 per tots els punts analitzats condueix a un augment anual a finals de segle respecte els valors mitjans del període de referència, encara que amb una diferència segons l'escenari d'emissió important. La diferència entre ambdós escenaris respecte el període de referència és poc destacada.

6.2.2 Temperatura mínima

Un cop analitzats els índex corresponents a la temperatura màxima, ja ens podem centrar en els resultats corresponents als índex de l'ETCCDMI utilitzats per l'anàlisi de la temperatura mínima, on s'han tractat 5 índex principals: Frost days (FD0), Tropical nights (TR20), Cold nights (TN10p), Warm nights (TN90p), i finalment, Cold spell duration index (CSDI). En conjunt, 5 índex que permetran avaluar la vulnerabilitat d'Andorra als impactes del canvi climàtic en funció dels escenaris climàtics futurs escollits (RCP4.5 i RCP8.5).

6.2.2.1 Frost days (FD0)

En un país de muntanya com Andorra, la freqüència dels dies de glaçada es un fenomen clau que s'ha d'avaluar i analitzar de cara a estudiar-ne la seva vulnerabilitat. A continuació, s'exposa el resultat de l'índex *Frost days (FD0)*, que mesura el nombre de dies en què la temperatura mínima és inferior a 0°C, on tal com es mostra la figura 36, segueix una tendència descendent molt marcada.

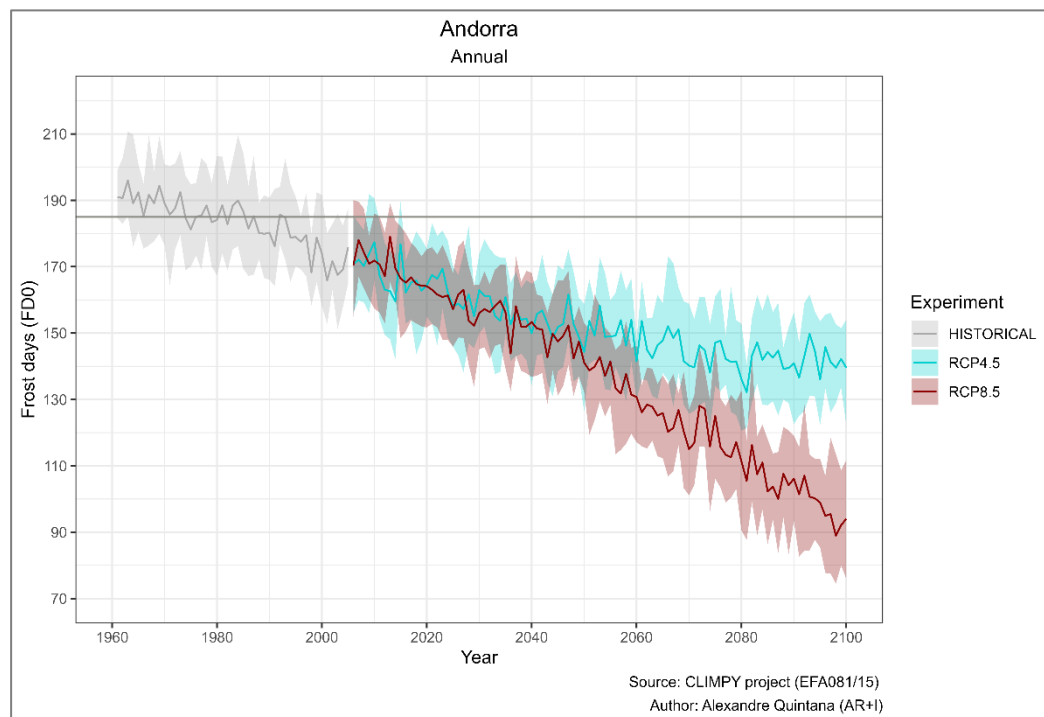


Figura 36. Evolució del nombre de dies de glaçada (FD0) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

L'evolució del nombre de dies de glaçada (FD0) mostra una disminució progressiva al llarg del S. XXI pels dos escenaris analitzats. Aquest comportament és coherent amb l'evolució dels valors mitjans de la temperatura mínima mostrats anteriorment. 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.

Centrant-nos en el comportament estacional, l'evolució que ha experimentat aquest índex a nivell estacional pel que fa a l'estiu i la tardor, segueix una tendència de reducció en el nombre de dies glaçats poc significativa, encara que en el cas de la tardor, s'incrementa considerablement. A l'hivern i la primavera, és on es produeixen les reduccions més destacades, especialment en els punts situats a més altitud.

Així doncs, a l'hivern i la primavera, se segueix una tendència bastant homogènia entre els diferents punts del territori, amb una reducció més accentuada sorprenentment a la primavera, especialment als punts d'alta muntanya. A l'estiu, als punts de més altitud, les temperatures mínimes inferiors a 0 °C acaben gairebé desapareixent, en ser el mes més càlid de l'any. Finalment, a la tardor s'aprecia una lleugera disminució en el nombre de dies glaçats a finals de segle per tot el territori.

Entre ubicacions que tenen la mateixa altitud, el nombre de dies de glaçada varia de manera que aquest descens es més pronunciat en punts d'alta muntanya que a fons de vall.

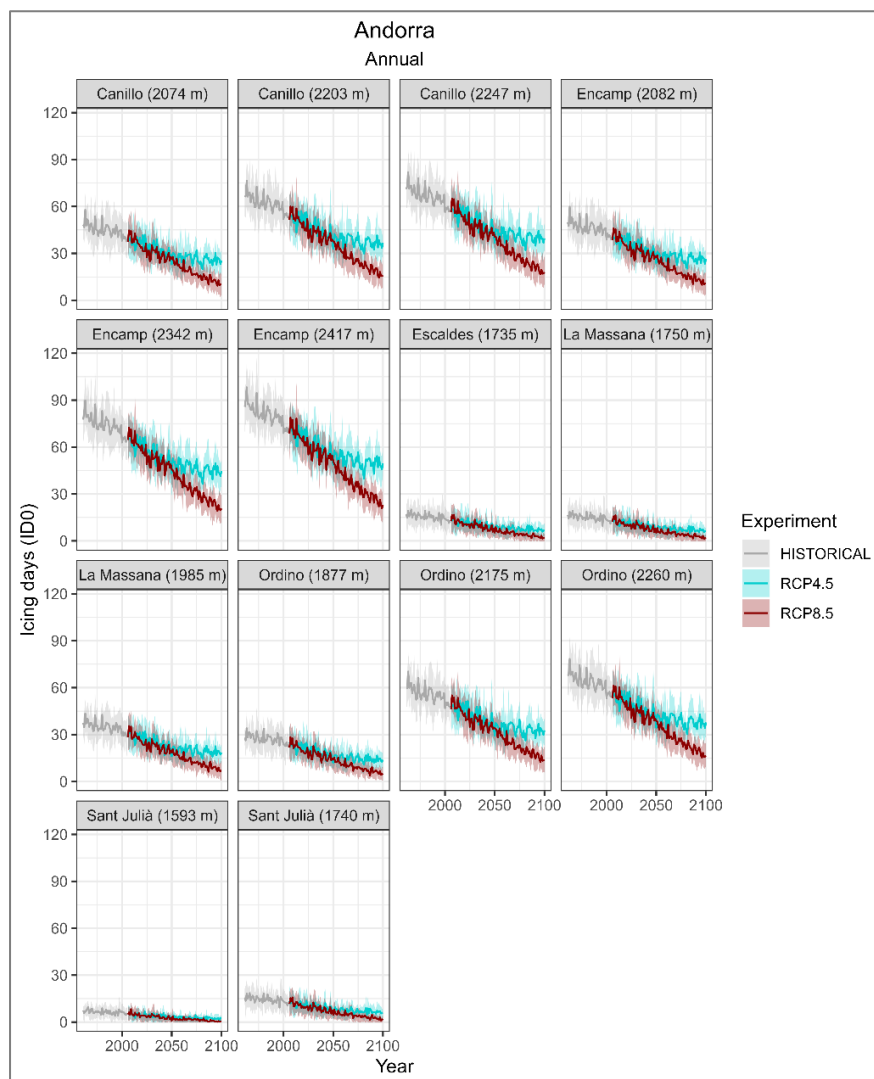


Figura 37. Evolució del nombre de dies de glaçada (FD0) segons cada punt del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83. Elaboració pròpia a partir de dades del CLIMPY project proporcionades per Andorra Recerca + Innovació (AR + I).

Els punts localitzats a les parròquies situades a l'extrem sud del territori i la vall central, és a dir, aquells de menys altitud, tenen una evolució en el nombre de dies glaçats inferior respecte els punts situats a alta muntanya, els quals pateixen una disminució més accelerada i pronunciada a finals de segle a mesura que augmenten en altitud.

Per tant, el gradient altitudinal determina clarament l'evolució d'aquest índex, especialment accentuada amb aquells punts situats a més de 2.000 metres d'altitud, on la disminució d'aquest índex es molt significativa.

6.2.2.2 Tropical nights (TR20)

A continuació, s'exposarà el resultat de l'índex *Tropical nights (TR20)*, que mesura el nombre de dies en què la temperatura mínima es superior a 20°C en un any, on tal com mostra la figura 38, es diferencia totalment respecte la resta d'índex calculats, essent així un dels índex més interessants a calcular de cara a saber la vulnerabilitat d'un territori com Andorra davant l'increment de nits tropicals.

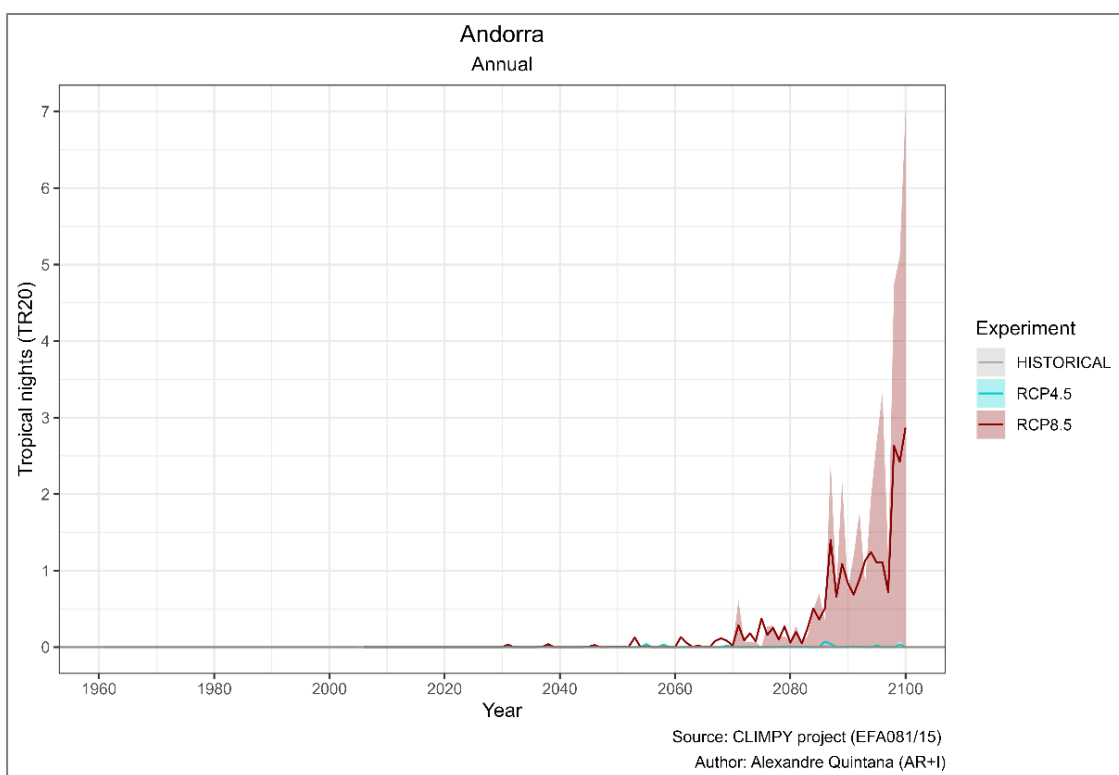


Figura 38. Evolució del nombre de nits tropicals (TR20) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

L'evolució del nombre de nits tropicals (TR20) mostra un comportament atípic respecte la resta d'índex exposats fins al moment, d'aquí neix, el seu especial interès en termes de vulnerabilitat i adaptació al canvi climàtic, ja que com s'ha introduït a l'inici, les projeccions climàtiques no presenten valors diaris fins a finals del S. XXI.

