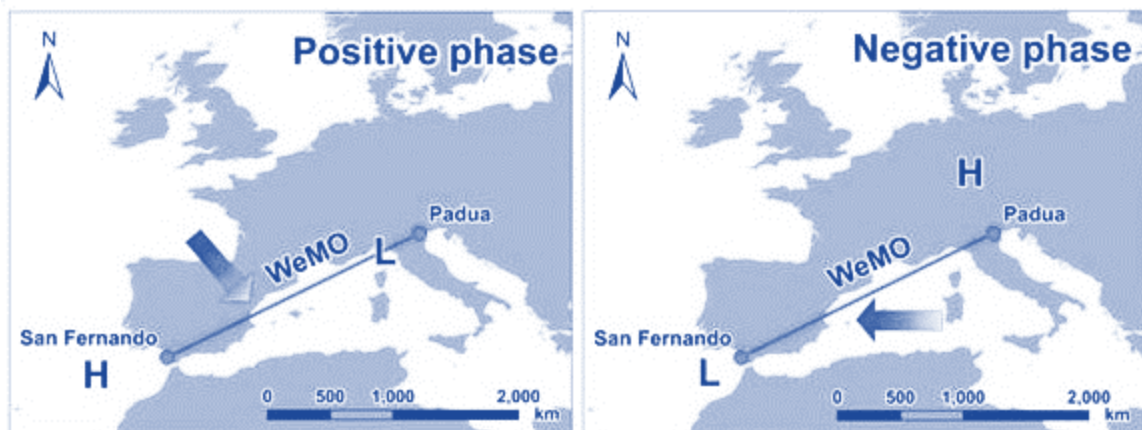




Influència dels patrons de teleconnexió NAO i WeMO en la precipitació a la ciutat de Barcelona (1821-2013)



Alumne: CASTILLO PÉREZ, Sergio

Tutor: ÚBEDA CARTAÑÁ, Xavier

Treball Final de Grau de Geografia

Juny de 2016

Curs 2015-2016

ÍNDIX GENERAL

Resum.....	6
Abstract	6
Agraïments	7
Motivació	8
1. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS	9
1.1. El clima mediterrani	9
1.1.1. Climes mediterranis de façana oriental.....	10
1.2. Els patrons de teleconnexió.....	12
1.3. Aproximació a l'àrea d'estudi: la ciutat de Barcelona	15
1.4. Objecte d'estudi.....	18
1.5. Objectius.....	19
1.5.1. Objectiu general.....	19
1.5.2. Objectius específics	19
1.6. Estat de la qüestió	19
2. METODOLOGIA.....	22
3. RESULTATS.....	25
3.1. Presentació	25
3.1.1. Mitjana i variabilitat de la sèrie mensual de precipitació de Barcelona (1786-2014).....	25
3.1.2. Correlacions entre els índexs de teleconnexió i la sèrie mensual de precipitació de Barcelona.....	29
3.2. Discussió	35
4. CONCLUSIONS	38
5. REFERÈNCIES	40

ÍNDIX DE FIGURES, TAULES I GRÀFICS

FIGURES

Figura 1. Distribució mundial del Clima Mediterrani	pàg. 9
Figura 1b. Classificació climàtica a Catalunya.....	pàg. 11
Figura 1c. Precipitació mitjana anual a Barcelona.....	pàg. 12
Figura 2. Fase positiva (esquerra) i fase negativa (dreta) de la NAO.	pàg. 13
Figura 3. Fase positiva (esquerra) i fase negativa (dreta) de la WeMO...	pàg. 14
Figura 4. Mapa topogràfic de la ciutat de Barcelona	pàg. 17
Figura 4b. Localització geogràfica de Barcelona dins d'Europa	pàg. 18
Figura 5. Regionalització de la PI segons la precipitació	pàg. 20

TAULES

Taula 1. Fórmules per al càlcul dels diferents índexs	pàg. 24
Taula 2. Significació estadística, al 95% del nivell de confiança (*)	pàg. 26
Taula 3. Valors del CV i del S1 de la pluviometria anual a Barcelona	pàg. 29
Taula 4. Coeficients de correlació del NAOi el WeMOi	pàg. 30
Taula 5. Mitjana de precipitació a Barcelona dels 30 anys (-) (+) índexs .	pàg. 34

GRÀFICS

Gràfic 1. Pluviometria anual a Barcelona (1786-2014).....	pàg. 25
Gràfic 2. Anomalies de la precipitació respecte a la mitjana anual	pàg. 26
Gràfic 3. Pluviometria mitjana estacional a Barcelona (1786-2014).....	pàg. 27
Gràfic 4. Pluviometria mitjana mensual a Barcelona (1786-2014).....	pàg. 27
Gràfic 5. Pluviometria mitjana anual per subperíodes (1786-2014)	pàg. 28
Gràfic 6. Pluviometria mitjana estacional a Barcelona (1851-1880).....	pàg. 28
Gràfic 7. WeMOi i precipitació desembre; NAOi i precipitació gener.....	pàg. 31
Gràfic 8. WeMOi i precipitació hivern; NAOi i precipitació a l'hivern.....	pàg. 32
Gràfic 9. WeMOi i precipitació desembre; WeMOi i precipitació octubre.	pàg. 32
Gràfic 10. NAOi i precipitació maig; NAOi i precipitació gener	pàg. 33
Gràfic 11. NAOi i precipitació setembre; WeMOi i precipitació juliol.....	pàg. 33

GLOSSARI D'ACRÒNIMS I ABREVIATURES.

CV. Coeficient de variació.

Dr. Doctor.

ENSO. El Niño Oscil·lació del sud.

ln. Logaritme neperià.

mm. Mil·límetres.

MO. Oscil·lació de la Mediterrània.

NAO. Oscil·lació de l'Atlàntic Nord.

NAOi. Índex de l'Oscil·lació de l'Atlàntic Nord.

NOAA. Administració Nacional Oceànica i Atmosfèrica.

NPO. Oscil·lació del Pacífic Nord.

PI. Península Ibèrica.

PIB. Producte Interior Brut.

QBO. Oscil·lació Quasi-Biennal.

r. Coeficient de correlació de Pearson.

r². Coeficient de determinació.

RPE. Règim pluviomètric estacional.

s. Desviació típica.

S₁. Índex de disparitat consecutiva.

S². Variància.

SMC. Servei Meteorològic de Catalunya.

TPHE. Tardor-Primavera-Hivern-Estiu.

TPEH. Tardor-Primavera-Estiu-Hivern.

UB. Universitat de Barcelona.

\bar{x} . Mitjana aritmètica.

WeMO. Oscil·lació de la Mediterrània Occidental.

WeMOi. Índex de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental.

Resum

L'any 2015, el Servei Meteorològic de Catalunya va publicar la sèrie mensual de precipitacions de la ciutat de Barcelona (1786-2014), una de les més llargues que hi ha a l'actualitat, gràcies a un bon esforç de climatologia històrica. Aquest fet, lligat a que la latitud de Barcelona fa frontera entre la influència del **NAOi** i del **WEMOi**, obre una línia de recerca força interessant per estudiar quin dels dos índexs afecta amb més intensitat a Barcelona i, a més, tractar de relacionar-los amb altres índexs pluviomètrics com el Coeficient de Variació (CV) i l'Índex de Disparitat Consecutiva (S_1). Per això, es farà un anàlisi estacional i mensual any a any, dividint les sèries estudiades en subperíodes, i buscant correlacions entre la sèrie mensual de precipitació de Barcelona i els índexs de teleconnexió per tractar de determinar quin dels dos influeix més a la precipitació de Barcelona.

Paraules clau: NAO, WeMO, Barcelona, Precipitació, Coeficient de correlació(r).

Abstract

In 2015, the Servei Meteorològic de Catalunya has published the monthly precipitation series in the city of Barcelona (1786-2014), one of the longest that exist today, thanks to a great effort of weather history. This fact, linked to the latitude of Barcelona makes border between the influence of **NAOi** and **WeMOi**, opens a line of research very interesting to study which of these two index affect more intensely in Barcelona and also try to match them with other indexes of rainfall as the Coefficient of Variation (CV) and Disparity index Consecutive (S_1). Therefore, there will be made a seasonal and monthly analysis year on year, dividing the studied series in sub-periods, and looking for correlations between monthly series of precipitation in Barcelona and teleconnection indexes to try to determine which of the two influences more in the precipitation of Barcelona.

Key Words: NAO, WeMO, Barcelona, Rainfall, Correlation coefficient (r).

Agraïments

En primer lloc m'agradaria destacar al meu tutor del Treball Final de Grau, el Dr. Xavier Úbeda Cartañá, per la paciència i dedicació que ha tingut amb mi i amb el meu treball, emmarcat en una àrea de recerca de la que no és especialista, i la rapidesa i celeritat amb que ha fet cadascuna de les correccions i revisions pertinents.

A més, el Dr. Joan Albert López-Bustins m'ha ajudat molt, tant en el moment d'escollir el tema del Treball Final de Grau com alhora de desenvolupar-lo, sobretot aquells dies en que estava encallat en el mateix. Així doncs, vull posar de manifest que sense la recerca del Grup de Climatologia de la Universitat de Barcelona, aquest treball no es podria haver portat a terme, ja que he fet servir diversos articles de la producció científica d'aquest grup investigador, i, sobretot, les dades del WeMOi des de 1821 fins a 2013.

El meu company de classe Marc Lemus Cánovas, que ha realitzat un Treball Final de Grau excel·lent, sempre ha atès els meus dubtes sobre qüestions del meu treball amb gran interès i amabilitat. Li auguro un gran futur com a investigador en l'àrea de recerca de climatologia.

També és necessari remarcar que la realització del treball ha estat possible gràcies a l'Àrea de Climatologia del Servei Meteorològic de Catalunya, encapçalada per Marc Prohom i Duran, que amb un gran esforç de recerca en climatologia històrica han pogut reconstruir la sèrie mensual de precipitacions de Barcelona (1786-2014) en la que es basa aquest treball.

Finalment, no he de deixar de banda l'amabilitat i hospitalitat d'Enric i Mercè, propietaris de l'establiment d'allotjament rural Ca La Pauleta a l'Espluga de Francolí, on he passat llargs caps de setmana fent l'anàlisi estadística del treball.

Motivació

L'any 2015, el Servei Meteorològic de Catalunya va publicar la sèrie mensual de precipitacions de la ciutat de Barcelona (1786-2014), una de les més llargues que hi ha a l'actualitat, gràcies a un bon esforç de climatologia històrica. Aquest fet, lligat a que a la ciutat de Barcelona no està clar el patró de teleconnexió que més afecta a la variabilitat temporal de les precipitacions, obrien una via de recerca en aquesta línia.

A més, el meu gust per l'estadística i el tractament de dades, així com la climatologia i el canvi global, i la bona relació amb el Dr. Joan Albert López-Bustins, m'han carregat de motivació per afrontar una anàlisi original, tenint en compte que la publicació de la sèrie llarga de precipitació de la ciutat de Barcelona és força recent.

Si més no, trobo força interessant que la recerca en aquest sentit pugui servir per fer prediccions de riades i sequeres, i al mateix temps, ajudar a les administracions i als òrgans de planificació territorial i sectorial a millorar la gestió dels recursos hídrics i l'adequació de les infraestructures per prevenir futures inundacions. Evidentment, els patrons de teleconnexió que veurem més endavant, poden tenir moltes altres aplicacions, per el que la recerca en aquesta direcció pot esdevenir clau per trobar noves correlacions en el futur.

1. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS

És necessari, abans d'entrar en matèria, fer una introducció multiescalar a l'àrea d'estudi, dels trets més generals als particulars. Així doncs, no és l'objectiu d'aquest treball fer una tesi doctoral sobre el clima mediterrani, però sí que es donaran els trets característics del mateix, per després passar a enumerar els principals patrons de teleconnexió existents i descriure, amb més detall, els dos que s'han utilitzat per a la realització del treball, el NAOi i el WeMOi. Per finalitzar aquest apartat, i com que l'anàlisi gira al voltant de la sèrie mensual de precipitació de la ciutat de Barcelona, es farà una ràpida caracterització física i sociodemogràfica de la capital comtal.

1.1. El clima mediterrani

El clima mediterrani és propi de les àrees costaneres de gairebé tota la conca mediterrània, des de la península d'Anatòlia a la península Ibèrica (on el clima mediterrani està present a la major part de la mateixa) i d'altres zones del planeta amb latituds semblants (entre 35° i 45°N, a l'hemisferi nord; i 30° i 40°S, a l'hemisferi sud), com són la regió de Califòrnia a Amèrica del Nord, la part central de Xile, el sud-oest de Sudàfrica i el sud i el sud-oest d'Austràlia (Figura 1).



Figura 1. Distribució mundial del Clima Mediterrani. Font: (Pasho *et al.*, 2011).

Doncs bé, com a trets generals, el clima mediterrani es caracteritza per la coincidència d'una estació marcadament seca a l'estiu, el que dona lloc a uns mesos estivals amb escassetat d'aigua que originen paisatges marrons, groguencs, on el verd, si és que el trobem, és obscur i grisós (Martín-Vide i Olcina, 2001).

