



Alan Ward i Koeck

Enginyer Superior
en informàtica



Alan Ward i Koeck

Èric Jover i Comas

Doctor en química



Èric Jover i Comas

Resultats preliminars de la reconstrucció del registre de temperatures d'Andorra

Resum

En aquest treball es presenten resultats preliminars de la reconstrucció del registre de temperatures d'Andorra. Utilitzant els registres instrumentals d'Andorra realitzats per FEDA, tenim dades a partir de l'any 1934. Volíem anar més enrere, i sabent que a escala global els registres instrumentals comencen al voltant del 1850, hem utilitzat diferents models basats en aquestes dades per reconstruir el registre de temperatures fins a aquesta època. No obstant això, per continuar el viatge en el passat hem hagut d'utilitzar dades indirectes i prioritzar les dades dendrocronològiques tant per a Andorra com pel gran potencial que presenta el país en aquesta àrea. En aquest estudi s'han correlacionat les temperatures d'Andorra amb diferents característiques dels anells de creixement dels arbres estudiats, tant en l'estudi realitzat a Andorra com a la resta dels Pirineus i als Alps. Gràcies a aquests estudis presentem una reconstrucció preliminar del registre de temperatures a partir del 1700. S'hi observen dos episodis freds al voltant dels anys 1700 i just abans del 1800 que es corresponen amb èpoques fredes ja conegudes a la resta d'Europa. Semblaria que globalment en aquella època el clima a Andorra presentava condicions més moderades, amb mínimes més altes i màximes més baixes que les actuals.

Abstract

In this work, we present preliminary results for the reconstruction of temperatures in Andorra. Using instrumental data from FEDA we have compiled temperature data since 1934. Since instrumental data was available on a global scale starting roughly at 1850, we were able to reconstruct temperatures in Andorra using several models based on global instrumental data. In order to go further back we needed to use indirect temperature data. In our case dendrochronolo-

logical data was preferred considering that, due to the geographic characteristics of this country, this technique presents an interesting potential. In this work, Andorran temperatures have been correlated with tree ring data from Andorra, other sampling sites from the Pyrenees and the Alps. From these correlations, we were able to carry out a preliminary reconstruction of temperatures beginning in 1700. We have identified two cold periods around 1700 and just before 1800, which have often been reported in other European studies. Finally, from our preliminary results, it seems that in the past temperatures in Andorra were less extreme than nowadays, with higher minimum and lower maximum temperatures.

Introducció

Durant els últims temps, hem estat literalment bombardejats per notícies relacionades amb el canvi climàtic amb milers de dades globals; per exemple, com estan canviant les temperatures globals, com evolucionarà el nivell mitjà dels oceans... La gran majoria d'aquestes notícies, tot i reconèixer l'heterogeneïtat geogràfica dels efectes del canvi climàtic, se centren en dades globals que de poc serveixen per predir el futur climatològic del nostre país. Així doncs, si volem saber els ets i uts del canvi climàtic a Andorra, encara que ens basem en dades globals, haurem de treballar sobretot amb dades d'Andorra mateix o del seu entorn més immediat.

Per caracteritzar el canvi climàtic a Andorra no és suficient d'observar les temperatures viscudes al país darrerament ni quina és la seva tendència. Encara que la gran majoria tenim la sensació que aquest darrer hivern (2006-2007) ha estat especialment calorós, és important contextualitzar-lo amb el màxim de dades històriques possibles per veure si aquest any ha estat excepcional –o si no és més que una de les anomalies



Alan Ward i Koeck

típiques de qualsevol sistema climàtic—. Així doncs, necessitem saber quina temperatura feia en el passat per millor interpretar les temperatures del present i així aconseguir predir les temperatures del futur.

