

MÈTODES DE CÀLCUL DE
L'ÍNDIX DE L'OSCIL·LACIÓ
DE LA MEDITERRÀNIA
OCCIDENTAL (WeMOi) I ESTUDI
DEL SEU POTENCIAL PREDICTIU
EN LA PRECIPITACIÓ DIÀRIA

Laia Arbiol Roca

Tesi Doctoral
Juliol 2021



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

**Mètodes de càlcul de l'índex
de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental (WeMO_i)
i estudi del seu potencial predictiu
en la precipitació diària**

Laia Arbiol Roca

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) i a través del Dipòsit Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) y a través del Repositorio Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service and by the UB Digital Repository (diposit.ub.edu) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



Climatology
Group

PROGRAMA DE DOCTORAT GEOGRAFIA, PLANIFICACIÓ
TERRITORIAL I GESTIÓ AMBIENTAL

DEPARTAMENT DE GEOGRAFIA

**MÈTODES DE CÀLCUL DE L'ÍNDEX DE
L'OSCIL·LACIÓ DE LA MEDITERRÀNIA
OCCIDENTAL ($WeMO_i$) I ESTUDI DEL
SEU POTENCIAL PREDICTIU EN LA
PRECIPITACIÓ DIÀRIA**

Memòria presentada per:

Laia Arbiol Roca

opta al títol de Doctora

Tesi Doctoral dirigida pels directors:

Dr. Joan Albert LÓPEZ BUSTINS i Dr. Javier MARTÍN VIDE

Tesi Doctoral tutoritzada per:

Dr. Javier MARTÍN VIDE



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

*"Imbuir-nos dels colors de la terra,
en aquesta tardor plujosa
que amara els grocs, els verds."*

Carme Pagès, a *Plou a la Toscana* (2017)

A la Gal·la.

Resum

Atmospheric oscillations, which are mostly associated with climate patterns, have great influences on global climate variables and often lead to extreme weather conditions and events, which cause lots of adverse impacts on our environmental and socioeconomic status. The aim of this thesis is to identify the main events of torrential rain on the eastern façade of the Iberian Peninsula coast based on instrumental data, reanalysis data and predictive data by calculating the value of the Western Mediterranean Oscillation and its index (WeMOi). The signs and magnitude of the value of the index reflect the relationships of climate patterns with rainfall and their strength on the western façade of the Mediterranean basin and are used as a support tool for predicting torrential rains in this area. Part of the results of the main component analysis agrees well with the general understanding of the impact of this pattern with torrential rains. In addition, the relationships between precipitation and the WeMO index are studied on a daily basis based on instrumental meteorological data, atmospheric models of reanalysis and predictions, both past and present climate. The statistical methods used reinforce the weight of this atmospheric teleconnection pattern in several study windows and, therefore, the persistence of this atmospheric configuration. This suggests that the proposed predictive method is able to represent the teleconnection between the climate pattern and precipitation intensity being a key planning tool considering the location, strength and persistence of torrential episodes in the eastern peninsula. Highly dense areas where geographical features such as proximity to the sea and topography play an important role and where the effects of climate change will be reflected and severely damaged.

Resum

Les oscil·lacions atmosfèriques, que s'associen majoritàriament a patrons climàtics, influeixen molt en les variables climàtiques globals i solen conduir a condicions i esdeveniments climàtics extrems, els quals causen molts impactes adversos sobre el nostre estatus ambiental i socioeconòmic. L'objectiu d'aquesta tesi és identificar els principals esdeveniments de pluges torrencials a la façana oriental del litoral peninsular ibèric a partir de dades instrumentals, dades de reanàlisi i dades predictives mitjançant el càlcul del valor de l'índex de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental ($WeMO_i$). Els signes i la magnitud del valor de l'índex reflecteixen les relacions de l'esmentat patró de variabilitat amb les precipitacions i la seva quantia a la conca de la Mediterrània, i s'usen com a eina de suport per a la predicció de pluges torrencials en aquesta àrea. Part dels resultats de l'anàlisi de components principals coincideix bé amb la comprensió general sobre l'impacte d'aquest patró amb les pluges torrencials. A més, les relacions entre la precipitació i el $WeMO_i$ s'estudien, a escala diària, a partir de dades meteorològiques instrumentals, de models atmosfèrics de reanàlisi i prediccions, tant del clima passat com del present. Els mètodes estadístics utilitzats reforcen el pes d'aquest patró de teleconnexió atmosfèrica en diverses finestres d'estudi i, per tant, la persistència d'aquesta configuració atmosfèrica. Això suggereix que el mètode predictiu que es proposa és capaç de representar la relació entre el patró climàtic i la intensitat de la precipitació i és, doncs, una eina de planificació clau atenent la localització, la força i la persistència d'episodis torrencials a l'est peninsular. Es tracta d'àrees densament poblades on factors geogràfics com la proximitat al mar i l'orografia tenen un paper important i on els efectes del canvi climàtic es manifestaran i es veuran reforçats negativament.

Resum

Las oscilaciones atmosféricas, que se asocian mayoritariamente a patrones climáticos, influyen mucho en las variables climáticas globales y suelen conducir a condiciones y eventos climáticos extremos, los cuales causan muchos impactos adversos sobre nuestro estatus ambiental y socioeconómico. El objetivo de esta tesis es identificar los principales eventos de lluvias torrenciales en la fachada oriental del litoral peninsular ibérico a partir de datos instrumentales, datos de reanálisis y datos predictivos mediante el cálculo del valor del índice de la Oscilación de la Mediterránea Occidental ($WeMO_i$). Los signos y la magnitud del valor del índice reflejan las relaciones de dicho patrón de variabilidad con las precipitaciones y su cuantía en la cuenca del Mediterráneo, y se usan como herramienta de apoyo para la predicción de lluvias torrenciales en esta área. Parte de los resultados del análisis de componentes principales coincide bien con la comprensión general sobre el impacto de este patrón con las lluvias torrenciales. Además, las relaciones entre la precipitación y el $WeMO_i$ se estudian, a escala diaria, a partir de datos meteorológicos instrumentales, de modelos atmosféricos de reanálisis y predicciones, tanto del clima pasado como del presente. Los métodos estadísticos utilizados refuerzan el peso de este patrón de teleconexión atmosférica en varias ventanas de estudio y, por tanto, la persistencia de esta configuración atmosférica. Esto sugiere que el método predictivo que se propone es capaz de representar la relación entre el patrón climático y la intensidad de la precipitación y es, pues, una herramienta de planificación clave atendiendo a la localización, la fuerza y la persistencia de episodios torrenciales al este peninsular. Se trata de áreas densamente pobladas donde factores geográficos como la proximidad al mar y la orografía tienen un papel importante y donde los efectos del cambio climático se manifestarán y se verán reforzados negativamente.

Agraïments

Aquesta tesi doctoral no hauria estat possible sense l'ajuda i el suport de moltes persones, a les quals vull agrair la contribució. El doctorat han sigut quatre anys en què he crescut acadèmicament i personal. I, per això, voldria agrair-ho a tothom que m'ha envoltat durant aquesta etapa tant important de la meua vida i de màxim reconeixement acadèmic.

En primer lloc, vull donar les gràcies als meus dos directors de tesi, al Dr. Joan Albert López Bustins i al Dr. Javier Martín Vide. Gràcies per haver confiat en mi, per acollir-me al grup de recerca *Climatology Group*, per haver-me permès treballar en allò que més m'agrada i, sobretot, per ensenyar-me tantes coses. Gràcies per la vostra disponibilitat i accessibilitat, per la vostra predisposició, paciència i positivisme. Gràcies, també, per donar-me l'oportunitat d'assistir a multitud de congressos, per deixar-me descobrir que m'encanta donar classes a la Universitat i per totes les reunions per decidir què fer i quan fer-ho. Quina sort haver-vos tingut al llarg d'aquests anys i poder aprendre de vosaltres!

També vull manifestar l'agraïment al Grup de Climatologia i a la beca atorgada pel projecte WEMOTOR (CSO2014-55799-C2-1-R). A tots els membres del GC, però, sobretot, al Marc Lemus, amb qui he compartit despatx, maldecaps i victòries climàtiques, a parts iguals. Del Departament de Geografia, vull agrair a tot el professorat per acollir-me i per retornar-me a la Geografia. I és que durant la carrera ja em van captivar: la Dra. Núria Benach, el Dr. Xavier Úbeda, la Dra. Mari Carmen, el Dr. Xosé Armesto (gràcies a tu vaig descobrir la màgia de donar classes als i les universitàries), i també la Dra. Belén Gómez, la Dra. Arlinda García i el Dr. Filipe Carvalho. La Geografia la fem entre tots (i entre totes les comissions). Gràcies a totes i a tots!

L'estada de recerca a la Universitat de Göteborg (Suècia) i a la Southern University of Science and Technology (SUSTech) (Xina) han estat experiències increïbles, tot i els dubtes de marxar-hi, però dono les gràcies al Dr. Deliang

Chen, al Dr. Masoud Irannezhad i al Dr. César Azorín per fer-ho fàcil i fer-m'hi sentir una més. Climàticament, també van ser experiències que recordaré sempre.

Vull explicitar el meu agraïment també al Servei Meteorològic de Catalunya: en especial, al Dr. Pere Esteban, per la paciència amb els infinits resultats del PXE; al Dr. Marc Prohom, i al Dr. Toni Barrera. També a la Gabriela Cuevas, de l'Agència Estatal de Meteorologia, per facilitar-me les dades. I a l'Oriol Ciurana: la WeMOTool existeix gràcies a tu.

Gràcies també a tots els doctorands amb qui he compartit les aventures i desventures de la realització d'una tesi i, sobretot, hi he compartit la molt poc coneguda i preuada feina del doctorand, així com els bons moments viscuts al llarg d'aquests anys. Als doctorands, i amics: en Marc, en Joan, en Marcos, el Carlos, la Vero, el Filipe, l'Albert, l'Edu, en Miquel, la Bárbara, la Julia, la Tania i la Laia, que heu fet que el dia a dia sigui molt millor entre crítiques, anàlisis, somriures i Geografia. I també a la Petia.

I un especial agraïment a les amigues: l'Emma, la Mireia, la Yelle, la Laia i la Natalia pels milions de riures i bons moments compartits. També a l'Anna Domingo, un pilar importantíssim. Des de fa anys sempre hi sou, i quina sort tenir-vos!

A la Itxaro per ser una excel·lent amiga a distància. Per l'optimisme i la confiança incondicional i pels milers de rotllos que ha aguantat d'aquesta tesi. I a tota la colla, gràcies. La boira amb vosaltres és millor. També a l'Aida, pel seu optimisme i a la Marisa, per la força que encomanes i que admiro. I als cosins, per fer-me una Barcelonina pagesa. A la Silvia per ser una amiga incondicional, perquè sempre hi és, per entendre els alts i baixos i per donar sentit a la paraula *amistat*. Per tot, pel bons i mals moments que hem viscut a la vida. També al Gaspar, per tants bons moments. I a la Laura i l'Angie, gràcies.

I a la Gira: gràcies per retornar i per revivre juntes, per ser-hi i entendre'm en els pitjors mesos de tesi i, sobretot, pels quilòmetres que ens queden per córrer juntes.

Per acabar, infinites gràcies a les persones més importants de la meva vida: els meus pares, la meva germana, el Víctor, la Gal·la i en Xavi. Als meus pares, que m'han ensenyat la curiositat, la crítica, la persistència, l'exigència, l'esforç i la felicitat. A la meva germana, per ser un referent, en tots els àmbits. Al Víctor, per tots els bons moments viscuts. I per donar-me la felicitat en nom de Gal·la.

I a en Xavi, un suport incondicional, amb les dificultats diàries que suposa fer una recerca d'aquestes característiques, amb els maldecaps i els petits triomfs que comporta, suportant estoicament els moments més agredolços. Per animar-me i ajudar-me en tots els meus projectes. Gràcies per donar-me energia i per voler compartir-ho tot. Amb tu, una vida fàcil i un(s) viatge(s) infinit(s).

Gràcies i mil gràcies !

Finançament

Aquesta tesi ha estat realitzada en el si del grup d'investigació Climatology Group (2017SGR1362, CSO2014-54078-C2-1-P), pertanyent al Departament de Geografia de la Universitat de Barcelona.

Ha estat finançada mitjançant una ajuda predoctoral del Programa de Formació de Personal Investigador (FPI, BES-2015-074522) del Ministeri d'Economia i Competitivitat, associada al projecte *WEMOTOR* (CSO2014-55799-C2-1-R). També s'ha gaudit de l'ajut per a joves investigadors de l'Institut de Recerca de l'Aigua (IdRA) per a les convocatòries 2017, 2018 i 2019.

Es van fer dues estades predoctorals l'any 2018: la primera, al Geovetarcenrum de la Göteborgs Universitet (Suècia), que va ésser finançada pel Programa d'Ajudes a la Mobilitat Predoctoral per a la Realització d'Estades Breus en Centres d'R+D (FPI-MINECO) de la convocatòria de 2018; la segona, a la School of Environmental Science & Engineering de la Southern University of Science and Technology, a Shenzhen (Xina), finançada per la mateixa Universitat.

Índex

Índex	xv
Índex de taules	xvii
Índex de figures	xix
Acrònims	xxv
1 INTRODUCCIÓ	29
1.1 Presentació	31
1.2 Motivació	32
1.3 Marc teòric	34
1.4 Àrea d'estudi	39
2 OBJECTIUS I HIPÒTESIS	45
2.1 Objectius generals	47
2.2 Hipòtesis	48
3 BASES DE DADES I METODOLOGIA	51
3.1 Bases de dades	53
3.2 Metodologia	63
4 CARACTERITZACIÓ DELS VALORS DE L'ÍNDEX DE L'OS- CIL · LACIÓ DE LA MEDITERRÀNIA OCCIDENTAL	71
4.1 Instrumental	75
4.2 Reanàlisi	81
4.3 Anàlisi de components principals (PCA)	87
5 REGIONALITZACIÓ DEL $WeMO_i$	109
5.1 Regionalització	112

5.2	Correlació per dies consecutius	118
6	APLICACIÓ DEL $WeMO_i$: PREDICCIÓ DE DIES DE PLUJA	129
6.1	WeMOTool	133
6.2	Predicció del $WeMO_i$	146
7	DISCUSSIÓ	179
8	CONCLUSIONS	189
9	LÍNIES FUTURES	209
	Bibliografia	215

Índex de taules

3.1	Característiques principals de les reanàlisis utilitzades. [Darrer accés: 07/06/2021].	56
4.1	Mitjana de valors de l'índex WeMO ($WeMO_i$) per als dies del mes d'octubre per les quatre finestres mòbils.	79
4.2	Tipus de circulació (CWT) per a la finestra sinòptica 25° N – 70° N i 25° O – 25° E, la mitjana (\bar{x}) del $WeMO_i$ i els dies (N) de cada distribució i el percentatge respecte al total de dies.	90
4.3	Tipus de circulació (CWT) per a la finestra sinòptica 30° N – 60° N i 15° O – 20° E, la mitjana (\bar{x}) del $WeMO_i$ i els dies (N) de cada distribució i el percentatge respecte al total de dies.	93
4.4	Tipus de circulació (CWT) per a la finestra sinòptica 30° N – 55° N i 15° O – 20° E, la mitjana (\bar{x}) del $WeMO_i$ i els dies (N) de cada distribució i el percentatge respecte al total de dies.	96
4.5	Tipus de circulació (CWT) per a la finestra sinòptica 35° N – 50° N i 10° O – 20° E, la mitjana (\bar{x}) del $WeMO_i$ i els dies (N) de cada distribució i el percentatge respecte al total de dies.	99
4.6	Tipus de circulació (CWT) per a la finestra sinòptica 35° N – 45° N i 10° O – 15° E, la mitjana (\bar{x}) del $WeMO_i$ i els dies (N) de cada distribució i el percentatge respecte al total de dies.	102
5.1	Dies de precipitació en què el $WeMO_i$ es troba en cada rang.	112
5.2	Dies per $WeMO_i < 0$ i $WeMO_i > 0$	118
6.1	Valors del $WeMO_i$ instrumental, del GFS i del GFS corregit dels dies del 9 al 14 d'octubre de 2016.	149
6.2	Precipitació acumulada durant l'episodi del 8 al 15 d'octubre de 2016. Font: Meteocat	157
6.3	Valors del $WeMO_i$ instrumental i del GFS del 8 al 13 de gener de 2019.160	

6.4	Valors del $WeMO_i$ d'instrumental i de la WeMOTool per als dies del 20 al 23 de gener de 2020.	167
6.5	Precipitació acumulada durant el període del temporal Glòria. Font: Agència Estatal de Meteorologia Espanyola (AEMET).	176

Índex de figures

1.1	Índex d'oscil·lació de l'Atlàntic nord (NAO_i), 1820-2020. Font: CRU.	36
1.2	Distribució de les correlacions de la precipitació i el NAO_i per a la península Ibèrica (1900-1994). Font: [Martín-Vide et al., 2000].	37
1.3	Tipus de climes de la península Ibèrica. Font: Instituto Geográfico Nacional i AEMET.	40
1.4	Distribució de la variació de la població i la densitat de població a Espanya (2015). Font: Instituto Geográfico Nacional.	41
1.5	Distribució de la variació de la població i la densitat de població a Espanya (2015). Font: Instituto Geográfico Nacional.	42
3.1	Punts d'estudi de San Fernando i Pàdua.	53
3.2	Índex d'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental ($WeMO_i$) per estacions de l'any durant 1821-2020.	64
3.3	Modificació a partir de [López-Bustins, 2007] dels valors anuals del $WeMO_i$ durant 1821-2020.	65
4.1	Fases de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental.	73
4.2	Gràfic comparatiu dels valors de pressió de la sèrie de Pàdua (1821-2013) i les dues fonts de dades que s'utilitzaran (1975-2016).	76
4.3	Calendari de dècada de dies del $WeMO_i$ i nombre d'episodis torrencials de cada dècada, modificat a partir del treball de [López Bustins et al., 2016].	77
4.4	Nombre d'episodis torrencials per diferents finestres mòbils.	80
4.5	Gràfic comparatiu de la pressió en superfície a Pàdua (a) i San Fernando (b) amb valors instrumentals i de la reanàlisi ERA-Interim.	82
4.6	Gràfic comparatiu de la pressió en superfície a Pàdua (a) i San Fernando (b) amb valors instrumentals i de la reanàlisi ERA-40.	82
4.7	Gràfic comparatiu de la pressió en superfície a Pàdua (a) i San Fernando (b) amb valors instrumentals i de la reanàlisi 20CR.	83

4.8	Gràfic comparatiu de la pressió en superfície a Pàdua (a) i San Fernando (b) amb valors instrumentals i de la reanàlisi MERRA-2.	83
4.9	Gràfic comparatiu de la pressió en superfície a Pàdua (a) i San Fernando (b) amb valors instrumentals i de la reanàlisi NCEP/NCAR.	84
4.10	Calendaris del $WeMO_i$ per a diferents reanàlisis.	85
4.11	Finestres sinòptiques d'estudi.	88
4.12	Classificació sinòptica en superfície, mitjançant COST733class, de la finestra sinòptica 25°N-70°N i 25°O-25°E.	89
4.13	Probabilitat de precipitació i precipitació mitjana a l'Espanya peninsular per al tipus 4 (fase negativa) (a) i (b) i per al tipus 8 (fase negativa) (c) i (d) de la finestra sinòptica 25°-70°N i 25° O-25°E.	91
4.14	Classificació sinòptica en superfície, mitjançant COST733class, de la finestra sinòptica 30°N-60°N i 15°O-20°E.	92
4.15	Precipitació mitjana i probabilitat de precipitació a l'Espanya peninsular per al tipus 4 (fase positiva) (a) i (b) i per al tipus 8 (fase negativa) (c) i (d) de la finestra sinòptica 30°N-60°N i 15°O-20°E.	94
4.16	Classificació sinòptica en superfície, mitjançant COST733class, de la finestra sinòptica 30°N-55°N i 15°O-20°E.	95
4.17	Precipitació mitjana i probabilitat de precipitació a l'Espanya peninsular per al tipus 3 (fase negativa) (a) i (b) i per al tipus 7 (fase positiva) (c) i (d) de la finestra sinòptica 30°N-55°N i 15°O-20°E.	97
4.18	Classificació sinòptica en superfície, mitjançant COST733class, de la finestra sinòptica 35°N-50°N i 10°O-20°E.	98
4.19	Precipitació mitjana i probabilitat de precipitació a l'Espanya peninsular per al tipus 3 (fase positiva) (a) i (b) i per al tipus 7 (fase negativa) (c) i (d) de la finestra sinòptica 35°N-50°N i 10°O-20°E.	100
4.20	Classificació sinòptica en superfície, mitjançant COST733class, de la finestra sinòptica 35°N-45°N i 10°O-15°E.	101
4.21	Precipitació mitjana i probabilitat de precipitació a l'Espanya peninsular per al tipus 6 (fase positiva) (a) i (b) i per al tipus 1 (fase negativa) (c) i (d) de la finestra sinòptica 35°N-45°N i 10°O-15°E.	103
4.22	Freqüències relatives en percentatge de cada CWT per mesos.	105
4.23	Freqüència relativa anual en percentatges de cada WT durant el període de 1950-2016.	105
4.24	Valor del $WeMO_i$ per als mesos DGF i sèries de precipitació (1821-2013).Font: [Martín-Vide et al., 2014].	106
5.1	Probabilitat per rangs que la precipitació sigui superior a 0.1 mm.	113
5.2	Probabilitat per rangs que la precipitació sigui superior a 50 mm.	114

5.3	Mitjana diària de precipitació per rangs del $WeMO_i$	115
5.4	Regionalització per tipus de temps. En color rosa fúcsia, s'hi representa la zona en què la WeMO no té influència, mentre que en gris es representa la zona en què la WeMO sí que té influència.	117
5.5	Setembre: correlació i la seva significança entre $WeMO_i$ i la precipitació. Significança < al 5%, en color gris clar, i <a l'1%, en color gris fosc.	119
5.6	Octubre: correlació i la seva significança entre $WeMO_i$ i la precipitació. Significança < al 5%, en color gris clar, i <a l'1%, en color gris fosc.	120
5.7	Novembre: correlació i la seva significança entre $WeMO_i$ i la precipitació. Significança < al 5%, en color gris clar, i <a l'1%, en color gris fosc.	121
5.8	Desembre: correlació i la seva significança entre $WeMO_i$ i la precipitació. Significança < al 5%, en color gris clar, i <a l'1%, en color gris fosc.	122
5.9	Gener: correlació i la seva significança entre $WeMO_i$ i la precipitació. Significança < al 5%, en color gris clar, i <a l'1%, en color gris fosc.	123
5.10	Febrer: correlació i la seva significança entre $WeMO_i$ i la precipitació. Significança < al 5%, en color gris clar, i <a l'1%, en color gris fosc.	124
6.1	Malla de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ de cobertura del model matemàtic GFS. Font: www.nco.ncep.noaa.gov	133
6.2	Diagrama de flux explicatiu del funcionament del servidor.	134
6.3	Gràfic evolutiu de la pressió atmosfèrica a San Fernando (color blau) i a Pàdua (color groc), amb el valor del $WeMO_i$ (color rosa viu).	135
6.4	Mapes de pressió atmosfèrica (a) i de precipitació (b) resultants de l'eina WeMOTool per al dia 9 de març de 2020.	136
6.5	Gràfic evolutiu de la pressió atmosfèrica a San Fernando (color blau) i a Pàdua (color groc), amb el valor del $WeMO_i$ (color rosa viu) del dia 9 d'octubre de 2016 a les 00 h i fins a 144 h.	147
6.6	Evolució del $WeMO_i$ instrumental i del GFS per a l'octubre de 2016.	148
6.7	Sortides del GFS de PRSML i APCP del dia 9 per als dies 10 al 14 d'octubre de 2016 a les 12h.	150
6.8	Sortides del GFS de PRSML i APCP del dia 10 per als dies 10 al 14 d'octubre de 2016 a les 12h.	150
6.9	Sortides del GFS de PRSML i APCP del dia 11 per als dies de l'11 al 14 d'octubre de 2016, a les 12 h.	151

6.10	Sortides del GFS de PRSML i APCP del dia 12 per als dies del 12 al 14 d'octubre de 2016, a les 12 h.	151
6.11	Sortides del GFS de PRSML i APCP del dia 13 per als dies del 13 al 14 d'octubre de 2016, a les 12 h.	152
6.12	Sortides del GFS de PRSML i APCP del dia 14 per al dia 14 d'octubre de 2016, a les 12 h.	152
6.13	Mapa de reanàlisi del GFS de la situació sinòptica del dia 13 d'octubre de 2016. Font: www.wetterzentrale.com	153
6.14	Precipitació diària acumulada dels dies 9 a 14 d'octubre de 2016.	154
6.15	Precipitació diària acumulada el dia 13 d'octubre de 2016 a la península Ibèrica (a) i a Catalunya (b). Font: AEMET.	155
6.16	Precipitació per dies a la Península Ibèrica. Font: AEMET.	155
6.17	Caracterització de la precipitació per al mes d'octubre de 2016, respecte de la mitjana de 1971-2000. On <i>EH</i> = extremament humit: les precipitacions sobrepassen el valor màxim registrat en el període de referència 1971-2000; <i>MH</i> = molt humit: $f \leq 20\%$. Les precipitacions es troben en l'interval corresponent al 20% dels anys més humits; <i>H</i> = humit: $20\% \leq f \leq 40\%$; <i>N</i> = normal: $40\% \leq 60\%$. Les precipitacions registrades se situen al voltant de la mitjana; <i>S</i> = sec: $60\% \leq f \leq 80\%$; <i>MS</i> = molt sec: $f \geq 80\%$; <i>ES</i> = extremament sec: les precipitacions no arriben al valor mínim registrat en el període de referència 1971-2000. Font: AEMET.	156
6.18	Sortides del GFS d'APCP dels dies del 9 al 12 d'octubre de 2016.	158
6.19	Gràfic evolutiu de la pressió atmosfèrica a San Fernando (color blau) i a Pàdua (color groc), amb el valor del $WeMO_i$ (color rosa viu).	161
6.20	Sortides del GFS de PRSML i APCP del dia 8 per als dies de l'11 al 13 de desembre de 2019, a les 12 h.	162
6.21	Sortides del GFS de PRSML i APCP del dia 9 per als dies de l'11 al 13 de desembre de 2019, a les 12 h.	162
6.22	Sortides del GFS de PRSML i APCP del dia 10 per als dies de l'11 al 13 de desembre de 2019, a les 12 h.	163
6.23	Sortides del GFS de PRSML i APCP del dia 11 per als dies de l'11 al 13 de desembre de 2019, a les 12 h.	163
6.24	Sortides del GFS de PRSML i APCP del dia 12 per als dies de l'11 al 13 de desembre de 2019, a les 12 h.	164
6.25	Sortides del GFS de PRSML i APCP del dia 13 per al dia 13 de desembre de 2019, a les 12 h.	164

6.26	Mapa de reanàlisi del GFS de la situació sinòptica per al dia 12 de desembre de 2019: (a) centres d'acció i (b) precipitació. Font: Wetterzentrale	165
6.27	Gràfic d'evolució temporal del $WeMO_i$ del dia 18/01/2020 a les 00 h per a les següents 144 h	167
6.28	Evolució del valor del $WeMO_i$ esperat per al temporal Glòria.	168
6.29	Mapes de pressió atmosfèrica i de precipitació resultants de l'eina WeMOTool del dia 18 per als dies del 20 al 23 de gener de 2021, a les 00 i a les 12 h.	169
6.30	Mapes de pressió atmosfèrica i de precipitació resultants de l'eina WeMOTool del dia 19 per als dies del 20 al 23 de gener de 2021, a les 00 i les 12 h.	170
6.31	Mapes de pressió atmosfèrica i de precipitació resultants de l'eina WeMOTool del dia 20 pel dia 20 a 23 de gener de 2021 a les 00 i les 12h.	171
6.32	Mapes de pressió atmosfèrica i de precipitació resultants de l'eina WeMOTool del dia 21 pel dia 21 a 23 de gener de 2021 a les 00 i les 12h.	172
6.33	Mapes de pressió atmosfèrica i de precipitació resultants de l'eina WeMOTool del dia 22 pel dia 22 a 23 de gener de 2021 a les 00 i les 12h.	173
6.34	Mapes de pressió atmosfèrica i de precipitació resultants de l'eina WeMOTool del dia 23 pel dia 23 de gener de 2021 a les 00 i les 12h.	174
6.35	Reanàlisi de pressió atmosfèrica i de precipitació dels dies 20 a 23 de gener de 2021, a les 00 h. Font: Wetterzentrale	175
9.1	Temperatura del mar per als mesos de setembre, octubre i novembre (1984-2016).	211

Acrònims

- AEMET: Agència Estatal de Meteorologia.
- AMJJAS: April, May, June, July, August, September (abril, maig, juny, juliol, agost i setembre).
- APCP: Accumulated total precipitation (precipitació total acumulada).
- ARPAV: Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto (Agència Regional per a Prevenció i Protecció Ambiental del Vèneto).
- AR4: Fourth Assessment Report (quart informe d'avaluació de l'IPCC).
- BNDC: National Climate Data Bank (banc nacional de dades climatològiques).
- CRU: Climate Research Unit (Unitat de Recerca Climàtica).
- CWT: Circulation Weather Type (classificació per tipus de circulació).
- DANA: Depressió aïllada a nivells alts.
- DJF: December, January, February (desembre, gener, febrer).
- ECA & D: European Climate Assessment and Dataset (Dades i Avaluació del Clima Europeu).
- ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Centre Europeu de Previsions Meteorològiques a Mitjà Termini).
- ERA: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Re-Analysis (reanàlisis del Centre Europeu de Previsions Meteorològiques a Mitjà Termini).

- GFS: Global Forecast System (model global de predicció).
- GPH: Geopotential height (altura geopotencial).
- GRIB: GRIdded Binary or General Regularly-distributed Information in Binary form (informació general distribuïda regularment en forma binària).
- IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change (Grup Intergovernamental d'Experts sobre el Canvi Climàtic).
- JJA: June, July, August (juny, juliol, agost).
- MAM: March, April, May (març, abril, maig).
- MeteoAM: Servizio Meteorologico, Aeronautica Militare (Servei Meteorològic de l'Aeronàutica Militar).
- NAO: North Atlantic Oscillation (oscil·lació de l'Atlàntic nord).
- NAO_i : North Atlantic Oscillation Index (índex de l'oscil·lació de l'Atlàntic nord).
- NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration (Administració Nacional dels Oceans i de l'Atmosfera).
- ODS: Objectius de Desenvolupament Sostenible.
- ONU: Organització de les Nacions Unides.
- PCA: Principal Component Analytics (anàlisi de components principals).
- PRMSL: Pressure reduced to mean sea level (pressió atmosfèrica reduïda a nivell del mar).
- SLP: Sea Level Pressure (pressió a nivell del mar).
- SO: sud-oest.
- SON: September, October, November (setembre, octubre, novembre).
- SONDJF: September, October, November, December, January and February (setembre, octubre, novembre, desembre, gener i febrer).
- SPREAD: Spanish PREcipitation At Daily scale (precipitació espanyola a escala diària).

- WeMO: Western Mediterranean Oscillation (Oscil·lació de la Mediterrània Occidental).
- *WeMO_i*: Western Mediterranean Oscillation Index (índex de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental).
- XOM: Xarxa d'Observadors Meteorològics.

Capítol 1

INTRODUCCIÓ

1.1 Presentació

La paraula *clima* procedeix del grec *Klima*, que designava una zona de la Terra limitada per dues latituds, associades a la inclinació dels rajos solars i, per extensió, a les característiques meteorològiques predominants [Agencia Estatal de Meteorología de España, 2011]. El clima es defineix com la mitjana de condicions atmosfèriques o, de manera més rigorosa, com la descripció estadística en termes de mitjana i variabilitat de diverses variables, normalment variables en superfície, com la temperatura, la precipitació i el vent, per al període de temps de trenta anys [Matthews, 2018]. És a dir, és l'estat del sistema climàtic, inclosa la descripció estadística. Les descripcions del clima d'una zona proporcionen una idea del temps que cal esperar, sense proporcionar cap detall específic sobre el temps que farà un dia determinat, encara que són aquests registres meteorològics els que a llarg termini ajuden a detectar els patrons i les tendències del clima.

La interacció del canvi climàtic amb àmbits socials, econòmics, polítics i naturals és clau en moltes branques del saber, en què la comunitat científica és responsable d'informar la societat de les repercussions que les activitats antròpiques poden tenir sobre el sistema natural i, en conseqüència, sobre la mateixa societat. Ara bé, és una qüestió complexa, que no es pot centrar en la comunicació unidireccional de les evidències científiques, sinó que ara ja es tracta d'explicar els riscos i impactes, entenent la mitigació i l'adaptació com un procés d'aprenentatge social, multidisciplinari i dinàmic per tal que hi hagi una transformació social verídica. Un dels punts clau perquè existeixi una bona adaptació és una robusta predicció de fenòmens extrems.

L'atmosfera¹ és un sistema dinàmic descrit per equacions que tenen una gran sensibilitat a les condicions inicials [Santos Burguete et al., 2018]. Això fa que la seva naturalesa sigui, en essència, caòtica i, per tant, amb canvis bruscos i ràpids. En aquest sentit es podria dir que es tracta d'un sistema dinàmic i sense memòria [Rodríguez, 2017]. No obstant, dins d'aquesta dinàmica caòtica, hi ha uns certs tipus de variabilitat subjacents a aquestes variacions caòtiques, que han de considerar-se una característica natural del sistema atmosfèric i, particularment, un reflex dels complexos processos de la dinàmica interna de l'atmosfera i la seva interacció amb altres sistemes naturals, com els oceans [Cubasch et al., 2013].

¹O dinàmica atmosfèrica. És una part de la termodinàmica que estudia les lleis físiques i els fluxos d'energia involucrats en els processos atmosfèrics. Aquests processos presenten una gran complexitat per l'enorme gamma d'interaccions possible tant en el mateix si de l'atmosfera com amb les altres parts (sòlida i líquida) del nostre planeta. Font: Viquipèdia.

Aquestes variacions són les que denominem *patrons de teleconnexió*.