La precipitació no és freqüent ni abundant, i se sol presentar de manera torrencial, concentrada en pocs dies, hores i minuts. Aquesta variabilitat espacio-temporal pluviomètrica té repercussions socioeconòmiques, ja sigui per la seva presència, sobtada i desmesurada, o per la seva absència, sovint perllongada. Totals pluviomètrics anuals al voltant de 500 mm amb un mal repartiment al llarg de cada any en particular són bastant comuns en els climes mediterranis. Les temperatures poden experimentar contrastos notables, amb amplituds tèrmiques més elevades a l'interior que a la costa, tant diària com anualment, però pocs cops tenen repercussions de gravetat.

Com a pauta general, la circulació de component oest, almenys en altura, constitueix el patró general de la dinàmica atmosfèrica més freqüent a la meitat freda de l'any, mentre les altes pressions subtropicals en altura dominen a la meitat càlida. Són, així, masses de procedència atlàntica, desnaturalitzades progressivament quant al seu contingut d'humitat al penetrar a la península Ibèrica, relativament freqüents en els mesos no càlids, encara que amb grans variacions d'any en any. A l'allunyar-se de l'Atlàntic, els temporals es tornen més irregulars i menys persistents, introduint a la dinàmica atmosfèrica lligada a les aigües del Mediterrani una major torrencialitat pluviomètrica i una menor freqüència de les ratxes plujoses llargues (Martín-Vide i Olcina, 2001).

Els climes mediterranis presenten una gran varietat, reflex dels contrastos i la diversitat geogràfica del territori. Només a l'estat espanyol podem trobar gran diversitat de climes mediterranis, com: submediterranis, mediterranis continentals, mediterranis meridionals, mediterranis àrids o del sud-est, mediterranis de muntanya o mediterranis de façana oriental. Com que Barcelona es troba emmarcada geogràficament en aquesta última classificació, es repassaran les característiques generals d'aquest subtipus de clima mediterrani.

1.1.1. Climes mediterranis de façana oriental

Els climes mediterranis de façana oriental ocupen la franja litoral i les terres prelitorals pròximes i no elevades que les recolzen des del flanc oriental de la península Ibèrica des de la frontera amb França fins a l'alacantina serra de Bèrnia, així com les illes Balears. La principal característica distintiva d'aquest clima és l'existència d'un acusat màxim pluviomètric a la tardor, amb l'estiu com

l'estació més seca, acompanyada del hivern, també bastant sec (Martín-Vide i Olcina, 2001).

Els valors mitjans de precipitació anual per aquest clima ronden els 500 mm, però majoritàriament concentrada en pocs dies. No són estranyes les jornades amb precipitacions per sobre dels 100 mm, amb major freqüència en la comarca valenciana de La Safor, pel que s'han datat en les darreres dècades un llarg llistat d'inundacions, algunes amb conseqüències fatals, i períodes de sequeres molt acusats, on l'escassetat d'aigua ha sigut extrema i el nivell dels embassaments s'ha situat en valors per sota del 20% de la seva capacitat.

Les temperatures són suaus en hivern, amb rara presència de gelades, que al litoral només es donen amb severes ones de fred procedents del nord-est. A l'estiu les temperatures són moderadament altes, amb temperatures mínimes per sobre dels 20°C en la majoria de les jornades, el que dóna un cert regust tropical a les nits estivals (Martín-Vide i Olcina, 2001).

La ciutat de Barcelona es troba emmarcada en el clima mediterrani de façana oriental. A escala catalana, es podria traduir com clima mediterrani litoral central (figura 1b). Aquest subtípus de clima es caracteritza per tenir màxims pluviomètrics a la tardor, i l'estiu com estació seca, amb valors de precipitació semblants a l'hivern.

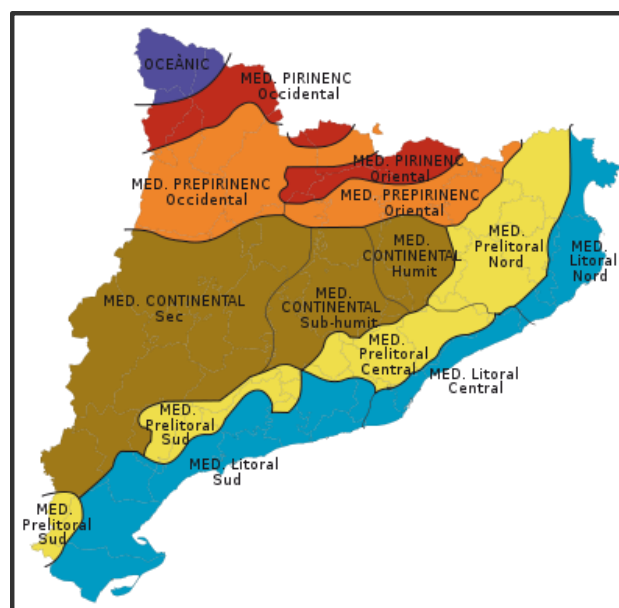


Figura 1b. Classificació climàtica a Catalunya.
Font: (Martín-Vide i Olcina, 2001).

La precipitació mitjana a la capital catalana oscil·la entre els poc més de 500 mm anuals de la zona del Fòrum de les cultures, i els vora 700 mm anuals del Tibidabo, passant pels vora 600 mm de la part costanera i Ciutat Vella i els 600-650 mm de la zona alta de la ciutat.

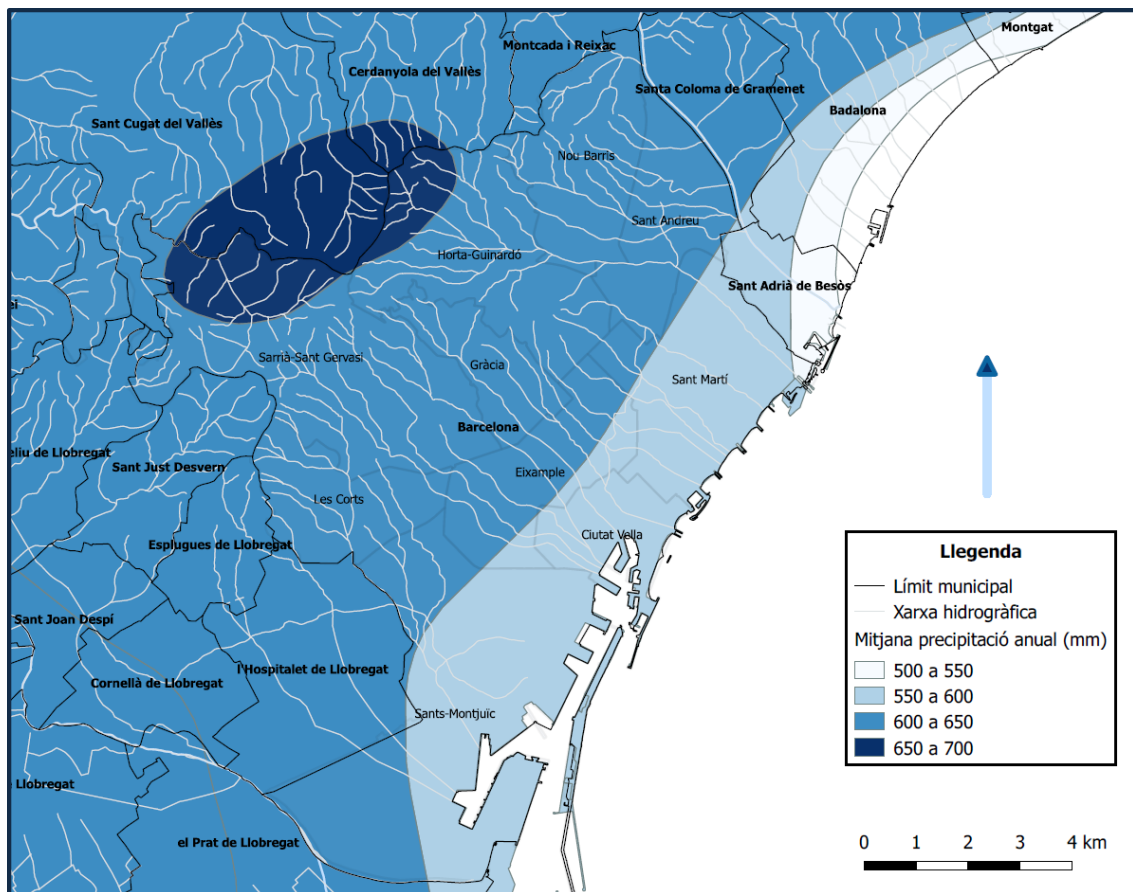


Figura 1c. Precipitació mitjana anual a Barcelona. Font: Elaboració pròpia a partir de dades de l'Atlas Climàtic de Catalunya

1.2. Els patrons de teleconnexió

Els patrons de teleconnexió són indicadors numèrics de connexions a distància en els sistemes atmosfèric i oceànic. Aquestes connexions es detecten, sovint, amb els comportaments sincrònics entre alguns centres d'acció, anticiclons o depressions, més o menys allunyats a diferents escales temporals (López-Bustins *et al.*, 2014).

Existeixen diversos tipus de teleconnexions atmosfèriques a distància. Es citaran, d'escala petita a més gran, algunes de les més rellevants, per després descriure, amb cert detall, els dos patrons de teleconnexió que es faran servir en aquest treball, la NAO i la WeMO:

- Escala global. ENSO/El Niño; Oscil·lació Quasi-biennal (QBO).
- Global-hemisfèrica. Oscil·lació de Madden-Julian; Oscil·lació del Pacífic Nord (NPO).
- Hemisfèrica-continental. **Oscil·lació de l'Atlàntic Nord (NAO)**; Atlàntic Est (EA).
- Continental-regional. Oscil·lació de la Mediterrània (MO).
- Regional. **Oscil·lació de la Mediterrània Occidental (WeMO)**.

L'oscil·lació de l'atlàntic nord (NAO) és un patró de teleconnexió que es calcula a partir de la diferència entre les pressions atmosfèriques mitjanes mensuals normalitzades en superfície de dos punts representatius de les cèl·lules dels dipòls (per exemple: Lisboa, per a l'anticicló de les Açores, i Reykjavík, per a la baixa d'Islàndia), de les que s'extreu un valor positiu o negatiu adimensional. Així doncs, la fase positiva o normal de la NAO correspon a una baixa d'Islàndia profunda i un potent anticicló de les Açores (figura 2), que provoca un flux intens de vents de l'oest al feix latitudinal que separa ambdós centres d'acció (Martín-Vide, 2002), i explica les precipitacions del nord i la costa cantàbrica de la península Ibèrica. La fase negativa del patró es caracteritza per altes pressions a Islàndia i una borrasca al golf de Cadis, entre l'arxipèlag de les Açores i la península Ibèrica (figura 2), i genera precipitacions abundants en el centre i el sud-oest de la península Ibèrica, ja que aquesta part de la mateixa es veu afectada per vents de component marítima (Atlàntic). Llavors, quan més positiva és la NAO, menys plou en el sud-oest i centre de la península i més plou al nord i en la costa cantàbrica, mentre que quan més negativa és la NAO es dona la casuística inversa a la citada.

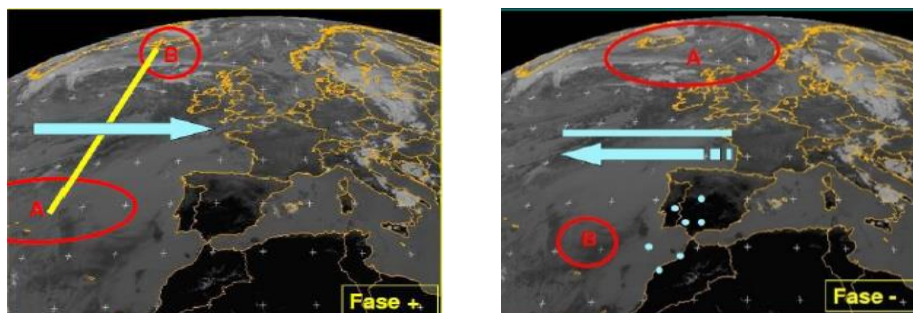


Figura 2. Fase positiva (esquerra) i fase negativa (dreta) de la NAO. Font: (Martín-Vide i López Bustins, 2006).

Però com que la NAO i la precipitació a la façana oriental de la península ibèrica no estan ben correlacionades, es va optar, gràcies a la qualitat de les sèries llargues de pressió atmosfèrica que hi ha a San Fernando (Cadis) i a Pàdua (Itàlia), i a un gran esforç d'homogeneïtzació de les mateixes¹, per trobar un altre patró de teleconnexió amb més relació amb les precipitacions en aquesta àrea, seguint el mateix esquema que amb la NAO, però amb diferents dipols (San Fernando, per l'anticicló del golf de Cadis, i Pàdua, per la baixa de Ligúria): és el que es coneix com l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental, WeMO (Martin-Vide i López-Bustins, 2006). La fase positiva de la WeMO es caracteritza per altes pressions a San Fernando i baixes pressions a Pàdua (figura 3), i explica



Figura 3. Fase positiva (esquerra) i fase negativa (dreta) de la WeMO. Font: (Martin-Vide i López-Bustins, 2006).

força bé les precipitacions al golf de Biscaia. En canvi, la fase negativa de la WeMO ve determinada per una borrasca a San Fernando i un anticicló a Pàdua (figura 3), que origina precipitacions a la façana oriental de la península Ibèrica al veure's afectada per vents de l'est de component marítima (mar Mediterrània).

