

# Generació d'escenaris climàtics amb alta resolució a Catalunya

---

## *Projecte ESCAT*

Dr. Jordi Cunillera i Grañó

Dr. Antoni Barrera Escoda

Unitat de Canvi Climàtic

Servei Meteorològic de Catalunya

Dr. José M. Baldasano Recio

Dra. Maria Gonçalves Ageitos

Sra. Dolores Guerreiro Pérez

Departament de Ciències de la Terra

Barcelona Supercomputing Center – Centro  
Nacional de Supercomputación



**Servei Meteorològic  
de Catalunya**



Barcelona, 13.11.2012

## **Presentació**

*L'origen d'aquest treball rau en una petició per part de l'Oficina Catalana del Canvi Climàtic (OCCC) al Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) en la qual es demanava estudiar la possibilitat de disposar de projeccions climàtiques de Catalunya a més resolució espacial (durant els anys 2008-2010 l'SMC havia fet un primer estudi per a la generació de projeccions climàtiques de Catalunya a 15 km de resolució) i, a la vegada, si es podia fer una anàlisi de la incertesa d'aquestes projeccions. Arran d'aquesta petició, la Unitat de Canvi Climàtic de l'Àrea de Climatologia de l'SMC va preparar una proposta del projecte ESCAT (Generació d'escenaris climàtics amb alta resolució a Catalunya), en la qual es proposava realitzar diferents simulacions per al període 1971-2050 a 10 km de resolució espacial, però esmentant que per dur a terme aquest projecte amb un temps raonable era necessari disposar de gran potència de càlcul computacional.*

*És llavors quan es va contactar amb el Departament de Ciències de la Terra del Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS) per esbrinar el seu interès en col·laborar en el projecte ESCAT i la possibilitat d'emprar el supercomputador Mare Nostrum (gestionat pel BSC-CNS) per tal d'executar les simulacions programades. Ambdues entitats van arribar a un acord, es va iniciar el projecte ESCAT i es va signar un primer conveni de col·laboració entre l'SMC i el BSC-CNS per a la generació d'escenaris climàtics amb alta resolució espacial, que es va dur a terme durant l'any 2011. Posteriorment, es va signar un segon conveni de col·laboració entre ambdues institucions per a l'explotació de tota la informació generada durant el primer conveni (que ocupava un espai de disc superior a 15 TB), que s'ha realitzat durant l'any 2012.*

*L'informe que tot seguit es presenta és el resultat de gairebé dos anys de treball (2011-2012), i és el fruit dels dos convenis esmentats al paràgraf anterior.*

*Els autors, novembre de 2012*

## Índex

<i>Presentació</i> .....	2
Llistat d'acrònims i abreviatures.....	8
1 Introducció.....	10
2 Objectius.....	12
3 Metodologia.....	12
3.1 Definició del sistema de modelització.....	12
3.2 Definició de la selecció d'escenaris d'emissions.....	14
3.3 Definició dels dominis d'estudi.....	15
3.4 Resum de les simulacions realitzades i temps de càlcul.....	16
4 Anàlisi i discussió de resultats.....	16
4.1 Avaluació del sistema de modelització emprat.....	16
4.1.1 Avaluació de les projeccions 2001-2011.....	20
4.2 Projeccions regionalitzades a Catalunya per al 2011-2050.....	21
4.2.1 Variació de la temperatura mitjana anual i estacional (2011-2050 vs. 1971-2000).....	21
4.2.2 Variació de precipitació mitjana anual i estacional (2011-2050 vs. 1971-2000).....	27
4.2.3 Variació de la velocitat del vent mitjana anual i estacional (2011-2050 vs. 1971-2000).....	36
4.3 Anàlisi d'indicadors climàtics per al període 1971-2050.....	42
4.3.1 Indicadors climàtics de l'evolució de la temperatura.....	42
4.3.2 Indicadors climàtics de l'evolució de la precipitació acumulada.....	47
5 Conclusions.....	52
Referències.....	54

## Índex de Figures

Fig. 1. Orografia de Catalunya.....	11
Fig. 2. Projecció de l'evolució d'emissions de CO <sub>2</sub> (GtC/any) globals en els escenaris B1 (a), A1B (b) i A2 (c) de Nakićenović et al (2000), seleccionats per a aquest estudi. ....	14
Fig. 3. Representació dels dominis definits sobre Europa (D01, resolució 30 km) i Catalunya (D02, resolució 10 km) per a les simulacions regionalitzades amb el model WRF-ARW.....	15
Fig. 4. (a) Temperatura mitjana anual (°C) derivada de les observacions del CSOC-SMC, (b) predicció de la temperatura mitjana anual del WRF-ARW/ERA40, (c) del WRF-ARW/EH5OM sim1, i (d) del WRF-ARW/EH5OM sim3.....	18
Fig. 5. Anomalia de temperatura (°C) per al període 1971-2000 derivada de la simulació regional del WRF-ARW/ERA40, les observacions (CSOC-SMC) i l'ERA40.....	18
Fig. 6. (a) Precipitació acumulada mitjana anual (mm) derivada de les observacions del Servei Meteorològic de Catalunya i l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET), (b) predicció de la temperatura mitjana anual del WRF-ARW/ERA40, (c) del WRF-ARW/EH5OM sim1, i (d) del WRF-ARW/EH5OM sim3.....	19
Fig. 7. Anomalia de precipitació (%) per al període 1971-2000 derivada de la simulació regionalitzada del WRF-ARW/ERA40, les observacions (CSOC-SMC) i l'ERA40.....	19
Fig. 8. Evolució temporal de les anomalies de temperatura (a) i precipitació (b) mitjanes anuals per al període 2001-2011 obtingudes a partir de les simulacions regionalitzades amb el WRF-ARW. ....	20
Fig. 9. Anomalia de temperatura (°C) derivada de les simulacions regionalitzades del WRF-ARW/EH5OM sim1 i sim3 per al 1971-2000 i projeccions per al 2001-2050, segons els escenaris d'emissió A2, A1B i B1.....	21
Fig. 10. Representació de les zones climàtiques diferenciades al territori Català: Pirineu, Interior, i Litoral i prelitoral. ....	22
Fig. 11. Anomalia de temperatura (°C) derivada de les simulacions regionalitzades del WRF-ARW/EH5OM sim1 i sim3 per al 1971-2000 i projeccions per al 2001-2050, segons els escenaris d'emissió A2, A1B i B1 al Litoral i prelitoral (a dalt), al interior (panell del mig) i al Pirineu (a sota).....	22
Fig. 12. Variació projectada de la temperatura mitjana anual (°C) per al període 2011-2050 respecte del període de referència 1971-2000 per al territori català segons els escenaris A2, A1B i B1 (de dalt a baix) a partir de les simulacions regionalitzades del WRF-ARW/EH5OM sim1 (s1, dreta) i sim3 (s3, esquerra).....	23
Fig. 13. Variació de la temperatura mitjana a l'hivern, la primavera, l'estiu i la tardor (°C) en el 2011-2050 per als escenaris A2, A1B i B1 (de dalt a baix) respecte del 1971-2000 per al territori català segons les projeccions del WRF-ARW/EH5OM sim1 (s1, dreta) i sim3 (s3, esquerra).....	24
Fig. 14. Funcions de densitat de probabilitat (FDP) de la temperatura mitjana mensual per al període de control del s. XX (WRF-ARW/EH5OM sim1 i sim3; 1971-2000: CTRL_s1 i CTRL_s3, respectivament) i en els escenaris d'emissió A2, A1B i B1 futurs (WRF-ARW/EH5OM sim1 i sim3 2011-2050: IEEE)....	25
Fig. 15. Diagrama de caixa (boxplot) de les variacions projectades de temperatura mitjana anual (°C) per als escenaris A2, A1B i B1 en les simulacions regionalitzades amb el WRF-ARW/EH5OM sim1 i sim3 en el període 2011-2050. Els límits de les caixes representen el quartil inferior, la mediana i el quartil superior. Les línies negres presenten els valors màxim i mínim si la mostra seguís una distribució normal. La mitjana aritmètica es presenta amb una línia verda, els percentils 95 i 5 amb un quadre rosa i blau clars i els valors màxim i mínim de la mostra amb punts vermells i blaus.....	25
Fig. 16. Anomalies projectades de la precipitació mitjana anual (%) calculades a partir de les simulacions regionalitzades del WRF-ARW/EH5OM sim1 i sim3 per al període 1971-2050 segons els escenaris d'emissions A2, A1B i B1.....	27



Fig. 17. Anomalia de precipitació (%) derivada de les simulacions regionalitzades del WRF-ARW/EH5OM sim1 i sim3 per al 1971-2000 i projeccions per al 2001-2050, segons els escenaris d'emissió A2, A1B i B1 al Litoral i prelitoral (a dalt), al interior (panell del mig) i al Pirineu (a sota).....	28
Fig. 18. Variació de la precipitació mitjana anual (%) en el 2011-2050 respecte del 1971-2000 per al territori català en els escenaris A2, A1B i B1 (de dalt a baix) segons les projeccions del WRF-ARW/EH5OM sim1 (s1, dreta) i sim3 (s3, esquerra).....	29
Fig. 19. Variació de la temperatura mitjana a l'hivern, la primavera, l'estiu i la tardor (%) en el 2011-2050 per als escenaris A2, A1B i B1 (de dalt a baix) respecte del 1971-2000 per al territori català segons les projeccions del WRF-ARW/EH5OM sim1 (s1, dreta) i sim3 (s3, esquerra) .....	30
Fig. 20. Funció de densitat de probabilitat (FDP) de la precipitació mitjana mensual als escenaris de control del s. XX (WRF-ARW/ECHAM5/MPI-OM sim1 i sim3; 1971-2000: CTRL_s1 1971 -2000 i CTRL_s3 1971-2000) i als escenaris d'emissió A2, A1B i B1 futurs (WRF-ARW/ECHAM5/MPI-OM sim1 i sim3 2011-2050: IEEE).....	32
Fig. 21. Funció de densitat de probabilitat (FDP) de la precipitació màxima diària mensual als escenaris de control del s. XX (WRF-ARW/ECHAM5/MPI-OM sim1 i sim3; 1971-2000: CTRL_s1 1971 -2000 i CTRL_s3 1971-2000) i als escenaris d'emissió A2, A1B i B1 futurs (WRF-ARW/ECHAM5/MPI-OM sim1 i sim3 2011-2050: IEEE).....	32
Fig. 22. Diagrama de caixa (boxplot) de la variació de precipitació mitjana anual (°C) per als escenaris A2, A1B i B1 projectada pel WRF-ARW/ECHAM5/MPI-OM sim1 i sim3 en el 2011-2050. Els límits de les caixes representen el quartil inferior, la mediana i el quartil superior. Les línies negres presenten els valors màxim i mínim si la mostra seguis una distribució normal. La mitjana aritmètica es presenta amb una línia blau, els percentils 95 i 5 amb un quadre verd clar i taronja i els valors màxim i mínim de la mostra amb punts verds i marrons.....	33
Fig. 23. Precipitació acumulada mitjana anual en forma de neu (mm) segons les simulacions del WRF-ARW/EH5OM simulació 1 (20C3Ms1) i simulació 3 (20C3Ms3) per al període 1971-2000, i diferència en la precipitació acumulada mitjana anual en forma de neu projectada per al 2001-2050 respecte del 1971-2000 segons les simulacions del WRF-ARW/EH5OM sim1 (a dalt) i sim3 (a sota) per als escenaris A2, A1B i B1 (d'esquerra a dreta) a Catalunya. Les isolínies contínues negres representen les corbes de nivell del model.....	35
Fig. 24. Anomalies projectades de la velocitat del vent mitjana anual a 10 m (%) calculades a partir de les simulacions regionalitzades del WRF-ARW/EH5OM sim1 i sim3 per al període 1971-2050 segons els escenaris d'emissions A2, A1B i B1.....	36
Fig. 25. Anomalia de la velocitat del vent mitjana anual (%) derivada de les simulacions regionalitzades del WRF-ARW/EH5OM sim1 i sim3 per al 1971-2000 i projeccions per al 2001-2050, segons els escenaris d'emissió A2, A1B i B1 al Litoral i prelitoral (a dalt), a l'interior (panell del mig) i als Pirineus (a sota).....	37
Fig. 26. Variació de la velocitat del vent mitjana anual (%) en el 2011-2050 respecte del 1971-2000 per al territori català en els escenaris A2, A1B i B1 (de dalt a baix) segons les projeccions del WRF-ARW/EH5OM sim1 (s1, dreta) i sim3 (s3, esquerra).....	38
Fig. 27. Variació de la velocitat del vent mitjana a l'hivern, la primavera, l'estiu i la tardor (%) en el 2011-2050 per als escenaris A2, A1B i B1 (de dalt a baix) respecte del 1971-2000 per al territori català segons les projeccions del WRF-ARW/EH5OM sim1 (s1, dreta) i sim3 (s3, esquerra).....	39
Fig. 28. Funció de densitat de probabilitat (FDP) de la velocitat del vent mitjana mensual als escenaris de control del s. XX (WRF-ARW/ECHAM5/MPI-OM sim1 i sim3; 1971-2000: CTRL_s1 1971 -2000 i CTRL_s3 1971-2000) i als escenaris d'emissió A2, A1B i B1 futurs (WRF-ARW/ECHAM5/MPI-OM sim1 i sim3 2011-2050: IEEE).....	40
Fig. 29. Diagrama de caixa (boxplot) de la variació de velocitat del vent mitjana anual (°C) per als escenaris A2, A1B i B1 projectada pel WRF-ARW/ECHAM5/MPI-OM sim1 i sim3 en el 2011-2050. Els	

límits de les caixes representen el quartil inferior, la mediana i el quartil superior. Les línies negres presenten els valors màxim i mínim si la mostra seguís una distribució normal. La mitjana aritmètica es presenta amb una línia blau, els percentils 95 i 5 amb un quadre verd clar i taronja i els valors màxim i mínim de la mostra amb punts verds i marrons. ....	40
Fig. 30. Canvi en el nombre de dies de glaçada (dies) per el territori català en el període 1971-2050 respecte del període 1971-2000 segons les projeccions del WRF-ARW/EH5OM (sim1 i sim3). Es presenten per a referència les variacions segons el WRF-ARW/ERA40 i la base de dades Spain02 (0.2°). ....	43
Fig. 31. Canvi en el nombre de nits tropicals (dies) per el territori català en el període 1971-2050 respecte del període 1971-2000 segons les projeccions del WRF-ARW/EH5OM (sim1 i sim3). Es presenten per a referència les variacions segons el WRF-ARW/ERA40 i la base de dades Spain02 (0.2°). ....	44
Fig. 32. Màxim nombre de dies de glaçada per any en el període 2001-2050 segons les projeccions del WRF-ARW/ECHAM5-MPI/OM sim1 (a dalt) i sim3 (a baix) per als escenaris A2, A1B i B1 (d'esquerra a dreta) i diferències respecte del període de control. ....	45
Fig. 33. Màxim nombre de nits tropicals per any en el període 2001-2050 segons les projeccions del WRF-ARW/ECHAM5-MPI/OM sim1 (a dalt) i sim3 (a baix) per als escenaris A2, A1B i B1 (d'esquerra a dreta) i diferències respecte del període de control (1971-2000). ....	46
Fig. 34. Precipitació màxima acumulada en 5 dies (mm/5 dies) per al territori català en el període 1971-2050, segons les projeccions del WRF-ARW/EH5OM sim1 i sim3. Es presenten com a referència els valors derivats de la simulació del WRF-ARW/ERA40 i de les observacions de la base de dades Spain02 pel període 1971-2000. ....	48
Fig. 35. Canvi en el nombre de dies de pluja consecutius (dies) per el territori català en el període 1971-2050 respecte del període 1971-2000 segons les projeccions del WRF-ARW/EH5OM (sim1 i sim3). Es presenten per a referència les variacions segons el WRF-ARW/ERA40 i la base de dades Spain02 (0.2°). ....	49
Fig. 36. Canvi en el nombre de dies de sequera consecutius (dies) per el territori català en el període 1971-2050 respecte del període 1971-2000 segons les projeccions del WRF-ARW/EH5OM (sim1 i sim3). Es presenten per a referència les variacions segons el WRF-ARW/ERA40 i la base de dades Spain02 (0.2°). ....	49
Fig. 37. Màxim nombre de dies anuals amb precipitació acumulada per sobre de 20 mm. en el període 2001-2050 segons les projeccions del WRF-ARW/ECHAM5-MPI/OM sim1 (a dalt) i sim3 (a baix) per als escenaris A2, A1B i B1 (d'esquerra a dreta) i diferències respecte del període de control. ....	50
Fig. 38. Màxim nombre de dies de sequera consecutius per any en el període 2001-2050 segons les projeccions del WRF-ARW/ECHAM5-MPI/OM sim1 (a dalt) i sim3 (a baix) per als escenaris A2, A1B i B1 (d'esquerra a dreta) i diferències respecte del període de control 1971-2000. ....	51

## Índex de taules

Taula 1. Parametritzacions i configuracions físiques seleccionades per a les simulacions regionalitzades amb el WRF-ARWv3.2.1. ....	13
Taula 2. Principals variables socioeconòmiques definitòries dels escenaris d'emissions seleccionats. ....	15
Taula 3. Resum de les simulacions regionalitzades realitzades. ....	16
Taula 4. Bases de dades d'observacions disponibles per a l'avaluació de les simulacions regionalitzades del s. XX (període 1971-2000). ....	17
Taula 5. Taula resum de les variacions projectades per a la temperatura mitjana anual a 2 m a partir de les simulacions regionalitzades amb el WRF/ARW a 10 km per al període 2011-2050 respecte a 1971-2000. Mit. es refereix al valor mitjà de totes les variacions projectades; Màx., al valor màxim; Mín., al valor mínim; P95, P75, P50, P25 i P5 corresponen respectivament als percentils 95, 75, 50 (mediana), 25 i 5 de totes les variacions projectades. ....	26

Taula 6. Taula resum de les variacions projectades per a la precipitació mitjana a partir de les simulacions regionalitzades amb el WRF/ARW a 10 km per al període 2011-2050 respecte al 1971-2000. Mit. es refereix al valor mitjà de totes les variacions projectades; Màx., al valor màxim; Mín., al valor mínim; P95, P75, P50, P25 i P5 corresponen, respectivament, als percentils 95, 75, 50 (mediana), 25 i 5 de totes les variacions projectades. ....	34
Taula 7. Taula resum de les variacions projectades per a la velocitat del vent mitjana a partir de les simulacions regionalitzades amb el WRF/ARW a 10 km per al període 2011-2050 respecte al 1971-2000. Mit. es refereix al valor mitjà de totes les variacions projectades; Màx., al valor màxim; Mín., al valor mínim; P95, P75, P50, P25 i P5 corresponen, respectivament, als percentils 95, 75, 50 (mediana), 25 i 5 de totes les variacions projectades. ....	41
Taula 8. Indicadors climàtics seleccionats per a la descripció dels esdeveniments extrems de temperatura i precipitació a Catalunya en el període 1971-2050. ....	42
Taula 9. Resum d'indicadors climàtics relatius a esdeveniments extrems de temperatura. Mitjana sobre el període de referència del número màxim de nits tropicals i dies de glaçada l'any estimats sobre el territori català per al 1971-2000 i 2001-2050. ....	43
Taula 10. Resum d'indicadors climàtics relatius a esdeveniments extrems de precipitació per al període 1971-2050 al territori català. Es mostren: la precipitació màxima acumulada en 5 dies (RX5day, mm), la precipitació màxima acumulada diària (RX1day, mm), el nombre de dies secs consecutius (CDD), el nombre de dies plujosos consecutius (CWD) i el nombre de dies en què la precipitació acumulada supera 20 mm (R20mm) estimats com a mitjana sobre tot el període dels valors anuals. ....	47

## Llistat d'acrònims i abreviatures

AEMET – Agència Estatal de Meteorologia

BSC-CNS – Barcelona Supercomputing Center-Centro Nacional de Supercomputación

DGF – Hivern, mesos de desembre, gener i febrer

ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Centre Europeu de Predicció Meteorològica a Mig Termini)

EH5OM – Model acoblat de circulació general atmosfera-oceà ECHAM5/MPI-OM

ERA40 – 40-year ECMWF Reanalyses (40 anys de Reanàlisis del ECMWF)

ESCACC – Estratègia Catalana d'Adaptació al Canvi Climàtic 2013-2020

FDP – Funció Densitat de Probabilitat

Fig. – Figura

GEH – Gasos amb Efecte d'Hivernacle

IEEE – Informe Especial sobre Escenaris d'Emissions de l'IPCC

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Grup d'Experts Intergovernamental del Canvi Climàtic)

JJA – Estiu, mesos de juny, juliol i agost

MAM – Primavera, mesos de març, abril i maig

MCG – Model de Circulació General

màx. – Màxim

mín. – Mínim

mit. – Mitjana aritmètica

NCAR – National Center for Atmospheric Research (Centre Nacional per a la Investigació Atmosfèrica)

OBS – Observacions

OCCC – *Oficina Catalana del Canvi Climàtic*

P5 – Percentil 5

P25 – Percentil 25

P50 – Percentil 50

P75 – Percentil 75

P95 – Percentil 95

PMA – Precipitació Mitjana Anual

PMM – Precipitació Mitjana Mensual

SMC – Servei Meteorològic de Catalunya

SON – Tardor, mesos de setembre, octubre i novembre

TMA – Temperatura Mitjana Anual

TMM – Temperatura Mitjana Mensual

VVMA – Velocitat del Vent Mitjana Anual

VVMM – Velocitat del Vent Mitjana Mensual

WRF-ARW – Advanced Research Weather Research and Forecasting Model

## 1 Introducció

Les evidències de l'escalfament del clima a nivell global són inequívocues. L'adaptació a les seves conseqüències i el disseny d'estratègies de mitigació és un dels reptes ambientals més importants que ha d'afrontar la nostra societat actualment (IPCC, 2007).

Els models climàtics globals o models de circulació general (MCG) constitueixen una eina fonamental per a investigar i comprendre l'evolució del clima arreu del món. Són capaços de representar de manera efectiva característiques climàtiques a gran escala, com ara la circulació general de l'atmosfera i l'oceà, patrons subcontinentals de precipitació i temperatura, etc. No obstant això, la seva resolució actual acostuma a ser baixa, de l'ordre de 100-200 km en els millors casos, fent que molts aspectes claus del clima regional i local, com per exemple les pluges orogràfiques o els fenòmens convectius, no es reproduïxin de manera adequada.

Les previsions del Grup d'Experts Intergovernamental del Canvi Climàtic (IPCC) suggereixen que les temperatures mitjanes anuals a Europa augmentarien més que la mitjana global. A més a més, s'espera que la regió mediterrània s'escalfi més a l'estiu, amb temperatures màximes més altes que la mitjana estacional global. D'altra banda, tant la precipitació anual com el número de dies de precipitació es reduiria previsiblement a la zona del Mediterrani, incrementant-ne el risc de sequera en aquesta àrea (IPCC, 2007), una regió ja vulnerable a la variabilitat climàtica. En conseqüència, es reduiria la disponibilitat d'aigua, el potencial de generació hidroelèctrica, el rendiment dels cultius, etc. S'espera, a més a més, un augment dels riscos per a la salut humana a causa d'una major freqüència d'onades de calor i incendis forestals. Paral·lelament, es preveu per a tot el conjunt d'Europa un augment del risc d'inundacions a l'interior, inundacions costaneres més freqüents i augment de l'erosió (a causa dels temporals i a l'augment del nivell del mar). La majoria dels ecosistemes i organismes s'adaptarien amb dificultat al Canvi Climàtic. Les zones muntanyenques s'enfrontarien a la reculada de glaceres, reducció de la coberta de neu i del turisme d'hivern i a extenses pèrdues d'espècies (en algunes zones fins a un 60% en escenaris d'emissions elevades per al 2080). Per als extrems hídrics (inundacions i sequeres), l'IPCC (2007) apunta cap a un augment en la variància de la precipitació a causa de l'escalfament global. Es a dir, un augment tant en els episodis de precipitacions intenses com de les sequeres. Així alguns estudis publicats mostren que els períodes secs i les sequeres augmentarien a Catalunya durant aquest segle (Altava-Ortiz, 2010).

El plantejament d'estratègies de mitigació o adaptació als efectes del clima a nivell regional de manera efectiva requereix, per tant, l'ús de tècniques que permetin avaluar l'evolució de les variables climàtiques sobre aquestes àrees amb una resolució més elevada que la que proporcionen actualment els MCG. Existeixen diferents metodologies que permeten incrementar aquesta resolució a nivell regional. Entre les més emprades es troba la regionalització dinàmica (Rummukainen, 2010), que utilitza models regionals d'àrea limitada, basats en la descripció de la dinàmica i la física de l'atmosfera, per a reproduir les característiques climàtiques locals o regionals amb alta resolució. De les diferents aproximacions existents per a dur a terme estudis de regionalització dinàmica, l'ús de models d'àrea limitada forçats mitjançant dades climàtiques globals és la menys costosa computacionalment. Aquest forçament es produeix en la pràctica utilitzant les dades climàtiques globals com a condicions inicials i de contorn per als models d'àrea limitada o mesoescalars.

La regionalització climàtica dinàmica ha sofert un fort desenvolupament en els darrers anys. Diverses iniciatives a nivell europeu, com els projectes PRUDENCE (Christensen et al., 2007), ENSEMBLES (Hewitt, 2005), o més recentment el projecte CORDEX (<http://cordex.dmi.dk/joomla/>), sota el marc del

programa mundial de recerca sobre el clima (WRCP), han desenvolupat, aplicat i millorat les tècniques de regionalització dinàmica. Tots ells proporcionen resultats de simulacions climàtiques sobre Europa amb una resolució espacial màxima de 25 km. A nivell espanyol, a més a més, s'està desenvolupant el projecte ESCENA (Dominguez et al., 2011), finançat pel Ministeri de Medi Ambient i Medi Rural i Marí, que aplica diferents models regionals sobre la Península Ibèrica amb una resolució de 25 km, considera diferents escenaris d'emissions, inclou diferents models d'àrea limitada i fa servir un ampli rang de MCG per tal d'extreure les condicions inicials i de contorn.

Catalunya és un territori amb una orografia molt complexa (Fig. 1), caracteritzada per dues serralades muntanyoses paral·leles a la línia de la costa, la Serralada Litoral i Prelitoral, que afecten la influència de la mar Mediterrània sobre la meteorologia i la climatologia de les terres de l'interior. A més a més, la presència dels Pirineus, amb pics de més de 3000 m d'alçada, al nord del territori, té una marcada influència sobre la dinàmica atmosfèrica de la zona. La gamma d'altituds produeix uns pisos climàtics, en especial tèrmics, que donen temperatures mitjanes anuals des dels 17°C fins als 0°C. L'orografia es troba molt compartimentada en serres i depressions. Aquest factor, unit a diferents orientacions en les seves unitats de relleu, produeix grans contrastos climàtics i meteorològics entre unes comarques i les seves veïnes (Martín-Vide, 1992).

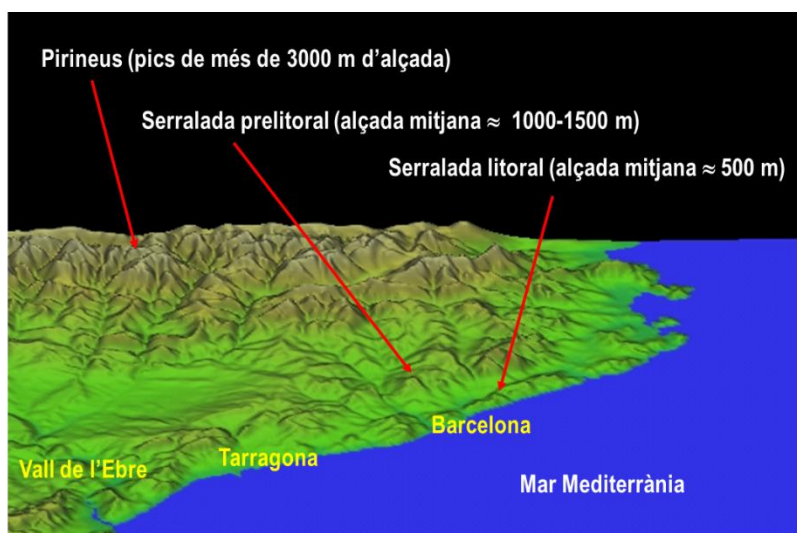


Fig. 1. Orografia de Catalunya

Donada aquesta variabilitat orogràfica i climàtica, es creu que l'estudi de l'evolució del clima a Catalunya es beneficiaria de resolucions encara majors que els 25 km que s'estan fent servir actualment en els estudis sobre la Península Ibèrica. Els recursos computacionals dels quals es disposa actualment, en particular al Barcelona Supercomputing Center – Centre Nacional de Supercomputació (BSC-CNS), permeten incrementar aquesta resolució fins als 10 km.