Aquest comportament és coherent amb l'evolució positiva dels valors mitjans de la temperatura mínima, el que implica que per a finals de segle, a nivell de tot el territori andorrà, s'espera que s'arribi a obtenir la primera nit tropical l'any 2087, amb un valor anual d'1.401 per a l'escenari més emissiu respecte el període de referència.

Encara així, fins els darrers 3 anys de la projecció, (2098, 2099 i 2100) no s'assoleixen més de 2 dies a l'any de temperatura mínima superior a 20 °C. Respecte l'escenari d'estabilització RCP4.5, no s'ha projectat cap valor diari que superi aquest criteri, sinó únicament valors anuals aïllats, que sobresurten la tendència nul·la d'aquest escenari. Per tant, es pot establir una diferenciació entre ambdós escenaris molt accentuada.

Centrant-nos en el comportament estacional, l'increment al llarg dels anys que ha experimentat aquest índex es produeix bàsicament a l'estiu, i en una proporció molt reduïda, a la tardor. Pel que fa a l'hivern i la primavera, l'increment dels valors d'aquest índex es inexistent per tota la sèrie temporal.

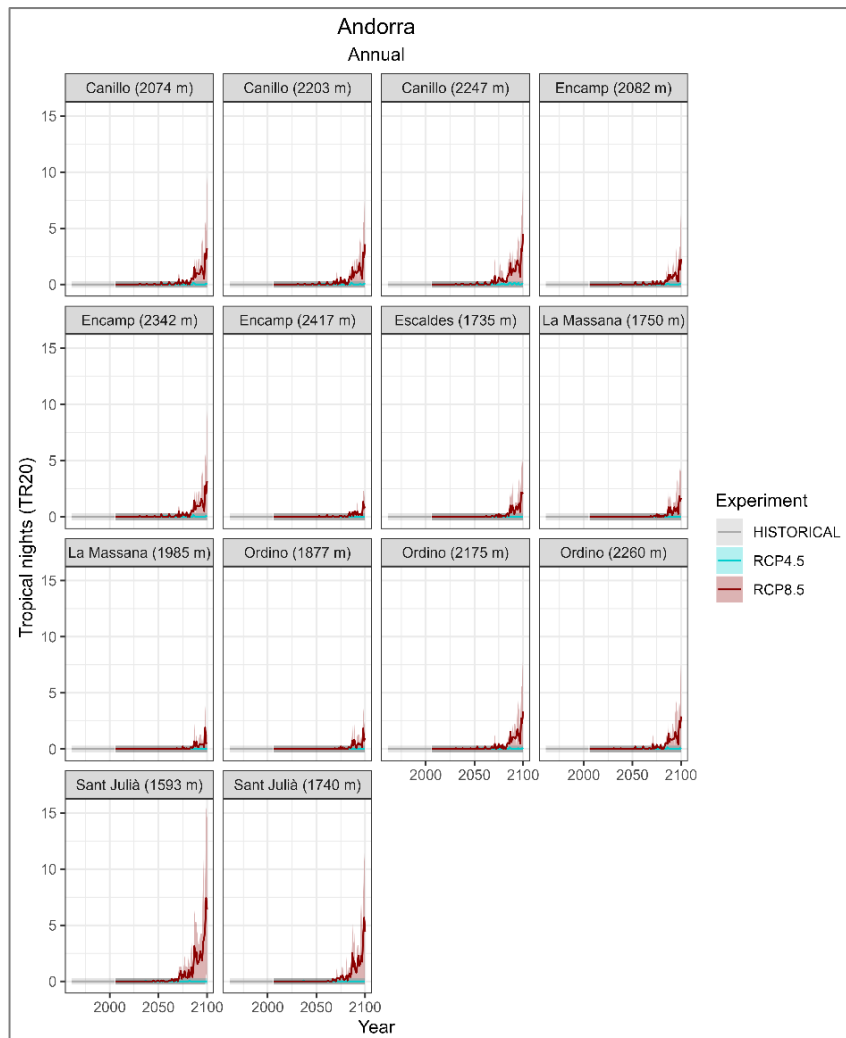


Figura 39. Evolució del nombre de del nombre de nits tropicals (TR20) segons cada punt del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83. Elaboració pròpia a partir de dades del CLIMPY project proporcionades per Andorra Recerca + Innovació (AR + I).

Així doncs, a nivell estacional, tant l'hivern com la primavera no registren cap valor diari d'increment per cap punt del territori en tota la sèrie temporal. Pel que fa a l'estiu, es l'estació que pateix un increment més accelerat a finals de segle, especialment accentuat en els punts situats a fons de vall. A la tardor, considero molt rellevant destacar, que experimentarà un petit increment en l'escenari més emissiu (RCP8.5).

Si analitzem els punts localitzats a fons de vall i els situats a alta muntanya, no podem observar una tendència clara que diferència els dos sectors, ja que s'observen punts d'ambdós sectors amb altituds diferenciades que tenen un creixement per a finals de segle molt similar. Encara així, s'ha de destacar el punt més baix del territori (Sant Julià, 1593 m), en ser el punt amb l'increment més pronunciat de tota la sèrie. Així i tot, els increments per l'escenari menys emissiu són pràcticament inexistent, concentrant-se l'increment en l'escenari més emissiu.

6.2.2.3 Cold nights (TN10p)

Tot seguit, s'exposa el resultat de l'índex *Cold nights (TN10p)*, que mesura la freqüència (%) de dies on la temperatura mínima es troba per sota del percentil 10. A través de la figura 40 podem apreciar com segueix una tendència similar a la seguida per l'índex homònim de la temperatura màxima.

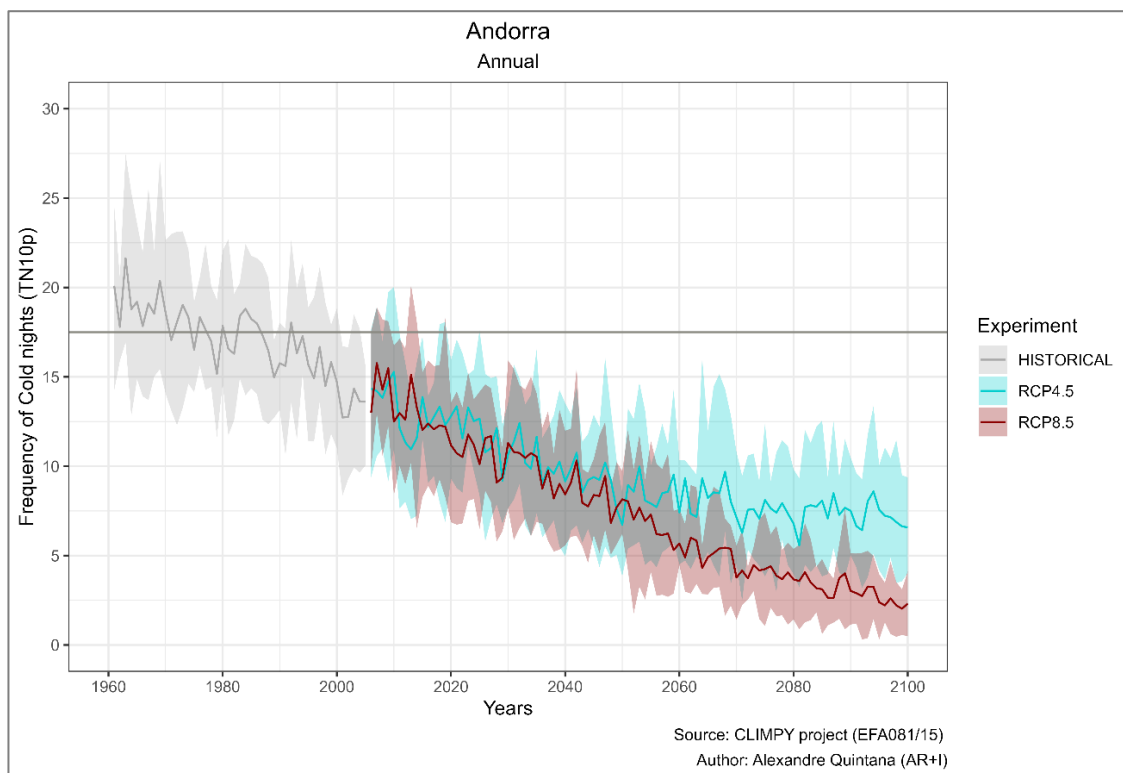


Figura 40. Evolució del nombre de nits fredes (TN10p) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

L'evolució del nombre de nits fredes (TN10p) mostra un comportament molt similar al comentat pels dies freds (TX10p), en produir-se una disminució progressiva al llarg del S. XXI pels dos escenaris analitzats, encara que no tant significativa.

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.

Pel que fa al comportament estacional, l'evolució que ha experimentat aquest índex es similar al comentat anteriorment, on l'estiu i la tardor segueixen una tendència de reducció en el nombre de nits fredes poc significativa. A l'hivern i la primavera, és on es produeixen les reduccions més destacades.

Si ens centrem en la distribució espacial dels punts del territori, s'observa com la reducció de les nits fredes (expressada en %) es molt semblant entre els 14 punts del territori analitzats, on no es pot establir una diferenciació clara a escala altitudinal ni d'ubicació geogràfica.

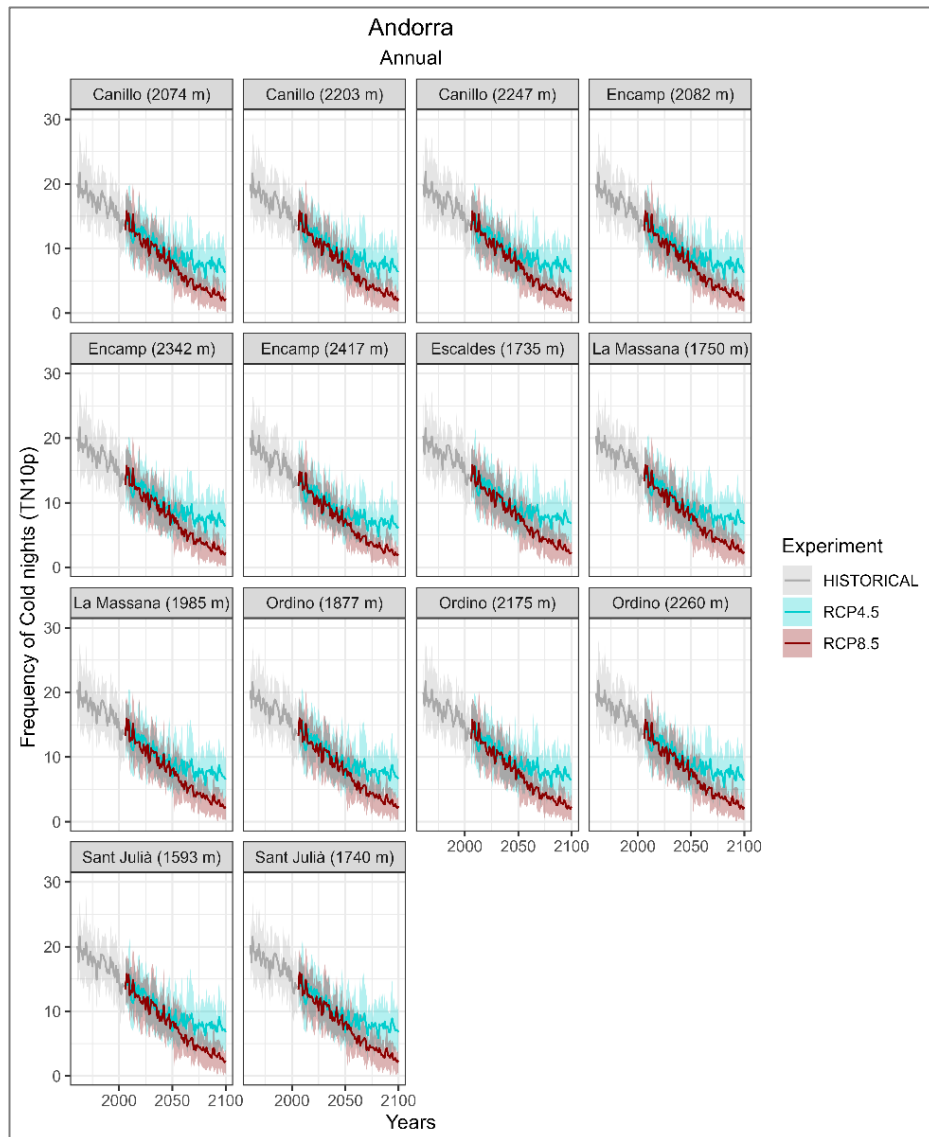


Figura 41. Evolució del nombre de nits fredes (TN10p) segons cada punt del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83. Elaboració pròpia a partir de dades del CLIMPY project proporcionades per Andorra Recerca + Innovació (AR + I).