El tipus de variabilitat, o patró de teleconnexió, determina i condiciona elements climàtics com la precipitació, la temperatura, la posició i la intensitat del *jet stream* (o corrent en jet o en raig) sobre certes àrees geogràfiques. Es tracta d'estructures espacials persistents a gran escala d'anomalies de circulació, les quals s'expandeixen sobre vastes àrees durant períodes de temps de setmanes a anys. Els patrons de teleconnexió reflecteixen canvis a gran escala en les ones atmosfèriques i en els corrents en raig, on exerceixen la influència [Walker and Bliss, 1928] [Van Loon and Rogers, 1978]. Aquests factors aplicats a escala local, com ara a la conca de la mediterrània, expliquen el calendari pluviomètric i la distribució estacional, en què la particularitat dels factors geogràfics accentua la seva singularitat pluviomètrica i, per tant, els riscos associats. Un dels aspectes més estudiats actualment en els treballs sobre climatologia en aquesta àrea geogràfica és el que es refereix a la variabilitat pluviomètrica centrada en l'actual procés de canvi climàtic, sobretot per la seva incerta evolució. En aquest sentit, l'arc mediterrani és una àrea amb una notable freqüència d'episodis torrencials, principalment degut a la seva situació de transició entre el clima marítim temperat, el semidesèrtic i el continental, així com al paper que exerceix el mar Mediterrani en la dinàmica atmosfèrica d'aquest territori [Martín-Vide and Fernández Belmonte, 2001a]. El règim de pluges de la Mediterrània és variable i irregular, en què la distribució anual de les precipitacions consisteix en un període molt sec a l'estiu i una estació humida a la tardor i a l'hivern. Tot i que les precipitacions poden variar substancialment d'any en any, els períodes de sequera severa poden anar seguits d'episodis de pluges torrencials, que en només vint-i-quatre hores poden produir quantitats de precipitació que superen la pluja anual [Peñarrocha et al., 2002].

1.2 Motivació

L'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental (*Western Mediterranean Oscillation*, WeMO) i el seu índex associat és un patró de teleconnexió regional, consolidat i correlacionat amb la variable climàtica de la precipitació, a la part oriental de la península Ibèrica [Martín-Vide, 2004, Martín-Vide and Lopez-Bustins, 2006]. Aquest patró de circulació de baixa freqüència, amb els seus cicles i variacions, explica la variabilitat pluviomètrica durant el semestre fred de l'any a l'arc mediterrani i el comportament del seu règim pluviomètric. Inicialment, els estudis de la variabilitat pluviomètrica s'han centrat a determinar com es caracteritza la precipitació en un període de temporal a partir d'uns estadístics bàsics [Sánc-

hez, 1975] o nous índexs (*Precipitation Concentration Index*, PCI, i l'índex de disparitat consecutiva, S1) [Burgueño, 1992, Oliver, 1980, Martín-Vide, 2004]. No merament els índexs pluviomètrics han servit per caracteritzar la pluviometria: també els índexs de teleconnexió ens permeten establir correlacions amb les precipitacions i indicar, així, quins tipus de fluxos o circulacions afavoreixen l'ocurrència de la precipitació. Així mateix, el desenvolupament de l'índex de teleconnexió per a la Mediterrània Occidental, $WeMO_i$, va suposar la possibilitat de determinar el comportament pluviomètric de la façana oriental de la península Ibèrica. La precipitació d'aquesta franja mediterrània es troba feblement influenciada pel patró de teleconnexió de l'Atlàntic Nord (*North Atlantic Oscillation*, NAO) [López-Bustins, 2007]. La pluviometria de l'arc mediterrani peninsular, estudiada per molts altres autors, és una àrea que no es correlaciona satisfactòriament amb la NAO, però la proposta del patró [Martín-Vide and Lopez-Bustins, 2006] com a fenomen òptim per tal de definir i explicar la caracterització de la precipitació en aquesta àrea va suposar un avanç en l'estudi de la variabilitat espacial i temporal de la precipitació a la façana oriental de la península Ibèrica. El patró de la NAO ha estat usat en nombrosos estudis climatològics, hidrològics i ecològics [Castro-Díez et al., 2002, Fernández-Martínez et al., 2017].

Les precipitacions torrencials són una de les característiques climàtiques més interessants globalment però, en concret, a l'arc mediterrani, ja que representa una de les principals causes potencials de riscos naturals de la zona. El canvi climàtic, forçat per l'actuació de l'home i, sobretot, per l'emissió de gasos amb efecte hivernacle, és ja una realitat. Tanmateix, el paper que com a inductor pot jugar en un creixement potencial sobre els riscos naturals no és el mateix per a tots. Tota una gamma de riscos meteorològics i físics locals que ja afecten l'àrea del Mediterrani es veuen agreujats, a més, per la ràpida urbanització costanera. Els estudis elaborats tracten el canvi global com a projeccions de futur, en base a les dades del passat i als factors de la resiliència, la freqüència, la perillositat i l'impacte. En conseqüència, aquesta tesi vol respondre a la necessitat de predir, a curt termini, les precipitacions torrencials associades al $WeMO_i$ i, per tant, a l'alerta sobre aquests factors a l'est peninsular, en què les precipitacions tendeixen a concentrar-se en un nombre relativament baix de dies, amb una gran part del total de precipitacions generades en alguns episodis de pluja. Les característiques de les condicions atmosfèriques que donen lloc a precipitacions torrencials a la regió s'han estudiat des de diverses perspectives. El factor crucial és la presència de fluxos de llevant acompanyats de tàlvegs o baixes pressions. Són molts els autors [Armengot, 1994, Armengot, 2000, Estrela et al., 2000] que descriuen les situacions sinòptiques que produeixen precipitacions torrencials a la zona. També des d'una perspectiva meteorològica [Doswell III et al., 1998] es destaquen els

factors dinàmics d'estrès i les metodologies diagnòstiques que podrien ser útils per predir les precipitacions torrencials, i el tractament sobre la simulació d'episodis de pluges torrencials a Catalunya [Ramis et al., 1995].

Segons el tercer informe del canvi climàtic a Catalunya [Martín-Vide et al., 2016], les inundacions es defineixen com a risc hidrometeorològic, amb presència d'altres factors involucrats. D'aquests, els climàtics es poden veure alterats amb l'augment de pluges torrencials, sobretot a l'estiu i a la tardor i de manera local i sobtada, en què la freqüència dels extrems de precipitació probablement augmentin, segons múltiples models climàtics [Durman et al., 2001, Palmer and Räisänen, 2002]. Amb l'anàlisi de la sèrie d'inundacions enregistrades a Catalunya per al període 1301-2012 es corrobora la variabilitat natural de les inundacions catastròfiques i extraordinàries, que mostra una lleugera tendència positiva, molt vinculada a les oscil·lacions climàtiques [Barrera-Escoda and Llasat, 2015].

Així, el fet què el $WeMO_i$ estigui relacionat amb el caràcter extrem de la precipitació a l'est peninsular del passat climàtic, que són múltiples les teleconnexions que s'usen com a eines predictives per explicar la variabilitat climàtica d'una regió i que la $WeMO$ és l'única per a la qual no s'ha desenvolupat un predictor temporal (és a dir, que predigui l'evolució d'aquest índex en diferents escales temporals futures) ha comportat que aquest últim punt tingui un gran interès per al desenvolupament d'aquesta tesi, tant des del punt de vista climatològic com per les seves repercussions socials, en tant que la predicció d'aquest índex permetria millorar i donar més eines per a la re-planificació i la re-gestió territorial, social, demogràfica i econòmica, i per construir les prediccions estacionals. De la mateixa manera, ajudaria a precisar els trets de la precipitació a unes escales temporals horària, diària, mensual i estacional, la qual cosa possibilitaria, també, una millor gestió dels recursos hídrics en el vessant mediterrani peninsular, regió que pateix una freqüent escassetat d'aquests recursos. No obstant això, per entendre les possibilitats que pot oferir el predictor esmentat, cal prosseguir amb la caracterització del $WeMO_i$ mitjançant l'ús d'altres bases de dades provinents de models matemàtics i altres mètodes estadístics que demostrin la importància d'aquest fenomen de teleconnexió atmosfèrica.

1.3 Marc teòric

Segons la classificació de Köppen, el clima mediterrani es caracteritza per un comportament estacional, amb hiverns humits i suaus i estius secs i càlids [KOPPEN, 1936], en què els mesos més secs són juliol i agost, amb menys de la meitat de

les precipitacions dels mesos més humits, novembre i desembre [Fortuny et al., 2015]. Ara bé, a part de la variabilitat estacional, les precipitacions a la regió de la Mediterrània també presenten grans variacions espacials. La major part de la precipitació anual té lloc als mesos més freds de l'any i és causada principalment per tempestes originades a l'Atlàntic nord que arriben a la península Ibèrica. Per aquest motiu, les costes occidentals ibèriques presenten, en general, precipitacions hivernals climatològiques més elevades que les costes orientals mediterrànies [Bolle, 2003], mentre que la precipitació durant l'estiu és escassa, a causa de l'anticicló subtropical sobre la península Ibèrica [Rodwell and Hoskins, 2001]. Però, a més, les teleconnexions persistents, recurrents, cobreixen una àmplia escala espacial i hi juguen un paper fonamental, en què la NAO condiciona bona part de la variabilitat dels patrons de temperatura i de precipitació sobre Europa [Osborn et al., 1999]. La península Ibèrica no queda fora d'aquesta influència (figura 1.2) i és el sector més sud-occidental, durant la meitat freda de l'any (octubre-març), el que presenta una millor correlació entre els valors dels índexs i la precipitació [Pita Rodríguez et al., 1999, Martín-Vide and Fernández Belmonte, 2001b]. L'oscil·lació de l'Atlàntic nord o NAO és una de les principals fonts de variabilitat interanual de la circulació atmosfèrica a l'Europa més occidental i inclús d'una part substancial de l'hemisferi boreal. Tradicionalment es defineix l'índex NAO com la diferència de pressió atmosfèrica entre una estació localitzada a Islàndia (Akureyri i Stykkisholmur) i una altra a les illes Açores (Ponta Delgada) [Walker, 1928]. I és que l'investigador Hurrell [Hurrell, 1995] va demostrar que aquest fenomen explica més del 36% de la variància del camp de pressió (mitjana) dins de la regió compresa entre els 20°-80° N i 90°W - 40°E, des del desembre fins al març. Aquest índex, durant els mesos més càlids, s'ha negativitzat en les darreres dècades (vegeu la figura 1.1a), mentre que sembla més positiu durant els mesos més freds de l'any (vegeu la figura 1.1b).

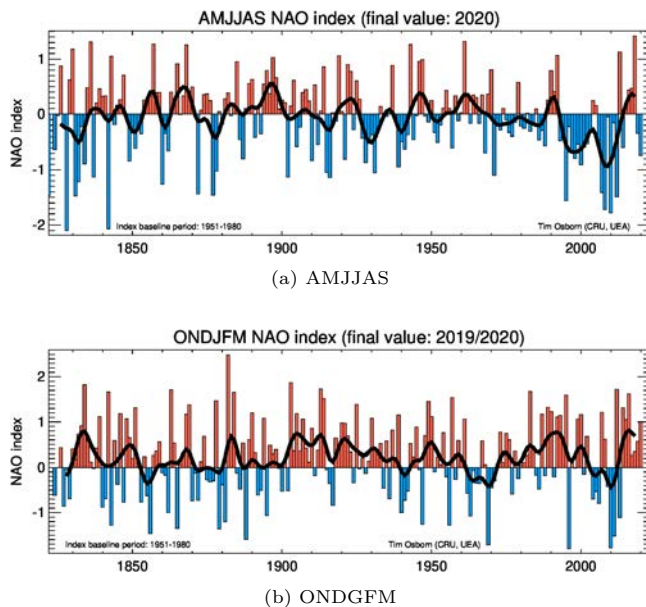


Figura 1.1: Índex d'oscil·lació de l'Atlàntic nord (NAO_i), 1820-2020.
Font: CRU.

HI ha estudis que han relacionat la NAO amb la precipitació d'hivern, els vents i la temperatura, incloent-hi extrems sobre l'oest de la Mediterrània [Vicente-Serrano et al., 2009, Di Lorenzo et al., 2008, Jerez et al., 2013, Casanueva et al., 2014]. A més, durant l'hivern, la fase positiva de la NAO podria actuar com a precursora de les ciclogènesi explosives que afecten Europa [Gómara et al., 2014]. Treballs recents suggereixen combinacions de la NAO amb altres patrons de teleconnexió, com el patró Scand i EA, per explicar la variabilitat climàtica del SO d'Europa [Comas-Bru and McDermott, 2014]. Des d'una perspectiva més regional, patrons com l'oscil·lació de la Mediterrània (MO) i l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental (WeMO) [Martín-Vide and Lopez-Bustins, 2006, Lana et al., 2016] són també importants a l'hora de descriure la variabilitat atmosfèrica de la regió [Barriopedro et al., 2014]. La NAO té una influència en el sector més sud-occidental de la península Ibèrica, durant la meitat més freda de l'any (d'octubre a març), la qual presenta una millor correlació entre els valors dels índexs i la precipitació (vegeu la figura 1.2) [Martín-Vide et al., 2000], i amb l'índex de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental expliquen gran part de la variabilitat

a la península Ibèrica.

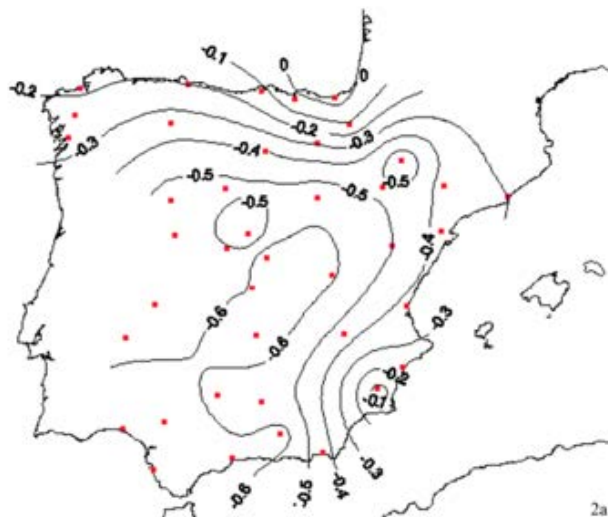


Figura 1.2: Distribució de les correlacions de la precipitació i el NAO_i per a la península Ibèrica (1900-1994). Font: [Martín-Vide et al., 2000].

La part oriental de la península Ibèrica (figura 1.2) queda més aïllada de la influència de la NAO, però també ho fan altres teleconnexions, com l'oscil·lació de la Mediterrània (MO_i) i totes les seves variants que la defineixen, i és aquí on es fa efectiva l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental (WeMO, *Western Mediterranean Oscillation*), un patró de teleconnexió de caràcter regional. És definit per poder explicar la variabilitat pluviomètrica d'aquelles zones orientals de la península Ibèrica on l'oscil·lació de l'Atlàntic nord té una influència dèbil [López-Bustins, 2007]. Cal explicar com influeixen aquests patrons en la pluvio-metria de la regió mediterrània, i és que la influència hi és destacable i variada. Tot i tractar-se d'un patró regional, s'ha comprovat que la WeMO i, en conseqüència, les fases del seu índex ($WeMO_i$) tenen una influència destacada en les anomalies meteorològiques i en la variabilitat climàtica de la franja mediterrània de la península Ibèrica. Així, la WeMO s'associa a la variabilitat climàtica de la regió mediterrània, amb encara més èmfasi en el cas de la precipitació, ja que porta associats canvis en la intensitat i la totalitat de la precipitació: la fase positiva de la WeMO comporta a l'àrea d'estudi de la Mediterrània anomalies negatives de precipitació; la fase negativa, precipitacions superior a les normals, i una fase neutral.

Les àrees definides són la plana del Po, al nord de la península Itàlica, i el golf de Cadis, al sud-oest de la península Ibèrica. Pel que fa a la plana del Po, es troba influenciada per l'anticicló d'Europa central i la depressió del mar Lìgur i, per tant, s'hi dona una alta variabilitat baromètrica. Per una altra banda, l'àrea del golf de Cadis freqüentment es troba influenciada per l'anticicló de les Açores i, puntualment, per baixes circumpolars despreses o per ciclogènesis. Així doncs, l'índex WeMO, en relacionar els valors de pressió a Cadis i un altre a Pàdua, avalua amb certesa la intensitat i la zonalitat dels fluxos atlàntics i de la conca mediterrània que afecten la zona d'estudi.

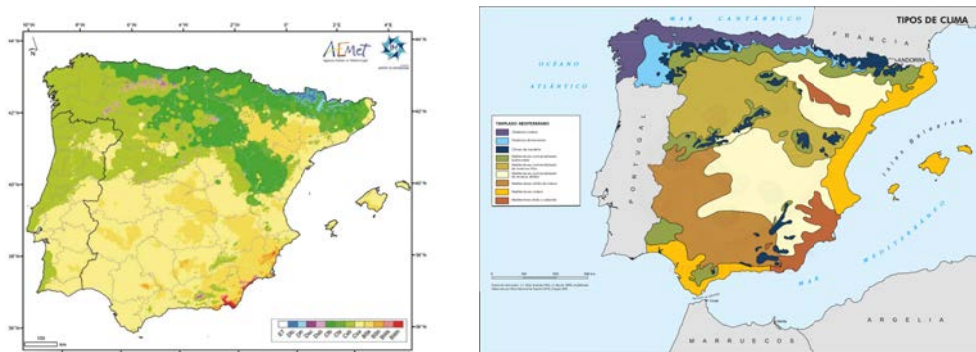
Les evidències dels impactes del canvi climàtic en l'àmbit mediterrani, definit com a *hotspot*, i la identificació de potencials riscos es poden trobar en tots els sectors a considerar [Sanz et al., 2021]: recursos hídrics, desertificació i sòls, ecosistemes terrestres, agricultura i ramaderia, medi marí, costes, medi urbà, salut humana, energia, infraestructures i transport i turisme. Hi ha proves substancials que confirmen que l'escalfament global induït per l'ésser humà ha provocat un augment de la freqüència, la intensitat i/o la quantitat d'esdeveniments de precipitació intensa a escala mundial, així com un augment del risc de sequera a la regió mediterrània [Hoegh-Guldberg et al., 2018] i en què la WeMO sembla tenir un paper important, com la sequera 1999-2001 i 2007-2012 [Mathbout et al., 2021]. Es reconeix una lleugera tendència cap al dèficit hídric i una major aridesa [Moreno, 2005, Hueso-González et al., 2018], i són aquestes àrees mediterrànies (i, per tant, incloent-hi la península Ibèrica) aquelles que apareixen englobades dins de les zones de major incertesa en el marc del canvi climàtic [Lionello et al., 2006, Norrant and Douguedroit, 2005]. Per contra, alhora, s'ha identificat una tendència a la concentració de les precipitacions en un menor nombre de dies, amb un augment dels aiguats extrems, i la major variabilitat espacial [IPCC, 2001, IPCC, 2014]. Aquesta variable pluviomètrica està determinada per una elevada irregularitat, intra i interanual [Edwards and Owens, 1991, Martín-Vide, 2004, Valero et al., 2009, González-Hidalgo et al., 2011a], però constitueix un factor fonamental en el funcionament i el modelatge dels ecosistemes [Martín-Vide, 1994, Maestre et al., 2016]). Així, nombrosos estudis determinen el patró pluviomètric com un dels agents erosius més importants en condicions mediterrànies [Lavee et al., 1998, Peña-Angulo et al., 2018]. La importància de la recerca en les teleconnexions de baixa freqüència que expliquen la variabilitat climàtica pren força. Mitjançant les teleconnexions es poden evidenciar els efectes del canvi climàtic futur, per la qual cosa resulta molt interessant determinar quins són els seus canvis de tendència, l'estabilitat de les seves configuracions espacials i els canvis en la distribució de les seves dades. A més, és important conèixer la sensibilitat

de les teleconnexions a determinats factors interns del mateix sistema climàtic, com, per exemple, la temperatura del mar, cosa que possibilitaria justificar el grau d'estacionarietat i de predictibilitat de les teleconnexions. I és que en l'AR4 de l'IPCC s'han observat canvis en la circulació atmosfèrica i els índexs de la variabilitat climàtica [IPCC, 2007].

Actualment, i en el marc del Fòrum Polític d'Alt Nivell de l'Organització de les Nacions Unides (ONU) en el qual s'avaluen anualment els progressos de la implementació de l'agenda internacional per al 2030 per al Desenvolupament Sostenible, aquesta tesi s'emmarca en l'*objectiu 13: acció climàtica*.

1.4 Àrea d'estudi

Les classificacions climàtiques fonamentades en els elements precipitació, temperatura i distribució bioclimàtica són múltiples per a totes les escales, no merament a la península Ibèrica, on hi ha molta varietat de climes dins de la categorització establerta com a *mediterrani*, segons la classificació de *Köppen* [Peel et al., 2007] (vegeu la figura 1.3b): de nord a sud, al sud-est, aproximadament, s'hi dona l'oceànic atlàntic, de muntanya i mediterrani. A causa dels factors geogràfics, fa que la diferenciació sigui àmplia (vegeu la figura 1.3). La distribució espacial dels factors i els elements geogràfics i la seva interrelació, que s'expressa en forma de tipus de climes, són: (i) la precipitació total anual, que és més quantiosa a la costa atlàntica i disminueix cap a l'interior i al Mediterrani, i en què la dinàmica atmosfèrica determina l'estacionalitat de les precipitacions i és més important a la tardor en zones mediterrànies; (ii) la influència que exerceix el mar explica aquests contrastos de climes, en pluviometria i també en termometria; i (iii) el relleu i, per tant, el vessant, que determina també les característiques climàtiques, especialment al litoral i prelitoral. I és que, latitudinalment, a la península Ibèrica es barreja l'aire càlid de zones subtropicals amb l'aire fred de zones de major latitud. Més concretament, doncs, i segons la classificació de tipus de clima segons l'Instituto Geográfico Nacional (figura 1.3a), s'hi troben els climes tipus *oceànic coster*, *oceànic de transició*, de *muntanya*, *mediterrani continentalitzat subhúmit*, *mediterrani continentalitzat d'hiverns freds*, *mediterrani continentalitzat d'estius càlids*, *mediterrani càlid d'interior*, *mediterrani costaner* i *mediterrani àrid i subàrid*.

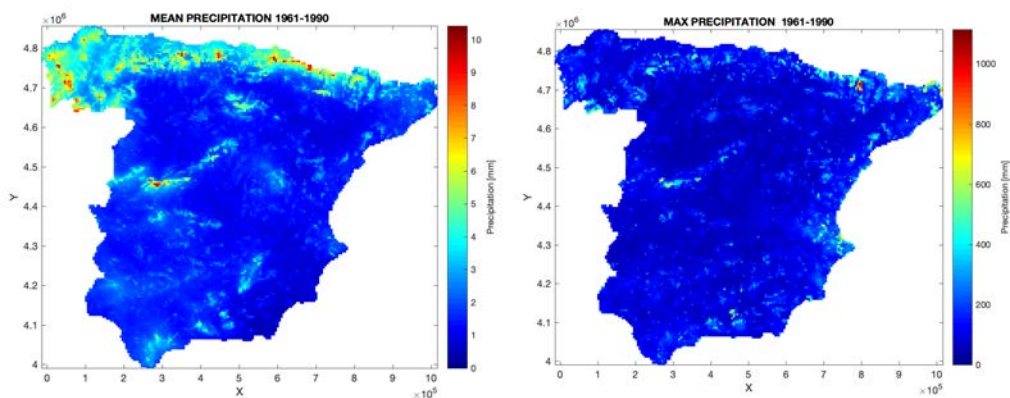


(a) Classificació climàtica Köppen-Geiger (1981-2010) (b) Subclimes mediterranis de la península Ibèrica. Font: IGN.

Figura 1.3: Tipus de climes de la península Ibèrica. Font: Instituto Geográfico Nacional i AEMET.

Com bé s'ha comentat anteriorment, dins la dinàmica atmosfèrica representen un paper molt important les teleconnexions i els índexs que les defineixen. López-Bustins [López-Bustins, 2007] demostra la distribució espacial de les correlacions obtingudes amb el NAO_i i el $WeMO_i$ amb la variable precipitació a tota la península Ibèrica, en què aquesta última té una influència a la franja est peninsular i al golf de Cadis, en la seva fase negativa ($WeMO_i < 0$), i a la franja nord peninsular, en la fase positiva ($WeMO_i > 0$). Pel que fa a la distribució temporal, la influència màxima de la $WeMO$ en extensió i en intensitat ho és en la seva fase negativa en el mes d'octubre i al golf de València. Així doncs, l'àrea d'estudi d'aquesta tesi és a escala peninsular per a l'anàlisi minuciosa del comportament de l'índex de teleconnexió, però, més concretament, se centra en l'arc mediterrani en la fase negativa del $WeMO_i$, en què la distribució espacial i temporal, tant d'extensió com d'intensitat, es donen de manera persistent i amb acompanyament de fortes precipitacions. El clima mediterrani, que transcorre des de Catalunya, el País Valencià i Múrcia, és de transició i en contacte, al sud, entre el domini temperat i humit de les latituds mitjanes i l'àrea àrida i desèrtica del cinturó dels anticiclons subtropicals. Concretament, els règims de circulació atmosfèrica de la conca mediterrània mostren un cicle estacional lligat a la circulació temperada i humida de l'oest a l'hivern i una de subtropical a l'estiu [López-Bustins and Martín-Vide, 2020]. Aquests factors, a més dels esmentats factors i elements geogràfics, descriuen els climes, però no denoten el comportament variable estacional i la caracterització

de les variables temperatura i precipitació. La precipitació mitjana a la península Ibèrica és més abundant al nord, al centre i al sud-oest, i concorda amb la serralada cantàbrica, el massís galaic, el sistema Central i el sistema Bètic, així com els Pirineus (figura 1.4a), mentre que els màxims de precipitació diària (1.4b) també es donen en zones litorals i prelitorals del Mediterrani.



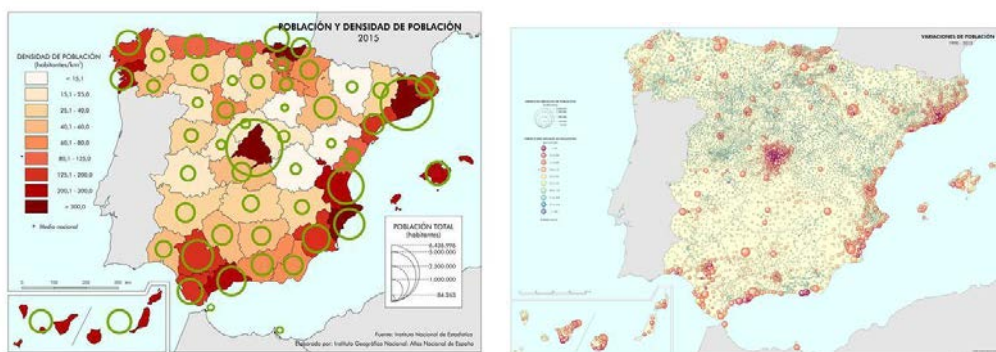
(a) Precipitació mitjana anual de la península Ibèrica (1961-1990). (b) Precipitació màxima diària de la península Ibèrica (1961-1990).

Figura 1.4: Distribució de la variació de la població i la densitat de població a Espanya (2015). Font: Instituto Geográfico Nacional.

Les precipitacions torrencials constitueixen un risc climàtic, i inclús natural, que produeix un elevat nombre de víctimes a la franja litoral de l'est de la península Ibèrica [Martín-Vide et al., 2008]. Existeixen nombrosos estudis que analitzen les característiques climàtiques i meteorològiques de les precipitacions torrencials, ja sigui per abundància de casos, ja sigui per estacionalitat, totals anuals, persistència, dificultat de predicció o tipus de situacions sinòptiques. S'han fet diversos estudis sobre les precipitacions torrencials al sud-est peninsular i les condicions meteorològiques, especialment pel que fa als tipus de temps que poden produir precipitacions d'aquest tipus. Tot i la dificultat d'estudiar-les i la variabilitat de les condicions trobades, les condicions favorables per a la seva aparició van lligades a causes convergents com l'elevada temperatura superficial del mar Mediterrani, l'elevada humitat atmosfèrica, la inestabilitat de la massa d'aire mediterrani (fort gradient tèrmic vertical), la presència de baixes pressions al Mediterrani o al golf de Cadis, una configuració del relleu afavoridora de l'ascens vertical de l'aire i

l'associació a fenòmens de gota freda. Els episodis altament convectius sobre la Mediterrània occidental solen ocórrer a l'estiu i s'associen a brises [López Bustins and Azorín Molina, 2004], i al començament de la tardor, estació que concentra la major ocurrència d'inundacions a l'arc mediterrani peninsular. Es tracta d'esdeveniments de curta durada que poden conduir al desbordament sobtat de rius i de rierols o torrents costaners. Es tracta d'una regió afectada per episodis de pluges sobtades, així com una de les més poblades [Tascón et al., 2018, Pascual, 1999]. A conseqüència d'això, el risc natural associat a aquest fenomen és molt elevat [Llasat et al., 2010].

Cal tenir present també que, tot i que la major part de l'atenció de les darreres dècades s'ha centrat en l'evolució dels extrems climàtics sota la influència del canvi climàtic, l'exposició socioeconòmica a aquests extrems també ha experimentat canvis generalitzats i, fins i tot, més greus. S'espera que les zones urbanes pateixin un creixement poblacional; ja es preveu que l'any 2050 el 68% de la població mundial visqui a les ciutats ([Nations, 2018]) i que ho faci, sobretot, a zones properes de la costa mediterrània (figures 1.5a i 1.5b). La majoria de models climàtics preveuen un augment de la temperatura i una disminució de les precipitacions a la fi del segle XXI per a la regió mediterrània. La disminució de les precipitacions i l'augment de les produccions augmentarà el dèficit hídric en aquesta regió, cosa que farà que l'augment del reg o de qualsevol altra activitat basada en un ús elevat de l'aigua sigui una opció inviable.



(a) Població total i densitat de població l'any 2015 a Espanya. (b) Variació de la població l'any 2015 a Espanya.

Figura 1.5: Distribució de la variació de la població i la densitat de població a Espanya (2015). Font: Instituto Geográfico Nacional.

Aquesta situació crea diversos escenaris urbans-rurals, on les zones altament poblades i densament urbanitzades seran més vulnerables a les conseqüències del canvi climàtic i augmentaran les conseqüències del canvi climàtic, mitjançant una exposició cada vegada més alta a esdeveniments extrems, mentre que les zones rurals densament poblades experimentarien un menor canvi en l'exposició al risc [Zhang et al., 2018], una distinció clara també és caracteritzar els riscos climàtics en hivernals i estivals [Olcina et al., 2016]. En qualsevol cas, la variabilitat climàtica natural inclou l'aparició d'esdeveniments extrems, que podrien ser més freqüents a causa del canvi climàtic en funció del territori, i les zones poblades estan obligades a afrontar aquests escenaris i, en funció d'ells, conèixer millors maneres de gestionar i planificar el desenvolupament de les àrees urbanes en què es demana informació climàtica a escala local per reforçar la resistència als riscos relacionats amb el clima a les zones urbanes [Redolat et al., 2020]. Aquests riscos se sumen a la intensa pressió urbana i l'alta densitat de població que caracteritzen aquestes ciutats, que es tradueixen en reptes que poden afectar els serveis bàsics [Framework, 2015]. Un coneixement detallat sobre el comportament recent del clima i la seva variabilitat espacial i temporal és de suma importància des d'una perspectiva social i econòmica i des d'una perspectiva aplicada de la gestió dels sistemes naturals. A la llum d'això, la caracterització exhaustiva de com la freqüència i la intensitat dels esdeveniments climàtics extrems poden afectar la presa de decisions territorials és una acció prioritària.

Capítol 2

OBJECTIUS I HIPÒTESIS

2.1 Objectius generals

Dins la tesi es troben diferents apartats que fan referència a la relació existent entre la WeMO i la pluviometria a l'est de la península Ibèrica. Així, aquesta tesi té en compte tres objectius principals, els quals coincideixen amb els apartats d'estudi i els quals, alhora, contenen objectius secundaris per acomplir-los. Es plantegen els objectius d'identificació de noves fonts de dades i mètodes, de distribució espacial, de variabilitat temporal, i de càlcul de predicció de l'índex de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental ($WeMO_i$). Es pretén contribuir al major coneixement sobre el caràcter de la precipitació a l'arc mediterrani peninsular i que el $WeMO_i$ sigui un suport a la predicció a curt termini de la precipitació, tant espacial com temporal.

L'objectiu principal d'aquest estudi és **explorar l'impacte del patró climàtic sobre la precipitació a l'est de la península Ibèrica amb diversos mètodes de càlcul**. Es pot desglossar en els següents objectius específics:

- Cercar que noves fonts de dades provinents de models de reanàlisi que siguin òptimes per estudiar la distribució espacial i la variabilitat temporal de la WeMO.
- Definir els patrons per a les diferents configuracions sinòptiques que espacialment defineixin la precipitació a l'est peninsular associada a la WeMO en la seva fase negativa.
- Crear un catàleg de precipitació en extensió i en intensitat per a cada rang del $WeMO_i$.
- Estudiar la regionalització per la correlació de la precipitació amb el $WeMO_i$ per intensitat de precipitació.
- Estudiar la regionalització per la correlació de la precipitació amb el $WeMO_i$ temporalment.
- Plantejar la WeMO com una potencial eina de suport a la predicció de pluja torrencial a resolució diària i horària mitjançant un model numèric.
- Calcular el $WeMO_i$ amb les sortides d'un model meteorològic de predicció.
- Crear una eina visual i espacial de l'impacte de la precipitació moderada i intensa. És important anticipar-se per tal d'augmentar la resiliència als efectes adversos dels esdeveniments atmosfèrics.

2.2 Hipòtesis

En aquesta investigació es parteix de la hipòtesi general: "L'índex de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental amb dades de models numèrics és una eina de suport en la predicció de pluges torrencials". De la mateixa manera que en els objectius, per a cada capítol es plantegen unes hipòtesis específiques que responen a idees principals per corroborar:

- La segona dècada de dies del mes d'octubre és quan es produeixen més episodis extrems.
- El patró de teleconnexió regional de la conca mediterrània occidental ($WeMO_i$) té un pes important en la circulació general a l'Europa occidental.
- Un catàleg categoritzat en funció del valor del $WeMO_i$ permet de classificar geogràficament zones amb possibles alertes per pluges torrencials.
- La predicció del $WeMO_i$, a resolució diària, és una eina clau per a la predicció d'esdeveniments torrencials a l'est de la península Ibèrica.

