Tethys
Revista de meteorologia
i climatologia mediterrània

Tethys 2011, **8**, 77–89
www.tethys.cat
ISSN-1697-1523
eISSN-1139-3394
DOI:10.3369/tethys.2011.8.08
Revista editada per **ACAM**

Projeccions de canvi climàtic per a Catalunya (NE Península Ibèrica). Part I: modelització climàtica regional

A. Barrera-Escoda i J. Cunillera

Departament de Territori i Sostenibilitat, Servei Meteorològic de Catalunya; C. de Berlín 38, 4a planta, 08029 Barcelona

Rebut: 20-IV-2011 – Acceptat: 18-VIII-2011 – **Versió Original**

Correspondència a: tbarrera@meteo.cat

Resum

Es presenta una tècnica dinàmica de regionalització climàtica per a generar projeccions al segle XXI a Catalunya, a partir de les sortides del model global acoblat atmosfera-oceà ECHAM5/MPI-OM. Aquesta tècnica consisteix en integracions llargues (5 anys) amb el model mesoescalar MM5 a través de tres dominis niats unidireccionalment de 135, 45 i 15 km de resolució horitzontal i 23 nivells verticals. S'utilitzen dos escenaris d'emissions possibles de l'Informe Especial sobre Escenaris d'Emissions per a la generació de les projeccions regionalitzades: un de sever (A2) i l'altre moderat (B1). S'estudien en detall només la temperatura a 2 m i la precipitació, per ser les variables de major interès social i les que condicionen d'una manera més directa els recursos hídrics del país. Les característiques espai-temps generals d'aquestes dues variables són correctament reproduïdes per la metodologia emprada, tret del cicle estacional de la precipitació. Les simulacions realitzades presenten un biaix fred important per a la temperatura, així com una sobreestimació general de la precipitació. Els escenaris obtinguts projecten un augment acusat de la temperatura (fins a 5°C cap a finals de segle) i una disminució de la precipitació mitjana anual durant aquest segle, però amb una elevada variabilitat espacial i temporal. Aquest descens és més acusat a la part càlida de l'any (del 50% a determinades zones per a l'estiu a finals de segle). Per contra, es projecta un augment lleuger durant gran part de l'època freda de l'any. Pel que fa referència als valors extrems, s'espera un augment important dels mesos càlids i una disminució lleugera dels mesos més freds. En precipitació es projecta un augment molt important dels períodes secs. Tot i així, també es projecta un augment dels mesos extremadament plujosos. Els canvis projectats són més marcats per a l'escenari A2 que no pas per al B1.

Paraules clau: canvi climàtic, projeccions, regionalització climàtica, MM5, Catalunya

1 Introducció

La resolució típica dels models de circulació general climàtics (MCGC), entre 100 i 300 km, no és suficient per a estudiar les característiques del clima a escala regional o local (a nivell de Catalunya o les seves comarques). Per tant, les projeccions obtingudes directament dels MCGCs per al segle XXI no són útils per a avaluar els impactes a escala regional i local que tindran lloc a causa del canvi climàtic antropogènic. És per aquest motiu que es recomana l'ús de tècniques de regionalització per a la realització d'escenaris climàtics futurs a alta resolució (IPCC, 2007). Aquestes tècniques consisteixen bàsicament a obtenir les variables meteorològiques principals amb un detall espacial més gran. Existeixen nombroses tècniques de regionalització, les quals es poden dividir en dos grups: estadístiques i dinàmiques. Les tècniques estadístiques utilitzen relacions empíriques entre les variables climàtiques de gran escala (o predictors) i les variables regionals o locals (predictands). Per una altra banda, les tècniques dinàmiques usen models meteorològics d'àrea limitada (models mesoescalars) per a obtenir les mateixes variables.

(cc) BY *2011 Autor(s). Aquest treball té llicència "Creative Commons".*

La necessitat de baixar d'escala les simulacions dels MCGCs, comentada anteriorment, es fa encara més palesa en zones de la Terra amb una complexa orografia com Catalunya, la qual es troba a més a la zona Mediterrània i, per tant, sota la influència de masses d'aire tant d'origen polar com tropical. La complexa orografia de Catalunya comporta que els processos mesoescalars, com poden ser les pluges orogràfiques o els fenòmens convectius, tinguin un paper molt important en la climatologia del país. Aquests processos no estan ben resolts pels MCGCs o bé no es tenen en compte en el sí d'aquests models, donades les seves baixes resolucions espacials.

L'últim informe de l'IPCC (2007) exposa que una de les zones de la Terra més vulnerables al canvi climàtic seria la zona Mediterrània. En aquesta zona es projecta un augment de la temperatura mitjana (entre 2-6°C) superior al valor mitjà projectat per al conjunt del planeta, així com una disminució de la precipitació (10-15%) durant aquest segle. Concretament, segons aquest informe s'espera que empitjorin les condicions ambientals en una regió ja vulnerable a la variabilitat climàtica. En conseqüència, podria reduir-se la disponibilitat d'aigua (reducció del 20-40% dels recursos hídrics), el potencial de generació hidroelèctrica i, en general, el rendiment dels cultius. També s'esperen més riscos per a la salut humana a causa d'una major freqüència d'onades de calor i incendis forestals. La majoria dels ecosistemes i organismes s'adaptarien amb dificultat al Canvi Climàtic. També s'apunta cap a un augment en la variància de la precipitació a causa de l'escalfament global. És a dir, un augment tant en els episodis de precipitacions intenses com de les sequeres. Així, alguns estudis publicats recentment mostren que els períodes secs i les sequeres podrien augmentar a Catalunya durant aquest segle (Altava-Ortiz, 2010).

Existeixen pocs treballs a l'àmbit català o de la Mediterrània més occidental que hagin abordat el tema de la regionalització climàtica a altes resolucions espacials ($\leq$ 15 km). Bàsicament, els treballs que hi ha publicats o estan en curs actualment se centren en l'ús de tècniques estadístiques de regionalització: Brunet et al. (2009) presenta projeccions a nivell de tota la Península Ibèrica (PI) a uns 50 km de resolució espacial o Altava-Ortiz (2010) amb projeccions a uns 5 km de la precipitació per a tot el segle XXI al NE de la PI. Altres exemples a nivell de l'Estat Espanyol són el de Gutiérrez et al. (2010) per a Cantàbria a tan sols 1 km utilitzant tècniques estadístiques o Montávez (2008) amb un conjunt de projeccions regionalitzades a partir del model mesoescalar MM5 per a tota la PI a 30 km i per al SE de la PI a 10 km. Finalment, caldria comentar els projectes espanyols ESCENA (2008-2011, http://www.meteo.unican.es/en/node/72776) i ESTCENA (2008-2011, http://www.meteo.unican.es/en/projects/esTcena), en els quals s'estan desenvolupant actualment projeccions regionalitzades a uns 25 km del clima de la PI per al segle XXI amb tècniques de regionalització només dinàmiques o estadístiques, respectivament, els resultats dels quals es publicaran properament. Per a la resta del món, cal destacar els projectes europeus PRUDENCE (EVK2-CT2001-00132, 2001-2004, http://PRUDENCE.dmi.dk/) i ENSEMBLES (GOCE-CT-2003-505539, 2004-2009, http://ENSEMBLES-eu.metoffice.com/index.html). En el primer, es van realitzar simulacions regionals climàtiques a 50-70 km per a tot Europa a partir de diferents models de centres de recerca europeus (Christensen, 2005; Déqué et al., 2005). En el segon, es va realitzar un sistema de projeccions regionalitzades per conjunts a 25-50 km per a tot Europa (Van der Linden i Mitchell, 2009). Actualment, cal destacar el projecte del WCRP CORDEX (des de 2009, http://cordex.dmi.dk/), continuació dels projectes anteriors, en el qual s'estan desenvolupant i coordinant diferents simulacions regionalitzades, moltes d'elles amb el model mesoescalar WRF, per a diferents zones de la Terra a 20-50 km. Finalment, durant els últims anys s'han portat a terme molts treballs amb regionalitzacions dinàmiques del clima en diferents zones del món i a partir de diferents models mesoescalars, sent un bon exemple Salathé Jr et al. (2008) amb projeccions a 15 km amb el model MM5 per al Pacífic NW dels EUA.