Cal destacar que reconstruir el registre de temperatures no és tan sols d'utilitat per estudiar el canvi climàtic, ja que hem de considerar que les dades climatològiques tenen una gran influència en la majoria d'aspectes relacionats amb l'evolució de les societats humanes. En aquest sentit, a Andorra ha existit fins a principis del segle XX una economia de subsistència que mantenia unes estretes relacions amb les dures condicions de vida que predominaven en aquest paratge pirinenc. La nostra hipòtesi, que intentarem confirmar en treballs posteriors, és que les condicions climatològiques tenien una especial incidència en la demografia del país i modulaven tant la mortalitat com els fluxos migratoris, a causa de la seva influència en la productivitat agrícola i ramadera.

En aquest treball de remuntar en el temps, pel que fa les temperatures, podem utilitzar diferents tipologies de dades. Disposem, primer, directament de dades de temperatures gràcies als registres instrumentals. Aquests registres comencen a escala global a partir del 1850 i a Andorra tenim tres sèries molt interessants gràcies a Fhasa (que esdevindria posteriorment FEDA) a partir del 1934[FEDA]. Aquestes sèries corresponen a l'estació central de FEDA situada entre Escaldes i Encamp, el llac d'Engolasters i la presa de Ransol. No obstant això, si volem continuar reculant en el temps haurem d'utilitzar també dades indirectes. Aquestes dades indirectes no són valors de temperatura però són mesures de paràmetres que estan correlacionats amb les temperatures, i podem, doncs, obtenir-les de manera indirecta. Hi ha una multitud de paràmetres que poden ser utilitzats amb aquests objectius. Esmentarem tan sols les fonts documentals,

com seria, per exemple, una pintura del segle XIX que ens ensenyés una glacera alpina. Comparant l'estat d'avançament d'aquesta glacera amb fotografies actuals podríem arribar a mesurar quina ha estat l'evolució de les temperatures. Un paràmetre força interessant també és l'evolució de les taques solars (Sun Spot Number (SSN)), que estan correlacionades amb l'energia radiativa que rebem del sol. Les diferències en la composició isotòpica d'O¹⁶ i O¹⁸ del gel, de diatomees i d'altres també han estat àmpliament utilitzades per estudiar la temperatura en el moment de la seva formació. Finalment, m'agradaria destacar l'ús de la dendrocronologia (estudi dels anells de creixement dels arbres), ja que a Andorra ja es disposa d'un treball basat en aquestes característiques [Schwein-gruber] i en què s'obtenen dades a partir del 1793.

En aquest treball intentarem ampliar el registre de temperatures d'Andorra al més lluny possible en el temps, primer utilitzant dades instrumentals i després basant-nos en dades dendrocronològiques, al principi d'Andorra, després dels Pirineus i finalment dels Alps i del Benelux.

Registre instrumental, fins al 1934

Ja hem comentat que a Andorra disposem d'un registre instrumental que comença l'any 1934 gràcies a les activitats de Fhasa i que consta de tres sèries (central, Engolasters i Ransol) situades a altituds diferents. Si analitzem les mitjanes anyals obtingudes en aquestes localitzacions (figura 1), podem veure que a part d'una petita anomalia a principis dels anys 40 tenim una distribució de les temperatures segons l'altitud de l'estació de mesura, amb Ransol amb les temperatures més baixes, seguides per les d'Engolasters i finalment per les de la central, que es troba entre Escaldes i Encamp. Examinant aquesta gràfica no es fa evident cap tendència clara d'escalfament. Però en comptes de



Éric Jover i Comas

treballar amb les mitjanes anyals, també podem treballar amb les dades més concretes del mes de gener, sobretot considerant les preocupacions que han despertat les temperatures d'aquest darrer hivern.