Així doncs, es posarà un exemple de càlcul per al WeMOi mensual, igualment vàlid per al NAOi, però canviant els valors dels respectius dipols en qüestió. Llavors, a cada valor mitjà mensual de pressió atmosfèrica de San Fernando se li resta el valor de la mitjana mensual del període (1821-2013) i es divideix per la desviació típica de la pressió mitjana mensual del període, obtenint la z de San Fernando. El mateix es fa per a Pàdua, obtenint la z de Pàdua. Finalment, per

¹ Cal destacar que s'ha fet un gran esforç d'homogeneïtzació de les sèries de pressió atmosfèrica per tal d'eliminar les senyals no climàtiques a les mateixes, tant a San Fernando com a Pàdua, ja que ambdues sèries presentaven algunes incompatibilitats temporals, canvis en els llocs d'observació, canvis instrumentals, o alguns dies sense dades.

obtenir el WeMOi mensual, es resta la z de Pàdua a la z de San Fernando:

$$\text{WeMOi} = ((\text{PSF}^2 - \text{M}^3\text{SF}) / \text{S}^4\text{SF}) - ((\text{PP}^5 - \text{MP}) / \text{SP} = z\text{SF} - z\text{P}.$$

Per altra banda, un altre tipus d'anàlisi, podria ser, gràcies a les sèries llargues i d'alta qualitat de precipitació i temperatura de la ciutat de Barcelona, estudiar l'evolució dels períodes extrems, seques i precipitacions torrencials, en els dos darrers segles (Coll *et al.*, 2016), i cercar si tenen relació amb períodes de WeMOi negatiu o positiu, però queda lluny de l'abast d'aquest Treball Final de Grau.

1.3. Aproximació a l'àrea d'estudi: la ciutat de Barcelona

L'any 2015, el Servei Meteorològic de Catalunya va publicar la sèrie mensual de precipitació de la ciutat de Barcelona (1786-2014), una de les més llargues que hi ha a l'actualitat, gràcies a un bon esforç de climatologia històrica, a partir de la qual s'estructura l'anàlisi estadística del treball.

És per això, que en aquest apartat, es tractarà, primer, de fer una breu aproximació geogràfica a la ciutat de Barcelona, i després, donar unes pinzellades de com s'ha portat a terme la reconstrucció de la sèrie mensual de precipitació a la ciutat de Barcelona.

Barcelona es troba delimitada molt clarament per elements físics: la serralada de Collserola al nord, la mar Mediterrània al sud, el riu Besòs a l'est i el riu Llobregat l'oest. Aquests accidents geogràfics han condicionat l'estructura, morfologia i desenvolupament de la ciutat al llarg del temps i han dificultat l'expansió de la ciutat, el que pot explicar que Barcelona i els municipis de la primera corona metropolitana tinguin densitats de població de les més elevades d'Europa i del món.

El territori del pla de Barcelona no fa estrictament cas al topònim homònim. En el cor de la ciutat, s'hi poden percebre tota una sèrie de turons testimoni claus per entendre la confecció dels barris o l'estructura de les comunicacions, des del

² Pressió atmosfèrica mitjana mensual a San Fernando.

³ Mitjana de la pressió atmosfèrica mensual del període.

⁴ Desviació típica de la pressió atmosfèrica mitjana mensual del període.

⁵ Pressió atmosfèrica mitjana mensual a Pàdua.

mont Tàber fins a la serralada de Collserola, passant per la muntanya màgica de Montjuïc o els turons d'Horta.

Al contrari que altres grans ciutats, la capital catalana no s'assenta a la llera d'un gran riu, pel que l'eficient gestió dels recursos hídrics esdevé un fenomen de suma importància per a les administracions metropolitanes, ja que les conques dels rius Besòs i Llobregat, i totes les rieres que discorrien pel pla de Barcelona, actualment soterrades, no són suficients per abastir a una de les àrees metropolitanes més poblades de la Unió Europea. D'aquí podem extreure una de les potencialitats de la recerca en el camp dels patrons de teleconnexió que afectin a la ciutat de Barcelona, i així poder preveure períodes de sequera o inundacions, entre altres utilitats.

Com es pot observar en la figura 4, l'accessibilitat de Barcelona al conjunt dels territoris de Catalunya és un fet clau per a la consideració de la ciutat comtal com a capital natural del principat, encara que no és ni de bon tros el centre geogràfic, que es troba a Pinós, a la comarca del Solsonès. A més, encara que s'ubica en una posició un tant perifèrica a l'estat espanyol, la ciutat té una importància estratègica per al país a l'estar situada en el corredor mediterrani, pel que aspira a aconseguir la capitalitat simbòlica de la Mediterrània Occidental.

Pel que fa a la **reconstrucció de les sèries mensuals i anuals de precipitació de Barcelona (1786-2014)**, s'ha fet servir, entre altres, el mètode HOMER (Caussinus i Mestre, 2004), que assumeix que cadascun dels valors de les sèries que formen el conjunt a homogeneïtzar pot ser descompost en un efecte climàtic, comú a totes elles, i un efecte d'estació, constant en cas de sèrie homogènia, variable en el temps en cas de sèrie inhomogènia (Prohom *et al.*, 2015). HOMER es un mètode d'homogeneïtat relativa, és a dir, necessita sèries de referència que posin a prova a la sèrie candidata, la de Barcelona en aquest cas (Coll *et al.*, 2016). Així doncs, s'ha hagut de fer un important esforç d'homogeneïtzació de les dades, ja que en el període 1786-1914 s'obtenien de diferents punts de Ciutat Vella, pràcticament a nivell del mar, i a partir de 1914 es recullen les de l'Observatori Fabra, situat en la serralada de Collserola a uns 415 m d'alçada, amb les diferències de precipitació que el factor altitud origina (figura 4b). Per tant, s'ha comparat la sèrie de Barcelona amb altres punts del litoral mediterrani nord-occidental, per trobar períodes comuns i així ajustar millor les dades.

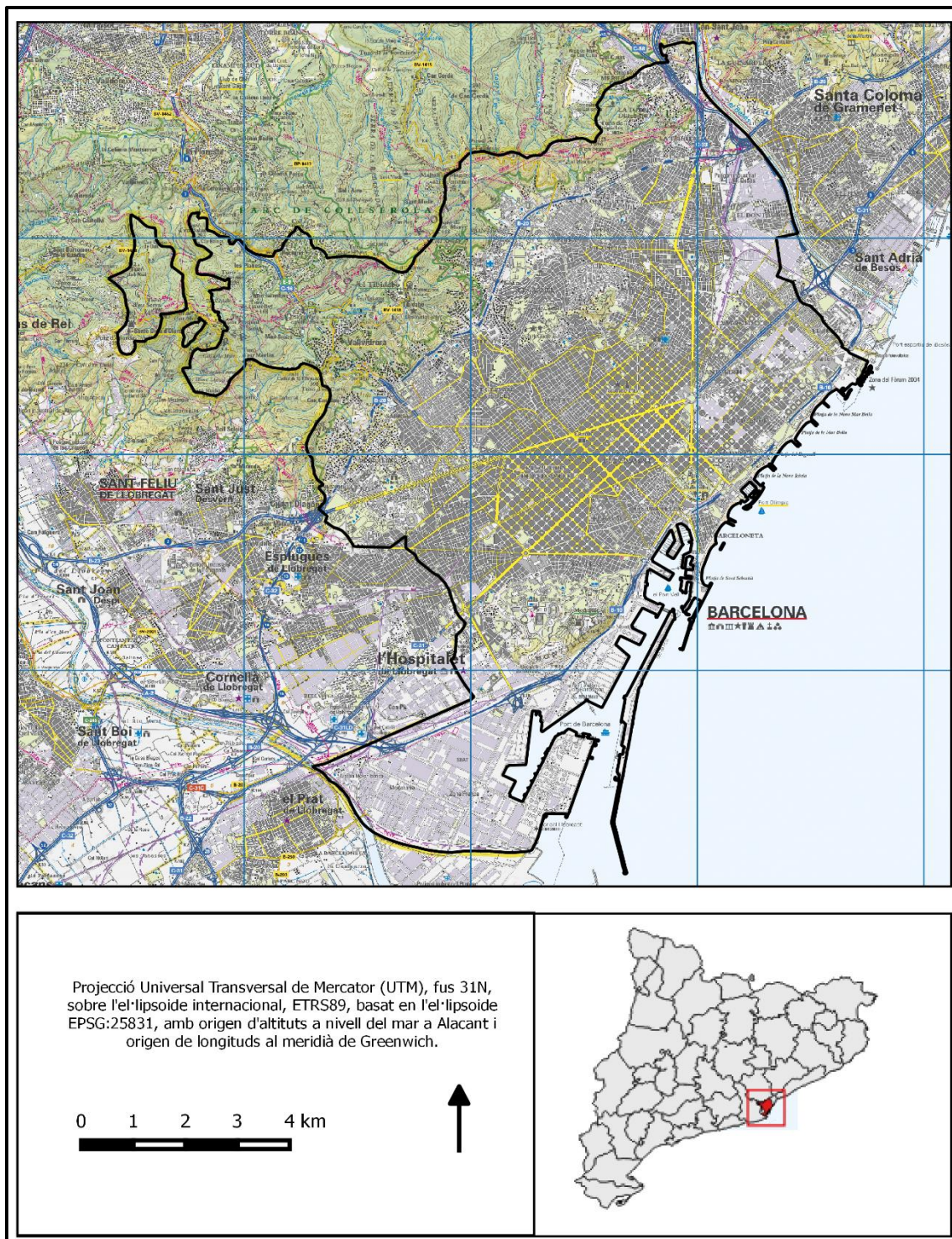


Figura 4. Mapa topogràfic de la ciutat de Barcelona i ubicació respecte al conjunt de Catalunya.
 Font: Elaboració pròpia a partir de dades del ICGC.

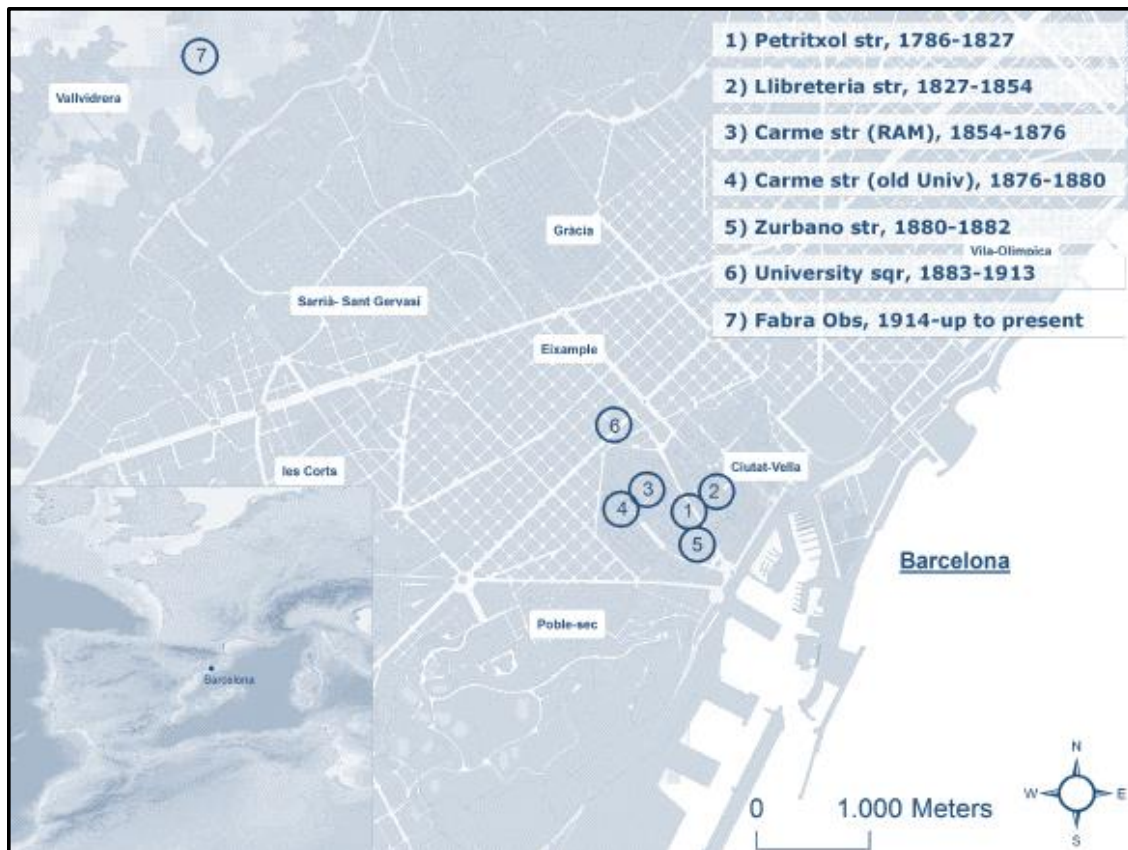


Figura 4b. Localització geogràfica de Barcelona dins d'Europa, i, en detall, dels observatoris situats a la ciutat i el segment de dades utilitzat per a la composició de la sèrie final. Font: (Prohom *et al.*, 2015).