Capítol 3

BASES DE DADES I METODOLOGIA

3.1 Bases de dades

Instrumental

Per tal de continuar l'estudi instrumental de la sèrie climàtica del $WeMO_i$ de López-Bustins [López-Bustins, 2007], s'ha treballat amb dades instrumentals de dos punts d'estudi, que s'han homogeneïtzat i validat respectivament amb la base de dades ja establerta. La construcció dels valors del $WeMO_i$ és mitjançant dues sèries de pressió superficial úniques: Pàdua i San Fernando.



Figura 3.1: Punts d'estudi de San Fernando i Pàdua.

Pàdua

Pàdua (45.4° N- 11.9° E) s'escull com a punt representatiu seguint la metodologia de López-Bustins (2007) [Martín-Vide and Lopez-Bustins, 2006]. Es tracta del punt d'estudi de l'extrem nord-est del transsecte de la WeMO i és representatiu de la vall del Po, el qual mostra la dinàmica atmosfèrica entre la depressió de la mar Lígur i l'anticicló centreeuropeu. La sèrie d'estudi de la tesi de López-Bustins tracta de la reconstrucció des de l'any 1725 fins al 2013, amb metadades baromètriques amb tres punts d'estudi com són Vicenza, Pàdua i la plana del Po, suplint els buits entre elles i amb una homogeneïtzació prèvia. Així doncs, i per

tal de continuar amb la metodologia instrumental, es van cercar possibles opcions, geogràficament similars a Pàdua, ja sigui per altitud, latitud i distància al mar, ja que cap de les utilitzades fins aleshores estan operatives actualment. Es van tractar dades de l'*Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto* (ARPAV) de ciutats com Belluno, Bardolino, Cavallino, Malo, Porto Tolle Pradon, Teolo i Venezia Cavanis. Tals dades, reduïdes a nivell del mar, havien de solapar-se certs anys amb la base de dades de Vicenza-Pàdua-plana del Po [López-Bustins, 2007] per tal de fer-ne una correcció estadística. Aquest motiu va fer descartar les esmentades abans, fins a cercar les dades de Treviso (Sant'Angelo i Istrana) de l'*Aeronautica Militare*, d'inici l'1 de gener de 1975 i operatives encara ara.

El conveni entre l'*Aeronautica Militare* i el *Grup de Climatologia* és anual i cada principi d'any l'*Aeronautica Militare* proporciona les dades baromètriques i horàries de l'any anterior, les quals són tractades per tal d'actualitzar el valor instrumental del *WeMO_i*. Les dades que s'utilitzen són les de l'estació de Treviso Sant'Angelo (45.65°N i 12.20°E), mentre que les dades de l'estació de Treviso Istrana (45.68°N i 12.08°E) es fan servir per omplir els possibles buits de l'estació principal. En tractar-se de dades automàtiques, la fiabilitat i la continuïtat són gairebé assegurades.

San Fernando

San Fernando (36.5° N 6.2° O) s'escull com a punt representatiu seguint la metodologia [Martín-Vide and Lopez-Bustins, 2006]. Es tracta d'un punt representatiu de l'extrem sud-oest del transsecte de la *WeMO*, el qual mostra la dinàmica atmosfèrica de l'anticicló de les Açores i la baixa circumpolar despresa al golf de Cadis. De la mateixa manera que amb la sèrie de baromètrica d'Itàlia, es continua l'estudi amb la sèrie de l'estació de San Fernando, iniciada a la tesi de López Bustins, que comprèn el període 1821-2000. Aquesta sèrie està construïda amb dades de la ciutat de Cadis, de Rota i de la localitat de San Fernando; aquesta última és la base de dades que s'utilitza en aquesta tesi. La sèrie baromètrica de San Fernando, situada a l'*observatori de l'Armada Espanyola*, pertany a l'*Agència Estatal de Meteorologia* (AEMET). Aquestes dades també es proporcionen cada inici d'any amb les dades diàries de l'any anterior i s'hi aplica una correcció, ja que la mesura és a una altura de 28 msnm, així que, a més del calibratge propi, es corregeix cada valor amb +3.7 hPa. Però, en tractar-se de dades automàtiques, són altament fiables i la seva continuïtat també és gairebé assegurada.

Reanàlisi

Les dades de reanàlisi meteorològica es produeixen a partir de la combinació de dades del mesurament, l'observació i la simulació, aplicant-hi tècniques d'assimilació de dades, per tal d'obtenir una descripció més realista de les ocurrences climàtiques. El conjunt de dades combinades per models meteorològics amb dades d'observació de satèl·lits i sensors terrestres té l'objectiu de crear un registre constant al llarg del clima, per millorar la comprensió del clima passat, què va succeir durant un esdeveniment climàtic en particular i per què, i relacionar-se amb els esdeveniments climàtics actuals i passats. Aquests conjunts de dades només estan disponibles per a períodes històrics i amb un retard substancial de diverses setmanes o mesos.

Així doncs, la reanàlisi és un mètode que descriu numèricament, globalment, físicament i consistentment el clima en el passat recent. Aquest mètode ha evolucionat en el passat recent amb l'objectiu d'extreure la màxima informació utilitzant els millors models disponibles per assimilar diferents tipus de observacions; per exemple, des d'estacions meteorològiques, vaixells, globus aeris, avions i una gran varietat de satèl·lits. Tanmateix, les dades de reanàlisi funcionen amb diferents graus de qualitat i precisió a causa de les diferències en els esquemes d'assimilació o les observacions d'entrada, entre altres factors [Dee et al., 2011a]. Per tant, és una òptima representació de les condicions i l'estat de l'atmosfera a diferents escales temporals i espacials, que ajuden a comprendre la dinàmica de l'atmosfera. El conjunt de dades resultants és una graella *grid* de cobertura global i una sèrie temporal sense llacunes temporals i espacials.

En aquesta tesi s'han utilitzat sis tipus de reanàlisis, de resolució temporal i espacial diferents: ERA-Interim, ERA-40, ERA5, 20CR, MERRA2 i NCEP / NCAR. La taula 3.1 resumeix les característiques principals de cadascuna:

Conjunt de dades de reanàlisi global en un interval de 00 h, a resolució diària				
Dades	Resolució lat × lon	Variable utilitzada	Operatiu	Referència i font
ERA5	0.1 × 0.1	slp	1950-present	[Hersbach et al., 2020] https://cutt.ly/WnQVJjO
ERA-Interim	0.75 × 0.75	slp	1979-2020	[Dee et al., 2011b] https://cutt.ly/mnQV1OJ
ERA-40	1.125×1.125	slp	1957-2002	[Uppala et al., 2005] https://cutt.ly/CnQV41m
20CR	2.0 × 2.0	slp	1870 - 2009	[Compo et al., 2011] https://cutt.ly/PnQV68p
MERRA2	0.5 × 0.625	slp	1980 - 2020	[Gelaro et al., 2017] https://cutt.ly/QnQBiQV
NCEP/NCAR	2.5 × 2.5	slp	1948 - Present	[Kalnay et al., 1996] https://cutt.ly/rnQBXiL

Taula 3.1: Característiques principals de les reanàlisis utilitzades. [Darrer accés: 07/06/2021].

Segons la *Guia de dades climàtiques* del *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), que proporciona informació concisa i fiable, amb els punts forts i les limitacions clau dels conjunts de dades observacionals, així com eines i mètodes utilitzats per avaluar els models de sistemes terrestres i entendre el sistema climàtic, s'ha preparat el text següent, que tracta sobre les reanàlisis estudiades.

El model de reanàlisi ERA-40 [Uppala et al., 2005] és una reanàlisi d'observacions meteorològiques que comprèn del setembre de 1957 a l'agost de 2002, produïda pel *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) i que va ser generada utilitzant una versió de l'*ECMWF Integrated Forecast Model* (IFS). Les dades de satèl·lits utilitzades inclouen radiàncies des de 1972 *Vertical Temperature Profile Radiometer* (VTPR), seguides per les dades obtingudes del TOVS (*TIROS Operational Vertical Sounder*), de l'*Special Sensor Microwave Imager* (SSM / I), de l'*European Remote Sensing* (ERS) i del *TIROS (Television Infrared Observation Satellite) Operational Vertical Sounder* (ATOVS), i a partir de 1979 es fa ús dels CMW. A més, es van utilitzar dades de diversos camps d'experiments anteriors, com són el GATE (*GARP Atlantic Tropical Experiment*) de 1974, el FGGE de 1979, l'ALPEX de 1982 del GARP, i el TOGA-COARE (*Tropical Ocean Global Atmosphere - Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment*) de 1992 a 1993.

- Punts forts:
 - Assimila radiants de satèl·lit directament (dades TOVS, SSM / I, ERS i ATOVS).
- Limitacions:
 - Hi ha biaixos de les dades d'humitat tropical (precipitació i columna de vapor d'aigua).
 - Les precipitacions superen l'evaporació.
 - La circulació de Brewer-Dobson queda representada de manera massa intensa.

La reanàlisi atmosfèrica ERA-20C és el primer model de reanàlisi del Centre Europeu de Previsions Meteorològiques de Mitjà Abast (ECMWF), resultat del projecte ERA-CLIM (*European Reanalysis of Global Climate Observations*), i proporciona un conjunt de dades globals de circulació atmosfèrica que comprèn el període 1850-2014. Els productes de l'ERA-20C descriuen l'evolució espai-temps de l'atmosfera amb una resolució horitzontal de 125 km i una resolució temporal diària de 3 h. Hi ha disponibles les dades mitjanes mensual i diària per una resolució temporal cada 3 h.

- Punts forts:
 - Durada del registre.
 - Estimacions d'incertesa.
- Limitacions:
 - Incongruències entre 20 CR i altres dades, especialment a escala regional.

El model de reanàlisi ERA-Interim, també produït per l'*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), té una resolució d'uns 80 km. L'assimilació de dades es basa en un sistema molt millorat en comparació amb l'ERA-40, ja que representa una reanàlisi de tercera generació. Comprèn els anys des de 1979 fins a meitat de 2019, quan va ser reemplaçat per l'ERA5.

- Punts forts:
 - Conjunt de dades completes espacialment i temporalment de múltiples variables a alta resolució espacial i temporal.

- Millora de la variabilitat de baixa freqüència (en comparació amb l'ERA-40).
- Millora de la circulació estratosfèrica (en comparació amb l'ERA-40).
- Limitacions:
 - Cicle de l'aigua massa esbiaixat (precipitació, evaporació) sobre els oceans.
 - A l'Àrtic: biaixos positius de temperatura i humitat inferiors a 850 hPA en comparació amb els radiosondatges: no capta inversions de baix nivell.

L'ERA5, el model de reanàlisi successor de l'ERA-Interim, també produït per l'*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), té una resolució de 31 km. S'estén a partir de 1950, i es parla d'un producte extraordinari.

- Punts forts:
 - Conjunt de dades completes espacialment i temporalment de múltiples variables a alta resolució espacial i temporal, capaces de resoldre fenòmens meteorològics com els huracans.
 - Millor representació de la circulació troposfèrica.
 - Assimilació de dades de molts instruments recents, inclosos IASI, ASCAT, CrIS, MWHS, MWHS-2, TMI, SSMIS, AMSR-2, GMI.
- Limitacions:
 - Les tendències no físiques i la variabilitat poden ser presents en el registre a causa de canvis en el sistema d'observació.
 - La consistència de la representació de les temperatures mitjanes mundials a l'estratosfera mitjana superior no ha millorat (respecte a l'ERA-Interim).

El MERRA-2 és una reanàlisi que ha substituït el MERRA original. L'anàlisi retrospectiva de l'era moderna per a la investigació i les aplicacions (MERRA) va ser realitzada per l'Oficina de Modelització i Assimilació Global de la NASA amb dos objectius principals: (i) situar les observacions dels satèl·lits del sistema d'observació de la Terra de la NASA en un context climàtic i (ii) millorar el cicle hidrològic representat en generacions de reanàlisis MERRA; es va generar amb la versió 5.2.0 del model atmosfèric *Goddard Earth Observing System* (GEOS) i el *Data Assimilation System* (DAS), i cobreix l'era moderna dels satèl·lits des

de 1979 fins a l'actualitat. En concret, la versió 5 de GEOS-DAS implementa actualitzacions d'anàlisi incremental (IAU) per ajustar lentament els estats del model cap a l'estat observat.

- Punts forts:
 - Presenta una millora significativa de la precipitació i la climatologia del vapor d'aigua en comparació amb les reanàlisis més antigues.
 - El procediment de la IAU en què s'aplica la correcció de l'anàlisi al model de predicció millora gradualment la precipitació durant les primeres etapes de la previsió i permet una sortida de freqüència més alta, inclosos els camps horaris seleccionats.
 - Proporciona integrals verticals i camps d'increment d'anàlisi per al tancament dels camps de pressió atmosfèrica.
- Limitacions:
 - Els canvis en el sistema d'observació afecten fortament les tendències en molts camps (com en altres reanàlisis).
 - La rutina d'assimilació està aturada i no s'actualitzarà per als instruments de satèl·lit més nous, de manera que la qualitat acabarà degradant-se a mesura que caduquin els instruments actuals.

Per acabar, la reanàlisi NCEP/NCAR és creada per la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), i va ser la primera reanàlisi d'aquest tipus de la NOAA. Originalment planejada per al període 1957-1996 (*projecte de reanàlisi de 40 anys*), es va estendre fins a 1948 i continua fins als nostres dies. Utilitza un sistema global d'assimilació de dades global d'última generació amb una inicialització amb gran varietat d'observacions meteorològiques: vaixells, avions, RAOBS, dades d'estacions, observacions per satèl·lit i molts més. El conjunt de dades es manté actual mitjançant observacions gairebé en temps real.

- Punts forts:
 - Conjunt global de dades.
 - Reanàlisi més llarga, que utilitza dades de radiosondatge.
 - S'utilitza en moltes publicacions, de manera que es pot utilitzar com a referència de base per a molts càlculs.

- Limitacions:
 - Assimilació/model de dades Antiquated (1994).
 - Baixa variabilitat de la humitat espacial i temporal sobre els oceans.
 - Fiabilitat de les dades de les variables a l'hemisferi sud, que són relativament pobres.

Precipitació

Les dades del Banc Nacional de Dades Climàtiques (BNDC) de l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET) i altres conjunts de dades d'organismes oficials, ja siguin nacionals ja siguin locals, contenen informació discontinua sobre la precipitació diària i, en conseqüència, comporten problemes de coherència i un enfocament analític de baixa fiabilitat en la sèrie temporal de les dades. No obstant això, amb limitacions, s'han fet reconstruccions d'observatoris, i gairebé totes les reconstruccions de precipitació a Espanya s'han realitzat a escala mensual [Serrano Notivoli et al., 2020], sense permetre la comprensió de la dinàmica dels esdeveniments extrems ni els seus riscos associats. Tal com apunta Serrano-Notivoli, en són exemples el conjunt de dades de la *Climate Research Unit* (CRU) (hi manquen 35 observatoris a escala mensual durant 1900-2015); *European Climate Assessment and Dataset* (ECA & D) (hi manquen 199 observatoris a escala diària d'entre 1896-2019); *Spain02* ([Herrera et al., 2012] (hi manquen 2.756 observatoris a escala diària d'entre 1950-2003); *MOPREDAS* ([González-Hidalgo et al., 2011b] (hi manquen 2.670 observatoris a escala mensual, d'entre 1946-2005); ([González-Rouco et al., 2001] (hi manquen aproximadament 100 observatoris a escala mensual d'entre 1899-1989), i([Ninyerola et al., 2007] (hi manquen 1.999 observatoris a escala mensual d'entre 1950-1999), entre d'altres.

Ara bé, amb el nou mètode de reconstrucció diària de la precipitació, maximitzant l'ús de la informació disponible i aplicant una reconstrucció climàtica diària adequada per a l'estudi de les variacions locals de la precipitació [Serrano-Notivoli et al., 2017], que permet la descripció detallada del comportament espacial del clima, així com una anàlisi completa i precisa dels índexs climàtics a escala diària, s'ha creat la malla de precipitació diària *Spanish PREcipitation At Daily scale* (SPREAD), de resolució temporal 1950-2016.

A més, per la impossibilitat d'aconseguir les dades de precipitació instrumentals per part de l'Agència de Meteorologia Espanyola (AEMET) i comptant amb l'existència de la malla regular d'alta resolució de precipitació diària SPREAD, s'ha optat per aquesta última opció per desenvolupar aquesta tesi, ja que les resolucions tant espacials com temporals són essencials per abordar l'estudi dels esdeveniments extrems i l'avaluació dels seus riscos associats.

La base de dades de pluviometria utilitzada està constituïda per dades instrumentals reconstruïdes en una malla a resolució diària d'alta resolució espacial de 5 x 5 km per a l'Espanya peninsular [Serrano-Notivoli et al., 2017]; de manera general, per a tota l'Espanya peninsular, uniforme, estandarditzada i corregida. Tal reconstrucció de la precipitació diària a Espanya s'ha fet a partir de 12.898

observatoris, que cobreixen el període 1950-2013. La metodologia implementada², la qual comporta un control de qualitat i l'emplenament de buits utilitzant valors de referència per a cada dia i cada ubicació, està àmpliament reconeguda a escala internacional en nombrosos estudis recents [Decuyper et al., 2020, Diez-Sierra and del Jesus, 2017, Sarricolea et al., 2019, Serrano-Notivoli et al., 2018]. Per tant, aquesta nova malla de dades resulta imprescindible en l'estudi de la precipitació i en el comportament d'aquesta.

Gràcies a aquesta nova base de dades consistent, aspectes com el nombre de dies de precipitació o la intensitat de la precipitació esdevenen de gran importància per tal de caracteritzar el clima d'una regió. I això és molt significatiu en regions com l'est i el sud-est peninsular, que tenen una elevada variabilitat espacial de les precipitacions, en què, ocasionalment, en un sol esdeveniment de precipitació (episodis de pluges torrencials) se supera la mitjana de precipitació del mes en què es dona [Serrano-Notivoli et al., 2017] o, fins i tot, en esdeveniments extrems de tot l'any. D'aquesta manera, la resolució a escala diària de precipitació també resulta imprescindible per analitzar riscos associats als esdeveniments de pluges torrencials.

²Càlcul dels valors de referència mitjançant una predicció binomial (dia sec o humit) i una predicció de magnitud, mitjançant models lineals generalitzats a partir de 10 estacions veïnes properes. La malla resultant estima les quantitats diàries de precipitació i la seva incertesa a cada node de la quadrícula.

3.2 Metodologia

Càlcul de l'índex WeMO

El càlcul de l'índex de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental, establert per [Martín-Vide, 2004], s'utilitza al llarg de tota la tesi amb les diverses bases de dades, tant instrumental com amb models numèrics, ja sigui de reanàlisi ja sigui de predictius. El càlcul del $WeMO_i$ a escala diària es realitza estandarditzant cada sèrie del dipol per separat, mitjançant l'expressió següent:

$$Z_{WeMO_i1Gen2021} = \frac{(P_{1Gen2021SF} - X_{SF1961-1990})}{\delta_{SF1961-1990}} - \frac{(P_{1Gen2021PD} - X_{PD1961-1990})}{\delta_{PD1961-1990}}$$

On $Z_{WeMO_i1Gen2021}$ és l'índex estandarditzant de la $WeMO_i$; P és la pressió atmosfèrica, en hPa; SF , San Fernando; PD , Pàdua; X , mitjana aritmètica, i δ , la desviació estàndard.

També es fa el càlcul mensual, el qual s'obté fent la mitjana de cadascuna d'ambdues sèries de pressió atmosfèrica a partir dels valors diaris. A aquest valor, com mostra l'expressió matemàtica, se li ha de restar la mitjana de pressió del mes en qüestió del període convencional de 30 anys³, 1961-1990, i seguidament cal dividir-ho, també, per la desviació típica del mes en qüestió del mateix període convencional. Finalment, cal restar ambdós valors estandarditzats. I, per tal d'obtenir els valors estacionals, de la mateixa manera que per als mensuals, s'obtenen fent la mitjana dels valors mensuals estandarditzats corresponents a cada estació de l'any, tal com es representa a la figura 3.2.

³L'Organització Meteorològica Mundial (OMM) estableix que una correcta caracterització climàtica s'ha de fer amb registres instrumentals d'almenys trenta anys de durada [Baddour and Kontongomde, 2007].

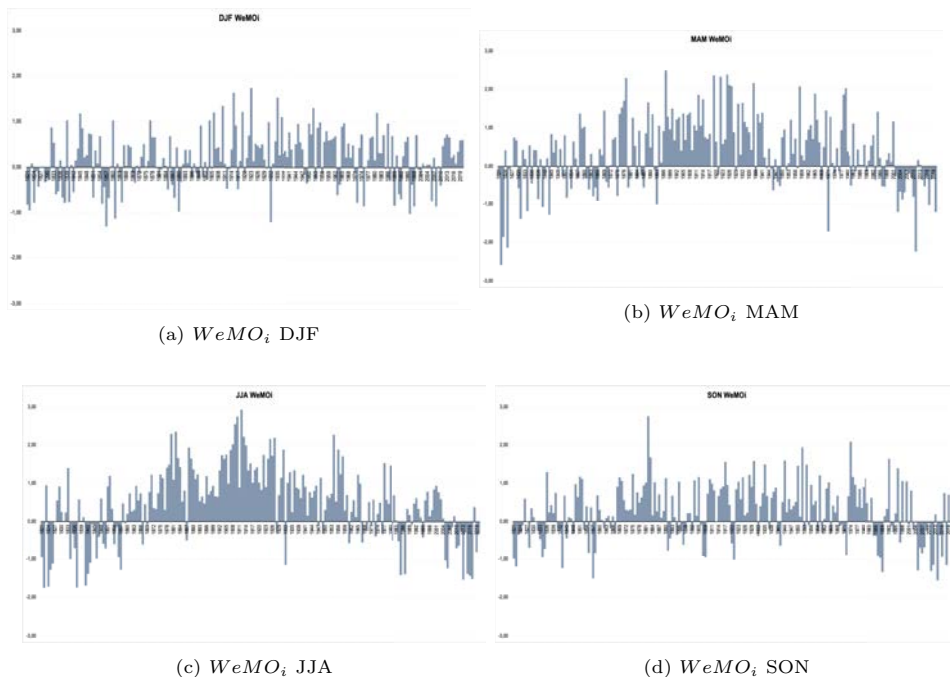


Figura 3.2: Índex d'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental ($WeMO_i$) per estacions de l'any durant 1821-2020.

El període de referència escollit és 1961-1990, ja que és un període on els valors del $WeMO_i$ van oscil·lar al voltant de valors neutres ($z_i=0$), mentre que les darreres dècades del segle XX i els primers anys del segle XXI han estat més aviat valors negatius, fet que no justificaria emprar el nou trentenni internacional de referència, 1991-2020. Aquests anys (1991-2020) comprendrien uns valors mitjans de referència massa negatius i en resultarien uns valors predominantment positius per a la resta del període d'estudi de la sèrie de l'Índex de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental. La figura següent 3.3 mostra la variabilitat anual des de l'inici de registre el 1821 fins al 2020, on s'observa l'ocurrència de valors extremament negatius en alguns anys de les darreres dues dècades.

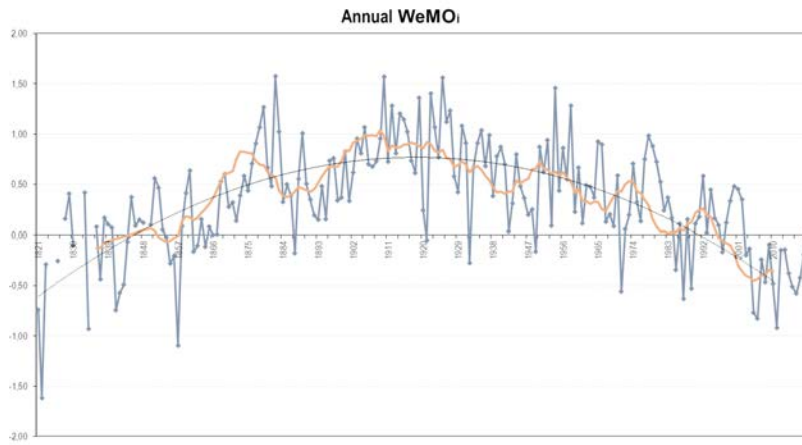


Figura 3.3: Modificació a partir de [López-Bustins, 2007] dels valors anuals del $WeMO_i$ durant 1821-2020.

Anàlisi estadística multivariant

L'anàlisi de components principals (PCA) és probablement la tècnica més popular de l'estadística multivariant i és utilitzada en la major part de les disciplines científiques en què es tracta informació quantitativa o quantificada [Abdi and Williams, 2010]. Aquest mètode redueix la dimensionalitat de les dades en les quals hi ha variables interrelacionades ([Jolliffe, 1986]); normalment aquestes dades corresponen a camps atmosfèrics o geofísics ([Wilks, 2011]), i se'n deriven patrons dominants de la seva variabilitat ([Von Storch and Zwiers, 2001]). El PCA consisteix en una transformació de lineal a ortogonal del conjunt de les dades original, en un nou sistema de coordenades, de manera que les noves variables són supeditades a la maximització de la covariant o la correlació ([Storch and Zwiers, 1999]). Es tracta, doncs, d'un mètode usual per concentrar la informació de la variabilitat climàtica per obtenir els principals patrons de la circulació, representats per règims de temps o patrons de teleconnexió. Els règims o tipus de temps descriuen fluctuacions en la circulació atmosfèrica a gran escala com transicions en el temps [Cattiaux et al., 2013].

Aquest mètode s'ha estès amb celeritat en els últims anys, degut principalment a l'augment del volum d'informació que és necessari processar i a la distingida capacitat d'aquesta tècnica de reduir la dimensió. De fet, són nombroses les esferes en què apareixen dades funcionals i se'n pot afavorir l'ús amb aquest mètode, com l'energia fotovoltaica [Murillo et al., 2019], la cobertura de neu [Frei and Robinson, 1999] o la distribució de l'activitat vegetativa [Vicente-Serrano et al., 2006], així com també els estudis en climatologia de la detecció de (i) patrons de baixa freqüència (*low-frequency modes*), (ii) l'illa de calor urbana [Fernández et al., 2003], (iii) climes extrems [Jiang et al., 2020], (iv) regionalització climàtica [Almazroui et al., 2015], (v) la precipitació regional [Irannezhad et al., 2017] [Stathis et al., 2009].

S'ha utilitzat el programari de classificació de tipus de circulació COST733 [Philipp et al., 2016] i l'anàlisi s'ha fet en mode S⁴, el qual localitza la variabilitat temporal de la variable *slp* i es realitza considerant el conjunt de dades compost pel model climàtic ERA-Interim per al període 1979-2017. S'ha utilitzat aquesta tècnica amb matriu de tipus S i rotació Varimax,⁵ però que utilitza els valors de

⁴Matriu de dades sobre la qual s'aplica l'ACP; les variables (columnes de la matriu) són els punts de malla repartits uniformement o relacionats amb estacions de mesura reals, mentre que les observacions (fileres de la matriu) són els casos en què s'ha donat el fenomen en estudi (dies, mesos, anys...) [Esteban Veà et al., 2012].

⁵O ortogonal; rotació de 90° dels factors per tal de reajustar els nous eixos de coordenades

les puntuacions factorials ⁶ més elevats de les fases positiva i negativa dels components principals per derivar-ne els tipus de circulació [Esteban et al., 2006]. La raó que justifica l'ús d'aquesta tècnica multivariant és la voluntat d'aproximar-se als treballs previs d'identificació de patrons de variabilitat i teleconnexió [Barnston and Livezey, 1987]. Un cop obtinguts els tipus de circulació, s'han identificat aquells més representatius de les dues fases de la WeMO a partir del valor de l'índex instrumental associat. Posteriorment, aquests tipus considerats representatius de la WeMO s'han relacionat amb la precipitació diària, i s'han dibuixat mapes de la mitjana i la probabilitat de precipitació a l'Espanya peninsular a partir dels dies classificats en cadascuna de les fases. La classificació d'ús comú dels patrons sinòptics associats a les precipitacions quantioses és en base als patrons de circulació atmosfèrica, a partir d'algoritmes o de procediments multivariants com l'anàlisi de components principals o tècniques clúster [Esteban et al., 2006].

S'ha treballat amb diferents finestres sinòptiques (figura 4.11), centrades en la conca occidental de la Mediterrània, per determinar els àmbits en què la WeMO té una significació important dins de la circulació general atmosfèrica. A continuació, s'hi han aplicat tècniques de correlació de l'anàlisi de components principals (PCA) i tècniques de clusterització, amb el mètode *SynoptReg* [Lemus-Canovas et al., 2019].

Predicció

La predicció numèrica del temps és, en l'actualitat, l'eina fonamental de qualsevol pronòstic meteorològic i consisteix a simular i descriure l'evolució futura del comportament de les variables meteorològiques (precipitació, temperatura de l'aire, pressió, cobertura del cel, radiació solar, velocitat i direcció del vent, etc.) i fenòmens meteorològics (sistemes frontals, anticiclons, ciclons tropicals, línies frontals, etc.), que determinen l'estat de l'atmosfera mitjançant l'ús de models matemàtics i amb un horitzó de pronòstic. L'abast típic per a les previsions curtes correspon a fins a les 72 hores. L'aplicabilitat és indubtable per a l'agricultura [Doblas-Reyes et al., 2003], el trànsit [Dunne and Ghosh, 2013], l'optimització d'energies renovables [Lledó et al., 2019], la planificació urbana [Baklanov et al., 2002] o el comerç [Maunder, 2019]. Per poder fer els càlculs de la predicció de l'índex WeMO amb el model global predictiu GFS de sortida de la NOAA, s'ha treballat amb la vari-

creats amb el PCA. Amb aquest canvi, els primers components passen a explicar menys variància, informació que es redistribueix cap a altres components principals.

⁶O *scores*; informen del grau de representativitat que tenen cadascun dels modes de variació associats als components principals (cartografia dels coeficients o *loadings* rotats, que inclouen un significat físic) en relació amb els casos originals.

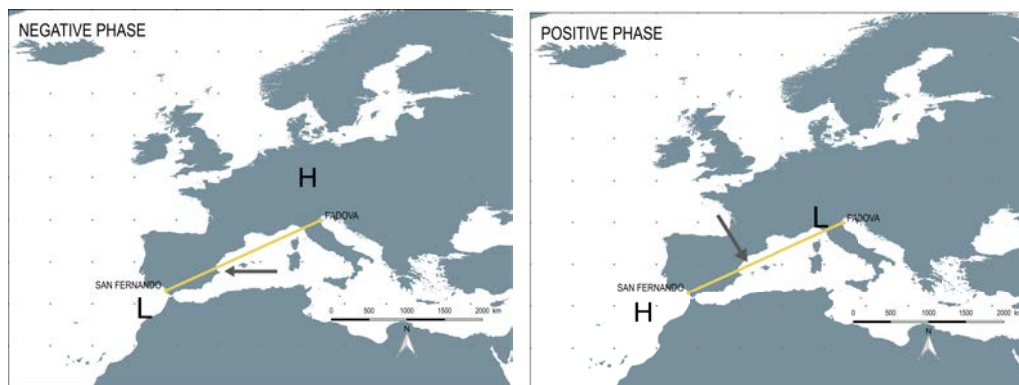
able pressió atmosfèrica (PRMSL) i la precipitació acumulada (APCP), per a les sortides de 00 h i 12 h i per a 144 hores de predicció.

Amb el fi de calcular el valor del $WeMO_i$ a partir de les variables de sortida del GFS, s'extreuen les dades horàries dels dos punts d'estudi (Pàdua i San Fernando) que s'esperen per a les properes 144 h; es defineix l'àrea d'estudi, que correspon a la Mediterrània Occidental, i es representen la variable pressió i la variable precipitació en dues figures resultants, de manera que s'observen l'evolució gràfica del temps que s'espera i el valor del $WeMO_i$. La metodologia, les dades utilitzades per fer la predicció de l'índex de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental i les figures resultants s'expliquen de manera més detallada al capítol 6.

Capítol 4

CARACTERITZACIÓ DELS VALORS DE L'ÍNDIX DE L'OSCIL·LACIÓ DE LA MEDITERRÀNIA OCCIDENTAL

L'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental es caracteritza en el marc de la conca occidental de la Mediterrània definint-hi la dinàmica atmosfèrica. Les àrees determinades són la plana del Po, al nord de la península Itàlica, una àrea d'alta variabilitat baromètrica per la influència diferenciada del domini de l'anticicló centreeuropeu i per la depressió de la mar Lígur; i el golf de Cadis, al sud-oest de la península Ibèrica, influenciat per l'anticicló persistent de les Açores i, episòdicament, pel despreniment de depressions polars o per ciclogènesis. El transecte que uneix ambdues àrees coincideix, aproximadament, amb la línia de costa del quadrant nord-oest de la conca mediterrània [Martín-Vide and Lopez-Bustins, 2006]. L'índex associat, el $WeMO_i$, en fase positiva (figura 4.1b), es descriu amb l'anticicló de les Açores ubicat al quadrant sud-oest de la península Ibèrica i amb baixa pressió al golf de Gènova. Contràriament, la seva fase negativa (figura 9.1) es descriu per l'anticicló de l'Europa central situat al nord de la península Itàlica i una baixa pressió, sovint despresa de latituds més septentrionals, centrada en el sector del sud-oest de la península Ibèrica. En cas de baix gradient baromètric a la conca occidental de la Mediterrània i a les àrees properes, o sempre que una advecció del nord-est o del sud-oest s'estableixi amb les mateixes isòbares unint ambdues àrees del dipol, es tractarà de fase neutra. La metodologia del càlcul establert de l'índex WeMO s'explica a l'apartat 3.2.



(a) Fase negativa de la WeMO.

(b) Fase positiva de la WeMO.

Figura 4.1: Fases de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental.

El concepte del fenomen de la WeMO i el seu índex associat a les pluges torrencials a la part mediterrània de la península Ibèrica és ben definit i argumentat a la tesi de López-Bustins [López-Bustins, 2007]. Tanmateix, a continuació, es vol

identificar i caracteritzar aquest índex associat a l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental, el $WeMO_i$. Els objectius específics d'aquest capítol són:

- Revisar les fonts de dades de les sèries de referència, localitzades al nord d'Itàlia i al sud-oest d'Espanya.
- Cercar-ne una de nova per al nord de la península Itàlica, per tal de continuar amb la reconstrucció de l'índex de la $WeMO_i$, així, homogeneïtzar i omplir determinats períodes amb buits de tota la sèrie instrumental de l'índex des del 1821 fins a l'actualitat.
- Acotar els dies de l'any en què el $WeMO_i$ és més negatiu.
- Reconstruir el $WeMO_i$ mitjançant diversos models numèrics de reanàlisi.
- Seleccionar la finestra òptima d'estudi en què la $WeMO_i$ té més incidència en l'escala sinòptica i en la qual defineix millor les seves fases.
- Construir un catàleg de mapes per rangs de $WeMO_i$ associats a la precipitació a la península Ibèrica.

