

Projeccions de canvi climàtic per a Catalunya (NE Península Ibèrica). Part II: sintetitzant diverses metodologies

J. Calbó¹, A. Sanchez-Lorenzo², A. Barrera-Escoda³ i J. Cunillera³

¹Departament de Física, Universitat de Girona, Campus Montilivi, EPS-II, 17071 Girona

²Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zürich, Zürich

³Servei Meteorològic de Catalunya, Departament de Territori i Sostenibilitat, Generalitat de Catalunya, C. de Berlín 38, 08029 Barcelona

Rebut: 22-X-2011 – Acceptat: 18-IV-2012 – **Versió Original**

Correspondència a: josep.calbo@udg.edu

Resum

La publicació del quart informe de l'IPCC, així com la gran quantitat de resultats de la recerca desenvolupada els darrers anys sobre la regionalització de les projeccions climàtiques, va impulsar l'actualització de l'informe sobre el canvi climàtic a Catalunya. Concretament, el nou informe de l'IPCC conté noves projeccions climàtiques d'escala global i continental, mentre que diversos projectes internacionals (especialment els projectes europeus PRUDENCE i ENSEMBLES) han produït projeccions climàtiques a escala subcontinental, que permeten discriminar entre regions europees. A nivell de l'estat espanyol, alguns d'aquests resultats han estat recollits en un document elaborat per encàrrec de la "Agència Estatal de Meteorologia". A més, a Catalunya mateix s'estan desenvolupant iniciatives (en particular, al Servei Meteorològic de Catalunya) per aconseguir projeccions climàtiques a escala d'aquest territori. En el present treball se sintetitzen els resultats d'aquests i altres estudis publicats prèviament, així com els d'una anàlisi pròpia dels resultats del projecte ENSEMBLES. L'objectiu és proposar uns escenaris de variació de la temperatura i la precipitació a Catalunya, durant el present segle XXI. Així, per a la meitat del segle XXI, la temperatura podria pujar fins gairebé 2°C respecte a la de finals del segle XX. Aquests augments serien, probablement, més alts a l'estiu que a l'hivern; generals en tot el territori però menys acusats a les zones litorals. Les precipitacions, en canvi, no haurien de canviar gaire i en tot cas disminuirien molt lleugerament. Cap a finals del segle XXI, la temperatura podria ser fins uns 5°C més alta que la de finals del segle passat, mentre que la precipitació mitjana anual podria disminuir més d'un 10%. Els augments de temperatura serien més elevats a l'estiu i a les àrees més allunyades de la costa. Les precipitacions disminuirien especialment durant l'estiu, mentre que podrien fins i tot augmentar a l'hivern en zones de muntanya com ara el Pirineu.

Paraules clau: canvi climàtic, projeccions, ENSEMBLES, Catalunya, regionalització

1 Introducció

El darrer informe (AR4) del Grup Intergovernamental d'Experts sobre el Canvi Climàtic (IPCC) afirma que el clima de la Terra està canviant actualment d'una manera que no té precedents coneguts. Aquest canvi climàtic recent és un fenomen d'escala planetària, encara que es reflecteix també a escala local. Per tal d'emprendre mesures d'adaptació al nou clima, és molt rellevant disposar de projeccions climàtiques, és a dir, estimacions sobre com pot ser el clima en el futur en les escales adequades.

Les projeccions climàtiques s'obtenen majoritàriament com a resultat de la utilització dels models climàtics. Aquests són eines que integren el coneixement actual del sistema climàtic, de manera que utilitzant com a dades d'entrada els factors que afecten (o "forcen") el sistema, obtenen com a resultat el clima que cal esperar en un període futur (McGuffie i Henderson-Sellers, 1990). Hi ha models climàtics de diversos tipus, però cal esmentar preferentment els anomenats Models Acoblats de Circulació General Atmosfèrica i Oceànica (AOGCM). Els AOGCM són codis informàtics que



resolen un conjunt d'equacions (que descriuen la física i la química dels processos que tenen lloc a l'atmosfera, l'oceà, la hidrosfera, la criosfera i la litosfera), per la qual cosa han d'emprar una malla en la qual fer els càlculs. Actualment, la majoria de models de què disposa la comunitat científica no treballen amb resolucions inferiors a uns pocs graus de latitud i longitud. Altres diferències entre els models provenen de les parametritzacions, és a dir, el tractament simplificat dels fenòmens (com la formació de núvols convectius, la transferència radiativa a l'atmosfera, la barreja oceànica) que no són descrits explícitament per les equacions principals del model.

A l'AR4 es comenta que els AOGCM han progressat en els darrers anys (Randall et al., 2007), però no han experimentat canvis realment significatius en els anys transcorreguts entre el tercer i quart informe de l'IPCC. El debat sobre la necessitat de millorar els models climàtics i les seves prediccions és doncs present a la comunitat científica (Goddard i Baethgen, 2009). Així, els models globals segueixen sent limitats a l'hora de fer projeccions climàtiques a escales regionals. Igualment es reconeix que els AOGCM presenten limitacions per simular els fenòmens extrems (onades de calor, sequeres, pluges torrencials, etc.) principalment a causa de les parametritzacions i la baixa resolució que tenen, la qual és contradictòria amb el caràcter local de molts d'aquests fenòmens (Sánchez et al., 2004).

En efecte, els AOGCM no inclouen una bona descripció de l'orografia, ni tampoc una bona definició de la línia de costa, almenys al nivell que caldria per descriure el clima en àrees regionals com Europa, la Península Ibèrica (PI), o Catalunya. Òbviament, una solució a aquest problema seria incrementar la resolució en la qual treballen aquests models, però això està limitat per la potència de càlcul disponible (i per la pròpia estructura del codi informàtic, que no sempre és escalable). Hi ha alguns exemples d'intents d'augmentar la resolució d'un model global: al Japó, un model ha estat executat sobre malles de menys de 50 km en un ordinador especialment dissenyat, anomenat Earth Simulator (Ohfuchi et al., 2005); més a prop nostre, al Barcelona Supercomputing Center - Centro Nacional de Supercomputación s'ha estat treballant per augmentar la resolució d'un model global (Jiménez-Guerrero, 2007), concretament el model EC-Earth, un AOGCM construït sobre la base del model de predicció estacional del *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF).

Mentre els models d'abast global no puguin produir resultats sobre una malla d'alta resolució, serà necessària alguna tècnica de regionalització o de disminució d'escala ("downscaling"), és a dir, alguna metodologia per obtenir més detall espacial de les projeccions climàtiques. Bàsicament, hi ha dues tècniques de regionalització, anomenades dinàmica i estadística respectivament, encara que se n'utilitzen d'altres que són variacions o combinacions d'aquestes dues. Totes elles depenen dels resultats dels models globals, que són en realitat els que projecten l'evolució del clima cap al futur, mentre que aquestes

tècniques converteixen els resultats a una escala de més detall.

La regionalització dinàmica es basa en l'ús de models climàtics regionals (RCM) niats en models globals. Els RCM són, bàsicament, models de pronòstic meteorològic d'àrea limitada (mesoscala), els quals descriuen el comportament de l'atmosfera sobre una part de la Terra, emprant una malla força més fina que la dels models globals. S'executen de manera que les condicions de contorn venen donades pels resultats d'algun model global. Més detalls sobre els fonaments de la modelització climàtica regional es poden trobar, per exemple, a Gaertner (2009). L'article que constitueix la primera part d'aquest treball (Barrera-Escoda i Cunillera, 2011) presenta precisament l'aplicació d'una tècnica de regionalització dinàmica.

La tècnica de regionalització estadística consisteix en utilitzar regressions estadístiques multivariades entre les variables climàtiques en un punt concret del territori i els valors que s'obtenen en una o més cel·les d'un model global. Aquestes regressions s'obtenen relacionant primer valors mesurats en el passat (sèries històriques instrumentals) amb les sortides dels models globals quan simulen aquests temps passats. Una premissa bàsica d'aquesta tècnica és que la relació entre les variables climàtiques es mantindrà invariable fins i tot en un context de canvi climàtic. En alguns casos, les relacions no s'estableixen entre un punt i els valors en una cel·la, sinó entre un punt i algun índex que recull informació sinòptica. Aquests índexs sovint es refereixen al comportament d'algun patró sinòptic de baixa freqüència o de teleconnexió, com ara l'Oscil·lació de l'Atlàntic Nord (NAO) o El Niño (ENSO), entre d'altres. En altres casos (metodologies basades en anàlegs), les diferents situacions sinòptiques es redueixen a un subconjunt de situacions típiques, per a les quals es coneix el comportament a escala local. La regionalització estadística presenta diversos avantatges respecte a la dinàmica: pot produir projeccions per a punts concrets, i no requereix grans recursos de càlcul. Entre els inconvenients, a part del ja esmentat de l'estacionarietat de les relacions, hi ha el fet que cal disposar de sèries històriques prou llargues per establir aquestes relacions (Ribalaygua et al., 2009).