Figura 1.
Comparativa de temperatures entre les tres estacions de FEDA: central, Engolasters i Ransol

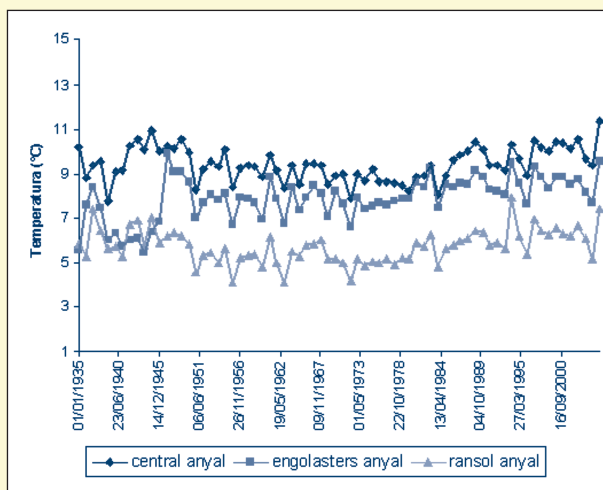
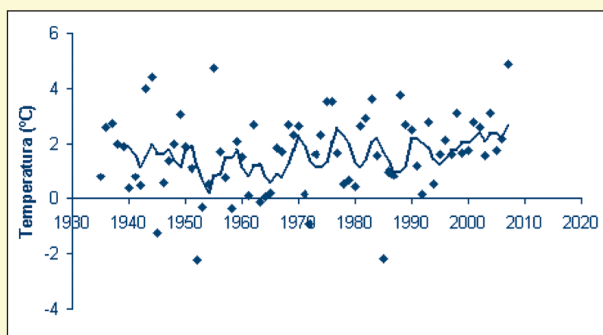


Figura 2.
Evolució de les temperatures mitjanes del mes de gener a la central de FEDA. La línia negra correspon a la mitjana flotant a cinc anys.



En la figura 2 podem veure la mitjana de les temperatures del mes de gener del 1935 al 2007 per a la central de FEDA. Si observem aquesta gràfica sí que semblaria que després d'haver tingut un comportament cíclic entre els anys 1950 i 1995 ara tindríem, en els darrers anys, una certa tendència a l'augment de les

temperatures. Aquesta gràfica també ens permet contextualitzar les temperatures observades el gener del 2007, ja que encara que hagin estat molt elevades si es comparen amb els últims trenta anys són força similars a temperatures ocorregudes durant els anys 40 i 50, cosa que ens mostra la importància d'aquests tipus d'estudis per poder interpretar millor l'evolució climàtica del país.

Més enllà de 1934

Així doncs, gràcies al registre instrumental andorrà podem saber l'evolució de les temperatures al país a partir de 1934, però si volem continuar reculant en el temps necessitarem utilitzar altres dades instrumentals. En aquest sentit, existeixen diferents models de reconstruccions de temperatures basats en dades instrumentals que permeten recular fins als voltants de l'any 1850. Hem utilitzat el model HadCRUT (versió 3), que permet conèixer l'evolució de les temperatures en funció de la situació geogràfica [HadCRUT], i el model NESAT (versió 2), que es basa en dades instrumentals d'observatoris del nord-est d'Espanya [NESAT].

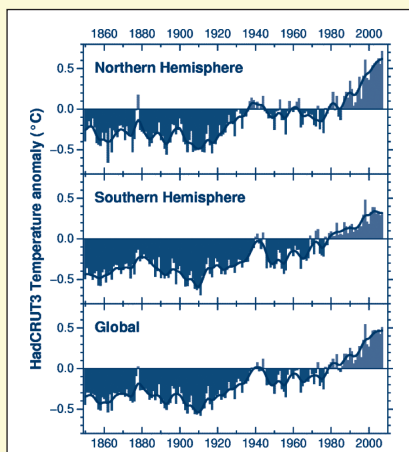
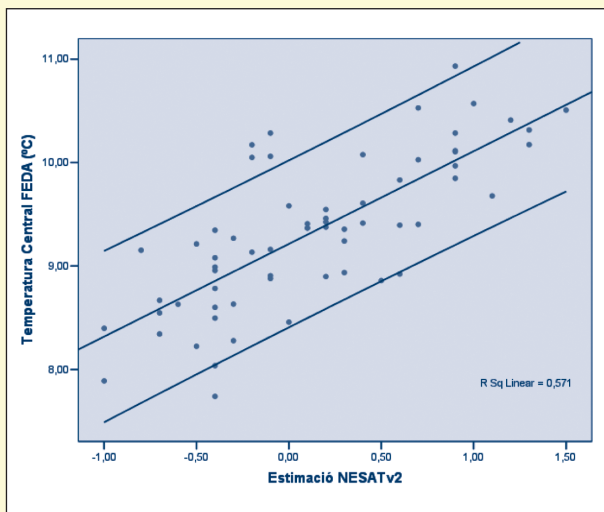