Aquest projecte neix, per tant, com un esforç col·laboratiu entre el Departament de Ciències de la Terra del BSC-CNS i la Unitat de Canvi Climàtic del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) amb la finalitat d'avaluar les tendències del clima futur a Catalunya amb una alta resolució i proveir les dades necessàries als organismes encarregats de planificar i definir les estratègies de mitigació i adaptació del canvi climàtic a Catalunya, entre els quals es troba l'Oficina Catalana del Canvi Climàtic.

Aquest projecte també s'ha dut a terme per a millorar els resultats d'un projecte previ que es va desenvolupar a l'SMC del 2008 al 2011 per a la generació d'escenaris regionalitzats a través del model

mesoescalar MM5 a una resolució de 15 km per a tot Catalunya i per al segle XXI (Barrera-Escoda i Cunillera, 2011a; 2011b).

## 2 Objectius

Els objectius principals d'aquest projecte són:

- La caracterització amb una alta resolució (10 km en horitzontal i 33 nivells verticals fins als 10 hPa) de la variabilitat climàtica a Catalunya per a l'horitzó 2050 mitjançant l'aplicació de tècniques dinàmiques de regionalització climàtica considerant tres escenaris diferents d'emissions de l'Informe Especial sobre Escenaris d'Emissions (IEEE) de l'IPCC de Nakićenović et al.(2000): A2, A1B i B1.
- L'avaluació dels efectes del clima futur en la temperatura en superfície, la precipitació acumulada i la velocitat del vent sobre Catalunya.
- El proveïment de dades a alta resolució de la variabilitat climàtica futura a Catalunya a l'Oficina Catalana de Canvi Climàtic per a la redacció de l'Estratègia Catalana d'Adaptació al Canvi Climàtic 2013-2020 (ESCACC).

## 3 Metodologia

A continuació es presenta la metodologia seguida per tal de dur a terme la regionalització climàtica sobre Catalunya. Primerament es defineix el sistema de modelització i es detalla la configuració de les simulacions tant per al període de control del s. XX (1971-2000), el qual permet dur a terme l'avaluació i validació dels resultats del projecte, com de les simulacions futures, per al període 2001-2050. Per al període 2001-2011 es disposa de projeccions i observacions, amb la qual cosa també es pot realitzar una primera validació general de les projeccions desenvolupades. A continuació es presenten els dominis d'estudi i els escenaris de clima futur que es contemplen.

### 3.1 Definició del sistema de modelització

Per al desenvolupament d'aquest treball es fa servir el model mesoescalar o d'àrea limitada Advanced Research Weather Research and Forecasting (WRF-ARW) en la versió 3.2.1 (Michalakes et al., 2004; Skamarock i Klemp, 2008), desenvolupat pel National Center for Atmospheric Research (NCAR) dels EUA i que és representatiu de l'estat de l'art en modelització meteorològica actualment. El WRF-ARW permet seleccionar diferents tipus de parametritzacions i esquemes per a la representació dels diferents processos físics que es donen a l'atmosfera. La configuració final del model es presenta a la Taula 1 i es basa en estudis previs realitzats sobre Catalunya i la Península Ibèrica (Jorba et al., 2008; Jiménez-Guerrero et al., 2008; Mercader et al., 2010). Aquesta configuració tendeix a subestimar la temperatura en superfície lleugerament i a sobreestimar la precipitació acumulada.

Per tal de validar el comportament del model, es realitza una simulació de control sobre el s. XX (període 1971-2000) amb el forçament de les reanàlisis de l'ERA-40 (Uppala et al., 2005) del Centre Europeu de Predicció Meteorològica a Mig Termini (ECMWF, European Centre For Medium-Range Weather Forecasts: <http://www.ecmwf.int/products/data/archive/descriptions/e4/index.html>). Les reanàlisis de l'ERA-40 es van elaborar tenint en compte dades de mesures de satèl·lit, campanyes de mesurament des d'avions, boies i radiosondatges, entre d'altres, fent-ne ús del model global de l'ECMWF, l'Integrated Forecasting System (IFS: <http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs/CY31r1/index.html>) amb una resolució espacial horitzontal de 2,5°, 23 nivells verticals fins a 1 hPa i una resolució temporal 6-horària. Aquestes



dades estan disponibles lliurement sense fins comercials al web de l'ECMWF: [http://data-portal.ecmwf.int/data/d/era40\\_daily/](http://data-portal.ecmwf.int/data/d/era40_daily/).

Taula 1. Parametritzacions i configuracions físiques seleccionades per a les simulacions regionalitzades amb el WRF-ARWv3.2.1.

Configuració del model	WRF-ARWv3.2.1
Microfísica	WSM-3 class
Radiació	RRTM (ona llarga) Dudhia(ona curta)
Capa límit (PBL)	YSU
Model de sòl	Noah LSM
Convecció	Kain-Fritsch

Com a model global climàtic per a proveir les condicions de contorn i inicials necessàries per a les simulacions regionals se selecciona l'ECHAM5/MPI-OM, el qual és un model acoblat de circulació general atmosfera-oceà. L'ECHAM5 (Roeckner *et al.*, 2003) és el seu component atmosfèric, el qual va ser desenvolupat conjuntament per l'ECMWF i el *Max Planck Institut für Meteorologie* d'Hamburg (Alemanya), i l'MPI-OM (Marsland *et al.*, 2003) és el seu component oceànic, desenvolupat íntegrament al *Max Planck Institut*. Aquest model ha mostrat ser un dels models globals que reproduïxen millor el clima actual d'Europa i de l'Atlàntic del Nord sota els forçaments radiatius coneguts per al segle XX (Van Ulden i Van Oldenborgh, 2006) i, en especial, a la zona de la Mediterrània Occidental (Altava-Ortiz, 2010). Per tant, es pot considerar com un dels millors models per a realitzar projeccions regionalitzades futures del clima de tota la munió de models considerats a l'IPCC (2007) per a la zona d'estudi.

Les simulacions climàtiques globals utilitzades del model ECHAM5/MPI-OM tenen 1,875° de resolució espacial horitzontal, 19 nivells verticals i estan disponibles cada 6hores (00, 06, 12 i 18 UTC). En total s'han utilitzat 9 simulacions d'aquest model de l'IPCC (2007):

1. Dues simulacions per al clima del segle XX (simulació 1: Roeckner, 2005a i simulació 3: Roeckner, 2005b)
2. Sis simulacions per al clima del segle XXI forçades, respectivament, pels escenaris d'emissions definits a l'IEEE per Nakićenović *et al.* (2000): IEEE-A2 (escenari sever, simulació 1: Roeckner *et al.*, 2006a i simulació 3: Roeckner *et al.*, 2006b), IEEE-A1B (escenari intermedi, simulació 1: Roeckner *et al.*, 2006c i simulació 3: Roeckner *et al.*, 2006d) i IEEE-B1 (escenari moderat, Roeckner *et al.*, 2006e i simulació 3: Roeckner *et al.*, 2006f).

Totes aquestes dades han estat subministrades pel portal CERA (portal web del Centre Mundial de Dades Climàtiques d'Hamburg, *World Data Center for Climate Hamburg*, que es pot consultar a l'adreça <http://cera-www.dkrz.de/CERA/index.html>).

### 3.2 Definició de la selecció d'escenaris d'emissions

La projecció de la variabilitat climàtica futura està fortament influenciada per l'evolució esperada de la concentració de gasos amb efecte d'hivernacle (GEH). D'acord amb les directrius establertes per l'IPCC per a l'elaboració del 4t informe d'avaluació dels efectes del Canvi Climàtic (IPCC, 2007), es poden definir diferents tendències d'evolució d'emissions antropogèniques de GEH en funció de variables socioeconòmiques bàsiques: creixement demogràfic, desenvolupament econòmic i avenços tecnològics, i les seves tendències esperades en diferents escenaris futurs a nivell mundial. Des d'aquesta perspectiva es van definir quatre famílies diferents d'escenaris futurs: B1, B2, A1 i A2 (Nakićenović et al., 2000) que es basaven en línies alternatives de desenvolupament futur i conseqüentment d'evolució de GEH, donant lloc a la definició de sis escenaris d'emissions concrets.

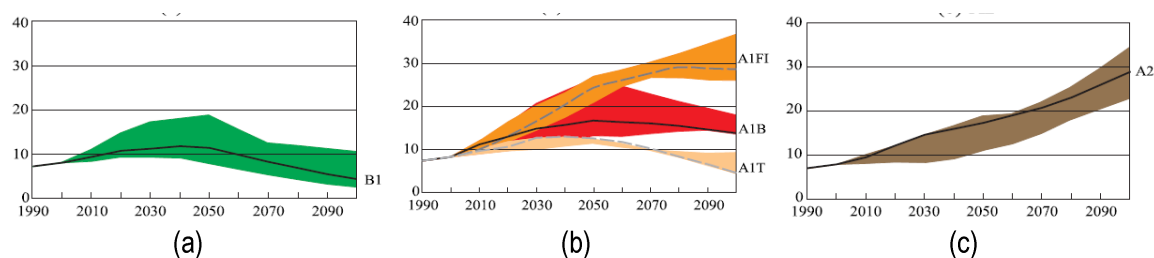


Fig. 2. Projecció de l'evolució d'emissions de CO<sub>2</sub> (GtC/any) globals en els escenaris B1 (a), A1B (b) i A2 (c) de Nakićenović et al (2000), seleccionats per a aquest estudi.

En aquest treball se seleccionen com a escenaris d'estudi els escenaris B1, A1B i A2, que proporcionen un ampli ventall d'anàlisi. L'escenari B1 es podria descriure com a optimista, amb una evolució esperada d'emissions de GEH relativament baixa comparada amb la resta. L'escenari A1B suposa un nivell d'emissions major que el B1, però amb un ús equilibrat de fons d'energia fòssils i alternatives, per tant es podria considerar un escenari intermedi. Finalment l'escenari A2 és el més intensiu en termes d'emissions de GEH (Fig. 2) i per tant es pot considerar pessimista.

Els factors socioeconòmics esperats en cadascun dels escenaris es resumeixen a la Taula 2. En línies generals, l'escenari B1 descriu un món convergent on la població reflecteix un màxim a mitjans de segle i després disminueix. L'estructura econòmica s'orienta a una economia de serveis i de la informació. S'hi introdueixen solucions a nivell global encarades a la sostenibilitat econòmica, social i ambiental, incloent-hi una major igualtat, però sense iniciatives climàtiques específiques. Aquest escenari és el que contempla unes menors emissions de GEH.

Els escenaris de la família A1 projecten un món amb un creixement econòmic molt ràpid, una població global que creix fins a meitat de segle per a després disminuir i la introducció de noves tecnologies i cada cop més eficients. Es tracta d'escenaris convergents, amb un increment de les interaccions socioculturals i una disminució de les diferències regionals, tant a nivell cultural com econòmic. Les concentracions esperades de CO<sub>2</sub> són entre mitjanes i altes, i dins d'aquesta família es defineixen tres línies diferenciades en funció del tipus d'energia emprada. En aquest estudi se selecciona l'escenari A1B, caracteritzat per fer un ús equilibrat d'energies fòssils i alternatives.

L'escenari A2 es caracteritza per l'autonomia i la preservació de la identitat local. Els patrons de fertilitat entre regions convergeixen molt lentament, de manera que la població mundial està en creixement continu durant tot el segle. A més a més, l'economia s'orienta cap al desenvolupament regional i el creixement de l'economia per càpita. Els canvis tecnològics estan més fragmentats i són més lents que en

d'altres línies. Els escenaris pertanyents a aquesta família tenen les emissions més elevades de tots els escenaris definits.

Taula 2. Principals variables socioeconòmiques definitòries dels escenaris d'emissions seleccionats.

Escenari d'emissions	B1	A1B	A2
<b>Creixement demogràfic</b>	Baix	Baix	Alt
<b>Desenvolupament econòmic</b>	Alt. Economia de la informació i serveis	Molt alt. Economia global	Mitjà. Economia regional
<b>Consum energètic</b>	Baix	Molt elevat	Alt
<b>Nivell d'emissions</b>	Baixes	Intermèdies	Altes
<b>Canvi tecnològic</b>	Baix	Ràpid	Baix

### 3.3 Definició dels dominis d'estudi

Per tal de dur a terme les simulacions es defineix una configuració amb dos dominis niats unidireccionalment: un primer domini sobre Europa amb una resolució de 30 km (D01, centre a 41°N 0°E, 100x100 cel·les) i un altre sobre la zona d'interès, Catalunya, amb una resolució de 10 km (D02, centre a 41°N 0°E, 76x76 cel·les), Fig. 3. Aquesta configuració permet optimitzar els temps de càlcul i reduir els efectes de les condicions de contorn, derivades de l'increment de resolució des del model global (1,875°) a la del domini final (10 km). La definició específica dels dominis segueix la relació de resolució recomanada pels models mesoescalars (3 a 1) i es fa de manera que no es donin trencaments o discontinuïtats en els elements orogràfics que poden influenciar la dinàmica atmosfèrica a escala regional (per ex. definició del domini sobre Catalunya incloent-hi la serralada dels Pirineus en tota la seva extensió). La projecció seleccionada és la recomanada per a aquestes latituds, la Lambert Conformal Conic. La resolució vertical és de 33 nivells verticals fins als 10 hPa, per a capturar adequadament els processos de transport troposfera-estratosfera.

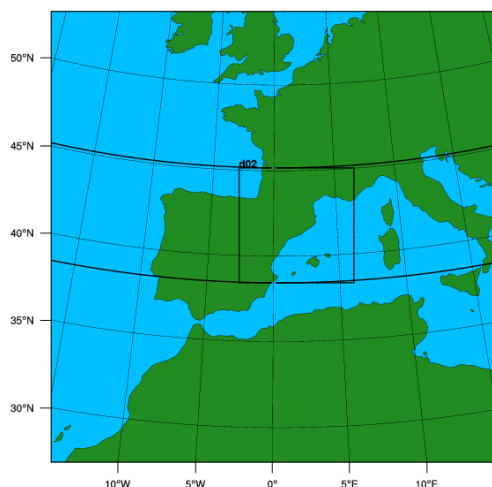


Fig. 3. Representació dels dominis definits sobre Europa (D01, resolució 30 km) i Catalunya (D02, resolució 10 km) per a les simulacions regionalitzades amb el model WRF-ARW.

### 3.4 Resum de les simulacions realitzades i temps de càlcul.

Si es consideren les simulacions realitzades per al s. XX i els diferents escenaris futurs definits (Taula 3), aquest treball ha suposat l'execució de 330 anys de simulació.

Taula 3. Resum de les simulacions regionalitzades realitzades.

	Identificador	Model global	Període	Escenari
s. XX	WRF-ARW/ERA40	ERA40	1971-2000	--
	WRF-ARW/EH5OMs1	ECHAM5/MPI-OM sim1	1971-2000	20C3M
	WRF-ARW/EH5OMs3	ECHAM5/MPI-OM sim3	1971-2000	20C3M
s. XXI	WRF-ARW/EH5OMs1 B1	ECHAM5/MPI-OM sim1	2001-2050	B1
	WRF-ARW/EH5OMs3 B1	ECHAM5/MPI-OM sim3	2001-2050	B1
	WRF-ARW/EH5OMs1 A1B	ECHAM5/MPI-OM sim1	2001-2050	A1B
	WRF-ARW/EH5OMs3 A1B	ECHAM5/MPI-OM sim3	2001-2050	A1B
	WRF-ARW/EH5OMs1 A2	ECHAM5/MPI-OM sim1	2001-2050	A2
	WRF-ARW/EH5OMs3 A2	ECHAM5/MPI-OM sim3	2001-2050	A2

La realització d'aquest treball va ser possible gràcies a la capacitat computacional del supercomputador MareNostrum, del Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación (<http://www.bsc.es/>), que compta amb 10.420 processadors i una capacitat de computació de 92,21 Teraflops. El temps total de càlcul emprat per a dur a terme les simulacions equival a 185 anys amb un únic processador.

## 4 Anàlisi i discussió de resultats

A continuació es presenta la validació dels resultats del model en el període de control (1971-2000), com el model reproduïx el període 2001-2011 (període d'existència d'observacions i projeccions futures regionalitzades) i s'analitzen en detall la temperatura, precipitació i velocitat del vent projectades per a les simulacions durant la primera meitat del s. XXI.

### 4.1 Avaluació del sistema de modelització emprat.

Per tal de validar el sistema de modelització emprat es comparen les simulacions de temperatura i precipitació per al període 1971-2000 amb observacions de diferents bases de dades per al territori català (Taula 4). Atès que les sèries de velocitat del vent disponibles a Catalunya durant el període 1971-2000 tenen una cobertura espacial i temporal petita, aquesta variable no s'ha avaluat en aquest apartat.

Les tres simulacions realitzades amb el WRF-ARW i els forçaments de l'ERA40, l'EH5OM\_sim1 i l'EH5OM\_sim3 subestimen lleugerament la temperatura mitjana anual per al període 1971-2000, entre 1 i 2°C de mitjana per a tot el territori (Fig. 4). A nivell estacional, les majors subestimacions per part de les simulacions regionalitzades es donen als mesos d'estiu, amb diferències d'1,5°C de mitjana per al Juny, Juliol i Agost en el cas del WRF-ARW/ERA40 (aquestes arriben fins a 2,3°C per al mateix període en el cas del WRF-ARW/EH5OM sim1). Per contra el WRF-ARW presenta un comportament molt proper a les

observacions en el cas de l'hivern i la tardor, sent les diferències de temperatura mitjana per a aquests períodes com a molt de 0,5°C.

Taula 4. Bases de dades d'observacions disponibles per a l'avaluació de les simulacions regionalitzades del s. XX (període 1971-2000).

Base de dades	Variables	Tipologia	Res. Espacial	Cobertura espacial	Res. temporal	Cobertura temporal
<b>CSOC-SMC</b> <sup>[1]</sup>	T 2m (°C) Precipitació acumulada (mm)	Malla elaborada amb tècniques d'interpolació (kriging) a partir de dades d'estacions de l'AEMET i l'SMC	0,04° ≈ 5 km	NE de la Península Ibèrica (Catalunya, Castelló i la Franja d'Aragó)	Mitjana mensual	1971-2000
<b>SPAIN02</b> <sup>[2]</sup>	T 2m (°C) Precipitació acumulada (mm)	Malla elaborada amb tècniques d'interpolació (kriging) a partir de dades d'estacions d'AEMET	0,20° ≈ 20 km	Espanya	Diària	1950-2008

[1] Altava-Ortiz (2010)

[2] Herrera et al. (2012)

Tot i així, independentment del forçament (ERA40, EH5OM sim1 o sim3) el model reproduïx el gradient de temperatura mitjana latitudinal observat, amb mínims de temperatura mitjana anual als Pirineus i temperatures més elevades a l'interior i l'àrea litoral i prelitoral (Fig. 4). D'aquesta manera les correlacions espacials entre la simulació del WRF-ARW/ERA40 amb les observacions es de 0,96, així com per a les simulacions del WRF-ARW/EH5OM sim1 i sim3. Finalment, el WRF-ARW/ERA40 reproduïx correctament la variabilitat interanual de la temperatura mitjana anual observada per al període 1971-2000 (Fig. 5) amb una correlació lineal amb les observacions de 0,92.

Per una altra banda, el WRF-ARW sobreestima lleugerament la precipitació mitjana anual per al període 1971-2000 respecte dels valors observats. En particular, en el cas del WRF-ARW/ERA40 la sobreestimació de la precipitació mitjana anual per a tot el període és de l'ordre de 170 mm, mentre que pel que fa les simulacions amb el forçament de l'Eh5OM aquesta es troba entre els 140 i 150 mm. Les majors desviacions del model es donen a l'estiu per al cas del WRF-ARW/ERA40, amb una desviació mitjana de 68 mm, i a la tardor per a les simulacions forçades amb l'Eh5OM sim1 i sim3, amb una desviació de l'ordre de 65 mm.

El model, independentment del forçament emprat, reproduïx correctament els patrons de precipitació espacials, amb màxims de precipitació mitjana anual als Pirineus i la Serralada Transversal, i àrees més seques al Pla de Lleida i la Depressió Central (Fig. 6). Així, la correlació espacial entre la simulació del WRF-ARW/ERA40 amb les observacions és de 0,84, per a la simulació del WRF-ARW/EH5OM sim1 de 0,82 i per a la simulació del WRF-ARW/EH5OM sim3 de 0,83. A més a més, el WRF-ARW/ERA40 captura correctament la variabilitat interanual de la precipitació mitjana anual, amb una correlació lineal amb les observacions de 0,65, millorant els resultats de l'ERA40 per sí sol, que mostra una correlació amb les observacions de 0,59 (Fig. 7).

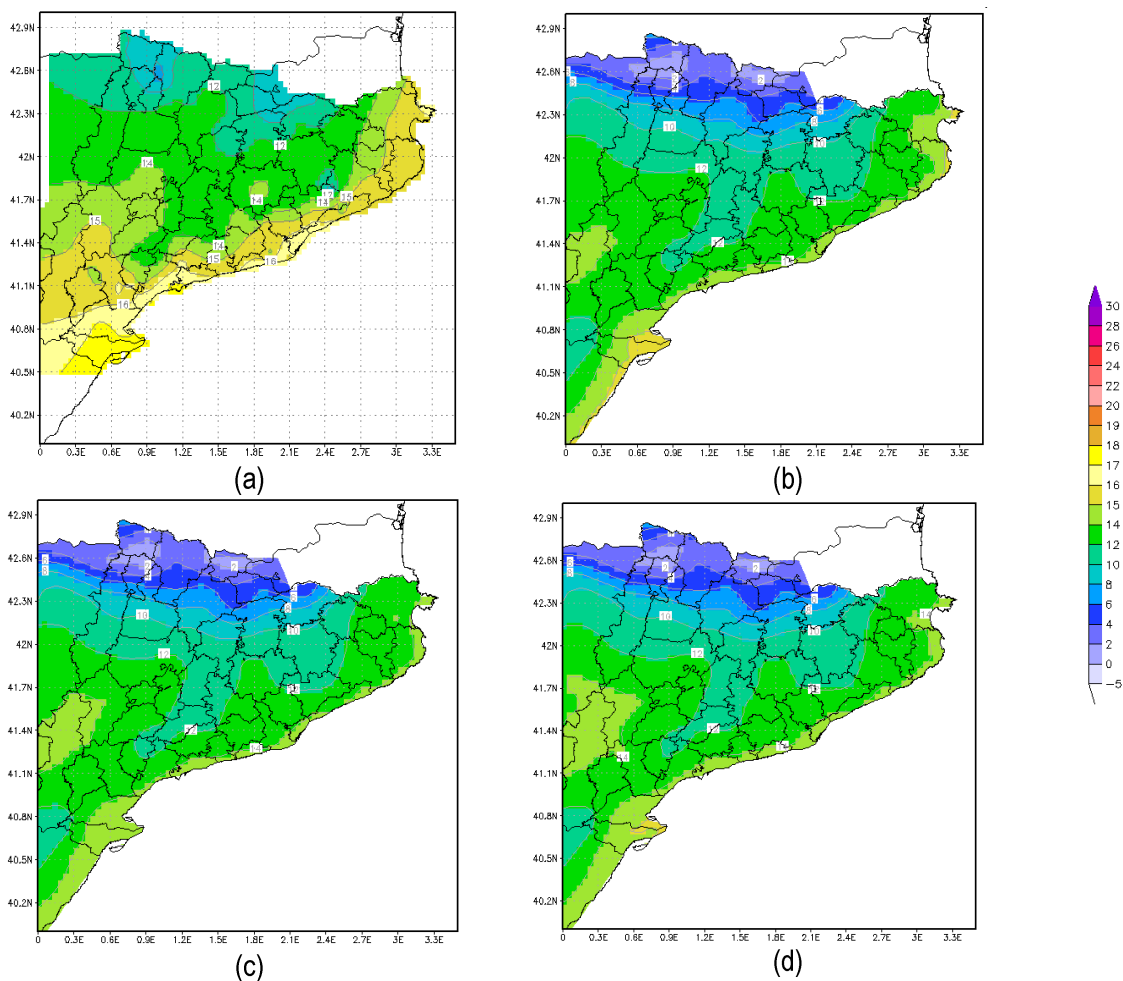


Fig. 4. (a) Temperatura mitjana anual (°C) derivada de les observacions del CSOC-SMC, (b) predicció de la temperatura mitjana anual del WRF-ARW/ERA40, (c) del WRF-ARW/EH5OM sim1, i (d) del WRF-ARW/EH5OM sim3.

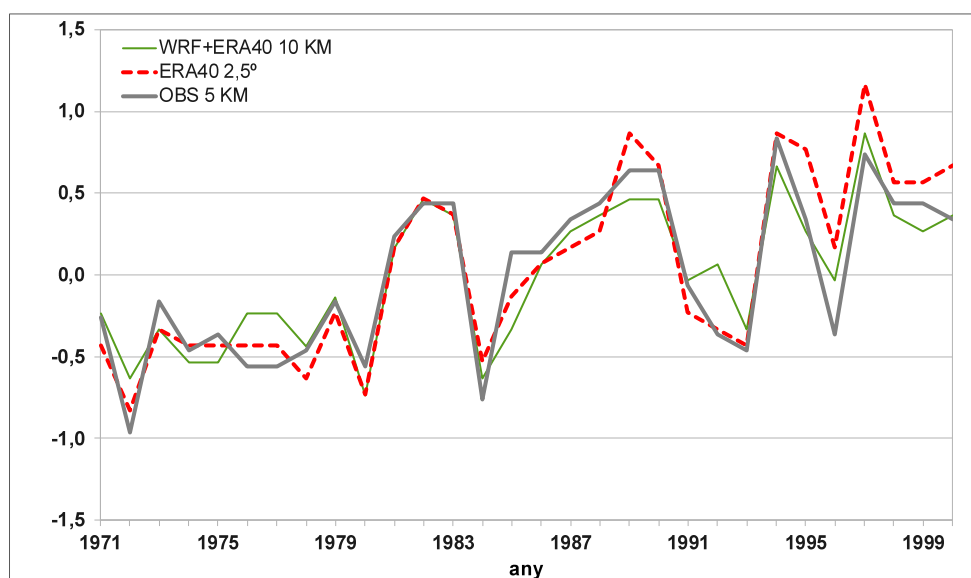


Fig. 5. Anomalia de temperatura (°C) per al període 1971-2000 derivada de la simulació regional del WRF-ARW/ERA40, les observacions (CSOC-SMC) i l'ERA40.