Així doncs, una determinada projecció climàtica d'abast regional serà el resultat de combinar: a) un escenari d'emissions; b) la sortida d'un model climàtic global forçat amb l'escenari d'emissions escollit; i c) una tècnica de regionalització. És evident doncs que el nombre de projeccions que es poden obtenir és molt elevat, cosa que justifica el present treball d'anàlisi dels estudis fins ara desenvolupats i de síntesi dels resultats que s'han publicat, sempre sobre l'àrea de Catalunya. També cal tenir present que cadascun dels passos esmentats introdueix incertesa en les projeccions regionals.

Com ja s'ha dit, el principal factor a l'hora d'intentar estimar quin pot ser el clima del futur és l'evolució de les concentracions de gasos amb efecte d'hivernacle (GEH) i dels aerosols d'origen antropogènic. Aquests factors afecten el clima de manera molt important i depenen gairebé exclu-

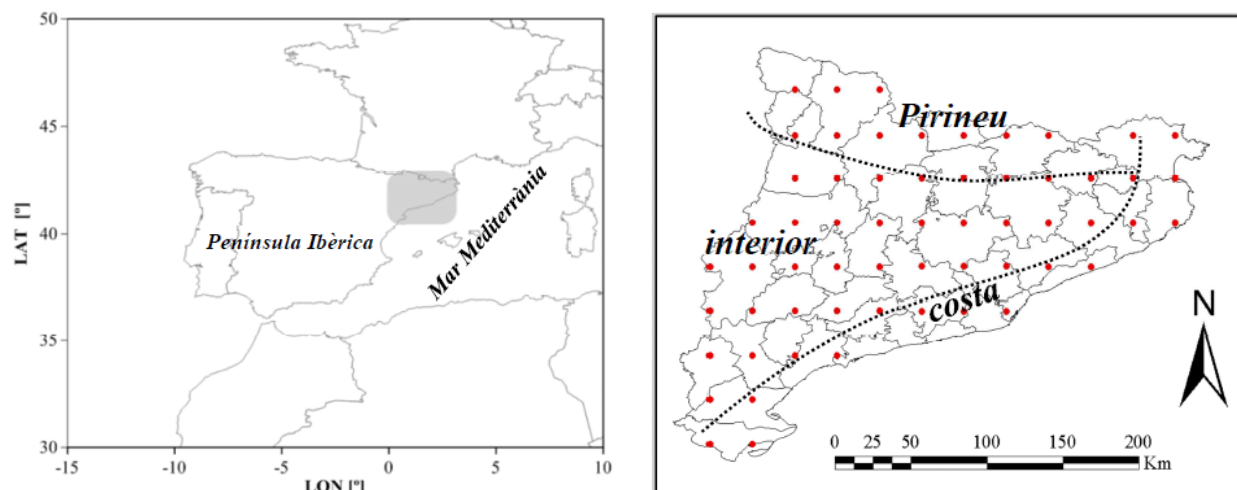


Figura 1. A l'esquerra, la zona ombrejada indica la situació de Catalunya respecte d'Europa, la Península Ibèrica, i el Mediterrani. A la dreta, es localitzen, sobre Catalunya, els centres de les cel·les utilitzades per analitzar els resultats proporcionats per les simulacions dels RCM del projecte ENSEMBLES. Així mateix, s'indiquen les tres zones en les quals s'ha dividit el territori de manera aproximada per sintetitzar les projeccions.

sivament d'aspectes econòmics, socials i tecnològics vinculats a l'espècie humana, aspectes que presenten una gran incertesa. Per tant, s'assumeixen diverses hipòtesis relatives a aquestes evolucions, obtenint els anomenats "escenaris" d'emissions. Els escenaris que s'han analitzat a l'AR4 provenen d'un informe (*Special Report on Emission Scenarios, SRES*) de Nakićenović et al. (2000), on es desenvolupen una quarantena d'evolucions futures, agrupades en quatre famílies, anomenades A1, A2, B1 i B2. Dins la família A1, s'hi inclouen els escenaris A1FI (en el qual les necessitats energètiques segueixen essent abastides bàsicament per combustibles fòssils) i A1B (en el qual es considera una diversitat de fonts i una millora de les tecnologies energètiques). Tots els escenaris previstos indiquen que les emissions de GEH seguiran creixent, almenys fins a meitat del segle XXI; concretament, de majors a menors emissions cap l'any 2050, els escenaris s'ordenen així: A1FI, A2, A1B, B2, B1. Malgrat que en alguns escenaris les emissions comencen a disminuir cap a mitjan segle, la concentració d'aquests gasos a l'atmosfera segueix augmentant durant algunes dècades més, atès que, per exemple, l'escala de temps per assolir un nou equilibri en la concentració de CO₂ és d'uns 200 anys.

Aquest article té com a objectiu proposar unes projeccions del clima futur a Catalunya (la seva situació dins Europa i la Península Ibèrica es mostra en la Figura 1), basades en resultats obtinguts en una gran diversitat d'investigacions prèvies. Primer es resumeixen els resultats que apareixen a l'AR4, a escala global i a escala continental. A continuació, es presenten diversos projectes i treballs encaminats a augmentar la resolució espacial de les projeccions: el projecte europeu PRUDENCE i alguns dels seus resultats; el recent informe elaborat per l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET); i una anàlisi pròpia efectuada en base a les

simulacions realitzades en el marc del projecte europeu ENSEMBLES. Finalment, tots els resultats presentats anteriorment, junt amb els que es presenten a l'article que constitueix la primera part d'aquest treball (Barrera-Escoda i Cunillera, 2011), que corresponen a una regionalització dinàmica realitzada pel Servei Meteorològic de Catalunya (SMC), se sintetitzen en dues taules que mostren rangs de variació futura de la temperatura i la precipitació en dues finestres temporals: a mitjans i finals del segle XXI.

Aquest treball, incloent aquest article i el de la primera part, resumeix, però també actualitza, el capítol 6 del recent *Segon informe del canvi climàtic a Catalunya* (Calbó et al., 2010), i reproduïx parcialment diverses publicacions recents que compten amb l'autoria o participació del primer autor (Calbó, 2009a; Calbó, 2009b; Calbó et al., 2009; Calbó, 2009c), en les quals es poden trobar alguns detalls addicionals.

2 Projeccions a escala global i continental: el que diu l'informe de l'IPCC

Totes les projeccions indiquen que se seguirà produint un augment de la temperatura mitjana del planeta. Cal destacar que per finals del segle XXI, i depenent de l'escenari d'emissions i dels models emprats, el rang d'augment de la temperatura mitjana global és d'1,1-6,4°C. Les millors estimacions (d'entre el conjunt de models) són, per a l'escenari de menys emissions (B1), d'1,8°C; i per al més pessimista (A1FI), de 4°C. Per a les properes dècades, tots els escenaris projecten augments molt similars: per exemple, per al 2040, al voltant d'1,2°C. L'augment de temperatura no serà uniforme al llarg de tota la Terra: l'augment serà més alt a les zones de latituds altes de l'hemisferi nord, i més baix

Taula 1. Variacions de temperatura (sempre positives) i de precipitació, per a finals del segle XXI (2071-2100) relatives a la mitjana del període 1961-1990, per a l'escenari A2, com a resultat dels models regionals emprats per PRUDENCE, per a la zona Nord d'Espanya. Els resultats són relatius a un augment de la temperatura global d'1°C (Christensen, 2005).