El treball que es presenta en aquest estudi és el primer que es fa amb una resolució espacial tan elevada per a la zona d'estudi tenint en compte tècniques de regionalització dinàmica. Tot i així, aquest treball representa només un punt de partida per a la zona d'estudi, ja que es mostren només uns primers resultats, els quals poden ser útils per a complementar estudis d'anàlisi d'impacte a Catalunya. S'han realitzat simulacions regionals a una resolució espacial de 15 km del clima durant el segle XXI per al conjunt de Catalunya a través del model mesoescalar MM5 niat a les condicions de contorn del model global acoblat atmosfera-oceà ECHAM5/MPI-OM. Primer de tot, s'hi presenten les dades utilitzades per a desenvolupar tal estudi, després es passa a explicar la metodologia desenvolupada i es mostren els resultats més significatius en relació a les projeccions de la temperatura de l'aire a 2 m i la precipitació per a tot Catalunya. Finalment, es presenten les principals conclusions així com el treball futur a desenvolupar per a millorar les simulacions realitzades. Per acabar, s'ha de comentar que aquest treball és la continuació i ampliació del que es va realitzar per al capítol 6 (Calbó et al., 2010) del *Segon Informe sobre el Canvi Climàtic a Catalunya* (Llebot, 2010). S'està preparant una segona part d'aquest article, en la qual es resumiran els resultats de les projeccions per a Catalunya mitjançant diverses aproximacions, incloent-hi les que es presenten aquí.

2 Dades utilitzades

Les dades que s'han utilitzat per a elaborar el present estudi són les següents:

- Reanàlisis de l'ERA40 (Uppala et al., 2005) del Centre Europeu de Predicció a Mitjà Termini (ECMWF) a 2,5° de resolució horitzontal espacial per al període 1971-2000 i disponibles cada 6 h (00, 06, 12 i 18 UTC). S'han

Taula 1. Comparació dels valors estacionals mitjans de temperatura (en °C) entre les observacions, l'ERA40, l'EH5OM i les simulacions MM5+ERA40 i MM5+EH5OM a 15 km per al període de referència 1971-2000.

Estació	OBS	MM5+ERA40	ERA40	MM5+EH5OM	EH5OM
DGF	7,3	6,7	5,8	6,5	7,1
MAM	12,8	10,3	11,2	9,9	8,8
JJA	22,0	16,5	20,3	15,4	18,6
SON	15,1	10,9	13,2	10,2	17,7
Anual	14,3	11,1	12,6	10,5	13,1

Taula 2. Comparació dels valors estacionals mitjans de precipitació (en mm) entre les observacions, l'ERA40, l'EH5OM i les simulacions MM5+ERA40 i MM5+EH5OM a 15 km per al període de referència 1971-2000.

Estació	OBS	MM5+ERA40	ERA40	MM5+EH5OM	EH5OM
DGF	134,8	247,1	111,1	351,8	112,7
MAM	174,5	257,1	152,6	423,8	135,7
JJA	147,3	85,6	144,9	172,6	34,7
SON	195,7	132,9	138,9	264,5	140,4
Anual	652,2	722,8	547,4	1212,7	423,5

utilitzat per a avaluar l'habilitat de les simulacions regionalitzades en reproduir les característiques espai-temps principals de la temperatura i la precipitació (http://data-portal.ecmwf.int/data/d/ERA40_daily/).

- Simulacions climàtiques globals del model ECHAM5/MPI-OM per a l'IPCC (2007) a 1,875° de resolució espacial horitzontal, 19 nivells verticals i disponibles cada 6 h (00, 06, 12 i 18 UTC): una per al clima del segle XX (Roeckner, 2005) i dues 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; Roeckner et al., 2006a) i IEEE-B1 (escenari moderat; Roeckner et al., 2006b). S'han utilitzat per a generar els escenaris regionalitzats a Catalunya (http://cera-www.dkrz.de/CERA/index.html).
- Malla de precipitació de 5 km × 5 km al NE de la PI calculada per Altava-Ortiz (2010) a partir d'unes 1100 estacions pluviomètriques de l'Agència Estatal de Meteorologia i altres institucions en aquesta zona (no simultànies en el temps). S'ha utilitzat per a comparar-la amb les dades simulades de precipitació.
- 17 sèries homogènies de temperatura representatives de les diferents zones climàtiques de Catalunya (Servei Meteorològic de Catalunya, SMC, 2010). S'han utilitzat per a comparar-les amb les dades simulades de temperatura.

3 Metodologia

En aquest estudi es proposa l'ús del model mesoescalar MM5 (Grell et al., 1994; Dudhia et al., 2005) niat unidireccionalment amb tres dominis de 135, 45 i 15 km de resolució horitzontal i 23 nivells de resolució vertical a les condicions de contorn subministrades per una banda per les reanàlisis de l'ERA40, i per una altra banda pel model global acoblat atmosfera-oceà ECHAM5/MPI-OM. L'ECHAM5 (Roeckner et al., 2003) és la seva component atmosfèrica, 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 la seva component oceànica, desenvolupada íntegrament al *Max Planck Institut*.

El model MM5 és un dels models que s'utilitzen en la predicció meteorològica que cada dia elabora l'SMC i la seva fiabilitat és força elevada (Sairouni et al., 2007). A més, és un dels models numèrics de predicció a curt termini més àmpliament estesos entre la comunitat internacional de modelització atmosfèrica, ja que és de lliure distribució i d'una execució i adaptació informàtica senzilles sobre múltiples plataformes. Per una altra banda, el model ECHAM5/MPI-OM ha mostrat ser un dels models globals que reprodueixen millor el clima actual de la Terra sota els forçaments radiatius coneguts (Ulden i Van Oldenborgh, 2006) i, en especial, a la zona Mediterrània (Altava-Ortiz, 2010). Per tant, es pot considerar un dels millors models per a realitzar projeccions futures del clima de tota la munió de models considerats a l'IPCC (2007) per a la zona d'estudi.

El primer domini amb l'MM5 que s'ha definit (resolució horitzontal de 135 km i 30×50 punts), cobreix una àrea limitada per 50°W a 50°E i 17°N a 58°N, i està centrat sobre 0°E i 40°N. El segon domini (resolució horitzontal de 45 km i 40×40 punts) ocupa una àrea limitada per 12°W a 8°E i 32°N a 47°N. El tercer domini (resolució horitzontal de 15 km i 25×25 punts) té una àrea limitada per 1°W a 4°E i 40°N a 43°N. Cal esmentar que les dimensions dels dominis d'integració s'han ajustat al màxim per tal de minimitzar el temps de càlcul i l'espai d'emmagatzematge en disc de les

Taula 3. Resum dels canvis projectats en temperatura i precipitació per al conjunt de Catalunya segons els escenaris d'emissions A2 i B1 i per a cada estació climàtica obtinguts amb les simulacions regionalitzades amb l'MM5 a 15 km. Període de referència 1971-2000. Mit. és mitjana; Màx., valor màxim; i Mín., valor mínim. Aquests dos darrers valors indiquen la màxima i mínima variació detectada entre totes les cel·les que cobreixen Catalunya.

IEEE	Període	Estació	Variació temp. (°C)			Variació precip. (%)		
			Mit.	Màx.	Mín.	Mit.	Màx.	Mín.
A2	2011-2040	Anual	+0,8	+0,9	+0,2	−8,0	−0,7	−15,9
		DGF	+0,7	+0,8	+0,0	−3,5	+7,1	−13,3
		MAM	+0,6	+0,8	+0,1	−12,8	−4,6	−19,7
		JJA	+0,9	+1,1	+0,4	+5,9	+25,7	−20,6
		SON	+0,8	+1,0	+0,2	−11,9	+8,9	−23,9
	2041-2070	Anual	+2,1	+2,3	+1,6	−8,0	+12,4	−18,1
		DGF	+2,0	+2,3	+1,5	+4,5	+37,6	−18,6
		MAM	+1,8	+2,0	+1,4	−13,3	+11,1	−25,0
		JJA	+2,5	+2,7	+2,0	−23,2	−1,1	−47,3
		SON	+2,1	+2,4	+1,6	−10,6	+9,6	−24,0
	2071-2100	Anual	+3,6	+4,0	+3,3	−16,5	+3,7	−29,7
		DGF	+3,2	+3,5	+3,0	+4,0	+37,1	−20,8
		MAM	+3,2	+3,5	+2,9	−20,8	+9,7	−35,6
		JJA	+4,3	+4,8	+3,6	−39,2	−13,7	−61,6
		SON	+3,9	+4,4	+3,3	−25,3	−0,6	−37,4
B1	2011-2040	Anual	+0,9	+1,0	+0,5	−1,4	+10,8	−14,5
		DGF	+1,0	+1,2	+0,7	+10,7	+40,4	−17,0
		MAM	+0,7	+0,8	+0,4	−11,1	−1,2	−18,0
		JJA	+1,0	+1,2	+0,7	+1,2	+27,0	−26,0
		SON	+0,8	+0,9	+0,4	−2,1	+6,0	−15,0
	2041-2070	Anual	+1,4	+1,5	+1,2	−3,8	+3,2	−12,5
		DGF	+1,3	+1,5	+1,1	−1,2	+20,6	−12,5
		MAM	+1,1	+1,2	+0,9	−11,5	−1,1	−20,3
		JJA	+1,7	+1,9	+1,4	−0,7	+21,7	−25,8
		SON	+1,5	+1,6	+1,2	+2,8	+17,4	−11,9
	2071-2100	Anual	+2,5	+2,8	+2,3	−10,5	+8,0	−21,5
		DGF	+2,2	+2,4	+2,0	+6,0	+35,2	−19,2
		MAM	+2,2	+2,5	+2,0	−13,5	+7,3	−25,5
		JJA	+3,0	+3,4	+2,5	−23,0	+4,0	−47,3
		SON	+2,6	+2,9	+2,3	−21,6	−6,7	−37,1

dades de sortida. Al domini mare (135 km), se li ha aplicat la tècnica de forçament amb anàlisi dinàmica (*dynamic analysis nudging*). Aquesta tècnica consisteix en forçar la simulació a seguir les condicions de contorn subministrades pel model global durant tota la integració. D'aquesta manera es garanteix la continuïtat de massa en les simulacions (integració d'àrea limitada). Aquesta tècnica també permet obtenir patrons de gran escala consistents amb els presents en la simulació global (Salathé Jr et al., 2008). En canvi, els dominis segon i tercer s'integren sense forçament dinàmic per tal que el model MM5 reprodueixi lliurement els fenòmens d'escala petita en aquests dos dominis i la tècnica de regionalització emprada sigui realment efectiva.

