



La realitat del canvi climàtic



Ramon COPONS i LLORENS, Laura TRAPERO i BAGUÉ, Marc PONS i PONS

Resum

El canvi climàtic és una realitat coneguda per tothom. El que seria convenient és conèixer la magnitud d'aquest canvi a casa nostra. En el present document es fa una síntesi dels canvis climàtics esdevinguts als Pirineus i, en concret, a Andorra. Primer, s'explica els canvis climàtics passats que han esdevingut en els últims milers d'anys als Pirineus. Posteriorment, es mostra com és el canvi climàtic actual des d'una òptica pirinenca a partir del resultat de l'acció *Clima projecte Observatori pirinenc del canvi climàtic* (OPCC) finançat pel programa Poctefa 2007-2013 (EFA056/15). Finalment, es detalla la realitat del canvi climàtic recent a Andorra, en concret a partir de l'anàlisi de les tendències de temperatura i precipitació entre 1950 i 2010 que el CENMA-IEA ha fet mitjançant les sèries meteorològiques de FEDA. Els treballs mostren, d'una banda, que el clima no ha estat invariable al llarg dels darrers milers d'anys i, d'altra banda, que avui en dia a Andorra també es detecta clarament l'empremta del canvi climàtic antropogènic. Des del 1950 s'ha quantificat una tendència a l'augment de les temperatures que va acompanyada d'una certa disminució de les precipitacions.

Introducció

El Centre d'Estudis de la Neu i de la Muntanya d'Andorra (Cenma) és un dels tres centres que integren l'Institut d'Estudis Andorrans (IEA). El Cenma-IEA s'ocupa de l'estudi del medi natural d'Andorra i de la difusió dels resultats a nivell social i científic.

Des de l'any 2008, el Cenma-IEA estudia el clima d'Andorra i, en especial, el canvi climàtic. Un dels primers treballs va ser el control de qualitat i l'homogeneïtzació mensual de les tres sèries històriques de temperatura i de precipitació de FEDA (Ransol, Engolasters i central). L'objectiu del control de qualitat va ser identificar possibles errors i anomalies dels valors mensuals, a més de fer una primera revisió de les dades preses de forma manualment des de l'octubre de 1934. Posteriorment, es va fer l'anàlisi d'homogeneïtat a partir de la metodologia

Homer (Mestre et al., 2013) desenvolupada en el marc de l'acció europea Cost ES0601 (*Advances in homogenisation methods of climate series: an integrated approach, HOME*). Més endavant, l'any 2012, el Cenma-IEA va treballar en l'acció *Clima* del projecte europeu *Observatori pirinenc del canvi climàtic* (OPCC) finançat pel programa Poctefa 2007-2013 (EFA235/11). Un dels objectius del projecte va ser crear una potent base de dades climàtica mensual per a l'àmbit pirinenc on es van incloure les sèries de FEDA. A partir d'aquesta base de dades es van calcular les anomalies climàtiques en el període 1959-2010 utilitzant el trentenni 1961-1990 com a període de referència climàtic. Un altre resultat va ser la cartografia climàtica a escala pirinenca de les anomalies de temperatura i de precipitació per dècada. Paral·lelament, el Cenma-IEA ha estat fent estudis sobre el canvi climàtic al territori d'Andorra. Els resultats d'aquests estudis s'han publicat en revistes científiques (Esteban et al., 2012; Esteban et al., 2017) i de forma resumida i divulgativa en el web de l'Observatori de la Muntanya d'Andorra (<http://www.oma.ad/ca/clima>). En aquest web es presenten els valors de diversos indicadors de seguiment del canvi climàtic proposats per l'OMM (Organització Meteorològica Mundial) per al període 1950-2010 i calculats a partir de les sèries de FEDA. Els indicadors climàtics considerats són els següents: (a) la variació de temperatura mitjana de l'aire, (b) la variació de la precipitació anual acumulada, (c) l'evolució dels dies càlids, (d) l'evolució dels dies gèlids, (e) l'evolució de les intensitats de precipitació diària, (f) variació de la temperatura mitjana de les mínimes, i (g) variació de la temperatura mitjana de les màximes. Per acabar, des de final de l'any 2016, el Cenma-IEA està participant en el projecte Replim, *Xarxa d'observatoris d'ecosistemes sensibles (llacs, torberes) al canvi climàtic als Pirineus* (EFA056/15), que ens permetrà tenir una visió del canvi climàtic passat a Andorra a una escala de temps mil·lenària.