Les hipòtesis específiques d'aquest capítol són:

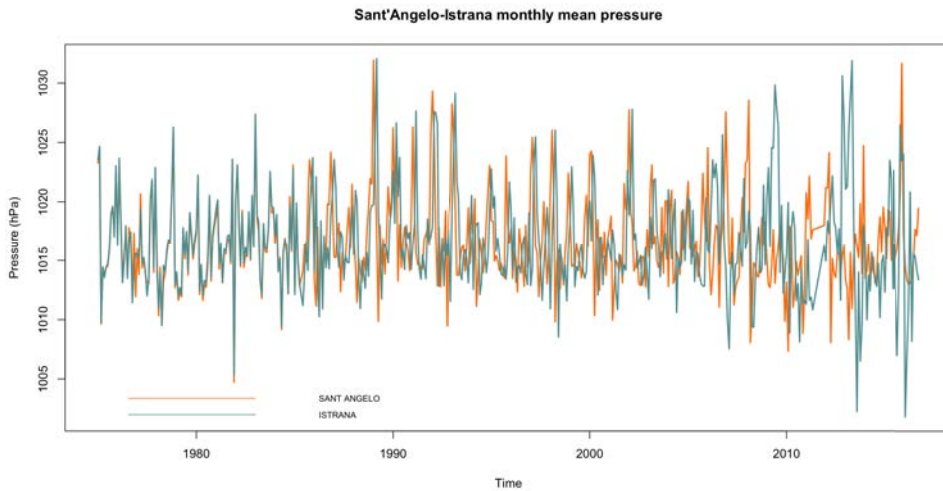
- Existeix una relació inversa entre el valor de l'índex de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental i el nombre d'episodis de pluja torrencial.
- La variable pressió atmosfèrica provinent de reanàlisi esbiaixa el valor real i, en conseqüència, el valor del $WeMO_i$ no queda tan negativitzat en episodis de pluja torrencial.
- El patró de teleconnexió de baixa freqüència es veurà reforçat com més petita sigui la finestra d'estudi dels tipus de circulacions.
- El catàleg és una guia general per poder categoritzar espacialment la precipitació en funció del valor de $WeMO_i$.

4.1 Instrumental

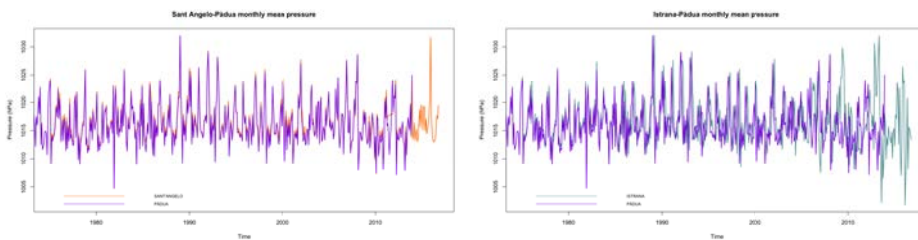
Els índexs basats en estacions meteorològiques tenen l'avantatge de proporcionar registres continus que es poden estendre més enllà del segle XX, quan les dades de reanàlisi són més escasses [Cropper et al., 2015]. No obstant això, els principals compromisos d'aquesta metodologia són (i) que l'ús d'índexs amb valors instrumentals d'estacions meteorològiques implica una ubicació fixa dels centres d'acció, tot i no haver-hi estacionalitat en la ubicació geogràfica d'aquests centres, tal com [Bladé et al., 2012, Lehner et al., 2012] han demostrat per al cas del NAO_i ; (ii) que els valors de la pressió en superfície registrada per les estacions meteorològiques poden no ser representatius regionalment a causa de biaixos locals, és a dir, possibles canvis artificials en els seus entorns locals [Pielke et al., 2007]; i (iii) que els primers enregistraments dels valors de pressió a nivell del mar poden estar compromesos per l'ús de dispositius instrumentals antics menys fiables [Aguilar et al., 2003, Trewin, 2010].

López-Bustins [López-Bustins, 2007] explicita l'anàlisi i validació de les dades usades (1725-2016). Per una banda, per a la vall del Po, analitza i homogeneïtza les dades provinents del projecte *IMPROVE* [Camuffo et al., 2006] i de les forces aèries de Pàdua i Vicenza [Maugeri et al., 2004]; per una altra banda, del punt d'estudi de San Fernando, dades mesurades a Rota, Cadis i San Fernando, corregides també al projecte *IMPROVE* [Barriendos et al., 2002]. Tal com s'ha exposat en el capítol 3, a l'apartat 3.1, s'ha cercat entre diverses bases de dades per proximitat, enclavament i per continuïtat una estació nova per tal de continuar amb la sèrie de dades instrumental de Pàdua (1821-2013). Les dues sèries instrumentals són a Treviso i pertanyen al *Servizio Meteorologico Aeronautica Militare* (MeteoAM) i corresponen a (i) l'aeroport de Sant'Angelo i (ii) a Istrana.

A partir de les figures següents (vegeu la figura 4.2), en què es comparen ambdues bases de dades de pressió atmosfèrica facilitades des de 1975 fins al 2016 per (i) Sant'Angelo (1975-2016)(en color taronja) i (ii) Istrana (1975-2016)(en color blau turquesa), amb la sèrie reconstruïda de Pàdua (1821-2013) (en color violeta), queda palès que la base de dades que més s'ajusta amb aquesta última i, per tant, serà la que s'utilitzarà en aquesta tesi és la base de dades de Sant'Angelo (vegeu la figura 4.2b). Ambdues estacions tenen el mateix comportament, però per al cas d'Istrana la figura 4.2c denota un petit desplaçament en el temps i un canvi substancial al final de la dècada dels 2000, en què els valors de pressió varien molt, en marcar pics oposats. En el cas de Sant'Angelo, és a dir, la figura 4.2b, els valors de pressió mantenen en el temps un comportament similar i ajustat al valor de pressió de la sèrie reconstruïda de Pàdua.



(a) Valors de pressió de Sant'Angelo (1975-2016) i Istrana (1975-2016).



(b) Valors de pressió de Pàdua (1821-2013) i (c) Valors de pressió de Pàdua (1821-2013) i Istrana (1975-2016).

Figura 4.2: Gràfic comparatiu dels valors de pressió de la sèrie de Pàdua (1821-2013) i les dues fonts de dades que s'utilitzaran (1975-2016).

Així, les bases de dades de pressió atmosfèrica que s'utilitzen en aquesta tesi per continuar amb el càlcul de l'índex de l'oscil·lació de la Mediterrània de manera instrumental són, per a l'àrea de de la vall del Po, la base de dades Sant'Angelo, a Treviso, i San Fernando, a Cadis, per a l'àrea del sud-oest peninsular.

Amb el propòsit de delimitar temporalment el període en què el registre d'episodis de pluges torrencials ($\geq 100mm$) és més freqüent, s'han actualitzat els calendaris decadal⁷ de López-Bustins [López-Bustins, 2007], en què s'ha configurat un calendari decadal que relaciona el valor de l'índex de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental, calculat per dècades de dies, amb el total d'episodis de $\geq 100mm$, també agregats per dècades de dies, d'entre el 1950 i el 2016. S'hi observa com el valor de l'índex de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental assoleix el valor mínim durant la segona dècada de dies del mes d'octubre, coincidint amb la franja de més episodis de pluja torrencial amb ($\geq 100mm$), tal com es pot observar a la figura següent 4.3. D'un total de 375 episodis de pluja intensa, 39 es van donar en la segona dècada de dies d'octubre, coincidint amb un mínim del $WeMO_i$.

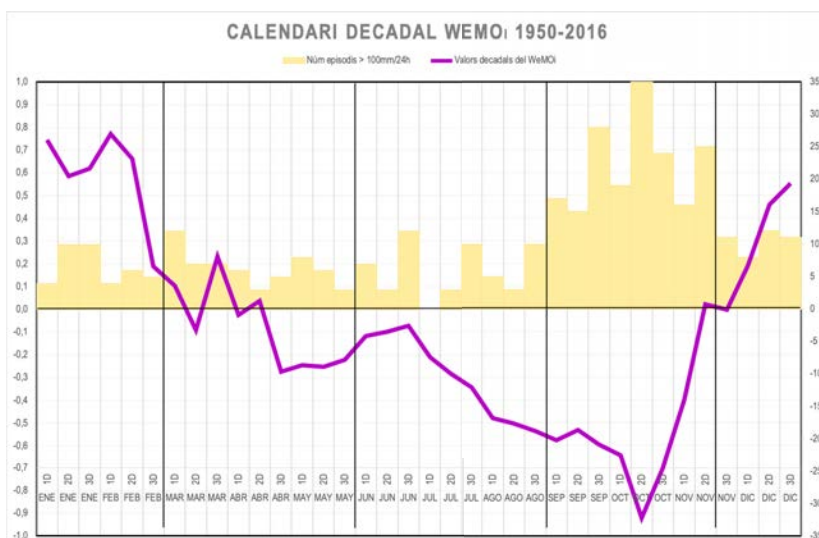


Figura 4.3: Calendari de dècada de dies del $WeMO_i$ i nombre d'episodis torrencials de cada dècada, modificat a partir del treball de [López Bustins et al., 2016].

⁷Durant la Revolució francesa, el calendari republicà reemplaçà la setmana de set dies per la *dècada*, com a període de deu dies, com en el calendari àtic, que s'acabava pel *dècadi*. Font: Viquipèdia.

Les finestres mòbils ⁸ tenen un interès estadístic molt específic, que ajuda a acotar els dies concrets en què es dona més una variable d'una sèrie estacionària ⁹. En aquest cas, s'ha fet la mitjana del valor de l'índex WeMO des de l'any 1950 al 2020 amb quatre finestres mòbils, d'un, cinc, set i deu dies del mes d'octubre (vegeu la taula 4.1). L'objectiu és veure que, com més s'acoten els dies, és a dir, els casos $WindowsMobile_D7$ i $WindowsMobile_D10$, més concentrats en els dies del 8 al 14 d'octubre queden els valors més negatius, i coincideixen, doncs, amb la major concentració de nombre d'episodis de pluja torrencial. Però totes quatre finestres mòbils estudiades indiquen que els valors mitjans més negatius del $WeMO_i$ es donen entre finals de la primera dècada i la segona dècada de dies del mes d'octubre.

⁸Funció estadística que es calcula sobre una finestra de dades representades per un determinat període de temps i, després, es desplaça la finestra de dades per a un interval especificat, calculant contínuament l'estadística. Font: [Gonzalez-Hidalgo et al., 2015].

⁹Tipus de sèries de temps en què les seves propietats no són afectades pels canvis al llarg del temps i en què (i) la mitjana de la sèrie no pot ser una funció en el temps; (ii) la variància no ha de ser una funció del temps, i (iii) la covariància és constant en el temps. Font: [Gonzalez-Hidalgo et al., 2015].

Date	Windows <i>Mobile_D1</i>	Windows <i>Mobile_D5</i>	Windows <i>Mobile_D7</i>	Windows <i>Mobile_D10</i>
10/1	-0.13	-0.24	-0.23	-0.28
10/2	-0.22	-0.27	-0.23	-0.31
10/3	-0.29	-0.25	-0.27	-0.33
10/4	-0.31	-0.22	-0.30	-0.35
10/5	-0.25	-0.26	-0.33	-0.36
10/6	-0.26	-0.31	-0.34	-0.36
10/7	-0.12	-0.35	-0.38	-0.38
10/8	-0.19	-0.40	-0.42	-0.40
10/9	-0.49	-0.47	-0.44	-0.42
10/10	-0.51	-0.45	-0.43	-0.44
10/11	-0.47	-0.41	-0.40	-0.44
10/12	-0.38	-0.40	-0.40	-0.42
10/13	-0.49	-0.39	-0.43	-0.42
10/14	-0.43	-0.38	-0.43	-0.40
10/15	-0.31	-0.42	-0.42	-0.39
10/16	-0.41	-0.46	-0.43	-0.39
10/17	-0.31	-0.44	-0.40	-0.38
10/18	-0.45	-0.46	-0.41	-0.38
10/19	-0.63	-0.41	-0.39	-0.37
10/20	-0.50	-0.36	-0.35	-0.32
10/21	-0.34	-0.32	-0.32	-0.29
10/22	-0.37	-0.32	-0.32	-0.29
10/23	-0.22	-0.31	-0.28	-0.27
10/24	-0.35	-0.33	-0.28	-0.25
10/25	-0.33	-0.28	-0.28	-0.23
10/26	-0.31	-0.25	-0.25	-0.23
10/27	-0.35	-0.26	-0.22	-0.22
10/28	-0.29	-0.22	-0.19	-0.19
10/29	-0.10	-0.18	-0.19	-0.19
10/30	-0.23	-0.19	-0.20	-0.20
10/31	-0.35	-0.20	-0.19	-0.19

Taula 4.1: Mitjana de valors de l'índex WeMO ($WeMO_i$) per als dies del mes d'octubre per les quatre finestres mòbils.

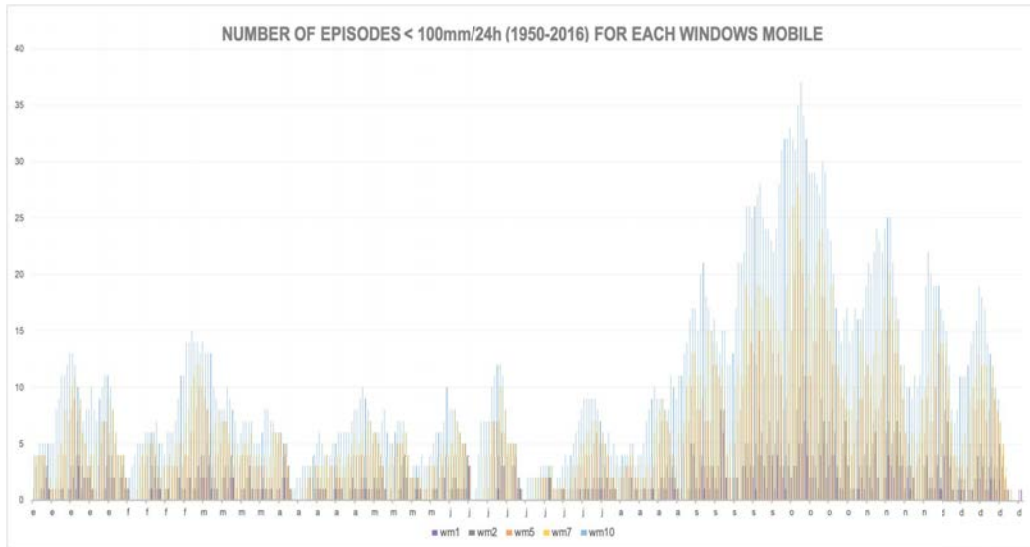


Figura 4.4: Nombre d’episodis torrencials per diferents finestres mòbils.

Gràficament, el recompte del nombre d’episodis des de l’any 1950 al 2016 amb les 4 finestres mòbils (vegeu la figura 4.4) també s’observa a finals de la primera i la segona dècada de dies d’octubre, de manera més marcada per a les finestres *WindowsMobile_{D7}* i *WindowsMobile_{D10}*. Aquestes figures s’han realitzat amb els episodis de pluja torrencial en 24 h amb $\geq 100mm$, ja que, d’aquesta manera, la quantitat total d’episodis és més elevat que si només es tenen en compte episodis de pluja extremament torrencials amb una precipitació acumulada de $\geq 200mm$.

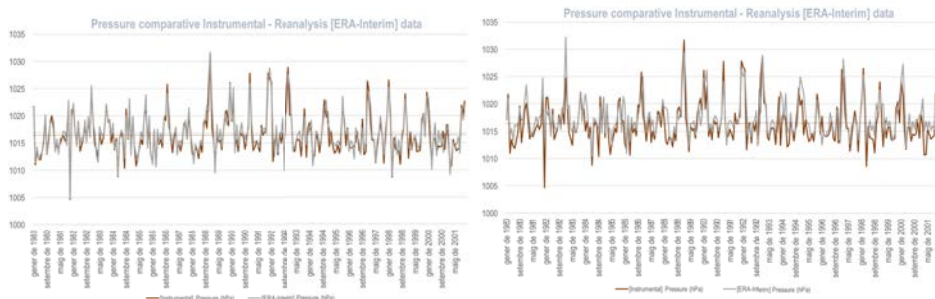
4.2 Reanàlisi

La possibilitat de disposar de registres instrumentals, com els descrits abans i utilitzats, com més amplis i continus possible, és un element clau per a l'anàlisi de la variabilitat i el canvi climàtic recent, però no sempre és així. Les dades de reanàlisi meteorològica es produeixen a partir de la combinació de dades de mesurament, observació i simulació, aplicant-hi tècniques d'assimilació de dades, per tal d'obtenir una descripció més realista de les ocurrencies climàtiques. El conjunt de dades combinades per models meteorològics amb dades d'observació de satèl·lits i sensors terrestres té l'objectiu de crear un registre constant al llarg del clima, de manera que millora la comprensió del clima passat, què va succeir durant un esdeveniment climàtic en particular i per què, i relacionar-ho amb els esdeveniments climàtics actuals i passats [Matthews et al., 2016].

Així doncs, la reanàlisi és un mètode que descriu numèricament, globalment, físicament i consistentment el clima en el passat recent. Aquest mètode ha evolucionat en el passat recent amb l'objectiu d'extreure la màxima informació utilitzant els millors models disponibles per assimilar diferents tipus de observacions; per exemple, des d'estacions meteorològiques, vaixells, globus aeris, avions i una gran varietat de satèl·lits. Tanmateix, les dades de reanàlisi funcionen amb diferents graus de qualitat i precisió a causa de les diferències en els esquemes d'assimilació o les observacions d'entrada, entre altres factors [Dee et al., 2011a]. Per tant, és una òptima representació de l'estat de l'atmosfera a diferents escales temporals i espacials en condicions atmosfèriques per a una comprensió de la dinàmica de l'atmosfera. El conjunt de dades resultants és una graella *grid* de cobertura global i una sèrie temporal sense llacunes temporals i espacials.

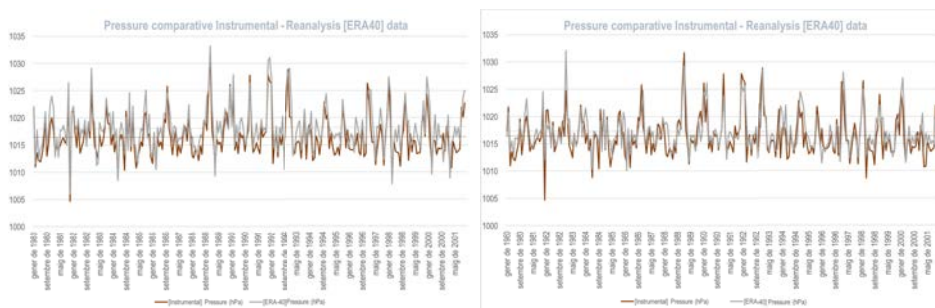
En aquesta tesi s'utilitza la variable pressió a nivell del mar de diferents fonts de dades de diverses reanàlisis i diferents resolucions horitzontals (vegeu la taula 3.1) per tal de reconstruir el dipol de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental. S'han analitzat cinc tipus de reanàlisi (ERA-Interim, ERA-40, 20CR, MERRA2 i NCEP / NCAR) de diferents resolucions, en què s'ha extret el valor de pressió a nivell del mar (slp - *sea level pressure*), per a ambdós punts d'estudi. Per avaluarlos i comparar-los, (i) s'ha fet la comparativa entre els valors de pressió a nivell del mar de cada un dels models de reanàlisi amb els valors de pressió d'instrumental i (ii) s'han construït diversos calendaris, un per a cada base de dades, basats en les mitjanes diàries del $WeMO_i$ durant un període de 10 dies. Aquests calendaris permeten estudiar la variabilitat intraanual de l'índex i ens permeten delimitar l'època de l'any més favorable per a l'aparició d'episodis torrencials, tal com s'ha vist anteriorment i amb les dades d'instrumental.

S'exposen, a continuació, diverses figures comparatives de la pressió a nivell del mar entre el valor d'instrumental i el corresponent a cada model de reanàlisi, per al punt d'estudi de Pàdua i per a San Fernando.



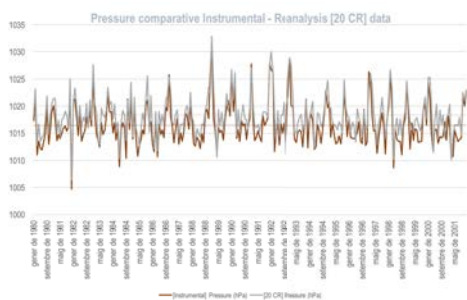
(a) PRMSL Instrumental i ERA-Interim a Pàdua (b) PRMSL Instrumental i ERA-Interim a San Fernando

Figura 4.5: Gràfic comparatiu de la pressió en superfície a Pàdua (a) i San Fernando (b) amb valors instrumentals i de la reanàlisi ERA-Interim.

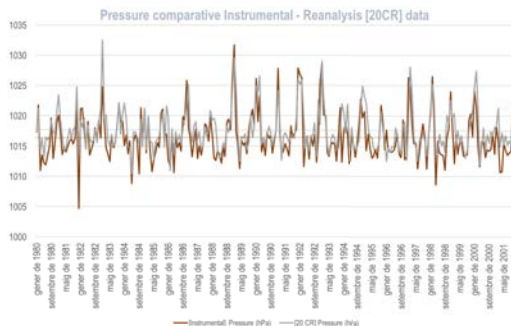


(a) PRMSL Instrumental i ERA40 a Pàdua (b) PRMSL Instrumental i ERA40 a San Fernando

Figura 4.6: Gràfic comparatiu de la pressió en superfície a Pàdua (a) i San Fernando (b) amb valors instrumentals i de la reanàlisi ERA-40.

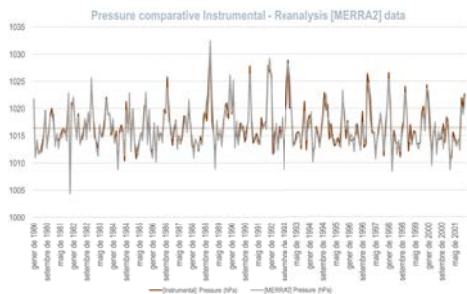


(a) PRMSL Instrumental i 20CR a Pàdua

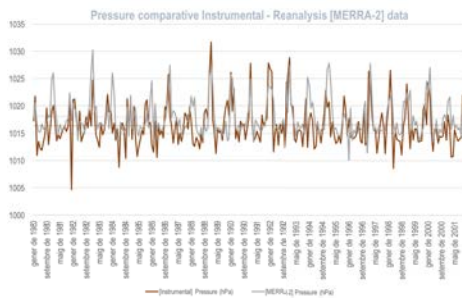


(b) PRMSL Instrumental i 20CR a San Fernando

Figura 4.7: Gràfic comparatiu de la pressió en superfície a Pàdua (a) i San Fernando (b) amb valors instrumentals i de la reanàlisi 20CR.

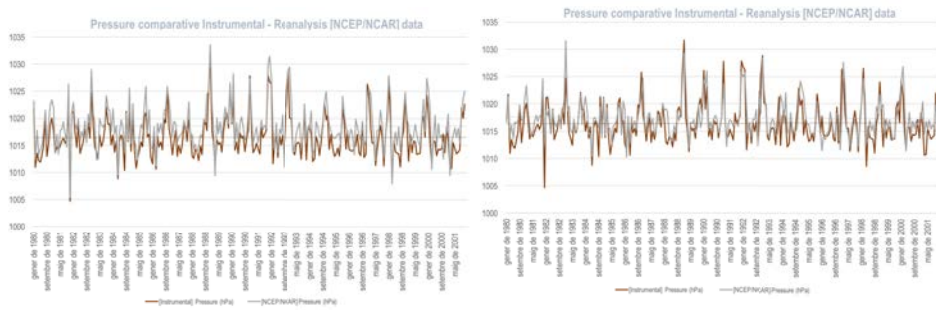


(a) PRMSL Instrumental i MERRA-2 a Pàdua



(b) PRMSL Instrumental i MERRA-2 a San Fernando

Figura 4.8: Gràfic comparatiu de la pressió en superfície a Pàdua (a) i San Fernando (b) amb valors instrumentals i de la reanàlisi MERRA-2.



(a) PRMSL Instrumental i NCEP/NCAR a Pàdua (b) PRMSL Instrumental i NCEP/NCAR a San Fernando

Figura 4.9: Gràfic comparatiu de la pressió en superfície a Pàdua (a) i San Fernando (b) amb valors instrumentals i de la reanàlisi NCEP/NCAR.

De la mateixa manera que anteriorment s'ha fet el calendari decadal amb el valor mitjà del $WeMO_i$ instrumental i els episodis torrencials ($\geq 100mm$), també s'ha fet amb els valors de totes quatre reanàlisis, però amb els episodis extremament torrencials, de $\geq 200mm$. Es mostren en les figures 4.10 classificats per l'abast temporal de cada una de les reanàlisis.

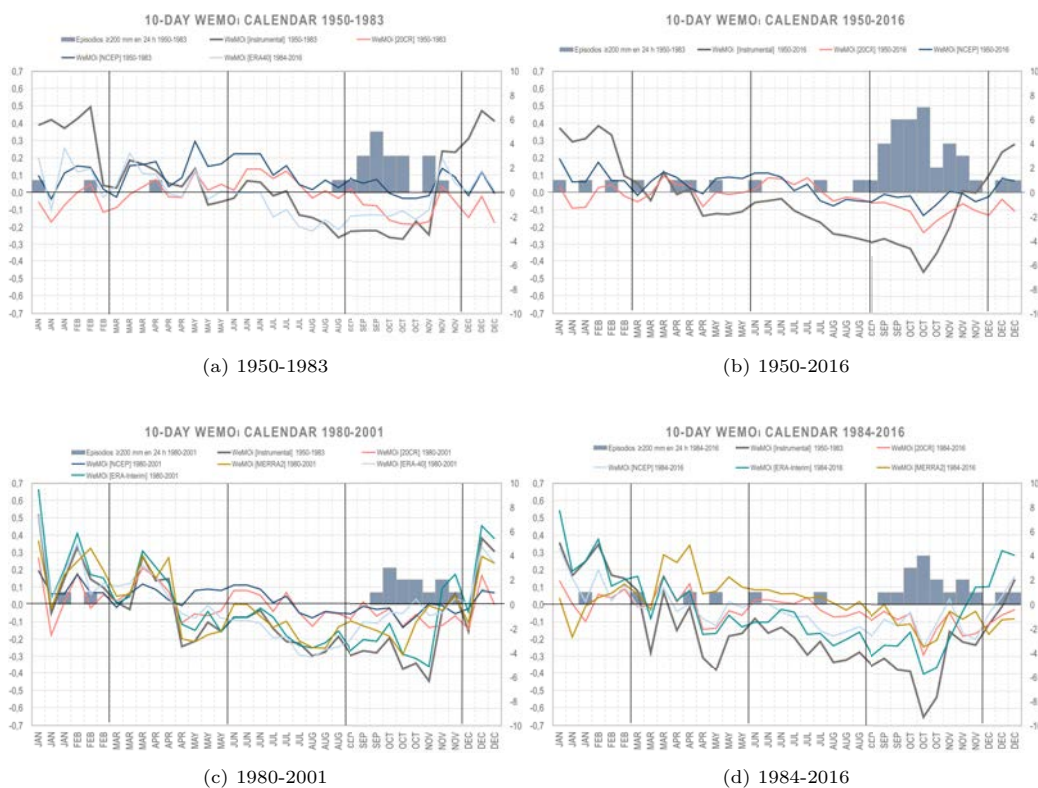


Figura 4.10: Calendaris del $WeMO_i$ per a diferents reanàlisis.

Els resultats principals que es poden extreure d'aquesta comparativa de base de dades de pressió en superfície d'entre els quatre models de reanàlisi i i l'instrumental per a ambdós punts d'estudi indiquen que tant el model ERA-Interim com el MERRA-2 són els que s'ajusten més a l'evolució temporal (vegeu la figura 4.5 i la figura 4.8, respectivament). Contràriament, ho són l'ERA-40 (figura 4.6 i l'NCEP/NCAR (figura 4.9). Cal destacar també que ambdues reanàlisis amb millors resultants s'ajusten millor a l'estació de Pàdua que a la de San Fernando.

Això podria ser a causa que el punt de reanàlisi del satèl·lit és més proper al punt de mostreig de dades instrumentals; també al fet que a San Fernando, en trobar-se al costat del mar, hi hagi un canvi substancial de la pressió entre terra-mar en pocs quilòmetres. I, a més, a partir dels calendaris decadal, els resultats mostren concordança amb la reanàlisi que més s'ajusta a la sèrie temporal instrumental: l'ERA-Interim constitueix la millor reanàlisi per a l'estudi de la variabilitat intraanual de l'índex de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental i l'ocurrència d'episodis torrencials. Tanmateix, el MERRA2 també té un bon ajust: això és degut a l'alta resolució espacial d'ambdues reanàlisis, així com al fet de tractar-se de les sèries més llargues, la qual cosa es reflecteix a les figures 4.10c i 4.10d. Els calendaris decadal d'episodis de $\geq 200mm$ coincideix amb un pic mínim d'índex la segona dècada de dies del mes d'octubre per al període (i) 1950-2016, amb la reanàlisi 20CR i NCEP/NCAR, i (ii) 1984-2016, amb totes cinc reanàlisis, però on l'ERA-Interim obté el valor més negativitzat. Però, per al període 1980-2001, el pic mínim de $WeMO_i$, donat a la primera dècada de dies de novembre, no coincideix amb el màxim registre de pluges extremament torrencials de la primera dècada d'octubre, mentre que, per al període 1950-1983, no s'hi observa un pic únic, sinó una negativització contínua des del setembre fins a la segona dècada de novembre. És d'esperar també, tal com s'observa, que els valors més negatius del $WeMO_i$, pics que es dibuixen amb l'instrumental, no siguin assolits amb els models de reanàlisi.

Per tant, la base de dades de pressió atmosfèrica que s'utilitza en aquesta tesi per calcular l'índex de l'oscil·lació de la Mediterrània és el model de reanàlisi ERA-Interim.

4.3 Anàlisi de components principals (PCA)

Amb l'objectiu d'establir catàlegs-resums sinòptics del comportament de l'atmosfera i establir, doncs, el pes que té el WeMO en la circulació atmosfèrica s'ha volgut fer una aproximació en la classificació per tipus de circulació (CWT), un mètode usat per tal de caracteritzar un sector d'estudi a partir d'una sèrie temporal de mapes del temps -normalment, camps de pressió en superfície (SLP) o de geopotencial (GPH) [Beck and Philipp, 2010]. Aquest mètode, basat en principis matemàtics de vectors propis, té la finalitat de reduir la dimensió d'un conjunt de dades arbitràries mitjançant el càlcul d'un grup molt menor de variables que millor representen el conjunt original de dades. Així doncs, permet identificar i obtenir patrons dominants de les variacions simultànies d'una variable.

El mètode de clusterització implementat és el proposat per [Esteban et al., 2005], basat en puntuacions extremes: suggereix que les puntuacions extremes (positives i negatives) g_{lscp} (≤ -2.0 o ≥ 2.0) es poden utilitzar com a coordenades multivariants de cada centre del clúster per aplicar l'algorisme *k-means*¹⁰. En aquest sentit, quan s'utilitzen les puntuacions positives i negatives, els grups de cada component es divideixen (si s'assoleixen aquestes puntuacions extremes per a cada grup). Per tant, si conservem 4 components principals, la nostra classificació final pot contenir fins a 8 tipus meteorològics/tipus de circulació. El mètode emprat per determinar el nombre de components a retenir és el conegut *scree Test* [Cattell, 1966], basat en la quantitat de variància explicada per cada PC. Aquests PCs es giren posteriorment mitjançant una rotació varimax, per obtenir la màxima variància explicada per a cada PC [Richman, 1986].

Així doncs, a continuació, i per a cada finestra d'estudi (vegeu la figura 4.11), s'ha tractat de determinar la regionalització que millor identifica els patrons dominants per a cada fase de la WeMO, i explicar-ne la variabilitat pluviomètrica utilitzant la malla de dades (*grid*) de reanàlisi ERA-Interim per a la pressió a nivell del mar i la malla de dades SPREAD, per a la precipitació. Per tant, i amb l'objectiu de corroborar el comportament de la intensitat i l'extensió de la WeMO en la variabilitat pluviomètrica mediterrània i cantàbrica, les diferents finestres d'estudi permeten apreciar el dipol de la WeMO, els tipus de circulació i els estadístics derivats que caracteritzen les seves fases. Les finestres estudiades són, de major a menor d'escala sinòptica: 25° N - 70°N i 25°O- 25°E; 30° N - 60°N i 15°O

¹⁰L'algorisme K-means és un mètode d'agrupament que té com a objectiu la partició d'un conjunt n observacions en k grups, en el qual cada observació pertany al grup més proper a la mitjana. És un mètode utilitzat en mineria de dades, creat per [MacQueen et al., 1967]

- 20°E; 30° N - 55°N i 15°O - 20°E; 35° N - 50°N i 10°O - 20°E; 35° N - 45°N i 10°O - 15°E.

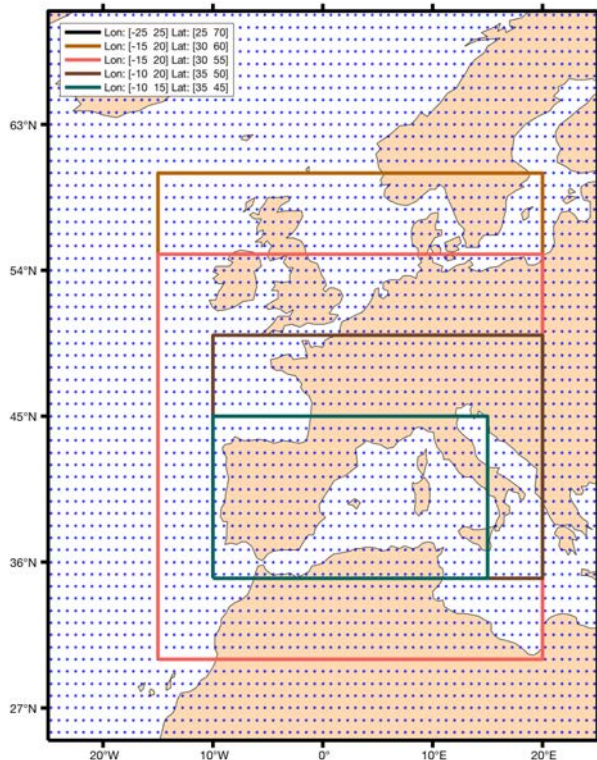


Figura 4.11: Finestres sinòptiques d'estudi.