6.2.2.4 Warm nights (TN90p)

A continuació, l'índex *Warm nights (TN90p)* mesura la freqüència (%) de dies on la temperatura mínima es troba per damunt del percentil 90. Tal com s'observa a la figura 42, segueix una tendència homònima a la seguida per l'índex referent als dies càlids (TX90p).

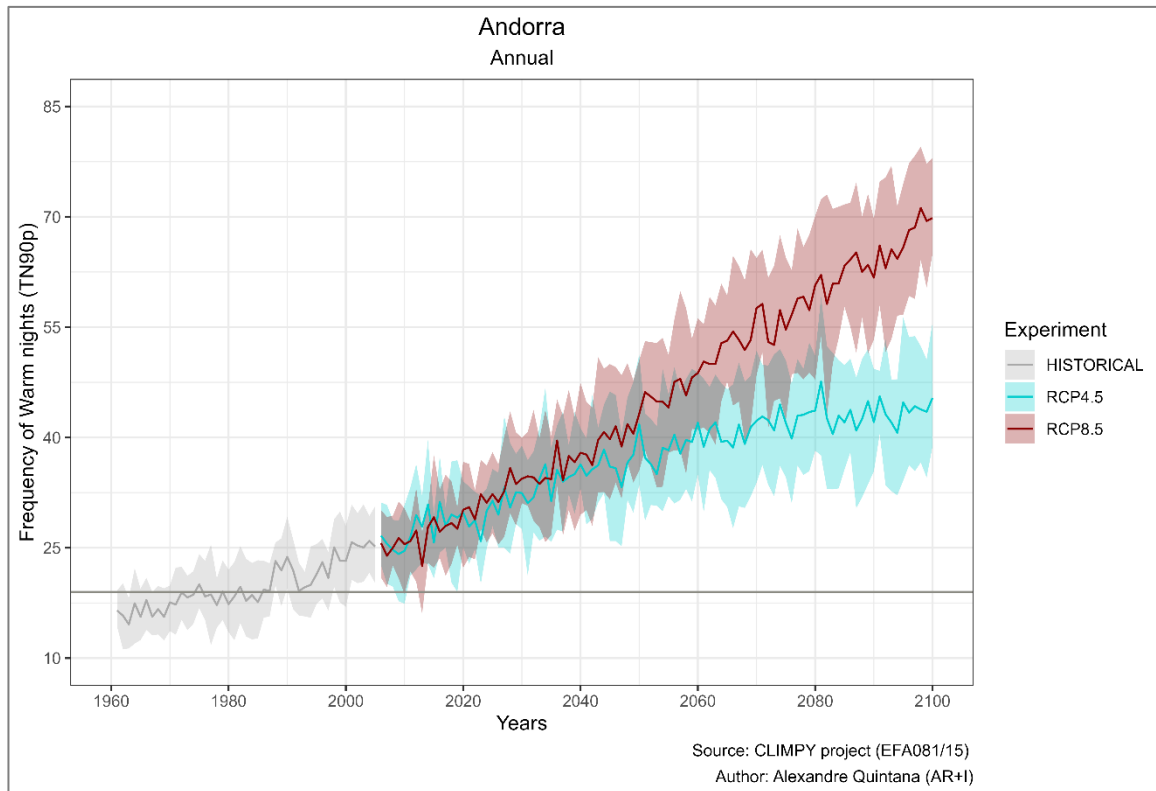


Figura 42. Evolució del nombre de nits càlides (TN90p) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

Si analitzem l'evolució en el nombre de nits càlides (TN90p), trobem un increment progressiu al llarg del S. XXI pels dos escenaris analitzats. Comportament coherent amb l'evolució dels valors mitjans de la temperatura mínima mostrats anteriorment.

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.

Pel que fa al comportament estacional, l'evolució que ha experimentat aquest índex destaca especialment a l'estiu i la tardor, en seguir una tendència d'augment en el nombre de nits càlides significatiu a finals de segle molt superior en el cas de l'estiu, en ser l'estació més càlida de l'any. A l'hivern i la primavera, es on trobem els increments més moderats, destacant-hi però, l'hivern, pel fort increment que experimenta.

La distribució espacial dels punts del territori permet observar perfectament com l'augment de nits càlides (expressades en %) es molt semblant entre els 14 punts del territori analitzats i per tant, no es pot arribar a establir una diferenciació clara a escala altitudinal, tal com s'ha comentat amb l'anàlisi evolutiu prèviament realitzat. Encara així, si comparem un punt situat a alta muntanya (Ordino, 2260 metres) amb un situat a fons de vall (Sant Julià, 1740 metres), la diferenciació en l'increment progressiu de nits càlides es lleugerament superior en el punt situat a fons de vall.

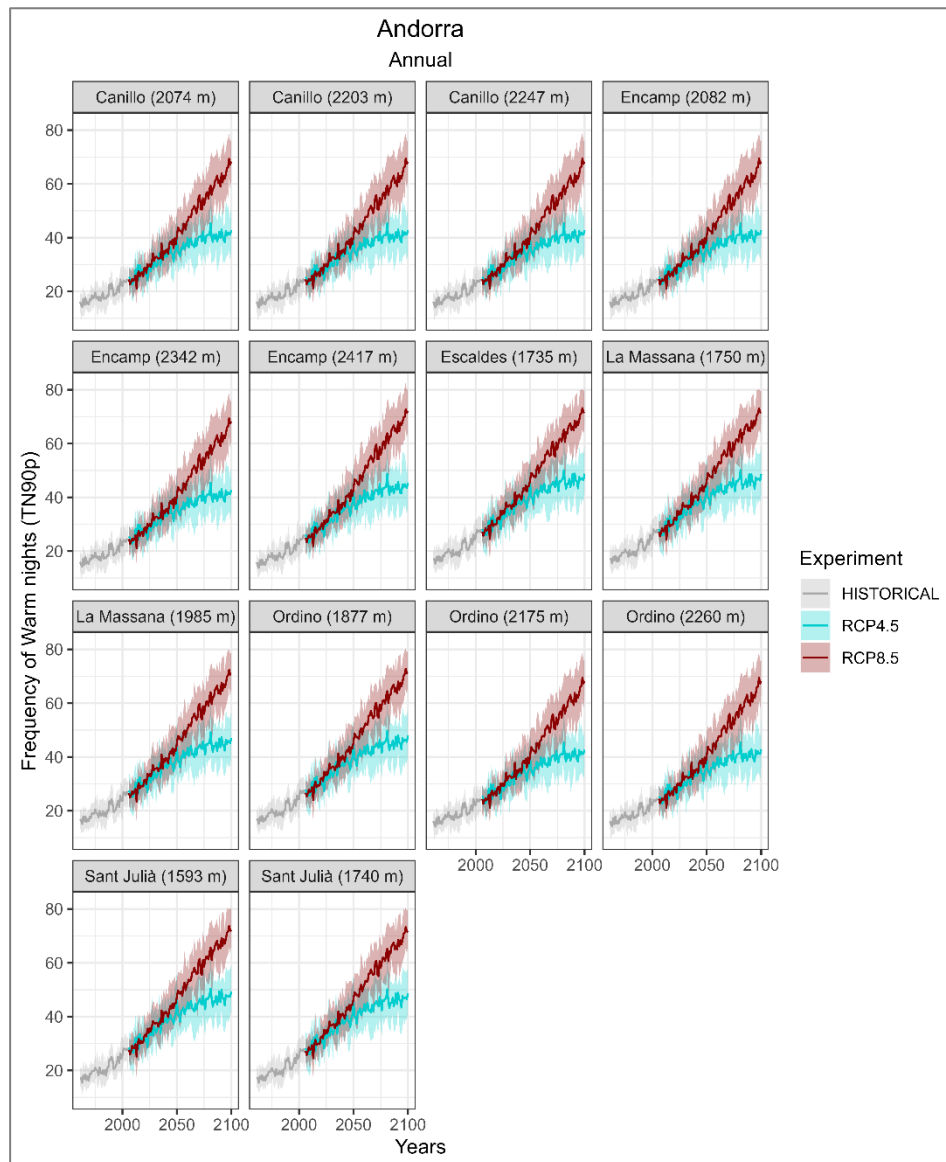


Figura 43. Evolució del nombre de nits càlides (TN90p) segons cada punt del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83. Elaboració pròpia a partir de dades del CLIMPY project proporcionades per Andorra Recerca + Innovació (AR + I).

En definitiva, l'evolució del nombre de nits càlides al llarg d'aquest segle per tots els punts analitzats condueix a un augment anual respecte als valors mitjans del període de referència, encara que amb diferències segons l'escenari d'emissió a destacar.

6.2.2.5 Cold spell duration index (CSDI)

A continuació, comentarem el resultat de l'índex *Cold spell duration index (WSDI)*, el qual realitza un recompte anual de dies amb almenys 6 dies consecutius de temperatura mínima situada per sota del percentil 10. Tal com s'observa a la figura 44, l'indicador de durada de ratxa freda segueix una tendència lleugerament negativa. En aquest cas, la configuració del gràfic es diferent, pel fet que les dades obtingudes a partir dels models i tècniques de regionalització dona lloc a un augment dels valors probables a finals de segle.