Els canvis climàtics passats als Pirineus

Els últims dos milions d'anys de la història de la Terra es caracteritzen per la presència de canvis globals de gran magnitud i rapidesa que han donat com a resultat períodes glacials i interglacials. L'últim període glacial que va afectar els Pirineus va tenir un dels màxims glacials ara fa 20.000 anys. S'estima que, en aquell moment, la temperatura de l'aire als Pirineus hauria estat, de mitjana, d'uns 10 °C per sota les temperatures actuals. Sota aquestes temperatures, gran part dels Pirineus estaven coberts per glaceres que haurien arribat a tenir més de cinquanta quilòmetres de llargada (Bordonau, 2005).

L'últim període glacial va finalitzar ara fa uns 10.000 anys amb la pujada gradual de les temperatures i, per tant, la pràctica desaparició de les glaceres. A la finalització de l'últim període glacial arriba el període interglacial anomenat holocè, que avui vivim. L'holocè ha presentat temperatures molt suaus però variables que han incidit, amb menys o més intensitat, en els ambients naturals. Els últims períodes alternats càlids freds han estat el període càlid romà, el període fred del final de la història antiga, el període càlid medieval, la petita edat del gel i l'augment de les temperatures actual (vegeu més endavant la figura 1). Tots han influït d'alguna manera en la història de la humanitat.

L'última fase freda de l'holocè va ser la petita edat del gel (PEG), que va estar present als Pirineus entre els segles XIV i XIX. Durant la PEG es van formar glaceres en els massissos

pirinencs amb alçades superiors als 3.000 metres d'altitud que van tenir la màxima extensió cap a la segona dècada del segle XIX (Copons i Bordonau, 1997). La petita edat del gel es dona com a acabada a mitjan segle XIX amb l'augment progressiu de les temperatures fins a dia d'avui.

Les glaceres de la petita edat del gel són les més grans de les que han pogut existir durant tot l'holocè. Per tant, tots, o gairebé tots, els registres glacials holocens han quedat esborrats per aquesta fase freda. Sense un registre glacial que ens doni una informació valuosa dels canvis climàtics, els sediments que hi ha als estanys són els que ens poden donar una informació indirecta dels canvis climàtics.

Els sediments dels llacs emmagatzemen els canvis químics, biològics i sedimentaris que hi ha tant a la mateixa aigua del llac com a la seva conca. A dia d'avui, hi ha molts estudis de recerca fets per tal d'analitzar el canvi climàtic i ambiental durant l'holocè. Com a exemple, la recerca feta pel Centre d'Estudis Avançats de Blanes del CSIC en el registre sedimentari de l'estany Redon (Val d'Aran) mostra el canvi climàtic al llarg de tot l'holocè (figura 1) a partir de les càpsules d'algues. Dins dels sediments dels llacs hi ha diversos tipus de microfòssils; un són les algues crisofícies que viuen en el plàncton de l'estany. Les crisofícies tenen la característica d'encapsular-se en forma de cist, o càpsula, al final del seu cicle vital per resistir condicions adverses i esperar moments de bonança. Un cop les càpsules es formen, poden precipitar al fons del llac on es fossilitzen dins del sediment. Les diferents espècies d'algues tenen diferent afinitat a les temperatures de les aigües i n'hi ha algunes que estan especialment còmodes en temperatures fredes. Per tant, l'estudi de les càpsules fossilitzades de determinades espècies ens permeten analitzar la temperatura de l'aigua a l'hivern que està en relació amb el clima on es troba el llac.