Tot el procés de simulació s'ha dividit en integracions contínues de 5 anys, independents les unes de les altres, i inicialitzades cadascuna d'elles amb les condicions inicials subministrades pels models globals (ERA40 o EH5OM). Per al seu desenvolupament s'ha escollit un conjunt de parametritzacions físiques simples perquè estudis previs, com el de Fernández et al. (2007), conclouen que no existeix cap combinació apropiada del tot per a definir les característiques a escala regional del clima de la PI per a integracions llargues (5 anys) amb el model MM5. Per tant, s'aconsella un conjunt de parametritzacions que minimitzin el temps de càlcul. Així, s'ha escollit l'algorisme de Grell (Grell, 1993; Grell et al.,1994) per a la convecció, la parametrització de

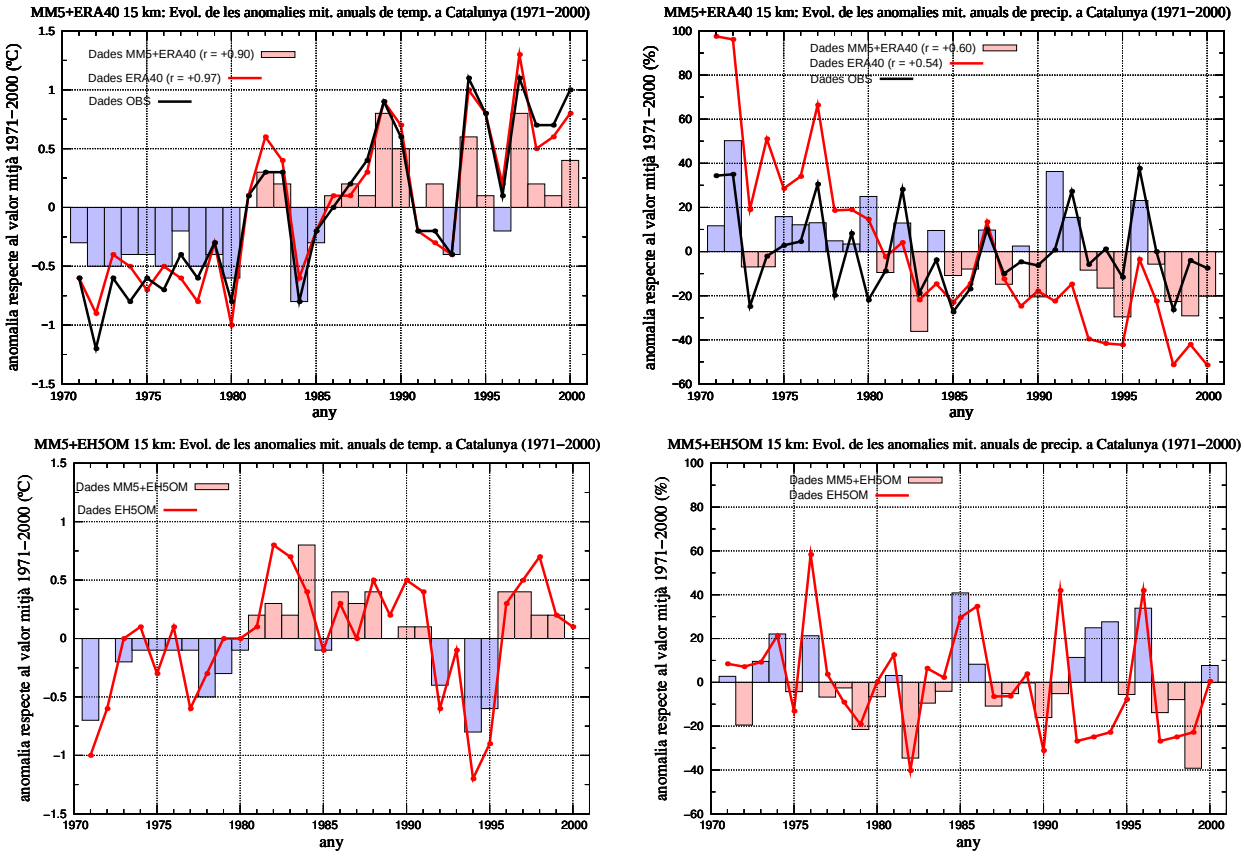

Figura 1. Evolució temporal de les anomalies mitjanes anuals de temperatura (a, esquerra a dalt, i c, esquerra a baix) i precipitació (b, dreta a dalt, i d, dreta a baix) per al conjunt de Catalunya i període 1971-2000 calculades a partir de les simulacions regionalitzades amb l'MM5 a 15 km (barres de colors), les observacions (línies negres) i l'ERA40 (línies vermelles, Figures a i b) o les simulacions climàtiques globals de l'EH5OM (línies vermelles, Figures c i d).

"gel simple" (de l'anglès *simple ice*; Dudhia, 1989) per a la microfísica, l'esquema de núvols (Dudhia, 1989; Grell et al., 1994) per a la radiació, l'esquema MRF (Hong i Pan, 1996) per a la capa límit planetària, i finalment, un model simple de sòl a 5 capes (Dudhia, 1996) per a la parametrització del sòl.

4 Resultats

En aquest apartat es presenten els resultats principals de les simulacions desenvolupades. En primer lloc hi ha l'avaluació de la metodologia definida en reproduir les característiques espai-temps actuals de la temperatura i la precipitació per al període de control (1971-2000). En segon lloc s'analitzen les projeccions obtingudes per al segle XXI, posant especial èmfasi en l'anàlisi de tres períodes de 30 anys: 2011-2040, 2041-2070 i 2071-2100.

4.1 Reproducció del clima actual

A la Figura 1a i 1b es presenten les evolucions temporals de les anomalies mitjanes anuals de temperatura i precipitació, respectivament, per al conjunt de Catalunya per a la simulació de l'MM5 niat a l'ERA40 (MM5+ERA40), les obtingudes directament de l'ERA40 i les observacions per al període 1971-2000. Es pot concloure que el rang de variabilitat produït pel model és similar a l'observat i, sobretot, que la regionalització millora els resultats obtinguts del model global directament. Això últim es pot apreciar de manera significativa per a la precipitació (Figura 1b), on, mentre que les observacions no mostren cap tipus de tendència, les dades de l'ERA40 mostren una tendència important a decréixer i l'MM5+ERA40 només mostra una lleugera disminució. Aquesta millora també és observable amb la correlació lineal entre la simulació MM5+ERA40 i les observacions (r = +0,60) enfront de la correlació ERA40 amb les observacions (r = +0,54).

Per una altra part, les Figures 1c i 1d mostren les mateixes evolucions temporals que les Figures 1a i 1b però per a la simulació de l'MM5 niat a la simulació climàtica global de l'ECHAM5/MPI-OM (MM5+EH5OM). La simulació regionalitzada manté el rang de variabilitat, especialment per a la temperatura.