1.4. Objecte d'estudi

L'objecte d'estudi d'aquest Treball Final de Grau se centra en **estudiar la variabilitat de la precipitació en la ciutat de Barcelona i trobar les relacions de la mateixa amb els índexs de teleconnexió NAOi i WeMOi.**

Cal destacar, que si bé en aquest treball els índexs de teleconnexió NAOi i WeMOi s'han fet servir per explicar la variabilitat de la precipitació de la sèrie mensual de Barcelona, es poden fer servir per a altres tipus d'anàlisi. Per citar alguns exemples, aquests índexs es poden emprar per determinar la variabilitat del poder erosiu de la precipitació, bàsic per portar a terme polítiques de conservació de sòls (Angulo-Martínez i Beguería, 2012); en la dendrocronologia, per explicar la variabilitat espacio-temporal dels anells de creixement del *Pinus halepensis* (Pasho *et al.*, 2011); o en la classificació i estudi dels allaus (García-Sellés *et al.*, 2010).

1.5. Objectius

1.5.1. Objectiu general

Determinar quin índex de teleconnexió (NAOi o WeMOi) influeix més directament en la variabilitat temporal de la precipitació a la ciutat de Barcelona.

1.5.2. Objectius específics

- ✓ Analitzar i cercar correlacions entre les dades mensuals de precipitació de la ciutat de Barcelona (1786-2014), l'índex NAO (1821-2015) i l'índex WeMO (1821-2013).
- ✓ Esbrinar, mitjançant la classificació de la sèrie mensual de precipitació de Barcelona (1786-2014) en subperíodes de 30 anys, si en tots ells es manté el mateix règim pluviomètric estacional.
- ✓ Dividir en subperíodes de 30 anys els índexs de teleconnexió (NAOi i WeMOi) per seguir l'evolució de les correlacions dels mateixos amb la sèrie mensual de precipitació de Barcelona entre el 1821 i el 2013.

1.6. Estat de la qüestió

Després d'haver presentat els principals patrons de teleconnexió que influeixen en la variabilitat espacio-temporal de les precipitacions a la península Ibèrica, és el moment de fer un repàs de la recerca en aquest sentit en els darrers anys. Doncs bé, en primer lloc, cal esmentar que la validesa d'aquests índexs presenta un major grau de significació per al semestre fred de l'any, d'octubre a març, que per al càlid, d'abril a setembre (Martín-Vide i López-Bustins, 2006).

D'aquesta manera, es pot afirmar que la fase negativa de la NAO origina precipitacions abundants en el centre i sud-oest peninsular, i seques en el nord i la costa cantàbrica. La fase positiva de la NAO presenta precipitacions abundants en el nord i la costa cantàbrica (encara que amb un baix grau de significació estadística), i seques en el centre i sud-oest peninsular (figura 5).

Per la seva banda, la fase positiva de la WeMO origina precipitacions abundants en el golf de Biscaia (millor correlacionades amb aquest patró de teleconnexió que amb la NAO) i seques en la façana oriental de la península Ibèrica. Mentre que la fase negativa de la WeMO origina precipitacions en la vessant mediterrània de la península Ibèrica i seques en la costa cantàbrica (figura 5).

Es destacable també que quan el índex WeMO diari és positiu, no s'hi donaran precipitacions torrencials de més de 100 mm, al 95% del nivell de confiança, en qualsevol punt de la façana mediterrània. Si el WeMOi és menor que -4, hi haurà un 80% de probabilitats de pluja al 95% del nivell de confiança en qualsevol observatori situat a la costa Mediterrània entre Màlaga i Perpinyà.

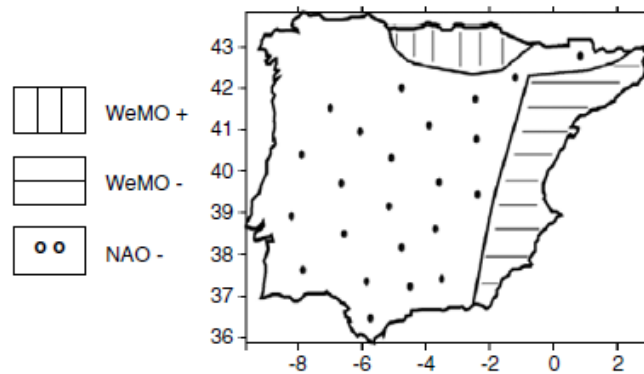


Figura 5. Regionalització de la PI segons la precipitació determinada per la NAO i la WeMO d'octubre a març. Font: (Martín-Vide i López-Bustins, 2006).

Pel que fa a la sèrie mensual de precipitacions de Barcelona (1786-2014) es poden extreure dos períodes llargs de sequeres (1812-1838 i 1997-2009), als quals hi va associat un període més curt de sequeres extremes (1823-1824 i 2006-2008 respectivament). Per altra banda, trobem un període molt humit (1971-1973) a dintre del qual hi ha un període extremadament humit (1971-1972).

Cal destacar que el període 1812-1838 és considerat una mega-sequera extrema (Coll i Aguilar *et al.*, 2016). Tot i així, es consideren les sequeres un 13% més severes en els darrers 50 anys en relació a la resta del període d'estudi. A col·lació amb aquests resultats, es precis nomenar la sequera de 2006-2008 per les seves greus repercussions a escala econòmica i social a la ciutat de Barcelona. Els embassaments es van situar a menys del 20% de la seva capacitat, pel que es van fer campanyes de sensibilització per un ús racional de l'aigua, així com que es va prohibir l'aigua per a les piscines, o per regar places i jardins públics. Aquesta sequera va tenir un cost estimat per a la ciutat de Barcelona de vora uns 500 milions d'euros (Coll *et al.*, 2016).

Si és cert que la precipitació és el principal impulsor de les sequeres, també s'ha de tenir en compte l'efecte de l'evapotranspiració. Com és conegut, l'escalfament global, del que no s'escapa ni la conca mediterrània ni la ciutat de Barcelona, va

originar que a la capital catalana la temperatura mitjana anual augmentés en $0,07^{\circ}\text{C}$ per dècada en el període 1961-2011. A més, aquest augment va ser més sever en els estius ($+ 0,09^{\circ}\text{C}$ per dècada) que en els hiverns ($+ 0,05^{\circ}\text{C}$ per dècada). Llavors queda clar que als estius, on les precipitacions són escasses i les temperatures cada cop més càlides, que les projeccions futures donaran condicions cada cop més àrides en la conca mediterrània, amb major severitat als estius que a la resta d'estacions.

Com s'ha apuntat amb anterioritat, quan la WeMO és positiva hi ha més probabilitat d'anys secs a la façana oriental mediterrània de la península Ibèrica, i quan és negativa hi ha més probabilitats d'anys amb precipitacions abundants. Això és compleix perfectament al període humit més amunt esmentat per a la ciutat de Barcelona (1971-72) on la mitjana del WeMOi dels semestres freds del període va ser $-0,39$.

2. METODOLOGIA

Aquest treball gira al voltant de l'anàlisi estadística. És per això que en aquest apartat bàsicament es tractarà de fer una aproximació amb cert nivell de detall sobre la manera en que s'ha portat a terme el tractament estadístic de les dades.

Abans de fer l'anàlisi estadística, però, s'han consultat diversos articles científics al portal ScienceDirect, que ens redirigeix a les revistes científiques amb major factor d'impacte i més citades de la comunitat científica internacional. El articles de més interès per a la realització del treball s'han pogut descarregar de la revista *International Journal of Climatology*, a més d'altres articles científics publicats en altres revistes, i llibres relacionats amb l'objecte d'estudi més amunt redactat, tots ells citats a l'apartat de referències.

Un cop assimilats alguns dels conceptes claus sobre els que pivoten els patrons de teleconnexió, era el moment de fer l'anàlisi estadística de les dades. S'ha basat en tres sèries: la **sèrie mensual de precipitació de Barcelona (1786-2014)**, descarregada en la pàgina web del Servei Meteorològic de Catalunya; el **WeMOi (1821-2013)**, descarregat en el portal d'internet del Grup de Climatologia de la Universitat de Barcelona; i el **NAOi (1821-2014)**, descarregat en la web del nord-americà Climate Prediction Center, òrgan que forma part de la NOAA (Administració Nacional Oceànica i Atmosfèrica).

Doncs bé, en primer lloc, s'ha analitzat la sèrie mensual de precipitacions de Barcelona (1786-2014). Llavors, fent servir el Microsoft Office Excel 2013, s'ha estudiat la mitjana i la variabilitat de la sèrie anual, estacional i mensualment, analitzant les anomalies en la mitjana anual de la precipitació, el règim pluviomètric estacional, i el càlcul de dos índexs: El Coeficient de Variació (CV), que avalua la variabilitat climàtica i ens serveix com a mesura de dispersió relativa, i que es calcula mitjançant l'obtenció del quocient entre la desviació tipus i la mitjana aritmètica de les dades en qüestió (taula 1) (Martín-Vide, 2002); i l'Índex de Disparitat Consecutiva (S_1), que s'empra per avaluar la irregularitat temporal de les sèries climàtiques, en aquest cas de precipitació, i es calcula fent la mitjana aritmètica dels valors absoluts dels logaritmes neperians dels quocients de cada valor i el precedent (taula 1). És precís matisar que s'han

hagut de modificar els valors mensuals de precipitació nul·la per 0,1 mm, per així poder calcular aquest índex (Martín-Vide, 2002).

El procés s'ha repetit establint subperíodes per observar l'evolució temporal de la variabilitat de la sèrie de precipitació de Barcelona. Aquesta, s'ha dividit en set subperíodes, cinc dels quals són de 30 anys, els centrals, mentre que els altres són de 35 anys el primer i 44 anys l'últim. El motiu d'aquesta elecció és poder ajustar-los a les dades del NAOi i el WeMOi, que comencen l'any 1821. La composició dels subperíodes és la següent: 1786-1820; 1821-1850; 1851-1880; 1881-1910; 1911-1940; 1941-1970 i 1971-2014.

El següent pas en l'anàlisi estadística ha sigut trobar la influència dels patrons de teleconnexió NAOi i WeMOi respecte a la precipitació de Barcelona, per el que s'ha calculat, també fent servir el Microsoft Office Excel 2013, el coeficient de correlació de Pearson (r) per a les dades mitjanes anuals, estacionals, i mensuals, per veure el comportament dels patrons de teleconnexió a diferents escales temporals, i poder trobar quin dels dos índexs influeix més en la precipitació a la ciutat de Barcelona, establint, a més, si la correlació és significativa al 95% o al 99% de nivell de confiança.

El mateix procés s'ha tornat a realitzar per als subperíodes establerts, en aquest cas sis, cinc de 30 anys i un, el darrer, de 43 anys, per poder estudiar l'evolució dels patrons amb canvis en el període d'anàlisi. En aquest cas, els subperíodes són els mateixos que s'han emprat per la sèrie mensual de precipitació, però obviant el primer, ja que en aquest interval de temps no disposem de dades del NAOi i el WeMOi. L'últim subperíode d'estudi (1971-2013) acaba en 2013 i no en 2014 perquè del WeMOi només hi ha dades fins al 2013, i per evitar possibles confusions entre els dos índexs s'ha optat per obviar l'any 2014 en la presentació i discussió dels resultats. El primer subperíode d'estudi (1821-1850), té alguns buits en els índexs NAOi i WeMOi mensuals, el que fa que les mitjanes estacionals i anuals dels anys amb buits no es puguin calcular, i els resultats obtinguts en aquest període perdin fiabilitat.

Finalment, per a tot el període d'estudi dels patrons de teleconnexió NAOi i WeMOi (1821-2013), s'han escollit els 30 anys més negatius i els 30 anys més positius de cada índex, i tant anual com estacional i mensualment, s'ha realitzat el test de la distribució *normal* per determinar si les mitjanes dels valors de

precipitació entre els valors més positius i negatius dels índexs eren similars o diferents estadísticament, i així poder corroborar si la precipitació és més abundant a Barcelona amb els 30 valors més positius o els 30 valors més negatius dels índexs.

El test de la distribució *normal* es calcula obtenint el quocient entre la diferència de les mitjanes dels dos períodes en valor absolut i l'arrel quadrada de la suma dels quocients de les variàncies de cada període i el nombre de dades de cadascun (taula 1). Si el resultat d'aquest test és major que 1,96, es pot afirmar que les mitjanes són estadísticament diferents al 95% de nivell de confiança ($\alpha=0,05$). Si no es compleix aquesta premissa, les mitjanes es consideraran estadísticament similars.