	Temperatura[°C]					Precipitació [%]				
	Any	DGF	MAM	JJA	SON	Any	DGF	MAM	JJA	SON
Mitjana	1,3	1,0	1,1	1,9	1,4	-5,7	+1,9	-8,6	-14,4	-5,2
Desv. Est.	0,4	0,3	0,4	0,5	0,4	+1,6	+2,0	+2,7	+4,2	+2,7
Mediana	1,3	1,0	1,0	1,8	1,3	-5,7	+1,9	-8,5	-13	-5,1
p95	2,0	1,6	1,8	2,7	2,0	-3,1	+5,2	-4,1	-7,4	-0,7
p5	0,7	0,4	0,5	1,1	0,7	-8,4	-1,4	-13,1	-21,4	-9,7

sobre els oceans, en particular sobre l'oceà Antàrtic (IPCC, 2007).

Pel que fa a la precipitació, la major part dels models indiquen un augment (en mitjana global), vinculat a un reforçament del cicle hidrològic. Atenent però a la major dispersió entre models i la major heterogeneïtat espacial i temporal dels canvis de precipitació (comparant amb els canvis de la temperatura), l'AR4 no dóna valors mitjans globals d'aquest augment de precipitació. A grans trets, el conjunt d'AOGCM donen augments de precipitació a la zona intertropical i latituds altes d'ambdós hemisferis (especialment durant els períodes hivernals corresponents), i disminucions a les àrees subtropicals.

El tercer apartat del Capítol 11 de l'AR4 (Christensen et al., 2007) es dedica a sintetitzar les projeccions climàtiques per a la regió Europa del Sud i el Mediterrani (àrea entre els paral·lels 30°N-48°N i els meridians 10°W-40°E). Els resultats es donen per a finals de segle (2080-2099) i corresponen a les simulacions efectuades amb 21 AOGCM inclosos en el Programa de diagnòstic i intercomparació de models climàtics (PCMDI), que donen lloc a l'anomenat “*multi-model data set*” (MMD). Les simulacions es van fer per a l'escenari A1B. Així doncs, per a aquesta àmplia regió dins la qual es troba Catalunya cal esperar (per a l'escenari A1B) un augment de temperatura mitjana de 3,5°C [3,0-4,0] (el primer valor és el de la mediana, i el rang entre claudàtors correspon al donat pels percentils 25 i 75). L'augment seria més marcat a l'estiu (4,1°C [3,7-5,0]) que no pas a l'hivern (2,6°C [2,5-3,3]).

En la mateixa publicació es presenten uns mapes que permeten fer una anàlisi més detallada. Per exemple, es pot observar que a la PI la temperatura mitjana anual podria augmentar entre 2,5 i poc més de 3,5°C. Aquesta és una estimació equivalent a la que es fa per al conjunt del globus i inferior a la de la resta d'Europa. Tot Catalunya es troba dins la línia que delimita un augment de 2,5-3°C. Estacionalment, el comportament és ben diferenciat. A l'hivern, el patró s'assembla al de l'any sencer, amb augments a la PI (i al Mediterrani en general) inferiors (2,5°C) als de l'Europa nord-oriental. En canvi, a l'estiu els augments de temperatura a la zona mediterrània són clarament superiors als de la resta del continent, assolint valors superiors als 4°C per bona part de la PI.

Pel que fa a la precipitació, i sempre segons Christensen et al. (2007) i per a la regió esmentada, cal esperar disminucions de la mitjana anual del 12% [9-16], disminució que serà més marcada a l'estiu (24% [14-35]) que no pas a l'hivern (6% [1-10]). Cal dir que la Mediterrània és de les poques regions, entre les considerades a l'AR4, on les estimacions de descens de la precipitació són unànimes entre la majoria de models globals i al llarg de totes les estacions de l'any. Ara bé, la variació projectada de la precipitació presentaria un marcat gradient latitudinal a la zona. Així, al sud de la Mediterrània (incloent-hi el sud de la PI) el descens podria ser superior al 20%. A Catalunya, s'esperarien disminucions de la precipitació d'un 10-15%, a escala anual. A l'estiu, el descens seria encara més notable a la PI (de més del 30%, arribant fins i tot al 50%); en canvi, a l'hivern bona part de la península es trobaria en una zona de poc canvi (entre 0 i -5%). Aquests valors poden servir de referència per a la resta de valors que s'aniran mostrant més endavant, però cal tenir present que la variabilitat de les precipitacions a la regió mediterrània és molt gran. Per tant, no ha d'estranyar que quan baixem més d'escala, trobem projeccions notablement diferents a aquesta referència.

3 Els resultats del projecte europeu PRUDENCE

Amb el rerefons d'intentar posar ordre en la generació d'escenaris climàtics regionals i organitzar la recerca en aquesta matèria a Europa, la Unió Europea va finançar, entre 2001 i 2004, el projecte PRUDENCE (“*Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects*”). Aquest projecte va involucrar més de 20 grups de recerca, amb l'objectiu de proporcionar escenaris climàtics d'alta resolució, per a Europa i per a finals del segle XXI, mitjançant regionalització dinàmica, i explorar les incerteses d'aquestes projeccions.

Els experiments duts a terme a PRUDENCE (Christensen, 2005; Déqué et al., 2005; <http://prudence.dmi.dk>) consistien en una simulació de “control” per a representar el període 1961-1990 i una altra simulació d'un escenari futur (2071-2100), ambdues efectuades amb diversos models climàtics regionals (10 RCM desenvolupats per institucions de 9 països europeus). La majoria de les simulacions es

varen fer per l'escenari A2, i utilitzant la sortida del model HadAM3H inicialitzat al seu torn amb les sortides del model global HadCM3 (per establir les condicions de contorn). També es varen fer altres simulacions amb l'escenari B2, i emprant altres models globals (ECHAM4/OPYC3). La zona d'anàlisi cobreix tots els països de l'Europa Occidental. Tots els models es varen executar amb resolucions a l'entorn dels 50 km.

A l'informe final del projecte (Christensen, 2005) es presenten uns valors que intenten resumir per països els resultats dels experiments. A partir d'aquesta informació s'ha elaborat la Taula 1, que correspon a la part nord d'Espanya (al nord del paral·lel 40°N). Malgrat que aquesta zona és la que conté Catalunya, també conté la costa cantàbrica que té un clima clarament diferent. Tal i com es fa en l'esmentat informe, els valors es donen relatius a un augment de temperatura global d'1°C. Això, que per a la temperatura pot semblar raonable, és una mica sorprenent per a la precipitació, que no respon linealment als augments de temperatura. Segons aquests resultats, però, podem dir que aquesta regió de la PI s'escalfarà més que la mitjana global, i més a l'estiu que no pas a l'hivern. La precipitació disminuirà en mitjana anual, a causa de descensos importants a l'estiu i primavera, menys importants a la tardor, i d'augment poc significatiu a l'hivern. Cal dir que totes aquestes projeccions són compatibles amb les que hem esmentat a la secció anterior, i que resultaven directament dels models globals.

El treball de revisió de Giorgi i Lionello (2008) també resumeix els resultats del projecte PRUDENCE, tot definint diverses regions dins el continent europeu. Per a la PI s'indica que el rang d'augment de la temperatura serà de 2,4-4,1°C a l'hivern i 4,1-7,6°C a l'estiu. Per a la precipitació, els rangs donats són petits augments a l'hivern (0,01-0,04 mm dia⁻¹) i disminucions importants a l'estiu (entre -0,13 i -0,80 mm dia⁻¹). Aquestes darreres quantitats, convertides a percentatge emprant uns valors aproximats de la precipitació mitjana a Catalunya, representen augments de menys del 2,5% a l'hivern i disminucions de fins al 50% a l'estiu.