A la figura 1 es representa gràficament l'anomalia de temperatura a l'hivern de l'estany Redon des de l'inici de l'holocè, fa uns 10.000 anys, fins a finals de la dècada dels anys 1990 agafant com a referència la temperatura recent. D'una banda, el gràfic mostra que les temperatures hivernals van augmentar progressivament des de la finalització de la glaciació fins als 4.000 anys abans d'ara. D'altra banda, les temperatures hivernals han anat fluctuant notablement de forma bastant independent als períodes càlids i freds al llarg dels últims 4.000 anys. A tall d'exemple, el període càlid romà va tenir estius calorosos i hiverns suaus, però per contra el període càlid medieval va tenir hiverns especialment freds. Finalment, el gràfic representa fidelment l'escalfament del clima que hi ha a dia d'avui.

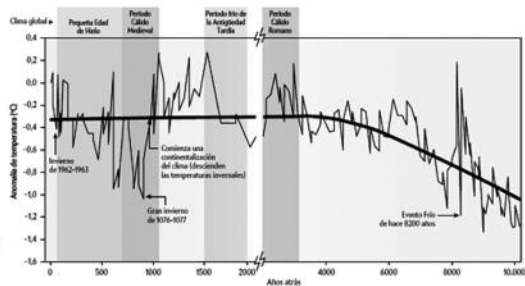


Figura 1: Anomalia de temperatura d'hivern-primavera registrada en el llac Redon a partir de les càpsules d'algues conservades en els sediments. Imatge cedida a través del projecte europeu Replim (EFA056/15) a partir de les dades de Pla i Catalan (2004)

El canvi climàtic recent als Pirineus

L'informe final de l'acció Clima del projecte OPCC (EFA 235/11), disponible al web <http://www.opcc-ctp.org>, recull els principals resultats i les característiques més remarcables en referència al canvi climàtic recent als Pirineus.

Considerant de forma global els Pirineus, els resultats del projecte OPCC permeten afirmar que durant el període d'estudi 1959-2010 s'ha observat un augment clar de la temperatura a tot el massís. En la figura 2, es mostra l'evolució de les anomalies de la temperatura mitjana anual. L'anomalia s'ha calculat comparant la temperatura mitjana de cada any amb el valor mitjà pel període 1961-1990. A la figura es pot veure en les barres en vermell (anomalies positives) la successió d'anys càlids des de la dècada dels 80, que es tradueix en una tendència a l'augment de les temperatures mitjanes a raó de $0,21\text{ }^{\circ}\text{C}$ per dècada (figura 2). La mateixa anàlisi s'ha fet per a les temperatures màximes i mínimes anuals amb resultats força similars. La tendència de les temperatures màximes anuals augmenta a raó de $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ per dècada, i de $0,16\text{ }^{\circ}\text{C}$ /dècada pel que fa a les temperatures mínimes.

De la mateixa manera, en la figura 3 s'ha representat l'evolució de l'anomalia de la precipitació acumulada anual durant el període 1959-2010 als Pirineus. Les barres grogues (anomalies negatives) ens indiquen els anys secs i les verdes (anomalies positives) els anys més humits. La tendència mitjana per al període analitzat ens mostra una disminució de la precipitació a raó de $-2,50\%$ per dècada.