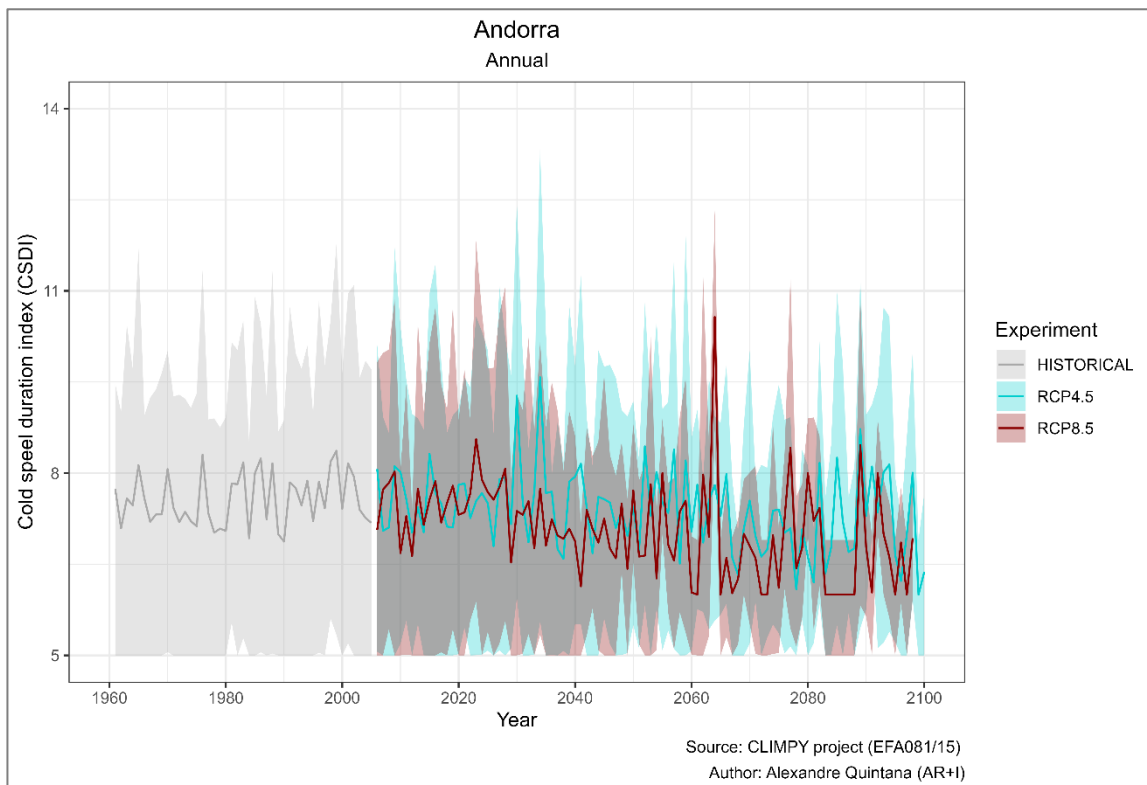


Figura 44. Evolució de l'indicador de durada de ratxa freda (CSDI) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

L'evolució de l'indicador de durada de ratxa freda (CSDI) mostra un lleuger descens al llarg del S. XXI pels dos escenaris analitzats, establint així un comportament coherent amb l'evolució dels valors mitjans de la temperatura mínima comentats en detall al primer punt dels resultats, però com es lògic, en ser 6 o més dies, no presenta una gran diferenciació al llarg del període analitzat.

A finals de segle s'espera que el nombre de dies amb almenys 6 dies consecutius de temperatura mínima situada per sota del percentil 10 es situï aproximadament en 6,5 dies i de manera constant per l'escenari RCP8.5, i en 4,5 dies respecte l'escenari d'estabilització RCP4.5, encara que l'augment que es produeix en aquest darrer escenari, a diferència del que succeeix en la major part dels índex, presenta una dispersió de valors molt elevada i un descens gairebé idèntic al del escenari més emissiu.

La distribució espacial dels punts del territori permet observar perfectament com l'increment d'aquest índex es força similar entre els 14 punts del territori analitzats i per tant, no es pot establir una clara diferenciació a escala altitudinal. Encara així, els punts situats a alta muntanya presenten una anomalia comuna l'any 2065 per l'escenari més emissiu, en presentar un valor anual molt més elevat.

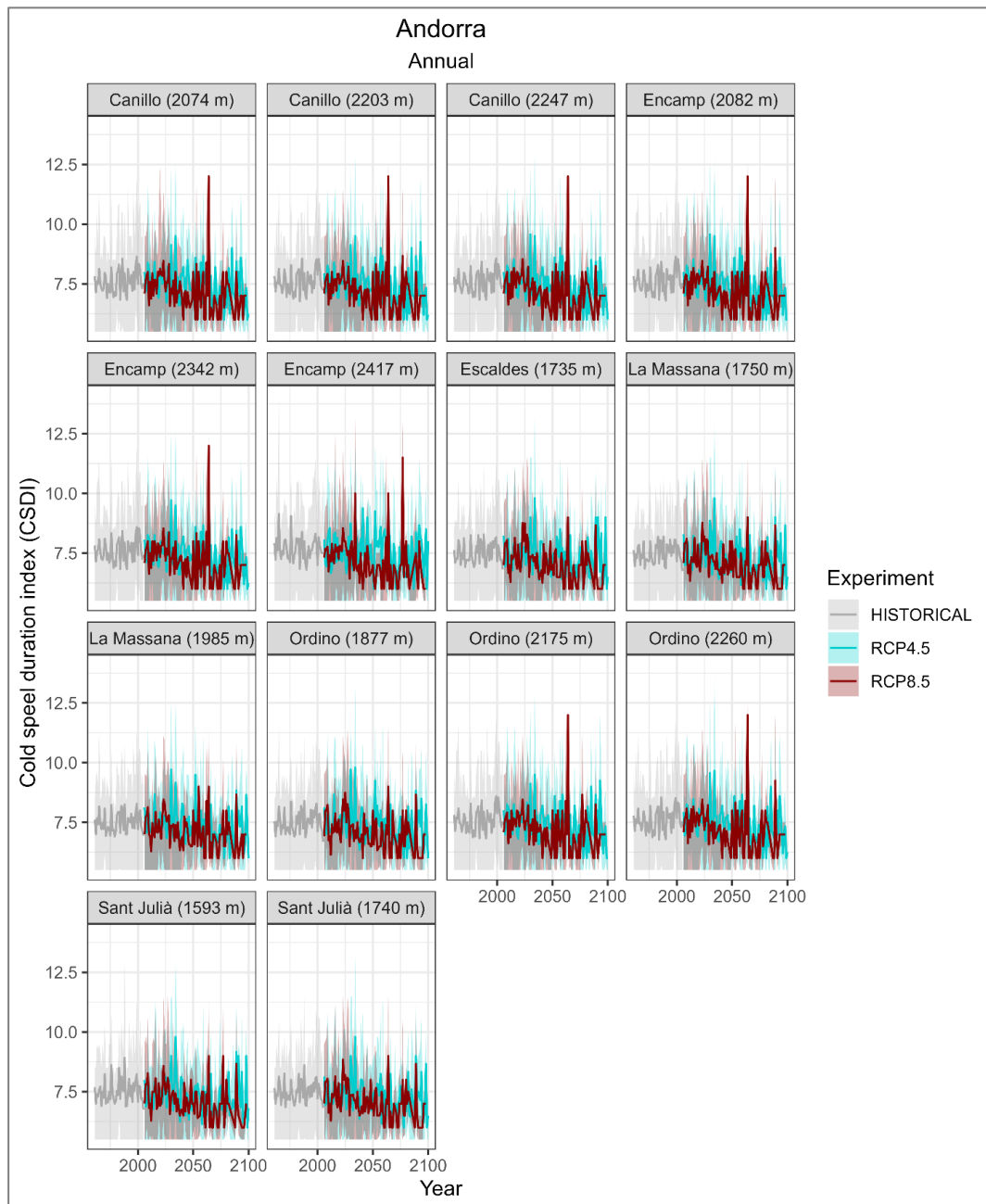


Figura 45. Evolució de l'indicador de durada de ratxa freda (CSDI) segons cada punt del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

Per tant, el nombre de dies amb almenys 6 dies consecutius de temperatura màxima situada per sobre del percentil 90 per tots els punts analitzats condueix a un lleuger descens anual a finals de segle respecte als valors mitjans del període de referència, amb valors molt semblants pels dos escenaris d'emissió

6.2.3 Precipitació

Un cop analitzats els índex corresponents a la temperatura màxima i mínima, ja ens podem centrar en els resultats corresponents als índex de l'ETCCDMI utilitzats per l'anàlisi de la precipitació. Aquests s'han centrat en 2 índex principals: Days when PRCP ≥ 10 mm (R10) i Days when PRCP ≥ 10 mm (R20). En conjunt, 2 índex que permetran avaluar la vulnerabilitat d'Andorra als impactes del canvi climàtic en funció dels escenaris climàtics futurs escollits (RCP4.5 i RCP8.5) davant escenaris de precipitació.

6.2.3.1 Days when PRCP ≥ 10 mm (R10)

En primer lloc, comentarem el resultat referent a l'índex *Days when PRCP ≥ 10 mm (R10)*, que mesura el nombre de dies en què la precipitació és igual o superior a 10 mm, on tal com mostra la figura 46 segueix una tendència totalment estable des del període de referència fins al final del segle XXI.

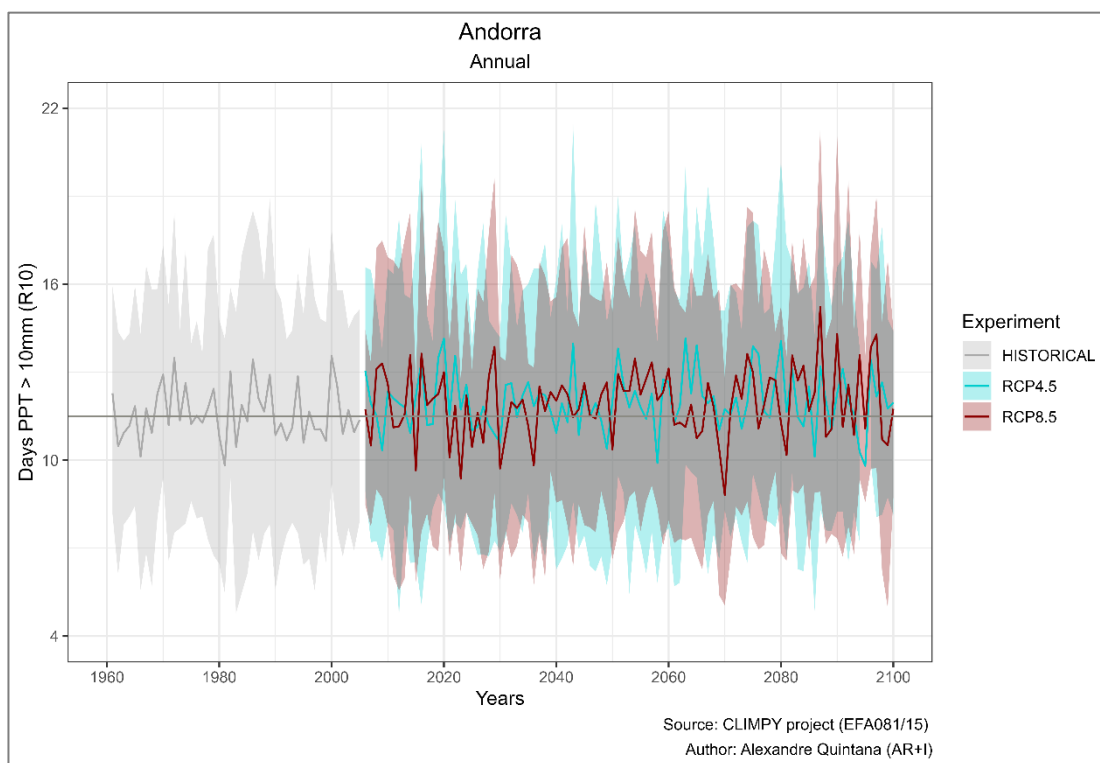


Figura 46. Evolució del nombre de dies de precipitació ≥ 10 mm (R10) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

L'evolució en el nombre de dies en què la precipitació és igual o superior a 10 mm mostra una estabilitat constant al llarg del S. XXI pels dos escenaris analitzats. Aquest comportament és coherent amb l'evolució dels valors mitjans de precipitació mostrats al primer apartat dels resultats, donada l'estabilitat que presenten. A finals de segle, s'espera que tant per l'escenari més emissiu com per l'escenari menys emissiu, aquest índex es mantingui de manera estable entre els 10 i 15 dies al llarg de tot el període objecte d'estudi. Això sí, amb oscil·lacions anuals d'ambdós escenaris d'emissions força destacades, encara que més accentuades en el cas de l'escenari RCP8.5

Centrant-nos en el comportament estacional, l'evolució que ha experimentat aquest índex destaca a l'hivern i la primavera, on segueixen una tendència bastant homogènia entre els diferents punts del territori, sense cap increment. Tot i això, i com passava amb la temperatura màxima i mínima, a l'estiu es produeix la major variació, esdevenint l'estació amb l'increment més gran de precipitació respecte el període de referència, encara que en cap cas definitiu. Així doncs, pel que fa al comportament estacional a finals de segle, s'aprecia una estabilitat en totes les estacions a excepció de l'estiu, que presenta un increment més destacat.