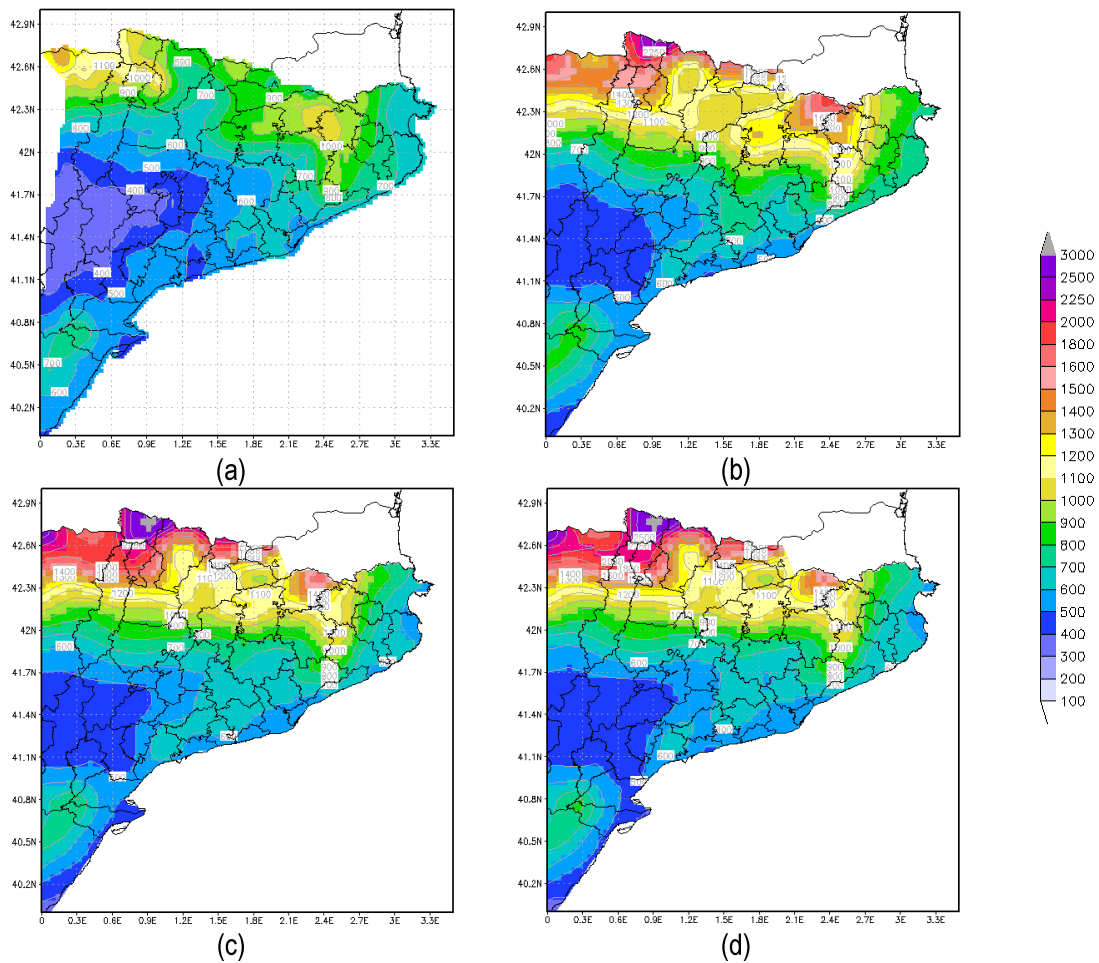


Fig. 6. (a) Precipitació acumulada mitjana anual (mm) derivada de les observacions del Servei Meteorològic de Catalunya i l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET), (b) predicció de la temperatura mitjana anual del WRF-ARW/ERA40, (c) del WRF-ARW/EH5OM sim1, i (d) del WRF-ARW/EH5OM sim3.

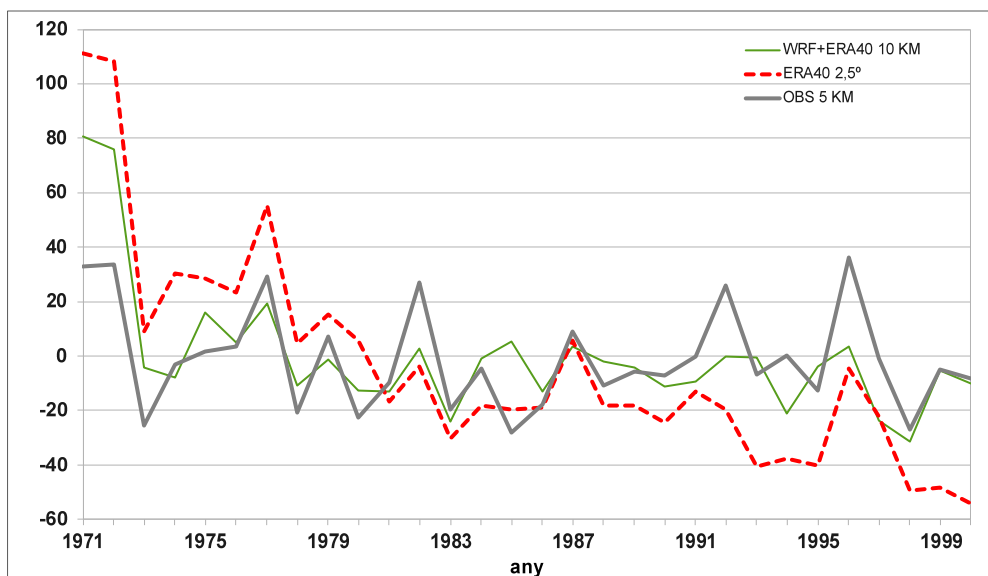


Fig. 7. Anomalia de precipitació (%) per al període 1971-2000 derivada de la simulació regionalitzada del WRF-ARW/ERA40, les observacions (CSOC-SMC) i l'ERA40.

#### 4.1.1 Avaluació de les projeccions 2001-2011

Tot seguit s'avaluen les projeccions de temperatura i precipitació per al període 2001-2011, comparant els resultats de la simulació WRF-ARW/ERA40 a 10 km amb les observacions. D'aquesta manera és té una primera anàlisi per a valorar la versemblança de les projeccions per al període 2011-2050 que es presenten més endavant.

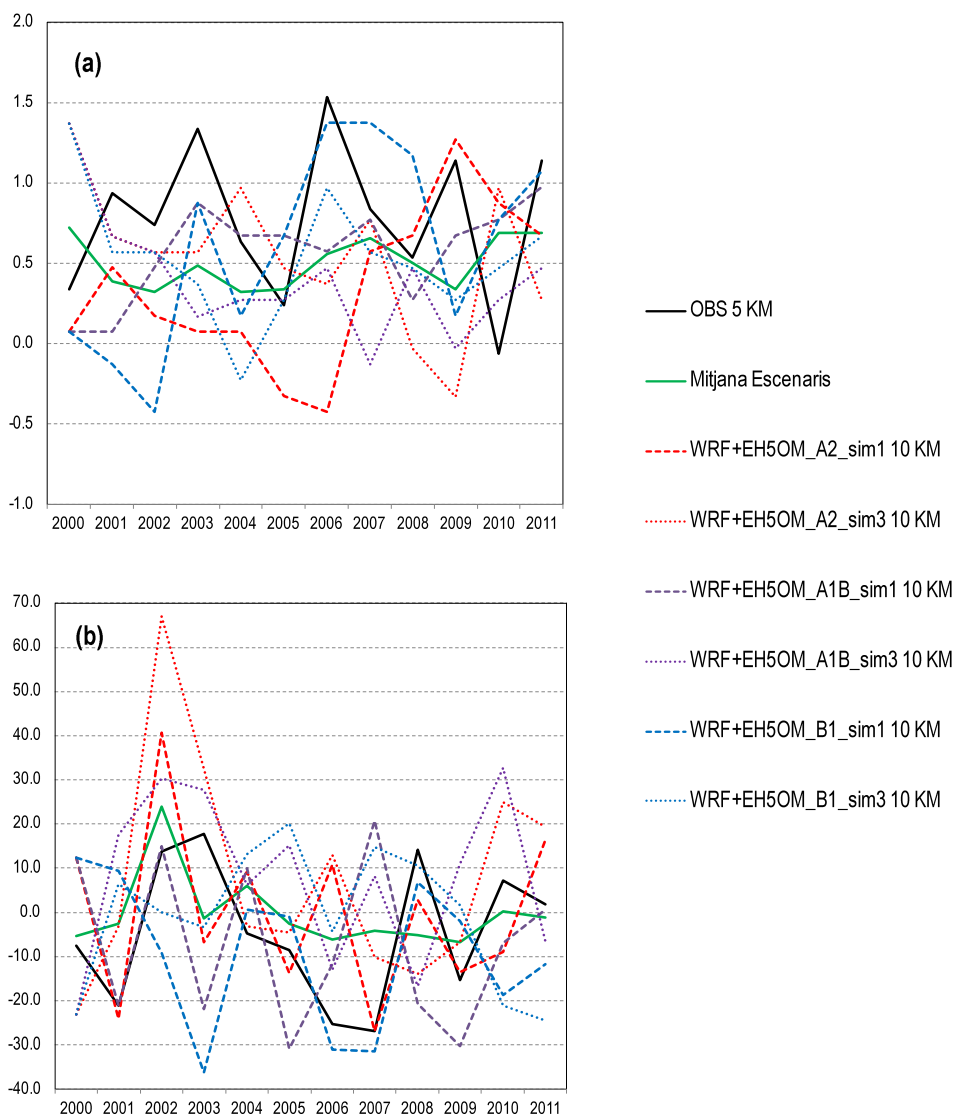


Fig. 8. Evolució temporal de les anomalies de temperatura (a) i precipitació (b) mitjanes anuals per al període 2001-2011 obtingudes a partir de les simulacions regionalitzades amb el WRF-ARW.

La comparació entre els valors de les projeccions per al període 2001-2011 i les observacions (Fig. 8) mostren a grans trets que el model reproduïx correctament la tendència observada durant aquest període. No obstant, per a les anomalies de temperatura s'observa que el model produeix un rang de variabilitat amb valors menors que els observats, per tant és probable que el rang de variació projectat a partir del model per al període 2011-2050 es quedi per sota del s'acabarà produint realment. Per a les anomalies de precipitació, els valors projectats mostren un rang de variabilitat molt més elevat (sent fins a gairebé el doble) que el present a les observacions, amb la qual cosa és força probable que les projeccions per al període 2011-2050 sobreestimïn el rang de la variabilitat interanual.



## 4.2 Projeccions regionalitzades a Catalunya per al 2011-2050

A continuació es presenten les variacions de la temperatura a 2 m, la precipitació acumulada i la velocitat del vent a 10 m sobre Catalunya per al període 2011-2050 i els diferents escenaris d'emissions seleccionats respecte dels valors del període de referència o control (1971-2000), segons les projeccions del WRF-ARW/EH5OM.

### 4.2.1 Variació de la temperatura mitjana anual i estacional (2011-2050 vs. 1971-2000)

Per a tots els escenaris simulats es projecta un increment de la temperatura mitjana anual (TMA) a Catalunya, que en l'horitzó del 2050 podria variar entre 1,5 i 2,0 °C (Fig. 9). Per tant, independentment de l'escenari que es consideri, es pot dir que la temperatura mitjana anual a Catalunya augmentarà molt probablement durant els propers 40 anys. Aquest increment és estadísticament significatiu per al període 2001-2050, amb un nivell de confiança del 95% calculat a partir d'una tècnica Monte Carlo, amb una tendència lineal mitjana d'1,2°C en 50 anys per al conjunt de Catalunya, calculada a partir de la mitjana de les sis simulacions regionalitzades que s'han desenvolupat.

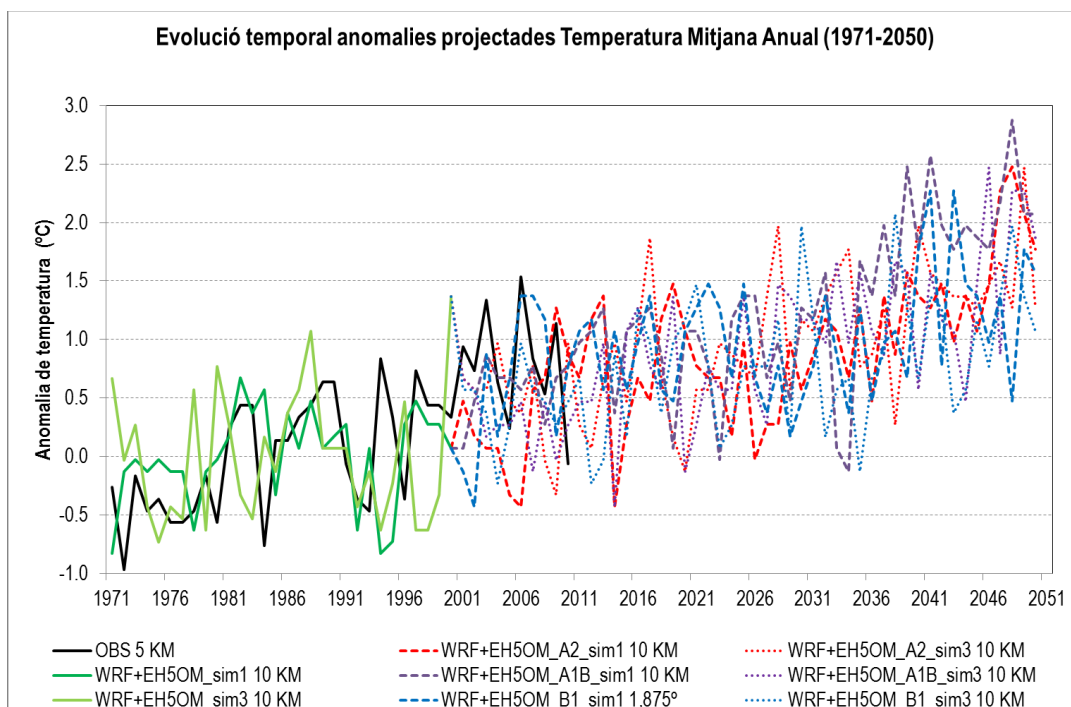


Fig. 9. Anomalia de temperatura (°C) derivada de les simulacions regionalitzades del WRF-ARW/EH5OM sim1 i sim3 per al 1971-2000 i projeccions per al 2001-2050, segons els escenaris d'emissió A2, A1B i B1.

Els increments serien majors als escenaris amb una major concentració de GEH (A1B i A2), respecte dels projectats per a l'escenari més optimista (B1). La definició d'escenaris comporta una evolució d'emissions molt semblant per als escenaris A1B i A2 a la primera meitat del s. XXI, fet que es reflecteix en l'evolució projectada de la temperatura, amb variacions per tots dos escenaris del mateix ordre de magnitud. D'altra banda es projecta un increment de la variabilitat interanual de la temperatura per a aquests escenaris a partir del 2030-2035.

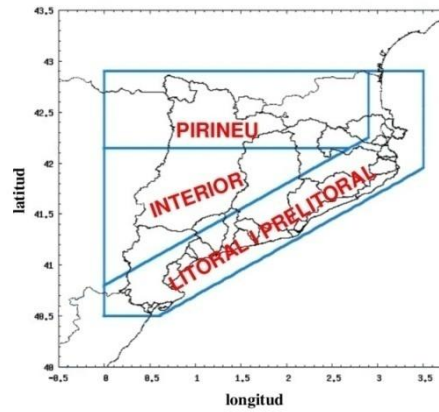


Fig. 10. Representació de les zones climàtiques diferenciades al territori Català: Pirineu, Interior, i Litoral i prelitoral.

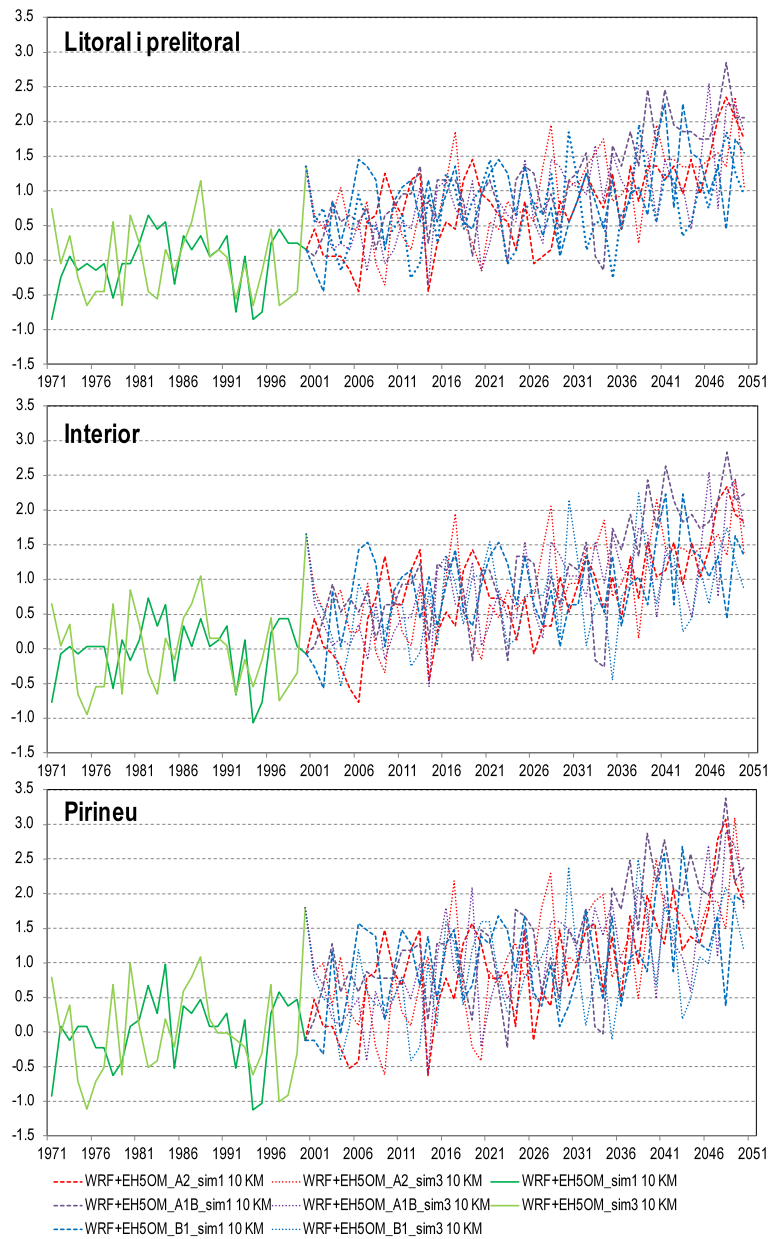


Fig. 11. Anomalia de temperatura (°C) derivada de les simulacions regionalitzades del WRF-ARW/EH5OM sim1 i sim3 per al 1971-2000 i projeccions per al 2001-2050, segons els escenaris d'emissió A2, A1B i B1 al Litoral i prelitoral (a dalt), al interior (panell del mig) i al Pirineu (a sota).

Si es divideix el territori català en tres zones climàtiques diferenciades: el Litoral i prelitoral, l'interior i la zona dels Pirineus (Fig. 10), es detecta una major variabilitat interanual de la temperatura als Pirineus que a l'interior o a zones costaneres. En particular, les temperatures projectades a la zona dels Pirineus per a mitjans del s. XXI serien de l'ordre de 0,4 fins a 3,4 °C majors que la mitjana per al període de control (Fig. 11). Al litoral, prelitoral i terres de l'interior aquestes variacions projectades es mouen entre els 0.5 i els 2.9 °C. Independentment de la zona s'aprecia un increment de la variabilitat interanual de la temperatura a partir de l'any 2030, com ja s'havia apreciat en l'anomalia de la temperatura mitjana sobre tot el territori.

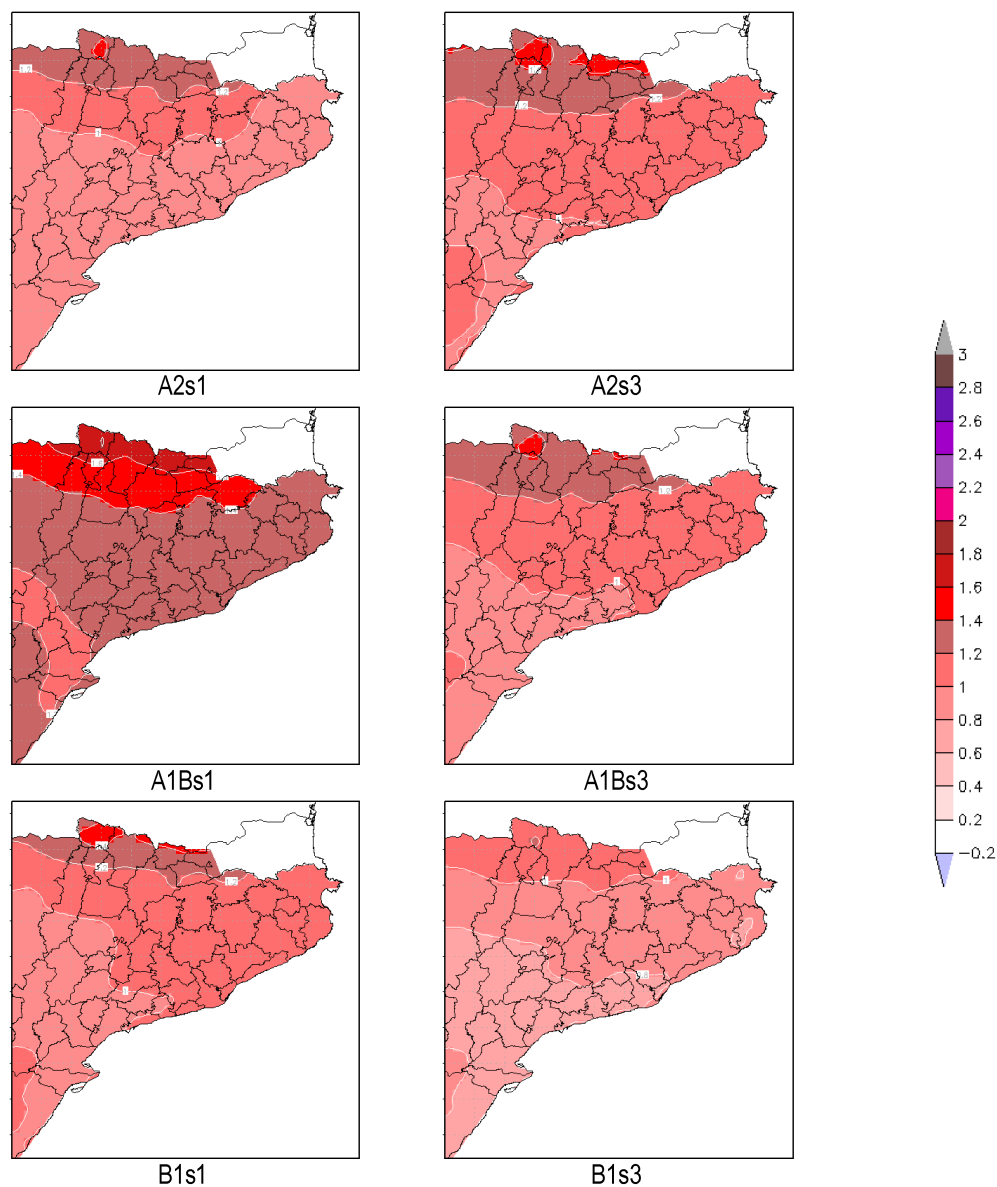


Fig. 12. Variació projectada de la temperatura mitjana anual (°C) per al període 2011-2050 respecte del període de referència 1971-2000 per al territori català segons els escenaris A2, A1B i B1 (de dalt a baix) a partir de les simulacions regionalitzades del WRF-ARW/EH5OM sim1 (s1, dreta) i sim3 (s3, esquerra).

La distribució espacial de les variacions projectades de la temperatura mitjana anual mostra majors increments a l'àrea dels Pirineus i un decreixement a mesura que decreix la latitud i l'altitud (augment més petits a la zona litoral). Per als escenaris més intensius en emissions (A2 i A1B) es projecten increments de temperatura mitjana anual a la cara nord dels Pirineus que podrien arribar a 1,4-1,6 °C respecte als valors del període de control (Fig. 12).

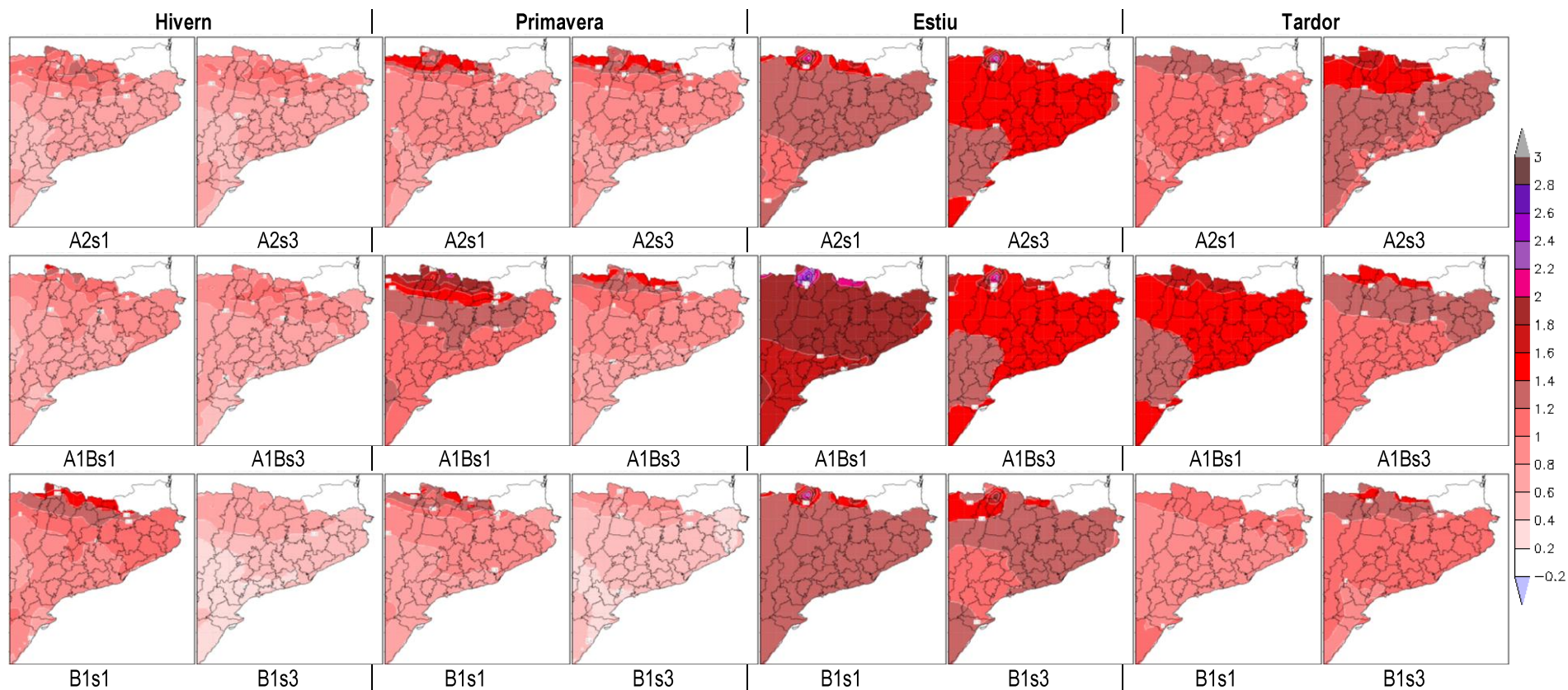


Fig. 13. Variació de la temperatura mitjana a l'hivern, la primavera, l'estiu i la tardor (°C) en el 2011-2050 per als escenaris A2, A1B i B1 (de dalt a baix) respecte del 1971-2000 per al territori català segons les projeccions del WRF-ARW/EH5OM sim1 (s1, dreta) i sim3 (s3, esquerra)

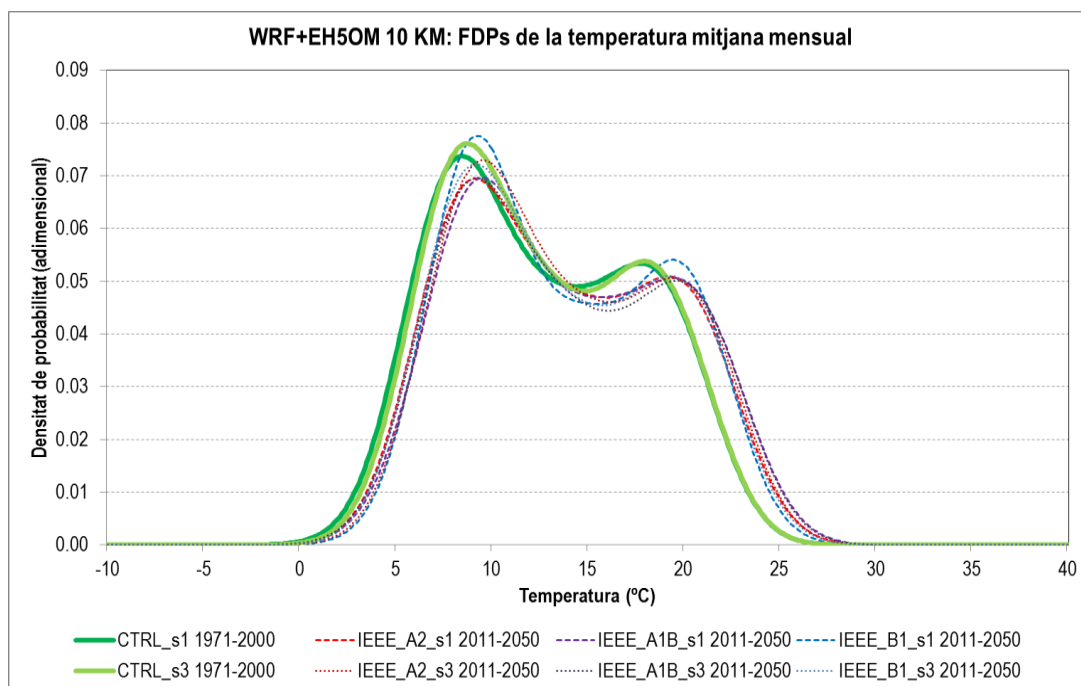


Fig. 14. Funcions de densitat de probabilitat (FDP) de la temperatura mitjana mensual per al període de control del s. XX (WRF-ARW/EH50M sim1 i sim3; 1971-2000: CTRL\_s1 i CTRL\_s3, respectivament) i en els escenaris d'emissió A2, A1B i B1 futurs (WRF-ARW/EH50M sim1 i sim3 2011-2050: IEEE).