Cal posar de relleu que per als càlculs estacionals s'ha fet servir el següent criteri: Hivern (H), compostat per els mesos de desembre, gener i febrer; Primavera (P), per març, abril i maig; Estiu (E), per juny, juliol i agost; Tardor (T), per setembre, octubre i novembre.

Com es podrà observar en el següent apartat, aquestes anàlisis s'han il·lustrat en gràfics i taules per poder exposar els resultats obtinguts d'una manera precisa, concisa, i alhora entenedora.

Descripció	Fórmula
Índex de Disparitat Consecutiva (S₁)	$(\sum \ln (P_{i+1} / P_i)) / (n-1)$
Coefficient de Variació (CV)	(s/\bar{X})
Test de la distribució <i>normal</i>	$ \bar{X}_1 - \bar{X}_2 / \sqrt{[(S_1^2/n_1) + (S_2^2/n_2)]}$

Taula 1. Fórmules per al càlcul dels diferents índexs emprats a la metodologia. Font: Elaboració pròpia a partir de Martín-Vide (2002).

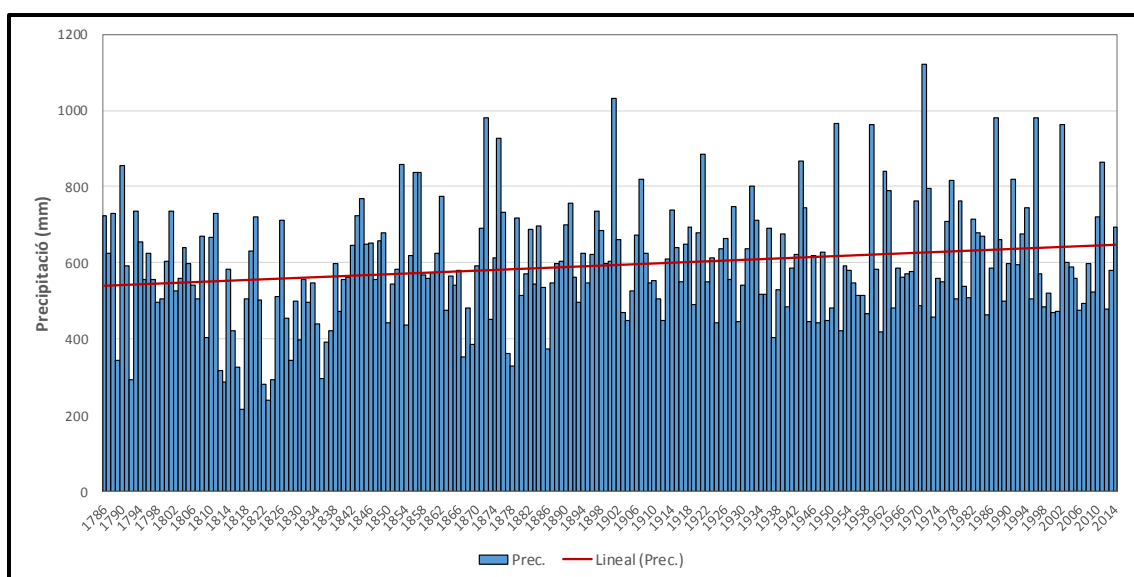
3. RESULTATS

Els resultats derivats de l'anàlisi estadística del treball es dividiran en dos blocs, un de **presentació** i un altre de **discussió**, i apareixeran en l'ordre en que van ser estudiades les sèries analitzades, és a dir, en primer lloc la sèrie mensual de precipitació de Barcelona (1786-2014), i en segon lloc la influència dels patrons de teleconnexió NAOi i WeMOi en la precipitació a Barcelona (1821-2013).

3.1. Presentació

3.1.1. Mitjana i variabilitat de la sèrie mensual de precipitació de Barcelona (1786-2014)

La ciutat de Barcelona ha tingut, al llarg del període 1786-2014, una precipitació mitjana anual de 592,5 mm (gràfic 1). Els anys més humits de tot el període d'estudi han sigut el 1971, 1901 i el 1986 amb 1.122,7, 1.030,6 i 982,4 mm respectivament, mentre que els anys més secs van ser el 1817, 1823 i 1822 amb 215,8, 239,4 i 280,5 mm respectivament.



Gràfic 1. Pluviometria anual a Barcelona (1786-2014). Font: Elaboració pròpia a partir de dades del SMC.

La tendència al llarg de tot el període és d'un augment de la precipitació de 0,5 mm per any, significatiu estadísticament al 95% del nivell de confiança (taula 2) segons el test de Mann-Kendall (Sneyers, 1992). Per estacions, l'augment de la precipitació a l'hivern també és significativa al 95% del nivell de confiança. En canvi, fent l'anàlisi per subperíodes, només és significativa al 95% del nivell de

confiança la reducció de precipitacions en el primer subperíode (1786-1820) segons el test de Mann-Kendall (Salmi *et al.*, 2002). Per subperíodes i estacions, trobem significatius al 95% del nivell de confiança els augments de la precipitació

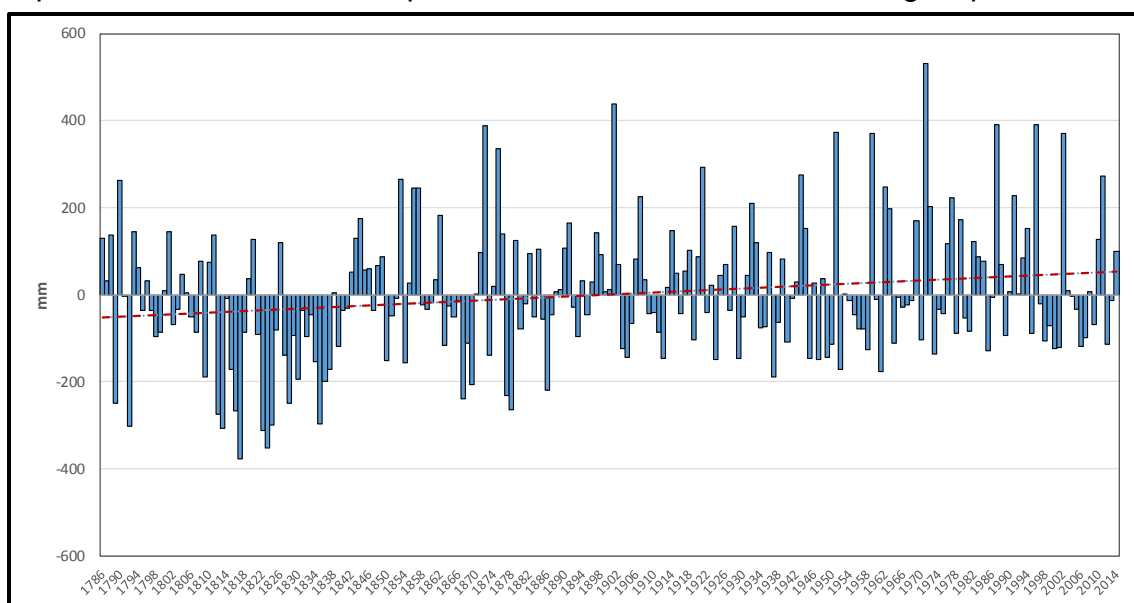
Període	1786-2014	1786-1820	1821-1850	1851-1880	1881-1910	1911-1940	1941-1970	1971-2014
Anual	*	*						
Hivern	*							
Primavera		*		*				
Estiu							*	
Tardor		*						

Taula 2. Significació estadística, al 95% del nivell de confiança (*), de l'evolució de la pluviometria a la ciutat de Barcelona, anual i estacional, per el període complet i els set subperíodes. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del SMC.

a la primavera (1786-1820 i 1851-1880) i a la tardor (1786-1820), mentre que la reducció de les precipitacions a l'estiu (1941-1970) és estadísticament significativa al 95% del nivell de confiança (taula 2).

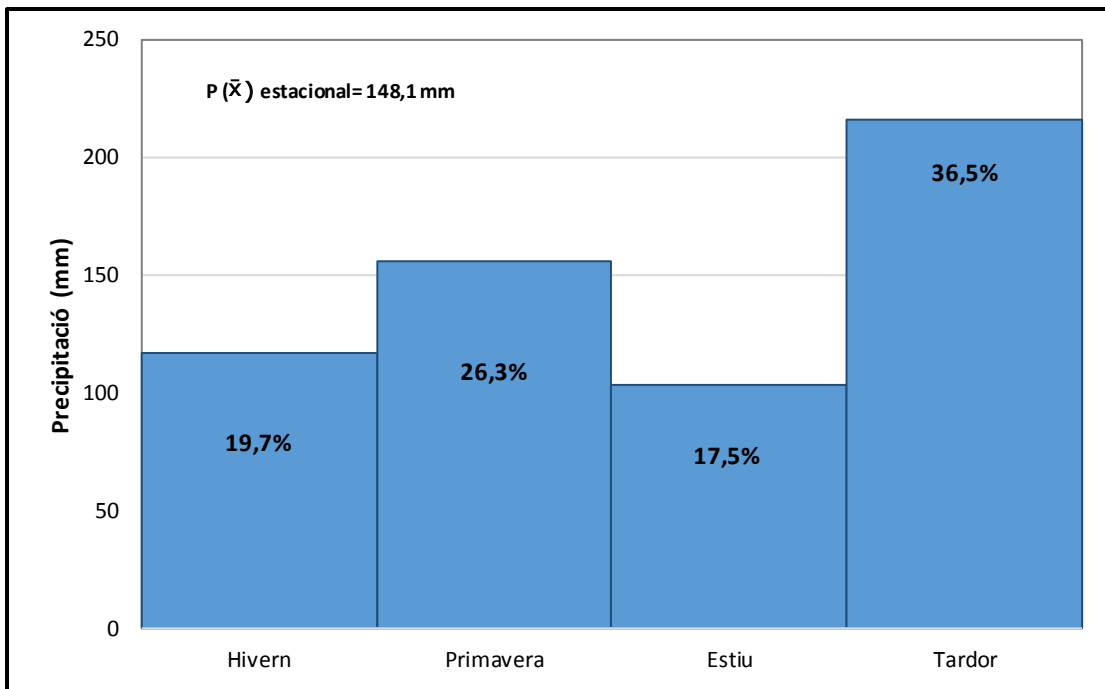
Com és típic del clima mediterrani, la precipitació presenta una variabilitat elevada (gràfic 2), situant-se gran part dels anys, en valors de precipitació molt per sobre o molt per sota de la mitjana del període d'estudi. Fins al punt de que els anys més humits s'apropen a doblar la mitjana anual de precipitacions del període, mentre que els anys més secs no arriben ni al 50% de la mateixa.

Un dels fets climàtics més sorprenents a la península Ibèrica és la gran varietat de règims pluviomètrics estacionals que s'hi poden trobar (Martín-Vide i Olcina, 2001). En el cas de la ciutat de Barcelona, i en el període d'estudi que abasta aquest treball, s'ha donat, per a la totalitat del mateix, el règim pluviomètric

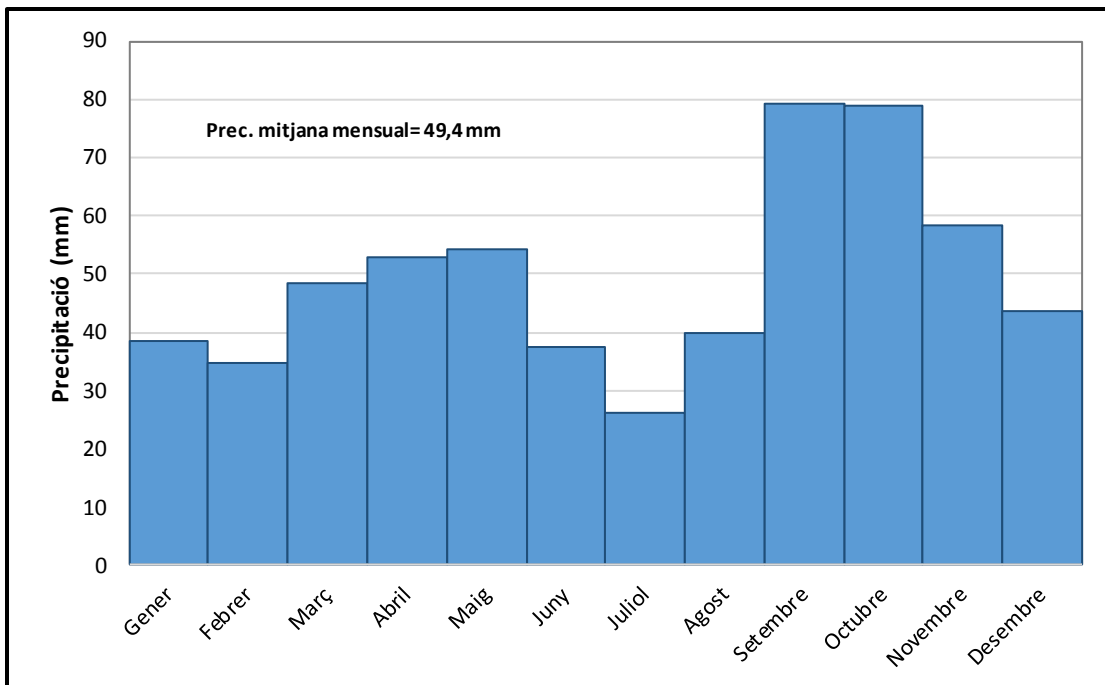


Gràfic 2. Anomàlies de la precipitació respecte a la mitjana anual a Barcelona (1786-2014). Font: Elaboració pròpia a partir de dades del SMC.

estacional TPHE (gràfic 3), un dels quatre típics de la vessant oriental mediterrània de la península Ibèrica, i Balears (Martín-Vide i Olcina, 2001). La tardor es considera l'estació plujosa amb un 36,5% de la precipitació mitjana



Gràfic 3. Pluviometria mitjana estacional a Barcelona (1786-2014). Font: Elaboració pròpia a partir de dades del SMC.