Entre ubicacions que tenen la mateixa altitud, el nombre de dies de precipitació ≥ 10 mm pateix un increment major als punts de fons de vall respecte els que es troben a alta muntanya. A la figura inferior, es pot veure aquesta diferenciació altitudinal segons el gradient vertical.

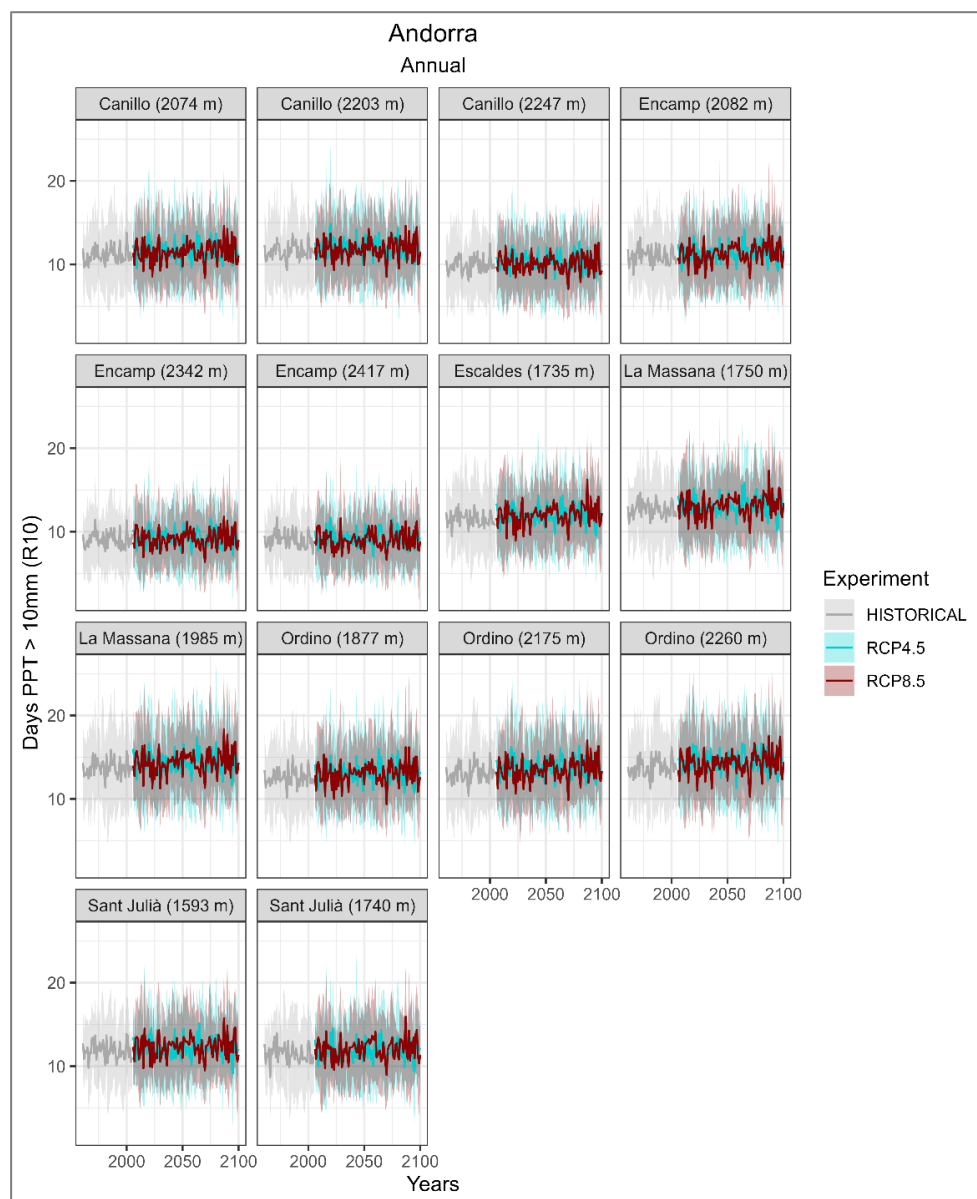


Figura 47. Evolució del nombre de dies de precipitació ≥ 10 mm (R10) segons cada punt del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83. Elaboració pròpia a partir de dades del CLIMPY project proporcionades per Andorra Recerca + Innovació (AR + I).

En conjunt, s'observa com els punts localitzats a les parròquies situades a l'extrem sud del territori i la vall central, és a dir, aquells de menys altitud, tenen una evolució superior respecte els punts situats a alta muntanya, els quals pateixen una disminució més pronunciada al llarg del període objecte d'estudi així com a mesura que augmenten en altitud. Per tant, el gradient altitudinal determina la tendència evolutiva tant estable d'aquest índex.

6.2.3.2 Days when PRCP \geq 20 mm (R20)

Tot seguit comentarem el resultat referent a l'índex *Days when PRCP \geq 20 mm (R20)*, que mesura el nombre de dies en què la precipitació és igual o superior a 20 mm, on tal com mostra la figura 48 segueix una tendència estable des del període de referència fins al final del segle XXI.

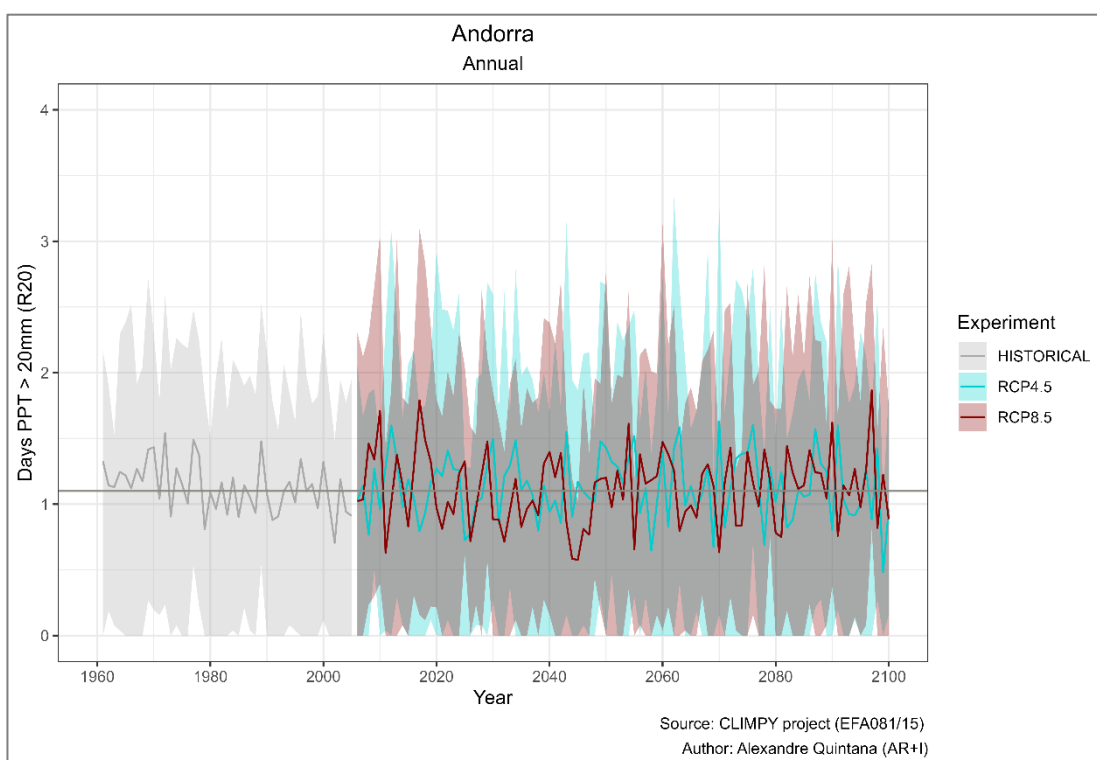


Figura 48. Evolució del nombre de dies de precipitació ≥ 20 mm (R20) al Principat d'Andorra per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

L'evolució en el nombre de dies en què la precipitació és igual o superior a 20 mm també mostra una estabilitat constant al llarg del S. XXI pels dos escenaris analitzats. Aquest comportament és coherent amb l'evolució dels valors mitjans de precipitació mostrats al primer apartat dels resultats, donada l'estabilitat que presenten. A finals de segle, s'espera que tant per l'escenari més emissiu com per l'escenari menys emissiu aquest índex es mantingui de manera estable al voltant d'un dia anual al llarg de tot el període objecte d'estudi, encara que amb oscil·lacions anuals d'ambdós escenaris d'emissions força destacades.

Centrant-nos en el comportament estacional, aquest índex pateix un increment moderat tant a l'hivern com a la tardor entre els diferents punts del territori. A l'estiu es produeix la menor variació, i l'hivern esdevé l'estació amb l'increment més gran de precipitació respecte el període de referència. Així doncs, pel que fa al comportament estacional a finals de segle, s'aprecia una estabilitat en totes les estacions a excepció de l'estiu, que presenta un increment més destacat.

Entre ubicacions que tenen la mateixa altitud, el nombre de dies de precipitació superior a 20 mm pateix un increment lleugerament major als punts de fons de vall respecte els que es troben a alta muntanya. A la figura inferior es pot observar com la diferenciació altitudinal segons el gradient vertical es gairebé inapreciable. Per tant, aquest gradient no determina la tendència evolutiva d'aquest índex.

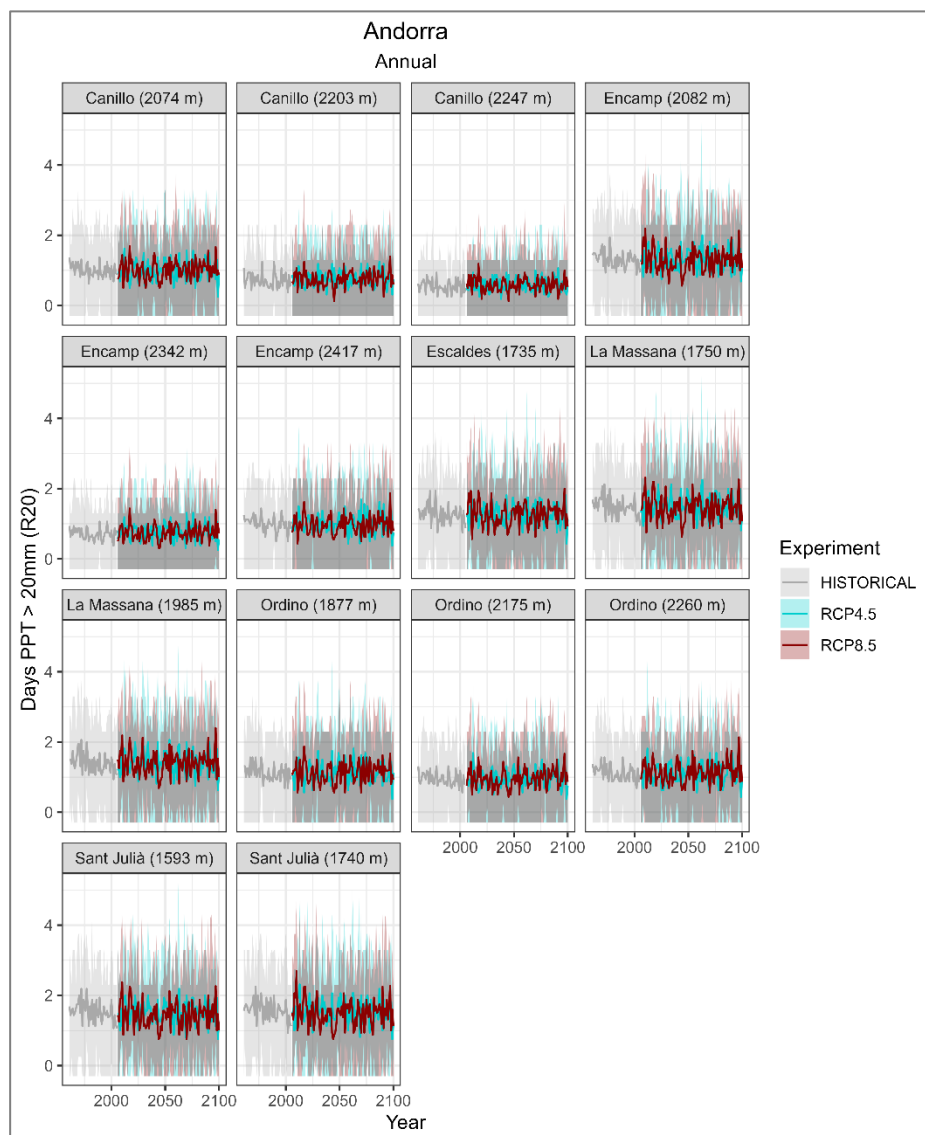


Figura 49. Evolució del nombre de dies de precipitació ≥ 20 mm (R20) segons cada punt del territori andorrà per a cadascun dels RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83. Elaboració pròpia a partir de dades del CLIMPY project proporcionades per Andorra Recerca + Innovació (AR + I).