A continuació, es mostren (i) les classificacions obtingudes en superfície per a cada finestra sinòptica mitjançant el programa COST733class (mètode PXE), desenvolupat en el projecte europeu COST733 [Philipp et al., 2016], centrat en les tècniques de classificació de tipus de circulació atmosfèrica; (ii) la mitjana (\bar{x}) del $WeMO_i$ instrumental; (iii) els dies (N) de cada distribució, i (iv) el seu percentatge respecte al total de dies. A més, s'afegeixen els mapes de precipitació mitjana i probabilitat de precipitació per a l'Espanya peninsular per a les dues situacions de circulació atmosfèrica que millor expliquen la fase positiva i negativa de la WeMO.

Finestra d'estudi 25° N – 70° N i 25°O – 25°E

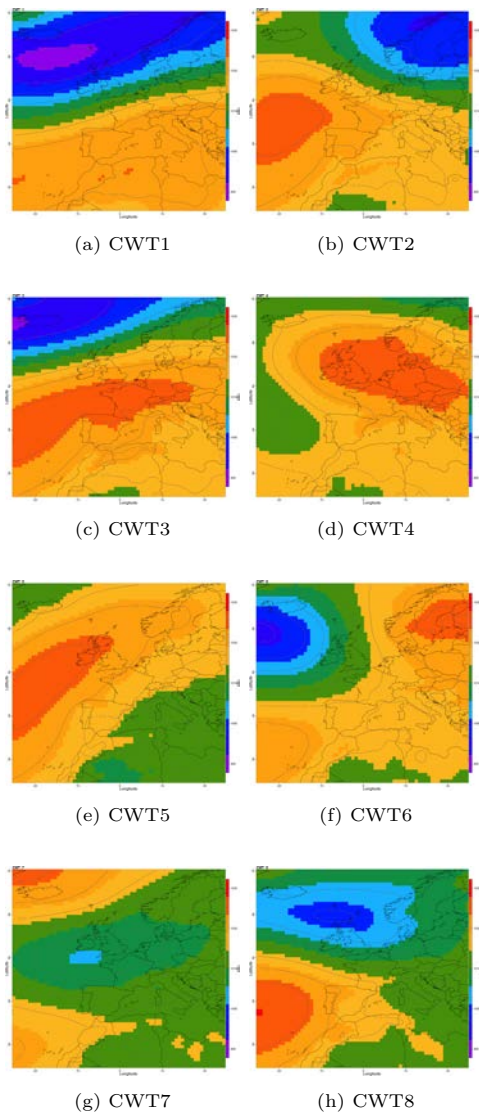


Figura 4.12: Classificació sinòptica en superfície, mitjançant COST733class, de la finestra sinòptica 25°N-70°N i 25°O-25°E.

	25° N – 70° N i 25° O – 25° E		
	\bar{x}	N	%
CWT 1	0.0025	2080	14.8
CWT 2	0.195	1880	13.4
CWT 3	-0.4620	2167	15.4
CWT 4	-1.2350	1346	9.8
CWT 5	-0.1320	1609	11.4
CWT 6	-0.1680	1800	12.8
CWT 7	0.080	1492	10.6
CWT 8	0.772	1634	11.6

Taula 4.2: Tipus de circulació (CWT) per a la finestra sinòptica 25° N – 70° N i 25° O – 25° E, la mitjana (\bar{x}) del $WeMO_i$ i els dies (N) de cada distribució i el percentatge respecte al total de dies.

Per a la finestra d'estudi 25°N-70°N i 25°O-25°E, tal com s'observa a la taula 4.2, es troba que els patrons sinòptics que millor expliquen les fases de la WeMO són: per a la fase positiva ($\bar{x} = 0.772$), el tipus 8, que és alhora un reflex de la fase positiva de la NAO, i per a la fase negativa ($\bar{x} = -1.235$), el tipus 4. El tipus 8 està configurat per l'anticicló de les Açores i la baixa d'Islàndia desplaçada al nord de la Gran Bretanya. Contràriament, el tipus 4 mostra una alta pressió entre l'Europa central i les illes britàniques, i baixes pressions cap a l'oest de la península Ibèrica, de manera que defineix la fase negativa de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental.

Per a ambdós patrons escollits, tipus 4 per a $WeMO_i$ negatiu i tipus 8 per a $WeMO_i$ positiu, i a partir dels corresponents dies associats (N), s'ha configurat la figura 4.13 utilitzant la base de dades pluviomètrica SPREAD, per veure la distribució de la mitjana i la probabilitat de precipitació de manera espacial. S'observa com les costes catalana i valenciana presenten una mitjana i una probabilitat de precipitació relativament altes per al tipus 4, mentre que, per al tipus 8, només Galícia, la franja cantàbrica i el Pirineu centreoccidental presenten valors rellevants.

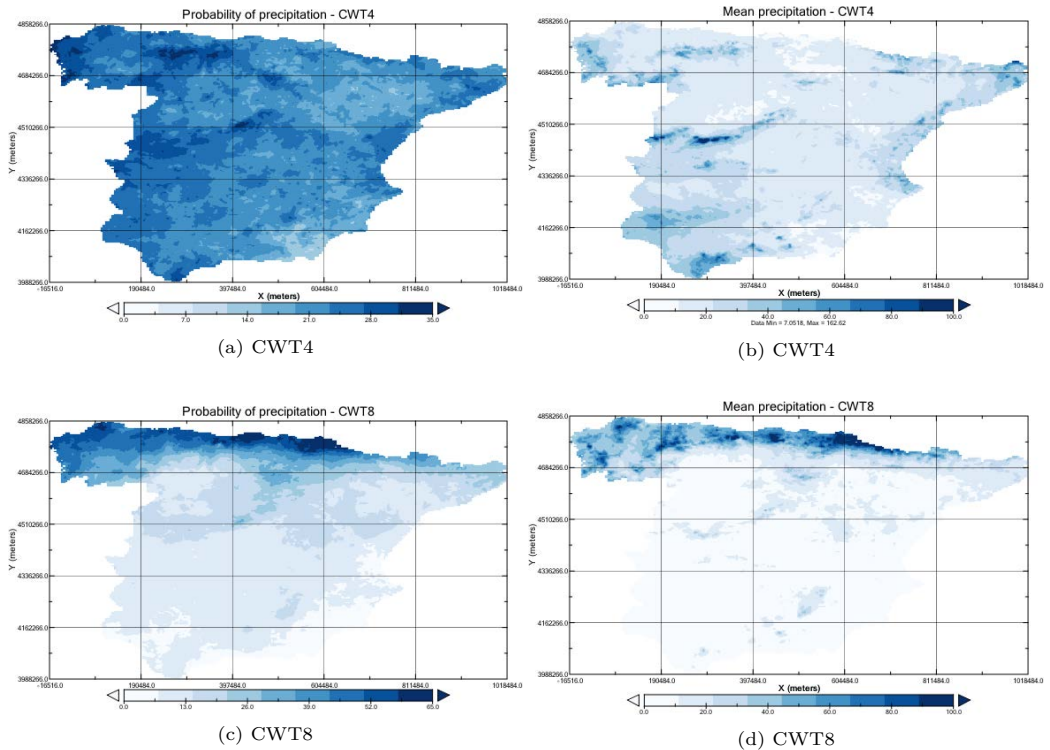


Figura 4.13: Probabilitat de precipitació i precipitació mitjana a l'Espanya peninsular per al tipus 4 (fase negativa) (a) i (b) i per al tipus 8 (fase negativa) (c) i (d) de la finestra sinòptica 25° - 70° N i 25° O- 25° E.

Finestra d'estudi 30° N – 60° N i 15°O – 20°E

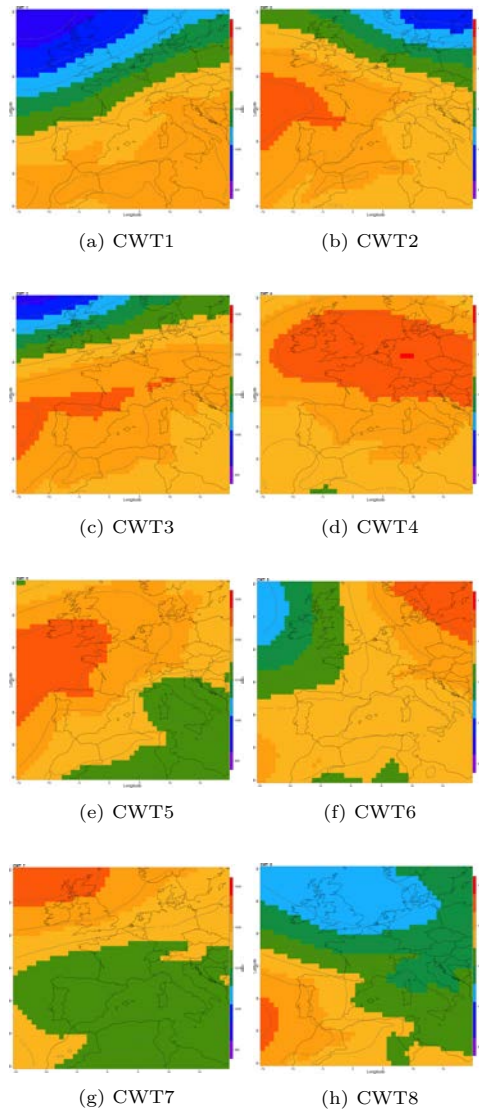


Figura 4.14: Classificació sinòptica en superfície, mitjançant COST733class, de la finestra sinòptica 30°N-60°N i 15°O-20°E.

	30° N – 60° N i 15° O – 20° E		
	\bar{x}	N	%
CWT 1	-0.247	1940	13.8
CWT 2	0.281	2060	14.7
CWT 3	-0.249	2067	14.7
CWT 4	-1.390	1389	9.9
CWT 5	0.049	1681	12.0
CWT 6	-0.505	1654	11.8
CWT 7	-0.459	1524	10.8
CWT 8	1.322	1693	12.1

Taula 4.3: Tipus de circulació (CWT) per a la finestra sinòptica 30° N – 60° N i 15° O – 20° E, la mitjana (\bar{x}) del $WeMO_i$ i els dies (N) de cada distribució i el percentatge respecte al total de dies.

Per a la finestra 30°N-60°N i 15°O-20°E s'obté que els patrons sinòptics que millor expliquen les fases de la WeMO són: per a la fase positiva ($\bar{x}=1.322$) el tipus 8, i per a la fase negativa ($\bar{x}= -1.390$), el tipus 4. El tipus 8 és un reflex més definit de l'anterior tipus 8 (vegeu la figura 4.14), i esbossa la baixa del golf de Gènova, centre d'acció característic del dipol de la WeMO, mentre, per al tipus 4, hi apareix un potent anticicló centreeuropeu, centrat sobre Alemanya, i s'intueix una baixa al golf de Cadis; tots dos centres d'acció són representatius de la fase negativa de la WeMO.

Per a ambdós patrons escollits, tipus 4 per a $WeMO_i$ negatiu i tipus 8 per a $WeMO_i$ positiu, i a partir dels corresponents dies associats (N), s'ha configurat la figura 4.15 utilitzant la base de dades pluviomètrica SPREAD, per veure-hi distribució de la mitjana i la probabilitat de precipitació de manera espacial. Per al tipus 4, destaca la façana oriental d'Espanya, sobretot el golf de València, molt destacat en la probabilitat de precipitació. El tipus 8, com el mateix tipus a la finestra precedent, realça Galícia i la cornisa cantàbrica, mentre que a la franja oriental la mitjana de precipitació i la probabilitat de precipitació són molt baixes.

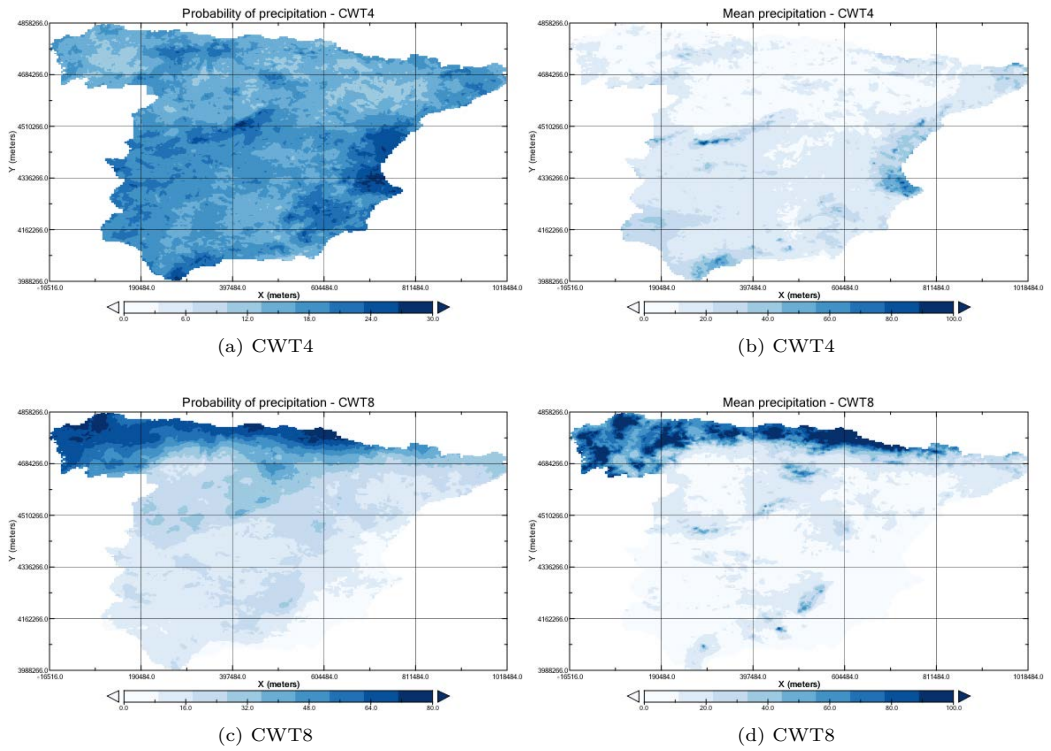


Figura 4.15: Precipitació mitjana i probabilitat de precipitació a l’Espanya peninsular per al tipus 4 (fase positiva) (a) i (b) i per al tipus 8 (fase negativa) (c) i (d) de la finestra sinòptica 30°N-60°N i 15°O-20°E.

Finestra d'estudi 30°N-55°N i 15°O-20°E

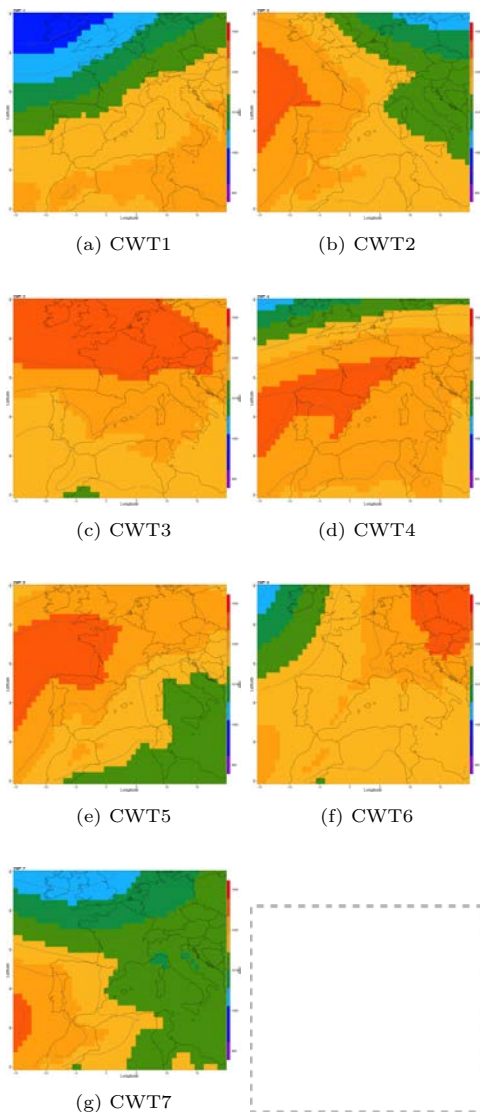


Figura 4.16: Classificació sinòptica en superfície, mitjançant COST733class, de la finestra sinòptica 30°N-55°N i 15°O-20°E.

	30° N – 55° N i 15° O – 20° E		
	\bar{x}	N	%
CWT 1	-0.325	1803	12.8
CWT 2	0.1659	2355	16.8
CWT 3	-0.4620	2167	15.4
CWT 4	-0.0222	2488	17.7
CWT 5	-0.665	2132	15.2
CWT 6	-0.329	1373	9.8
CWT 7	0.927	2134	15.2

Taula 4.4: Tipus de circulació (CWT) per a la finestra sinòptica 30° N – 55° N i 15° O – 20° E, la mitjana (\bar{x}) del $WeMO_i$ i els dies (N) de cada distribució i el percentatge respecte al total de dies.

Per a la finestra 30°N-55°N i 15°O-20°E s'obté que els patrons sinòptics que millor expliquen les fases de la WeMO són: per a la fase positiva ($\bar{x} = 0.927$), el tipus 7, i per a la fase negativa ($\bar{x} = -1.216$), el tipus 3. Per a ambdós patrons escollits i a partir dels corresponents dies associats (N), s'ha configurat la figura 4.17 utilitzant la base de dades pluviomètrica SPREAD, per veure la distribució de la mitjana i la probabilitat de precipitació de manera espacial. Per al tipus 3, es dona un major mitjana de precipitació a la meitat sud-oriental de la península Ibèrica i al sud-oest; una probabilitat més alta, a la zona del golf de València i proximitats de l'estret de Gibraltar i al sistema Central. Contràriament, el tipus 7 reproduïx les pautes pluviomètriques dels tipus 8 de les finestres precedents (vegeu les figures 4.12 i 4.14) per la seva similitud sinòptica.

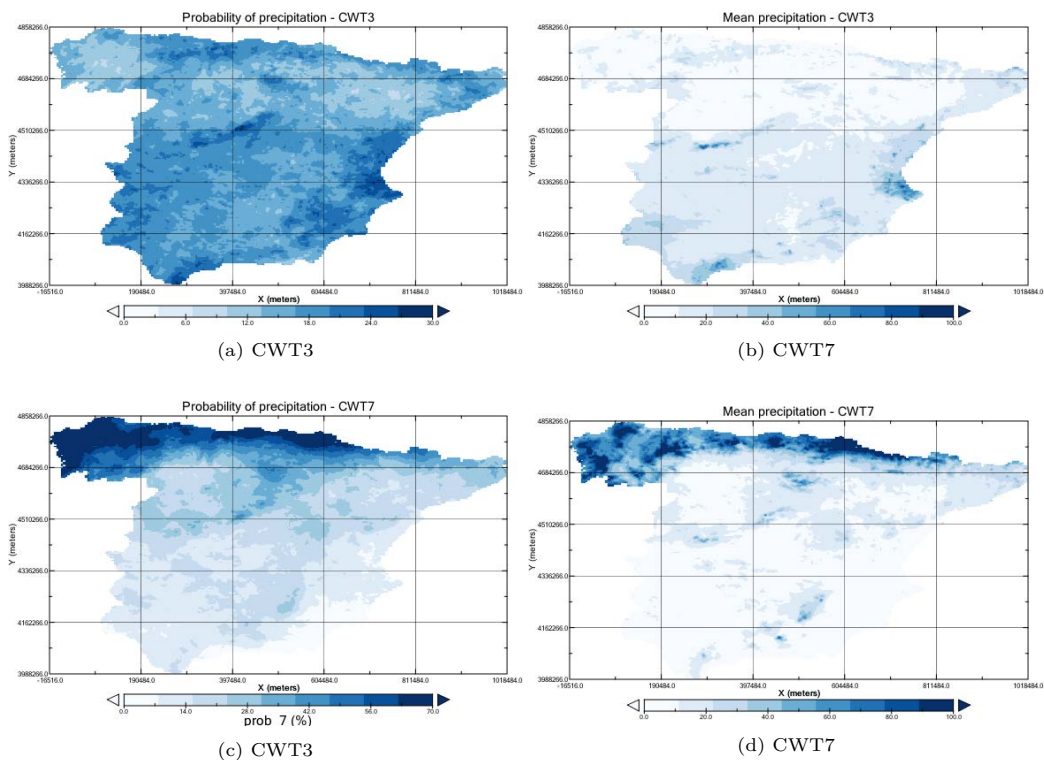


Figura 4.17: Precipitació mitjana i probabilitat de precipitació a l'Espanya peninsular per al tipus 3 (fase negativa) (a) i (b) i per al tipus 7 (fase positiva) (c) i (d) de la finestra sinòptica 30°N-55°N i 15°O-20°E.

Finestra d'estudi 35°N-50°N i 10°O-20°E

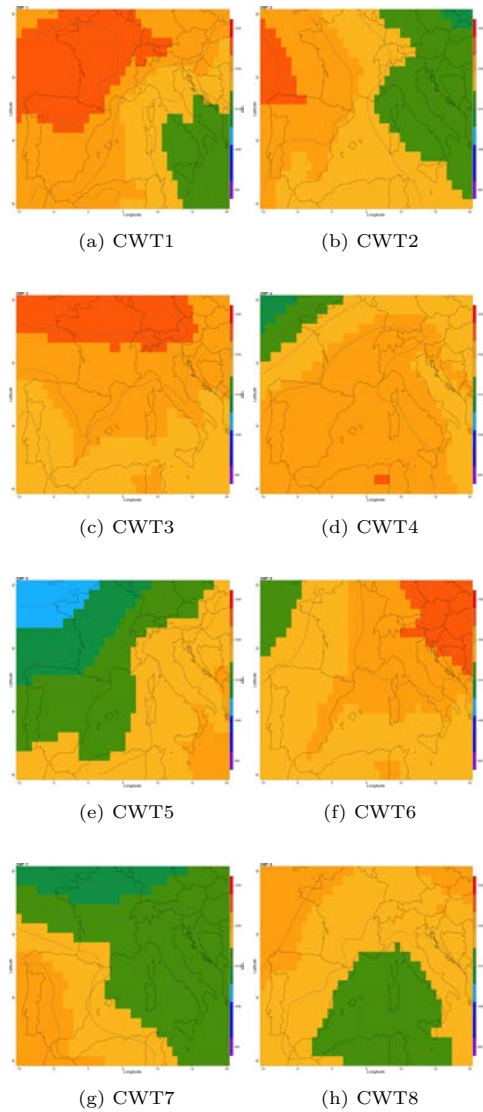


Figura 4.18: Classificació sinòptica en superfície, mitjançant COST733class, de la finestra sinòptica 35°N-50°N i 10°O-20°E.

	35° N – 50° N i 10° O – 20° E		
	\bar{x}	N	%
CWT 1	-0.033	1887	13.4
CWT 2	0.562	2372	16.9
CWT 3	-1.164	1855	13.2
CWT 4	0.056	1512	10.7
CWT 5	-0.464	1628	11.6
CWT 6	0.825	1518	10.8
CWT 7	1.050	1758	12.5
CWT 8	-0.406	1470	10.5

Taula 4.5: Tipus de circulació (CWT) per a la finestra sinòptica 35° N – 50° N i 10° O – 20° E, la mitjana (\bar{x}) del $WeMO_i$ i els dies (N) de cada distribució i el percentatge respecte al total de dies.

Per a la finestra 35°N-50°N i 10°O-20°E es troba que els patrons sinòptics que millor expliquen les fases de la WeMO són: per a la fase positiva ($\bar{x} = 1.050$) el tipus 7, i per a la fase negativa ($\bar{x} = -1.164$) el tipus 3.

Per a ambdós patrons escollits, tipus 3 per a $WeMO_i$ negatiu i tipus 7 per a $WeMO_i$ positiu, i a partir dels corresponents dies associats (N), s'ha configurat la figura 4.19 utilitzant la base de dades pluviomètrica SPREAD, per veure la distribució de la mitjana i la probabilitat de precipitació de manera espacial. A la figura 4.19 s'aprecia que el patró pluviomètric del tipus 7 és similar al dels tipus que mostren una fase positiva de la WeMO i la NAO en les finestres precedents. En el tipus 3, la meitat meridional de la península Ibèrica, en mitjana de precipitació, i la meitat occidental, juntament amb el golf de València, en probabilitat de precipitació, són les que presenten els valors superiors.

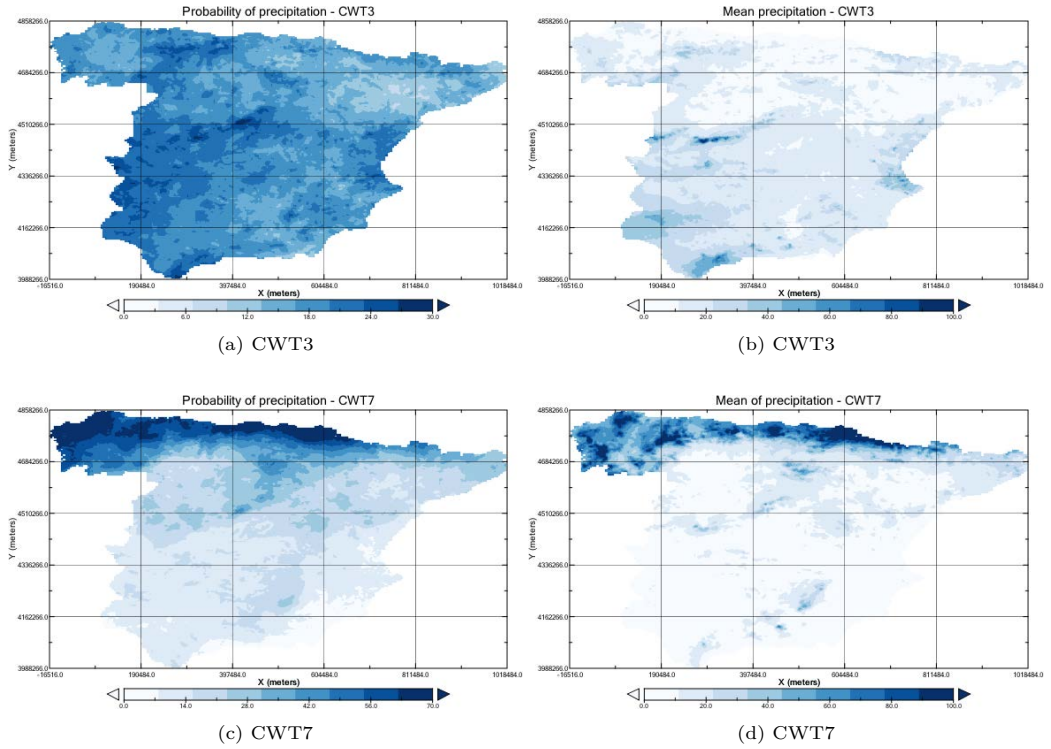


Figura 4.19: Precipitació mitjana i probabilitat de precipitació a l'Espanya peninsular per al tipus 3 (fase positiva) (a) i (b) i per al tipus 7 (fase negativa) (c) i (d) de la finestra sinòptica 35°N-50°N i 10°O-20°E.

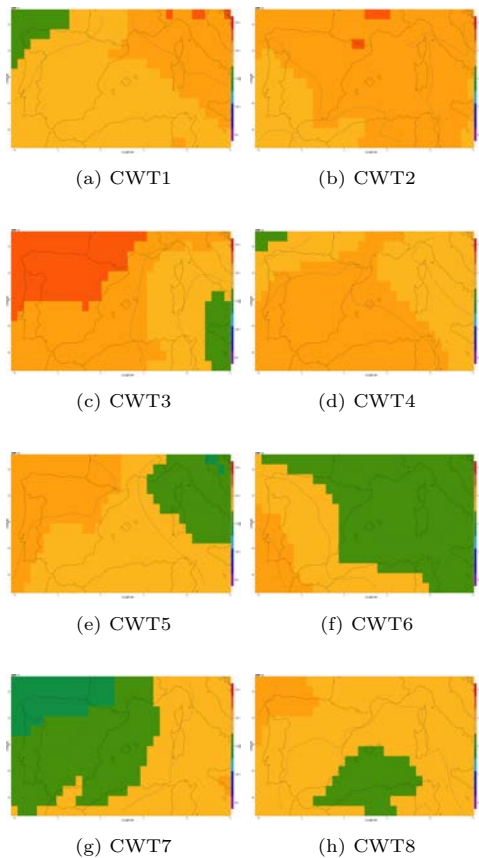
Finestra d'estudi 35°N-45°N i 10°O-15°E

Figura 4.20: Classificació sinòptica en superfície, mitjançant COST733class, de la finestra sinòptica 35°N-45°N i 10°O-15°E.

	35° N – 45° N i 10° O – 15° E		
	\bar{x}	N	%
CWT 1	-1.102	1127	8.0
CWT 2	-0.949	2112	15.8
CWT 3	0.004	2215	15.8
CWT 4	0.409	1408	10.1
CWT 5	0.599	2349	16.7
CWT 6	0.909	1765	12.1
CWT 7	-0.709	1247	8.9
CWT 8	-0.576	1777	12.6

Taula 4.6: Tipus de circulació (CWT) per a la finestra sinòptica 35° N – 45° N i 10° O – 15° E, la mitjana (\bar{x}) del $WeMO_i$ i els dies (N) de cada distribució i el percentatge respecte al total de dies.

Per a la finestra 35°N-45°N i 10°O-15°E s'obté que els patrons sinòptics que millor expliquen les fases de la WeMO són: per a la fase positiva ($\bar{x} = 0.909$), el tipus 6, i per a la fase negativa ($\bar{x}=-1.102$), el tipus 1.

Per a ambdós patrons escollits, tipus 3 per a $WeMO_i$ negatiu i tipus 7 per a $WeMO_i$ positiu, i a partir dels corresponents dies associats (N), s'ha configurat la figura 4.21 utilitzant la base de dades pluviomètrica SPREAD, per veure distribució de la mitjana i la probabilitat de precipitació de manera espacial. A la figura 4.21 i per al tipus 1, Galícia i, en general, el quadrant nord-occidental d'Espanya, presenta una major precipitació, mitjana i probabilitat, mentre que per al tipus 6 és el terç septentrional el més afavorit. En tot cas, com passa en les altres finestres, sempre en el tipus que reflecteix la fase negativa de la WeMO, la precipitació en mitjana i en freqüència al litoral oriental de la península Ibèrica és més elevada que en el tipus que reflecteix fase positiva.

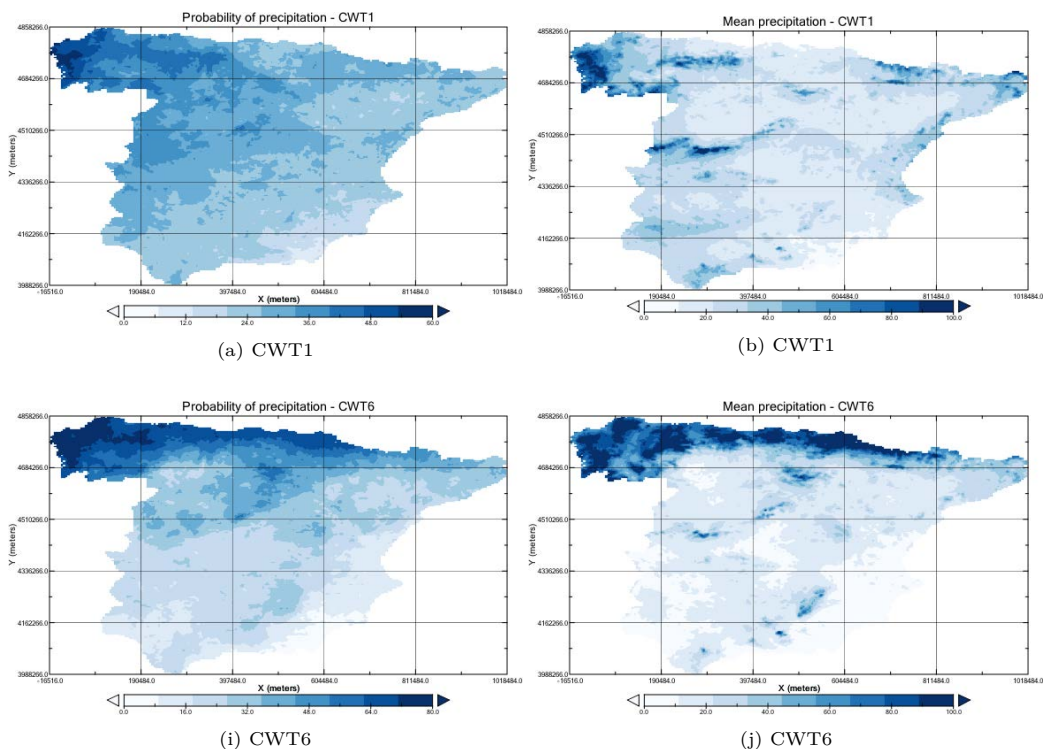


Figura 4.21: Precipitació mitjana i probabilitat de precipitació a l'Espanya peninsular per al tipus 6 (fase positiva) (a) i (b) i per al tipus 1 (fase negativa) (c) i (d) de la finestra sinòptica 35°N - 45°N i 10°O - 15°E .