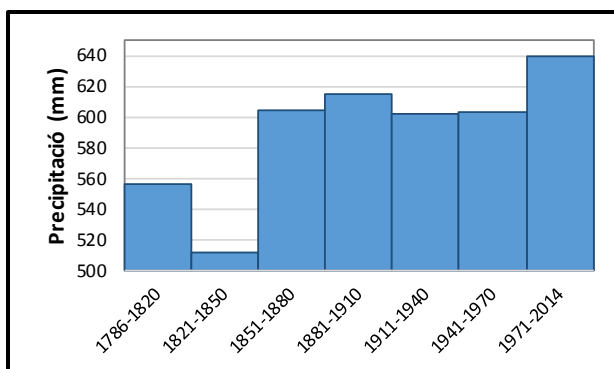
Gràfic 4. Pluviometria mitjana mensual a Barcelona (1786-2014). Font: Elaboració pròpia a partir de dades del SMC.

anual, mentre que l'estiu esdevé com l'estació seca amb un 17,5%, sense tenir diferències molt significatives amb l'hivern (19,7%).

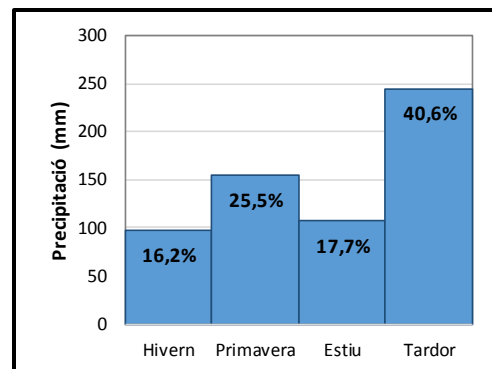
Per acabar aquest repàs a les dades de la sèrie mensual de precipitacions de Barcelona és precís mostrar la pluviometria mitjana mensual del període (gràfic 4). Destaquen setembre i octubre com a mesos més humits, mentre que el juliol és el mes més sec, però la resta de mesos de l'estiu i de l'hivern tenen valors molt semblants.

Dividint la sèrie en set subperíodes, es posa de manifest que les mitjanes de precipitació anual dels mateixos són bastant diferents (gràfic 5). Els dos primers subperíodes són els més àrids, amb mitjanes de precipitació anual a prop del llindar de 500 mm. Els 5 subperíodes restants sobrepassen els 600 mm de precipitació mitjana anual, destacant el darrer (1971-2014) amb 640,1 mm.

A més, hi ha un subperíode, el 1851-1880, on el règim pluviomètric estacional canvia del clàssic TPHE a TPEH (gràfic 6), també considerat aquest com un dels típics de la vessant oriental mediterrània de la península Ibèrica (Martín-Vide i Olcina, 2001).



Gràfic 5. Pluviometria mitjana anual per subperíodes a Barcelona (1786-2014). Font: Elaboració pròpia a partir de dades del SMC.



Gràfic 6. Pluviometria mitjana estacional a Barcelona (1851-1880). Font: Elaboració pròpia a partir de dades del SMC.

En altre ordre de prioritats, per avaluar la variabilitat climàtica de la sèrie mensual de precipitació de Barcelona s'ha fet servir una mesura de dispersió relativa: el **coeficient de variació** (taula 3). Doncs bé, per a tot el període d'estudi el resultat del mateix és 25,5%, catalogat com a moderat-alt, una mica per sota dels valors més extrems que es donen al litoral mediterrani de la península Ibèrica, que arriben fins a 40% al delta de l'Ebre o en alguns punts de la regió de Múrcia, però habitual en el litoral central català i les Illes Balears (Martín-Vide, 2002). El CV mostra força variabilitat entre els diferents subperíodes d'estudi. Així doncs, el subperíode amb un CV més elevat és el 1851-1880 (27,7%), curiosament, el subperíode en el qual s'altera el règim pluviomètric estacional. En el subperíode

1911-1940 hi ha un CV de 18,4%, és a dir, la variabilitat pluviomètrica a dintre del mateix es considera baixa, un valor més típic de la costa cantàbrica que del litoral mediterrani.

Per poder introduir la importància de l'ordenació cronològica de les dades s'ha fet servir l'índex de disparitat consecutiva (S_1). Aquest índex ens realça la irregularitat temporal de la sèrie, ja que el valor per a la totalitat del període d'estudi de la sèrie mensual de precipitacions de Barcelona és de 0,27 (taula 3) el que es considera moderat, i va en consonància amb els valors d'irregularitat temporal característics de la conca mediterrània (Martín-Vide, 2002). En l'anàlisi per subperíodes, hi ha dos que tenen un S_1 considerat moderat-alt (1786-1820 i 1941-1970), i un altre que presenta un valor considerat molt baix, de 0,19 (1881-1910), també més típic del litoral cantàbric que no del mediterrani.

Període	CV (%)	Variabilitat	S_1	Irregularitat temporal
1786-2014	25,5	Moderada-alta	0,27	Moderada
1786-1820	27,2	Moderada-alta	0,32	Moderada-alta
1821-1850	27,1	Moderada-alta	0,23	Baixa
1851-1880	27,7	Moderada-alta	0,30	Moderada-alta
1881-1910	19,7	Baixa	0,19	Molt Baixa
1911-1940	18,9	Baixa	0,24	Baixa
1941-1970	25,2	Moderada-alta	0,31	Moderada-alta
1971-2014	25,1	Moderada-alta	0,26	Moderada

Taula 3. Valors del CV i del S_1 de la pluviometria anual a Barcelona. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del SMC.

3.1.2. Correlacions entre els índexs de teleconnexió i la sèrie mensual de precipitació de Barcelona

Estudiada la sèrie mensual de precipitacions, és el moment de presentar l'anàlisi realitzada respecte a la influència dels patrons de teleconnexió NAO i WeMO en la mateixa. La manera que s'ha triat per tal d'il·lustrar aquesta qüestió és el format taula, recolzada, segons la utilitat, per alguns gràfics que posen de relleu els trets més rellevants.

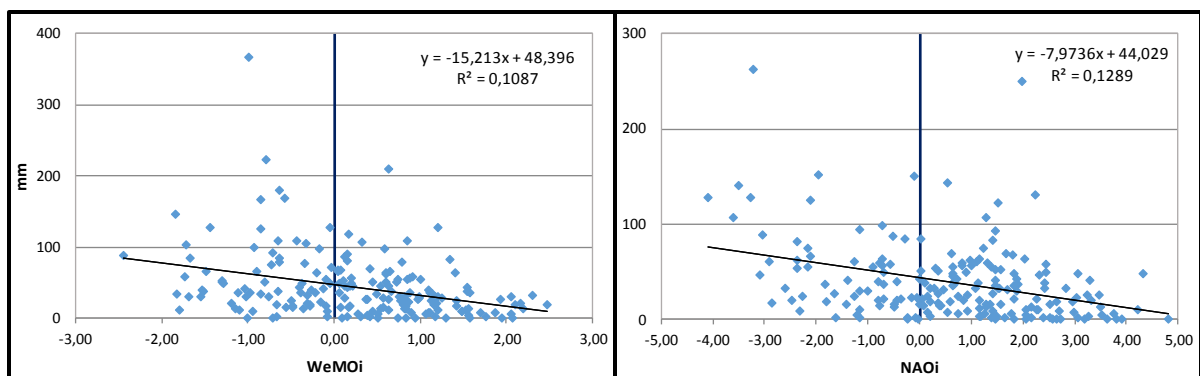
Doncs bé, la **taula 4** recull els coeficients de correlació de Pearson de la precipitació a Barcelona amb els índexs de teleconnexió NAOi i WeMOi, per al període 1821-2013 i també per a sis subperíodes del mateix, com s'ha posat de manifest en l'apartat de metodologia (2).

Període	1821-2013		1821-1850		1851-1880		1881-1910		1911-1940		1941-1970		1971-2013	
	NAOi	WeMOi	NAOi	WeMOi	NAOi	WeMOi	NAOi	WeMOi	NAOi	WeMOi	NAOi	WeMOi	NAOi	WeMOi
Anual	-0,10	-0,08	-0,08	0,27	-0,28	-0,35	0,10	-0,07	-0,06	-0,47*	-0,04	-0,13	-0,11	-0,13
Hivern	-0,29**	-0,30**	-0,13	-0,22	-0,35	-0,61**	-0,13	-0,15	-0,45*	-0,52**	-0,10	-0,12	-0,42**	-0,35*
Primavera	-0,16*	-0,03	0,01	0,37	0,01	-0,02	-0,17	0,14	-0,23	-0,33	-0,32	-0,15	-0,18	-0,14
Estiu	-0,04	-0,01	0,12	-0,34	-0,14	-0,23	-0,24	-0,15	-0,03	-0,18	-0,30	0,11	0,11	0,23
Tardor	-0,18*	-0,25**	-0,10	-0,02	-0,17	-0,09	-0,02	-0,22	-0,23	-0,34	-0,24	-0,41*	-0,19	-0,45**
Gener	-0,35**	-0,32**	-0,30	-0,19	-0,46*	-0,37*	0,06	-0,55**	-0,23	-0,36*	-0,60**	-0,06	-0,59**	-0,40**
Febrer	-0,31**	-0,23**	-0,44*	-0,29	-0,34	-0,33	-0,38*	0,02	-0,16	-0,29	-0,30	-0,18	-0,27	-0,45**
Març	-0,23**	-0,31**	-0,24	-0,24	-0,06	-0,15	-0,37*	-0,42*	-0,26	-0,40*	-0,04	-0,29	-0,39*	-0,45**
Abril	-0,23**	-0,07	-0,01	0,48*	-0,27	-0,19	-0,39*	-0,06	-0,08	-0,26	-0,39*	-0,31	-0,15	-0,03
Maig	-0,30**	-0,02	-0,27	0,04	-0,22	-0,10	-0,53**	-0,09	-0,33	-0,07	-0,32	-0,05	-0,31*	0,16
Juny	0,02	0,17*	-0,16	-0,01	0,28	0,18	0,00	0,06	0,15	0,29	-0,37*	0,11	0,05	0,24
Juliol	-0,14*	0,07	0,14	0,18	-0,26	0,09	-0,14	-0,29	-0,16	0,01	-0,04	0,37	-0,34*	0,08
Agost	-0,19**	0,07	-0,31	0,07	-0,36*	0,15	-0,30	0,10	-0,06	0,09	-0,34	0,14	0,10	-0,09
Setembre	-0,15*	-0,06	-0,36	-0,39*	-0,07	-0,17	0,29	0,26	-0,34	-0,09	-0,13	-0,28	-0,32*	0,10
Octubre	-0,16*	-0,28**	-0,23	0,22	-0,12	-0,27	0,01	-0,10	-0,20	-0,10	-0,28	-0,68**	-0,17	-0,38*
Novembre	-0,33**	-0,30**	-0,10	-0,23	-0,15	-0,27	-0,38*	-0,38*	-0,42*	-0,43*	-0,44*	-0,12	-0,41**	-0,40**
Desembre	-0,25**	-0,33**	-0,14	-0,28	-0,09	-0,38*	-0,31	-0,17	-0,57**	-0,68**	-0,34	-0,32	-0,19	-0,41**

Taula 4. Coeficients de correlació del NAOi el WeMOi amb la precipitació de Barcelona. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del SMC, el Grup de Climatologia de la UB i la NOAA. **Llegenda:** Negreta i blau fosc per a l'índex que s'imposa en cada període; * (95% del nivell de confiança), ** (99% del nivell de confiança).

Fent cas als resultats que s'han trobat per a tot el període d'estudi, les mitjanes anuals dels índexs NAOi i WeMOi i la precipitació de Barcelona presenten una correlació molt baixa. No és així en el cas de les mitjanes estacionals: es pot veure com en el semestre fred de l'any, s'imposa la influència del WeMOi amb correlacions de -0,30 a l'hivern i -0,25 a la tardor, les dues significatives al 99% del nivell de confiança, mentre que a la part càlida de l'any, primavera i estiu, s'imposa la influència del NAOi amb correlacions més modestes: -0,16 en el cas de la primavera (al 95% del nivell de confiança) i -0,04 en el cas de l'estiu.