També basant-se en PRUDENCE, Beniston et al. (2007) troben que tots els índexs relacionats amb les onades de calor (nombre, durada màxima, temperatura màxima, etc.) augmenten clarament a Catalunya (10-25% segons l'índex) a finals del segle XXI sota un escenari A2. Sánchez et al. (2004), utilitzant només un model i l'escenari A2, troben que les temperatures més extremes (el percentil 90 de les temperatures màximes) podrien pujar entre 5-7°C a l'estiu i al voltant de 3°C a l'hivern. Pel que fa a les temperatures mínimes més baixes (percentil 10) augmentarien uns 3°C a l'hivern i uns 4°C a l'estiu. Per la seva banda, Kjellström et al. (2007) troben també que les temperatures extremes (percentil 95 de les màximes i percentil 5 de les mínimes) augmentarien a la PI 6 i 3°C respectivament a l'estiu i a l'hivern (escenari A2). Per últim, Diffenbaugh et al. (2007) combinen la temperatura i la humitat relativa per definir un índex de calor, obtenint que per l'escenari A2 i a finals de segle, els dies en

què el valor d'aquest índex supera un cert llindar de perillositat passarien a ser més de 30 dies a l'any en algunes zones de la costa i el sud de Catalunya, quan en el clima actual no són més d'uns 10 dies per any. Gao et al. (2006) analitzen els canvis en la durada dels períodes sense precipitació i en les precipitacions intenses (definides a partir de la màxima precipitació acumulada en 5 dies consecutius, 5DP), a finals del segle XXI i per l'escenari A2. Segons els seus resultats, i pel que fa als períodes secs, aquests tendrien a allargar-se entre un 25-75% a la primavera i fins a més d'un 100% a l'estiu, i no canviarien de manera significativa a la tardor i l'hivern. Pel que fa a la 5DP, tendria a disminuir durant l'hivern i la primavera (entre un 10-25%) però a augmentar (fins un 50%) en el litoral a la tardor. Per la seva banda, Christensen i Christensen (2004) conclouen que malgrat el descens de les precipitacions totals, es podria esperar (A2, finals de segle) un cert augment en les precipitacions intenses. En canvi Beniston et al. (2007) indiquen que les precipitacions intenses disminuirien al sud d'Europa, tant a l'hivern com a l'estiu. Del treball de Sánchez et al. (2004) es pot derivar que hi hauria una clara disminució dels dies amb precipitacions intenses (disminució superior al 10% a l'hivern i al 25% a l'estiu).

També és adient destacar el treball de Gaertner et al. (2007) en què troben, a partir de l'anàlisi de resultats de models regionals inclosos en PRUDENCE i considerant l'escenari A2, indicis d'una possible formació, en el Mediterrani occidental, de borrasques amb característiques de ciclons tropicals per a finals de segle. Un altre treball (López-Moreno et al., 2008), avalua quina pot ser la precipitació al Pirineu cap a finals de segle i conclou que la importància de la neu en el cicle hidrològic disminuiria clarament, en part pels canvis de la precipitació (disminuiria un 5-10% a l'hivern en el Pirineu oriental) però sobretot a causa de l'augment de temperatura, que significaria una reducció de l'àrea on s'acumula neu, un avançament del període de fosa i la conseqüent disminució dels cabals durant la primavera.

Tots aquests treballs, i alguns altres publicats també en base als resultats del projecte PRUDENCE: Gibelin i Déqué (2003); Castro et al. (2005); Rowell (2005); Déqué et al. (2005, 2007); Rowell i Jones (2006); Petisco et al. (2006); i Tapiador et al. (2007), s'han tingut en compte en els valors de síntesi que es donen en la secció 6 del present article.

4 L'informe de l'AEMET

En el marc del "*Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático*" i concretament en el seu primer programa de treball, l'*Agencia Estatal de Meteorología* va ser designada per coordinar la tasca de generar uns escenaris climàtics detallats per a Espanya, de cara a l'avaluació dels possibles impactes. La primera fase d'aquesta tasca es va anar desenvolupant al llarg dels anys 2006 i 2007, i ha donat lloc a la publicació (Brunet et al., 2009) que aquí comentem.

L'aproximació que presenta l'esmentat informe es basa en l'ús de diverses tècniques de regionalització. Per una

Taula 2. Incrementos de temperatura mitjana ($^{\circ}\text{C}$) i variacions de la precipitació (anuals i estacionals, pel cas de finals del segle XXI), per a tres zones de Catalunya, per a l'escenari A2 i dos horitzons temporals, a partir dels resultats de diverses tècniques de regionalització (Brunet et al., 2009).

		2011-2040		2071-2100			
		Any	Any	Hivern (DJF)	Primavera (MAM)	Estiu (JJA)	Tardor (SON)
Increment temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Costa	0,2-1,3	3,5-5,0	2,5-3,5	3,0-4,0	5,0-6,5	3,5-5,0
	Interior	0,7-1,8	4-5,5,0	2,5-4,5	3,5-5,0	6,0-7,5	4,5-6,5
	Pirineu	0,7-1,8	4-5,5,0	2,5-4,5	3,0-5,0	6,5-7,5	5,0-6,0
Variació precipitació (%)	Costa	-10 , 0	-20 , -10	-10 , 0	-10 , 0	-40 , -20	-15 , -5
	Interior	-5 , +5	-15 , -5	-5 , +10	-15 , -5	-35 , -15	-15 , -5
	Pirineu	0 , +10	-5 , +5	+5 , +15	0 , +10	-15 , 0	-10 , 0

banda, s'analitzen directament els resultats dels models globals, utilitzant un mètode adequat per aquest propòsit, el de generació d'escenaris MAGICC-SCENGEN (Wigley et al., 2000). Per altra banda, s'utilitzen els resultats de tots els models regionals del projecte PRUDENCE, que s'analitzen a escala de la PI. Finalment, i com a novetat interessant per obtenir l'alta resolució espacial desitjada, s'empren tres tècniques de regionalització estadística. Dues d'elles són mètodes que incorporen el coneixement dinàmic de l'atmosfera (mètodes d'anàlegs), mentre que la tercera és un mètode purament empíric. Concretament, són els mètodes d'anàlegs FIC (*Fundación para la Investigación del Clima*, Ribalaygua et al., 2009); d'anàlegs INM (aplicat pel propi *Instituto Nacional de Meteorología*); i el SDSM (*Statistical DownScaling Method*) que és una regressió lineal múltiple.

Diverses taules i figures de l'esmentat informe presenten els resultats. D'una inspecció detallada de les figures hem pogut construir la Taula 2, on es distingeixen les projeccions en tres àrees geogràfiques, que hem anomenat costa (o litoral), interior i muntanya (Pirineu). Aquestes no són àrees definides de manera exacta, però la seva configuració aproximada es mostra en la Figura 1. En tots els casos es donen rangs de valors, ja que provenen dels mapes generats amb les diverses tècniques i inclouen també la variabilitat espacial que hi ha dins de les àrees definides. Per altra banda, també s'inclouen a la taula els rangs esperats d'augment de temperatura a nivell estacional (només per a l'horitzó llunyà de finals del segle XXI). Cal dir que en aquest cas, l'augment donat correspon a la temperatura màxima. En realitat, dels resultats de l'informe es desprèn que els increments de temperatures màximes i mínimes són semblants als de la mitjana; si de cas, una mica més alts ($0,2-0,4^{\circ}\text{C}$) els de les màximes. A diferència del cas de les temperatures, l'acord entre els diferents resultats per a la precipitació és difícil d'assolir, ja que els valors que es troben presenten una gran dispersió. En particular, els resultats provinents de PRUDENCE (forçats amb HadAM3H) presenten disminucions més importants de la precipitació que la resta pel que fa a l'estiu, i menys importants per a la tardor. O el cas de la metodologia d'anàlegs de l'INM, que forçada amb el mateix HadAM3 tendeix a donar

augments de precipitació en la meitat freda de l'any, per a la zona de Catalunya.

5 Resultats per a Catalunya a partir del projecte europeu ENSEMBLES

El projecte ENSEMBLES (Hewitt, 2005; Van der Linden i Mitchell, 2009: www.ensembles-eu.org), finançat entre 2004 i 2009 per la Unió Europea, volia desenvolupar un sistema de predicció pel canvi climàtic a partir de conjunts de simulacions, i en base als principals models regionals d'alta resolució desenvolupats a Europa, per produir una estimació probabilística de la incertesa del clima futur en escales que anirien de les estacionals a les decennals. L'objectiu final del projecte era fitar les incerteses de les prediccions seculares de canvi climàtic mitjançant la integració amb diferents escenaris d'emissió, diferents models globals, diferents models regionals i també diferents tècniques estadístiques de regionalització.

Les dades de les simulacions realitzades en el marc del projecte ENSEMBLES es poden descarregar des de la seva pàgina web, i el treball que tot seguit presentem s'ha fet a partir de les simulacions de cinc RCM disponibles, totes en base a l'escenari A1B i prenent com a condicions de contorn les sortides dels models globals HadCM3 i ECHAM5, i amb una resolució espacial de 25 km, convertida a retícules regulars de $0,25^{\circ}$. Concretament, s'han emprat els resultats dels següents models i casos:

- REMO (ECHAM5-r3), Max-Planck Institut, Alemanya.
- PROMES (HadCM3Q0), Universidad de Castilla La Mancha, Espanya.
- HadRM3Q0 (HadCM3Q0), Hadley Centre, Anglaterra.
- RegCM (ECHAM5-r3), International Centre for Theoretical Physics, Itàlia.
- DMI-HIRLAM5 (ECHAM5-r3), Danish Meteorological Institute, Dinamarca.