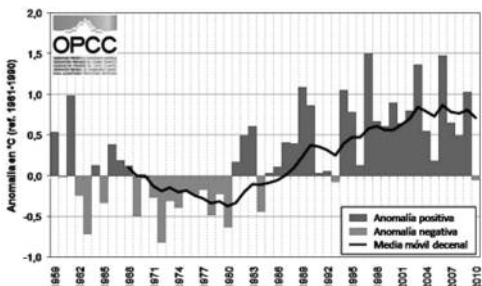


Figura 2: Evolució de la temperatura mitjana en el conjunt dels Pirineus durant el període 1959-2010. Les barres vermelles amb signe positiu mostren una anomalia positiva i les blaves amb signe negatiu mostren una anomalia negativa. La línia negra representa la mitjana mòbil decenal. Figura extreta de la memòria del projecte OPCC – acció Clima

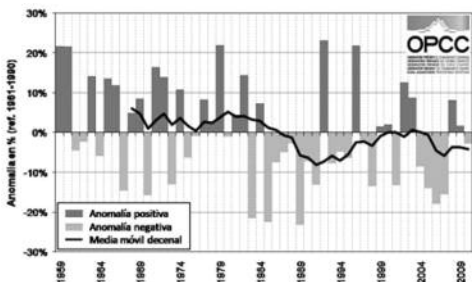


Figura 3: Evolució de les precipitacions en el conjunt dels Pirineus durant el període 1959-2010. Les barres verdes amb signe positiu mostren una anomalia positiva i les grogues amb signe negatiu mostren una anomalia negativa. La línia negra representa la mitjana mòbil decenal. Figura extreta de la memòria del projecte OPCC – acció Clima

En el marc del projecte europeu també es van cartografiar les anomalies de les temperatures i les precipitacions per cada dècada des de l'any 1951 fins al 2010 (figures 4 i 5). Per al càlcul de l'anomalia es va utilitzar com a referència climàtica el trentenni 1961-1990. Aquesta cartografia climàtica ha de permetre identificar anomalies regionals o bé diferenciar l'evolució dels canvis entre el vessant sud i nord dels Pirineus. Pel que fa a les temperatures, es pot apreciar un augment general a partir de la dècada 1981-1990. L'augment sembla ser més marcat a la part oriental dels Pirineus. Pel que fa a les precipitacions, les anomalies negatives són notablement més importants en les últimes tres dècades (des de 1981 fins al 2010) que en les tres primeres (des de 1951 fins al 1980). Destaca la dècada 1971-1980 com la més plujosa, especialment al vessant nord, mentre que les dècades 1981-1990 i 2000-2010 destaquen per ser les més seques.