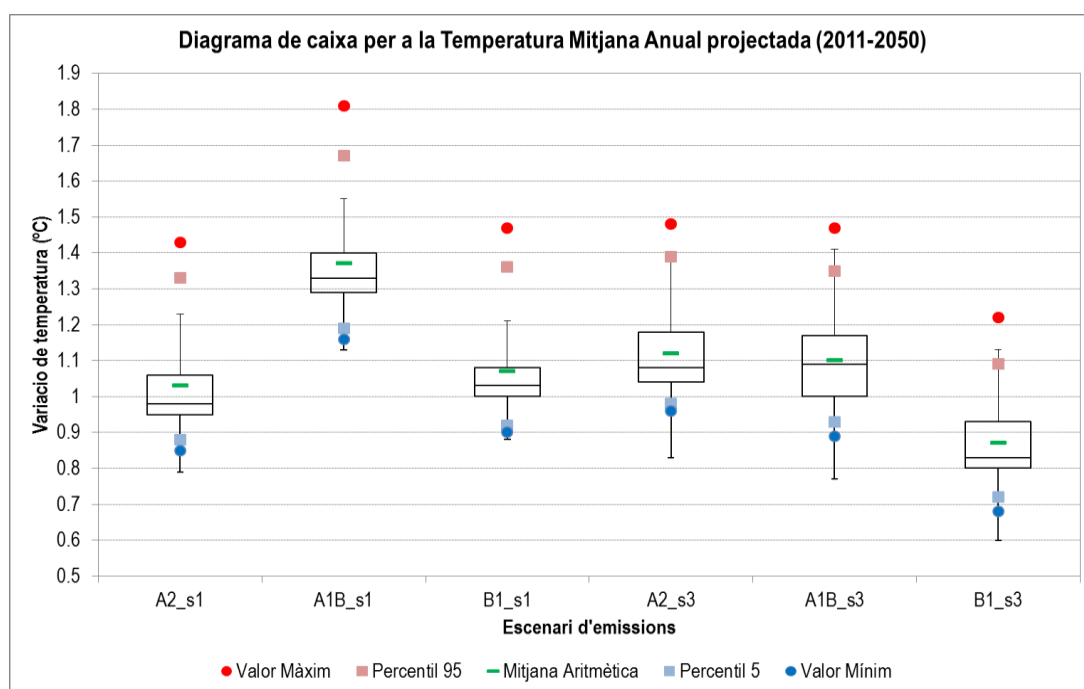


Fig. 15. Diagrama de caixa (boxplot) de les variacions projectades de temperatura mitjana anual (°C) per als escenaris A2, A1B i B1 en les simulacions regionalitzades amb el WRF-ARW/EH50M sim1 i sim3 en el període 2011-2050. Els límits de les caixes representen el quartil inferior, la mediana i el quartil superior. Les línies negres presenten els valors màxim i mínim si la mostra seguís una distribució normal. La mitjana aritmètica es presenta amb una línia verda, els percentils 95 i 5 amb un quadre rosa i blau clar i els valors màxim i mínim de la mostra amb punts vermells i blaus.



En analitzar la variació de la temperatura mitjana estacional es corroboren els resultats de l'anàlisi de la temperatura mitjana anual, és a dir, s'observen increments generalitzats de temperatura, amb un gradient latitudinal i altitudinal, sent màximes aquestes variacions per l'àrea dels Pirineus en tots els escenaris. La temperatura mitjana a l'estiu és la que es veuria més afectada, amb increments que, en àrees com la Vall d'Aran, podrien arribar als 2,2 °C (escenari A1Bs1). La regió litoral-prelitoral sud és la menys afectada per les variacions de temperatura mitjana estacional en tots els escenaris (Fig. 13).

Taula 5. Taula resum de les variacions projectades per a la temperatura mitjana anual a 2 m a partir de les simulacions regionalitzades amb el WRF/ARW a 10 km per al període 2011-2050 respecte a 1971-2000. Mit. es refereix al valor mitjà de totes les variacions projectades; Màx., al valor màxim; Mín., al valor mínim; P95, P75, P50, P25 i P5 corresponen respectivament als percentils 95, 75, 50 (mediana), 25 i 5 de totes les variacions projectades.

Escenari	Estació	Variació Temperatura (°C)							
		Mit.	Màx.	Mín.	P95	P75	P50	P25	P5
A2_s1	Anual	+1,0	+1,4	+0,8	+1,3	+1,1	+1,0	+1,0	+0,9
	DGF	+0,8	+1,3	+0,4	+1,2	+0,9	+0,7	+0,7	+0,5
	MAM	+0,9	+1,6	+0,7	+1,4	+0,9	+0,8	+0,8	+0,7
	JJA	+1,3	+2,2	+1,1	+1,4	+1,4	+1,3	+1,3	+1,1
	SON	+1,1	+1,4	+0,9	+1,3	+1,2	+1,1	+1,0	+1,0
A1B_s1	Anual	+1,4	+1,8	+1,2	+1,7	+1,4	+1,3	+1,3	+1,2
	DGF	+0,9	+1,5	+0,6	+1,3	+0,9	+0,9	+0,8	+0,6
	MAM	+1,3	+2,0	+1,0	+1,8	+1,3	+1,2	+1,1	+1,1
	JJA	+1,9	+2,9	+1,7	+1,9	+1,9	+1,9	+1,8	+1,7
	SON	+1,5	+1,7	+1,3	+1,6	+1,5	+1,4	+1,4	+1,3
B1_s1	Anual	+1,1	+1,5	+0,9	+1,4	+1,1	+1,0	+1,0	+0,9
	DGF	+1,1	+1,8	+0,8	+1,6	+1,1	+1,0	+0,9	+0,8
	MAM	+0,9	+1,5	+0,7	+1,3	+0,9	+0,8	+0,8	+0,7
	JJA	+1,3	+2,3	+1,2	+1,4	+1,4	+1,3	+1,3	+1,2
	SON	+1,0	+1,2	+0,9	+1,1	+1,0	+1,0	+0,9	+0,9
A2_s3	Anual	+1,1	+1,5	+1,0	+1,4	+1,2	+1,1	+1,0	+1,0
	DGF	+0,8	+1,2	+0,5	+1,0	+0,8	+0,7	+0,7	+0,6
	MAM	+0,9	+1,6	+0,7	+1,4	+1,0	+0,9	+0,8	+0,7
	JJA	+1,5	+2,3	+1,3	+1,6	+1,5	+1,5	+1,4	+1,3
	SON	+1,3	+1,7	+1,1	+1,6	+1,4	+1,3	+1,2	+1,2
A1B_s3	Anual	+1,1	+1,5	+0,9	+1,3	+1,2	+1,1	+1,0	+0,9
	DGF	+0,8	+1,2	+0,5	+1,1	+0,9	+0,8	+0,7	+0,6
	MAM	+0,9	+1,5	+0,6	+1,4	+1,0	+0,9	+0,8	+0,7
	JJA	+1,5	+2,3	+1,3	+1,6	+1,5	+1,5	+1,5	+1,4
	SON	+1,2	+1,6	+1,0	+1,5	+1,3	+1,2	+1,1	+1,0
B1_s3	Anual	+0,9	+1,2	+0,7	+1,1	+0,9	+0,8	+0,8	+0,7
	DGF	+0,5	+0,8	+0,3	+0,8	+0,7	+0,5	+0,4	+0,3
	MAM	+0,5	+1,0	+0,3	+0,9	+0,6	+0,5	+0,4	+0,4
	JJA	+1,3	+2,0	+1,1	+1,4	+1,3	+1,2	+1,2	+1,1
	SON	+1,1	+1,4	+1,0	+1,4	+1,2	+1,1	+1,1	+1,0

A partir de l'anàlisi de les funcions de densitat de probabilitat (FDP) de la temperatura mitjana mensual projectada per al conjunt de tot el territori de Catalunya (Fig. 14), es pot concloure que per a tots els escenaris futurs es projecta un augment de la freqüència dels mesos càlids, amb temperatures mitjanes mensuals (TMM) de l'ordre d'1-2°C més altes que al període de control. Per contra, es continuaran produint mesos molt freds (TMM < 2°C) amb una freqüència semblant a l'actual (període 1971-2000).

Amb l'anàlisi del diagrama de caixa (boxplot) calculat a partir de totes les variacions anuals projectades per a la TMA a Catalunya per al període 2011-2050 (Fig. 15), es pot afirmar que el rang de variació de la TMA més probable per als propers 40 anys seria de 0,9 a 1,2°C d'augment respecte als valors mitjans del

període de referència 1971-2000 a gran part del territori. Per al 95% del territori es projecta un augment de la TMA per sota dels 1,3°C (excepte per a la simulació A1B\_s1) i per damunt dels 0,8°C (excepte per a la simulació B1\_s3) per a gairebé totes les simulacions regionalitzades. Tot i així s'ha de destacar que el rang de variabilitat espacial per al conjunt d'escenaris en l'augment de la TMA és d'1,1°C (0,7-1,8°C). Per una altra banda, l'augment de la TMA és altament dependent de la concentració de GEH, excepte per a l'escenari A1B de la simulació 1 de l'EH5OM. A la En analitzar la variació de la temperatura mitjana estacional es corroboren els resultats de l'anàlisi de la temperatura mitjana anual, és a dir, s'observen increments generalitzats de temperatura, amb un gradient latitudinal i altitudinal, sent màximes aquestes variacions per l'àrea dels Pirineus en tots els escenaris. La temperatura mitjana a l'estiu és la que es veuria més afectada, amb increments que, en àrees com la Vall d'Aran, podrien arribar als 2,2 °C (escenari A1Bs1). La regió litoral-prelitoral sud és la menys afectada per les variacions de temperatura mitjana estacional en tots els escenaris (Fig. 13).

Taula 5 es troben resumits tots els valors calculats per a realitzar el diagrama de caixa de les variacions projectades en la TMA. També es mostren els mateixos valors per a les quatre estacions de l'any.

#### 4.2.2 Variació de precipitació mitjana anual i estacional (2011-2050 vs. 1971-2000)

L'evolució de les anomalies projectades de la precipitació mitjana anual (PMA) en el 2011-2050 respecte dels valors actuals és altament dependent de l'escenari d'emissions que es consideri (Fig. 16). Mentre que l'escenari A2 presenta una disminució general de la precipitació fins al 2050, en l'A1B la tendència no està tan clara i s'observen diferències importants en funció de la simulació del model global (EH5OM sim1 o sim3). Pel que fa a l'escenari B1 el valor mitjà de la PMA es manté aproximadament constant. Tot i així, la mitjana de les sis simulacions desenvolupades presenta, per al període 2001-2050, una tendència lineal a una disminució del 7,5% en 50 anys, la qual és estadísticament significativa amb un nivell de confiança del 95%. Per una altra banda, la variabilitat interanual de la precipitació augmentaria en tots els escenaris simulats, amb desviacions de la mitjana molt importants per a alguns anys en el cas de l'escenari A2. L'escenari que presenta una variabilitat interanual menys acusada és el B1.

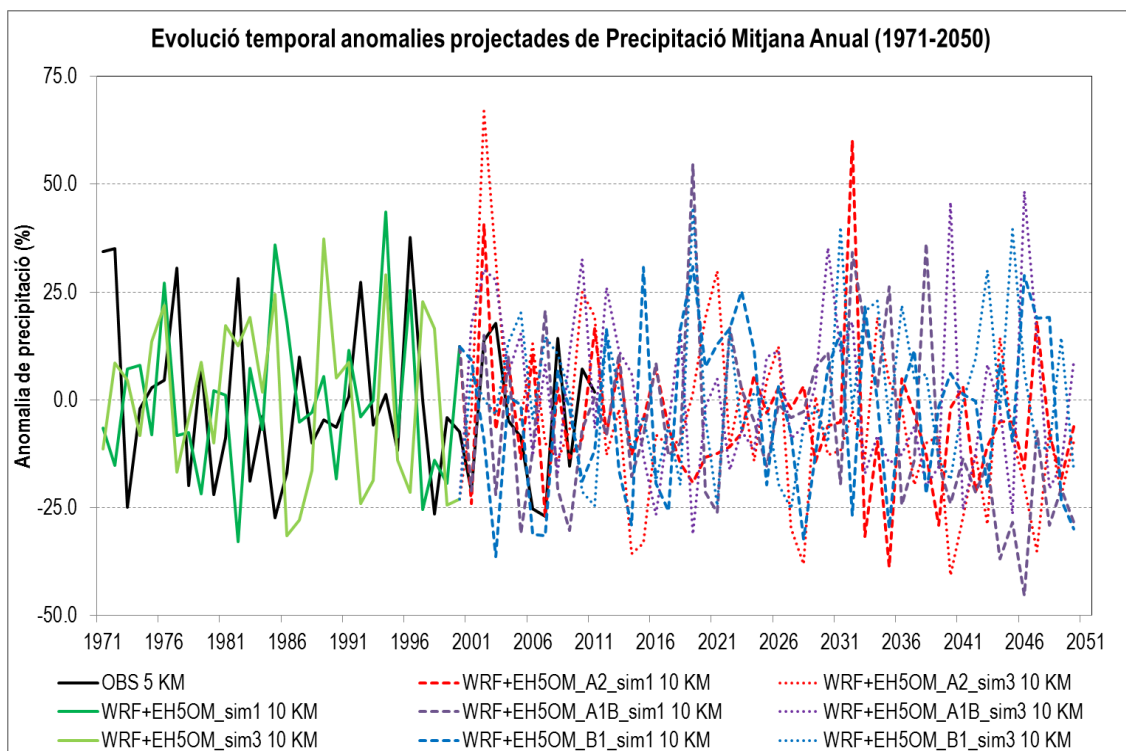


Fig. 16. Anomalies projectades de la precipitació mitjana anual (%) calculades a partir de les simulacions regionalitzades del WRF-ARW/EH5OM sim1 i sim3 per al període 1971-2050 segons els escenaris d'emissions A2, A1B i B1.

Si es consideren les zones climàtiques definides anteriorment (Fig. 10) s'observa que aquesta variabilitat és més gran al litoral i prelitoral, que a l'interior i a la vegada en aquesta zona major que a l'àrea dels Pirineus (Fig. 17). En particular, al litoral i prelitoral la precipitació acumulada anual en el període 2001-2050 podria ser entre un 75% menys i un 120% més que la mitjana del període de control (1971-2000), mentre que als Pirineus, la variació projectada en el 2001-2050 respecte del 1971-2000 es trobaria entre un -25% i un 50%.



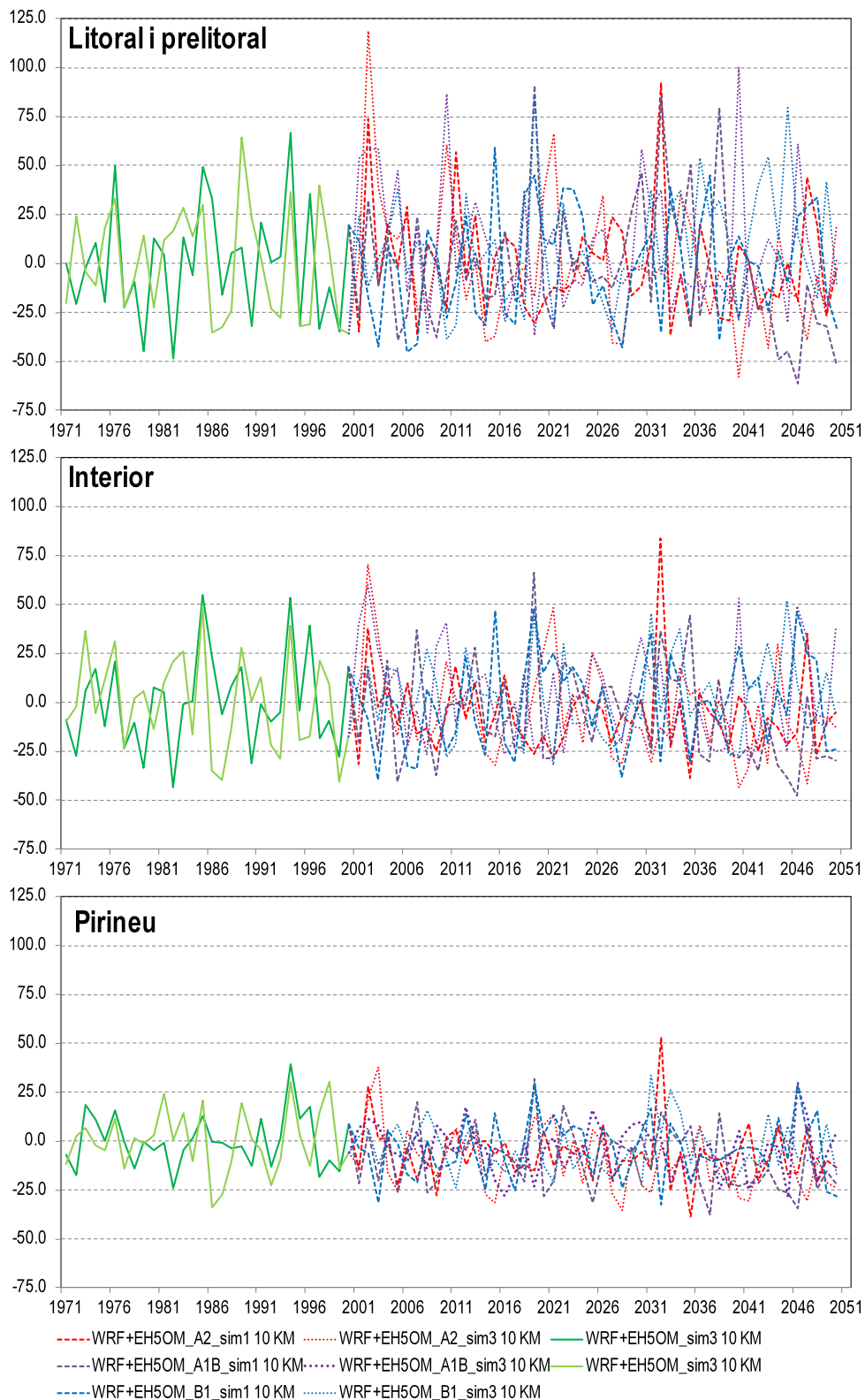


Fig. 17. Anomalia de precipitació (%) derivada de les simulacions regionalitzades del WRF-ARW/EH5OM sim1 i sim3 per al 1971-2000 i projeccions per al 2001-2050, segons els escenaris d'emissió A2, A1B i B1 al Litoral i prelitoral (a dalt), al interior (panell del mig) i al Pirineu (a sota).

Pel que fa referència a la variabilitat espacial, es projecten disminucions de la precipitació mitjana anual a la cara nord dels Pirineus en tots els escenaris (Fig. 18). Al litoral, per contra es donen augments o variacions poc importants. En particular, en els escenaris B1 i A1B la PMA a l'àrea litoral i prelitoral

tendria a augmentar. Pel que fa a l'àrea de l'interior de Catalunya, tant l'escenari A1B com l'A2 mostren una tendència a la disminució de la PMA. La variabilitat interanual de la PMA depèn també de la regió climàtica, sent més reduïda als Pirineus, que a l'interior, i aquesta a la vegada menor que al litoral i prelitoral.

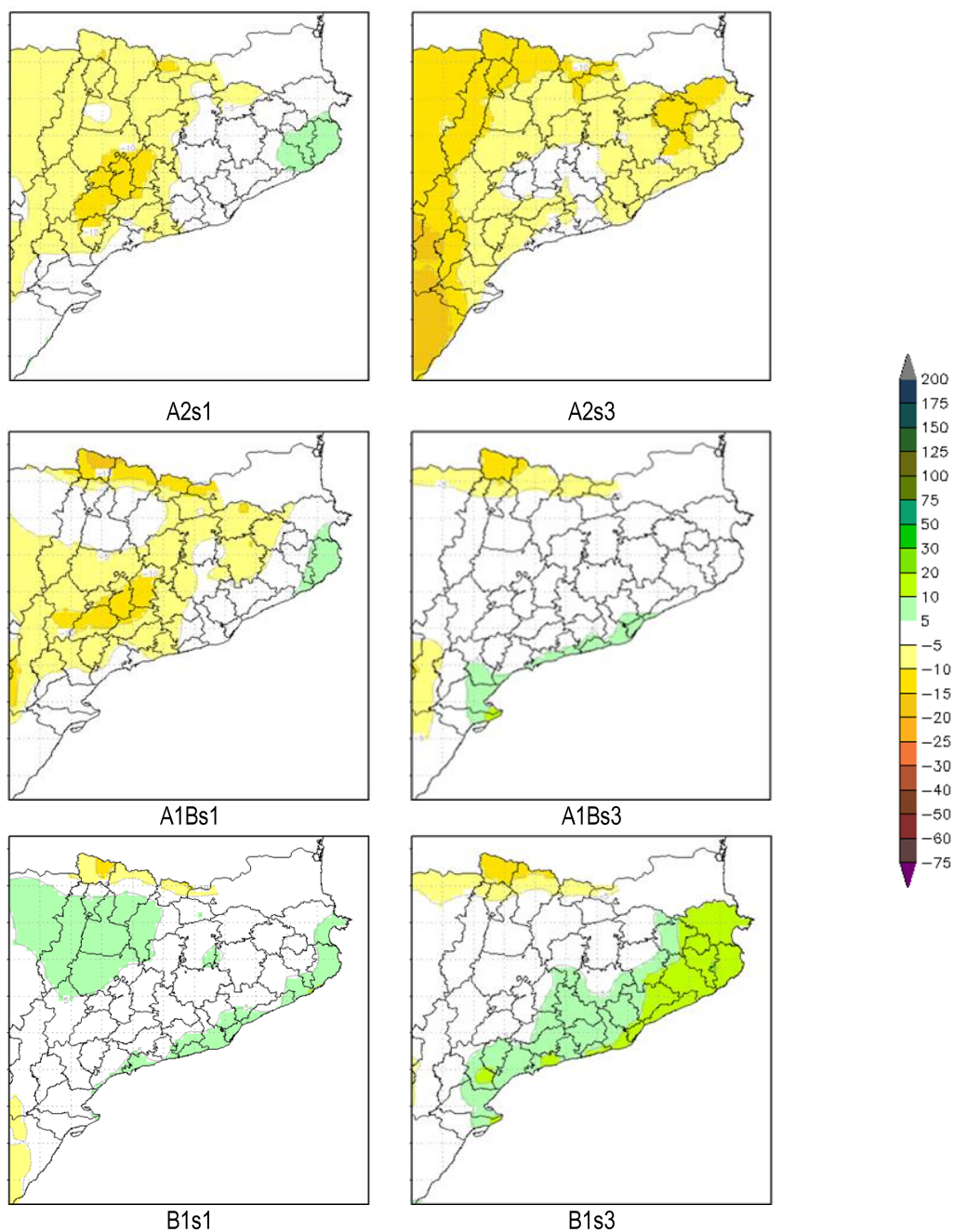


Fig. 18. Variació de la precipitació mitjana anual (%) en el 2011-2050 respecte del 1971-2000 per al territori català en els escenaris A2, A1B i B1 (de dalt a baix) segons les projeccions del WRF-ARW/EH5OM sim1 (s1, dreta) i sim3 (s3, esquerra).

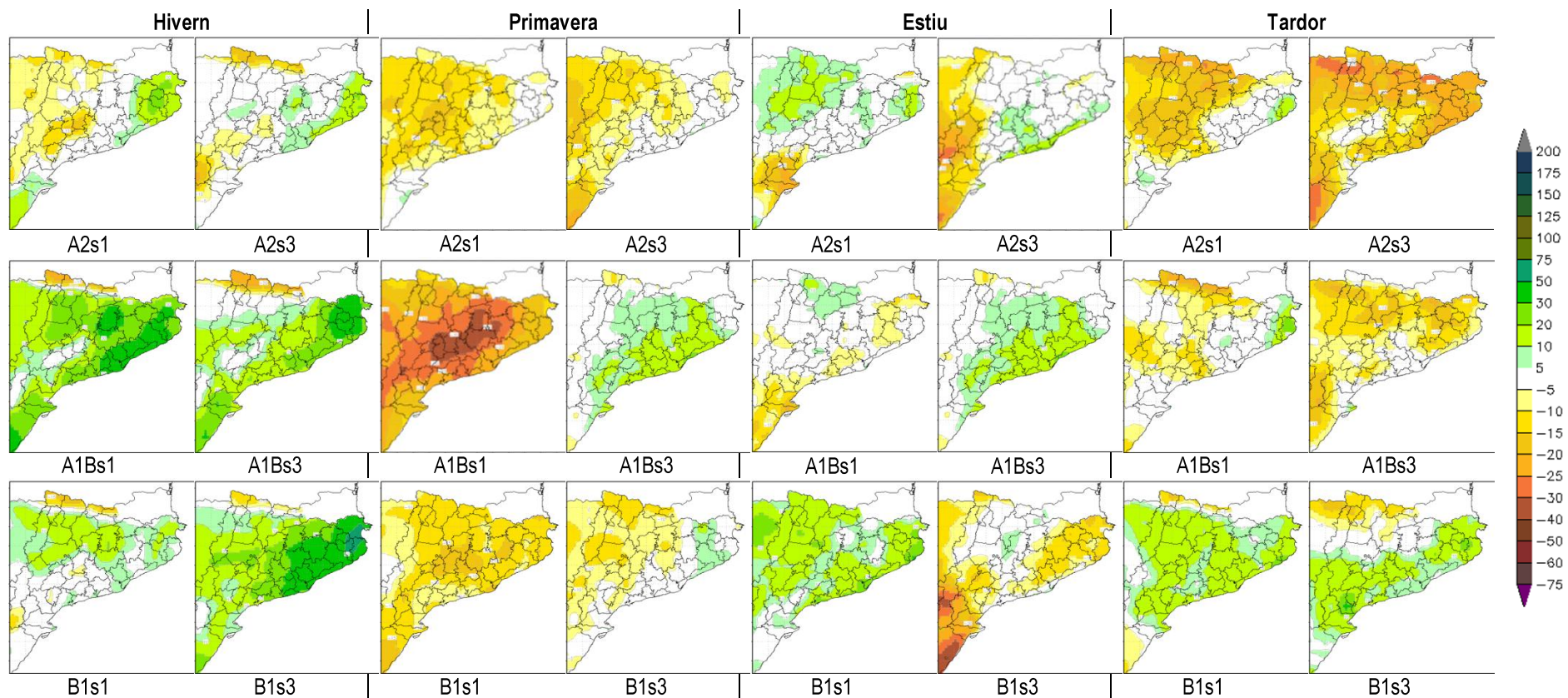


Fig. 19. Variació de la temperatura mitjana a l'hivern, la primavera, l'estiu i la tardor (%) en el 2011-2050 per als escenaris A2, A1B i B1 (de dalt a baix) respecte del 1971-2000 per al territori català segons les projeccions del WRF-ARW/EH5OM sim1 (s1, dreta) i sim3 (s3, esquerra)

La variació de la precipitació mitjana estacional és altament dependent de l'escenari (Fig. 19). A l'hivern tots els escenaris mostren increments de precipitació a l'àrea litoral i prelitoral, que en els escenaris A1B i B1 podrien superar el 50%, en particular a la zona nord-est. Es projecten també disminucions de la precipitació als Pirineus, més intenses a l'escenari A1B (fins al 20%). L'interior de Catalunya podria veure's afectat per disminucions de la pluviositat a l'hivern, per exemple a l'escenari A2, o fins i tot increments, als escenaris A1B i B1. A la primavera, segons l'escenari A2 es produiria una disminució de la precipitació a gairebé tot el territori català. L'escenari A1B presenta una gran incertesa, amb increments i disminucions a l'interior depenent de la simulació del model global (ECHAM5/MPI-OM) que es consideri. En qualsevol cas es donaria una reducció de la precipitació a l'àrea pirinenca, que també es projecta per al cas de l'escenari B1. Aquest escenari d'emissions, el més optimista quant a concentració de GEH, mostra també reduccions de la precipitació mitjana a la primavera, del 5 al 15%, a l'interior de Catalunya.