Totes les simulacions estan disponibles per al període 1951-2100, excepte les del model PROMES, limitades al 1951-2050.

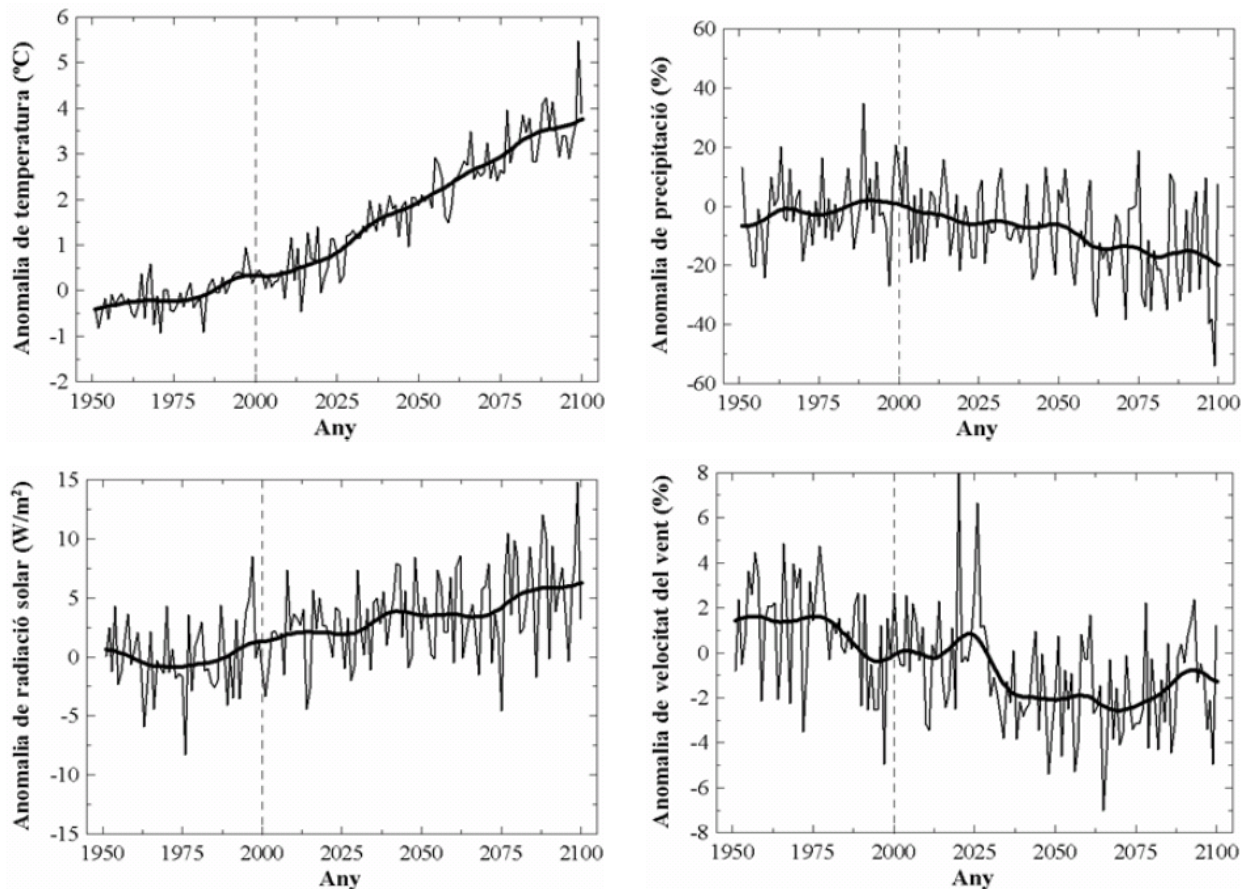


Figura 2. Evolució temporal (1951-2100) de les sèries mitjanes anuals de diferents variables climàtiques obtingudes emprant cinc simulacions de RCM del projecte ENSEMBLES per a Catalunya: (a, esquerra superior) temperatura mitjana (°C); (b, dreta superior) precipitació (%); (c, esquerra inferior) radiació solar ($W\ m^{-2}$); (d, dreta inferior) velocitat del vent (%). El període de referència és el 1971-2000. Les línies gruixudes representen l'evolució suavitzada amb filtres gaussians passa-baixos de 31 anys.

Per a cadascun dels models seleccionats s'han descarregat, a resolució mensual, les següents variables: temperatura mitjana (°C), precipitació (mm), radiació solar (irradiància, $W\ m^{-2}$) i velocitat del vent ($m\ s^{-1}$). De tota la malla disponible per a Europa, s'han seleccionat per a les posteriors anàlisis totes aquelles cel·les que tenen el seu centroid sobre territori de Catalunya. En total hi ha 59 cel·les que compleixen el criteri esmentat (Figura 1).

Per obtenir les sèries conjuntes de Catalunya per a cada variable climàtica en el període 1951-2100, s'han calculat les sèries mitjanes a resolució anual, així com per a l'hivern (desembre, gener i febrer) i l'estiu (juny, juliol i agost) de cadascun dels models. Les esmentades sèries s'han convertit en anomalies (en % per a les precipitacions i velocitat del vent) respecte al període de referència 1971-2000, i finalment s'ha calculat la sèrie mitjana com el valor mitjà de les sèries d'anomalies de tots els models. Per suavitzar la representació temporal de les sèries i millorar la visualització de la seva variabilitat interdecennal, s'ha aplicat un filtre gaussià passa-baixos de 31 anys. Igualment, s'han calculat les tendències lineals per al període 2001-2100, i s'ha

avaluat la seva significació ($\alpha \leq 0,05$) a partir del test no paramètric de Mann-Kendall.

La Figura 2 mostra l'evolució temporal de les variables seleccionades durant el període 1951-2100. En les temperatures mitjanes anuals (Figura 2a) s'observa un augment constant durant tot el segle XXI, mostrant un augment significatiu de $0,40^{\circ}C$ per dècada. Les tendències també són significatives a nivell estacional, presentant una major taxa d'augment l'estació estival ($0,52^{\circ}C\ dècada^{-1}$) que la hivernal ($0,33^{\circ}C\ dècada^{-1}$). En tot cas, l'evolució temporal de les temperatures simulades durant el període 1951-2000 no mostra el descens o estabilització que es produeix, segons les mesures, entre 1950 i principis de 1970 (SMC, 2011).

Les precipitacions mitjanes anuals simulades (Figura 2b) mostren un descens progressiu durant el període analitzat, encara que amb un descens més acusat durant les últimes dècades del segle XXI. En conjunt, la sèrie mostra un descens significatiu de $-1,8\%$ per dècada a resolució anual. A nivell estacional es troba una clara estacionalitat de les mateixes, en presentar un clar descens significatiu l'estiu ($-5,1\%$ per dècada) i una tendència no significativa a l'hivern.

Taula 3. Resum de les projeccions dels cinc RCM seleccionats del projecte ENSEMBLES, mostrant els canvis entre les mitjanes de tot Catalunya de diferents variables climàtiques per als períodes 2021-2050 i 2071-2100 respecte al període de referència 1971-2000.

	2021-2050			2071-2100		
	Any	Hivern	Estiu	Any	Hivern	Estiu
Temperatura (°C)	+1,35	+1,20	+1,73	+3,36	+2,69	+4,44
Precipitació (%)	-5,68	-6,45	-6,87	-16,08	-1,20	-30,12
Radiació solar (W m ⁻²)	+2,89	+1,48	+1,64	+5,47	-2,04	+7,52
Velocitat del vent (%)	-1,67	-1,97	-1,51	-2,41	-1,92	-1,57

La radiació solar (Figura 2c) presenta una tendència positiva durant el segle XXI, encara que es poden apreciar dos períodes de clar augment durant les tres primeres i últimes dècades. En conjunt per al període 2001-2100, la tendència és positiva i significativa amb un 0,5 W m⁻² per dècada. Respecte a la velocitat del vent, es constata un descens durant el segle XXI a resolució anual (Figura 2d), encara que durant el primer quart de segle s'aprecia un període d'estabilització seguit d'un brusc descens fins a principis de la dècada de 2040. Després existeix una lleugera tendència negativa, per finalitzar amb un repunt durant les últimes dues dècades del segle. La tendència és negativa i significativa, amb un valor de -0,2% per dècada.