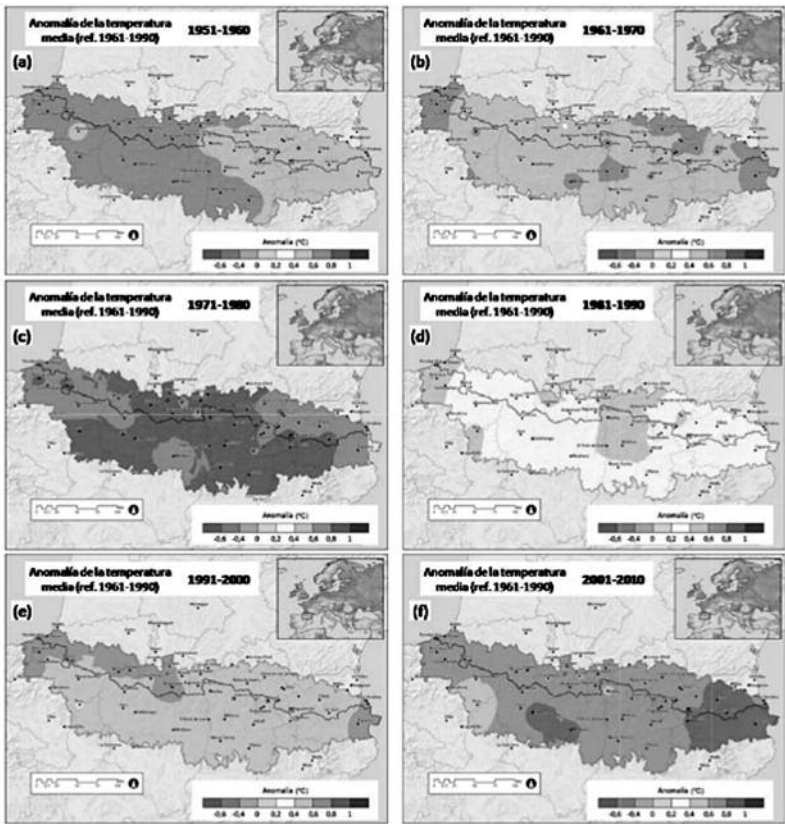


Figura 4: Mapes de l'anomalia de la temperatura mitjana de cada dècada respecte el període de referència 1961-1990. Figura extreta de la memòria del projecte OPC – acció Clima

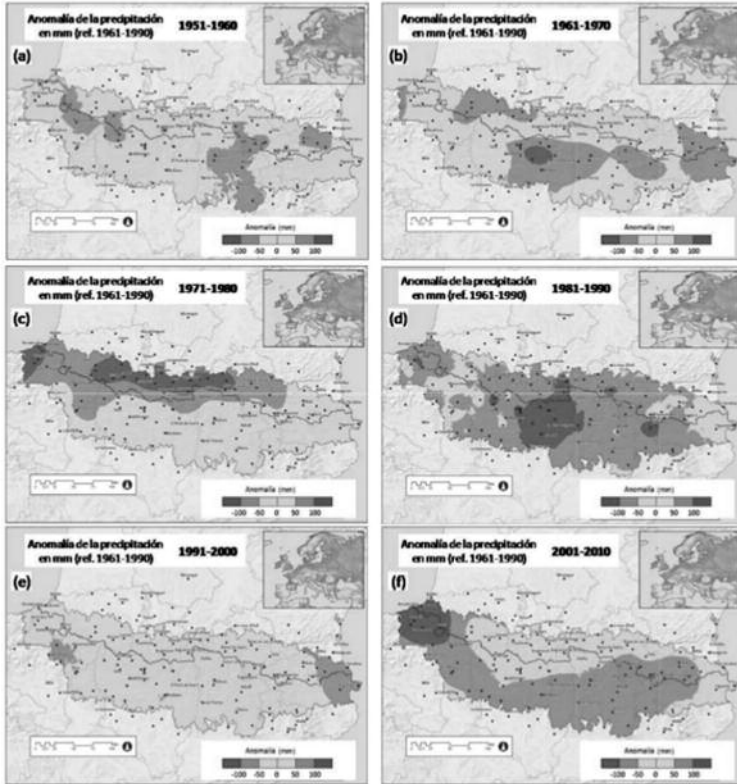


Figura 5: Mapes de l'anomalia absoluta de la precipitació mitjana de cada dècada respecte el període de referència 1961-1990. Figura extreta de la memòria del projecte OPCC – acció Clima

El canvi climàtic recent a Andorra

El web de l'Observatori de la Muntanya d'Andorra (www.oma.ad) i el web de l'Observatori del Clima (<http://www.iea.ad/butlletins-i-anomalies-climatiques/butlletins-mensuals>) presenten de forma gràfica la informació més remarcable referent al canvi climàtic recent a Andorra. El Cenma-IEA ha analitzat el període 1950-2010 i mostra, de forma similar al projecte OPCC, l'evolució de les temperatures i les precipitacions així com les seves anomalies utilitzant com a període de referència el trentenni 1971-2000. Per al cas d'Andorra, les sèries homogeneïtzades mensuals de temperatura i precipitació seleccionades són les tres sèries històriques de FEDA: Ransol (1645m), Engolasters (1640m) i central (1145m); només la sèrie de precipitació d'Engolasters va ser desestimada per problemes de qualitat (Esteban *et al.*, 2017).