La WeMO ha esdevingut clau per caracteritzar les àrees amb major variabilitat pluviomètrica a la península Ibèrica, en què la precipitació de l'est mostra una elevada irregularitat temporal, influenciada per la posició d'altres pressions al nord d'Itàlia i centre d'Europa. La presència d'aquest dipol de la WeMO s'observa en totes les finestres sinòptiques estudiades mitjançant el mètode PXE, del programari COST733class, i és especialment representativa a la finestra 30°N - 60°N i 15°O - 20°E , amb el tipus 4 i tipus 8, en què (i) els valors mitjans de l' $WeMO_i$ instrumental entre les dues fases són més extrems i (ii) la probabilitat de precipitació i la mitjana de precipitació queden regionalitzades per les seves fases de manera coherent: per l'est i sud-est, en la seva fase negativa, i al nord, per la fase positiva. Per contra, la finestra que pitjor representa la WeMO és la més reduïda (35°N - 45°N i 10°O - 15°E). Tot i que pel valor del $WeMO_i$ queda palesa

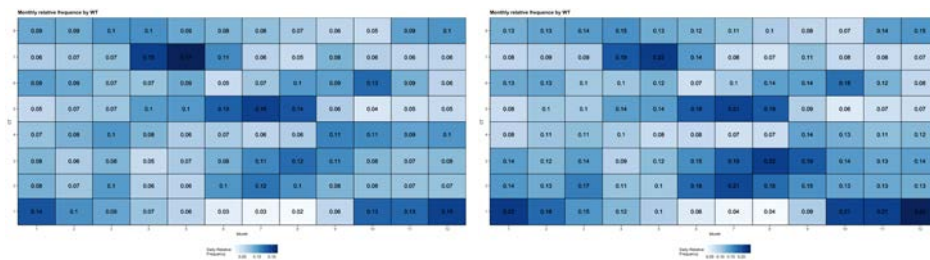
la presència de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental a la finestra, la distribució de la precipitació, en probabilitat i en mitjana, no és representativa de la regionalització típica, vista en les altres finestres, de la precipitació a la península Ibèrica.

L'acotament de l'abast espacial de la WeMO té un límit i s'ha comprovat que una finestra més petita ja no implica una detecció més acurada del valor i la configuració espacial de l'índex. Els CWT de totes les finestres d'estudi defineixen la mateixa situació sinòptica, d'aquesta manera i basant-se en (i) els valors mitjans de $WeMO_i$ instrumental i (ii) les freqüències relatives basats en la millor finestra d'estudi:

- El CWT4 correspon a la circulació sinòptica d'est, de llevant i representa els dies caracteritzats per una alta pressió de gran extensió instal·lada a l'est situada al mar Lígur i per una baixa pressió a l'oest de la península Ibèrica, que afavoreix l'entrada de flux mediterrani humit i càlid i que, sobretot, a la tardor provoca les pluges torrencials a l'arc mediterrani peninsular.
- El CWT8, contràriament, correspon a la situació sinòptica en què els fluxos d'oest i nord-oest influencien l'arc mediterrani; vents que venen definits per la baixa pressió al sud-oest peninsular i una alta pressió al nord de la península Itàlica, els quals aporten estabilitat atmosfèrica a tot el litoral.

No merament, els CWT1 de totes les finestres d'estudi apareixen com a dominants, i és que es tracta de la circulació d'oest dominant a la península Ibèrica.

En conseqüència, s'ha volgut fer la regionalització espacial amb el paquet *synoptReg* [Lemus-Canovas et al., 2019] per a la finestra que millor representa l'oscil·lació de la Mediterrània (30°N-60°N i 15°O-20°E). *SynoptReg* és un paquet de codi obert per al càlcul de classificacions climàtiques sinòptiques i regionalitzacions espacials de dades ambientals, que permet obtenir els principals patrons o tipus atmosfèrics (CWT) d'una determinada regió i que, també, permet obtenir les freqüències relatives de cada tipus de circulació (CWT) per mesos i per anys, amb la finalitat d'observar en quin període de temps té més pes cada tipus de circulació. A continuació, es presenten la figura 5.4, de freqüències relatives per mesos i per CWT, i la figura 4.23, anual i per cada CWT per a la finestra 30°N-60°N i 15°O-20°E:



(a) Freqüències de CWT per cada mes.

(b) Freqüències de mesos per cada CWT.

Figura 4.22: Freqüències relatives en percentatge de cada CWT per mesos.

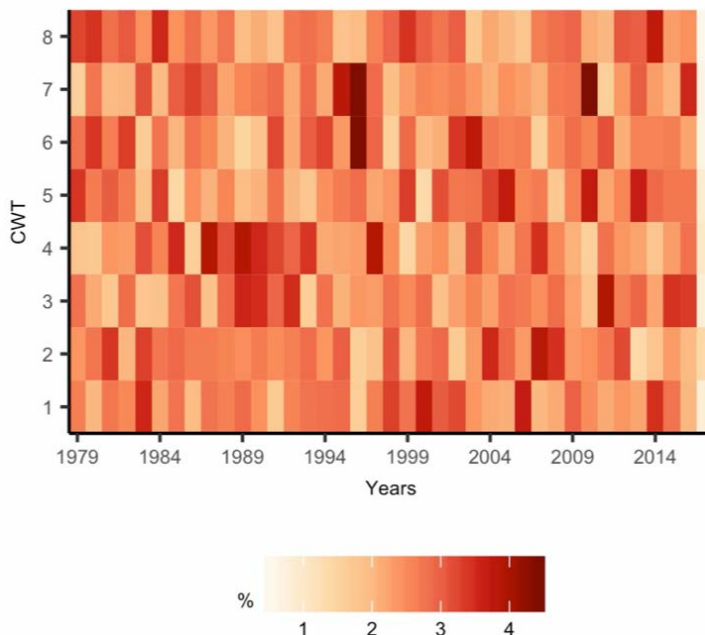


Figura 4.23: Freqüència relativa anual en percentatges de cada WT durant el període de 1950-2016.

La figura 4.22a, de freqüències relatives de mesos per cada CWT, mostra com en els mesos més freds de l'any, en què la WeMO té més incidència és el tipus 4 el més estable; acumula un 56%, i és més alt que la resta per a la fase negativa de

la WeMO. El segueix el CWT3 per als mesos SONDGF, però la figura 4.14c no mostra una situació sinòptica favorable a la definició de $WeMO_i$ negatiu. Mentre que per als mesos en què la fase és positiva (de febrer a maig) coincideix, en primer lloc, amb el CWT7, d'anticicló, i el tipus 8, de definició de fase de WeMO. I la figura 4.22b de freqüències relatives de mesos per cada CWT mostra com el tipus 8 és el més estable per als mesos de novembre, desembre, gener i febrer. Però, pel que fa al mes d'octubre, correspon al CWT6, que predomina. Tanmateix, la figura 4.14f no mostra que sigui una situació sinòptica que defineixi la fase positiva de la WeMO.

Anualment, tal com es mostra al gràfic de freqüències 4.23, els tipus de circulació 4 i 8 s'han vist disminuïts al llarg del període d'estudi (1961-1990), mentre que els tipus de CWT1 i CWT5 han canviat la tendència a l'alça. La dècada dels 90 del segle XX fou especialment negativa, tal com es pot veure en la màxima freqüència del CWT_4 (1990-1994 i 1997); també en el cas del CWT_8 durant 1997-2002 i el 2014. En la figura 4.24 [Martín-Vide et al., 2014] es pot observar com les darreres dècades (1980-1990-2000) han estat especialment negatives quant al $WeMO_i$.

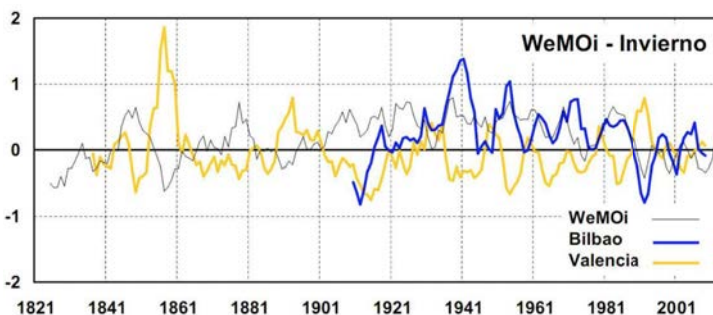


Figura 4.24: Valor del $WeMO_i$ per als mesos DGF i sèries de precipitació (1821-2013). Font: [Martín-Vide et al., 2014].

Per tant, i en relació amb les hipòtesis específiques plantejades a l'inici d'aquest capítol:

- Existeix una relació inversa entre el valor de l'índex de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental i el nombre d'episodis de pluja torrencial. **Hipòtesi confirmada.**
- La variable pressió atmosfèrica provinent de reanàlisi esbiaixa el valor real i, en conseqüència, el valor del $WeMO_i$ no queda tan negativitzat en episodis de pluja torrencial. **Hipòtesi confirmada.**
- El patró de teleconnexió de baixa freqüència es veurà reforçat com més petita sigui la finestra d'estudi dels tipus de circulacions. **Hipòtesi rebutjada.**
- El catàleg és una guia general per poder categoritzar espacialment la precipitació en funció del valor de $WeMO_i$. **Hipòtesi confirmada.**

Capítol 5

REGIONALITZACIÓ DEL *WeMO_i*

La precipitació de caràcter fort i intens associada a un índex de la *WeMO* negatiu és clara, tal com s'ha esmentat i demostrat en capítols anteriors. Generalment, els fenòmens climàtics resulten molt complexos per catalogar-ne la descripció, no només pel fet del gran nombre de variables que hi poden influir, i més en un context de canvi global, sinó també per la gran diversitat de maneres en què poden estar combinades les múltiples condicions causals que porten a un resultat determinat [Ragin, 2014]. Així, un cop definida temporalment la freqüència d'episodis torrencials per dècada de dies i per freqüències de dies, es pretén, a continuació, fer una catalogació espacial del *WeMO_i* segons la precipitació.

La distinció de valors superiors +1 o inferiors -1 escollits per Hurrell [Hurrell, 1995] a la seva anàlisi de la NAO són els determinants per classificar i distingir-hi les fases. El mateix passa amb el *WeMO_i*. Ara bé, a continuació, s'ha fet una visualització estadística categoritzada per a diferents rangs i vinculada a la precipitació per dos motius: una categorització (i) simplifica la visualització espacial i (ii) filtra i localitza espacialment.

Els objectius específics d'aquest capítol són:

- Relacionar i identificar espacialment la quantitat de pluja acumulada en funció del valor de l'índex.
- Identificar els episodis amb valors del *WeMO_i* extrems.
- Correlacionar mensualment les fases del *WeMO_i* amb la precipitació peninsular.
- Identificar espacialment la correlació entre les fases del *WeMO_i* i la precipitació peninsular fins a 72 hores a la vista.

Les hipòtesis específiques d'aquest capítol són:

- Els episodis amb un *WeMO_i* extremament negatiu es donen a l'arc mediterrani.
- La correlació estadística mensual entre la precipitació i el *WeMO_i* per les seves fases és bona, sobretot per als mesos SON en fase negativa.
- El *WeMO_i* < 0 s'ajusta significativament a l'inici d'un temporal, al sud, i es desplaça cap al nord-est peninsular.

5.1 Regionalització

Per quantificar la magnitud i la distribució espacial de la intensitat dels esdeveniments de precipitació, les figures següents s'han creat amb la base de dades de precipitació SPREAD (1950-2013) [Serrano-Notivoli et al., 2017], agrupant els dies en què el valor del $WeMO_i$ instrumental és entre els rangs de categorització de la taula 5.1, per a l'àrea de l'Espanya peninsular. Així doncs, s'han establert rangs de 0.5 de valor d'índex des del 4 negatiu fins al 4 positiu (vegeu la taula 5.1) i s'ha calculat (i) la probabilitat que la precipitació sigui superior a 0,1 mm per als dies en què el $WeMO_i$ es troba entre cada rang; (ii) la probabilitat que la precipitació sigui superior a 50 mm per als dies en què el $WeMO_i$ es troba entre cada rang; (iii) la mitjana de precipitació de cada rang comparada amb la mitjana total.

$WeMO_i$ negatiu	nombre de dies	$WeMO_i$ positiu	nombre de dies
≤ -4.0	26	0 a 0.5	3894
-4.0 a -3.5	35	0.5 a 1.0	2520
-3.5 a -3.0	97	1.0 a 1.5	1563
-3.0 a -2.5	208	1.5 a 2.0	898
-2.5 a -2	414	2.0 a 2.5	540
-2 a -1.5	873	2.5 a 3.0	297
-1.5 a -1	1830	3.0 a 3.5	146
-1 a -0.5	3480	3.5 a 4.0	59
-0.5 a 0	4667	≥ 4.0	35

Taula 5.1: Dies de precipitació en què el $WeMO_i$ es troba en cada rang.

A la taula 5.1, s'hi indiquen els rangs del $WeMO_i$ i el total de dies en què el $WeMO_i$, provinent de la base de dades instrumental (vegeu l'apartat 4.1), té un valor dins de cada categorització. Com és d'esperar, en els rangs més extrems, tant en positiu com en negatiu, la quantitat de dies observats és molt menor que si el valor de l'índex és positiu, lleugerament positiu, negatiu o lleugerament negatiu. De fet, d'un total de 23.011 dies d'observació de precipitació SPREAD, la major quantitat de dies (37.2%) es troben en fase neutra (-0.5 a 0.5).

Es mostra la probabilitat que la precipitació sigui superior a 0,1 mm per als dies en què el $WeMO_i$ es troba entre cada rang. Es remarca el llindar del 75% de probabilitat (vegeu la figura 5.1).

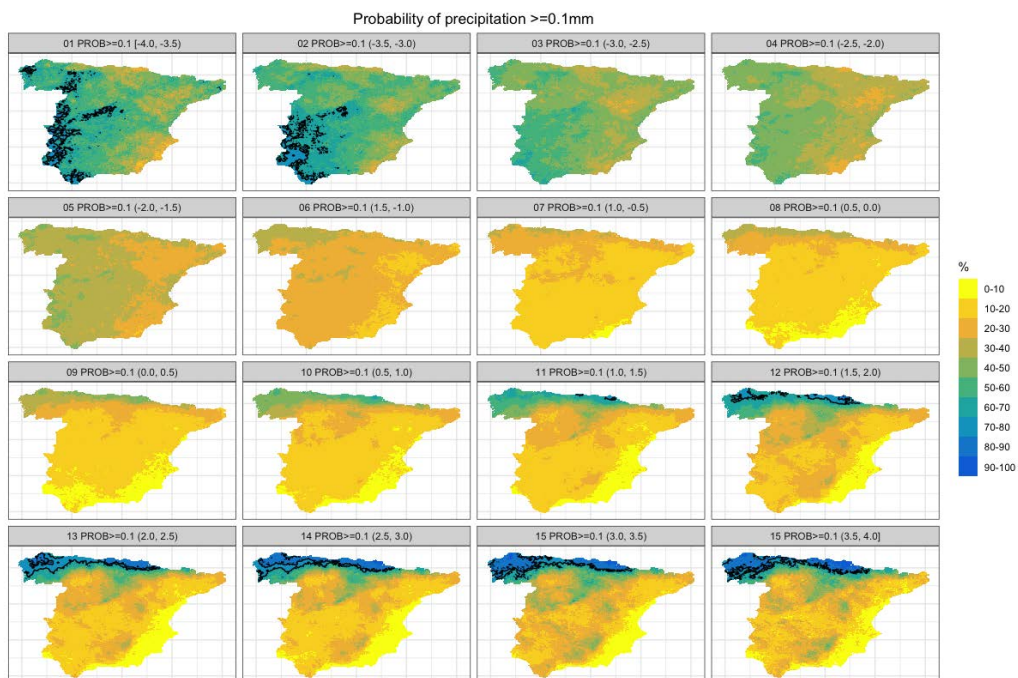


Figura 5.1: Probabilitat per rangs que la precipitació sigui superior a 0.1 mm.

A continuació, es mostra la probabilitat que la precipitació sigui superior a 50 mm per als dies en què el $WeMO_i$ es troba entre cada rang. Es remarca el llindar del 75% de probabilitat que la precipitació sigui torrencial (vegeu la figura 5.2).

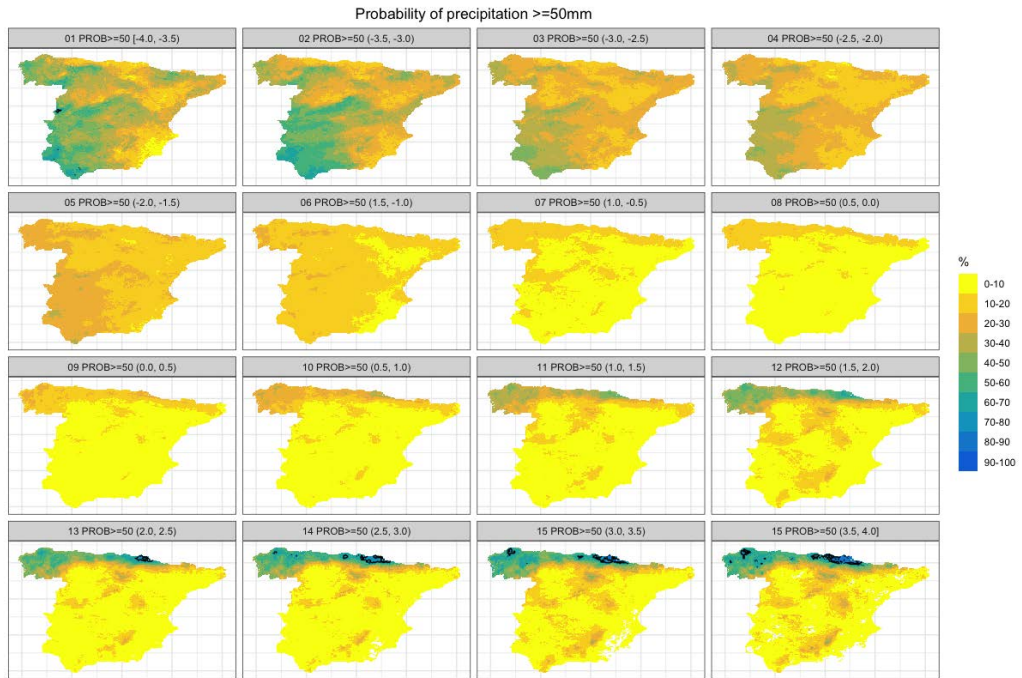


Figura 5.2: Probabilitat per rangs que la precipitació sigui superior a 50 mm.

I, finalment, es mostra la precipitació mitjana per cada rang del $WeMO_i$

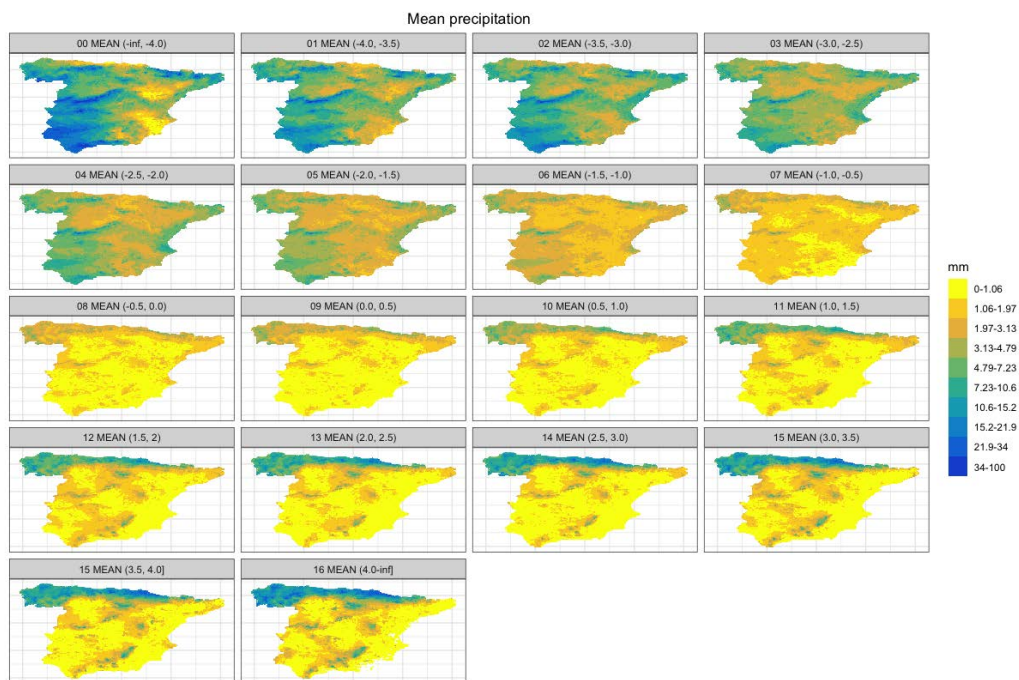


Figura 5.3: Mitjana diària de precipitació per rangs del $WeMO_i$.

Així mateix, el percentatge de dies per cada rang del $WeMO_i$ que la precipitació ha superat els 0.1 mm es dona en la totalitat de rangs, amb alta probabilitat com més extrems i no tan neutres són els rangs del $WeMO_i$. S'hi observa com els valors (representats en colors verds i blaus) corresponents a alta probabilitat (60-90%) són majoritaris amb $WeMO_i \leq 0$ a l'oest i centre peninsulars i, contràriament, amb $WeMO_i \geq 0$ es dona a la zona cantàbrica i a Galícia. Ara bé, quan la probabilitat és més alta (colors verdosos a la figura 5.1), s'hi observen, clarament, dos comportaments pluviomètrics. Aquests comportaments o categoritzacions, associats a rangs extrems, són (i) per a $WeMO_i$ extremadament negatiu, una precipitació localitzada a l'oest i sud-oest de la península Ibèrica, mentre que (ii) s'observa que, amb rangs de $WeMO_i$ positiu o extremadament positiu, la precipitació queda a la part nord de la geografia espanyola (Cantàbria i Galícia). Finalment, (iii) s'hi denota, tímidament, un comportament pluviomètric en què, sobretot, l'est i sud-est de la península Ibèrica queda menys exposat a aquesta quantitat de precipitació, corresponent a les fases lleugerament negatives, neutres

i lleugerament positives.

Pel que fa a la figura 5.2, s'observa el comportament pluviomètric descrit anteriorment, però per a precipitacions torrencials també s'observa que aquesta queda concentrada a l'oest i sud-oest peninsulars, així com a la part mediterrània, per a $WeMO_i$ negatiu. Cal destacar que el quadrant sud-oest de la península Ibèrica és l'àrea més extensa i amb major probabilitat de precipitacions torrencials amb $WeMO_i$ extremament negatius, per sobre de la franja oriental ibèrica, catalana i valenciana. Això és degut a la proximitat de l'esmentat quadrant de la depressió del golf de Cadis, mentre que, per a $WeMO_i$ positiu, és clara la localització de la precipitació al Cantàbric i a Galícia. Es diferencia també, gràficament, com quan la probabilitat és més alta, la probabilitat de precipitació torrencial és alta (i) a l'oest peninsular i l'arc mediterrani, per al cas de $WeMO_i$ negatiu, i (ii) a la franja cantàbrica i a Galícia, per a $WeMO_i$ positiu. Tanmateix, els valors corresponents a baixa probabilitat (0-10% i representats amb colors grogosos) es fan extensius en rangs lleugerament negatius i fins a extremament positius.

I, d'altra banda, la figura 5.3 mostra la distribució espacial de la precipitació mitjana per als dies de cada rang del $WeMO_i$. Quan el $WeMO_i$ és negatiu, la precipitació més quantiosa (colors blaus i verds) queda concentrada al sud-oest i nord-est peninsulars, sobretot per als valors negatius i extremament negatius, i resta al marge la zona central d'Espanya. Però, quan el $WeMO_i$ és positiu i, sobretot, extremament positiu, la precipitació mitjana més elevada es concentra al cantàbric i a Galícia, mentre que la resta, sud i centre, tenen precipitació minsas.

Tant la probabilitat de precipitació extrema ($\geq 50mm$) com la mitjana de precipitació de tots els dies des del 1950 fins al 2013 i per rangs de valor de $WeMO_i$, configuren la distribució diferenciada a tota la península Ibèrica i expliquen el comportament pluviomètric de cada un d'ells i el tipus de situació sinòptica associada. Els mapes corresponents als rangs d'índexs negatius conformen la precipitació en què una baixa situada al golf de Cadis aporta flux de component est a tota la Mediterrània peninsular i en què l'eix N-S d'orografia és perpendicular als fluxos de llevant actua de pantalla orogràfica [Lopez-Bustins and Lemus-Canovas, 2020] i afavoreix les precipitacions a Catalunya, al País Valencià i a la regió de Múrcia. La disposició orogràfica favorable a la descàrrega de grans quantitats de precipitació (com la serralada Transversal, els massissos de les Guilleries i el Montseny), així com la disposició de N-S dels Ports i l'extrem oriental de la serralada Prebètica i Bètica, i les alineacions muntanyoses del sistema Ibèric que conflueixen amb les valls fluvials de la hidrografia de la zona, contribueixen a canalitzar els fluxos del SE i de l'ESE. Cal destacar també la zona sud-oest peninsular, que, malgrat no

ésser l'àrea d'estudi directa, (i) acumula també grans quantitats de precipitació i (ii) té una alta probabilitat de precipitació, també intensa ($\geq 50mm$). De manera oposada, els mapes corresponents als rangs de $WeMO_i$ positius defineixen una precipitació localitzada de manera uniforme a tota la serralada cantàbrica i a la costa gallega, fins al massís gallec i la muntanya de León, i són, doncs, adveccions de nord i nord-oest.

Per conseqüència, s'ha volgut fer la regionalització espacial *synoptReg* de [Lemus-Canovas et al., 2019] per a la precipitació. D'aquesta manera, la figura 5.4 mostra també el comportament pluviomètric diferenciat que es pot associar al $WeMO_i$ positiu i negatiu: la zona atlàntica i cantàbrica no influenciada per la $WeMO$ i, la resta peninsular, corresponentment, sí que s'associa a l'abast d'extensió de la influència de la $WeMO$. Igualment, s'hi configura la distribució vista anteriorment de dos comportaments pluviomètrics, per extensió i localització, segons la categorització del $WeMO_i$.

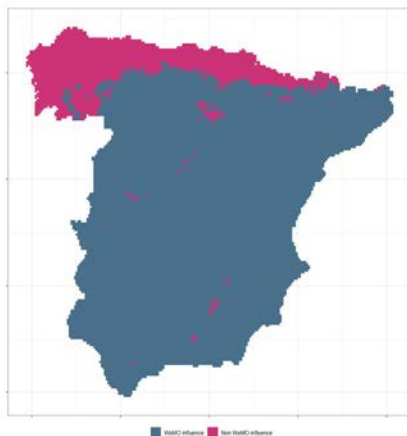


Figura 5.4: Regionalització per tipus de temps. En color rosa fúcsia, s'hi representa la zona en què la $WeMO$ no té influència, mentre que en gris es representa la zona en què la $WeMO$ sí que té influència.

Aquesta catalogació, a més de (i) senyalar la distribució genèrica de la influència de la $WeMO$, (ii) constitueix un mitjà de presentació de forma gràfica, (iii) i és una síntesi de la variabilitat de la precipitació de la península Ibèrica que pot servir d'indicador de l'extensió geogràfica de la precipitació associada a cada rang de $WeMO_i$.

5.2 Correlació per dies consecutius

Es presenta una anàlisi de correlació lineal, a resolució mensual, per als mesos més freds de l'any, entre l'índex WeMO ($WeMO_i$) provinent de la reanàlisi ERA-Interim, a resolució diària, i els valors de la variable precipitació de l'SPREAD, per a tota la península Ibèrica, per al període d'estudi 1979-2013. Així: (i) es categoritza per $WeMO_i < 0$ i $WeMO_i > 0$ (taula 5.2) per als mesos de setembre, octubre, novembre, desembre, gener i febrer, mesos en què la WeMO té més incidència en les pluges torrencials; i (ii) es mostra la correlació significativa amb la confiança de 95% (en color gris clar) i 99% (gris fosc) de la precipitació per al dia $DiaD$, $D + 1$, $D + 2$ i $D + 3$.

	Nombre de dies	
	$WeMO_i < 0$	$WeMO_i > 0$
Setembre	638	382
Octubre	638	416
Novembre	531	489
Desembre	437	617
Gener	442	612
Febrer	410	551

Taula 5.2: Dies per $WeMO_i < 0$ i $WeMO_i > 0$.

És interessant el tractament de variables bidimensionals quantitatives, ja que, a part de poder estudiar l'existència i intensitat de la seva relació, es pot estudiar com varia una variable segons l'altra. La millor manera d'expressar aquesta relació és mitjançant la correlació lineal i la seva significança. Així, fins i tot, es poden predir valors d'una variable segons l'altra.

Setembre

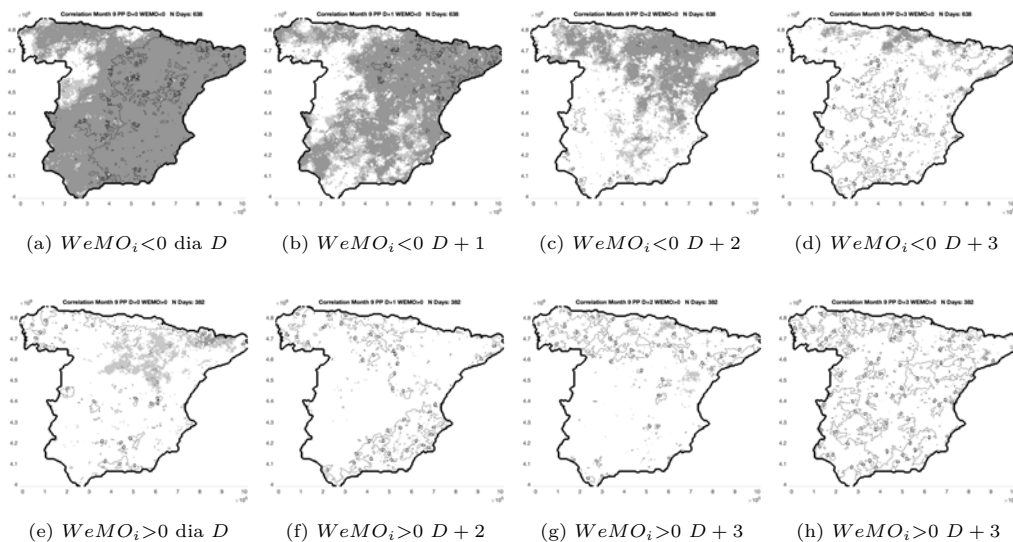


Figura 5.5: Setembre: correlació i la seva significança entre $WeMO_i$ i la precipitació. Significança $<$ al 5%, en color gris clar, i $<$ a l'1%, en color gris fosc.

Octubre

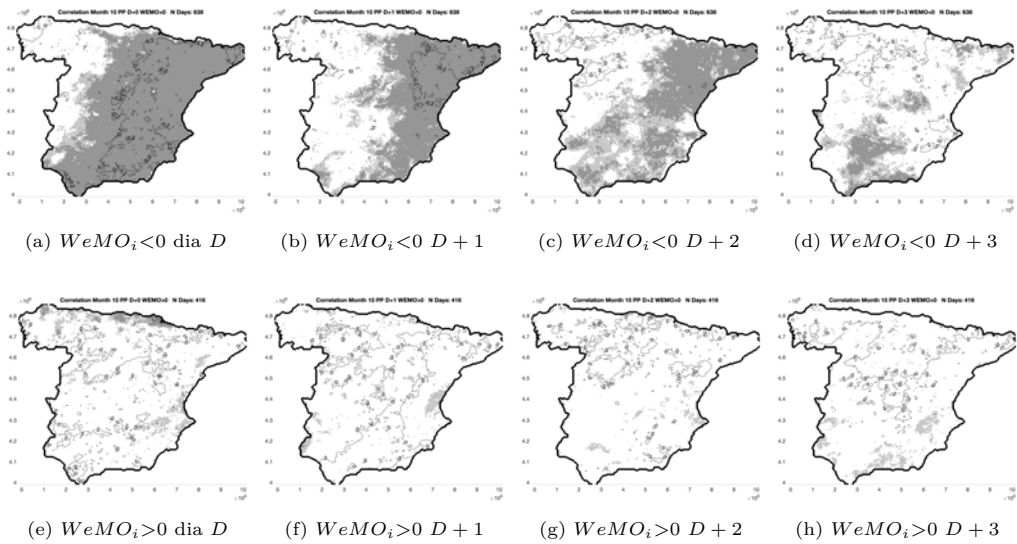


Figura 5.6: Octubre: correlació i la seva significança entre $WeMO_i$ i la precipitació. Significança < al 5%, en color gris clar, i <a l'1%, en color gris fosc.

Novembre

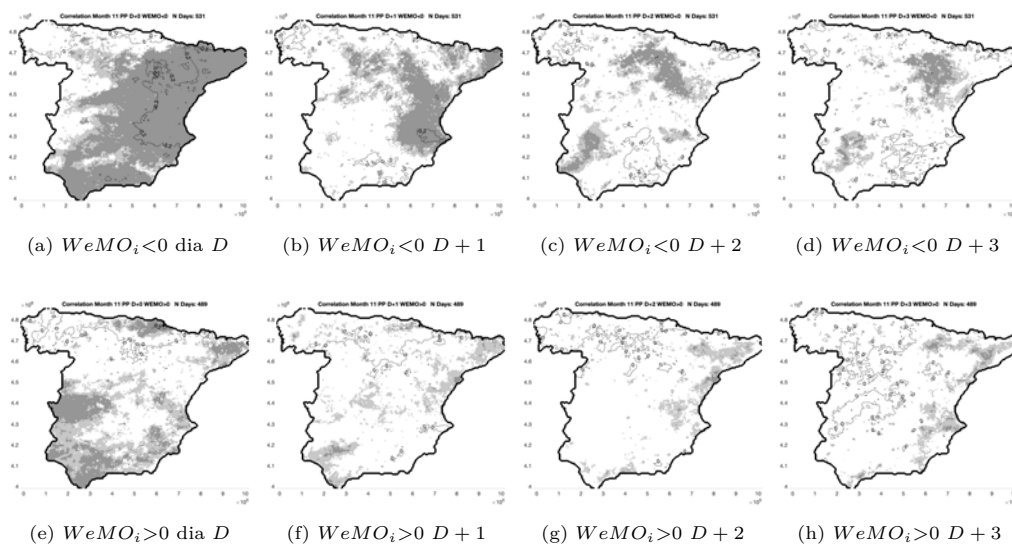


Figura 5.7: Novembre: correlació i la seva significança entre $WeMO_i$ i la precipitació. Significança $<$ al 5%, en color gris clar, i $<$ a l'1%, en color gris fosc.