Figura 3.
Evolució de les temperatures mitjanes i per hemisferi.
Font: HadCRUTv3

En la figura 3 podem veure l'evolució de les temperatures globals i les dels hemisferis nord i sud dels últims 150 anys segons la modelització HadCRUT. Es poden observar lleugeres diferències, però la tendència en tots els casos seria d'un augment considerable de les temperatures a partir dels anys 1980. A fi de saber si aquestes dades són útils per avaluar les temperatures del passat s'ha mirat si les dades que se superposen temporalment per les dos sèries (a partir de 1934 i fins a l'actualitat tenim dades tant de FEDA com de HadCRUT) presenten una bona correlació. No obstant això, encara que aquesta correlació s'ha trobat estadísticament significativa ($p < 0,01$) tant per les dades de HadCRUT com per les de NESAT aquestes últimes han mostrat un comportament més pròxim i per tant són les que hem decidit utilitzar (figura 4).

Figura 4.
Correlació estadísticament significativa ($p < 0,01$) entre l'estimació del model NESATv2 i les temperatures mitjanes de la central de FEDA per a cada any. La línia central mostra la recta de regressió lineal i les dos que l'envolten, els seus límits de confiança al 95%.



Aquest tipus de correlació podrà, així doncs, ser utilitzat, gràcies a una senzilla regressió lineal, per reconstruir el registre de temperatures d'Andorra fins al 1850.

La dendrocronologia, un gran pas enrere

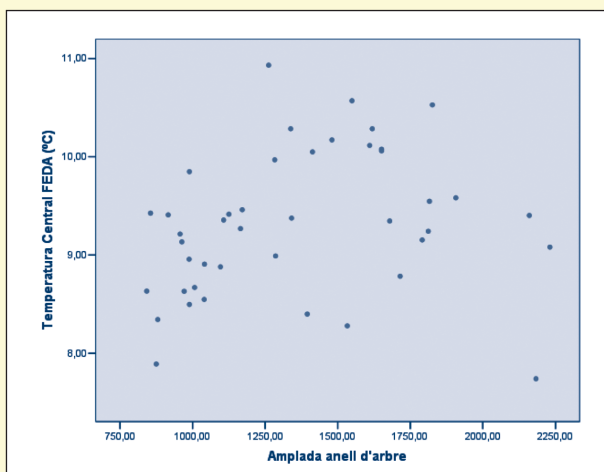
A partir del 1850 ja no disposem de dades directes de temperatura, fet que ens obligarà a utilitzar dades indirectes per continuar el nostre viatge en el passat de les temperatures a Andorra. La dendrocronologia –estudi dels anells de creixement dels arbres– ens permet obtenir dades climàtiques indirectes. Però abans d'entrar més en el detall de les dades val la pena explicar breument en què es basen aquests estudis dendrocronològics. Els arbres presenten cicles de creixement anyal que es tradueixen en un progressiu eixamplament del seu diàmetre; a causa de les diferències de velocitat de creixement en les diferents estacions s'observen, visualment, aquests anells de creixement anyals. D'aquesta manera podem saber l'edat dels arbres comptant-ne els anells. De fet, en aquests anells de creixement podem diferenciar dues zones: la primera, de creixement ràpid, que es correspon a la primavera, *early wood*, i una segona, de creixement més lent que es correspon amb el final d'estiu, *late wood*. Les característiques d'aquests anells (amplada, densitat...) dependran tant de factors biològics com climatològics. Com a principals factors biològics podem citar l'espècie de l'arbre, la seva edat i la competència per l'espai. Com a factors climatològics es poden considerar tant les temperatures com l'estrès hídric. Així doncs, és possible obtenir una informació indirecta del registre de temperatures estudiant les característiques d'aquests anells de creixement. Cal doncs trobar arbres de llarga vida i que estiguin situats en zones de fort estrès climàtic, com per exemple la zona del seu límit de creixement en altitud.