Pel que fa a l'evolució de les temperatures mitjanes anuals (figura 6), des del 1950 s'observa un augment del voltant de 0,14 °C per dècada. Aquest augment és més evident a partir de final de la dècada del 1980, quan se succeeixen la majoria dels anys més càlids (valors d'anomalia positiva més grans). Pel que fa a les mitjanes de les temperatures màximes i mínimes, cal destacar el comportament a escala estacional, per exemple les màximes estivals augmenten al voltant de 0,45 °C per dècada (figura 7). Mentre que les mínimes hivernals augmenten al voltant de 0,22 °C per dècada.

Altres variables per estudiar l'evolució del clima són els índexs climàtics. Un és el nombre de dies càlids, és a dir el dies amb temperatures màximes superiors a 25 °C, o bé el nombre de dies de gèlids que tenen temperatures inferiors a 0 °C durant tot el dia. En aquest sentit, el nombre de dies gèlids està disminuint lleument, amb una disminució del voltant de -0,6 dies per dècada; mentrestant, el nombre de dies càlids està augmentant de forma més marcada, amb 2,2 dies per dècada (figura 8). Aquests resultats són un reflex d'estius més calorosos i d'hiverns més suaus.

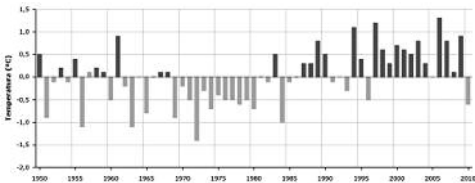


Figura 6: Evolució de la temperatura mitjana en el conjunt d'Andorra durant el període 1950-2010. Les barres vermelles en signe positiu mostren una anomalia positiva i les blaves en signe negatiu mostren una anomalia negativa. Figura extreta del web www.oma.ad

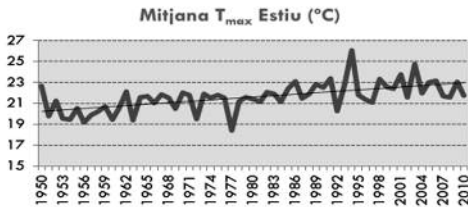


Figura 7: Evolució de la mitjana de les temperatures màximes a l'estiu en el conjunt d'Andorra durant el període 1950-2010. L'indicador representa les temperatures més elevades que es registren a l'estiu poc després del migdia. Cada valor representa la mitjana de les temperatures d'un estiu. Figura modificada a partir de la informació representada al web www.oma.ad

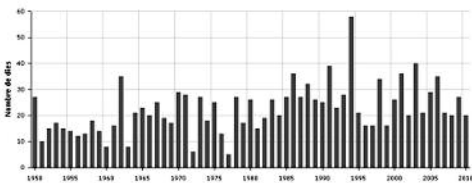


Figura 8: Evolució del nombre de dies amb temperatures màximes superiors a 25 °C en el conjunt d'Andorra durant el període 1950-2010. Figura extreta del web www.oma.ad

Consideracions finals

Durant el període interglacial holocè que vivim avui, i que representa els últims 10.000 anys de la història de la Terra, podríem pensar que el clima ha estat gairebé inalterable. Però, lluny d'aquesta realitat, el clima ha estat canviant contínuament, amb moments més freds i d'altres