Desembre

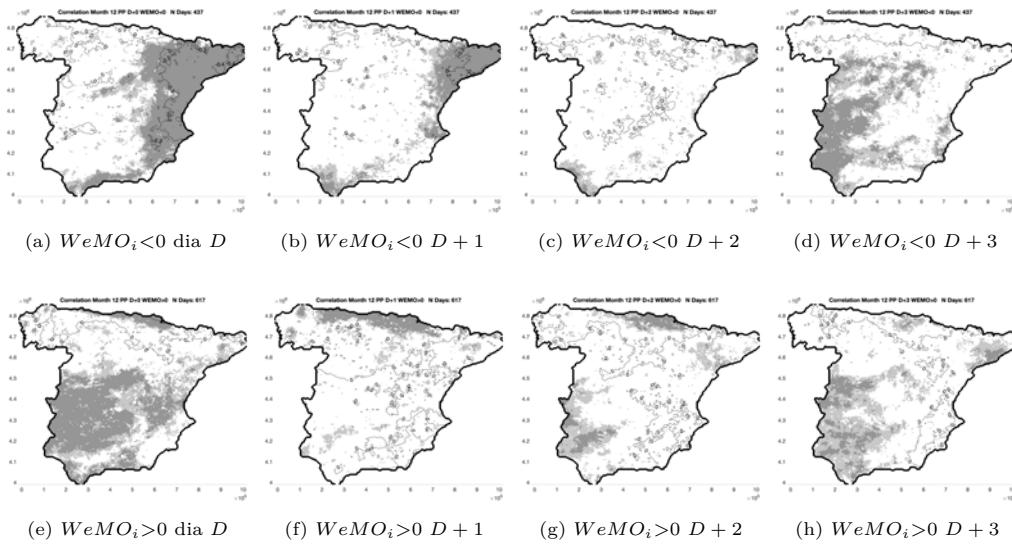


Figura 5.8: Desembre: correlació i la seva significança entre $WeMO_i$ i la precipitació. Significança $<$ al 5%, en color gris clar, i $<$ a l'1%, en color gris fosc.

Gener

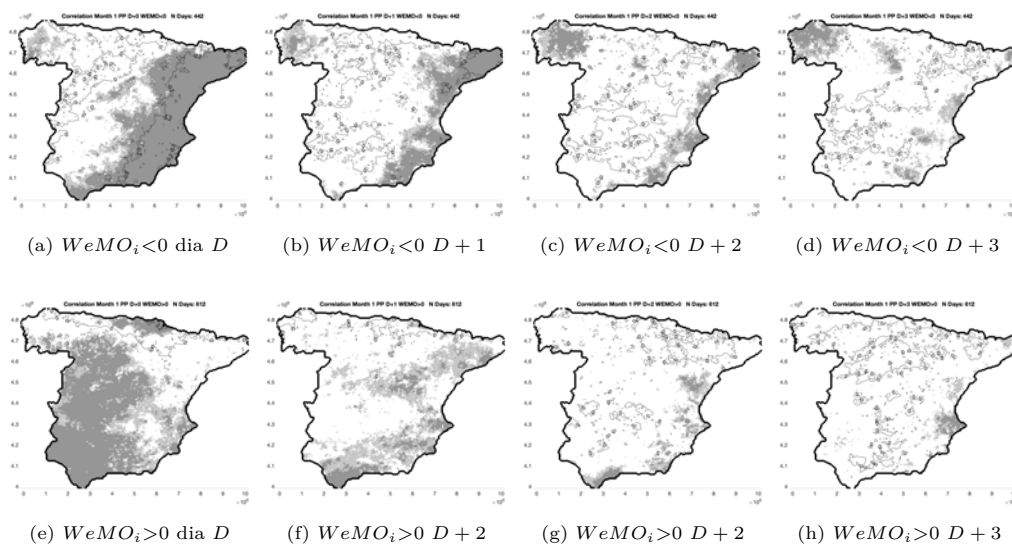


Figura 5.9: Gener: correlació i la seva significança entre $WeMO_i$ i la precipitació. Significança $<$ al 5%, en color gris clar, i $<$ a l'1%, en color gris fosc.

Febrer

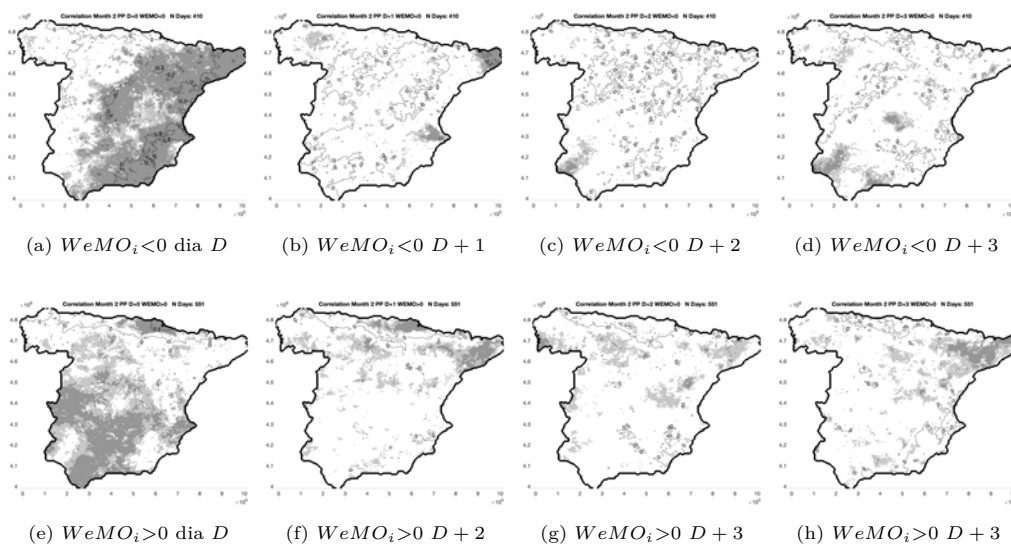


Figura 5.10: Febrer: correlació i la seva significança entre $WeMO_i$ i la precipitació. Significança $<$ al 5%, en color gris clar, i $<$ a l'1%, en color gris fosc.

La correlació mensual dels mesos més freds de l'any s'ha calculat amb la base de dades diària de pressió en superfície de l'ERA-Interim, per obtenir-ne el valor de l'índex, i la precipitació diària de la base de dades SPREAD. S'han separat els valors de $WeMO_i$ diaris per positius i negatius i, per a cada un d'aquests dos grups, s'ha correlacionat el valor de l'índex WeMO amb la precipitació d'aquell dia D , del dia $D + 1$, del dia $D + 2$ i del dia $D + 3$. S'hi representen: (i) la correlació amb isolínies i (ii) la significança, ombrejada, per a cada mes.

Els resultats de la correlació i la significació del mes de setembre mostren que aquesta és bona per $WeMO_i$ negatiu ($WeMO_i < 0$): per al dia D , ho és al sud-oest, a la franja nord del riu Guadalquivir i al sud-est peninsular, a la costa valenciana i a la d'Alacant. Mentrestant, per al dia $D + 1$, la significació ho és cap a la meitat est peninsular i, per al dia $D + 2$, aquesta queda localitzada al nord-est del Mediterrani. Pel que fa a la correlació del $WeMO_i$ en la seva fase positiva per al dia D , aquesta té una petita significació al nord peninsular, a la

costa basca i al sud-oest peninsular, mentre que per al dia $D + 1$ ho és a la cara nord de la serralada Cantàbrica; per al dia $D + 2$ queda localitzat, al nord a la costa basca i al sud, al sud-oest (serra Morena). Per al dia $D + 3$, ídem: com l'anterior, però també és significatiu a Catalunya.

Pel que fa al mes d'octubre, la correlació, negativa, i la significació per al dia D són al centre i est peninsulars. Quant al dia $D + 1$, s'observa com la correlació es desplaça cap a l'est peninsular i el Mediterrani, sobretot a la costa Blanca i d'Almeria i a la gironina; puntualment, també la costa de la Luz, a Huelva. Per al dia $D + 2$, la correlació segueix essent a la meitat est peninsular, però es troba més localitzada només al nord-est d'Espanya. I, per a la fase positiva del mes d'octubre i per a la precipitació del dia D , la correlació, s'hi denota només a la zona cantàbrica. Però la correlació de les precipitacions per als dies $D + 1$, $D + 2$ i $D + 3$ és inexistent a tota la península Ibèrica.

De la mateixa manera que per a la fase negativa de la $WeMO$ dels casos de setembre i octubre, per al novembre la correlació amb la precipitació del dia D es troba sobretot a la meitat est peninsular, així com al sud-oest. Per a la precipitació del dia $D + 1$, es dona al quadrant est peninsular, queda aïllada a la costa Blanca, a Alacant i interior i costa catalana. Ara bé, la correlació entre el $WeMO_i$ diari amb la precipitació del dia $D + 2$ ja no és tan generalitzada, puntualment al sud-oest i interior peninsular. Mentre que la correlació per a la precipitació del dia $D + 3$ es desdibuixa. Així, per a la fase positiva del mes de novembre i per a la precipitació dels dies D i $D + 1$, la correlació s'hi denota localment a la costa basca. Però la correlació de les precipitacions per als dies $D + 2$ i $D + 3$ queda limitada i desdibuixada a l'est peninsular.

Per al mes de desembre, la correlació és significativa entre el $WeMO_i < 0$ i la precipitació dels dies D i $D + 1$ a tot l'arc mediterrani. Aquest últim dia és més intensa als països catalans i golf de Cadis. Mentre que la correlació del $WeMO_i$ per a la precipitació del dia $D + 2$ queda localitzada a també al golf de Cadis i a la costa Brava, Girona. La correlació per a la precipitació del dia $D + 3$ queda, altra vegada, desdibuixada a l'est peninsular i pren força al sud-oest i oest peninsular. Contràriament, és a dir, per a la fase positiva del mes de desembre, la correlació del $WeMO_i$ amb la precipitació del dia $D + 1$ és forta a la costa basca i sud-oest i centre peninsular; pel dia $D + 2$ la correlació és forta a la costa basca i Cantàbria. El dia $D + 3$ manté un comportament similar al dia anterior. I pel dia $D + 3$ la correlació ho és al sud-oest i nord-est peninsular.

Pera al mes de gener, la correlació de l'índex de la $WeMO$ amb la precipitació dels dies D i $D+1$ és, de la mateixa manera que els mesos anteriors, a la meitat est peninsular, amb més extensió i més negativa en punts de l'interior d'Alacant, per a la precipitació del dia en qüestió. Mentrestant, la correlació amb la precipitació del dia $D+1$ queda més negativa al nord-est de Catalunya, i la correlació del $WeMO_i$ diari amb la precipitació del dia $D+2$ del mes de gener queda localitzada a la costa litoral peninsular i a Galícia. Exactament de la mateixa manera que els mesos de setembre, octubre, novembre i desembre, la correlació de l'índex amb la precipitació del dia $D+3$ desdibuixa. Així, per a la fase positiva del mes de gener i per a la precipitació del dia D és la costa basca, al sud-oest i centre la península Ibèrica. La correlació de l'índex diari amb la precipitació del dia $D+1$, en aquest cas, és al sud i sud-est peninsular. Per als dies $D+2$ i $D+3$ és puntual en zones de la costa litoral espanyola.

I, per acabar, per al mes de febrer, la correlació del $WeMO_i$ en la seva fase negativa amb la precipitació diària del dia D té el mateix comportament, en extensió i intensitat, que els mesos anteriors, és a dir, a la meitat est peninsular. Per a la precipitació del dia $D+1$, és a la costa Brava i València. Mentre que la correlació per a la precipitació del dia $D+2$ queda restringida i desdibuixada al sud-oest peninsular. Per a la correlació del $WeMO_i$ diària amb la precipitació del dia $D+3$, torna a ser com el del dia $D+2$. Contràriament, és a dir, per a la fase positiva del mes de febrer, la correlació del $WeMO_i$ amb la precipitació del dia D i $D+1$ existeix a la costa basca i a Catalunya per a la precipitació dels dies $D+2$ i $D+3$.

Per tant, i en relació amb les hipòtesis específiques plantejades a l'inici d'aquest capítol:

- Els episodis amb $WeMO_i$ extremament negatiu es donen a l'arc mediterrani. **Hipòtesi parcialment confirmada.**
- La correlació estadística mensual entre la precipitació i el $WeMO_i$ per les seves fases és bona, sobretot per als mesos SON en fase negativa. **Hipòtesi confirmada.**
- El $WeMO_i < 0$ s'ajusta significativament, a l'inici d'un temporal, al sud, i es desplaça cap al nord-est peninsular. **Hipòtesi confirmada.**

Capítol 6

APLICACIÓ DEL $WeMO_i$: PREDICCIÓ DE DIES DE PLUJA

Un cop demostrada la relació estreta entre el valor del $WeMO_i$, tant amb dades instrumentals com amb reanàlisi, i les pluges torrencials a l'est peninsular mediterrani, es proposa el $WeMO_i$ com a índex predictiu de pluges torrencials. Es pretén mostrar com el clima ens explica part de la meteorologia, del comportament i de les variacions atmosfèriques actuals i a curt termini. Els esdeveniments històrics de pluja torrencial a la façana mediterrània de la península Ibèrica que s'han correlacionat positivament amb la fase negativa de la WeMO, juntament amb la configuració dels tipus de circulació atmosfèrica que la defineixen, determinen que la climatologia pot ésser aplicada a la meteorologia, és a dir, als esdeveniments torrencials que mantenen una similitud als històrics climàtics i que poden esdevenir en les properes hores.

Aquest capítol té un objectiu únic:

- Calcular el $WeMO_i$ amb les sortides d'un model meteorològic de predicció i crear una eina visual i espacial de l'impacte de la precipitació moderada i intensa.

Les hipòtesis específiques d'aquest capítol són:

- L'eina WeMOTool predirà el valor del $WeMO_i$ per a les properes hores.
- La WeMOTool esdevé una eina de suport predictiva de les pluges torrencials, en extensió i en intensitat.

Institucions internacionals i serveis meteorològics nacionals proporcionen previsions meteorològiques horàries, diàries i estacionals basades ens models matemàtics de diversa resolució espacial i temporal. A escala sinòptica, existeixen una gran diversitat de models útils per predir el temps a curt termini. En són exemples: UKMO (model meteorològic britànic), GFS (model meteorològic americà), ECMWF (Centre Europeu de Prediccions Meteorològiques a Mitjà Termini), DWD (Servei Meteorològic Alemanya) i GEM (model meteorològic global Canadenc), entre d'altres. Però les precipitacions de caràcter torrencial i intens són esdeveniments imprevisibles en què l'extensió de la incertesa varia d'un model a un altre en funció de la seva modelització matemàtica, i és una variable difícil de modelitzar per als models de circulació general (CGM) [Bárdossy, 1997]. Com a conseqüències directes, quan l'alerta per pluges intenses pot ser que sigui esbiaixada espacialment o temporalment, són els desastres naturals i més en un context de canvi climàtic com aquest en què estem immersos. Malauradament, estudis confirmen un augment de les pluges torrencials [(US), 2014], i la prevalença d'aquests esdeveniments sembla correlacionar-se amb l'augment del vapor d'aigua a l'atmosfera terrestre i d'altres factors, com canvis en els usos del sòl i una alta exposició de les persones en certs indrets [Schumacher, 2017]. L'alerta primerenca dels aiguats és molt important no tant, però, com és una planificació territorial i una gestió correcta de la zona afectada, però, per fer això, cal desenvolupar, doncs, indicadors, tendències, índexs, regionalitzacions i retrats que descriguin cada una de les variabilitats climàtiques.

Així, malgrat que és probable que el nombre d'aquests esdeveniments continuï augmentant, l'anàlisi per a la millora de l'alerta primerenca i la generació d'eines que ajudin a afinar la predicció és el que es proposa a continuació, amb la creació de l'eina anomenada WeMOTool.

6.1 WeMOTool

L'eina WeMOTool s'ha creat per la necessitat de donar suport a la predicció meteorològica d'esdeveniments puntuals, locals i amb caràcter fort, basada en la correlació històrica del $WeMO_i$ i les pluges torrencials a l'est de la península Ibèrica.

En aquesta tesi s'utilitza el model matemàtic Global Forecast System (GFS) de la National Center for Environmental Information (NOAA), creat per [Sela, 1980]. Es tracta d'un model espectral de resolució triangular, de malla de 768 x 384 punts, aproximadament de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (55km) (vegeu la figura 6.1). Aquest model s'executa quatre vegades al dia (00h, 06h, 12h i 18h) i prediu amb una resolució alta, fins a 192 hores, per a multituds de variables. El GFS és l'únic model global per al qual totes les seves sortides són disponibles gratuïtament i sota domini públic a través d'Internet, com a resultat de les lleis dels Estats Units d'Amèrica.

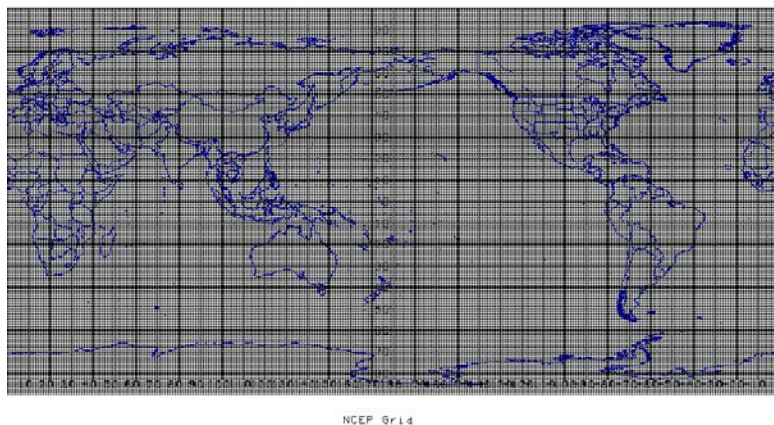


Figura 6.1: Malla de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ de cobertura del model matemàtic GFS.

Font: www.nco.ncep.noaa.gov

Amb l'objectiu de fer els càlculs de la predicció del $WeMO_i$, s'utilitza un servidor que connecta amb servidors de dades de la NOAA, executa els diver-

sos codis de guió, pinta gràficament els resultats i actualitza automàticament la predicció al web del Grup de Climatologia de la Universitat de Barcelona (<http://www.ub.edu/gc/wemoi-forecast/>)(veure figura 6.2).

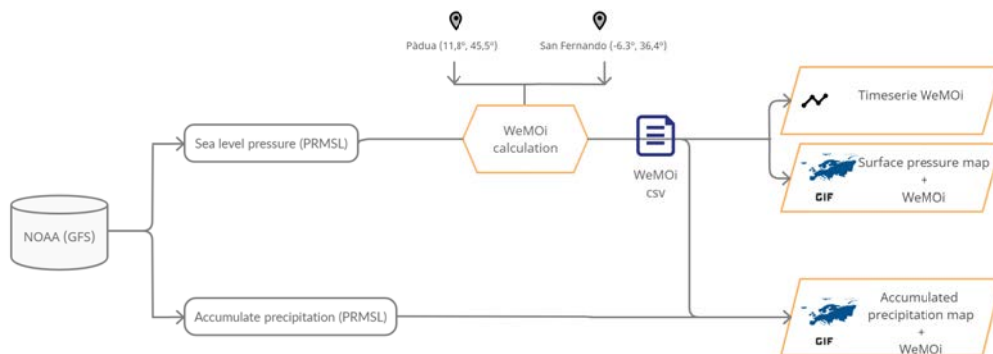


Figura 6.2: Diagrama de flux explicatiu del funcionament del servidor.

És a dir, l'*script wemo.sh* i, en llenguatge de programació *bash*, s'executa de manera automàtica cada 12 hores mitjançant l'eina *crontab*, la qual descarrega les prediccions del model global GFS de sortida de la NOAA (i) per a la variable pressió atmosfèrica a nivell del mar (PRMSL) i (ii) per a la precipitació acumulada (APCP); ambdues, per a les sortides a les 00 h i 12 h, i fins a 144 hores de predicció a l'àrea de la Mediterrània. Aquestes dades es descarreguen en format *GRIB*¹¹ i, per tal de manipular-les, s'utilitza el programa *wgrib2*.

El primer pas per calcular l'índex és extreure les dades de pressió en superfície de les coordenades establertes de Pàdua (11.8°N, 45.5°N) i San Fernando (6.3°O, 36.4°N), definides prèviament. També es configura l'àrea d'estudi (30, 60, -20, 25). Un cop obtingudes les dades de pressió, aquestes dades s'estandarditzen i es calcula el $WeMO_i$ aplicant la correcció amb constants, extretes a partir dels càlculs de l'estudi climàtic instrumental (1821-actualitat), tal com s'explica a continuació.

El pronòstic horari de les dades de pressió, en hPa, i el valor de l'índex per

¹¹GRIB és un format WMO per a les dades de la xarxa. Els centres meteorològics operatius utilitzen GRIB per emmagatzemar i intercanviar camps de quadrícula. Els avantatges principals de GRIB són que els fitxers solen ser de 1/2 a 1/3 de la mida dels fitxers binaris normals (flotants), els camps s'autodescriuen i és un estàndard internacional obert. Font: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/reading_grib.html.

a totes les 144 hores es desen en un fitxer del tipus *csv*¹², juntament amb la data d'execució del model i la data de la predicció generada amb l'*script wemo.sh* (vegeu el codi 6.2). I amb l'execució d'aquest últim i, mitjançant l'*script* 6.2, es genera la figura 6.3, que mostra en un gràfic temporal els valors de pressió (en hPa) dels dos punts d'estudi; en color groc s'hi representa la pressió en superfície per a Pàdua, mentre que en color blau s'hi representa la pressió en superfície per a San Fernando, i el valor del $WeMO_i$, que s'hi representa en color rosa viu.

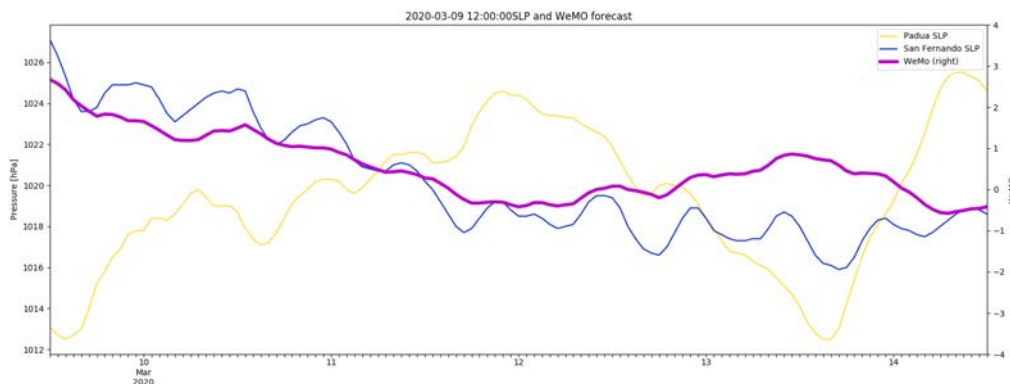


Figura 6.3: Gràfic evolutiu de la pressió atmosfèrica a San Fernando (color blau) i a Pàdua (color groc), amb el valor del $WeMO_i$ (color rosa viu).

Pel que fa als mapes resultants de la WeMOTool, per una banda, es configura el mapa de pressió per al domini definit amb projecció cònica conforme de Lambert (LCC) per a cada horitzó de pronòstic. En aquesta figura, s'hi mostra la sortida del model GFS de la variable de pressió en superfície i s'hi observen els centres d'acció (vegeu la figura 6.4a). I, pel que fa al segon mapa resultant de la WeMOTool, d'escala sinòptica més gran i peninsular, s'hi representen la precipitació acumulada i les isòbares (vegeu la figura 6.4b), també amb la projecció de Lambert (LCC). Per a ambdues imatges (vegeu la figura 6.3), s'hi inclouen els valors de les pressions atmosfèriques dels dos punts d'estudi, San Fernando i Pàdua, i el valor resultant del càlcul del $WeMO_i$, també per aquell horitzó de pronòstic. Finalment, s'ofereix un GIF animat amb tots els mapes de predicció fins a 144 hores, que es pot consultar a www.ub.edu/gc/wemol-forecast.

¹²Els arxius CSV (de l'anglès *comma-separated values*) són un tipus de document en format obert i senzill per representar dades en forma de taula, en què les columnes se separen per comes (o punt i coma, on la coma és el separador decimal

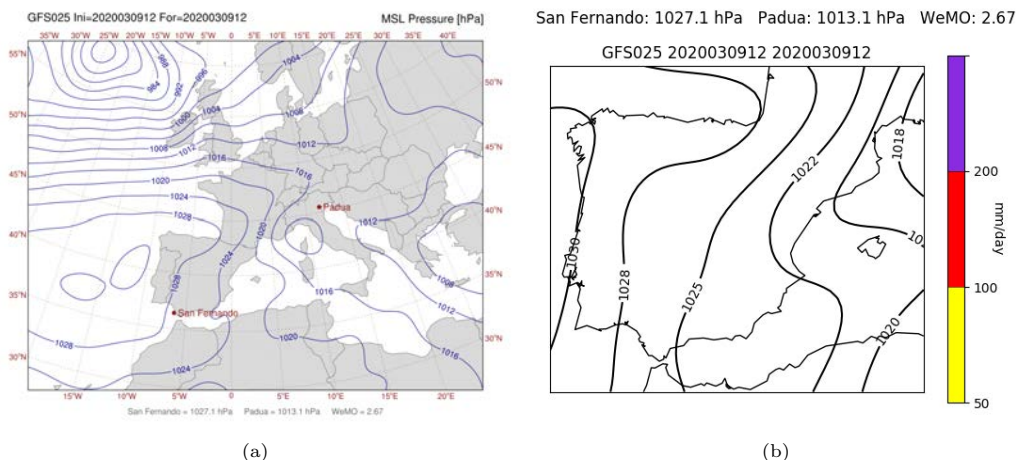


Figura 6.4: Mapes de pressió atmosfèrica (a) i de precipitació (b) resultants de l'eina WeMOTool per al dia 9 de març de 2020.

Ara bé, cal destacar que (i) aquests valors del $WeMO_i$ són corregits i estandaritzants d'acord amb l'estandarització clàssica, és a dir, seguint la metodologia de càlcul del $WeMO_i$ instrumental, amb la correcció en funció el període de 30 anys de 1961-1990 [López Bustins and Azorín Molina, 2004], constants que estan definides a l'*script wemo.sh* i a l'apartat 3.2; (ii) la precipitació que s'hi representa és pluja superior a 50 mm/dia de manera horària, és a dir, precipitació intensa i fins a un màxim de 200 mm/dia, corresponent a episodis extremament torrencials.

A continuació, s'exposen els codis amb els quals es generen les figures anteriors (6.3 i 6.4): els gràfics lineals es generen amb l'*script wemo.sh* (vegeu el codi 6.2). I amb l'execució d'aquest últim i mitjançant l'*script 6.2*, es genera la figura 6.4a, mentre que la figura 6.4b ho fa mitjançant l'*script 6.4b*.

6.2 Predicció del $WeMO_i$

Un cop definida i implementada l'eina predictiva del $WeMO_i$, la WeMOTool, amb els codis exposats d'execució i de definició temporal de l'índex amb el codi , de definició dels camps de pressió amb el codi i de definició de la precipitació torrencial amb el codi , juntament amb la metodologia explicada (vegeu la figura *workflow* 6.2), diàriament s'obtenen els valors de pressió i s'estandarditzen per tal de conèixer-ne l'índex esperat per a cada hora d'horitzó i l'abast espacial.

Tal com s'ha introduït en aquesta tesi, la WeMO té tres fases segons el valor del seu índex: positiva, neutra i negativa. Per això, a continuació, s'exposen (i) un cas d'estudi amb l'objectiu de validar aquesta eina i (ii) dos casos d'estudi, a mode d'exemple: un, per a fase positiva (vegeu la secció 6.2), és a dir, per a $WeMO_i > 0$, i l'altre, per a fase negativa (vegeu la secció 6.2), per a $WeMO_i < 0$. Com que els casos en què la WeMO es troba en fase negativa són els que comporten pluja torrencial, en el cas que s'exposa d'exemple es fa d'una manera més àmplia i concreta que no pas el cas en què la fase de la WeMO és positiva.

Validació: cas d'estudi

Amb la finalitat que la WeMOTool sigui un suport de predicció per a les pluges torrencials de l'est peninsular, s'ha fet una validació d'un temporal concret, corresponent als dies del 9 al 14 de l'octubre de 2016. En aquest episodi s'ha fet la validació (i) amb els valors del $WeMO_i$ dels dies d'episodi, originaris de la sortida del GFS de la WeMOTool amb el valor instrumental, i (ii) des del punt de vista pluviomètric s'ha comparat la sortida del nostre model amb la precipitació real que es va donar mitjançant la base de dades de precipitació diària provinent de la reanàlisi ERA5 [Hersbach et al., 2020].

El mes d'octubre de 2016 es va produir un episodi de precipitació acumulada abundant a l'inici de la segona dècada de dies del mes d'octubre (del 12 al 14): (i) dies dins la dècada de dies en què es registren més episodis torrencials amb el $WeMO_i$ més negativitzat [López Bustins et al., 2016], i (ii) dies que l'estudi de l'acotament dels dies més negatius amb finestres mòbils assenyala (vegeu 4.1), d'entre els dies del 8 al 14 d'octubre.

En primer lloc, la figura 6.5, resultant de la WeMOTool del dia 9 d'octubre de 2016 fins a 144 hores, mostra el pic de la negativització del $WeMO_i$ per a les properes hores:

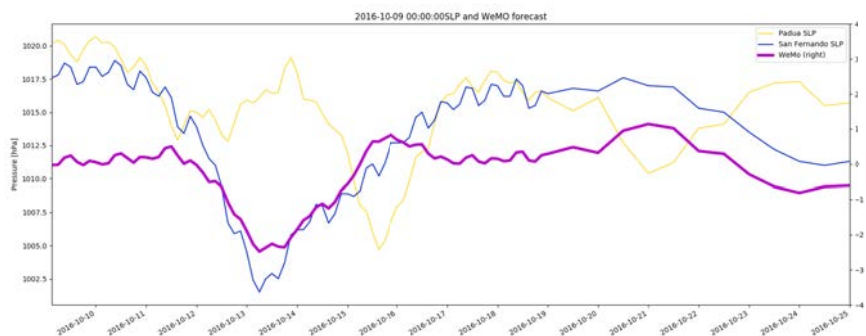


Figura 6.5: Gràfic evolutiu de la pressió atmosfèrica a San Fernando (color blau) i a Pàdua (color groc), amb el valor del $WeMO_i$ (color rosa viu) del dia 9 d'octubre de 2016 a les 00 h i fins a 144 h.

Així mateix, la figura 6.6 mostra el comportament del valor del $WeMO_i$ instrumental i del GFS per al mes d'octubre de 2016, tant el de sortida del model com el corregit. S'hi mostren els valors del $WeMO_i$ provinents de la WeMOTool per al mateix dia (D), per al dia següent ($D + 1$), per a dos dies després del dia D ($D + 2$) i per a tres dies més tard del dia D ($D + 3$). Això és així ja que (i) se segueix la metodologia aplicada d'abast temporal en la correlació per dies consecutius (vegeu l'apartat 5.2) i (ii) autors com [Das et al., 2010] indiquen que l'abast típic i vàlid per a les previsions de curt i mitjà abast corresponen fins a un màxim de 72 hores.

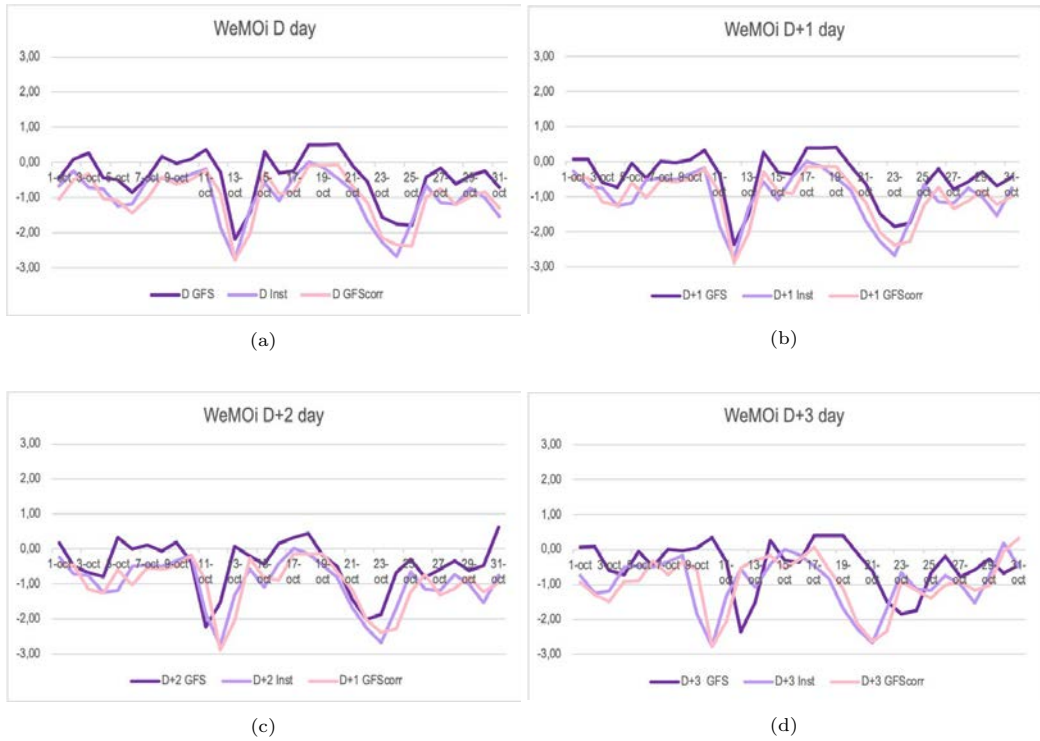


Figura 6.6: Evolució del $WeMO_i$ instrumental i del GFS per a l'octubre de 2016.

Per una altra banda, en la taula 6.1, també s'hi mostren el valor del $WeMO_i$ instrumental i el $WeMO_i$ de sortida de la WeMOTool per al mateix dia (D), per al dia següent ($D + 1$), per a dos dies després del dia D ($D + 2$) i per a tres dies més tard del dia D ($D + 3$). El valor del $WeMO_i$ del GFS Dia_n s'obté de forma horària, a partir del qual s'ha calculat la mitjana diària.