Pel que fa referència als cicles estacionals (Taules 1 i 2), el de la temperatura està ben reproduït per les simulacions

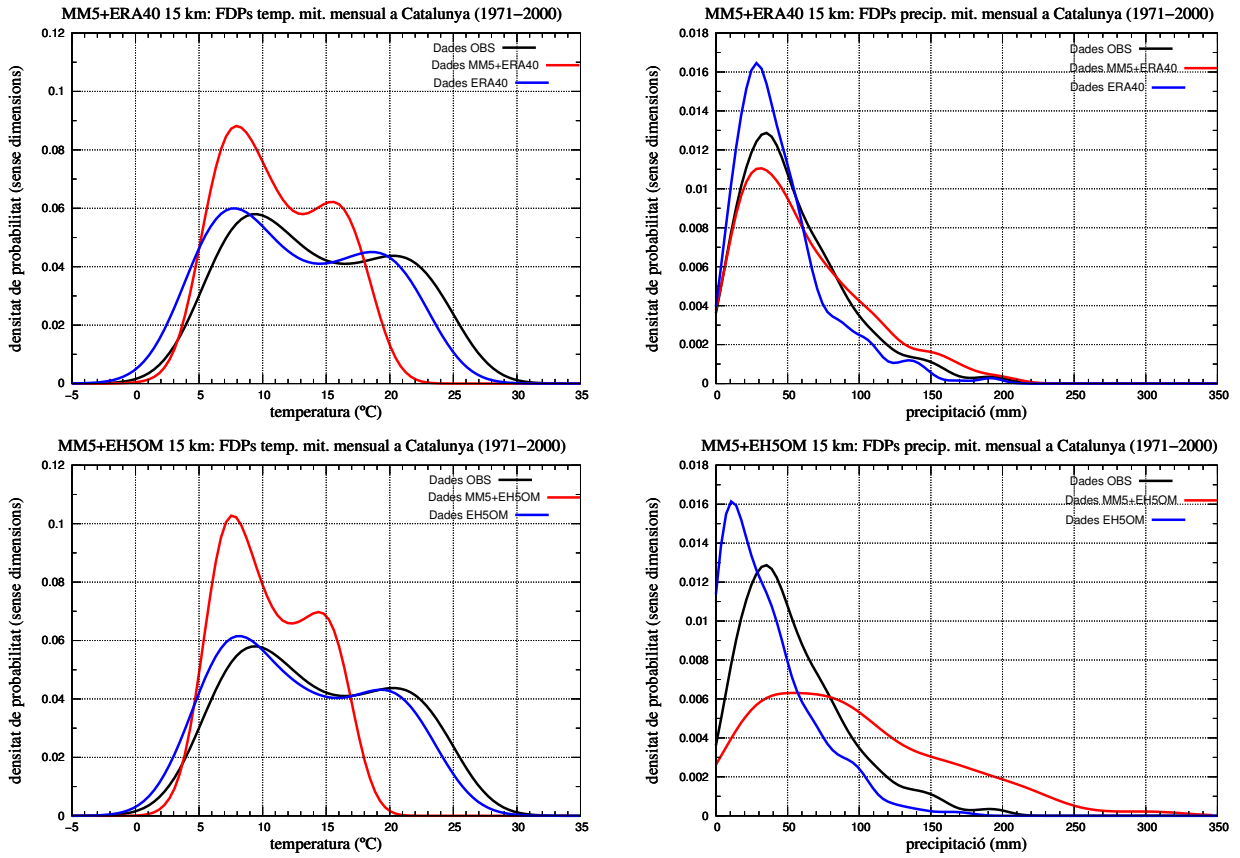

Figura 2. Funcions densitat de probabilitat (FDPs) de temperatura (a, esquerra a dalt, i c, esquerra a baix) i precipitació (b, dreta a dalt, i d, dreta a baix) mitjanes mensuals per al conjunt de Catalunya i període 1971-2000 calculades a partir de les simulacions regionalitzades amb l'MM5 a 15 km (línies vermelles), les observacions (línies negres) i l'ERA40 (línies blaves, Figures a i b) o les simulacions climàtiques globals de l'EH5OM (línies blaves, Figures c i d).

regionalitzades, més bé per a la simulació MM5+ERA40 que no pas per a la simulació MM5+EH5OM. El cicle de la precipitació, però, no està ben reproduït, obtenint-se una sobreestimació molt important a l'hivern i a la primavera i una subestimació a l'estiu i a la tardor. A grans trets, doncs, s'observa d'aquesta anàlisi un esbiaixament fred que produeix l'MM5 (el biaix fred és intrínsec al model MM5, tal i com es va concloure a la nota d'estudi de l'SMC de Sairouni et al. (2007); a més, una part d'aquest biaix podria ser degut a la baixa densitat de sèries disponibles per a comparar-les amb els valors simulats) i una sobreestimació general de la pluja, molt més marcada per a la simulació MM5+EH5OM (possiblement el fet que l'ERA40 i l'EH5OM, aquest darrer en menor mesura, no reprodueixin bé el cicle de precipitació pot ser un factor important perquè tampoc quedi ben reproduït per les simulacions regionalitzades; a més, els diferents niaments que s'han realitzat junt amb les molt ajustades dimensions dels dominis són probablement també responsables d'aquesta sobreestimació).

Aquest comportament de les simulacions es pot veure millor en l'anàlisi de les distribucions de freqüència de les temperatures i precipitacions mitjanes mensuals a partir de les seves Funcions Densitat de Probabilitat (FDPs, Figura 2). En general la tipologia de totes les FDPs simulades són semblants a les FDPs observades: distribució bimodal per a la temperatura i distribució unimodal amb esbiaixament negatiu per al cas de la precipitació. Ara bé, a causa del biaix fred que produeix l'MM5 ja comentat en les temperatures, cap de les dues simulacions regionalitzades reprodueix correctament l'FDP. Per tant, en aquest cas la tècnica emprada no mostra una millora respecte als models globals per als quals les seves FDPs són molt semblants a les observades. Per a la precipitació l'anàlisi és més complexa, ja que per a la simulació MM5+ERA40 sí que s'obté una FDP que és més propera a l'FDP observada que no pas l'obtinguda directament de l'ERA40. En canvi per a la simulació MM5+EH5OM, degut a la gran sobreestimació que produeix, la forma de l'FDP simulada és força diferent a l'observada, tot i que en aquest cas tampoc és similar a l'observada l'FDP de l'EH5OM.

Tot i que les simulacions regionalitzades han mostrat tenir imprecisions en característiques tan importants com el cicle estacional de la precipitació i la distribució de

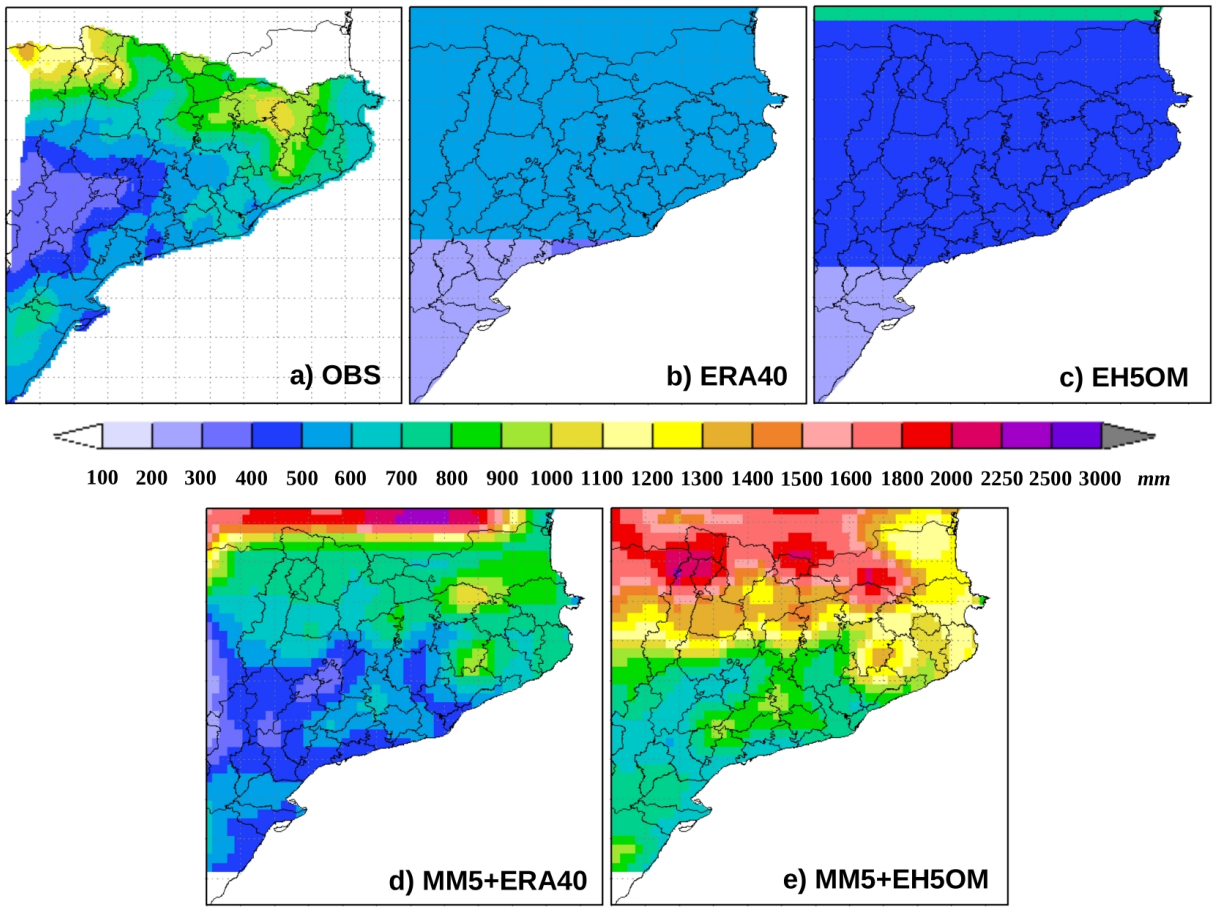

Figura 3. Comparació del camp de precipitació mitjana anual per al període 1971-2000 calculat a partir de les observacions (a), de l'ERA40 (b), de l'EH5OM (c), i de les simulacions MM5+ERA40 (d) i MM5+EH5OM (e) a 15 km.