Els resultats per la precipitació mitjana a l'estiu mostren una incertesa elevada, donat que la seva tendència de variació respecte dels valors del segle XX varia en funció no només de l'escenari, sinó també depenent de la simulació del model global que s'hagi fet servir per al forçament del model regional (EH5OM sim1 o sim3). Es pot observar que l'estiu és l'única estació en què alguns dels escenaris estudiats mostren lleugers increments de la precipitació als Pirineus (del 5 al 10% per a l'escenari A2 i per als escenaris A1B i B1 només en el cas de la simulació 1 de l'EH5OM. La precipitació al litoral i prelitoral podria romandre en els mateixos valors actuals o incrementar-se una mica en el cas dels escenaris A2 i A1B. L'àrea de l'interior mostra reduccions de la precipitació al voltant del 20-25% per a la regió sud a l'escenari A2.

Finalment, la tardor seria més seca segons els escenaris A2 i A1B, especialment als Pirineus i l'interior de Catalunya. Si se seguís una evolució semblant a l'escenari B1, per contra, es donarien increments de la precipitació mitjana a la tardor especialment a l'àrea litoral i prelitoral, amb disminucions als Pirineus.

L'anàlisi de les funcions de densitat de probabilitat de la precipitació mitjana mensual, PMM, (Fig. 20) mostra una elevada freqüència de mesos amb pluges entre els 30 i els 75 mm als escenaris de control del s. XX (1971-2000). Les projeccions per al 2011-2050 indiquen que els escenaris B1 i A1B tendeixen a tenir més freqüència de mesos amb menys quantitat de pluja acumulada. D'altra banda s'hi observa un lleuger increment de la probabilitat que es donin mesos molt plujosos (per sobre de 100 mm de PMM), especialment a l'escenari A2.

Si s'analitza la pluja màxima diària mensual (Fig. 21) tots els escenaris futurs presenten una major probabilitat que els de control per a esdeveniments de pluja extrema, especialment en el cas de l'escenari A2, on s'observa un augment de la freqüència de mesos amb precipitació màxima diària per sobre dels 225 mm que arribaria a doblar el valor del període de control. Per tant, s'ha d'esperar que en els propers 40 anys augmenti la freqüència dels episodis de precipitació extremadament abundant (> 100 mm en 24h).



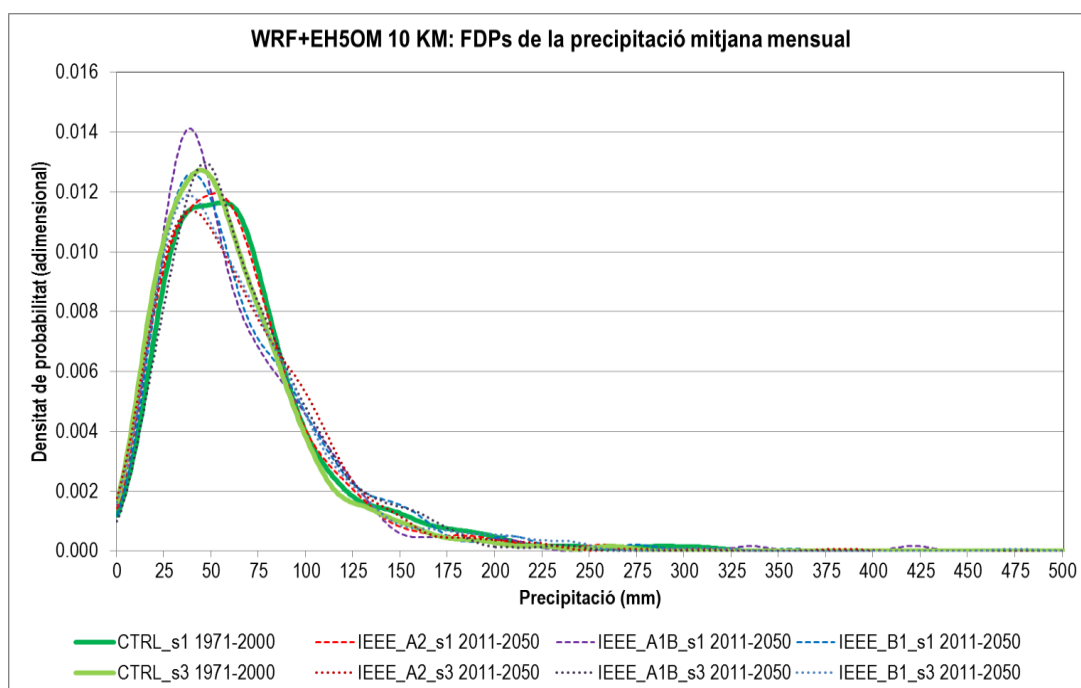


Fig. 20. Funció de densitat de probabilitat (FDP) de la precipitació mitjana mensual als escenaris de control del s. XX (WRF-ARW/ECHAM5/MPI-OM sim1 i sim3; 1971-2000: CTRL\_s1 1971 -2000 i CTRL\_s3 1971-2000) i als escenaris d'emissió A2, A1B i B1 futurs (WRF-ARW/ECHAM5/MPI-OM sim1 i sim3 2011-2050: IEEE).

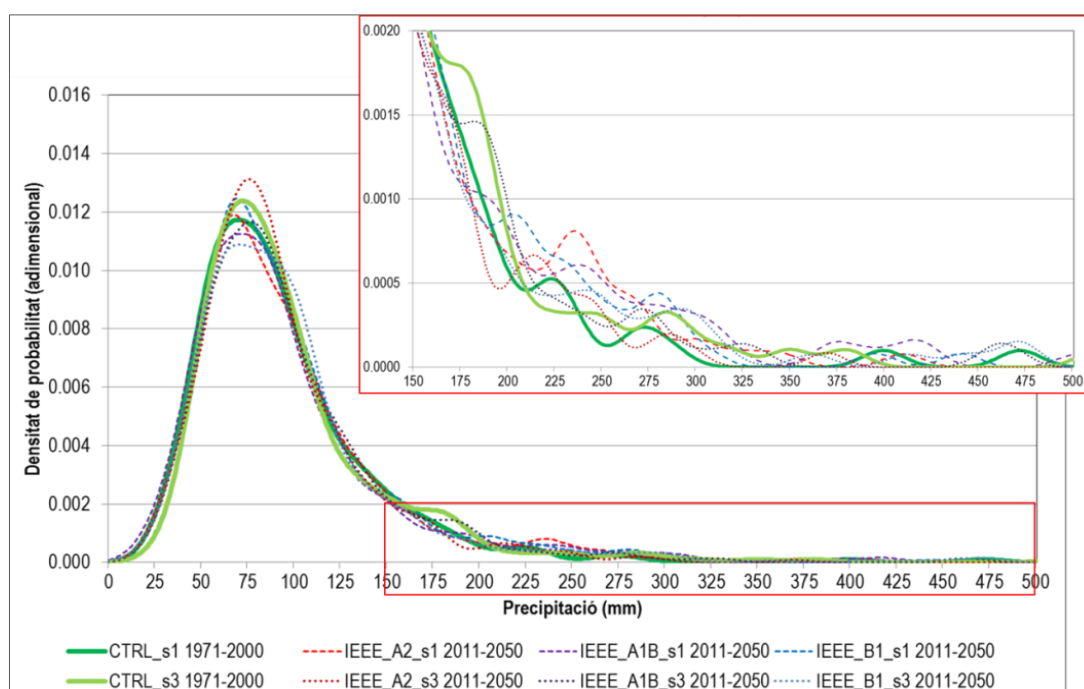


Fig. 21. Funció de densitat de probabilitat (FDP) de la precipitació màxima diària mensual als escenaris de control del s. XX (WRF-ARW/ECHAM5/MPI-OM sim1 i sim3; 1971-2000: CTRL\_s1 1971 -2000 i CTRL\_s3 1971-2000) i als escenaris d'emissió A2, A1B i B1 futurs (WRF-ARW/ECHAM5/MPI-OM sim1 i sim3 2011-2050: IEEE).

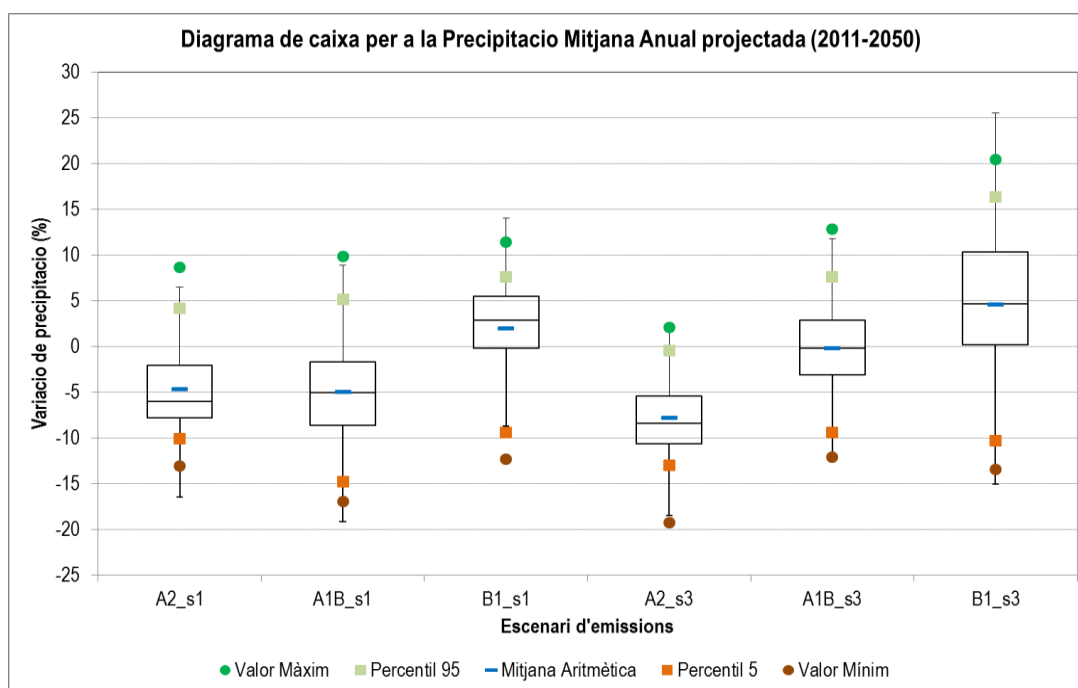


Fig. 22. Diagrama de caixa (boxplot) de la variació de precipitació mitjana anual (°C) per als escenaris A2, A1B i B1 projectada pel WRF-ARW/ECHAM5/MPI-OM sim1 i sim3 en el 2011-2050. Els límits de les caixes representen el quartil inferior, la mediana i el quartil superior. Les línies negres presenten els valors màxim i mínim si la mostra seguis una distribució normal. La mitjana aritmètica es presenta amb una línia blava, els percentils 95 i 5 amb un quadre verd clar i taronja i els valors màxim i mínim de la mostra amb punts verds i marrons.

Per als escenaris futurs, el rang de variació de la precipitació mitjana anual projectada més probable per als propers 40 anys seria del -10 al 5% segons el diagrama de caixa calculat a partir de totes les variacions anuals projectades per a la PMA a Catalunya per al període 2011-2050 (Fig. 22). El 90% del territori presenta una variació inferior al 5% i a prop d'un 60% del territori presenta una variació negativa de la PMA per al període 2011-2050. En general, s'hi observa una disminució de la PMA amb l'increment de la concentració de GEH. D'aquesta manera, l'escenari A2 és el que presenta les reduccions més importants dels estudiats i el B1 és el que presenta la menor disminució de la PMA. L'escenari A1B, presenta un comportament intermedi, molt semblant al de l'escenari A2, especialment per al cas de les projeccions del WRF-ARW/ECHAM5/MPI-OM sim1. L'escenari B1 és el que presenta una major variabilitat espacial. A la

Taula 6 es troben resumits tots els valors calculats per a realitzar el diagrama de caixa de les variacions projectades en la PMA. També es mostren els mateixos valors per a les quatre estacions de l'any.

L'anàlisi de la precipitació en forma de pluja es complementa amb la variació de la precipitació en forma de neu per al període 2001-2050. Donat que no es disposa de dades d'observació específiques de precipitació en forma de neu, no es proporciona una validació detallada dels resultats proveïts pel model per al s. XX. Tot i així, els patrons reproduïts pel model són coherents amb els esperats, com es pot veure a la Fig. 23, per al període de control (20C3M) amb els màxims de precipitació a l'àrea dels Pirineus, en alguns casos per sobre de 1000 mm de precipitació acumulada anual mitjana per al període 1971-2000.

Tots els escenaris projectats preveuen una disminució de la precipitació en forma de neu (Fig. 23). Per claredat només es presenten les variacions percentuals de neu per aquells punts del territori català on la precipitació acumulada anual supera els 30 mm. Les reduccions projectades serien més acusades als escenaris d'emissió més severos, A2 i A1B, i per a les cotes més baixes dels Pirineus. En particular, les

àrees amb major precipitació acumulada en forma de neu al s. XX podrien recollir fins un 30% menys en aquests escenaris. D'altra banda, per algunes zones del Prepirineu es projecta que per al 2001-2050 la quantitat anual de precipitació en forma de neu seria de l'ordre de la meitat que per al 1971-2000. Aquestes reduccions de la precipitació en forma de neu serien menys acusades a l'escenari B1, el més optimista quant a les emissions de GEH, inclús per al qual es projecten lleugers augments per al Pirineu Oriental.

Taula 6. Taula resum de les variacions projectades per a la precipitació mitjana a partir de les simulacions regionalitzades amb el WRF/ARW a 10 km per al període 2011-2050 respecte al 1971-2000. Mit. es refereix al valor mitjà de totes les variacions projectades; Màx., al valor màxim; Mín., al valor mínim; P95, P75, P50, P25 i P5 corresponen, respectivament, als percentils 95, 75, 50 (mediana), 25 i 5 de totes les variacions projectades.

Escenari	Estació	Variació Precipitació (%)							
		Mit.	Màx.	Mín.	P95	P75	P50	P25	P5
A2_s1	Anual	-4,7	+8,7	-13,1	+4,2	-2,1	-6,0	-7,8	-10,1
	DGF	-0,8	+24,2	-17,0	+16,9	+4,8	-2,3	-8,1	-12,5
	MAM	-9,7	+5,8	-20,3	-2,2	-7,6	-10,0	-12,5	-16,3
	JJA	+1,2	+17,2	-26,2	+11,7	+7,1	+3,1	-1,8	-17,7
	SON	-9,4	+13,2	-25,3	+5,4	-2,6	-10,8	-16,7	-21,0
A1B_s1	Anual	-5,0	+9,9	-17,0	+5,1	-1,6	-5,0	-8,7	-14,8
	DGF	+15,6	+41,2	-27,3	+34,5	+25,5	+18,9	+9,6	-21,2
	MAM	-22,6	-13,0	-33,5	-14,6	-18,1	-22,3	-26,9	-31,0
	JJA	-2,3	+14,9	-23,7	+6,9	+2,3	-1,7	-6,2	-14,3
	SON	-3,0	+26,6	-22,5	+13,4	+2,1	-3,3	-8,5	-17,6
B1_s1	Anual	+1,9	+11,4	-12,3	+7,7	+5,5	+2,9	-0,2	-9,4
	DGF	+3,0	+20,3	-25,0	+14,5	+8,3	+4,5	+0,3	-17,3
	MAM	-12,7	-0,7	-22,5	-7,5	-10,6	-12,5	-14,7	-18,6
	JJA	+11,9	+34,9	-11,3	+23,2	+16,1	+11,8	+7,5	+1,2
	SON	+9,5	+26,3	-16,7	+18,8	+14,2	+11,4	+7,3	-10,0
A2_s3	Anual	-7,9	+2,1	-19,2	-0,4	-5,4	-8,4	-10,6	-13,0
	DGF	+0,2	+24,2	-21,7	+17,0	+5,5	+0,2	-5,1	-16,8
	MAM	-5,8	+6,9	-19,4	+2,4	-1,5	-5,7	-10,0	-14,3
	JJA	-0,6	+32,7	-27,0	+22,6	+5,4	-1,9	-9,0	-17,7
	SON	-15,5	+6,0	-27,8	-1,1	-11,1	-16,8	-21,5	-25,1
A1B_s3	Anual	-0,2	+12,8	-12,1	+7,6	+2,9	-0,2	-3,1	-9,4
	DGF	+10,6	+41,5	-23,9	+31,8	+20,7	+11,7	+3,7	-21,8
	MAM	+6,4	+22,5	-10,9	+16,9	+11,5	+6,8	+1,6	-5,3
	JJA	+3,9	+39,8	-16,9	+22,6	+8,8	+2,5	-2,2	-10,4
	SON	-7,1	+19,6	-20,7	+10,8	-2,3	-8,6	-13,7	-17,5
B1_s3	Anual	+4,6	+20,4	-13,4	+16,4	+10,3	+4,6	+0,2	-10,3
	DGF	+19,9	+55,6	-14,0	+47,1	+32,4	+18,6	+9,3	-11,0
	MAM	-4,0	+11,7	-13,9	+7,3	+0,2	-5,6	-8,8	-11,8
	JJA	-7,1	+20,3	-30,6	+6,6	-1,3	-7,6	-13,1	-20,6
	SON	+6,5	+34,0	-17,9	+19,4	+13,6	+9,5	-1,1	-12,7

La precipitació en forma de neu es relaciona directament amb la recàrrega de reserves d'aigua dolça en zones d'alta muntanya durant l'hivern, que permeten recarregar els rius i aqüífers per a l'abastiment de la població i/o dels ecosistemes, especialment a la primavera. També podria tenir incidència en sectors turístics relacionats amb els esports de muntanya. Per tant, és important tenir-la en compte a l'hora de planificar futures polítiques d'adaptació i mitigació de les conseqüències del canvi climàtic.

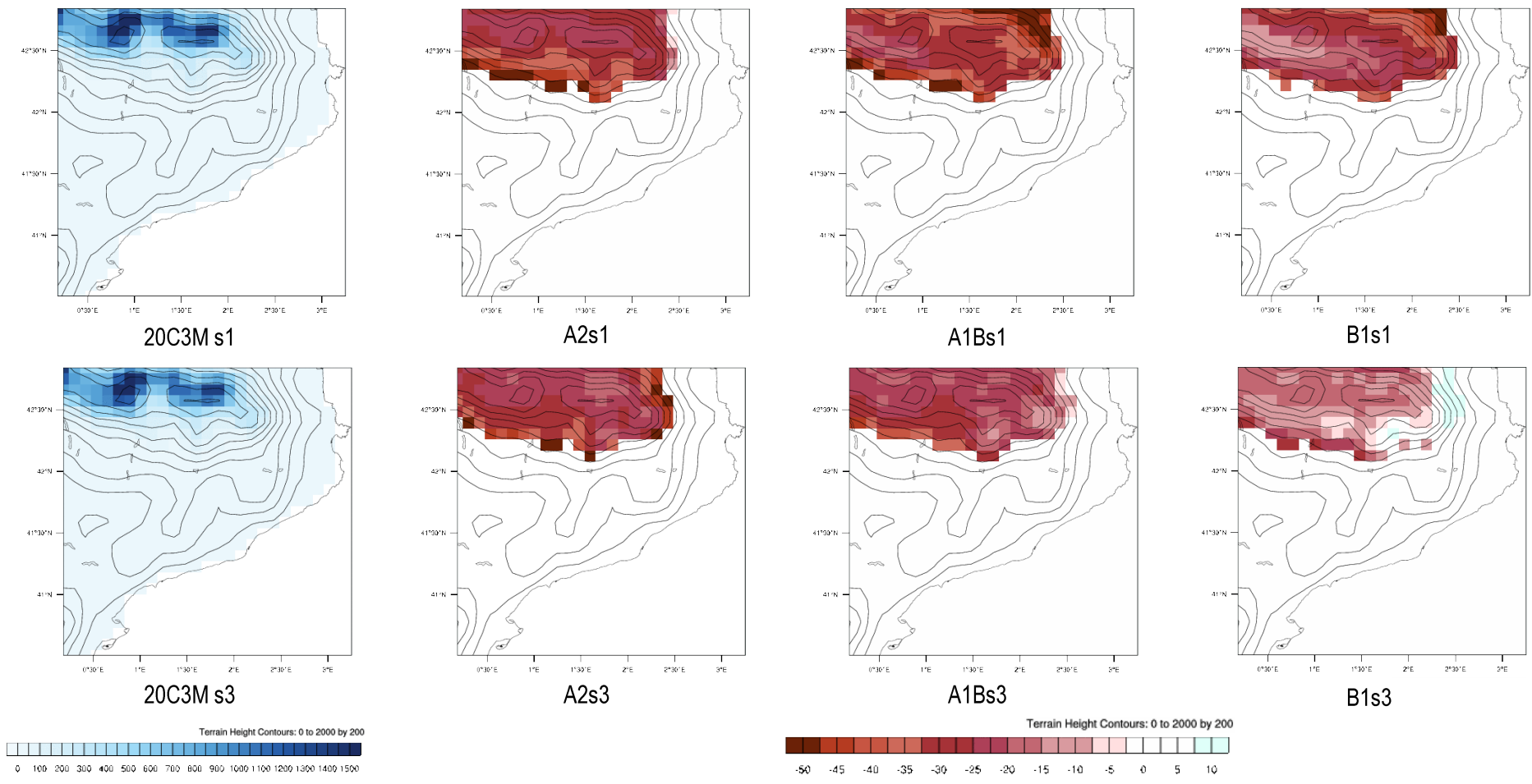


Fig. 23. Precipitació acumulada mitjana anual en forma de neu (mm) segons les simulacions del WRF-ARW/EH5OM simulació 1 (20C3Ms1) i simulació 3 (20C3Ms3) per al període 1971-2000, i diferència en la precipitació acumulada mitjana anual en forma de neu projectada per al 2001-2050 respecte del 1971-2000 segons les simulacions del WRF-ARW/EH5OM sim1 (a dalt) i sim3 (a sota) per als escenaris A2, A1B i B1 (d'esquerra a dreta) a Catalunya. Les isolínies contínues negres representen les corbes de nivell del model.



#### 4.2.3 Variació de la velocitat del vent mitjana anual i estacional (2011-2050 vs. 1971-2000)

Es pot observar a la Fig. 24 que la velocitat del vent mitjana anual (VVMA) durant els propers 40 anys disminuiria independentment de l'escenari d'emissions considerat, amb un augment associat a la seva variabilitat que podria arribar a ser gairebé el doble respecte a la del període de control. La mitjana de les sis simulacions desenvolupades mostra una tendència lineal per al període 2001-2050 de -2,7% en 50 anys, la qual és estadísticament significativa amb un nivell de confiança del 95%. Les majors reduccions en aquesta variable s'obtenen considerant l'escenari més sever en emissions, escenari A2.

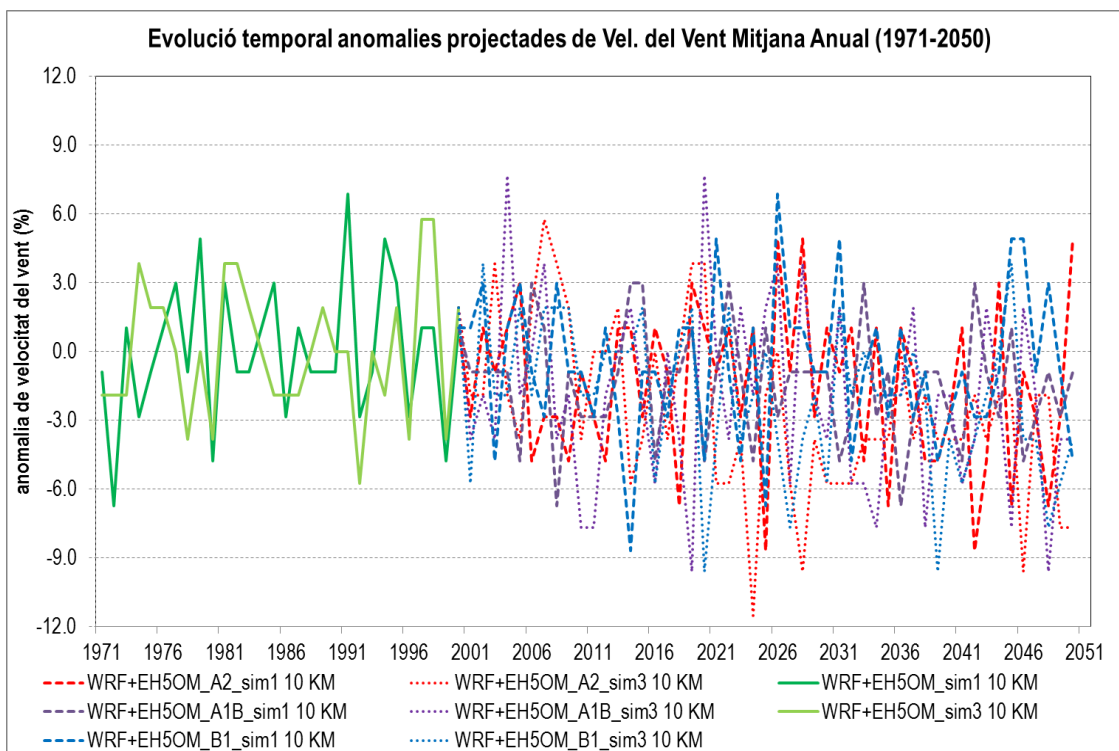


Fig. 24 Anomalies projectades de la velocitat del vent mitjana anual a 10 m (%) calculades a partir de les simulacions regionalitzades del WRF-ARW/EH5OM sim1 i sim3 per al període 1971-2050 segons els escenaris d'emissions A2, A1B i B1.

Analizant les diferents zones climàtiques definides (Fig. 10) s'observa una major variabilitat de la velocitat mitjana anual del vent en zones de l'Interior i Pirineus, respecte del Litoral i prelitoral. A més, la tendència a la disminució de la velocitat mitjana és més pronunciada en aquestes àrees, i no està tan clara al Litoral i prelitoral (Fig. 25).

Aquest fet es reflecteix també si s'analitza la variabilitat espacial de les projeccions. Es projecta una disminució general de la VVMA a tot el territori i per a tots els escenaris (Fig. 26), sent més important aquesta reducció a la cara sud dels Pirineus i a la zona dels Ports de Tortosa-Beseit, la qual podria arribar a ser de l'ordre del 5%. A escala estacional es manté el patró general que projecta una disminució de la velocitat mitjana a tot el territori, tot i que aquesta disminució és més important a la meitat occidental de Catalunya que no pas a la meitat oriental, on fins i tot per a algunes estacions es projecten lleugers augments. S'ha de comentar però que existeixen diferències apreciables entre escenaris i estacions (Fig. 27).