de més càlids. Per tant, hem d'admetre que el clima no és mai constant sinó que, de forma natural, va canviant de forma cíclica i lentament. Avui en dia estem vivint un escalfament continuat des de mitjan segle XIX bàsicament a causa de l'efecte hivernacle que produeix la combustió d'energia fòssil. Segons els estudis mitjançant algues crisofícies a l'estany de Redon, de Pla i Catalan (2005) amb dades agafades als finals de la dècada dels anys 1990, les mitjanes de les temperatures hivernals podrien arribar a assolir un dels màxims dels últims 10.000 anys. L'anàlisi de tendències de canvi climàtic a partir de dades instrumentals requereix del control de qualitat i l'homogeneïtzació de les sèries climàtiques. La base de dades mensual generada en el marc del projecte OPCC ens ha permès disposar d'informació transfronterera, homogeneïtzada i de qualitat per poder quantificar el canvi climàtic recent al Principat d'Andorra. Els resultats de les tendències climàtiques a Andorra (1950-2010) indiquen un clar augment de la temperatura de l'aire des de mitjan segle passat, especialment pel que fa a les temperatures màximes de l'estiu (0,45 °C/dècada) i una disminució significativa de la precipitació (-4%/dècada). Aquests resultats estan d'acord amb els de l'acció Clima de l'OPCC que mostren un augment de les temperatures mitjanes anuals a raó de 0,21 °C/dècada, un augment de les temperatures màximes anuals a raó de 0,25 °C/dècada i una disminució de la precipitació a raó de -2,5% en el global del massís pirinenc.

Agafant tota la informació presentada, es podria dir que a dia d'avui es podria haver arribat a les temperatures hivernals més altes de tot interglacial holocè. D'una banda, l'estudi de Pla i Catalan (2005) marca que un dels màxims de les temperatures hivernals durant l'holocè va ser a la dècada dels 90. D'altra banda, les temperatures hivernals han anat pujant durant les dècades dels 90 i 2000 segons les tendències climàtiques als Pirineus i a Andorra.

Fins ara, disposem d'informacions homogeneïtzades als Pirineus fins a l'any 2010. Dades més recents homogeneïtzades per al Pirineu català per part del Servei Meteorològic de Catalunya (www.meteo.cat) mostren que l'augment de temperatures segueix endavant d'acord amb les projeccions del canvi climàtic.

Des de l'any 2016 el Cenma-IEA ja està treballant en un nou projecte de canvi climàtic als Pirineus: el *Clim'Py*. Seguint la feina feta a l'acció clima, s'està avançant en la correcció de les sèries diàries i la identificació del canvi climàtic a aquest detall temporal, al mateix temps que s'hi incorpora l'anàlisi d'una nova variable molt rellevant en zones de muntanya: el gruix de neu. En conclusió, hi ha la possibilitat que s'hagi arribat als màxims de temperatures, com a mínim les hivernals, dels darrers 10.000 anys. Si el canvi climàtic actual és degut a l'home per l'emissió dels gasos de l'efecte hivernacle a l'atmosfera, cal preveure que les temperatures seguiran augmentant en el futur. Llavors, els ambients dels Pirineus se sotmetran a les temperatures més elevades a què mai hagin estat sotmesos. Davant d'aquesta realitat cal fer actuacions per mitigar l'augment de les temperatures i reduir els seus impactes.