freqüències dels valors mensuals de temperatura i precipitació, la tècnica desenvolupada és per ara l'única que pot reproduir amb el suficient detall la variabilitat espacial d'ambdues variables. D'aquesta manera, a la Figura 3 es presenta una comparació entre els camps de precipitació mitjana anuals per al període de control obtinguts a partir de les observacions i els obtinguts a partir dels models globals i les dues simulacions regionalitzades. Es pot veure com la simulació MM5+ERA40 (Figura 3d) reprodueix força bé el patró espacial (coincidència dels màxims i mínims de precipitació, i dels valors totals) de les observacions (Figura 3a). La simulació MM5+EH5OM (Figura 3e), tot i que sobreestima d'una manera molt important el camp de precipitació, el seu patró espacial és també molt semblant a l'observat. Ara bé, com que el domini d'interès (el de 15 km de resolució espacial) té una extensió massa ajustada, als contorns del mateix apareixen zones amb una sobreestimació important de la precipitació (especialment a la franja nord de la Figura 3d). Finalment, només cal comentar que amb els camps mitjans obtinguts a partir de l'ERA40 (Figura 3b) o l'EH5OM (Figura 3c) és impossible reproduir la gran variabilitat espacial de la precipitació a Catalunya.

4.2 Anàlisi de les projeccions

Per a avaluar els canvis projectats en precipitació i temperatura per als tres períodes d'anàlisi (2011-2040, 2041-2070 i 2071-2100) es procedeix de la següent manera: primer es calculen els valors mitjans de les variables en qüestió per a la simulació MM5+EH5OM a 15 km per al període de control 1971-2000. Posteriorment, es calculen els valors mitjans de les variables de l'MM5+EH5OM per als tres períodes del segle XXI, però tenint en compte dos escenaris d'emissions diferents (A2 i B1). Finalment, es calculen les variacions de les variables com la diferència entre els valors mitjans de les dues simulacions forçades amb les emissions corresponents i la simulació de referència. En fer aquesta diferència se suposa que gran part dels errors i esbiaixaments, que produeix la metodologia emprada, quedaran cancel·lats. No obstant, no s'eliminen del tot perquè en un principi els esbiaixaments no són lineals, encara que els errors que presenta el model hi són presents sempre.

A la Taula 3 es troben resumits els canvis projectats en la temperatura i la precipitació per al conjunt de Catalunya (caixa definida per 0,15°-3,35°E i 40,5°-42,9°N). Es dóna

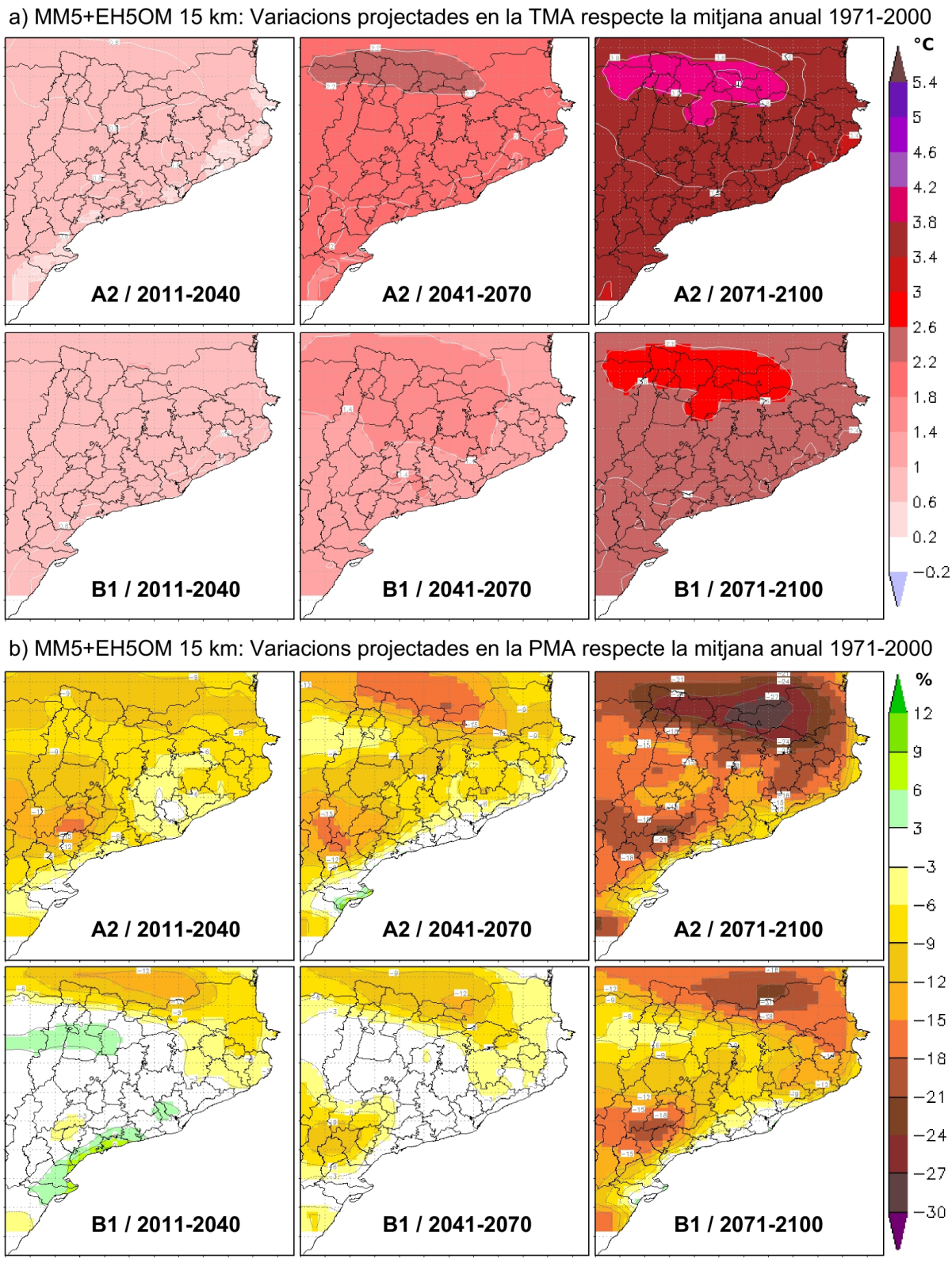

Figura 4. Mapes dels camps de variació de la temperatura (a) i la precipitació (b) mitjanes anuals, obtinguts amb la simulació regionalitzada amb l'MM5 a 15 km per als escenaris d'emissions A2 i B1 i per als períodes 2011-2040, 2041-2070 i 2071-2100. Període de referència 1971-2000. Les isolínies de variació de temperatura estan representades cada 0,2°C mentre que les de precipitació estan representades segons l'escala de valors de la dreta.

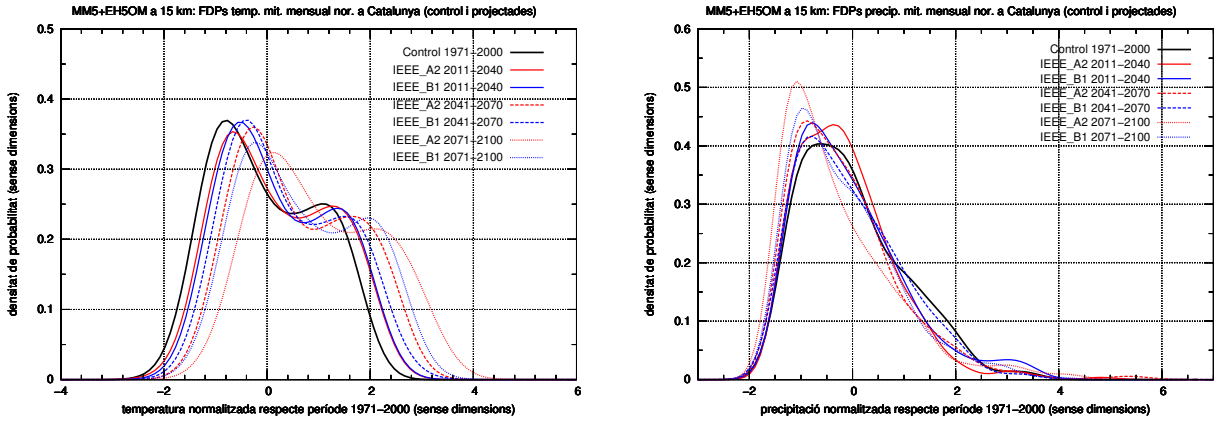

Figura 5. Funcions densitat de probabilitat (FDPs) projectades de temperatura (a, esquerra) i precipitació (b, dreta) mitjanes mensuals normalitzades per al conjunt de Catalunya calculades a partir de les simulacions regionalitzades amb l'MM5 a 15 km: simulació de control (1971-2000, línies negres), simulacions segons escenari A2 (línies vermelles) i B1 (línies blaves) per als períodes 2011-2040, 2041-2070 i 2071-2100.