A la cerca de la correlació perduda

Així doncs, hom podria esperar una correlació significativa entre l'amplada de l'anell de creixement per a cada any i la presència o absència d'estrès (hídric, de

temperatura o un altre) en el transcurs d'aquell any. Per aquest motiu, la primera cerca de correlacions es va fer entre les amplades dels anells d'una sèrie de mostres preses a la Rabassa en *Pinus Mugo Uncinata* [Schwein-gruber] i les temperatures mitjanes d'Andorra. Però en la tabulació de dades presentada en la figura 5 no s'observa cap tendència clara entre les dues variables estadístiques. En aquesta gràfica, cada any és representat per un punt, punts que formen un núvol molt dispers. Fóra difícil identificar una corba d'interpolació que representés una relació entre elles... ja que molt probablement no existeix!

Figura 5.
Hi ha correlació entre
amplada dels anells i tem-
peratura?



Per contra, en la gràfica de la figura 6 la correlació és molt més present i permet establir una interpolació lineal amb un coeficient de correlació molt bona. Per obtenir aquesta gràfica, però, hem hagut de treballar:

- A partir de les dades de densitat màxima dels anells de creixement, més aviat que amb les amplades.
- Fent la comparació amb les dades de temperatura mensuals, i no una mitjana anyal.

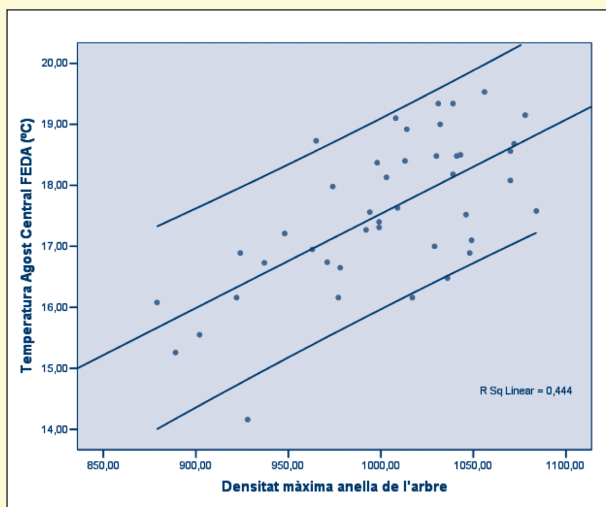


Figura 6.
Correlació entre densitats
màximes d'anells d'arbres i
temperatures

En aquesta figura, la recta central correspon a una regressió lineal de les dades, mentre que les dues corbes laterals marquen el límit de 95% de les mostres. Les dades presentades corresponen al mes d'agost. Han aparegut correspondències interessants amb altres mesos de l'any –però no amb tots–. Aquesta constatació es pot associar de manera temptativa a l'estacionalitat marcada del creixement dels arbres: una producció inicial de matèria que depèn de la data d'inici de primavera cada any, i una producció estival que depèn directament de l'estrès hídric. Aquest aspecte seria, però, mereixedor d'un estudi més aprofundit.

Eixamplar la zona geogràfica

Una vegada establerta la possibilitat de correlacionar dades de densitat màxima dels anells de creixement dels arbres amb la temperatura, i a causa de la falta de dades locals d'aquí a Andorra, resulta necessari interessar-se en les sèries dendrocronològiques mostrejades en altres llocs del Pirineu, o més lluny encara.