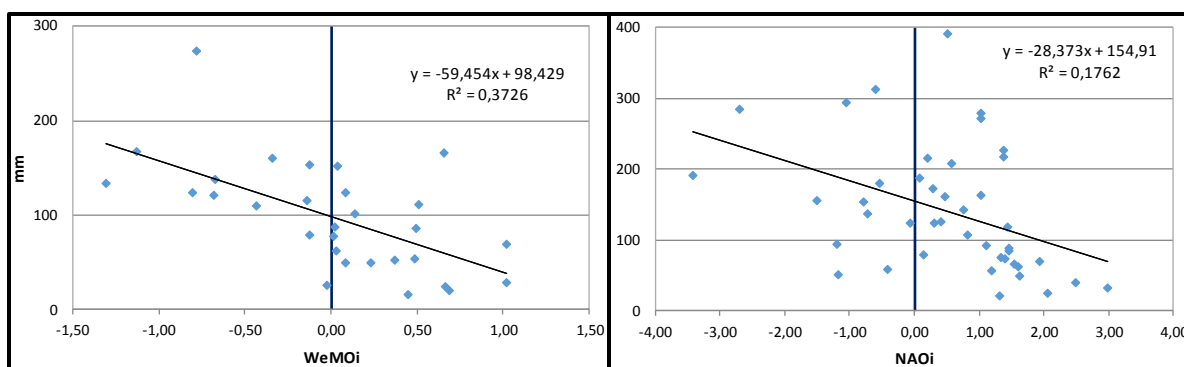
En el cas de les de les mitjanes mensuals dels índexs NAOi i WeMOi i la precipitació de Barcelona, la correlació es fa més evident. El NAOi s'imposa en vuit mesos de l'any, mentre que el WeMOi només ho fa en quatre (març, juny, octubre i desembre). Destaquen, particularment, les correlacions del WeMOi i la precipitació de desembre (-0,33**), i del NAOi i la precipitació de gener (-0,35**) significatives al 99% del nivell de confiança, pel que s'ha considerat oportú il·lustrar-les gràficament (gràfic 7).



Gràfic 7. WeMOi i precipitació al desembre (esquerra) i NAOi i precipitació al gener (dreta) del període 1821-2013. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del SMC, el Grup de Climatologia de la UB, i la NOAA.

Passant a les dades obtingudes per subperíodes, a nivell general, al comptar amb menys parelles de dades, augmenta el valor del coeficient de correlació de Pearson (r) però baixa la significació (taula 4). Encara que amb bastant volatilitat, anualment s'imposa la influència de la WeMOi, així com estacionalment, i es compleix que al semestre fred de l'any (tardor i hivern) la correlació dels índexs és negativa amb les precipitacions, és a dir, hi ha més probabilitat d'estacions més humides amb NAOi i WeMOi negativa, que no amb aquests índexs amb valors positius estacionals. Per il·lustrar la influència del WeMOi i el NAOi per estacions, s'han triat les dues correlacions més elevades amb la precipitació de

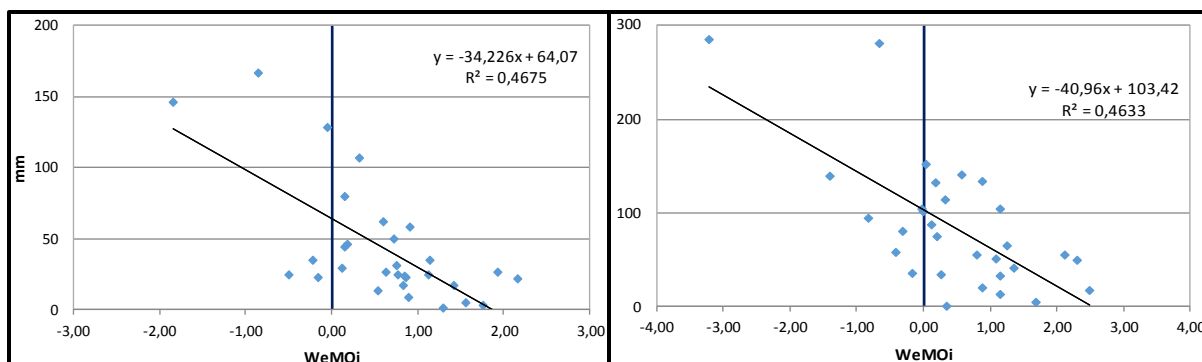
Barcelona (gràfic 8). Així, podem veure com a l'hivern el WeMOi en el subperíode 1851-1880 està força ben correlacionat negativament amb la precipitació de Barcelona (-0,61**) al 99% del nivell de confiança. En la mateixa estació, però en el subperíode d'estudi 1971-2013, trobem la major correlació entre NAOi i precipitació a Barcelona per estacions (-0,42**) també al 99% del nivell de confiança.



Gràfic 8. WeMOi i precipitació a l'hivern, 1851-1880 (esquerra) i NAOi i precipitació a l'hivern, 1971-2013 (dreta). Font: Elaboració pròpia a partir de dades del SMC, el Grup de Climatologia de la UB, la NOAA.

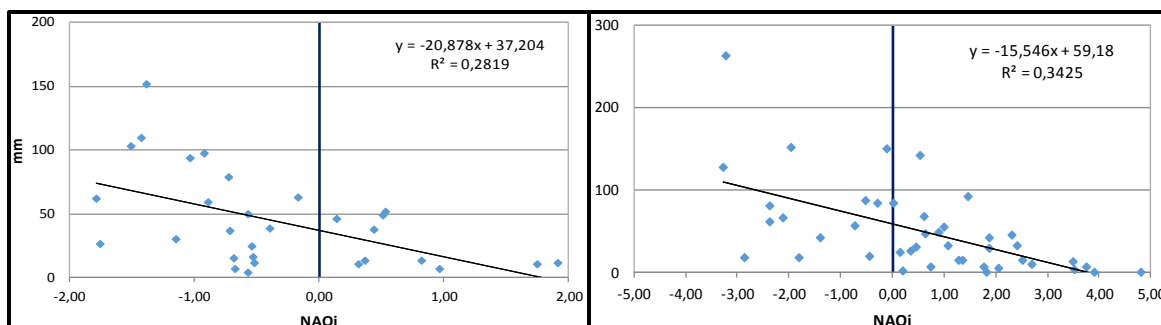
A nivell mensual, la tendència acostuma a ser la mateixa, encara que amb certa volatilitat: en els mesos freds de l'any s'imposa la influència de la WeMOi, amb correlació negativa significativa amb les precipitacions a Barcelona, i als mesos més càlids s'imposa la influència del NAOi, alternant correlacions positives i negatives amb la precipitació de Barcelona, i generalment, sense significació estadística (taula 4).

Així doncs, desembre en el subperíode 1911-1940 i octubre en el subperíode 1941-1970 són els mesos de tots els subperíodes on surt millor correlacionat el WeMOi i la precipitació de Barcelona: -0,68** en els dos casos, al 99% del nivell de confiança (gràfic 9).



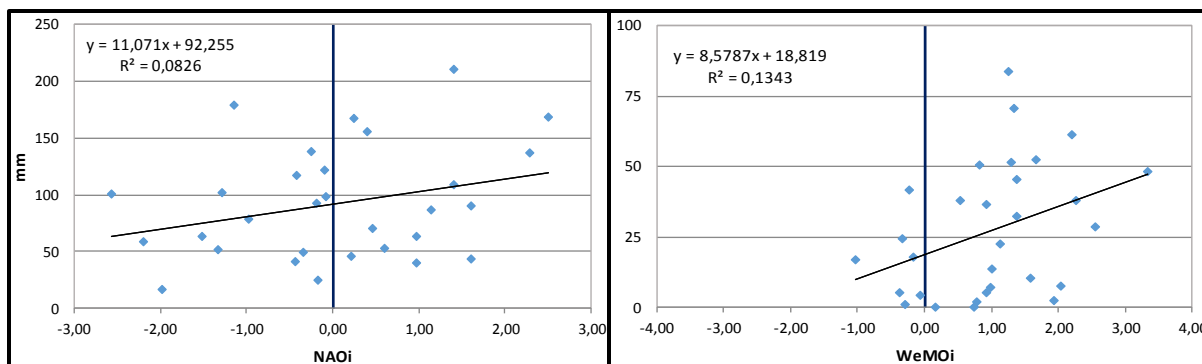
Gràfic 9. WeMOi i precipitació al desembre, 1911-1940 (esquerra) i WeMOi i precipitació a l'octubre, 1941-1970 (dreta). Font: Elaboració pròpia a partir de dades del SMC i el Grup de Climatologia de la UB.

Pel que fa al NAOi, els mesos que surten millor correlacionats amb la precipitació de Barcelona són (gràfic 10): maig al subperíode 1881-1910 (-0,53** al 99% del nivell de confiança) i gener al subperíode 1971-2013 (-0,59** al 99% del nivell de confiança).



Gràfic 10. NAOi i precipitació al maig, 1881-1910 (esquerra) i NAOi i precipitació al gener, 1971-2013 (dreta). Font: Elaboració pròpia a partir de dades del SMC i la NOAA.

Per acabar d'il·lustrar la influència dels patrons de teleconnexió amb la precipitació a Barcelona, es mostraran aquells mesos en que les correlacions han sigut més positives per cadascun dels índexs. Així doncs, el mes amb la correlació més positiva entre el NAOi i la precipitació de Barcelona és el setembre al subperíode 1881-1910 (0,29), mentre que el mes de juliol al subperíode 1941-1970 presenta la correlació més positiva entre el WeMOi i la precipitació de Barcelona (0,37), ambdues, però, sense ser estadísticament significatives (gràfic 11).



Gràfic 11. NAOi i precipitació al setembre, 1881-1910 (esquerra) i WeMOi i precipitació al juliol, 1941-1970 (dreta). Font: Elaboració pròpia a partir de dades del SMC, el Grup de Climatologia de la UB, i la NOAA.

Per acabar amb la presentació de resultats, s'ha inclòs al document una taula amb la mitjana de la precipitació dels 30 anys amb NAOi i WeMOi més positiu i negatiu, per al període d'estudi 1821-2013, i amb escala temporal anual, estacional i mensual (taula 5).

Es pot observar que tant a escala temporal anual i estacional, en els dos índexs, hi ha mitjanes de precipitació més elevades els 30 anys més negatius dels índexs que en els 30 més positius, adquirint aquestes mitjanes la qualificació estadística de diferents al 95% del nivell de confiança a l'hivern i la tardor, on la diferència entre mitjanes quasi es dobla en el cas del NAOi (162,1 mm a 82,4 mm a l'hivern) i és també força més elevada en el WeMOi (236,9 mm a 173,3 mm a la tardor).

A escala mensual, s'imposen en el cas del NAOi tots els mesos amb els 30 anys més negatius de l'índex exceptuant el juny, mentre que al WeMOi, els mesos centrals de l'any, d'abril a setembre, tenen mitjanes de precipitacions més elevades els 30 anys més positius de l'índex. A la resta dels mesos de l'any s'imposa la precipitació dels 30 anys amb WeMOi més negatiu. En ambdós casos, les mitjanes són estadísticament diferents al 95% del nivell de confiança en gairebé la totalitat dels mesos on s'imposa la mitjana de precipitació dels 30 anys més negatius de l'índex, mentre que quan s'imposen les mitjanes mensuals de precipitació dels 30 anys més positius dels índexs, l'absència de significació estadística propicia que les mitjanes siguin estadísticament similars.

Període	1821-2013			
	P (mm) NAOi (-)	P (mm) NAOi (+)	P (mm) WeMOi (-)	P (mm) WeMOi (+)
Anual	630,5	600,5	608,5	546,7
Hivern	162,1*	82,4*	157,3*	100,8*
Primavera	171,1	140,3	140,5	138,7
Estiu	106,2	99,6	112,4	104,6
Tardor	225,3*	174,2*	236,9*	173,3*
Gener	66,3*	16,1*	61,3*	27,4*
Febrer	60,9*	21,8*	47,5*	24,5*
Març	64,3*	32,6*	65,2*	37,1*
Abril	67,6*	36,5*	42,9	44,1
Maig	72,2*	47,3*	54,0	58,6
Juny	36,8	42,0	35,2	48,2
Juliol	25,9	19,3	25,8	29,8
Agost	49,5*	24,1*	41,0	44,9
Setembre	96,2*	63,6*	81,2	69,2
Octubre	82,1*	62,7*	112,6*	61,6*
Novembre	81,3*	26,4*	72,5*	37,6*
Desembre	54,7*	24,7*	64,8*	24,4*

Taula 5. Mitjana de precipitació a Barcelona dels 30 anys amb NAOi més negatiu i els 30 anys amb NAOi més positiu i dels 30 anys amb WeMOi més negatiu i els 30 anys amb WeMOi més positiu. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del SMC, el Grup de Climatologia de la UB, i la NOAA. **Llegenda:** Negreta i blau fosc per la mitjana de precipitació que s'imposa en cada període; * (mitjanes estadísticament diferents al 95% del nivell de confiança).