el valor mitjà, màxim i mínim de les variacions projectades en aquestes dues variables, respecte als valors mitjans del període de referència 1971-2000, per a cada període, escenari i estació de l'any. Aquests valors han estat calculats a partir de tots els punts de malla del domini d'alta resolució (15 km) que es troben en terra ferma i cauen dins de la caixa definida anteriorment. En resum, es pot afirmar que per a aquest segle es projecta un augment de la temperatura mitjana anual per als dos escenaris d'emissions. Aquest augment seria proper a 1°C per al primer període, al voltant d'1,8°C per al segon període i de l'ordre de 3°C per a finals de segle. També s'observa un augment de la temperatura en totes les estacions de l'any, essent més acusat a l'estiu i sobretot per a l'escenari A2. En precipitació, s'obté una disminució mitjana de la precipitació del 5% per al primer i segon períodes i del 14% per a finals de segle. El comportament a nivell estacional de la precipitació és menys regular i el rang de variació molt més ampli que en el cas de la temperatura. A més, existeixen notables diferències entre els resultats obtinguts per a cada escenari a escala estacional, sobretot a mitjans de segle, tot i que cap a finals de segle ambdós escenaris tendeixen a convergir en el signe de la variació projectada tant anualment com estacional. Així doncs, la disminució projectada de la precipitació no és un resultat tan robust com l'augment de temperatura projectat.

A la Figura 4 es mostren els mapes amb els canvis projectats anuals en la temperatura (Figura 4a) i la precipitació (Figura 4b) per als tres períodes d'estudi. Es pot veure que l'augment projectat en la temperatura no serà de la mateixa magnitud per a tot Catalunya, essent molt més important a la zona pirinenca que no pas al litoral, de l'ordre d'1°C. La zona interior del país es comportaria com una zona de transició entre el litoral i el Pirineu, en referència a les variacions projectades. En precipitació s'observa que la disminució general en la precipitació no seria constant durant el segle XXI ni es produiria amb la mateixa intensitat a tot Catalunya. De fet a gran part del litoral només es projecta o una lleugera disminució o pràcticament cap canvi apreciable en els totals anuals. En alguns punts del litoral inclús podria augmentar la precipitació molt lleugerament ($\sim 5\%$). En detall, si s'analitzen les zones del país que podrien patir una reducció més important de la precipitació, la zona pirinenca seria la que patiria una reducció anual major seguida de les Terres de Ponent. Per al Pirineu es projecta una reducció propera al 30% per a l'escenari A2 i finals de segle, i a les Terres de Ponent superior al 20%. Encara que per als dos primers períodes les diferències entre ambdós escenaris són importants, per a finals de segle aquestes diferències són poc importants, projectant-se una disminució de la precipitació més general i més marcada que afectarà gairebé tot el país (tret de la zona litoral sud), amb reduccions de la precipitació d'un 10-15% a gran part del país.

A la Figura 5 es presenten les FDPs projectades de la temperatura (Figura 5a) i la precipitació (Figura 5b) mitjanes mensuals normalitzades per al període de control i els tres períodes d'estudi per al conjunt de Catalunya. Totes les dades mensuals de temperatura i precipitació que s'han utilitzat per a calcular les FDPs s'han estandarditzat segons la següent expressió matemàtica:

$$z = \frac{x - x_m}{s} \tag{1}$$

on z és la variable normalitzada, x és la variable sense normalitzar, x_m i s són, respectivament, la mitjana aritmètica i la desviació estàndard de tots els mesos de l'any del període d'anàlisi.

Per a la temperatura, el més important a destacar de les projeccions obtingudes és l'augment en la probabilitat d'ocurrència de mesos molt càlids ($z > 2$), el qual seria més important a mesura que avança el segle XXI. Aquest resultat és més marcat per a l'escenari A2 que no pas per al B1. D'altra banda, per als mesos de fred extrem ($z < -2$) es

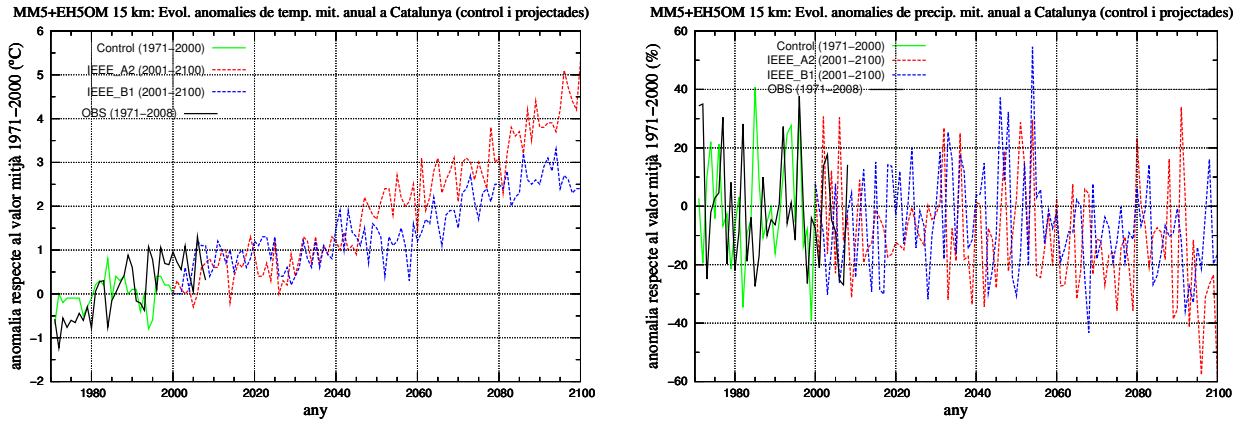

Figura 6. Evolucions temporals projectades de les anomalies de temperatura (a, esquerra) i precipitació (b, dreta) per al conjunt de Catalunya calculades a partir de les simulacions regionalitzades amb l'MM5 a 15 km per al període 1971-2100. Les dades de la simulació de control (1971-2000) regionalitzada amb l'MM5 a 15 km apareixen en color verd, les dades de la simulació amb l'escenari A2 es troben en vermell i les de l'escenari B1, en color blau. Les dades de les observacions (1971-2008) estan en color negre.

projecta una disminució en la seva freqüència durant aquest segle, que és menys marcada que l'augment dels mesos molt càlids. Per a la precipitació, es pot concloure que es podria produir una transferència de probabilitat cap a les cues de l'FDP de la precipitació mensual per als propers 100 anys, amb la qual cosa augmentaria la seva variabilitat interanual a Catalunya. Per tant, això fa pensar que la freqüència dels extrems hídrics (sequeres i inundacions) podria incrementar-se durant aquest segle, fet però que encara no es detecta (Barrera-Escoda, 2008).

Finalment, a la Figura 6 es mostren les evolucions temporals projectades de les anomalies mitjanes anuals de temperatura (Figura 6a) i precipitació (Figura 6b) per al conjunt de Catalunya per a 1971-2100. L'evolució de les temperatures anuals al llarg del segle XXI mostra clarament una tendència positiva (augment), i es podrien assolir uns valors d'augment propers als +5°C a finals de segle per a l'escenari A2 respecte als valors mitjans del període 1971-2000. La tendència lineal en la temperatura per al present segle es projecta en +4,5°C en 100 anys per a l'escenari A2 i en +2,4°C en 100 anys per al B1. És interessant comentar també que fins a mitjans de segle l'evolució anual de la temperatura es projecta de manera força semblant per a ambdós escenaris i no és fins a finals de segle quan les dues projeccions són força diferents. A grans trets, les projeccions de l'escenari B1 són més baixes que les de l'A2, sobretot per a finals de segle. L'evolució anual de les precipitacions no presenta una tendència tan clara com l'obtinguda per a la temperatura mitjana anual. Es pot observar com fins a mitjans d'aquest segle les simulacions desenvolupades donen una gran variabilitat en la precipitació sense una tendència clara, tot i que en general predominen els valors negatius sobre els positius. Per a la segona meitat de segle, la precipitació anual projectada mostra una tendència molt més clara cap a la disminució, la qual podria arribar a ser molt important per a finals de segle i amb l'escenari A2, assolint-se reduccions superiors al 40%. L'anàlisi de tendències de les projeccions en la precipitació anual (Taula 4) a partir d'un mètode de Monte Carlo per a avaluar la seva significància estadística (Livezey i Chen, 1983; Kunkel et al., 1999; Liebmann et al., 2004) dóna com a resultat que només presenta una tendència lineal decreixent, estadísticament significativa amb un nivell de confiança del 95%, la precipitació mitjana anual considerant l'escenari A2. En aquest cas, la tendència lineal projectada en aquest segle resulta ser de -17,0% en 100 anys. En canvi, per a l'escenari B1 no s'obté cap tendència estadísticament significativa, ja que la variació lineal de -8,7% en 100 anys cau dins de l'interval d'aleatorietat del mètode de Monte Carlo emprat (Taula 4).