La pregunta que ens farem és si seria possible establir correlacions entre les temperatures o bé la densitat dels anells de creixement entre aquí i altres indrets, en què possiblement existeixen més dades i sobretot sèries cronològiques més llargues i que ens permetin anar més any enrere.

Es presenten els resultats d'una cerca en la base de dades [WDC] en la figura 7. Com es veu, existeixen una sèrie de dades dendrocronològiques disponibles per a la zona axial del Pirineu. Algunes de les localitats tenen sèries de dades que van enrere fins a l'any 1700. A partir de la normalització d'aquestes sèries de dades, es pot establir una sèrie *mitjana* de densitat màxima dels anells de creixement al Pirineu. Fent una cerca semblant pels Alps també es pot obtenir una sèrie mitjana que reflecteixi un estat global d'aquella regió.

Figura 7.
Resultats de la cerca de
sèries dendrocronològiques
al Pirineu.



Quan es fa la comparació entre les dues sèries, obtenim la figura 8. En aquest cas cada punt correspon a un any, amb la seva posició horitzontal proporcional a

la densitat màxima d'aquell any al Pirineu, i la vertical proporcional a la dels Alps.

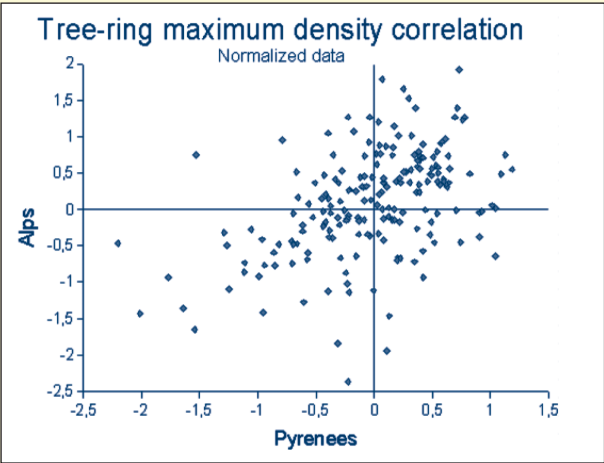


Figura 8.
Comparativa: densitats
màximes d'anells d'arbre,
per al període comprès
entre 1783 i 1977.

Sembla que, efectivament, pugui existir alguna correlació entre les dues sèries. Es confirma aquesta impressió mitjançant el càlcul del coeficient de correlació lineal, que permet concloure a una relació significativa. La correlació no pot ser gaire bona, però, ja que el núvol és bastant dispers – i en tot cas, ens podem preguntar si serà suficient per permetre una reconstrucció de temperatures del Pirineu a partir de dades dels Alps. La figura següent, figura 9, ens mostra la gràfica de les dues sèries temporals. No acaben de sobreposar-se gaire, si bé la seva evolució és propera.

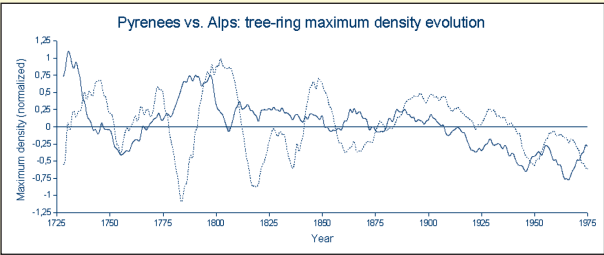


Figura 9.
Evolució temporal de densi-
tats màximes d'anells d'ar-
bres: Pirineu i Alps.

En aquesta gràfica, és interessant notar la disminució de les densitats màximes cap a final de la sèrie (a partir dels anys 30 del segle XX), moment en què és conegut l'augment progressiu de les temperatures. A la vegada, els primers valors tenen densitats màximes dels anells de creixement molt elevades, que corresponen a les temperatures bastant baixes del període del *Dalton Minimum*, sobretot als països de l'Europa del nord i celebrat pels pintors de l'escola flamenca (vegeu la il·lustració 1). Com a anècdota, a Burckle 2003 es presenta una hipòtesi que lliga la densitat de la fusta produïda als Alps durant el *Little Ice Age*—període en què va viure l'Stradivari— amb la qualitat sonora dels seus instruments.