A la Taula 3 es resumeixen les anomalies mitjanes registrades en el conjunt de Catalunya, per a les variables i RCM seleccionats, i en els períodes 2021-2050 i 2071-2100 respecte al període de referència 1971-2000. Els resultats constaten el que ja s'ha apuntat anteriorment, amb un augment d'1,2°C i 3,4°C en les temperatures mitjanes anuals per al primer i segon període, respectivament, sent més gran l'augment a l'estació estival que a la hivernal. Respecte a les precipitacions, s'observa un descens aproximat del -6% per al 2021-2050, tant a nivell anual com estacional. En canvi, a finals del segle XXI sembla que la taxa de descens anual s'aguditza (-16%), encara que concentrant-se la disminució a l'estiu (-30%), mentre que les precipitacions hivernals es recuperen fins a nivells pròxims al període 1971-2000.

A la Figura 3 es mostren els mapes amb els canvis previstos de la precipitació a Catalunya, a partir de les anomalies obtingudes a cada un dels punts de malla, en els períodes 2021-2050 i 2071-2100. S'aprecia un descens generalitzat de la precipitació a resolució anual per al període 2021-2050. Tot i així, als sectors més meridionals de Catalunya es detecten lleugers augments, fet que es repeteix tant a l'hivern com a l'estiu. Les estimacions per al 2071-2100 mostren un major descens generalitzat a totes les comarques catalanes, amb màxims que ronden el -20% en sectors del Prepirineu. En canvi durant l'hivern s'aprecia com la major part del territori no mostra canvis importants, i fins i tot ronden augments d'aproximadament un 4% a la Plana de Lleida, l'Empordà i el Pirineu Oriental. En canvi, per a l'estiu les simulacions pronostiquen un descens generalitzat de les precipitacions sobre el territori de Catalunya, presentant descensos que superen el -30%

en àrees de l'interior compreses principalment per les comarques del Solsonès i la Segarra, així com per àrees nord-orientals del Maresme, la Selva, el Gironès i el Pla de l'Estany. Els descensos menors es concentren en els sectors del Pirineu, així com punts meridionals de les Terres de l'Ebre, on s'obtenen les anomalies mínimes per a tot Catalunya, que malgrat tot, són també importants (-21%).

6 Conclusions

En aquest apartat hem intentat resumir totes les projeccions fins ara comentades en els apartats anteriors, per tal de donar, per a Catalunya i fins i tot amb una certa distinció entre àrees geogràfiques (costa, interior, Pirineu), uns rangs de variació de la temperatura i la precipitació que podem considerar probables en base als coneixements actuals, a les tècniques de modelització i regionalització utilitzades pels investigadors, i als escenaris considerats.

Així, a la Taula 4 hem inclòs el resum corresponent a les projeccions per a finals del segle XXI, que són les que disposen de més treballs originals publicats. Cal tenir present que els valors de la taula no són el resultat d'una síntesi efectuada amb una metodologia estadística o numèrica específica, sinó que surten d'una integració més aviat qualitativa de les diverses projeccions, obtingudes per diverses escales i amb diverses metodologies. Entre les dificultats trobades a l'hora de confeccionar aquesta taula hi ha el fet que els diversos resultats presentats anteriorment donen els canvis relatius a períodes lleugerament diferents (1971-2000, 1980-1999 o 1961-1990).

Com es pot veure, es donen els rangs esperats d'augment de temperatura i de variació de la precipitació, corresponents a l'escenari A2. S'ha escollit aquest escenari perquè és un dels que projecta unes emissions de GEH més elevades. A més, per a aquest escenari es troben moltes més projeccions que per a tots els altres. Per elaborar els valors de la Taula 4 s'han tingut en compte també els resultats de les modelitzacions regionals que ha dut a terme el SMC, corresponents al període de finals de segle i per a l'escenari A2 (Barrera-Escoda i Cunillera, 2011). Pel que fa als resultats d'ENSEMBLES (recordem, amb l'escenari A1B) les projeccions dels canvis de la precipitació són força semblants a les de la Taula 4, és a dir, queden dins o molt properes als rangs que es mostren; en canvi, els augments de temperatura que

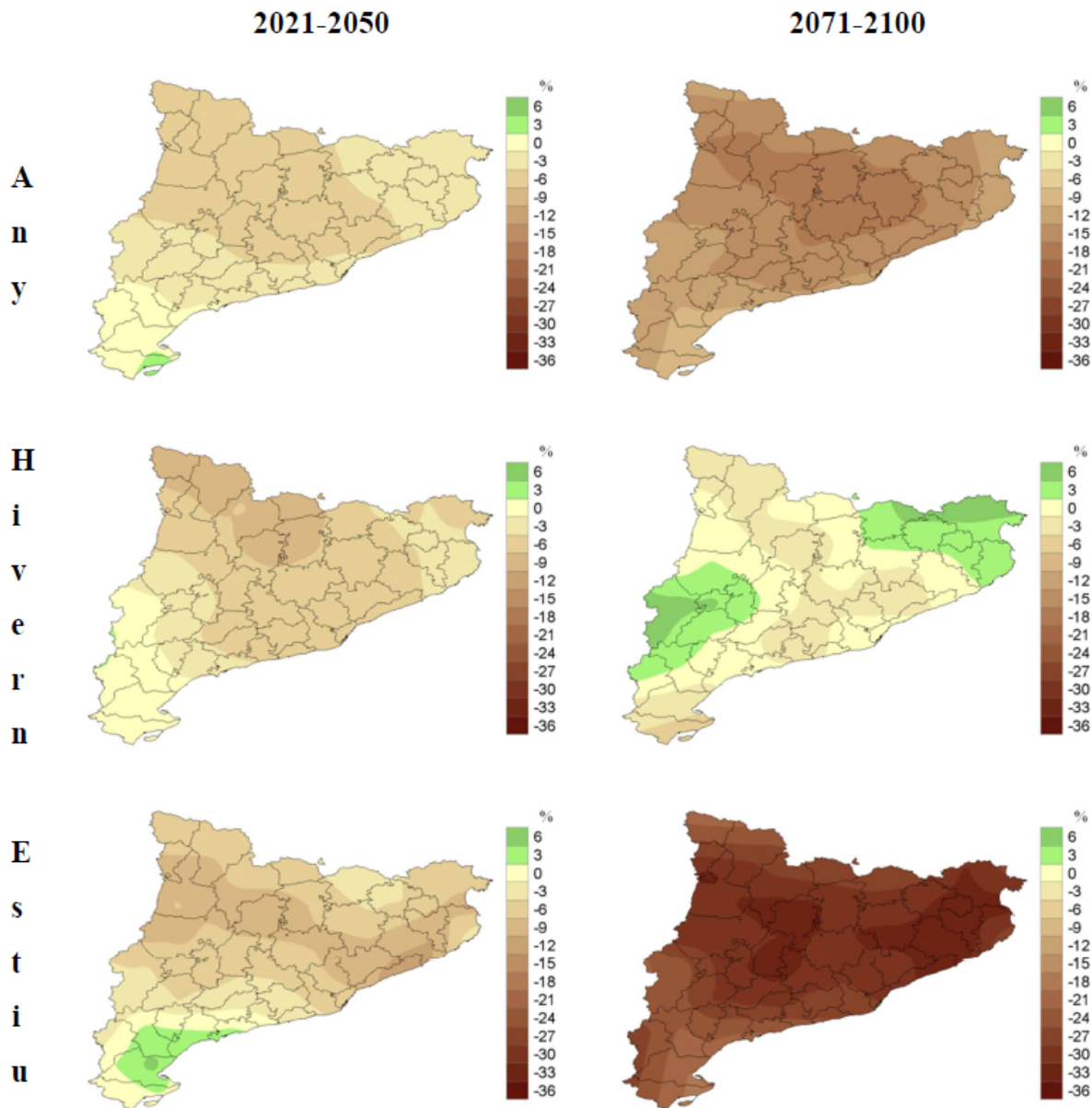


Figura 3. Canvis de la precipitació (%) anual (dalt), hivernal (enmig) i estival (baix) a Catalunya a partir de les simulacions seleccionades del projecte ENSEMBLES a 25 km de resolució, per a l’escenari d’emissions A1B, i per als períodes 2021-2050 (esquerra) i 2071-2100 (dreta). Període de referència 1971-2000.

suggereixen els resultats d’aquest projecte són inferiors, però mostren la mateixa diferenciació estacional.