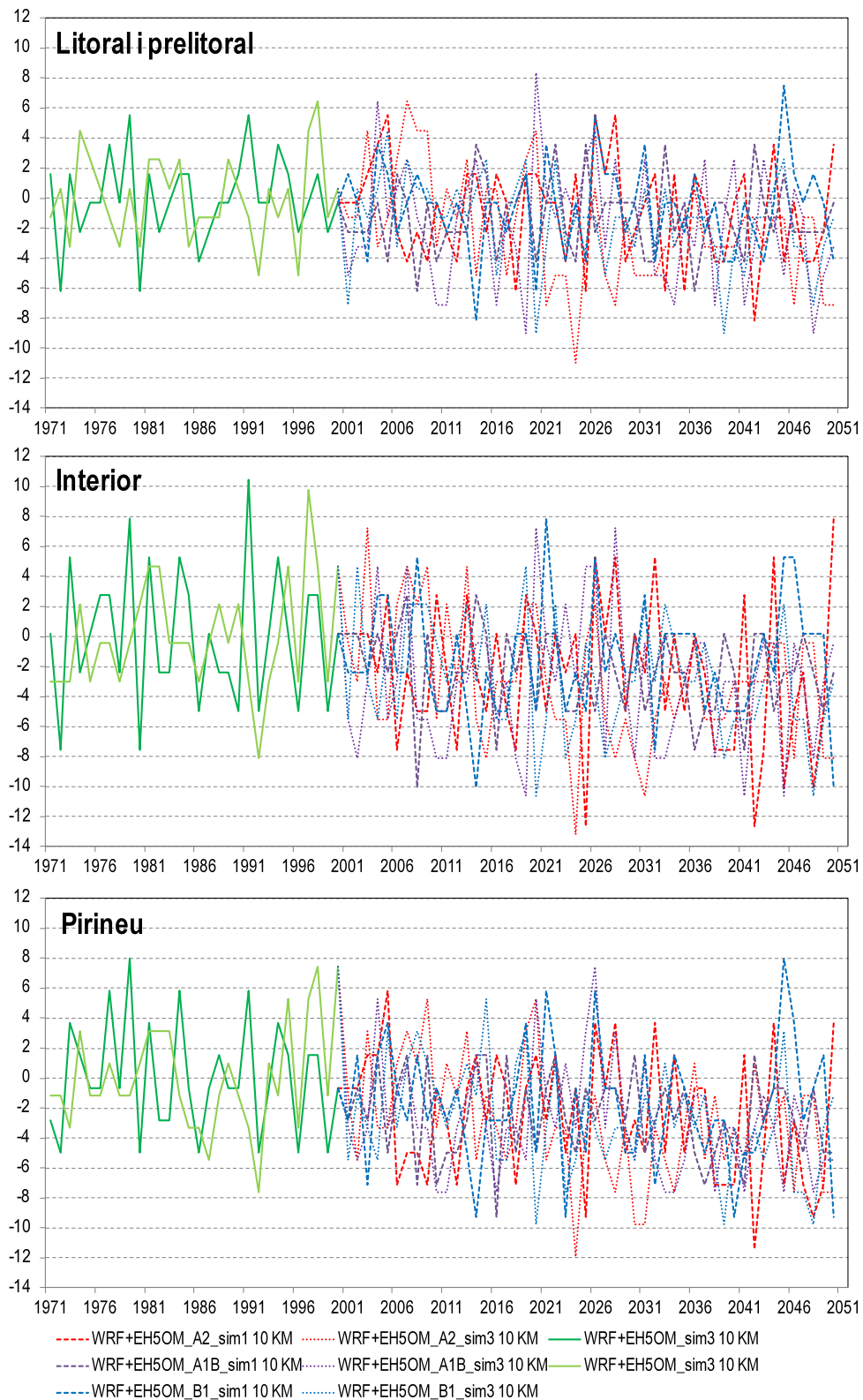


Fig. 25. Anomalia de la velocitat del vent mitjana anual (%) derivada de les simulacions regionalitzades del WRF-ARW/EH5OM sim1 i sim3 per al 1971-2000 i projeccions per al 2001-2050, segons els escenaris d'emissió A2, A1B i B1 al Litoral i prelitoral (a dalt), a l'interior (panell del mig) i als Pirineus (a sota).

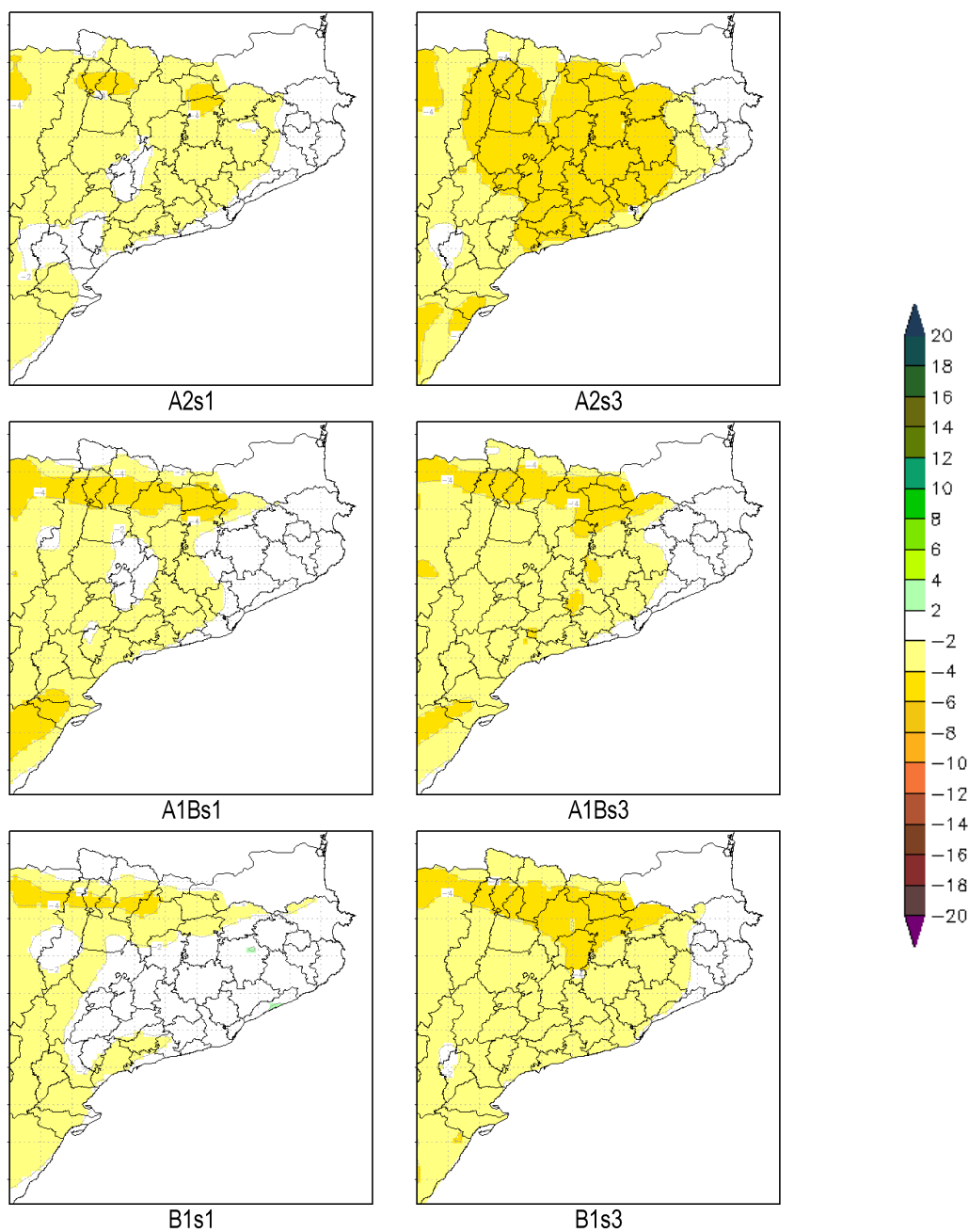


Fig. 26. Variació de la velocitat del vent mitjana anual (%) en el 2011-2050 respecte del 1971-2000 per al territori català en els escenaris A2, A1B i B1 (de dalt a baix) segons les projeccions del WRF-ARW/EH5OM sim1 (s1, dreta) i sim3 (s3, esquerra).

Analitzant les FDPs projectades (Fig. 28) per a la velocitat del vent mitjana mensual (VVMM) per al conjunt de Catalunya, es pot observar una disminució de la freqüència del mesos molt ventosos ( $VVMM > 7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) i un augment en la dels mesos poc ventosos ( $VVMM < 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). És important destacar l'augment que es projecta en la freqüència dels mesos amb velocitats del vent mitjanes properes a la mitjana del període de control.

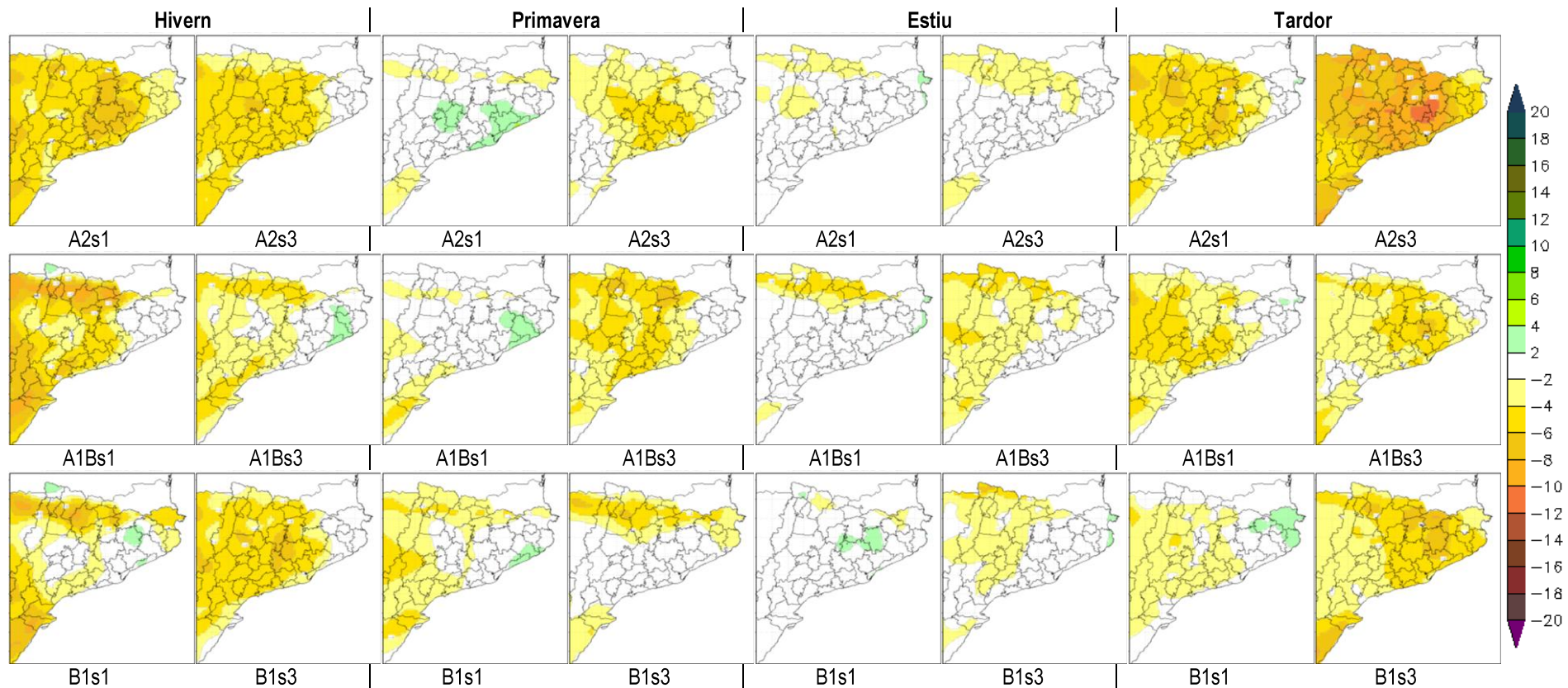


Fig. 27. Variació de la velocitat del vent mitjana a l'hivern, la primavera, l'estiu i la tardor (%) en el 2011-2050 per als escenaris A2, A1B i B1 (de dalt a baix) respecte del 1971-2000 per al territori català segons les projeccions del WRF-ARW/EH5OM sim1 (s1, dreta) i sim3 (s3, esquerra)

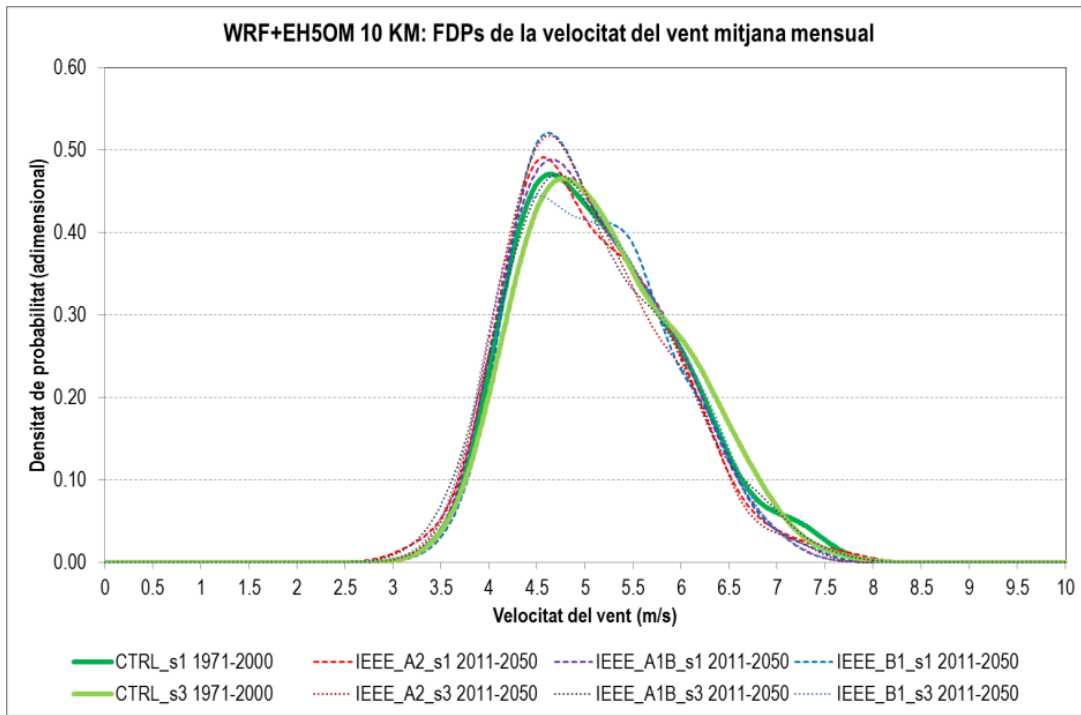


Fig. 28. Funció de densitat de probabilitat (FDP) de la velocitat del vent mitjana mensual als escenaris de control del s. XX (WRF-ARW/ECHAM5/MPI-OM sim1 i sim3; 1971-2000: CTRL\_s1 1971 -2000 i CTRL\_s3 1971-2000) i als escenaris d'emissió A2, A1B i B1 futurs (WRF-ARW/ECHAM5/MPI-OM sim1 i sim3 2011-2050: IEEA).

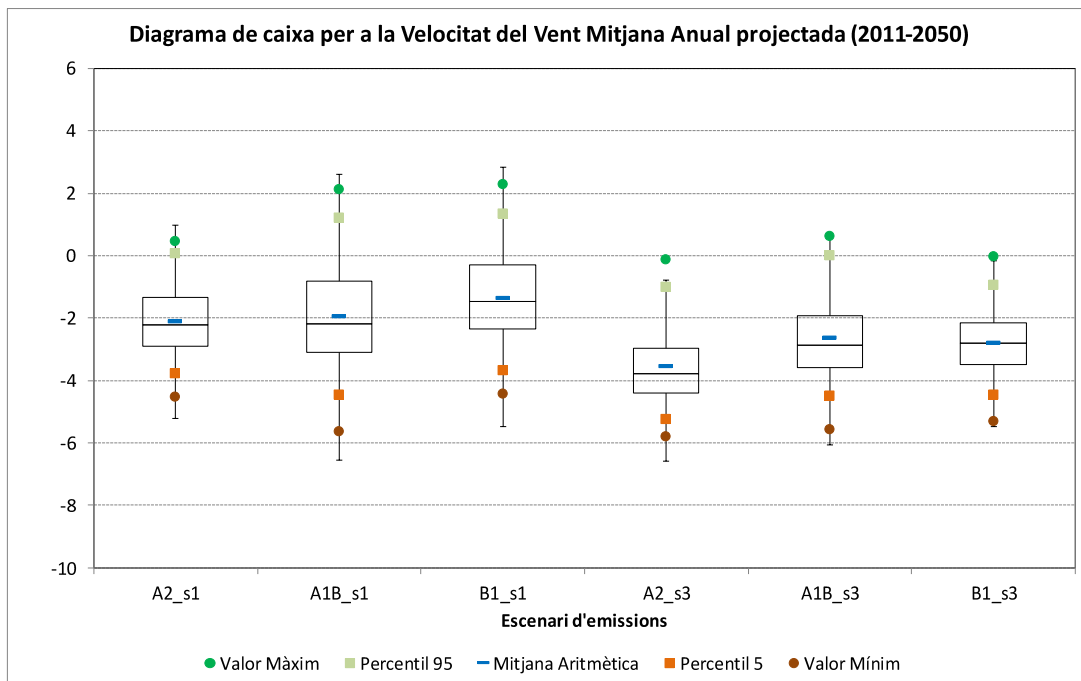


Fig. 29. Diagrama de caixa (boxplot) de la variació de velocitat del vent mitjana anual (°C) per als escenaris A2, A1B i B1 projectada pel WRF-ARW/ECHAM5/MPI-OM sim1 i sim3 en el 2011-2050. Els límits de les caixes representen el quartil inferior, la mediana i el quartil superior. Les línies negres presenten els valors màxim i mínim si la mostra següés una distribució normal. La mitjana aritmètica es presenta amb una línia blava, els percentils 95 i 5 amb un quadre verd clar i taronja i els valors màxim i mínim de la mostra amb punts verds i marrons.



Per als escenaris futurs, el rang de variació de la VVMA projectada més probable va del -1 al -5% segons el diagrama de caixa de les variacions de la VVMA per a tot el territori català i període 2011-2050 (Fig. 29). S'ha de comentar que més del 95% del territori presenta per als propers 40 anys una disminució en la VVMA. En general, s'hi observa una disminució de la VVMA amb l'increment de la concentració de GEH. D'aquesta manera, l'escenari A2 és el que presenta les reduccions més importants dels estudiats i el B1 és el que presenta la menor disminució de la VVMA. A la Taula 7 es troben resumits tots els valors calculats per a realitzar el diagrama de caixa de les variacions projectades en la velocitat del vent mitjana anual. També es mostren els mateixos valors per a les quatre estacions de l'any.

Taula 7. Taula resum de les variacions projectades per a la velocitat del vent mitjana a partir de les simulacions regionalitzades amb el WRF/ARW a 10 km per al període 2011-2050 respecte al 1971-2000. Mit. es refereix al valor mitjà de totes les variacions projectades; Màx., al valor màxim; Min., al valor mínim; P95, P75, P50, P25 i P5 corresponen, respectivament, als percentils 95, 75, 50 (mediana), 25 i 5 de totes les variacions projectades.

Escenari	Estació	Variació Velocitat del Vent (%)							
		Mit.	Màx.	Min.	P95	P75	P50	P25	P5
A2_s1	Anual	-2,1	+0,4	-4,5	+0,1	-1,3	-2,2	-2,9	-3,8
	DGF	-4,4	-0,4	-7,5	-2,0	-3,4	-4,5	-5,5	-6,5
	MAM	+0,1	+4,7	-4,1	+3,2	+1,4	-0,0	-1,2	-2,8
	JJA	-0,8	+3,2	-3,7	+1,9	+0,1	-1,1	-1,8	-2,8
	SON	-3,1	+2,2	-7,5	+1,1	-1,8	-3,5	-4,9	-6,3
A1B_s1	Anual	-1,9	+2,1	-5,6	+1,2	-0,8	-2,2	-3,1	-4,5
	DGF	-3,8	+3,4	-9,9	+0,8	-1,5	-3,9	-5,8	-8,4
	MAM	-0,7	+3,9	-4,6	+2,4	+0,0	-0,9	-1,7	-2,8
	JJA	-0,8	+2,7	-5,9	+2,2	+0,2	-0,4	-1,6	-4,4
	SON	-2,3	+2,1	-5,8	+1,4	-1,0	-2,6	-3,9	-5,1
B1_s1	Anual	-1,3	+2,3	-4,4	+1,3	-0,3	-1,5	-2,4	-3,7
	DGF	-2,6	+3,9	-8,9	+1,8	-0,6	-2,6	-4,5	-7,5
	MAM	-2,0	+4,2	-5,7	+2,2	-1,0	-2,6	-3,4	-4,4
	JJA	+0,5	+3,1	-4,7	+2,1	+1,5	+1,0	-0,4	-1,9
	SON	-0,9	+3,5	-4,4	+2,7	+0,7	-1,3	-2,5	-3,4
A2_s3	Anual	-3,5	-0,1	-5,8	-1,0	-3,0	-3,8	-4,4	-5,2
	DGF	-3,6	+0,2	-6,7	-0,8	-2,6	-3,9	-4,9	-5,8
	MAM	-2,4	+1,3	-5,7	+0,7	-1,6	-2,6	-3,7	-4,6
	JJA	-1,0	+2,4	-4,1	+1,7	-0,0	-1,0	-2,1	-3,3
	SON	-6,9	-2,5	-11,1	-3,5	-5,8	-7,3	-8,2	-9,5
A1B_s3	Anual	-2,6	+0,6	-5,6	+0,0	-1,9	-2,9	-3,6	-4,5
	DGF	-2,0	+3,5	-5,6	+2,1	-0,7	-2,3	-3,5	-4,7
	MAM	-3,4	+1,1	-7,1	+0,1	-2,5	-3,7	-4,5	-5,7
	JJA	-2,1	+1,7	-5,8	+1,0	-0,8	-2,3	-3,4	-4,8
	SON	-3,4	+1,1	-7,1	+0,1	-2,5	-3,8	-4,5	-5,7
B1_s3	Anual	-2,8	-0,0	-5,3	-0,9	-2,2	-2,8	-3,5	-4,5
	DGF	-3,3	+1,9	-6,9	+0,7	-1,9	-3,9	-4,9	-5,9
	MAM	-2,2	+0,5	-6,4	-0,5	-1,1	-1,6	-3,0	-5,2
	JJA	-1,3	+3,0	-6,6	+2,4	-0,5	-1,5	-2,5	-4,5
	SON	-4,1	+0,4	-8,1	-1,8	-3,2	-4,0	-5,0	-6,5

Amb tots els resultats presentats en les projeccions de la velocitat mitjana del vent a 10 m, és d'esperar que el poder de generació elèctrica de molts parcs eòlics es vegi disminuït durant els propers 40 anys.



### 4.3 Anàlisi d'indicadors climàtics per al període 1971-2050

Els indicadors climàtics constitueixen una eina útil per a caracteritzar el clima, presentar patrons històrics i detectar els canvis que es produeixen (Cunillera, 2009). El Grup d'Experts en Detecció del Canvi Climàtic i Índexs de la Comissió de Climatologia de l'Organització Meteorològica Mundial (CCI), el Grup de Variabilitat i Predictibilitat Climàtica (CLIVAR) i la Comissió Conjunta per a la Meteorologia Marina i l'Oceanografia (JCOMM) (ETCCDI/CRD, 2009) van definir un conjunt de 27 indicadors amb la finalitat d'analitzar situacions climàtiques extremes. A efectes d'aquest estudi s'han seleccionat set d'aquests indicadors, dos que representen esdeveniments extrems de temperatura, com el nombre de dies de glaçada i el nombre de nits tropicals; i cinc que caracteritzen esdeveniments extrems de precipitació, com ara la precipitació acumulada màxima en un període de temps determinat o el nombre de dies consecutius sense precipitació. A la Taula 8 es presenta la definició detallada d'aquests indicadors, que permeten realitzar una anàlisi detallada dels esdeveniments climàtics extrems a Catalunya per al període d'estudi (1971-2050).

Taula 8. Indicadors climàtics seleccionats per a la descripció dels esdeveniments extrems de temperatura i precipitació a Catalunya en el període 1971-2050.

Indicador climàtic	Acrònim	Definició
<b>Dies de glaçada</b>	FD0	Nombre de dies en un any en què la temperatura mínima és igual o inferior a 0 °C.
<b>Nits tropicals</b>	TR20	Nombre de dies en un any en què la temperatura mínima es troba per sobre de 20 °C.
<b>Màx. quantitat de precipitació en 5 dies</b>	RX5day	Quantitat de precipitació més elevada per a un interval de 5 dies consecutius en un any.
<b>Màx. quantitat de precipitació diària</b>	RX1day	Quantitat de precipitació diària més elevada en un any.
<b>Longitud màx. de la ratxa seca</b>	CDD	Màxim nombre de dies consecutius en un any amb una precipitació acumulada diària inferior a 1 mm.
<b>Longitud màx. de la ratxa plujosa</b>	CWD	Màxim nombre de dies consecutius en un any amb una precipitació diària major a 1 mm.
<b>Dies l'any en què la precipitació total és major a 20 mm</b>	R20mm	Nombre anual de dies en què la precipitació total és major a 20 mm

A continuació es presenta l'anàlisi realitzada d'aquests indicadors, considerant d'una banda els valors que prenen durant el període de referència: 1971-2000, i per una altra, la seva evolució en els sis escenaris futurs definits: 2001- 2050.

#### 4.3.1 Indicadors climàtics de l'evolució de la temperatura.

Per tal d'analitzar els esdeveniments extrems en relació a la temperatura es calcula el nombre de dies de glaçada i nits tropicals màxim per cada any en qualsevol punt del territori català. A la Taula 9 es presenta la mitjana dels valors obtinguts per al període de control 1971-2000 i per als diferents escenaris de futur considerats, del 2001 al 2050.

En tots els escenaris futurs s'aprecia una tendència a la disminució dels dies de glaçada, és a dir, amb temperatures mínimes inferiors a 0°C, de l'ordre del 5%. A més, es detecta una tendència a l'increment de les nits tropicals, amb temperatures mínimes superiors a 20°C, especialment als escenaris més intensius en termes d'emissions de GEH, és a dir, l'A1B i l'A2. Es preveu que el nombre de nits tropicals en el període 2001-2050 pugui arribar al 14,7% de les nits de l'any, fins a un 7% més que l'estimació per al període de referència.

Taula 9. Resum d'indicadors climàtics relatius a esdeveniments extrems de temperatura. Mitjana sobre el període de referència del número màxim de nits tropicals i dies de glaçada l'any estimats sobre el territori català per al 1971-2000 i 2001-2050.

Model/escenari	Període	Dies glaçada (mit. dels màx. anuals)	% anual de dies de glaçada	Nits tropicals (mit. dels màx. anuals)	% anual de nits tropicals	
WRF-ARW/ERA40	1971-2000	219	60,0	36	9,8	
WRF-ARW/EH5OMs1	1971-2000	226	61,8	27	7,3	
WRF-ARW/EH5OMs3	1971-2000	229	62,7	29	7,8	
WRF-ARW/EH5OMs1	B1	2001-2050	55,4	49	13,4	
	A1B	2001-2050	195	53,4	54	14,7
	A2	2001-2050	202	55,4	48	13,0
WRF-ARW/EH5OMs3	B1	2001-2050	203	55,6	47	12,8
	A1B	2001-2050	201	55,0	51	13,9
	A2	2001-2050	199	54,4	50	13,6

Analitzant l'evolució d'aquests indicadors any a any (Fig. 30 i 31) s'observa que en el període 1971-2000 es dona una tendència a la disminució dels dies de glaçada i a l'augment de les nits tropicals, que es veu intensificada en les projeccions futures amb una lleugera dependència del forçament introduït en el model pels escenaris de GEH. Mentre que els escenaris A1B i A2 mostren un comportament molt semblant, les tendències pel que fa l'escenari B1 són menys marcades.