Il·lustració 1.
"Fun on the Ice", Hendrick
Avercamp [wikipedia].



La conclusió que se'n pot extraure és que hi ha una relació entre episodis freds i calents als Alps i al Pirineu, però que la relació any per any no és prou precisa per ser d'utilitat directa per al nostre propòsit.

Reconstrucció del registre de temperatures

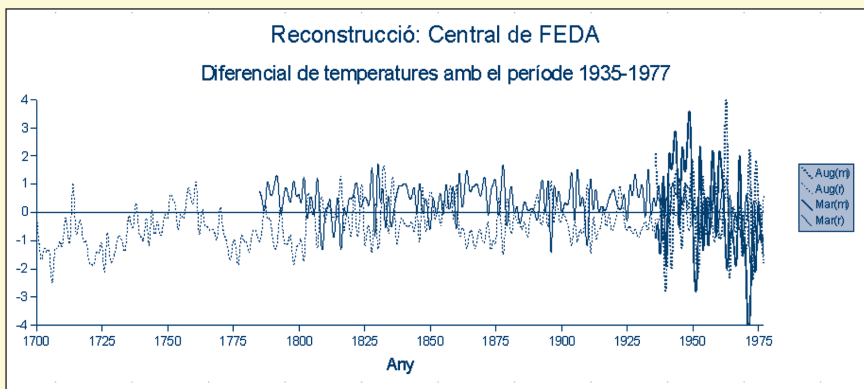
Estudiant les correlacions entre densitats màximes dels anells d'arbres i temperatura, apareixen algunes correlacions significatives. Una és amb les temperatu-

res màximes durant el mes d'agost a la central de FEDA. A partir d'aquesta correlació hem pogut reconstruir l'evolució de les temperatures màximes a l'agost per al període comprès entre l'any 1700 i l'inici del registre de temperatures instrumentals de FEDA, l'any 1935. Una altra és amb les temperatures mínimes durant el mes de març. En aquest cas, tan sols hem pogut efectuar la reconstrucció cap enrere fins a l'any 1785, ja que les sèries de dades dendrocronològiques que millor correlació presentaven s'acabaven en aquest any.

A la figura 10 es presenten les reconstruccions. Per tal de facilitar-ne la lectura, no es presenten les temperatures reals, sinó la seva variació respecte d'un nivell de referència. En tots els casos, l'hem pres com la mitjana de les dades de FEDA entre els anys 1935 i 1977.

En primer lloc, cal remarcar que les dades instrumentals presenten variacions molt acusades respecte de les dades reconstruïdes. Això és degut en part a la inèrcia que presenta el creixement dels arbres davant de petites variacions anyals de temperatura. Això implica que poden haver existit curtes fluctuacions de les temperatures històriques (del voltant d'un o dos anys) i que no quedin reflectides en la reconstrucció.

Figura 10.
Reconstrucció de les temperatures màximes de l'agost i mínimes del maig per a la central de FEDA (de 1935 a 1977).



Referències

- [Bradley 2003]
Bradley R.S., Hughes M.K.,
Diaz H.F. Climate in Medieval
Time. *Science Magazine*
302:404-405, 2003
- [Büntgen 2007]
Büntgen U. et al Climatic res-
ponse of multiple tree-ring
parameters from the Spanish
Central Pyrenees. In: Haneca K
et al. (Eds.) Tree rings in archa-
eology, climatology and eco-
logy, TRACE, Vol. 5, 60-72.
- [Burckle 2003]
Burckle L., Grissino-Mayer
H.D. Stradivari, violins, tree
rings, and the Maunder Mini-
mum: a Hypothesis. *Den-
drochronologia* 21(1):41-45,
2003
- [FEDA]
Històric de dades meteorolò-
giques, Forces Elèctriques
d'Andorra URL:
<https://www.feda.ad/Cat/DadesInteres/Meteorologia.aspx>
- [HadCRUT]
HadCRUT temperature data-
set, Hadley Center, UK Meteo-
rological Office and Climatic
Research Unit, University of
East Anglia, Norwich, UK URL:
<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/>