En resum, observem que la temperatura mitjana a Catalunya podria pujar entre 4-5,5°C a finals de segle, essent aquest augment molt més important a l’estiu al Pirineu i comarques interiors (fins a 7°C), i més moderat a l’hivern per a zones costaneres (a l’entorn de 3°C). Pel que fa a la precipitació, per al conjunt de Catalunya i en mitjana anual, podria disminuir entre 5-15%, essent l’estiu l’estació que patiria descensos més importants de precipitació (fins a un 40% menys de precipitació en alguna àrea costanera). Afor-

tunadament, a la zona del Pirineu, i en estacions més plujoses (tardor) els descensos serien una mica més moderats, semblants als de la mitjana anual. En general, les diverses projeccions indiquen la possibilitat d’un lleuger augment de la precipitació durant l’hivern.

Es pot atorgar un cert grau de confiança als valors presentats a la Taula 4, ja que provenen de moltes anàlisis diferents, efectuades per diferents autors. És cert que la majoria d’aquests treballs es basen en les simulacions del projecte PRUDENCE, que malgrat utilitzar diversos models regionals, els executa amb condicions de contorn donades per

Taula 4. Augments de temperatura (línia superior, en °C) i canvis en la precipitació (línia inferior, en %), estimats a partir de diversos treballs i documents revisats. Canvis projectats (es donen rangs de valors) per a finals del segle XXI, respecte dels valors de finals del segle XX.

	Escenari A2, període 2071-2100				
	Hivern	Primavera	Estiu	Tardor	Any
Costa	2,5;3,5 -10;0	3,0;4,0 -15;0	5,0;6,5 -40;-20	3,5;5,0 -20;-5	3,5;5,0 -20;-5
Interior	2,5;4,0 +5;+10	3,5;5,0 -15;-5	6,0;7,0 -35;-15	4,5;6,5 -20;-5	4,0;5,5 -15;-5
Pirineu	2,5;4,0 0;+15	3,0;4,5 -5;+10	6,5;7,5 -25;0	5,0;6,0 -15;0	4,0;5,5 -10;+5
Catalunya	2,5;4,0 -5;+10	3,0;4,5 -10;0	5,5;7,0 -30;-10	4,0;5,5 -15;-5	4,0;5,5 -15;-5

Taula 5. Augments de temperatura mitjana (línia superior, en °C) i canvis en la precipitació mitjana (línia inferior, en %), estimats a partir de diversos treballs i documents revisats. Canvis projectats per a mitjans del segle XXI.

	Diversos escenaris, meitat de segle				
	Hivern	Primavera	Estiu	Tardor	Any
Costa	1,0;1,6 -5;+15	- -10;+5	1,3;1,9 -40;+30	- -5;+20	0,8;1,6 -5;+10
Interior	1,0;1,6 -5;+15	- -10;0	1,6;2,2 -50;+20	- -10;+20	1,4;2,2 -15;+5
Pirineu	1,3;1,9 -5;+5	- -20;-5	1,6;2,2 -25;+20	- -10;+20	1,4;2,2 -20;-5
Catalunya	1,1;1,9 -5;+5	0,9;1,7 -10;-5	1,3;2,3 -30;+20	1,3;1,9 -5;+10	1,2;1,9 -5;0

tan sols dos models globals. Ara bé, alguns treballs independents de PRUDENCE (per exemple el resum per la regió mediterrània inclòs a l'AR4 de l'IPCC i les simulacions dutes a terme per l'SMC) semblen avalar la validesa d'aquests valors.

Per a altres escenaris i per a altres horitzons temporals, les projeccions es fan més difícils, ja que, com hem vist, existeixen menys treballs publicats que s'hi refereixen. Ara bé, també és cert que la majoria d'escenaris comencen a distingir-se, pel que fa a les emissions, cap allà el 2030. Dit d'una altra manera, el canvi que es pot esperar per les properes dècades (posem des del present fins a meitat de segle) hauria de ser gairebé independent de les tendències que finalment prenguin les emissions de GEH. Per això, encara que sigui en base a menys treballs, també proposem una taula resum de les projeccions climàtiques en un horitzó temporal més proper.

Concretament, per mitjans de segle, hem resumit els resultats de les simulacions analitzades del projecte ENSEMBLES (recordem, diversos models regionals, per a l'escenari

A1B i per al període 2021-2050) amb els resultats obtinguts per l'SMC amb un model regional, dos escenaris (A2 i B1) i el període 2041-2070 (veure Barrera-Escoda i Cunillera, 2011). Aquesta diversitat de models, escenaris, i períodes, permeten pensar que el resum de la Taula 5 conté força incertesa (per això alguns rangs són força grans) però malgrat tot, indica els trets principals del canvi que podem esperar a meitat del present segle XXI. L'augment de temperatura podria ser al voltant dels 1,5°C, i, com en els altres horitzons, més elevat a l'interior i Pirineu que no pas a la costa, i més alt a l'estiu que no a l'hivern i primavera. La precipitació mitjana anual a Catalunya podria variar molt poc respecte a l'actual, com a resultat de possibles augments en algunes àrees (costa) i descensos en d'altres (Pirineu). Estacionalment, els resultats són poc significatius, en el sentit que les diverses metodologies i escenaris donen resultats fins i tot contradictoris. Així, a la tardor, i sobretot a l'estiu, l'escenari A2 dona descensos clars de la precipitació, mentre que el B1 indica ascensos de la mateixa. L'escenari A1B (resultats d'ENSEMBLES) queda a mig camí, amb descensos mo-

derats. A l'hivern, la majoria de resultats indiquen canvis menors, mentre que la primavera és l'estació en què el descens de la precipitació es mostra de forma més consistent.

Sigui com sigui, ja ha quedat dit que les projeccions climàtiques no estan pas exemptes d'incertesa degut a diversos factors. També s'ha esmentat que alguns d'aquests factors tenen a veure amb el desconeixement de les dades i informació necessària, mentre que d'altres estan associats a una comprensió limitada del funcionament d'alguns components del sistema climàtic, que afecten d'una manera especialment important a les projeccions de les precipitacions futures. Per tant, és clar, tal i com diu l'AR4, que les projeccions climàtiques i els seus impactes, sobretot si anem més enllà del 2050, depenen molt de l'escenari i del model escollit. Per exemple, de cara al nou informe de l'IPCC, s'està treballant en una nova definició d'escenaris, que n'inclourà de mig (2035) i llarg termini (2100), i que considerarà les conseqüències de les accions de mitigació i adaptació sobre la pròpia evolució dels forçaments radiatius. Per això els rangs d'augment de temperatura (i encara més en la precipitació) que es donen en el present article són força grans. Donant la volta a l'argument, però, podem assenyalar que les projeccions per les properes 2-4 dècades són força més robustes, gairebé independents de l'escenari d'emissions i menys dependents de la representació de les retroaccions, ja que aquestes darreres acostumen a tenir efecte sobre escales temporals més llargues.

Agraïments. Aquest treball ha estat desenvolupat en el marc del Segon informe del canvi climàtic a Catalunya, promogut pel Consell assessor per al desenvolupament sostenible (CADS) i el Servei Meteorològic de Catalunya, ambdues institucions de la Generalitat de Catalunya, a qui s'agraeix el seu suport. El segon autor gaudeix d'una beca postdoctoral finançada pel Comissionat per a Universitats i Recerca del Departament d'Innovació, Universitats i Empresa de la Generalitat de Catalunya (2009 BP-A00035).