Ramon Copons i Llorens,

doctor en ciències geològiques i director tècnic del CENMA-IEA,

Laura Trapero i Bagué,

doctora en ciències físiques i investigadora del CENMA, i

Marc Pons i Pons,

doctor en enginyeria de la sostenibilitat i investigador al CENMA

Referències

- BORDONAU, J. (2005) "El relleu i el modelat glacial als Pirineus". *Horitzó*, núm. 8, p. 15-22. www.iea.ad/publicacions-cenma/revista-horitzo/revista-horitzo-8
- CENMA-IEA: Observatori de la Muntanya d'Andorra – www.oma.ad
- CENMA-IEA: Observatori del Clima - www.iea.ad/butlletins-i-anomalies-climatiques/butlletins-mensuals, properament a www.clima.ad
- COPONS, R.; BORDONAU, J. (1997) "El registro glacial correspondiente a la Pequeña Edad del Hielo en la Península Ibérica". En: IBÁÑEZ, J. J.; VALERO, B.; MACHADO, C. (ed.) *El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Implicaciones en la desertificación*. p. 295-310.
- ESTEBAN, P.; PROHOM, M.; CUNILLERA, J.; TRAPERO, L. (2017) "Tendències recents del clima a Andorra (1950-2010): Resultats del projecte acció clima – OPCC". *Revista del CENMA*, 9.
- ESTEBAN, P.; PROHOM, M.; AGUILAR, E. (2012) "Tendencias recientes e índices de cambio climático de la temperatura y la precipitación en Andorra, Pirineos (1935-2008)". *Pirineos. Revista de Ecología de Montaña*, vol. 167, p. 87-106, DOI: 10.3989/Pirineos.2012.167005.
- FEDA. Dades meteorològiques de FEDA (Forces Elèctriques d'Andorra) – www.feda.ad
- MESTRE, O.; DOMOKOS, P.; PICARD, F.; AUER, I.; ROBIN, S.; LEBARBIER, E.; BÖHM, R.; AGUILAR, E.; GUIJARRO, J.; VERTACHNIK, G.; KLANCAR, M.; GUBUISSON, B.; STEPANEK, P. (2013) "Homer a homogenization software – methods and applications". *Quart. Jour. Of the Hungarian Meteorological Service*, 117, 1, p. 47-67.
- PLA, S.; CATALÁN, J. (2005) "Chrysophyte cysts from lake sediments reveal the submillennial winter/spring climate variability in the northwestern Mediterranean region throughout the Holocene". *Climate Dynamics*, núm. 24, p. 263–278, DOI: 10.1007/s00382-004-0482-1.
- Servei Meteorològic de Catalunya, Universitat de Zaragoza, MeteoFrance, Institut d'Estudis Andorrans y Agencia Estatal de Meteorología (2014): *Observatorio Pirenaico del Cambio Climático (EFA 235/11): Acción Clima. Memoria final*. Comunitat de Treball dels Pirineus. Finançat en el marc del programa europeu POCTEFA 207-2013., 48 p. <http://www.opcc-ctp.org>

Annex: conceptes utilitzats

Període de referència. Interval de temps, normalment de 30 anys (trentenni), utilitzat per aplicar tècniques estadístiques amb l'objectiu de definir un clima *normal*. En el present article s'han utilitzat els períodes de referència per definir temperatures i precipitacions *normals*.

Anomalia climàtica. Diferència, de temperatura o precipitació, entre un interval de temps concret (p. e. un any) i el període de referència (trentenni). L'anomalia és positiva si el valor en l'interval és superior al del període de referència. L'anomalia és negativa si el valor en l'interval és inferior al del període de referència.

Mitjana mòbil decenal. Càlcul que es fa en una sèrie de dades seguides per fer sèries de mitjanes. En el cas del decenal, la mitjana s'agafa a partir de 10 dades prèvies, siguin de temperatures o precipitacions, tenint en compte que cada dada representa un any. Com a resultat, la mitjana mòbil decenal és una llista de números que cadascun d'ells representa una mitjana dels deu valors originals anteriors.

Control de qualitat. Anàlisi numèrica i estadística que s'aplica a una sèrie de dades meteorològiques amb la finalitat de detectar i corregir les dades errònies o dubtoses. Els errors acostumen a venir de problemes puntuals en l'observació feta per l'observador meteorològic, així com de problemes en la transcripció de la informació normalment a mà.

Homogeneïtzació. Conjunt d'anàlisis estadístiques aplicades en sèries meteorològiques amb la finalitat d'eliminar els efectes no climàtics. Després d'aplicar un procés d'homogeneïtzació en una sèrie meteorològica resultarà una sèrie *homogeneïtzada* amb dades meteorològiques influenciades per causes estrictament climàtiques. Els efectes no climàtics en sèries meteorològiques poden ser de molts tipus: modificació de l'entorn d'una estació meteorològica (p. e. creixement d'un arbre a tocar del punt de mesura), canvis en els sensors de mesura, descalibratge dels sensors al llarg del temps, canvis d'ubicació de l'estació, canvi en l'observador meteorològic, etc.