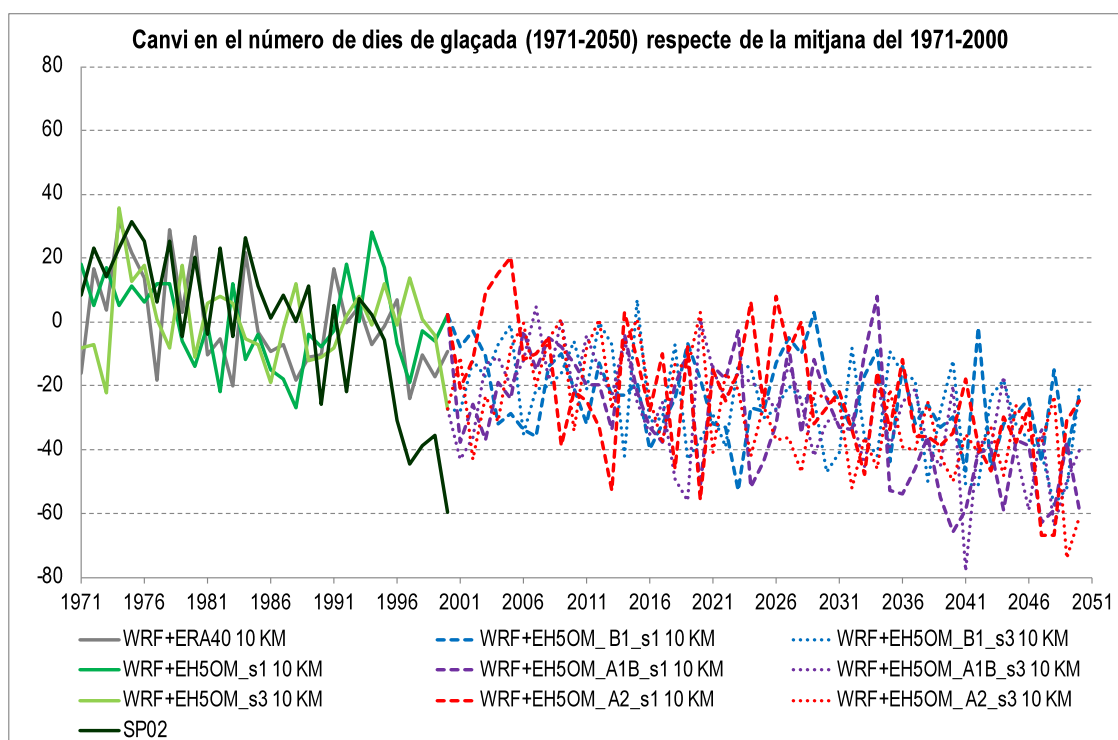


Fig. 30. Canvi en el nombre de dies de glaçada (dies) per el territori català en el període 1971-2050 respecte del període 1971-2000 segons les projeccions del WRF-ARW/EH5OM (sim1 i sim3). Es presenten per a referència les variacions segons el WRF-ARW/ERA40 i la base de dades Spain02 (0.2°).

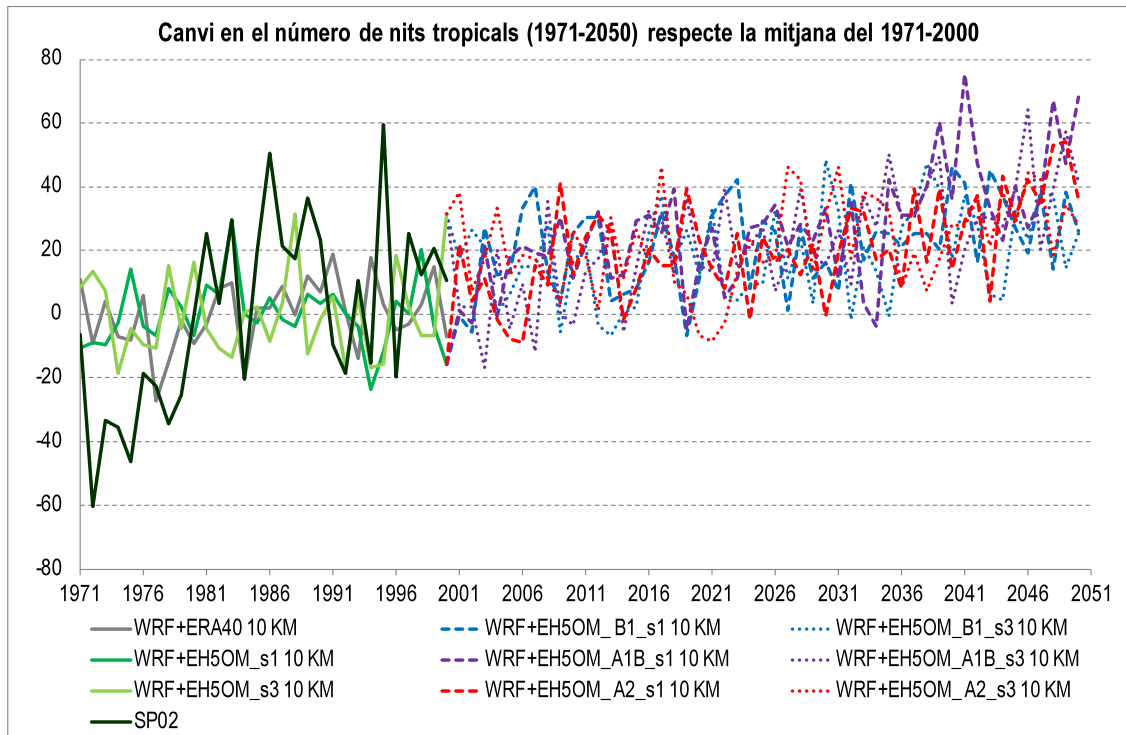


Fig. 31. Canvi en el nombre de nits tropicals (dies) per el territori català en el període 1971-2050 respecte del període 1971-2000 segons les projeccions del WRF-ARW/EH5OM (sim1 i sim3). Es presenten per a referència les variacions segons el WRF-ARW/ERA40 i la base de dades Spain02 (0.2°).

En referència a la distribució espacial, el màxim de dies de glaçada es dona a l'àrea dels Pirineus (Fig. 32), per sobre de 200 nits a l'any, mentre que a la costa i zones poc elevades de l'interior mai es superen els 40 dies anuals amb temperatures mínimes menors de 0°C. De fet, en tots els escenaris projectats la major disminució de dies de glaçada es dona a l'àrea dels Pirineus, on depenent de la localització poden donar-se fins 40 dies menys a l'any amb temperatures mínimes per sota de 0°C. D'altra banda, el màxim de nits tropicals es registra a tots els escenaris a zones costaneres i a les terres de l'interior (Fig. 33), sent a l'àrea dels Pirineus menor a les 20 nits a l'any. Pel que fa les variacions en el període 2001-2050 respecte del període de control, en àrees costaneres podrien donar-se increments del nombre de nits tropicals fins a 20-30 nits anuals depenent de l'escenari, mentre que als Pirineus, el nombre de nits tropicals a l'any romandria pràcticament invariable.

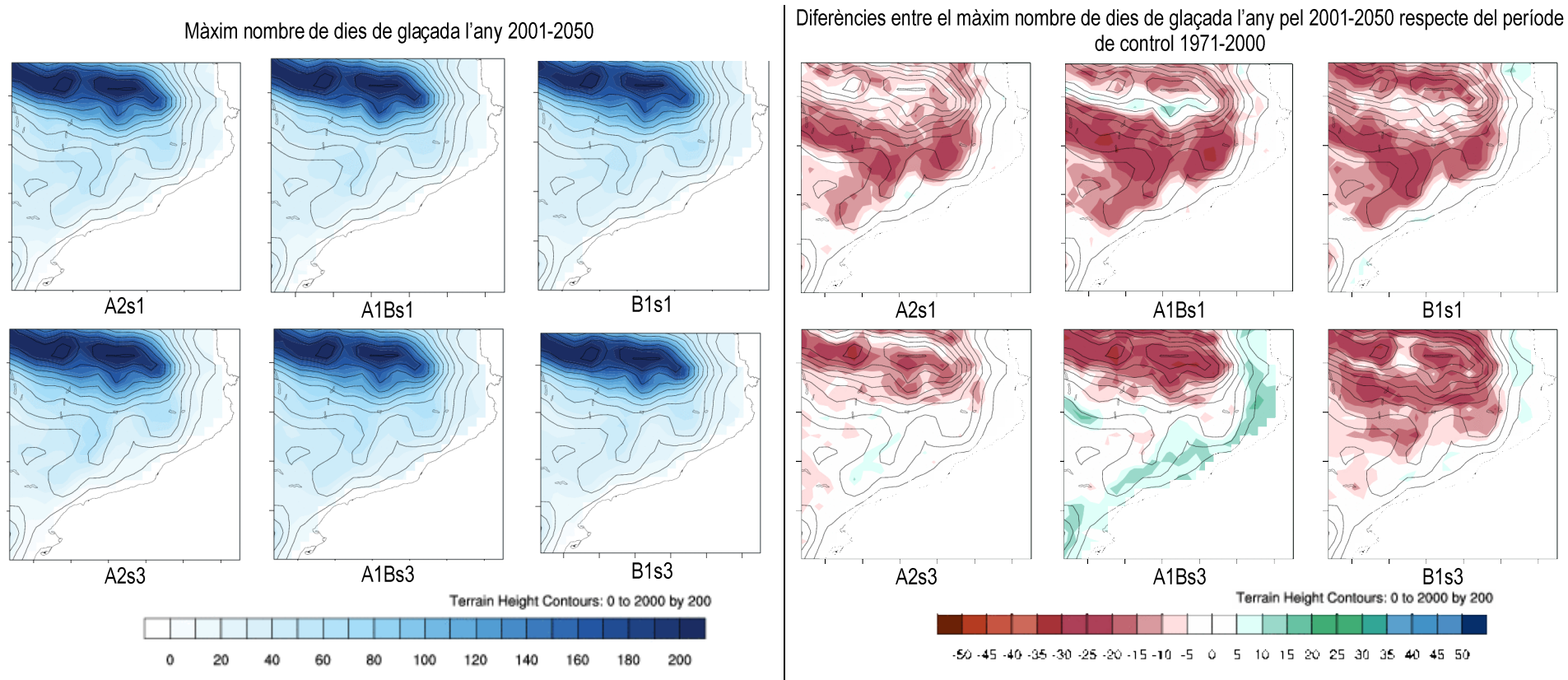


Fig. 32. Màxim nombre de dies de glaçada per any en el període 2001-2050 segons les projeccions del WRF-ARW/ECHAM5-MPI/OM sim1 (a dalt) i sim3 (a baix) per als escenaris A2, A1B i B1 (d'esquerra a dreta) i diferències respecte del període de control.

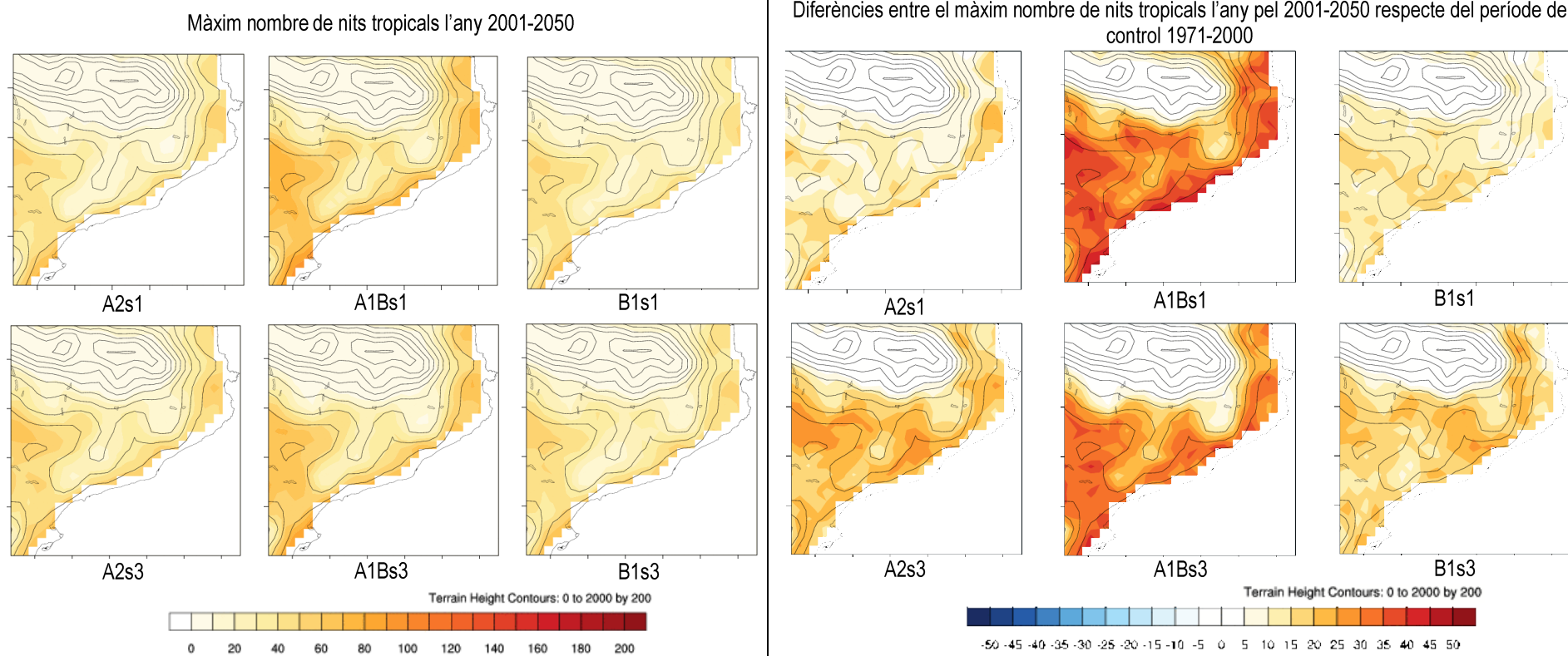


Fig. 33. Màxim nombre de nits tropicals per any en el període 2001-2050 segons les projeccions del WRF-ARW/ECHAM5-MPI/OM sim1 (a dalt) i sim3 (a baix) per als escenaris A2, A1B i B1 (d'esquerra a dreta) i diferències respecte del període de control (1971-2000).



#### 4.3.2 Indicadors climàtics de l'evolució de la precipitació acumulada

Els esdeveniments extrems de precipitació es caracteritzen d'acord amb diferents indicadors climàtics. La Taula 10 mostra el valor mitjà dels màxims anuals estimats per a cada indicador durant el període de referència.

Taula 10. Resum d'indicadors climàtics relatiu a esdeveniments extrems de precipitació per al període 1971-2050 al territori català. Es mostren: la precipitació màxima acumulada en 5 dies (RX5day, mm), la precipitació màxima acumulada diària (RX1day, mm), el nombre de dies secs consecutius (CDD), el nombre de dies plujosos consecutius (CWD) i el nombre de dies en què la precipitació acumulada supera 20 mm (R20mm) estimats com a mitjana sobre tot el període dels valors anuals.

Model/escenari	Període	RX5day (mm)	RX1day (mm)	CDD	CWD	R20mm
<b>WRF-ARW/ERA40</b>	1971-2000	341,7	200,5	67	25	43
<b>WRF-ARW/EH5OMs1</b>	1971-2000	349,5	193,1	65	26	56
<b>WRF-ARW/EH5OMs3</b>	1971-2000	355,0	191,0	65	24	57
<b>WRF-ARW/EH5OMs1</b>	<b>B1</b> 2001-2050	347,3	197,1	68	21	50
	<b>A1B</b> 2001-2050	374,9	209,5	77	21	47
	<b>A2</b> 2001-2050	352,1	203,9	68	22	51
<b>WRF-ARW/EH5OMs3</b>	<b>B1</b> 2001-2050	378,2	219,7	73	23	50
	<b>A1B</b> 2001-2050	343,9	193,2	67	23	48
	<b>A2</b> 2001-2050	320,1	186,1	73	22	49

L'anàlisi d'aquests valors no mostra una tendència clara, donat que la variabilitat que presenten en els escenaris de referència és aproximadament del mateix ordre de magnitud que la que es troba per a les projeccions del s. XXI. Si es considera la mitjana de tots els escenaris futurs respecte a la mitjana dels escenaris del s. XX es troba una lleugera tendència al increment de la quantitat de precipitació màxima recollida en cinc dies i diària, de l'ordre de 8 i 7 mm, respectivament. A més, es troba que el nombre de dies de sequera consecutius tendeix a augmentar lleugerament (de 66 dies a l'any de mitjana al període de control a 71 dies anuals de mitjana en els escenaris futurs), i el nombre de dies amb pluja consecutius tendeix a disminuir (de 25 dies anuals de mitjana en el període de control a 22 en els escenaris futurs). Per últim, el nombre de dies l'any que registren quantitat de precipitació superior a 20 mm disminueix lleugerament (sent 52 de mitjana al període de control i 49 als escenaris del s. XXI).

Les projeccions realitzades indiquen, per tant, que probablement es donaria un increment de la quantitat de precipitació recollida en períodes curts de temps (un o cinc dies), a la vegada que el nombre de dies amb precipitació disminuiria i, per tant, es produiria un increment dels dies consecutius sense cap mena de precipitació.

Si es fa una anàlisi més detallada, considerant l'evolució any a any d'alguns d'aquests indicadors i analitzant les tendències per als diferents escenaris, es pot observar que la quantitat màxima de precipitació acumulada en cinc dies tendeix a disminuir per al període 2001-2050 en el cas dels escenaris més intensius en emissions (A1B i A2) i a augmentar en l'escenari més optimista (B1) (Fig. 34). El nombre de dies consecutius en els quals es registra precipitació disminueix per a tots els escenaris considerats durant el període 2001-2050, excepte per a l'escenari B1, on la tendència varia depenent de la simulació del model global considerada (Fig. 35). Els esdeveniments de precipitació intensa, amb una precipitació acumulada de més de 20 mm al dia, es donen fonamentalment a l'àrea dels Pirineus, independentment de l'escenari (Fig. 37). A l'àrea del Prepirineu es pot arribar a superar aquesta quantitat entre 40 i 60 dies a l'any, mentre que a àrees específiques dels Pirineus, que varien segons l'escenari considerat, es



projecten superacions fins a 80 dies anuals. Segons els escenaris simulats és improbable que a la zona litoral i interior es donin més de 10 o 20 dies a l'any amb una precipitació diària acumulada de més de 20 mm. La variació d'aquest indicador en els escenaris projectats presenta una incertesa elevada. Encara que el comportament mitjà sobre el territori indica una lleugera disminució del nombre de dies amb precipitació acumulada major de 20 mm, localment la tendència podria ser la contrària. Depenent de l'escenari es projecten tant increments com disminucions d'aquest indicador de l'ordre de 20-25 dies a l'any (Fig. 37), per tant no es pot determinar una evolució clara.

D'altra banda, el nombre de dies consecutius sense precipitació tendeix a créixer a l'escenari A1B en el període 2001-2050, mentre que es manté pràcticament constant a l'escenari A2. L'evolució d'aquest indicador a l'escenari B1 mostra una incertesa molt elevada, donat que depenent de la simulació pot augmentar o disminuir en el període 2001-2050 (Fig. 36). A l'àrea dels Pirineus els dies consecutius sense pluja no arribarien als 20 dies anuals en cap dels escenaris projectats (Fig. 38). Els períodes més llargs sense precipitació es donarien al litoral, la Vall de l'Ebre i l'interior, on segons l'escenari es podria arribar a tenir 100 dies consecutius sense pluja en alguns punts. Aquestes àrees són les que mostren també una major variació en nombre de dies de sequera consecutius respecte del període de control, amb increments que podrien arribar fins als 50 dies anuals depenent de la ubicació.

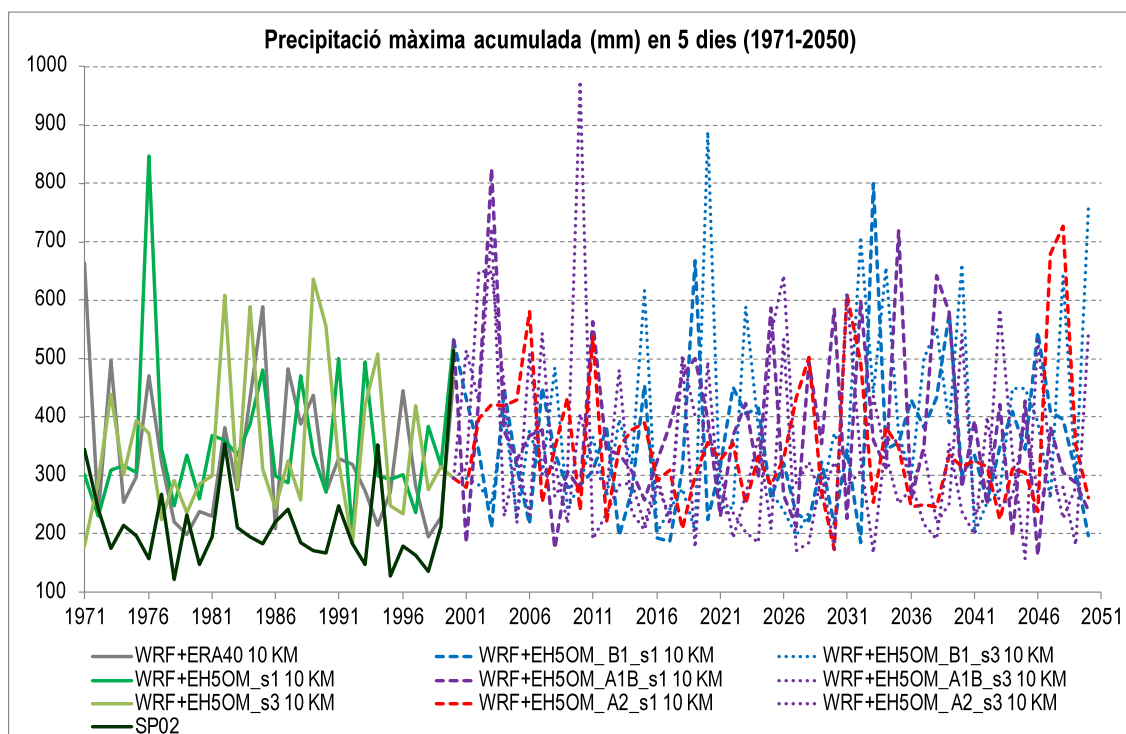


Fig. 34. Precipitació màxima acumulada en 5 dies (mm/5 dies) per al territori català en el període 1971-2050, segons les projeccions del WRF-ARW/EH5OM sim1 i sim3. Es presenten com a referència els valors derivats de la simulació del WRF-ARW/ERA40 i de les observacions de la base de dades Spain02 pel període 1971-2000.

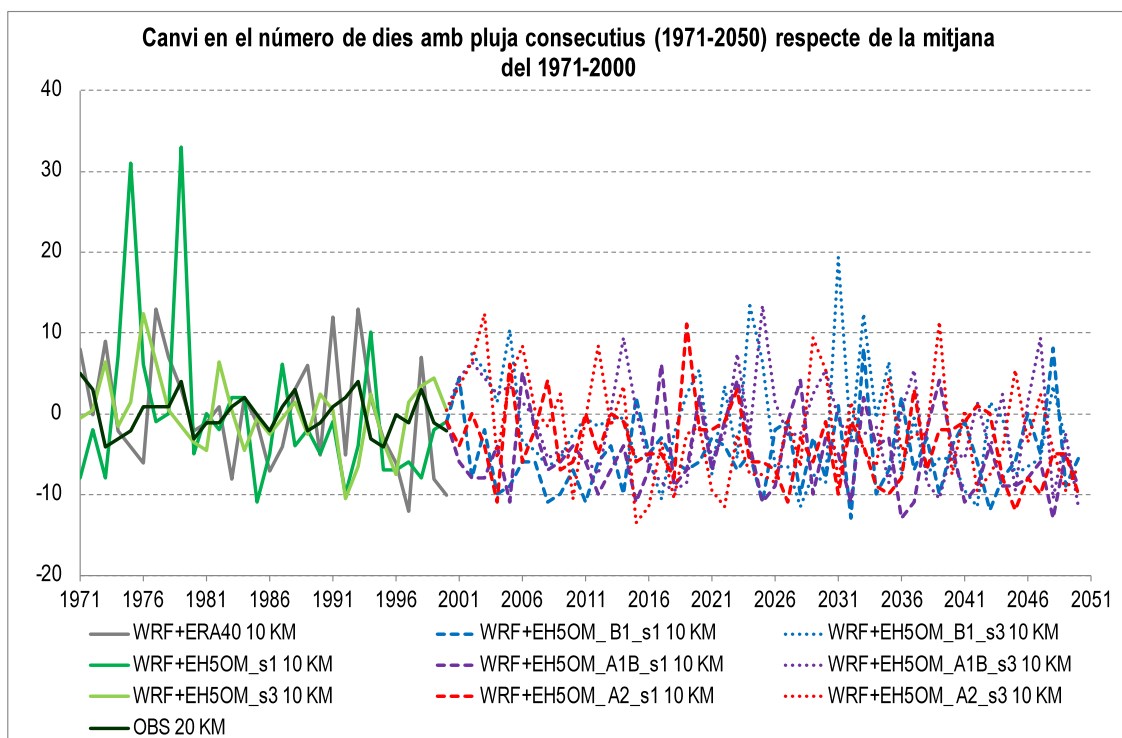


Fig. 35. Canvi en el nombre de dies de pluja consecutius (dies) per el territori català en el període 1971-2050 respecte del període 1971-2000 segons les projeccions del WRF-ARW/EH5OM (sim1 i sim3). Es presenten per a referència les variacions segons el WRF-ARW/ERA40 i la base de dades Spain02 (0.2°).