Referències

- Barrera-Escoda, A. i Cunillera, J., 2011: *Climate change projections for Catalonia (NE Iberian Peninsula). Part I: Regional climate modeling*, Tethys, **8**, 77–89, doi: 10.3369/tethys.2011.8.08.
- Beniston, M., Stephenson, D. B., Christensen, O. B., Ferro, C. A. T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T., i Woth, K., 2007: *Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections*, Clim Change, **81**, 71–95, doi: 10.1007/s10584-006-9226-z.
- Brunet, M., Casado, M. J., de Castro, M., Galán, P., López, J. A., Martín, J. M., Pasto, 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, Madrid, pp. 165.
- Calbó, J., 2009a: Projeccions globals: el 4t informe del GIECC. Aigua i canvi climàtic. Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya, Agència Catalana de l'Aigua, Departament de Medi Ambient i Habitatge, Generalitat de Catalunya, Barcelona, pp. 73-81.
- Calbó, J., 2009b: Projeccions regionals; d'Europa a la península Ibèrica. Aigua i canvi climàtic. Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya, Agència Catalana de l'Aigua, Departament de Medi Ambient i Habitatge, Generalitat de Catalunya, Barcelona, pp. 83-90.
- Calbó, J., 2009c: Possible Climate Change Scenarios with Specific Reference to Mediterranean Regions, S. Sabater and D. Barceló (Eds.), Water Scarcity in the Mediterranean: Perspectives Under Global Change, Handbook of Environmental Chemistry, Springer-Verlag, doi: 10.1007/698_2009_28.
- Calbó, J., Cunillera, J., Llasat, M. C., Llebot, J. E., i Martín-Vide, J., 2009: Projeccions climàtiques per a Catalunya. Aigua i canvi climàtic. Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya, Agència Catalana de l'Aigua, Departament de Medi Ambient i Habitatge, Generalitat de Catalunya, Barcelona, pp. 91-99.
- Calbó, J., Sanchez-Lorenzo, A., Cunillera, J., i Barrera-Escoda, A., 2010: Projeccions i Escenaris futurs. 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.
- Castro, M. D., Martín-Vide, J., i Alonso, S., 2005: El clima de España: pasado, presente y escenarios para el siglo XXI, Impactos del Cambio Climático en España.
- Christensen, J. H., 2005: Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects (PRUDENCE) Final Report, J. H. Christensen coord., 269 pp.
- Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R. K., Kwon, W. T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C. G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A., i Whetton, P., 2007: Regional Climate Projections, Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., and Miller, H. L. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge (UK), climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Christensen, O. B. i Christensen, J. H., 2004: *Intensification of extreme European summer precipitation in a warmer climate*, Glob Planet Change, **44**, 107–117, doi: 10.1016/j.gloplacha.2004.06.013.
- Déqué, M., Jones, R. G., Wild, M., Giorgi, F., Christensen, J. H., Hassell, D. C., Vidale, P. L., Rockel, B., Jacob, D., Kjellström, E., De Castro, M., Kucharski, F., i van den 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/s00382-005-0052-1.
- Déqué, M., Rowel, D. P., Lüthi, D., Giorgi, F., Christensen, J. H., Rockel, B., Jacob, D., Kjellström, E., De Castro, M., i van den Hurk, B., 2007: *An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections*, Clim Change, **81**, 53–70, doi: 10.1007/s10584-006-9228-x.
- Diffenbaugh, N. S., Pal, J. S., Giorgi, F., i Gao, X., 2007: *Heat stress intensification in the Mediterranean climate change hotspot*, Geophys Res Lett, **34**, L11 706, doi: 10.1029/2007GL030 000.
- Gaertner, M. A., 2009: Técnicas y aplicaciones de regionalización dinámica, Brunet, M., Sigró, J., Aguilar, E. (Eds.). Observed and modelled regional climate change. Asociación Española de Climatología.
- Gaertner, M. A., Jacob, D., Domínguez, M., Padorno, E., Sánchez,

- E., i De Castro, M., 2007: *Tropical cyclones over the Mediterranean Sea in climate change simulations*, Geophys Res Lett, **34**, L14 711, doi: 10.1029/2007GL029 977.
- Gao, X., Pal, J. S., i Giorgi, F., 2006: *Projected changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean region from a high resolution double nested RCM simulation*, Geophys Res Lett, **33**, L03 706, doi:10.1029/2005GL024 954.
- Gibelin, A. L. i Déqué, E. M., 2003: *Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model*, Clim Dyn, **20**, 327–339, doi: 10.1007/s00 382–002–0277–1.
- Giorgi, F. i Lionello, P., 2008: *Climate change projections for the Mediterranean region*, Glob Planet Change, **63**, 90–104, doi: 10.1016/j.gloplacha.2007.09.005.
- Goddard, L. i Baethgen, W., 2009: *The urgent need for improved climate models and predictions*, EOS Transactions AGU, **90**, 343, doi: 10.1029/2009EO390 004.
- Hewitt, 2005: *The ENSEMBLES Project - Providing ensemble-based predictions of climate changes and their impacts*, The EGGS, EGU newsletter, **13**, 22–25.
- IPCC, 2007: *Climate change 2007: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., and Miller, H. L. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge (UK) and New York (USA), 996 pp.
- Jiménez-Guerrero, P., 2007: *Application of climate models within supercomputing frameworks*, Teraflap, **94**, p. 3.
- Kjellström, E., Bäring, L., Jacob, D., Jones, R., Lenderink, G., i Schär, C., 2007: *Modelling daily temperature extremes: recent climate and future changes over Europe*, Clim Change, **81**, 249–265, doi: 10.1007/s10 584–006–9220–5.
- López-Moreno, J. I., Beniston, M., i García-Ruiz, J. M., 2008: *Environmental change and water management in the Pyrenees: Facts and future perspectives for Mediterranean mountains*, Glob Planet Change, **61**, 300–312, doi: 10.1016/j.gloplacha.2007.10.004.
- McGuffie, K. i Henderson-Sellers, A., 1990: *Introducción a los modelos climáticos*, Editorial Omega, Barcelona, 246 pp.
- Nakićenović, N., Swart, R., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grubler, 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 (SRES)*, Cambridge University Press, Cambridge (UK), 570 pp.
- Ohfuchi, W., Sasaki, H., Masumoto, Y., i Nakamura, H., 2005: *Mesoscale Resolving Simulations of the Global Atmosphere and Ocean on the Earth Simulator*, EOS Transactions AGU, **86**, 45, doi: 10.1029/2005EO050 002.
- Petisco, E., Martín, J. M., i Alonso, J., 2006: *Escenarios de temperatura y precipitación para la España Peninsular y Baleares durante el período 2001-2100 basados en “Downscaling” estadístico mediante métodos de análogos*, Proceedings XXIX Jornadas Científicas de la AME, Pamplona.
- Randall, D. A., Wood, R. A., Bony, S., Colman, R., Fichet, T., Fyfe, J., Kattsov, V., Pitman, A., Shukla, J., Srinivasan, J., Stouffer, R. J., Sumi, A., i Taylor, K. E., 2007: *Climate Models and Their Evaluation*, Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. and Miller, H.L. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge (UK) and New York (USA), climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Ribalaygua, J., Torres, L., i del Carre, M., 2009: *El método de análogos en el downscaling estadístico*, Brunet, M., Sigró, J., Aguilar, E. (Eds.). *Observed and modelled regional climate change*. Asociación Española de Climatología, pp. 41-48.
- Rowell, D. P., 2005: *A scenario of European climate change for the late twenty-first century: seasonal means and interannual variability*, Clim Dyn, **25**, 837–849, doi: 10.1007/s00 382–005–0068–6.
- Rowell, D. P. i Jones, R. G., 2006: *Causes and uncertainty of future summer drying over Europe*, Clim Dyn, **27**, 281–299, doi: 10.1007/s00 382–006–0125–9.
- Sánchez, E., Gallardo, C., Gaertner, M. A., Arribas, A., i De Castro, M., 2004: *Future climate extreme events in the Mediterranean simulated by a regional climate model: a first approach*, Glob Planet Change, **44**, 163–180, doi: 10.1016/j.gloplacha.2004.06.010.
- SMC, 2011: *Butlletí anual d’indicadors climàtics 2010*, Servei Meteorològic de Catalunya, Departament de Territori i Sostenibilitat, Generalitat de Catalunya, Barcelona, 60 pp.
- Tapiador, F. J., Sánchez, E., i Gaertner, M. A., 2007: *Regional changes in precipitation in Europe under an increased greenhouse emissions scenario*, Geophys Res Lett, **34**, L06 701, doi: 10.1029/2006GL029 035.
- Van der Linden, P. i Mitchell, J. F. B., 2009: *ENSEMBLES. Climate change and its impacts at seasonal, decadal and centennial timescales*, Met Office Hadley Centre, Exeter (UK), 160 pp.
- Wigley, T. M. L., Raper, S. C. B., Hulme, M., i Smith, S., 2000: *The MAGICC/SCENGEN Climate Scenario Generator: Version 2.4*, Technical Manual, Climatic Research Unit, UEA, Norwich (UK), 48 pp.