5 Conclusions

Les simulacions regionalitzades desenvolupades reproduïxen correctament tant el rang de variabilitat interanual com el signe de les tendències observades, però no el cicle estacional de la pluja (sí per a la temperatura). S'observen, però, una sobreestimació i un esbiaixament fred generals dels camps de precipitació i temperatura mitjana anual, respectivament. Les projeccions mostren un augment significatiu i robust de les temperatures, de fins a +4°C a finals de segle respecte al període 1971-2000, amb un augment important dels mesos molt càlids i una disminució dels més freds. En referència a les precipitacions, les tendències projectades no són tan robustes. Es projecta una disminució anual de la mateixa (de fins a un 17% en 100 anys), però no de manera monòtona. S'ha de comentar que existeixen grans diferències a escala estacional segons l'escenari d'emissions considerat. Es projecta també més variabilitat, amb la qual cosa s'hauria d'esperar un augment dels episodis secs i de precipitacions extremes. Per a l'escenari A2 (sever) es pro-

Taula 4. Resum de l'aplicació del mètode de Monte Carlo en l'avaluació de tendències en les projeccions de precipitació anual regionalitzades amb l'MM5 a 15 km per al segle XXI. Les tendències lineals estan expressades en % de variació per 100 anys. IEEE és escenari d'emissió de referència, t és la tendència lineal calculada, $T_{2,5}$, T_5, T_{95} i $T_{97,5}$ són els percentils 2,5, 5, 95 i 97,5 de les tendències lineals aleatòries calculades pel mètode de Monte Carlo, respectivament.

IEEE	t	$T_{97,5}$	T_{95}	T_5	$T_{2,5}$	Sig.? $\rightarrow t > \|T\|$?
A2 (2001-2100)	-17,0	-12,31	—	—	+12,33	Sí
B1 (2001-2100)	-8,7	-11,49	-9,59	+9,58	+11,50	No

jecten canvis més importants i notables que no pas per al B1 (moderat), sent el Pirineu la zona del país amb els canvis més importants i la zona litoral on són més petits aquests canvis. La zona interior del país es comportaria com una zona de transició entre ambdues àrees.

S'ha de comentar que els resultats generals obtinguts estan en la mateixa línia que els trobats en treballs similars per a la zona d'estudi però amb menors resolucions espacials, com els de Brunet et al. (2009) i els projectes europeus PRUDENCE i ENSEMBLES (veure referències a la introducció). Tot i així, el fet d'haver realitzat les simulacions a una elevada resolució espacial ens ha permès analitzar detalladament com els canvis projectats no són homogenis en tot el territori. Més informació sobre els resultats d'aquests estudis la podreu trobar a la segona part d'aquest article, que s'està preparant. Els resultats mostrats en aquest treball representen un punt de partida per a la zona d'estudi, ja que hi ha una sèrie d'aspectes a millorar com són la reproducció del cicle estacional de la pluja, la seva sobreestimació general i el biaix fred de les temperatures, tal i com s'ha vist a l'apartat 4.1. Per tant, com a treball futur caldria redefinir els dominis d'integració, per tal que abastin una zona més àmplia (sobretot el de 15 km). També fóra necessari l'ús d'altres parametritzacions més complexes per a millorar els errors detectats, els quals treuen robustesa als resultats obtinguts. Per a tenir una visió més completa de les projeccions s'haurien de realitzar també simulacions regionalitzades tenint en compte altres escenaris d'emissions de l'IEEE com l'A1B, escenari intermedi d'emissions entre l'A2 i el B1 utilitzats. Per una altra banda s'haurien d'utilitzar altres models climàtics globals que també han mostrat un bon encert en la reproducció de les característiques climàtiques a l'Atlàntic Nord i Europa (Ulden i Van Oldenborgh, 2006) com el CCC63 (Flato, 2005), el MIROChi (Hasumi i Emori, 2004), el HadGEM (IPCC, 2007), el CCC47 (Kim et al., 2003) i el GFDL2.1 (Delworth et al., 2006) en ordre decreixent de qualitat, respectivament. Finalment, junt amb les consideracions exposades s'haurien d'utilitzar a part de l'MM5 altres models d'escala limitada, com per exemple el WRF (Skamarock et al., 2005). La combinació de totes aquestes possibilitats oferiria un ampli ventall de resultats a partir dels quals es podria analitzar amb detall la robustesa de les projeccions obtingudes, així com l'avaluació de les seves incerteses.

Agraïments. Volem agrair l'ajuda i els consells donats pels membres de l'Àrea de Recerca Aplicada i Modelització del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC), el Dr. Aitor Atencia de la Universitat McGrill de Montréal (Canadà) i el Dr. Vicent Altava-Ortiz de la Universitat de Barcelona. També volem donar les gràcies al Dr. Marc Prohom de l'Àrea de Climatologia de l'SMC per facilitarnos les dades de temperatura homogeneïtzades, a l'ECMWF per les dades de l'ERA40 i al CERA (portal web del Centre Mundial de Dades Climàtiques d'Hamburg, *World Data Center for Climate Hamburg*) per les dades de les simulacions climàtiques globals. Finalment, agraïm els comentaris i la revisió del text fets pels Dr. Josep Calbó i Dr. Arturo Sánchez-Lorenzo.

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, Barcelona, 296 pp.

Barrera-Escoda, A., 2008: Evolución de los extremos hídricos en Catalunya en los últimos 500 años y su modelización regional, Tesi Doctoral, Publicació Interna, Departament d'Astronomia i Meteorologia, Universitat de Barcelona, Barcelona, 319 pp., http://www.zucaina.net/Publicaciones/Barrera-Escoda-TESIS-2008.pdf.

Brunet, M., Casado, M. J., de Castro, M., Galán, P., López, J. A., Martín, J. M., Pastor, A., Petisco, E., Ramos, P., Ribalaygua, J., Rodríguez, E., Sanz, I., i Torres, L., 2009: Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España, Agencia Estatal de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid, informe tècnic, 165 pp., http://www.aemet.es/documentos/es/elclima/cambio_climat/escenarios/Informe_Escenarios.pdf.

Calbó, J., Sánchez-Lorenzo, A., Cunillera, J., i Barrera-Escoda, A., 2010: Projeccions i Escenaris futurs, A, 2n Informe sobre el Canvi Climàtic a Catalunya, J. E. Llebot, Grup d'Experts en Canvi Climàtic de Catalunya. Generalitat de Catalunya i Institut d'Estudis Catalans, Barcelona, pp. 183-239, http://www15.gencat.cat/cads/AppPHP/index.php?option=com_content&task=view&id=730&Itemid=158.

Christensen, J. H., 2005: Prediction of regional scenarios and uncertainties for defining european climate change risks and effects. Prudence final report, Danish Meteorological Institute, Copenhaguen, Dinamarca, informe tècnic, 269 pp., http://prudence.dmi.dk/public/publications/PRUDENCE%20Final%20report.pdf.

Delworth, T. L., Broccoli, A. J., Rosati, A., Stouffer, R. J., Balaji, V., Beesley, J. A., Cooke, W. F., Dixon, K. W., Dunne, J., Dunne, K. A., Durachta, J. W., Findell, K. L., Ginoux, P., Gnanadesikan, A., Gordon, C. T., Griffies, S. M., Gudgel, R., Harrison, M. J., Held, I. M., Hemler, R. S., Horowitz, L. W., Klein, S. A., Knut-

son, T. R., Kushner, P. J., Langenhorst, A. R., Lee, H.-C., Lin, S.-J., Lu, J., Malyshev, S. L., Milly, P. C. D., Ramaswamy, V., Russell, J., Schwarzkopf, M. D., Shevliakova, E., Sirutis, J. J., Spelman, M. J., Stern, W. F., Winton, M., Wittenberg, A. T., Wyman, B., Zeng, F., i Zhang, R., 2006: *GFDL's CM2 global coupled climate models. Part I: Formulation and simulation characteristics*, J Clim, **19**, 643–674.