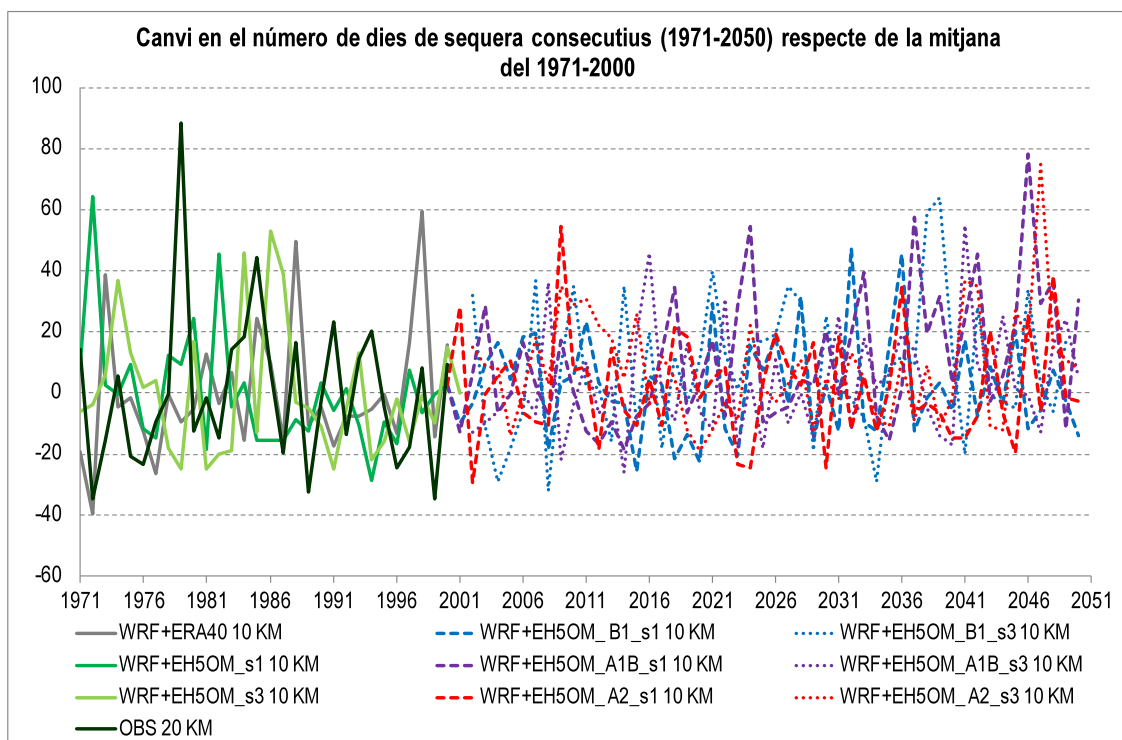
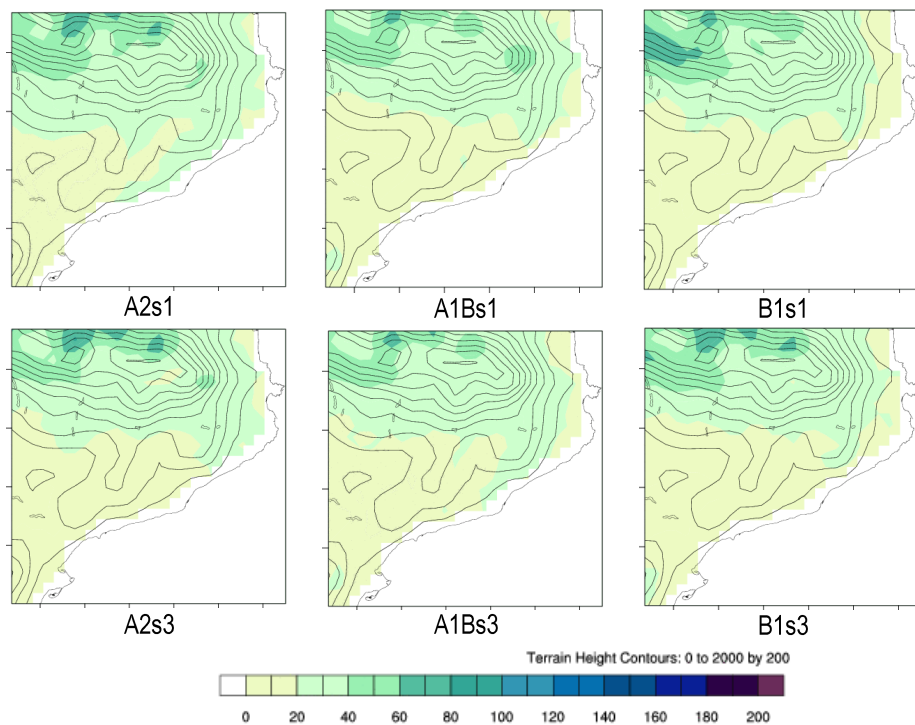


Fig. 36. Canvi en el nombre de dies de sequera consecutius (dies) per el territori català en el període 1971-2050 respecte del període 1971-2000 segons les projeccions del WRF-ARW/EH5OM (sim1 i sim3). Es presenten per a referència les variacions segons el WRF-ARW/ERA40 i la base de dades Spain02 (0.2°).

Màxim nombre de dies l'any amb precipitació acumulada per sobre de 20 mm en el període 2001-2050



Diferències entre el màxim nombre de dies l'any amb precipitació acumulada per sobre de 20 mm pel 2001-2050 respecte del període de control 1971-2000

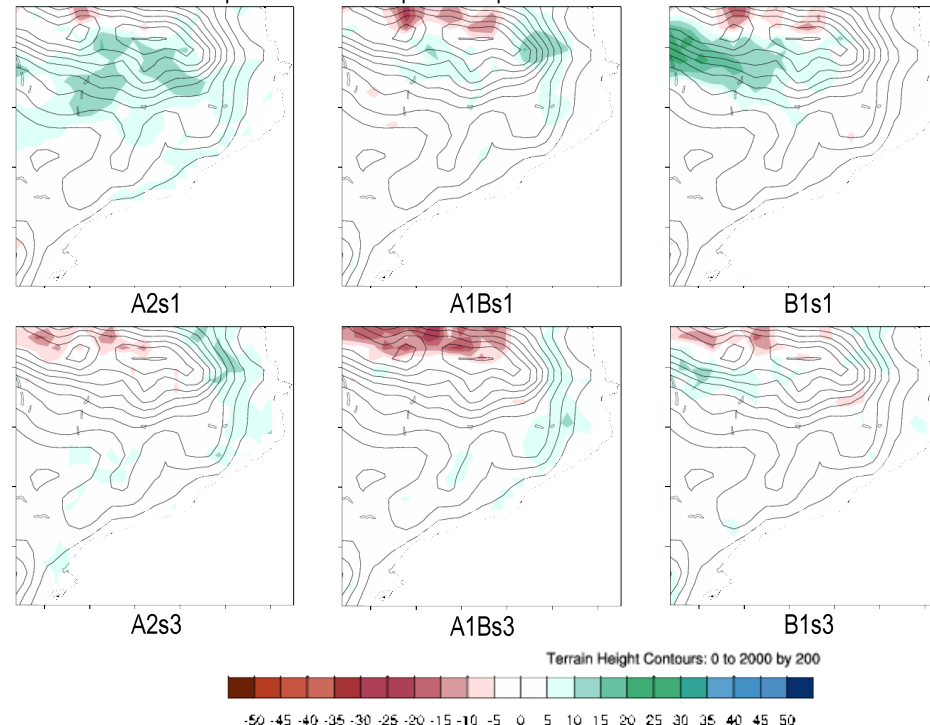


Fig. 37. Màxim nombre de dies anuals amb precipitació acumulada per sobre de 20 mm. en el període 2001-2050 segons les projeccions del WRF-ARW/ECHAM5-MPI/OM sim1 (a dalt) i sim3 (a baix) per als escenaris A2, A1B i B1 (d'esquerra a dreta) i diferències respecte del període de control.

Màxim nombre de dies de sequera consecutius l'any en el període 2001-2050

Diferències entre el màxim nombre de dies de sequera consecutius l'any pel 2001-2050 respecte del període de control 1971-2000

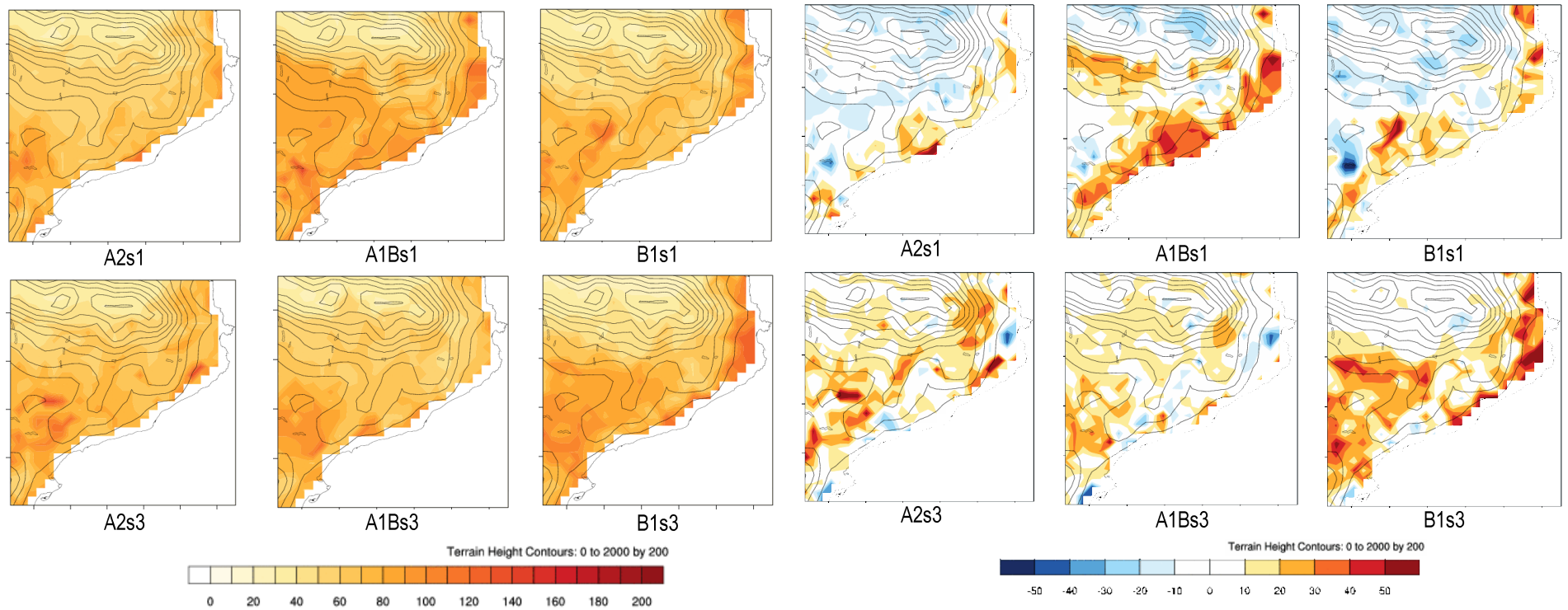


Fig. 38. Màxim nombre de dies de sequera consecutius per any en el període 2001-2050 segons les projeccions del WRF-ARW/ECHAM5-MPI/OM sim1 (a dalt) i sim3 (a baix) per als escenaris A2, A1B i B1 (d'esquerra a dreta) i diferències respecte del període de control 1971-2000.

## 5 Conclusions

A continuació es presenten les principals conclusions obtingudes de l'anàlisi de les simulacions desenvolupades i que s'han presentat en els apartats anteriors.

La validació del sistema de modelització ha donat resultats força satisfactoris. Les simulacions de control realitzades amb el WRF-ARW reproduïen correctament els patrons espacials dels camps mitjans anuals i estacionals de temperatura en superfície i precipitació acumulada per al període 1971-2000. Amb unes correlacions espacials amb les observacions de 0,83 per a la precipitació mitjana anual i 0,96 per a la temperatura mitjana anual. Aquestes simulacions també capturen adequadament els rangs de variabilitat interanual de les observacions i simulen apropiadament l'evolució temporal de la precipitació, millorant els resultats dels models globals (augment de la correlació anual), amb unes correlacions amb les observacions punt a punt entre 0,5 i 0,7 per a la gran majoria de la zona d'estudi (litoral i Pirineus, principalment). Per contra, les simulacions realitzades presenten un biaix fred per a la temperatura en superfície (1°C a escala anual) i una sobreestimació general de la precipitació acumulada (150 mm a escala anual). Aquests biaixos són més acusats a la zona dels Pirineus que no pas al litoral, però són propis dels models d'àrea limitada (Mercader et al, 2010) i no atribuïbles a la metodologia utilitzada (regionalització dinàmica).

La validació del sistema de modelització en el període 2001-2011, període per al qual existeixen observacions i projeccions futures regionalitzades, ha mostrat que el model tendeix a sobreestimar el rang de variabilitat interanual de la precipitació i a subestimar la variació de la temperatura mitjana anual. En canvi, sí que està ben simulada la tendència temporal per a aquest període d'avaluació.

Les projeccions desenvolupades mostren que la temperatura mitjana anual augmentaria durant els propers 40 anys independentment de l'escenari d'emissions que es consideri. Aquest augment se situaria entre 0,7 i 1,8°C, depenent de la localització i de l'escenari, sent el rang més probable d'augment entre **0,9 i 1,2°C** per a tot el territori (tendència mitjana lineal de 1,2°C en 50 anys, estadísticament significativa). La variació projectada de la temperatura presenta un gradient amb la latitud i també amb l'altitud, sent més acusada a l'àrea dels Pirineus (i en particular a la Vall d'Aran i cara Nord), l'interior es comportaria com una zona de transició entre el litoral i els Pirineus. A escala estacional es projecten canvis en el mateix sentit i també independentment de l'escenari d'emissions considerats. Els màxims augments de temperatura es projecten per a l'estiu, amb augments de la temperatura mitjana que podrien ser propers als 3°C a la zona de l'Aran, i els menors durant l'hivern. És probable que tots aquests valors acabin sent encara un poc més elevats, tenint en compte que el model subestima la variació de la temperatura mitjana anual durant el període 2001-2011.

En canvi, les projeccions per a la precipitació no són tan robustes com en el cas de la temperatura. A grans trets, es donaria una lleugera reducció de la precipitació mitjana anual, excepte a la zona litoral amb un lleuger ascens. El rang més probable de variació de la precipitació se situaria entre **-10 i 5%** per al conjunt de Catalunya per al període 2011-2050 (tendència mitjana lineal de -7,5% en 50 anys, estadísticament significativa). Es projecta també un augment important de la variabilitat interanual de la precipitació, sent més important aquest augment a la zona litoral i prelitoral que no pas als Pirineus. Per una altra banda, l'evolució futura de la precipitació acumulada estacional presenta força incertesa, ja que les variacions projectades són altament dependents de l'escenari d'emissions i de la simulació del model global considerada. En general es pot concloure que podria incrementar-se en àrees costaneres durant l'hivern, fins a valors propers al 50% per a l'escenari B1, i decreixeria en zones muntanyoses de l'interior, especialment a la tardor, fins al 30% per a l'escenari A2. A la primavera s'espera una disminució general



de la precipitació en tot el territori, tret d'alguns punts costaners que presenten increments de precipitació per als escenaris A1B i B1. La precipitació als Pirineus (sobretot la seva cara nord) disminueix en tots els escenaris per a totes les estacions, excepte a l'estiu, que no presenta una tendència clara.

Pel que fa a la precipitació en forma de neu, es projecten disminucions en tots els escenaris en particular per l'àrea dels Pirineus i Prepirineu, i especialment per a les cotes més baixes de la serralada. Aquestes reduccions serien més importants en els escenaris A1B i A2, i podrien arribar al 30% per aquelles zones on la precipitació acumulada anual és més gran (zones elevades dels Pirineus).

En referència als valors extrems de temperatura s'espera que el nombre de mesos càlids augmenti d'una manera considerable durant els propers 40 anys. En canvi, la freqüència d'ocurrència dels mesos molt freds seria semblant a l'actual (període 1971-2000).

En relació als extrems de precipitació, es projecta per a tots els escenaris un increment important dels mesos secs, una disminució dels mesos plujosos i un lleuger augment dels mesos extremadament plujosos. Aquest últim augment té la seva causa en què per a gairebé tots els escenaris d'emissions considerats es projecta un augment de l'ocurrència dels màxims diaris de precipitació acumulada, la qual podria arribar a doblar-se per a l'escenari A2. Tot i que és probable que aquests augments acabin sent menors en magnitud, tenint en compte que el model tendeix a sobreestimar el rang de variabilitat interanual de la precipitació durant el període 2001-2011.

En resum, l'escenari A2 és molt més sec i càlid que el B1, que és més humit i amb uns increments de temperatura més moderats. L'escenari A1B en general presenta condicions de temperatura i precipitació intermèdies respecte als altres, però donat que s'està estudiant la primera meitat del s. XXI, que es correspon al major creixement demogràfic amb aquest escenari, les diferències amb l'escenari extrem (A2) són en ocasions molt petites.

Aquests resultats es veuen confirmats per l'anàlisi d'indicadors climàtics de temperatura i precipitació. Es projecta en els escenaris futurs una disminució dels dies de glaçada i un increment de les nits tropicals, amb temperatura mínima per sobre de 20°C, que en el cas dels escenaris A1B i A2 poden arribar a constituir el 30% de les nits de l'any. Tant la precipitació acumulada en cinc dies com el nombre de dies consecutius amb pluja tendeix a disminuir en els escenaris futurs, donant-se un nombre més elevat de dies consecutius sense pluja, que afectarà especialment a les àrees de la costa i alguns punts de l'interior.

Per a la velocitat de vent a 10 m, les projeccions obtingudes apunten a una possible disminució de la velocitat mitjana anual independentment de l'escenari d'emissions considerat. El rang més probable de variació de la velocitat del vent se situaria entre -1 i -5% per a tot Catalunya per al període 2011-2050 (tendència mitjana lineal de -2,7% en 50 anys, estadísticament significativa), amb un augment en la seva variabilitat interanual, augmentant la freqüència dels mesos pocs ventosos i disminuint la dels mesos molt ventosos.

Finalment, s'ha de comentar que la regionalització climàtica dinàmica amb alta resolució que s'ha realitzat permet definir patrons geogràfics de temperatura i precipitació futurs amb un grau de detall elevat, proporcionant informació fonamental per a la definició d'estratègies de mitigació i adaptació als impactes derivats del canvi climàtic. Tenint en compte els canvis projectats, és d'esperar que aquests tinguin un impacte important en els recursos hídrics del territori, ja que per als Pirineus, on es troben les capçaleres de tots els rius catalans, es projecta una disminució apreciable de la precipitació, un augment important de la temperatura, i una disminució de la precipitació en forma de neu. També caldria esperar una



disminució de la cobertura de neu a l'hivern i del potencial eòlic per a la generació d'energia, mentre que el risc d'incendis forestals augmentaria.

## Referències

- Altava-Ortiz, V. (2010): Caracterització i monitoratge de les sequeres a Catalunya i nord del País Valencià. Càlcul d'escenaris climàtics per al segle XXI, Tesi Doctoral, Publicació Interna, Departament d'Astronomia i Meteorologia, Universitat de Barcelona, 296 pp.
- Barrera-Escoda, A. i J. Cunillera (2011a): Primer informe sobre la generació d'escenaris climàtics regionalitzats per a Catalunya durant el segle XXI. Informe Tècnic, Servei Meteorològic de Catalunya, Departament de Territori i Sostenibilitat, Generalitat de Catalunya, 95 pp. Disponible a: [http://www20.gencat.cat/docs/meteocat/Continguts/Climatologia/Canvi%20climatic/static\\_files/informe\\_escenaris\\_SMC-JUN2011.pdf](http://www20.gencat.cat/docs/meteocat/Continguts/Climatologia/Canvi%20climatic/static_files/informe_escenaris_SMC-JUN2011.pdf)
- Barrera-Escoda, A. i J. Cunillera (2011b): "Projeccions de canvi climàtic per a Catalunya (NE Península Ibèrica). Part I: Modelització climàtica regional". Tethys, 8, 77-89, doi: 10.3369/tethys.2011.8.08. Disponible a: <http://www.tethys.cat/sites/default/files/pdf/articles/8tethys-08-cat.pdf>
- Christensen, J.H., Carter, T.R., Rummukainen, M., Amanatidis, G. (2007): "Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project". Climatic change 81 (1), pp. 1-6. doi:10.1007/s10584-006-9211-6
- Cunillera, J. (2009): "Indicadors climàtics per al seguiment". A Prat, N. i A. Manzano (eds.): Aigua i canvi climàtic. Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya. 3r Conveni de l'Agència Catalana de l'Aigua Fundació Nova Cultura de l'Aigua. Agència Catalana de l'Aigua, Departament de Medi Ambient i Habitatge, Generalitat de Catalunya, Barcelona, Espanya, pp. 53-62.
- Domínguez, M., Romera, R., Sánchez, E., Fita, L., Fernández, J., Jiménez-Guerrero, P., Montávez, J.P., Cabos, W.D., Liguori, G., Gaertner, M.A. (2011): Present climate precipitation and temperature extremes over Spain from a set of high resolution RCMs. Climate Research (submitted, 2011). Disponible a: <http://www.meteo.unican.es/es/node/73026>.
- ETCCDI/CRD (2009): Climate change indices defined by the CCI/CLIVAR/JCOMM Expert Team on Climate Change Detection and Indices. Disponible a: <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDI/index.shtml>, September 2012.
- Herrera, S., J.M. Gutiérrez, R. Ansell, M.R. Pons, M.D. Frías i J. Fernández (2012): "Development and analysis of a 50 year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02)". International Journal of Climatology, 32, pp. 74-85. doi: 10.1002/joc.2256.
- Hewitt, C.D. (2005): The ENSEMBLES Project: Providing ensemble-based predictions of climate changes and their impacts. EGGS newsletter, 13, pp. 22-25. Disponible a: <http://www.the-eggs.org/?issueSel=24>
- IPCC (2007): IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Disponible a: <http://www.ipcc.ch/>
- Jiménez-Guerrero, P., Jorba, O., Baldasano, J.M., Gassó, S. (2008): The use of a modelling system as a tool for air quality management: Annual High resolution simulations and evaluation. The Science of the Total Environment 390 (2-3), pp.323-340, doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.10.025.

- Jorba, O., Loridan, T., Jiménez-Guerrero, P., Baldasano, J.M (2008): Annual evaluation of WRF-ARW and WRF-NMM meteorological simulations over Europe. 9th Annual WRF Users' Workshop. 23-27 June, 2008. Boulder, CO, USA.
- Marsland, S.J., Haak, J.H., Jungclaus, M., Latif, F., Röske (2003). "The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates". *Ocean Modelling*, 5(2), pp. 91–127, doi:10.1016/S1463-5003(02)00015-X.
- Martín Vide, J. (1992): *El Clima. Geografía General dels Països Catalans*. Enciclopèdia Catalana, Barcelona.
- Mercader, J., Codina, B., Sairouni, A., Cunillera, J. (2010): Results of the meteorological model WRF-ARW over Catalonia, using different parametrizations of convection and cloud microphysics. *Tethys* 7, pp. 75-86, doi:10.3369/tethys.2010.7.07.
- Michalakes, J., Dudhia, J., Gill, D., Henderson, T., Klemp, J., Skamarock, W., and Wang, W. (2004): The Weather Research and Forecast model: software architecture and performance. A. Mozzdynski, E.G. (ed.): *Proceedings of the Eleventh ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*, 25-29 October 2004, Reading, UK, pp. 117-124.
- Nakićenović, N., R. Swart, J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T.Y. Jung, T. Kram, E.L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Roehrl, H.-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, S. van Rooijen, N. Victor i D. Dadi (2000): *Emissions Scenarios 2000—Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (SRES-IEEE)*. Cambridge University Press, Cambridge, RU, 570 pp. Disponible a: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.php?idp=0>
- Roeckner, E., G. Bäuml, L. Bonaventura, R. Brokopf, M. Esch, M. Giorgetta, S. Hagemann, I. Kirchner, L. Kornblüeh, E. Manzini, A. Rhodin, U. Schlese, U. Schulzweida i A. Tompkins (2003). The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I. Max-Planck Institut für Meteorologie, Report No. 349, Hamburg, Alemania, 127 pp. Disponible a: [http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/publikationen/Reports/max\\_scirep\\_349.pdf](http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/publikationen/Reports/max_scirep_349.pdf).
- Roeckner, E. (2005a): IPCC MPI-ECHAM5\_T63L31 MPI-OM\_GR1.5L40\_20C3M\_all run no.1: atmosphere 6 HOUR values MPImet/MaDGermany. World Data Center for Climate, Hamburg, Alemania, CERA-DB "EH5-T63L31\_OM\_20C3M\_1\_6H". Disponible a: [http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=EH5-T63L31\\_OM\\_20C3M\\_1\\_6H](http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=EH5-T63L31_OM_20C3M_1_6H)
- Roeckner, E. (2005b): IPCC MPI-ECHAM5\_T63L31 MPI-OM\_GR1.5L40\_20C3M\_all run no.3: atmosphere 6 HOUR values MPImet/MaDGermany. World Data Center for Climate, Hamburg, Alemania, CERA-DB "EH5-T63L31\_OM\_20C3M\_3\_6H". Disponible a: [http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=EH5-T63L31\\_OM\\_20C3M\\_3\\_6H](http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=EH5-T63L31_OM_20C3M_3_6H)
- Roeckner, E., M. Lautenschlager i H. Schneider (2006a): IPCC-AR4 MPI-ECHAM5\_T63L31 MPI-OM\_GR1.5L40 SRESA2 run no.1: atmosphere 6 HOUR values MPImet/MaDGermany. World Data Center for Climate, Hamburg, Alemania, doi: 10.1594/WDCC/EH5-T63L31\_OM-GR1.5L40\_A2\_1\_6H. Disponible a: [http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Entry.jsp?acronym=EH5-T63L31\\_OM-GR1.5L40\\_A2\\_1\\_6H](http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Entry.jsp?acronym=EH5-T63L31_OM-GR1.5L40_A2_1_6H).
- Roeckner, E., M. Lautenschlager i H. Schneider (2006b): IPCC-AR4 MPI-ECHAM5\_T63L31 MPI-OM\_GR1.5L40 SRESA2 run no.3: atmosphere 6 HOUR values MPImet/MaDGermany. World Data Center for Climate, Hamburg, Alemania, doi:10.1594/WDCC/EH5-T63L31\_OM-GR1.5L40\_A2\_3\_6H. Disponible a: [http://dx.doi.org/10.1594/WDCC/EH5-T63L31\\_OM-GR1.5L40\\_A2\\_3\\_6H](http://dx.doi.org/10.1594/WDCC/EH5-T63L31_OM-GR1.5L40_A2_3_6H)

- Roeckner, E., M. Lautenschlager i H. Schneider (2006c): IPCC-AR4 MPI-ECHAM5\_T63L31 MPI-OM\_GR1.5L40 SRESA1B run no.1: atmosphere 6 HOUR values MPImet/MaDGermany. World Data Center for Climate, Hamburg, Alemanya, doi:10.1594/WDCC/EH5-T63L31\_OM-GR1.5L40\_A1B\_1\_6H. Disponible a: [http://dx.doi.org/10.1594/WDCC/EH5-T63L31\\_OM-GR1.5L40\\_A1B\\_1\\_6H](http://dx.doi.org/10.1594/WDCC/EH5-T63L31_OM-GR1.5L40_A1B_1_6H)
- Roeckner, E., M. Lautenschlager i H. Schneider (2006d): IPCC-AR4 MPI-ECHAM5\_T63L31 MPI-OM\_GR1.5L40 SRESA1B run no.3: atmosphere 6 HOUR values MPImet/MaDGermany. World Data Center for Climate, Hamburg, Alemanya, doi:10.1594/WDCC/EH5-T63L31\_OM-GR1.5L40\_A1B\_3\_6H. Disponible a: [http://dx.doi.org/10.1594/WDCC/EH5-T63L31\\_OM-GR1.5L40\\_A1B\\_3\\_6H](http://dx.doi.org/10.1594/WDCC/EH5-T63L31_OM-GR1.5L40_A1B_3_6H)
- Roeckner, E., M. Lautenschlager i H. Schneider (2006e): IPCC-AR4 MPI-ECHAM5\_T63L31 MPI-OM\_GR1.5L40 SRESB1 run no.1: atmosphere 6 HOUR values MPImet/MaDGermany. World Data Center for Climate, Hamburg, Alemanya, doi: 10.1594/WDCC/EH5-T63L31\_OM-GR1.5L40\_B1\_1\_6H. Disponible a: [http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Entry.jsp?acronym=EH5-T63L31\\_OM-GR1.5L40\\_B1\\_1\\_6H](http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Entry.jsp?acronym=EH5-T63L31_OM-GR1.5L40_B1_1_6H)
- Roeckner, E., M. Lautenschlager i H. Schneider (2006f): IPCC-AR4 MPI-ECHAM5\_T63L31 MPI-OM\_GR1.5L40 SRESB1 run no.3: atmosphere 6 HOUR values MPImet/MaDGermany. World Data Center for Climate, Hamburg, Alemanya, doi:10.1594/WDCC/EH5-T63L31\_OM-GR1.5L40\_B1\_3\_6H. Disponible a: [http://dx.doi.org/10.1594/WDCC/EH5-T63L31\\_OM-GR1.5L40\\_B1\\_3\\_6H](http://dx.doi.org/10.1594/WDCC/EH5-T63L31_OM-GR1.5L40_B1_3_6H)
- Rummukainen, M. (2010): State-of-the-art with regional climate models. WIREs Climate Change. Volume 1. John Wiley & Sons, Ltd. January/February 2010, pp. 82-96.
- Skamarock, W. C. and Klemp, J. B. (2008): A time-split non hydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. Journal of Computational Physics 227(7), pp. 3465-3485.
- Uppala, S.M. et al. (2005):The ERA-40 re-analysis. Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society 131, pp. 2961-3012,doi: 10.1256/qj.04.176
- Van Ulden, A.P. i G.J. Van Oldenborgh (2006): "Large-scale atmospheric circulation biases and changes in global climate model simulations and their importance for climate change in Central Europe", Atmospheric Chemistry and Physics, 6, pp. 863–881, doi:10.5194/acp-6-863-2006. Disponible a: <http://www.atmos-chem-phys.net/6/863/2006/>.