Finalment, per tal de poder visualitzar i conèixer de forma exacta l'evolució de tots els índex analitzats en aquest apartat dels resultats, s'ha realitzat una taula on es recullen tots aquests increments i descensos segons cada escenari, donant-nos així un coneixement major que no l'obtingut en un gràfic. Per a fer-ho s'ha calculat la mediana del període de referència (1986-2005) i del darrer període d'estudi (2081-2100).

Changes in Climate Indices					
Indices (ETCCDMI)	Scenario	Median (1986-2005)	Scenario	Median (2081-2100)	Unit
Summer days (SU25)	HISTORICAL	4.52	RCP4.5	15.2	Days
			RCP8.5	41.5	
Icing days (ID0)	HISTORICAL	41.2	RCP4.5	25.0	Days
			RCP8.5	12.8	
Cold days (TX10p)	HISTORICAL	15.2	RCP4.5	6.88	%
			RCP8.5	2.73	
Warm days (TX90p)	HISTORICAL	22.5	RCP4.5	43.5	%
			RCP8.5	65.7	
Warm spell duration index (WSDI)	HISTORICAL	8.27	RCP4.5	10.8	Days
			RCP8.5	15.2	
Frost days (FD0)	HISTORICAL	179.2	RCP4.5	142.5	Days
			RCP8.5	102.1	
Tropical nights (TR20)	HISTORICAL	No value	RCP4.5	No value	Days
			RCP8.5	0.835	
Cold nights (TN10p)	HISTORICAL	15.7	RCP4.5	7.51	%
			RCP8.5	3.02	
Warm nights (TN90p)	HISTORICAL	23.1	RCP4.5	43.2	%
			RCP8.5	64.2	
Cold spell duration index (CSDI)	HISTORICAL	7.76	RCP4.5	7.02	Days
			RCP8.5	6.53	

Days when PRCP \geq 10mm (R10)	HISTORICAL	11.3	RCP4.5	12.0	Days
			RCP8.5	12.3	
Days when PRCP \geq 20mm (R20)	HISTORICAL	1.08	RCP4.5	1.06	Days
			RCP8.5	1.22	

Taula 9. Evolució dels índex climàtics a partir del càlcul de la mediana de dos horitzons de pronòstic i escenaris (RCP4.5 i RCP8.5). Elaboració pròpia a partir dels criteris establerts pel ETCCDMI i pel sisè informe de l'IPCC (IPCC, 2023)

Un cop s'han exposat de forma clara els resultats del present treball, podem relacionar-los amb diferents articles científics, tant nacionals com internacionals. El primer d'ells, tal com se l'ha referenciat en múltiples ocasions és l'article que ha servit de base per a la realització de gran part del treball (Amblar-Francés *et al.*, 2020), en realitzar projeccions d'alta resolució del canvi climàtic a la regió dels Pirineus, on s'inclou Andorra. En aquest article s'extreuen conclusions molt similars a les obtingudes en el meu estudi, fet lògic i comprensible donat que la base de dades utilitzada ha estat la mateixa que he utilitzat en el meu estudi, és a dir, del projecte POCTEFA CLIMPY. En aquest estudi doncs, s'obtenen resultats molt similars, on l'impacte del escenari també esdevé molt important a partir de la segona meitat del segle XXI, amb canvis diferenciats per massissos de temperatures extremes i diferents índexs extrems associats i amb valors de precipitació que presenten una estabilitat al llarg dels anys, seguint així la mateixa tendència.

Un altre article molt relacionat (Jacob *et al.*, 2013) realitza un estudi similar al presentat en aquest treball, però utilitzant les projeccions climàtiques d'alta resolució EURO-CORDEX pels escenaris RCP8.5 i RCP4.5. Aquest article enfocat a la investigació d'impactes climàtics a Europa exposa resultats molt similars, d'una banda per estudiar el canvi anual mitjà de temperatura i precipitació fins a final de segle pels mateixos escenaris d'emissió i en segon lloc, perquè remarca un augment robust i estadísticament significatiu de la temperatura, amb diferències regionals, d'aproximadament 1-4,5 °C pel escenari RCP4.5 i de 2,5-5,5 °C pel RCP8.5 i una tendència al estancament pel que fa a la precipitació en països del Sud d'Europa. Així doncs, concorda amb els canvis comentats en els resultats de l'estudi, on la veritable variació de la temperatura deriva de la magnitud dels canvis que es produeixen entre els dos escenaris d'emissió.

Finalment, considero important destacar un darrer article (Pepin *et al.*, 2022), el qual se centra en avaluar el canvi climàtic i els seus patrons d'elevació en entorns de muntanya. L'interès d'aquest article es relaciona amb la sectorització altitudinal exposada al llarg dels resultats, en exposar com la tendència de temperatura a les muntanyes ha mostrat 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. Tot i això, remarca com hi ha diferències regionals independents de l'elevació, tal com s'ha exposat en els resultats.

7. Discussió

En els darrers anys, la demanda social per quantificar els impactes locals dels nivells d'escalfament global ha augmentat considerablement (Diffenbaugh *et al.*, 2017). En aquest context es presenten aquestes projeccions climàtiques per tal d'abordar la sensibilitat específica de les regions de muntanya a condicions climàtiques globals. En el nostre estudi, s'han generat projeccions climàtiques d'alta resolució mitjançant l'aplicació de dos mètodes estadístics de reducció d'escala (regressió per a les temperatures màxima i mínima, i anàleg per a la precipitació) sobre els Pirineus (Amblar-Francés *et al.*, 2020), en concret sobre el massís pirinenc corresponen a Andorra, territori englobat dins el marc del projecte CLIMPY.

Les projeccions de models climàtics globals i regionals indiquen que probablement l'escalfament i les sequeres continuaran, encara que la seva amplitud presentarà canvis després del 2050 altament dependents de l'escenari d'emissions que s'assoleixi. Tot i que els models climàtics prediuen un augment general dels extrems de temperatura per a finals del S. XXI, la distribució espacial exacta dels canvis de temperatura i molt més en la precipitació segueix presentant un alt grau d'incertesa, ja que són fortament dependents del model.

Sabent que existeix aquesta incertesa, el que està clar, es que les temperatures màximes i mínimes mostren una clara tendència a l'augment, amb augments més significatius de les temperatures màximes en comparació amb les mínimes. Els resultats extrets en aquest treball indiquen que la resposta de les condicions meteorològiques locals del principat d'Andorra es més forta a finals de segle i per a l'escenari més emissiu (RCP8.5).

Així doncs, l'augment progressiu de les temperatures màximes durant aquest segle serà més ràpid per a l'escenari RCP8.5 i més lent per a l'escenari RCP4.5. Per aquest darrer escenari, la variació del valor mitjà de temperatura màxima serà d'uns 3°C aproximadament. A escala anual, les variacions estarien compreses entre 4.5 °C i 6.4 °C a finals de segle per a l'escenari més emissiu, és a dir, un augment molt marcat respecte el període de referència, on els canvis esperats a l'estiu són força més superiors als que s'esperen per la resta d'estacions.

Tant pel que fa a la temperatura màxima com pel que fa a la temperatura mínima, s'espera que l'evolució anual que es produeix entre els punts situats a fons de vall (< 2000 metres) i els situats a alta muntanya (> 2000 metres) sigui molt similar, indicant així una tendència positiva similar entre els diferents punts del territori.

En general, els canvis futurs de precipitació no presenten una tendència clara i fins i tot poden apuntar cap a un sentit diferent de canvi (positiu o negatiu), degut principalment a la incertesa provinent dels models, és a dir, la concordança en el sentit que es produiria el canvi és menor que l'observat en les temperatures, per la qual cosa, poder extreure-hi conclusions sòlides, es una tasca força més complexa que en el cas de les temperatures. Malgrat tot, es poden apreciar lleugers increments que oscil·len al llarg de la segona meitat del S. XXI.

Relacionat amb la precipitació, la comprensió d'aquesta variable en el futur es de vital interès, ja que si s'augmenten els anys amb temporades deficitàries, aquests podrien esdevenir un problema per a la gestió del recurs hídric al país. Al respecte, Domènech, Travesset, Albalat, Traperó i Pons (2022) van indicar: “tots els escenaris projectats fins al moment comportaran una reducció del cabal mitjà dels rius, on l'efecte de l'augment dels escenaris d'anys de sequera agreujarà intensament la reducció del seu cabal i podrà provocar en el pitjor dels casos la pèrdua del 70% d'aquest”.

A més del comportament de les anomalies a una escala anual, la disponibilitat de sèries diàries ha permès poder calcular índex climàtics extrems, tant de temperatura com de precipitació. Així doncs, des del 1961 (primer any amb dades diàries registrades), s'ha experimentat un increment dels extrems associats a un clima més càlid. Un clar exemple, el trobem amb el nombre de dies d'estiu (en què s'ha assolit o superat el llindar dels 25 °C com a temperatura màxima diària registrada), en haver patit un increment de mitjana de 15 dies per a l'escenari RCP4.5 respecte la mitjana registrada pel període de referència i de gairebé 50 dies per a l'escenari més emissiu.

L'increment en el nombre dies càlids i nits càlides (TX90p i TN90p) és molt destacat a finals de segle i especialment per l'escenari RCP8.5, on l'impacte d'aquests índex esdevé molt important, amb un increment molt destacat. En concret, pel que fa a l'evolució del nombre de dies càlids, ens trobem que per l'escenari d'estabilització RCP4.5, aquest increment es situa al voltant del 30 % respecte el període de referència, mentre que per l'escenari RCP8.5, se situa al voltant del 55 %.

Pel que fa a la durada de ratxa càlida (WSDI), hi ha concordança en què les onades de calor seran més llargues, sent l'increment més acusat a l'escenari més emissiu i a finals del S. XXI. La dispersió més gran en la magnitud de la seva projecció, està induïda en part per les tècniques de regionalització que s'han utilitzat, donant lloc a un augment de la forquilla de valors probables per a finals de segle, on de mitjana, la durada de ratxa càlida més llarga tindria entre 5 i 10 dies més que la mitjana del període de referència.

L'evolució dels índex corresponents al nombre de dies amb glaçades (FD0) i el nombre de dies glaçats (ID0) es clarament negativa i estadísticament significativa, és a dir, el canvi climàtic està causant un descens en la freqüència de glaçades a Andorra des d'inicis del S. XX fins a finals del XXI, el que significa que han augmentat els dies sense gelades. Aquesta tendència es molt rellevant pels efectes que podria tenir sobre el permafrost o en processos de gelifracció en un territori de muntanya com es el Principat d'Andorra.