Déqué, M., Jones, R. G., Wild, M., Giorgi, F., Christensen, J. H., Hassell, D. C., Vidale, P. L., Rockel, B., Jacob, D., Kjellström, E., Castro, M., Kucharski, F., i Hurk, B., 2005: *Global high resolution versus limited area model climate change projections over europe: quantifying confidence level from prudence results*, Clim Dyn, **25**, 653–670, doi: 10.1007/s00 382–005–0052–1.

Dudhia, J., 1989: *Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model*, J Atmos Sci, **46**, 3077–3107.

Dudhia, J., 1996: A multi-layer soil temperature model for MM5, Preprints, The Sixth PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop, Boulder, Colorado, USA, 22-24 July 1996, pp. 49-50, http://www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5v2/whatisnewinv2.html.

Dudhia, J., Gill, D., Manning, K., Wang, W., i Bruyere, C., 2005: PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and Users' Guide (MM5 Modeling System Version 3), Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA, http://www.mmm.ucar.edu/mm5/documents/tutorial-v3-notes.html.

Fernández, J., Montávez, J. P., Sáenz, J., González-Rouco, J. F., i Zorita, E., 2007: *Sensitivity of the MM5 mesoscale model to physical parameterizations for regional climate studies: Annual cycle*, J Geophys Res-Atmospheres, **112**, D04, 101, doi: 10.1029/2005JD006 649.

Flato, G. M., 2005: The third generation coupled global climate model (CGCM3), http://www.cccma.bc.ec.gc.ca/models/cgcm3.shtml.

Grell, G. A., 1993: *Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations*, Mon Weather Rev, **121**, 764–787.

Grell, G. A., Dudhia, J., i Stauffer, D. R., 1994: A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR Technical Note 398, Mesoscale and Microscale Meteorology Division, 122 pp.

Gutiérrez, J. M., Herrera, S., San-Martín, D., Sordo, C., Rodríguez, J. J., Frochoso, M., Ancell, R., Fernández, J., Cofiño, A. S., Pons, M. R., i Rodríguez, M. A., 2010: Escenarios regionales probabilísticos de cambio climático en Cantabria: Termopluviometría, Universidad de Cantabria y Consejería de Medio Ambiente, Gobierno de Cantabria, Santander, informe tècnic, 169 pp., http://www.meteo.unican.es/files/projects/escenariosCantabria/ClimaCantabria_Informe.pdf.

Hasumi, H. i Emori, S., 2004: K-1 coupled GCM (MIROC) description, Center for Climate System Research, University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies and Frontier Research Center for Global Change, K-1 Technical Report No. 1, 34 pp.

Hong, S. Y. i Pan, H. L., 1996: *Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model*, Mon Weather Rev, **124**, 2322–2339.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: The physical science basis, Cambridge University Press, UK and USA, 996 pp., http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm.

Kim, S. J., Flato, G., i Boer, G., 2003: *A coupled climate model simulation of the Last Glacial Maximum, Part 2: approach to equilibrium*, Clim Dyn, **20**, 635–661.

Kunkel, K. E., Andsager, K., i Easterling, D. R., 1999: *Long-term trends in extreme precipitation events over the conterminous United States and Canada*, J Clim, **12**, 2515–2527.

Liebmann, B., Vera, C. S., Carvalho, L. M. V., Camilloni, I. A., Hoerling, M. P., Allured, D., Barros, V. R., Báez, J., i Bidegain, M., 2004: *An observed trend in central South American precipitation*, J Clim, **17**, 4357–4367, doi: 10.1175/3205.1.

Livezey, R. E. i Chen, W. Y., 1983: *Statistical field significance and its determination by Monte Carlo techniques*, Mon Weather Rev, **111**, 46–59.

Llebot, J. E., 2010: 2n Informe sobre el canvi climàtic a Catalunya, Generalitat de Catalunya i Institut d'Estudis Catalans, Barcelona, 1152 pp., http://www15.gencat.cat/cads/AppPHP/index.php?option=com_content&task=view&id=736&Itemid=160.

Marsland, S. J., Haak, H., Jungclaus, J. H., Latif, M., i Röske, F., 2003: *The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates*, Ocean Model, **5**, 91–127, doi: 10.1016/S1463–5003(02)00 015–X.

Montávez, J. P., 2008: Proyecciones regionales de cambio climático con modelos climáticos regionales: Región de Murcia, Jornadas de colaboración internacional en estudios de cambio climático y su interacción con los recursos hídricos regionales, 25-28 de noviembre, Universidad Politécnica de Cartagena, Murcia, http://www.upct.es/~agua/ABSTRACT_PONENCIAS/PRESENTACION_JMONTAVEZ.pdf.

Nakićenović, N., Swart, R., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T. Y., Kram, T., La Rovere, E. L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., van Rooijen, S., Victor, N., i Dadi, D., 2000: Emissions Scenarios 2000-Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 570 pp., http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.php?idp=0.

Roeckner, E., 2005: IPCC MPI-ECHAM5_T63L31 MPI-OM_GR1.5L40 20C3M_all run no.1: atmosphere 6 HOUR values MPImet/MaD Germany, World Data Center for Climate, Hamburg, Alemanya, CERA-DB "EH5-T63L31_OM_20C3M__1_6H", http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=EH5-T63L31_OM_20C3M_1_6H.

Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kirchner, I., Kornblueh, L., Manzini, E., Rhodin, A., Schlese, U., Schulzweida, U., i Tompkins, A., 2003: The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I, Max-Planck Institut für Meteorologie, Hamburg, Alemanya, Report No. 349, 127 pp., http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/publikationen/Reports/max_scirep_349.pdf.

Roeckner, E., Lautenschlager, M., i Schneider, H., 2006a: IPCC-AR4 MPI-ECHAM5_T63L31 MPI-OM_GR1.5L40 SRESA2 run no.1: atmosphere 6 HOUR values MPImet/MaD Germany, World Data Center for Climate, Hamburg, Alemanya, doi: 10.1594/WDCC/EH5-T63L31_OM-GR1.5L40_A2_1_6H.

Roeckner, E., Lautenschlager, M., i Schneider, H., 2006b: IPCC-AR4 MPI-ECHAM5_T63L31 MPI-OM_GR1.5L40 SRESB1 run no.1: atmosphere 6 HOUR values MPImet/MaD Germany, World Data Center for Climate, Hamburg, Alemanya, doi: 10.1594/WDCC/EH5-T63L31_OM-GR1.5L40_B1_1_6H.

Sairouni, A., Moré, J., Toda, J., Miró, J. R., Aran, M., i Cunillera, J., 2007: Verificació dels models de mesoescala

operatius al Servei Meteorològic de Catalunya, Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient i Habitatge, 78 pp., Notes d'Estudi del Servei Meteorològic de Catalunya, núm. 71, http://www20.gencat.cat/docs/meteocat/Continguts/El%20Servei%20Meteorologic/Publicacions/Publicacions%20tecniques/documents/verificacio_models.pdf.

Salathé Jr, E. P., Steed, R., Mass, C. F., i Zahn, P. H., 2008: *A high-resolution climate model for the US Pacific Northwest: Mesoscale feedbacks and local responses to climate change*, J Clim, **21**, 5708–5726, doi: 10.1175/2008JCLI2090.1.

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., i Powers, J. G., 2005: A description of the Advanced Research WRF Version 2, Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, EUA, NCAR Technical Note NCAR/TN-468+STR, 88 pp., http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v2.pdf.

SMC, 2010: Butlletí anual d'indicadors climàtics 2009, Servei Meteorològic de Catalunya, Departament de Medi Ambient i Habitatge, Generalitat de Catalunya, Baic 2009, 42 pp., http://www20.gencat.cat/docs/meteocat/Continguts/Climatologia/Indicadors%20climatics%20a%20Catalunya/pdf/BAIC2009.pdf.

Ulden, A. P. V. i Van Oldenborgh, G. J., 2006: *Large-scale atmospheric circulation biases and changes in global climate model simulations and their importance for climate change in Central Europe*, Atmos Chem Phys, **6**, 863–881, doi: 10.5194/acp–6–863–2006.

Uppala, S. M., Kållberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., da Costa Bechtold, V., Fiorino, M., Gibson, J. K., Haseler, J., Hernández, A., Kelly, G. A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R. P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M. A., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hólm, E., Hoskins, B. J., Isaksen, L., Janssen, P. A. E. M., Jenne, R., McNally, A. P., Mahfouf, J.-F., Morcrette, J.-J., Rayner, N. A., Saunders, R. W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K. E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., i Woollen, J., 2005: *The ERA-40 re-analysis*, Q J R Meteorol Soc, **131**, 2961–3012, doi: 10.1256/qj.04.176.

Van der Linden, P. i Mitchell, J. F. B., 2009: ENSEMBLES: Climate change and its impacts at seasonal, deacadal and centennial timescales, Met Office Hadley Centre, Exeter, RU, 160 pp., http://ensembles-eu.metoffice.com/docs/Ensembles_final_report_Nov09.pdf.