La corba blava discontinua presenta l'evolució de les temperatures màximes de l'agost. La seva lectura resulta instructiva, ja que deixa clarament en evidència temperatures màximes inferiors a les actuals, amb entre -2 i -1°C de diferència. Al mateix temps, s'observen dos episodis particularment freds:

1. Als voltants de l'any 1700. En aquest cas es detecta la presència aquí a Andorra de la cua d'un episodi de temperatures bastant baixes a tot Europa, que es coneix com a *Little Ice Age*. Les temperatures d'indrets com els Països Baixos van arribar a baixar suficientment perquè els canals i rius principals es gelessin, cosa que es reflecteix en les obres de pintura de l'època, com la presentada en la il·lustració 1. Segons alguns autors, les estimacions de caiguda de temperatures van fins a -6 o -7°C, que és considerable. Aquí a Andorra no sembla que la caiguda hagi estat tan marcada, però val a dir que entre un i dos graus de caiguda poden tenir repercussions importants en la fauna i la flora de les franges superiors de cada estrat.

2. Immediatament anteriorment a l'any 1800, un segon episodi fred es perfila, si bé no tan marcat com l'anterior. També correspon a un període fred conegut a la resta d'Europa.

Pel que fa a la corba blava contínua de la figura 10, presenta l'evolució de les temperatures mínimes durant el mes de març. En aquest cas, no s'observen modificacions locals importants, però sí una tendència general a temperatures superiors d'entre +0,75 i +1°C respecte a les actuals.

Conclusions i perspectives de treball

La bona correspondència entre la densitat màxima dels anells de creixement i algunes temperatures mensuals a Andorra ha quedat demostrada. Aquest resultat, que confirma un estudi d'altres llocs del Pirineu

[Büntgen 2007] ens permet fer una reconstrucció de temperatures màximes del mes d'agost i mínimes del mes de març a la central de FEDA, anant enrere en el temps fins a l'any 1700.

A la vista d'aquestes dades, comencem a tenir una representació del clima del segle XVIII i principis del XIX, en què les temperatures serien, en conjunt, més moderades que les actuals, amb màximes considerablement més baixes però a la vegada mínimes més altes.

Cal fer èmfasi, però, en el fet –anunciat en el nostre títol!– que aquesta reconstrucció és tan sols un resultat preliminar. Seguint amb el bon procediment científic, ara ens queda una feina important de cerca de fonts contrastades que ens permetin afinar aquests resultats. També és la nostra intenció intentar allargar les sèries reconstruïdes fins a arribar, si és possible, a uns anys força importants per a les Valls, com poden ser 1278 i 1288.

A causa de les dificultats per establir correlacions entre dades del Pirineu i d'altres indrets, sembla difícil aprofitar les sèries temporals més llargues que es coneixen en altres zones per poder establir reconstruccions fiables. Per aquest motiu, caldrà buscar sèries més llargues de dades en indrets propers, si és possible a l'interior mateix del país.

[NESAT]

North Eastern Spain Air Temperature, Universitat Rovira Virgili, URL:

<http://wwwa.urv.net/centres/Departaments/geografia/clima/archive.htm>

[Schweingruber] WDC for Paleoclimatology, National Climatic Data Center, NC.

URL:

<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/treering/>

[WDC]

WDC for Paleoclimatology, National Climatic Data Center, NC. URL:

<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/treering/>

[Wikipedia]

Wikipedia. L'enciclopèdia lliure,

http://en.wikipedia.org/wiki/Hendrick_Avercamp