3.2. Discussió

El primer detall que crida l'atenció de l'anàlisi estadística de les dades és la tendència positiva de la pluviometria a Barcelona en l'abast de la sèrie mensual de precipitació 1786-2014. Aquesta ha augmentat 0,5 mm per any, o el que és el mateix, 5 mm per dècada, al llarg de tot el període d'estudi, el que obriria una línia de recerca a la justificació d'aquest increment, fet que sobrepassa el propòsit d'aquest treball.

Com s'ha repassat en altres apartats, la gran varietat de règims pluviomètrics estacionals és un dels trets més característics de la precipitació a la península Ibèrica, on es poden trobar dotze dels vint-i-quatre possibles (De Luis *et al.*, 2010). Si a la ciutat de Barcelona està clarament definida l'estació plujosa, la tardor, degut a la inestabilitat generada pel contrast entre les aigües mediterrànies, escalfades durant l'estiu, i l'arribada de les primeres onades de fred en alçada (Martín-Vide i Olcina, 2001), hi ha força competència entre l'hivern i l'estiu per proclamar-se com l'estació seca a la ciutat comtal. Si bé a la capital catalana predomina el règim pluviomètric estacional TPHE al llarg de tot el període d'estudi, és ben cert que l'hivern i l'estiu adquireixen valors de precipitació molt semblants. Tant és així, que dividint la sèrie mensual de precipitació a Barcelona en set subperíodes, hi ha un, el 1851-1880, on l'hivern desplaça a l'estiu com l'estació seca de l'any, canviant el règim pluviomètric estacional de TPHE a TPEH. Resultats que van en la línia dels estudis fets en aquest sentit, que apunten a una subtropicalització del clima a la península Ibèrica, on es reforça la posició de la tardor com estació més humida, mentre que es redueix la precipitació a l'hivern i l'estiu (De Luis *et al.*, 2010).

Pel que fa a la variabilitat i la irregularitat temporal de la sèrie, tant el CV com el S_1 , presenten valors, per a la totalitat del període, inclosos en el llinar mediterrani, situat a partir del 20% i el 0,25 respectivament. Però al trossejar la sèrie mensual de precipitació de Barcelona, es poden trobar subperíodes amb variabilitat baixa (1881-1910 i 1911-1940), per sota del llinar mediterrani, pel que aquests subperíodes presenten un CV més típic de la pluviometria de climes atlàntics de la península Ibèrica que no dels mediterranis. El mateix procés es repeteix per al S_1 , però afegint un subperíode més dels esmentats en el cas del

CV, el 1821-1850, on la irregularitat temporal de la precipitació també es troba també per sota del llindar mediterrani.

Pel que fa a la influència dels patrons de teleconnexió NAOi i WeMOi a la precipitació de la ciutat de Barcelona, es poden identificar alguns trets característics. És important destacar que les correlacions negatives entre aquests índexs i la precipitació a Barcelona són clarament marcades en el semestre fred de l'any, on la correlació és estadísticament significativa al 95% del nivell de confiança, i s'imposa, en línies generals i per subperíodes, la influència del WeMOi, amb valors més elevats de correlació negativa amb les precipitacions de Barcelona que el NAOi.

El semestre càlid de l'any presenta unes dades més complexes d'interpretar. Així doncs, encara que amb força variabilitat, s'imposa la influència del NAOi, però amb alguns matisos. Sobretot en els mesos de juny i juliol s'altera el règim general de les correlacions, ja que esdevenen positives en alguns dels cassos, on el WeMOi funciona millor que NAOi en aquest escenari. L'explicació científica d'aquesta alteració en la influència dels patrons de teleconnexió a la precipitació de Barcelona pot venir donada perquè en aquests mesos, juny i juliol especialment, coincideixen dos fets: la península Ibèrica roman afectada per un pantà baromètric on la pressió atmosfèrica és uniforme, i s'origina pluja convectiva, a l'estar el sòl ja molt calent per l'augment de les temperatures a aquesta alçada de l'any i els embossaments d'aire fred en altura.

Al llarg de tot el període d'estudi de la influència dels patrons de teleconnexió NAOi i WeMOi a la ciutat de Barcelona (1821-2013), el mes de juny té una correlació positiva entre el WeMOi i la precipitació (0,17*) significativa estadísticament al 95% del nivell de confiança.

Aquestes tendències es reafirmen quan s'analitzen les mitjanes de precipitació dels 30 anys més negatius i els 30 anys més positius de cada índex, on clarament s'imposen les mitjanes de precipitació dels 30 anys més negatius en ambdós índexs, tret dels mesos més càlids de l'any en el cas del WeMOi, on són majors les mitjanes de precipitació dels 30 anys amb WeMOi més positiu, el que va en la línia del que s'ha comentat en l'anterior paràgraf.

Així doncs, es podria afirmar, que a la ciutat de Barcelona, quan la precipitació anual es caracteritza per poca variabilitat e irregularitat temporal, agafa més pes la influència del NAOi, mentre que quan aquesta precipitació és més pròpia de la ciclogènesis mediterrània, més variable e irregular, s'imposa la influència del WeMOi.

4. CONCLUSIONS

El sistema climàtic és variable de per si. Per això és molt important poder analitzar sèries climàtiques llargues, com la sèrie mensual de precipitació de Barcelona (1786-2014), ja que permet analitzar tendències i variacions del clima. És a dir, la reconstrucció climàtica del passat contribueix molt al coneixement del clima futur.

Llavors, encara que resta molt de treball d'investigació per anar concretant la influència d'aquests índexs de teleconnexió, més amunt caracteritzats, en la precipitació, ens poden donar, d'una manera clara i entenedora, l'explicació als fenòmens extrems. Fins i tot pot servir per a la planificació territorial i sectorial alhora de fer una distribució eficient dels recursos hídrics tant per a l'agricultura com per al turisme. Aquest darrer sector és de vital importància per a la ciutat de Barcelona: representa aproximadament el 15% dels llocs de treball a la ciutat i poc més del 14% del Producte Interior Brut (PIB)⁶.

Altra tendència observada al llarg del treball és la possible alteració dels règims pluviomètrics estacionals, amb un augment de la irregularitat temporal de la precipitació, el que també pot arribar a condicionar determinades activitats econòmiques, sobretot agrícoles i turístiques, o fins i tot el propi funcionament dels ecosistemes o els règims fluvials.

El que queda força demostrat amb l'anàlisi estadística del treball és la influència dels índexs de teleconnexió en la precipitació. En aquest cas d'estudi, i per al semestre fred de l'any, amb valors de WeMOi negatiu la precipitació és major a Barcelona, tendència que s'imposa, a més, a la influència del NAOi a la ciutat. El semestre càlid de l'any presenta una tendència variable entre el predomini de la influència de cada índex, però, generalment, als mesos de juny i juliol, la correlació positiva entre la precipitació i el WeMOi també supera a la influència del NAOi.

Per tant, es pot afirmar que la ciutat de Barcelona compleix les característiques de la façana litoral mediterrània de la península Ibèrica en aquest sentit. És a dir, en línies generals, predomina la influència del WeMOi sobre el NAOi en la

⁶ Anuari estadístic de la ciutat de Barcelona (2015).

precipitació a la ciutat comtal, correlacionats, ambdós índexs, negativament a la meitat freda de l'any, i positivament a l'inici de l'estiu, on també s'imposa el WeMOi.

La conca Mediterrània és una de les parts del planeta més amenaçades per l'escalfament global i el canvi climàtic. A més, el creixement de població de la mateixa en l'actualitat respecte al 1950 ha sigut d'un 86% (Prohom *et al.*, 2015). En el futur, s'esperen condicions més extremes per a la regió, amb un increment significatiu de les temperatures mitjanes anuals entre 1,5°C i 7°C a finals del segle XXI respecte a finals del segle XX i una reducció de la precipitació d'entre un 10% i un 30% a finals de segle XXI respecte a finals del segle XX, augmentant i intensificant-se els fenòmens extrems.

A la ciutat de Barcelona, el fet d'haver detectat un subperíode marcadament més sec que la resta (1821-1850), on la mitjana de la precipitació és d'aproximadament un 15% menor que la mitjana de tot el període d'estudi, dona un avís de que en el futur les precipitacions poden tornar a ser d'aquest ordre de magnitud, amb les greus conseqüències que aquest escenari tindria per a la densament poblada Àrea Metropolitana de Barcelona, on l'aigua no és un recurs il·limitat ni molt menys.

Si més no, el progrés d'aquestes investigacions en matèria climàtica són cabdals per una major **adaptació** al canvi climàtic, la qual ha d'anar unida a campanyes de sensibilització de la població per **mitigar** els efectes nocius del mateix en el futur.

Encara que, tot s'ha de dir, l'alta variabilitat de la precipitació és una característica pròpia del clima mediterrani, i no una conseqüència del canvi climàtic. El perill del canvi climàtic radica en que aquesta variabilitat de la precipitació sigui major en el futur, el que dificultaria, més si cap, la gestió dels recursos hídrics en la conca mediterrània.

5. REFERÈNCIES

- Angulo-Martínez, M.; Beguería, S. (2012). Do atmospheric teleconnection patterns influence rainfall erosivity? A study of NAO, MO and WeMO in NE Spain, 1955–2006. *Journal of Hydrology*, Vol. 450-451, 168-179 p.
- Caussinus H, Mestre O. (2004). Detection and correction of artificial shifts in climate series. *J. R. Stat. Soc. Ser. C: Appl. Stat.* 53: 405–425 p.
- Coll, J.R.; Aguilar, E.; Prohom, M.; Sigró, J. (2016). Long-term drought variability and trends in Barcelona (1787-2014). *Universidad de la Rioja: Cuadernos de Investigación Geográfica*, nº 42 (1), 16 p. ISSN: 0211-6820.
- De Luis, M.; Brunetti, M.; González-Hidalgo, J.C.; Longares, L.A.; Martín-Vide, J. (2010). Changes in seasonal precipitation in the Iberian Peninsula during 1946-2005. *Global and Planetary Change*, nº74, 27-33 p. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2010.06.006.
- García-Sellés, C.; Peña, J.C.; Oller, P.; Martínez, P. (2010). WeMOI and NAOi influence on major avalanche activity in the Eastern Pyrenees. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 64, 137-145 p.
- López-Bustins, J.A.; Salvà, M.; Cernocky, T. (2008). Càlcul i cartografia de la irregularitat pluviomètrica temporal a Catalunya mitjançant tècniques SIG. *Universitat de Barcelona: Segon Congrés Català de Geografia*, 29-31 de maig de 2008, 11 p.
- López-Bustins, J.A.; Martín-Vide, J.; Barriendos, M. (2014). Actualización de los valores del índice de la oscilación del mediterráneo occidental (WeMOi): 1821-2013. *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología, Serie A*, nº 9, 283-294 p. ISBN: 978-84-16027-69-9.
- Martín-Vide, J. (1991). *Fundamentos de climatología analítica*. Madrid: Editorial Síntesis, 157 p. ISBN: 8477381135.
- Martín-Vide, J. (2002). *El temps i el clima*. Barcelona: Editorial Rubes, 127 p. ISBN: 8439360339.
- Martín-Vide, J.; Olcina, J. (2001). *Climas y tiempos de España*. Madrid: Editorial Alianza, 258 p. ISBN: 84-206-5777-8.
- Martín-Vide, J.; López-Bustins, J.A. (2006). The Western Mediterranean Oscillation and Rainfall in the Iberian Peninsula. *RMetS: International Journal of climatology*, nº26, 1455-1475 p. DOI: 10.1002/joc.1388.

- Oliva, M.; López-Bustins, J.A.; Barriendos, M.; Muedra, C.; Martín-Vide, J. (2006). Reconstrucción històrica de la Oscilación del Mediterráneo Occidental (WeMO) e inundaciones en el Levante peninsular (1500-2000). ResearchGate, available from Marc Oliva, 12 p.
- Pasho, E.; Camarero, J.J.; De Luis, M.; Vicente-Serrano, S.M. (2011). Spatial variability in large-scale and regional atmospheric drivers of *Pinus halepensis* growth in eastern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 151, 1106-1119 p.
- Prohom, M.; Barriendos, M.; Sánchez-Lorenzo, A. (2015). Reconstruction and homogenization of the longest instrumental precipitation series in the Iberian Peninsula (Barcelona 1786-2014). *International Journal of climatology*, Published online in Wiley Online Library, 16 p. DOI: 10.1002/joc. 4537.
- Salmi, T; Määttä, A; Anttila, P; Ruoho-Airola, T; Amnell, T. (2002). Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and sen's slope estimates (the Excel template application Makesens). Helsinki: Finnish Meteorological Institute, N°31, 35 p.
- Sneyers R. (1992). On the use of statistical analysis for the objective determination of climatic change. *Meteorol. Z.* 1: 247–256 p.