En definitiva, dels 10 índexs climàtics definits per l'ETCCDI relacionats amb la temperatura, presenten una tendència a l'augment: els dies d'estiu (SU25), els dies càlids (TX90p), l'indicador de durada de ratxa càlida (WSDI), les nits tropicals (TR20) i les nits càlides (TN90p), així com un augment progressiu en l'evolució temporal de les temperatures màximes i mínimes durant aquest segle, mentre que presenten una tendència negativa (de disminució), els dies glaçats (ID0), els dies de glaçada (FD0), les nits fredes (TN10p), els dies freds (TX10p) i l'indicador de durada de ratxa freda (CSDI).

En conseqüència dels resultats exposats anteriorment respecte a la precipitació, s'ha de destacar que el nombre de dies amb precipitació superior a 10 mm (R10) i el nombre de dies amb precipitació superior a 20 mm (R20), no presenten cap tendència clara d'increment o reducció.

Finalment, cal remarcar que els resultats presentats pels 14 punts de l'àrea geogràfica d'on procedeixen els registres (Andorra), permeten poder fer una extrapolació d'aquests resultats pel conjunt del país, en ser representatius de les diferents zones geogràfiques del territori. Encara així, els punts escollits en el marc del projecte CLIMPY, es podrien ampliar en un futur o comparar-se amb les sèries climàtiques de les quals disposa el Servei Meteorològic Andorrà i Andorra Recerca + Innovació, per tal d'ampliar l'abast geogràfic de les conclusions que es puguin extreure.

De cara al futur, seria de gran interès poder arribar a realitzar estudis on s'ampliï la sectorització realitzada en aquest treball amb més resolució, no únicament entre fons de vall i alta muntanya, sinó disgregant-ho entre diferents nivells altitudinals, així com poder extrapolat aquesta metodologia a altres territoris de muntanya, per poder descriure similituds i diferències entre territoris que comparteixen la component altitudinal com a variable clau.

8. Conclusions

La conclusió final que es pot ressaltar és 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. Les projeccions climàtiques han permès determinar com l'augment de la temperatura serà proporcional a l'augment de les emissions de GEH per cada un dels dos escenaris analitzats, d'una banda, el més emissiu (RCP8.5) i d'altra banda l'escenari més estable (RCP4.5). A diferència de la temperatura, les projeccions futures de precipitació no mostren una tendència clara.

Si es tenen en compte els objectius proposats al apartat 3.1 d'aquest estudi, es pot considerar que s'han pogut assolir i donar resposta a tots els objectius plantejats.

Pel que fa a l'objectiu principal d'aquest treball d'investigació: *“caracteritzar l'evolució del canvi climàtic a Andorra mitjançant l'anàlisi i càlcul de projeccions climàtiques”* es pot concloure que amb l'anàlisi evolutiu de la temperatura i la precipitació, i l'exposició de resultats dels 12 índex tractats en aquest estudi s'ha pogut fer un pas endavant sobre la coneixença futura d'Andorra respecte variables climàtiques que només disposen de dades fins a l'actualitat, el que permet poder planificar i adaptar mesures per fer front a possibles impactes. A part, s'han pogut assolir tots els objectius específics plantejats.

El primer d'ells planteja si es podrien identificar les àrees geogràfiques del territori més vulnerables als impactes del canvi climàtic, fet que s'ha pogut dur a terme, ja que per cada variable, tal com s'observa als punts 11.1 i 11.2 de l'Annex, s'ha obtingut cartografia climàtica a nivell individual de tots els índex i tendències per cada punt del territori. Aquest objectiu específic enllaça amb el referent a poder establir una sectorització altitudinal dels punts del territori segons si es troben a fons de vall (< 2000 metres) o a alta muntanya (> 2000 metres), on tant pel que fa a les anomalies tèrmiques i pluviomètriques com pel que fa al càlcul d'índex climàtics, s'ha pogut analitzar mitjançant l'exposició gràfica dels 14 punts de manera individual.

A continuació, també s'han pogut identificar possibles canvis estacionals en l'anàlisi d'índex i variables, en haver calculat la variació estacional que experimenten els diferents punts que conformen el territori, associant-ho en molts casos amb el factor altitudinal.

Pel que fa als objectius de definir un conjunt d'indicadors climàtics en el marc de l'Estratègia Nacional d'Adaptació al Canvi Climàtic i poder avaluar la vulnerabilitat d'Andorra als impactes del canvi climàtic en funció dels escenaris climàtics futurs escollits (RCP4.5 i RCP8.5) també s'han pogut assolir, en disposar d'informació dels índex climàtics més importants, tant pel que fa al conjunt del territori andorrà (escala nacional), com a escala individualitzada de cada punt (parroquial) pels escenaris escollits en aquest treball, servint el càlcul d'aquests indicadors de base per definir els indicadors climàtics futurs de l'ENACC, en orientar els esforços en mesures d'adaptació que preparin la població per afrontar extrems climàtics que facin front als canvis en la productivitat i la qualitat dels cultius existents, aprofitant les oportunitats derivades de la disminució del període de gelades i l'increment de les temperatures mitjanes.

També s'ha pogut conèixer en quin any s'assoliran l'1.5 i 2.0 graus d'augment de temperatura segons cada escenari climàtic i segons la variable analitzada (temperatura màxima, mínima i mitjana) a partir del període de referència 1986-2005. Tal com s'ha comentat al apartat metodològic, aquests valors s'han pogut obtenir després d'un llarg procés d'elaboració de codi per poder trobar el primer any on s'assoleix aquest increment de temperatura.

A part, ho podem relacionar amb l'objectiu d'analitzar tendències climàtiques de temperatura i precipitació i avaluar la seva evolució al llarg dels anys per poder identificar futurs impactes i vulnerabilitats, ja que ens dona informació clau juntament amb el càlcul dels índex climàtics, sobre com evolucionaran aquestes variables al llarg del temps segons l'escenari d'emissions que s'acabi assolint.

La hipòtesi de partida d'aquest treball exposada al apartat 3.2, se centra en la premissa que el càlcul de tendències i índex de canvi climàtic a Andorra basats en projeccions climàtiques serviran de base per poder identificar en estudis posteriors l'impacte i adaptació del canvi climàtic de diferents sectors, com l'energia, l'agricultura, el turisme o la salut entre d'altres.

Un cop obtinguts els resultats del present estudi, es pot dir que s'ha confirmat la hipòtesi plantejada, pel fet que les projeccions climàtiques a llarg termini han donat resultats i informació tan rellevant que pot servir per entendre l'afectació a futur del canvi climàtic a Andorra, així com per la necessitat de disposar d'índex i indicadors climàtics de qualitat, els quals permetran poder entendre la magnitud del problema i posteriorment poder dissenyar estratègies d'adaptació efectives al territori.

Des del punt de vista personal, aquest treball d'investigació m'ha servit per poder tenir un major coneixement del meu país, així com saber el funcionament d'un centre de recerca científica en relació al canvi climàtic, ja que durant la realització del treball, en dur-lo a terme gran part en un centre d'investigació, m'ha donat l'oportunitat d'aprendre un futur àmbit d'interès professional donat el meu interès per l'afectació del canvi climàtic i els fenòmens climàtics que afecten un territori.

Un dels punts del treball que més problemàtiques m'ha generat, és la part de la proposició d'una metodologia adient pel territori. Això es deu a que no hi ha una metodologia prèviament establerta ni un mètode concret per desenvolupar aquest tipus de treball, sinó que únicament es disposa d'antecedents que utilitzen mètodes similars però amb diferències, especialment pel que fa a l'anàlisi d'alta resolució dels punts del territori.

En definitiva, malgrat que Andorra sigui un territori molt petit, no s'està aconseguint complir l'objectiu marcat pel Acord de París l'any 2015 de limitar l'esclafament global sota els 2 graus de temperatura en comparació als nivells pre-industrials. Així i tot, 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 conviurem, per la qual cosa, la inversió en investigació es fonamental per definir estratègies de futur que garanteixin l'adaptació del territori davant el canvi climàtic.

Bibliografia

Aguilar, E., Peterson, T.C., Obando, P., Frutos, R., Retana, J., Solera, M., Soley, J., González-García, I., Araujo, R., Santos, A., Valle, V. & Brunet, M. (2005). Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003. *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2005JD006119.

Ambar-Francés, M.P., Ramos, P., Casado, M.A., Pastor, A. & Rodríguez, 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.

Anderegg, W., Prall, J., Harold, J. & Schneider, S. (2010). Expert Credibility in Climate Change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 107. 12107-9, doi:10.1073/pnas.1003187107.

AR+I, Andorra Recerca + Innovació (2022). Observatori de la Muntanya d'Andorra. Índex Climàtics. <https://www.oma.ad/ca/index-climatics>

Barrera-Escoda, A. & Cunillera, J. (2011). Projeccions de canvi climàtic per a Catalunya (NE Península Ibèrica). Part I: Modelització climàtica regional. *Tethys*, 8, pp. 77-89, doi:10.3369/tethys.2011.8.08

Batalla, M., Ninyerola, M., Trapero, L. & Esteban, P. (2016). ACDA: Atlas climàtic digital d'Andorra (període 1981-2010). Servidor de mapes. Institut d'Estudis Andorrans (IEA), Universitat Autònoma de Barcelona (UAB). URL: <http://www.acda.ad>

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., Trapero, L., Pons, M., Copons, R., López-Moreno, J.I., Luna, Y., 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, pp. 53–66.

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

Diaz, H.F., Grosjean, M. & Graumlich, L. (2003). Climate Variability and Change in High Elevation Regions: Past, Present and Future. *Climatic Change* 59, 1–4, doi: 10.1023/A:1024416227887

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., Ninyerola, M. & Prohom, M. (2009). Spatial Modelling of air temperature and precipitation for Andorra (Pyrenees) from daily circulation patterns, a Theoretical and Applied Climatology, 96:43-56, doi:10.1007/s00704-008-0035-3

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, pp. 87-106, doi:10.3989/Pirineos.2012.167005.

Esteban, P., Prohom, M., Cunillera, J. & Trapero, L. (2017). Tendències recents del clima a Andorra (1950-2010): Resultats del projecte acció clima – OPCC. Revista del CENMA, 9.

Estratègia Energètica Nacional i de lluita contra el Canvi Climàtic 2020-2050. (2021). Govern d'Andorra. Departament de Medi Ambient i Sostenibilitat. Oficina de l'energia i del canvi climàtic.

Hock, R., Bliss, A., Marzeion, B., Giesen, R., Hirabayashi, Y., Huss, M. & Slangen, A. (2019). GlacierMIP – A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections. Journal of Glaciology, 65(251), pp. 453-467, doi:10.1017/jog.2019.22

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.

IPCC. (2023). Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6). Longer Report. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>

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

Kirtman, B., Power, S. B., Adedoyin, J. A., Boer, G. J., Bojariu, R., Camilloni, I., Doblas-Reyes, F. J., Fiore, A. M., Kimoto, M., Meehl, G. A., Prather, M., Sarr, A., Schär, C., Sutton, R., van Oldenborgh, G. J., Vecchi, G. & Wang, H.J. Near term Climate Change: Projections and Predictability in Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, 2013.

Kitoh, A., Ose, T. & Takayabu, I. (2016). Dynamical downscaling for climate projection with high-resolution MRI AGCM-RCM, Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 2016, Volume 94A, Pages 1-16, doi:10.2151/jmsj.2015-022, 2016

- Lemus-Canovas, M., Lopez-Bustins J.A., Martín, J., Halifa, A., Insua, D., Martinez, J., Trapero, L., Serrano, R. & Cuadrat, J.M. (2021). Characterisation of Extreme Precipitation Events in the Pyrenees: From the Local to the Synoptic Scale. *Atmosphere* 12, no. 6: 665, doi:10.3390/atmos12060665
- Lemus-Canovas, M. & Lopez-Bustins, J. (2021). Assessing internal changes in the future structure of Dry-Hot compound events. The case of the Pyrenees, doi:10.5194/nhess-2021-5.
- Navarro, C., Tarapues, J., Thornton, P., Jarvis, A. & Ramirez, J. (2020). High-resolution and bias-corrected CMIP5 projections for climate change impact assessments. *Scientific Data*, doi:10.1038/s41597-019-0343-8.
- OPCC, 2018: El canvi climàtic als Pirineus: impactes, vulnerabilitats i adaptació. <https://www.opcc-ctp.org/>.
- Pérez-Zanón, N., Sigró, J. & Ashcroft, L. (2016). Temperature and precipitation regional climate series over the central Pyrenees during 1910-2013. *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.4823
- 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
- Pons, M., Puigdemasa, E. & Trapero, L. (2015). Regionalització d'escenaris de canvi climàtic a Andorra: regionalització estadística a partir de la sèrie climàtica de Ransol. *Revista del CENMA*, núm. 8, pp. 30-39.
- Pons, M. & Trapero, L. (2017). Projeccions regionalitzades de canvi climàtic a Andorra. Actes de la 29a Diada andorrana a la XLVIII Universitat Catalana d'Estiu. Andorra: Societat Andorrana de Ciències, pp. 61-66, doi:10.2436/15.8060.09.6
- Pérez-Zanón, N., Sigró, J. & Ashcroft, L. (2016). Temperature and precipitation regional climate series over the central Pyrenees during 1910-2013. *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.4823
- SCAMPEI (2012) "Scénarios climatiques adaptés aux zones de montagnes: Phénomènes extrêmes, enneigement et incertitudes". Agence Nationale de la Recherche. <http://www.cnrm.meteo.fr/scampe/>
- Smid, M. & Costa, A.C. (2018). Climate projections and downscaling techniques: a discussion for impact studies in urban Systems. *International Journal of Urban Sciences*. num. 22, pp. 277-307, doi:10.1080/12265934.2017.1409132.
- SMN, Servei Meteorològic Nacional d'Andorra. (2023). www.meteo.ad
- Trapero, L., Albalat, A. & Lemus-Canovas, M. (2021). AR+I, Andorra Recerca + Innovació (2022). Climate setting in Andorra. Document intern.

Trzaska, S. & Schnarr, E. (2014). A Review of Downscaling Methods for Climate Change Projections. African and Latin American Resilience to Climate Change (ARCC).

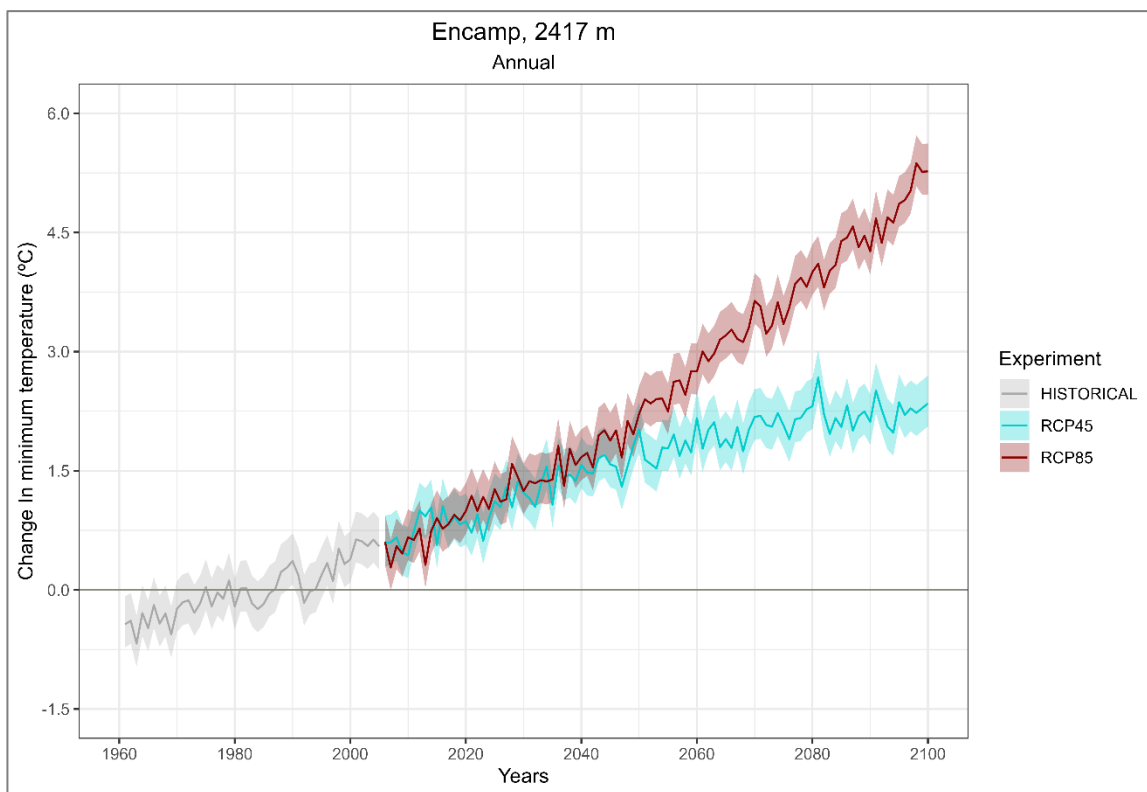
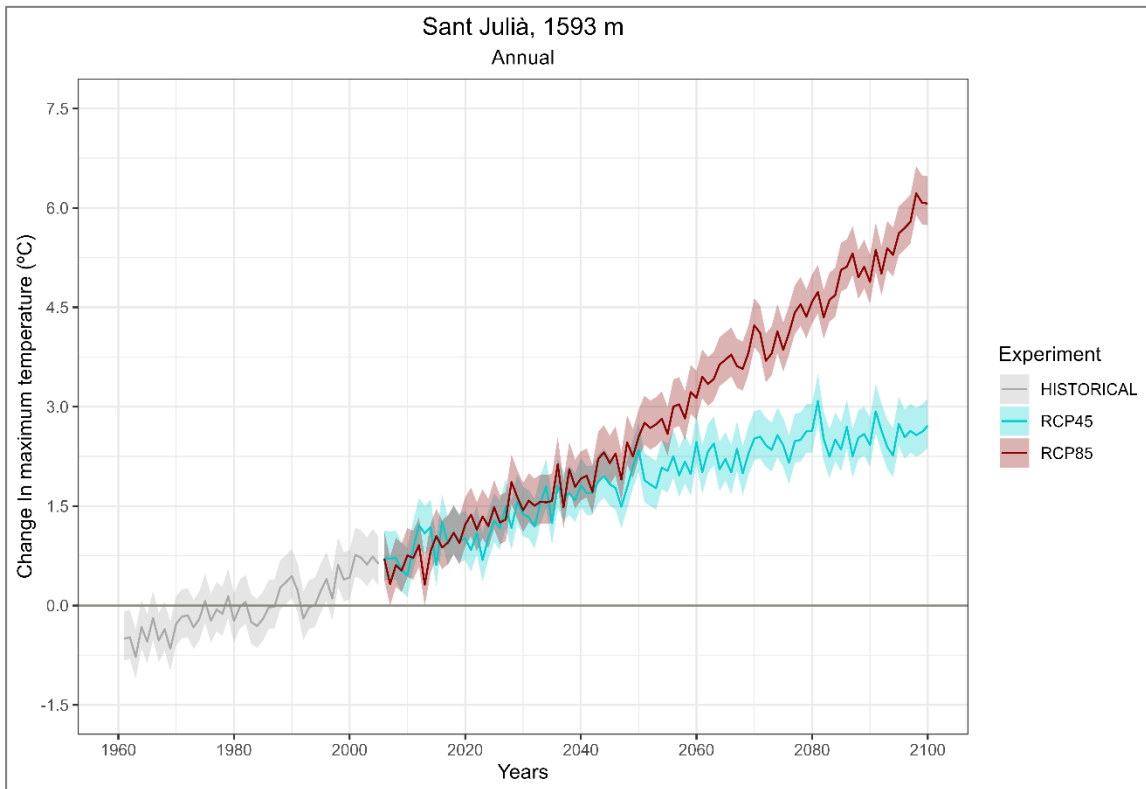
Udina, M., Trapero, L., Bech, J., González, S., Paci, A., Beaufils, S. & Sarasua, M. (2022). Untangling mountain boundary layer processes in the eastern Pyrenees: the case of the Cerdanya Basin and Andorra central valley. EMS Annual Meeting, Bonn, Germany, 5–9 Sep 2022, doi: 10.5194/ems2022-675, 2022.

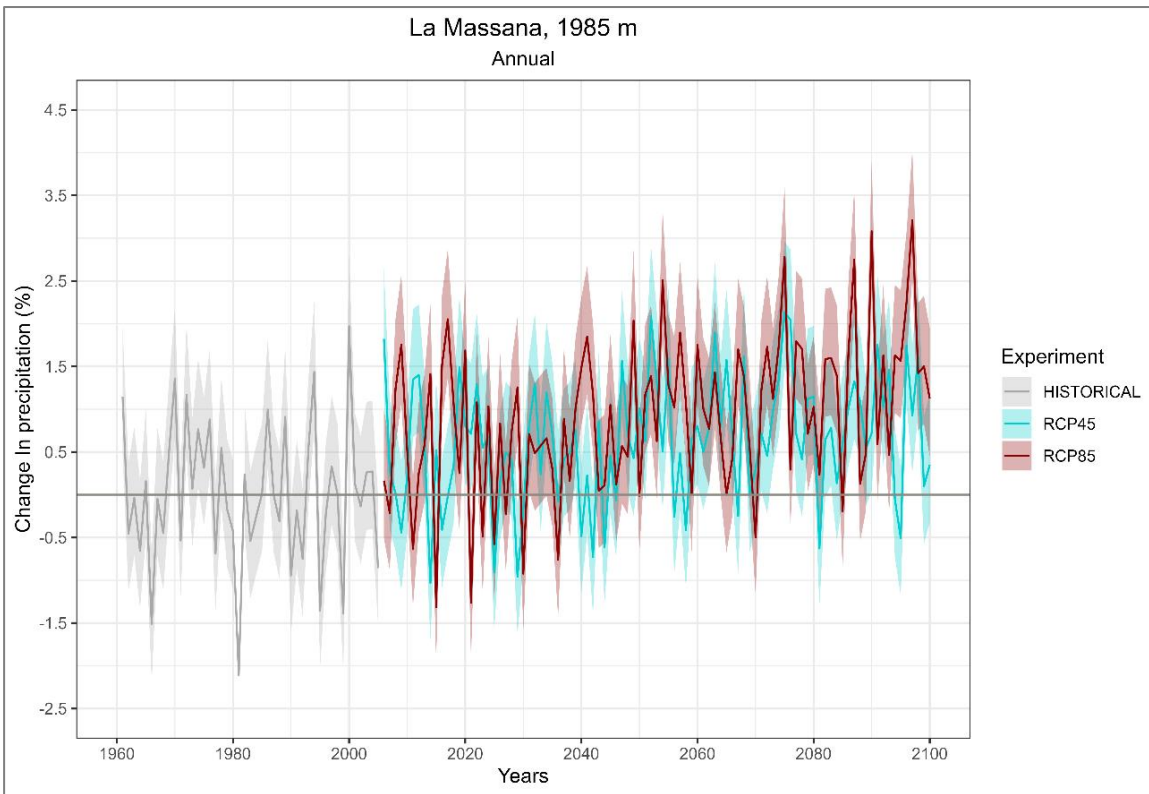
Vicente-Serrano, S., Beguería, S. & López-Moreno, J.I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. *Journal of Climate*, doi:10.1175/2009JCLI2909.1.

Zhang, X., Hegerl, G., Zwiers, F.W. & Kenyon, J. (2005): Avoiding Inhomogeneity in Percentile-Based Indices of Temperature Extremes. *Journal of Climate*, 18, 1641–1651, doi:10.1175/JCLI3366.1.

Annexos

Exemples d'anàlisi individual de l'evolució tèrmica i pluviomètrica





Exemples d'anàlisi individual d'índex climàtics