Data	GFS Dia_D $WeMO_i$	Ins Dia_D $WeMO_i$	GFS Dia_{D+1} $WeMO_i$	Ins Dia_{D+1} $WeMO_i$	GFS Dia_{D+2} $WeMO_i$	Ins Dia_{D+3} $WeMO_i$	GFS Dia_{D+3} $WeMO_i$	Inst Dia_{D+2} $WeMO_i$
09/10/2016	-0.62	-0.50	-0.57	-0.50	-0.41	-0.50	-0.32	-0.50
10/10/2016	-0.49	-0.34	-0.49	-0.34	-0.60	-0.34	-0.72	-0.34
11/10/2016	-0.23	-0.18	-0.20	-0.20	-0.18	-2.18	-0.34	-0.18
12/10/2016	-1.88	-1.85	-1.89	-1.85	-1.70	-1.85	-1.29	-1.85
13/10/2016	-2.50	-2.77	-2.43	-2.77	-2.51	-2.77	-2.32	-2.77
14/10/2016	-2.02	-1.32	-1.75	-1.32	-1.66	-1.32	-1.55	-1.32

Taula 6.1: Valors del $WeMO_i$ instrumental, del GFS i del GFS corregit dels dies del 9 al 14 d'octubre de 2016.

A partir de la figura 6.6 i la taula 6.1, si es compara el valor de l'índex esperat segons la WeMOTool amb el valor del $WeMO_i$ instrumental per als dies del 9 a 14 d'octubre de 2016, s'observa com el valor del $WeMO_i$ del model GFS s'ajusta correctament al valor instrumental, sobretot per als dia en qüestió (D) i per al dia següent ($D + 1$), tot i que la tendència a la negativització s'hi observa ja des de 72 h abans de l'inici de l'episodi. També es mostra el valor del GFS corregit, és a dir, del valor esperat, però establint una correcció amb la diferència existent entre el valor del GFS i el valor instrumental. Si es compara, per tant, el valor instrumental amb el GFS corregit, el comportament és coincident, en extrems i en temps, amb el valor del $WeMO_i$ instrumental també per al dia en qüestió ($DiaD$), per al dia següent ($D + 1$) i per a dos dies després del $DiaD$, tal com es pot també observar a la taula.

A continuació s'exposen les sortides del model GFS de la WeMOTool per a la pressió en superfície i la precipitació acumulada esperada dels dies del 9 al 14 d'octubre. Es mostren aquests dies ja que corresponen a la previsió de 72 h prèvies a l'inici de l'episodi.

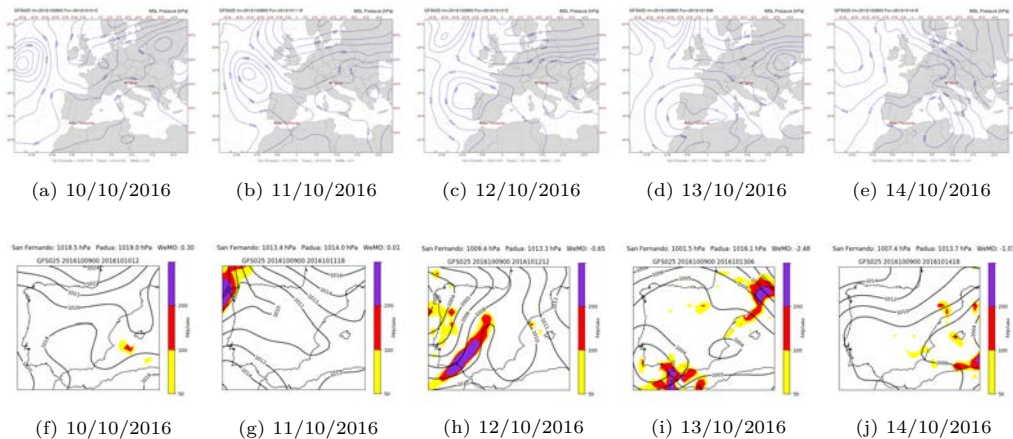


Figura 6.7: Sortides del GFS de PRSML i APCP del dia 9 per als dies 10 al 14 d’octubre de 2016 a les 12h.

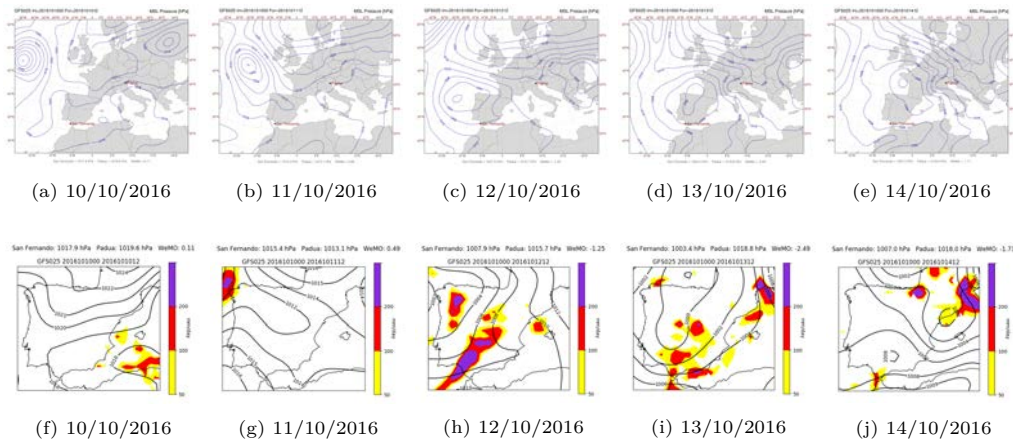


Figura 6.8: Sortides del GFS de PRSML i APCP del dia 10 per als dies 10 al 14 d’octubre de 2016 a les 12h.

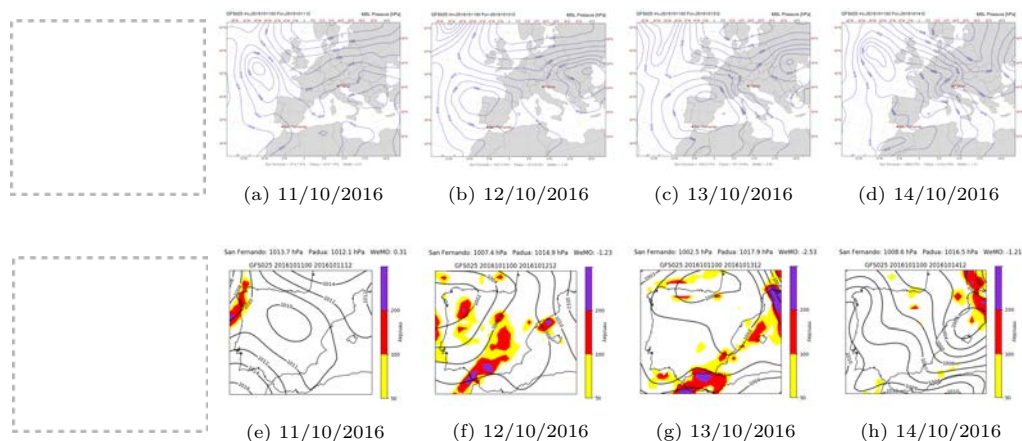


Figura 6.9: Sortides del GFS de PRSM i APCP del dia 11 per als dies de l'11 al 14 d'octubre de 2016, a les 12 h.

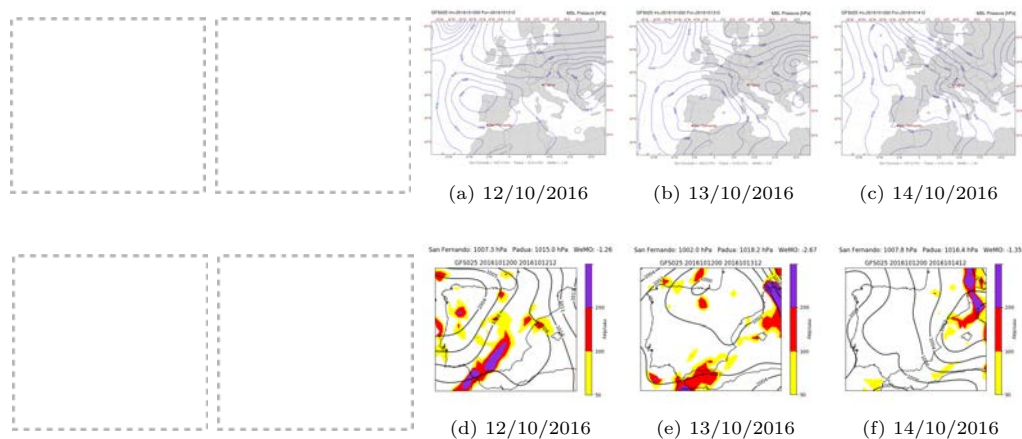


Figura 6.10: Sortides del GFS de PRSM i APCP del dia 12 per als dies del 12 al 14 d'octubre de 2016, a les 12 h.

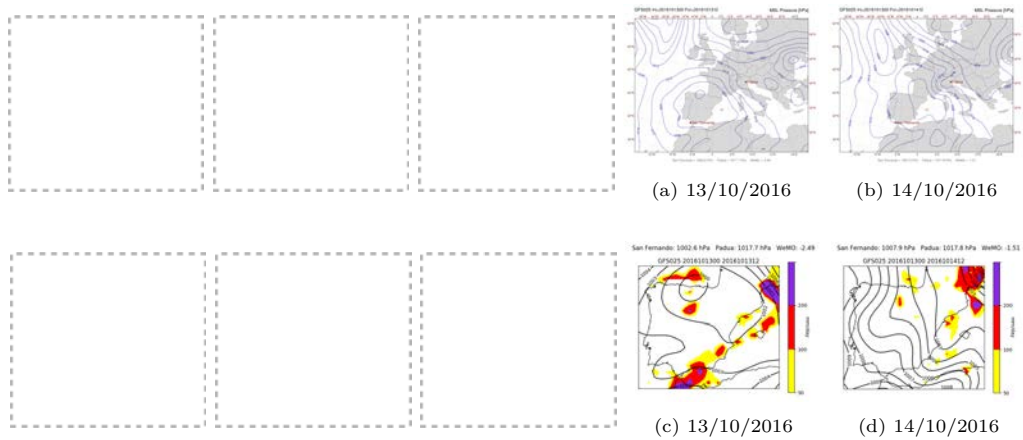


Figura 6.11: Sortides del GFS de PRSML i APCP del dia 13 per als dies del 13 al 14 d'octubre de 2016, a les 12 h.

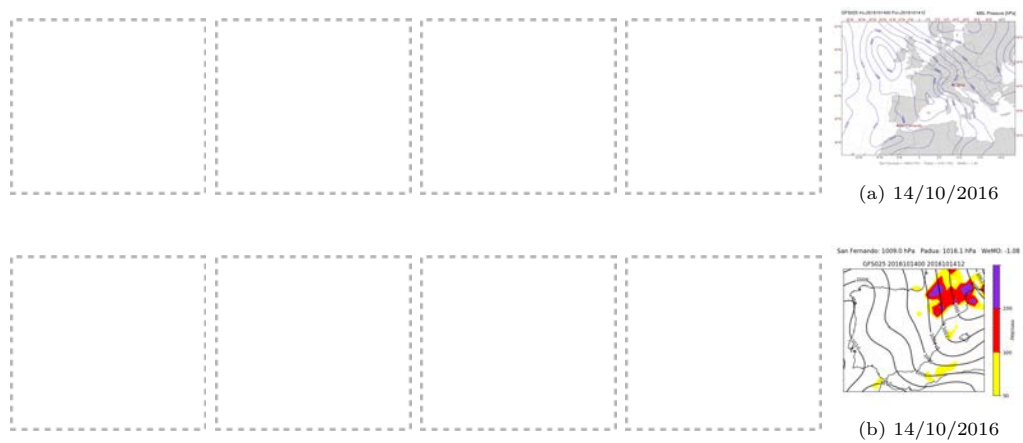


Figura 6.12: Sortides del GFS de PRSML i APCP del dia 14 per al dia 14 d'octubre de 2016, a les 12 h.

Si bé és cert que l'episodi generalitzat de pluges va ser entre els dies 12 i 14 d'octubre, les figures resultants de la WeMOTool de precipitació acumulada (i) defineixen amb força exactitud l'extensió geogràfica que va afectar l'episodi, a l'inici per l'oest peninsular i comprnent tota la península Ibèrica, i (ii) exposen que la predicció més ajustada i vàlida és fins a un màxim de 72 h. Per tant, les figures resultants del dia 9 i 10 d'octubre (vegeu les figures 6.21 i 6.8, respectivament) no són representatives del temporal global que mostren, però sí que s'hi observa una tendència similar. L'inici del temporal per l'oest de la península Ibèrica coincideix amb totes les sortides de tots els dies, en quantitat i en extensió geogràfica. Ara bé, a causa del moviment de la borrasca, la predicció a més llarg termini no és tan acurada. Tanmateix, els últims dies ja s'hi observa una baixa centrada molt profunda a la costa central catalana, sense indicar, però, grans quantitats de pluja. Per bé que es pot observar amb els mapes del dia 12 d'octubre, resultants de tots els dies, tots ells indiquen una quantitat de precipitació i de localització diversa.

A continuació, es presenta una anàlisi de l'entorn sinòptic i mesoescalar de l'episodi, i de la fenomenologia associada a través de l'exploració d'imatges de models numèrics de predicció i observacions convencionals. Entre els dies 12 i 14 d'octubre de 2016, quan la pertorbació atlàntica va creuar l'est peninsular i es convertí en una borrasca pròpiament mediterraneïtzada, va produir precipitacions generals, si bé van ser més extenses i generoses al litoral i prelitoral. Aquest temporal de precipitacions va ser provocat pel domini d'un solc en alçada i reforçat per l'entrada d'aire càlid i humit, procedent del mar Mediterrani a causa del flux de llevant i del sud-est que hi havia en els nivells més baixos troposfèrics [Àrea de Climatologia. Servei Meteorològic de Catalunya, 2016]. Durant aquest temporal es van produir diversos danys materials i una víctima mortal al Maresme.

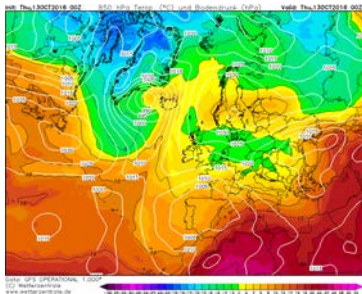


Figura 6.13: Mapa de reanàlisi del GFS de la situació sinòptica del dia 13 d'octubre de 2016. Font: www.wetterzentrale.com

Es presenten a continuació els mapes de precipitació dels dies del 9 al 14 d'octubre (i) de la reanàlisi de GFS ERA5¹³ (figura 6.14, i (ii) mapes d'acumulació de la precipitació provinents de la delegació de l'AEMET Catalunya (figura 6.15b).

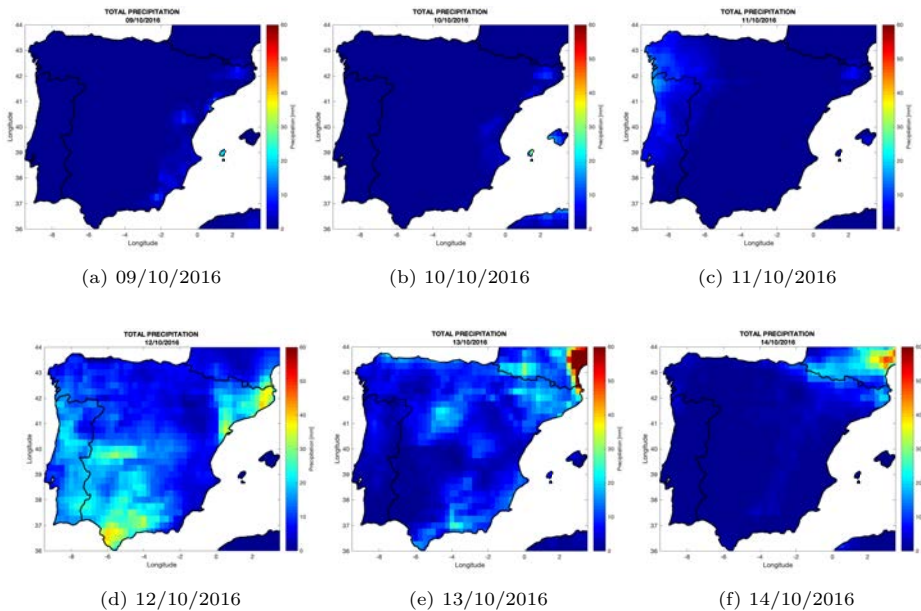


Figura 6.14: Precipitació diària acumulada dels dies 9 a 14 d'octubre de 2016.

¹³ERA5 és l'última generació de reanàlisi atmosfèrica del ECMWF, que ofereix una resolució espacial més alta que l'ERA-Interim i d'altres millores.

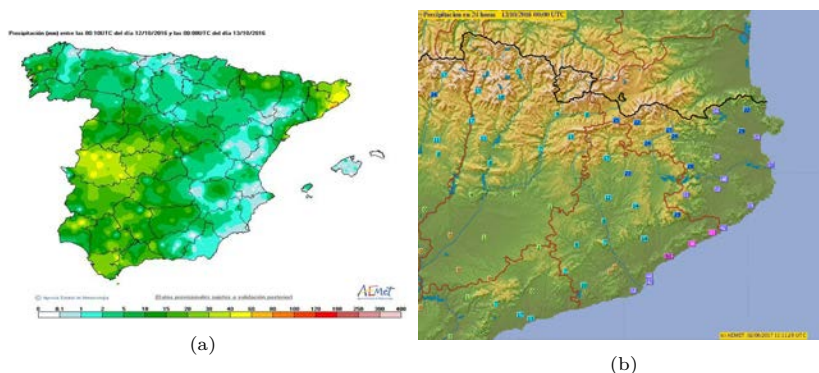


Figura 6.15: Precipitació diària acumulada el dia 13 d'octubre de 2016 a la península Ibèrica (a) i a Catalunya (b). Font: AEMET.

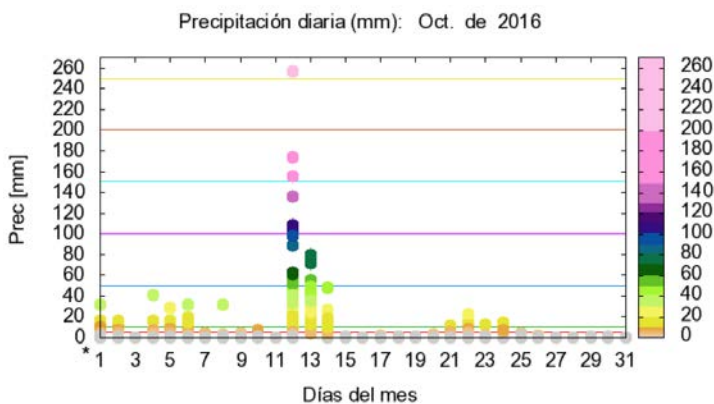


Figura 6.16: Precipitació per dies a la Península Ibèrica. Font: AEMET.

Tal com s'observa als mapes de precipitació per dies a la península Ibèrica, és entre els dies 12 i 14 d'octubre que els registres són més generalitzats i quantiosos, sobretot al sud i sud-oest peninsulars i al nord del litoral i prelitoral català, coincidint amb (i) el gràfic de precipitació diària de la península Ibèrica i (ii) els valors més negatius del $WeMO_i$ instrumental, com del GFS, tal com s'ha vist a

la taula anterior 6.1. A més, aquests registres van en concordança també amb la figura següent 6.16, de la caracterització de la precipitació del mes d'octubre.

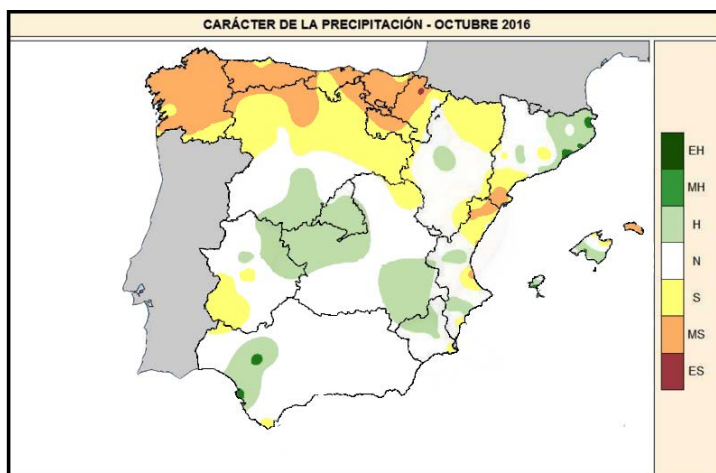


Figura 6.17: Caracterització de la precipitació per al mes d'octubre de 2016, respecte de la mitjana de 1971-2000. On *EH* = extremament humit: les precipitacions sobrepassen el valor màxim registrat en el període de referència 1971-2000; *MH* = molt humit: $f \leq 20\%$. Les precipitacions es troben en l'interval corresponent al 20% dels anys més humits; *H* = humit: $20\% \leq f \leq 40\%$; *N* = normal: $40\% \leq f \leq 60\%$. Les precipitacions registrades se situen al voltant de la mitjana; *S* = sec: $60\% \leq f \leq 80\%$; *MS* = molt sec: $f \geq 80\%$; *ES* = extremament sec: les precipitacions no arriben al valor mínim registrat en el període de referència 1971-2000. Font: AEMET.

Tal com es pot observar a la figura 6.17, el mes d'octubre del 2016 va ser pluviomètricament en la normal o inferior als valors normals per a aquest mes a gairebé tota la península Ibèrica [AEMET, 2010]. N'és excepció la zona nord-est de la façana mediterrània, que va ser entre *molt humida* i *extremament humida* a causa de l'episodi de pluges generalitzades i abundants d'entre els dies 12 i 14, en què des de la part central de la costa Barcelonina i fins l'Alt Empordà va ploure molt per sobre de la mitjana, amb precipitacions acumulades de fins a 290 mm en 24 h, tal com s'observa a la taula 6.2.

Estació	Comarca	Precipitació (mm) 8-15/10/2016
Vilassar de Mar (XOM)	Maresme	290.4
Cabrils	Maresme	256.7
Teià (XOM)	Maresme	200.3
El Masnou (XOM)	Maresme	191.7
Mataró (XOM)	Maresme	186.3
Monestir de Santa Maria de Solius (XOM)	Baix Empordà	142.5
Sant Andreu de Llavaneres (XOM)	Maresme	135.3
Albanyà (XOM)	Alt Empordà	134.4
Portbou	Alt Empordà	132.8
Torroella de Montgrí (XOM)	Baix Empordà	132.7
Fogars de la Selva	Selva	130.2
La Bisbal d'Empordà (XOM)	Baix Empordà	128.1
Castelló d'Empúries	Alt Empordà	128.0
Sant Pere Pescador	Alt Empordà	127.5
Girona	Gironès	126.9
Canet de Mar (XOM)	Maresme	126.5
Arenys de Mar (XOM)	Maresme	124.7
Salt (XOM)	Gironès	123.5
Pantà de Darnius	Alt Empordà	122.9
Badalona	Barcelonès	121.8

Taula 6.2: Precipitació acumulada durant l'episodi del 8 al 15 d'octubre de 2016. Font: Meteocat

S'ha presentat el temporal del 12 al 14 d'octubre del 2016 per validar l'eina WeMOTool, en què s'ha comparat el valor del $WeMO_i$ tant instrumental com de sortida del model GFS, i s'observa com l'eina és força acurada per a la predicció de l'índex per al mateix dia i fins a dos dies abans de l'episodi. Si bé és cert que els valors del $WeMO_i$ del GFS es mostren molt negativitzats, no arriben a assolir uns valors tan extrems com els valors del $WeMO_i$ de l'instrumental. La situació sinòptica que es va donar (vegeu la figura 6.13) ve afavorida per la localització d'una baixa a l'oest de la península Ibèrica i una alta a la península Itàlica i es defineix, doncs, la fase negativa del $WeMO_i$ (figura 9.1), que també mostren els mapes de camp de pressió de la WeMOTool el dia 9 per al dia 13 d'octubre. Tot i així, les figures de predicció dels camps de pressió i precipitació presentades s'ajusten, espacialment, a l'episodi torrencial i, en quantitats de precipitació, la

precipitació s'ajusta sobretot a l'inici d'aquest temporal. Els mapes de predicció de la WeMOTool marquen aquest inici de temporal per l'oest peninsular de manera clara per a tots els dies d'estudi, així com el moviment de la borrasca, força inestable dels dies següents, que va afectar sobretot el sud-oest i nord-est peninsulars el dia 12 d'octubre, i cal comparar que l'abast esperat va ser inferior al real (vegeu les figures 6.14 i 6.15).

Es vol remarcar que les figures de les sortides que s'han mostrat anteriorment de la WeMOTool dels dies del 9 al 13 d'octubre per als dies 12 a 14 d'octubre, corresponen a les 12 h de cada dia de predicció. Així mateix, a continuació s'exposen els mapes en què, ja des del dia 9, s'intuïa una forta i localitzada precipitació i una profunda baixa pressió entre el nord del Barcelonès i el Maresme. Es mostra la sortida més ajustada al que va succeir, indistintament del dia en què es preveu:

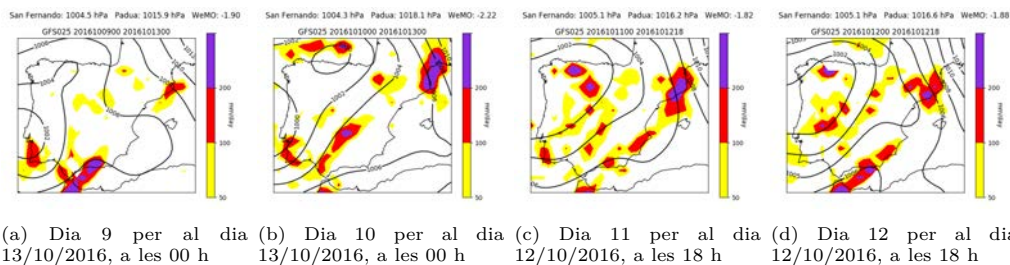


Figura 6.18: Sortides del GFS d'APCP dels dies del 9 al 12 d'octubre de 2016.

Les figures anteriors mostren com, amb més o menys precisió, temporalment i espacialment, la WeMOTool pot arribar a predir localment episodis altament convectius sobre la Mediterrània occidental i de manera horària, tal com va succeir al Maresme. La figura 6.18a del dia 9 i la figura 6.18b prediuen pluja forta al sud del litoral o prelitoral barceloní per al dia 13 a les 00 h, mentre que la figura del dia 11 (figura 6.18c) i la del dia 12 (figura 6.18d) predeïen per al dia 12 la pluja de caràcter extremament forta i local. Aquests episodis solen ocórrer a l'estiu i al començament de la tardor, estació en què es concentra la major ocurrència d'inundacions a l'arc mediterrani peninsular. Es tracta d'esdeveniments de curta durada i, per aquest motiu, s'observa de manera molt clara com els models de dies anteriors coincideixen amb la realitat. Aquests esdeveniments poden pro-

duir el desbordament sobtat de rius i de rierols o torrents costaners. De fet, el litoral català és una de les regions més afectades per episodis de pluges sobtades i, en particular, el Maresme, que és l'àrea de més impacte, així com una de les més poblades, amb importants assentaments i infraestructures, juntament amb un turisme intensiu, i conques reduïdes amb fort pendent; tot plegat fa que els impactes dels riscos naturals hi siguin molt elevats [Barnolas and Llasat, 2007, Jiménez et al., 2012].

Fase positiva de la WeMO ($WeMO_i \geq 1$)

Com bé s'ha definit anteriorment en aquesta tesi, la fase positiva de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental es configura a partir d'un anticicló situat al sud-oest de la península Ibèrica, juntament amb una baixa pressió al nord de la península Itàlica, a la mar Lígur o a l'Adriàtic (figura 9.1). Tal situació sinòptica afavoreix fluxos de component nord cap a l'interior de la conca de la Mediterrània occidental i també afavoreix les precipitacions al nord d'Itàlia i un temps estable a la façana mediterrània peninsular ibèrica.

A mode d'exemple, entre els dies 11 i 13 de desembre de 2019 els valors del $WeMO_i$ van ser força elevats i, per tant, va ser una fase extremament positiva. A la taula 6.3 es mostren els valors de $WeMO_i$ dels dies 8 (figura 6.20), 9 (figura 6.21), 10 (figura 6.22), 11 (figura 6.23), 12 (figura 6.24) i 13 (figura 6.25) de desembre de 2019 per als dies 11, 12 i 13 de desembre de 2019, que resulten de la WeMOTool, i el valor que es va donar aquells dies, extrets de l'anàlisi instrumental.

	$WeMO_i$ GFS 11/12	$WeMO_i$ Ins 11/12	$WeMO_i$ GFS 12/12	$WeMO_i$ Ins 12/12	$WeMO_i$ GFS 13/12	$WeMO_i$ Ins 13/12
8/12/19	1.53		3,39		2.40	
9/12/19	2.25		3.71		4.90	
10/12/19	2.18		3.61		4.68	
11/12/19	3.60	3.33	5.05	4,92	2.39	3,06
12/12/19	-		5.28		3.38	
13/12/19	-		-		3.11	

Taula 6.3: Valors del $WeMO_i$ instrumental i del GFS del 8 al 13 de gener de 2019.

A més, el gràfic lineal d'evolució del $WeMO_i$ resultant de la WeMOTool asenyala ja des del dia 8 de desembre a les 12 h i fins a 144 h una oscil·lació del valor i assoleix màxims superiors a 4 per al dia 9 i 13 de desembre de 2019.

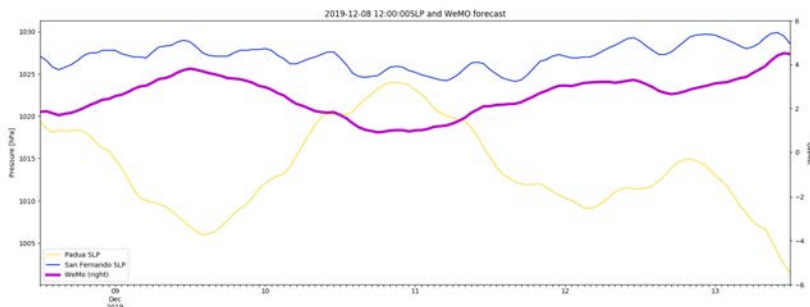


Figura 6.19: Gràfic evolutiu de la pressió atmosfèrica a San Fernando (color blau) i a Pàdua (color groc), amb el valor del $WeMO_i$ (color rosa viu).

També, als mapes resultants de la WeMOTool de camps de pressió atmosfèrica, s'hi observa de manera molt marcada la configuració sinòptica que defineix la fase positiva de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental: una alta pressió al golf de Cadis i una baixa pressió al nord de la mar Lígur. De la mateixa manera, a continuació, es mostren les figures resultants de pressió en superfície i de precipitació acumulada esperada de la WeMOTool dels dies del 8 a 13 per als dies de l'11 al 13 de desembre de 2019.

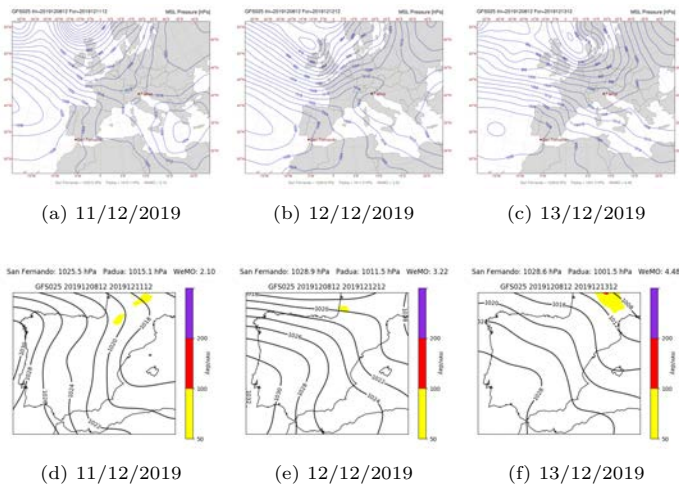


Figura 6.20: Sortides del GFS de PRSML i APCP del dia 8 per als dies de l’11 al 13 de desembre de 2019, a les 12 h.

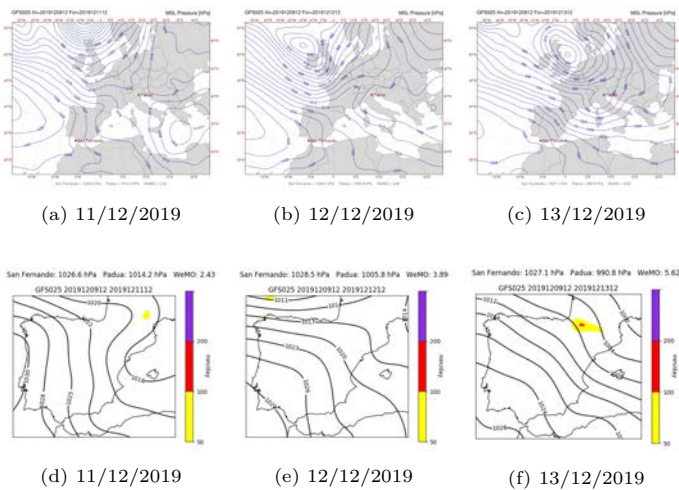


Figura 6.21: Sortides del GFS de PRSML i APCP del dia 9 per als dies de l’11 al 13 de desembre de 2019, a les 12 h.

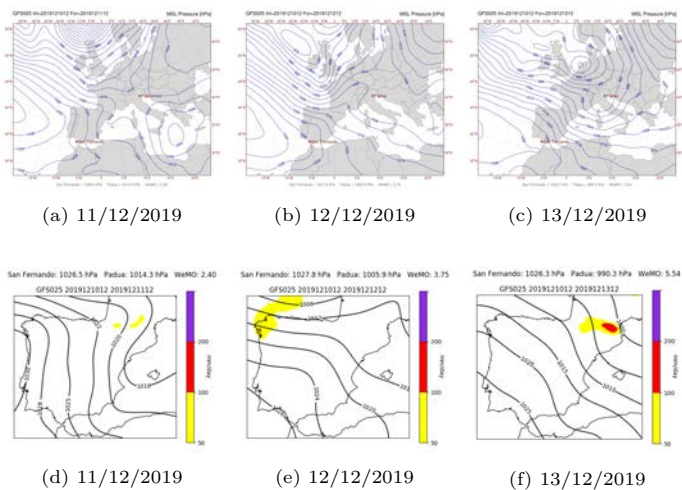


Figura 6.22: Sortides del GFS de PRSM i APCP del dia 10 per als dies de l'11 al 13 de desembre de 2019, a les 12 h.

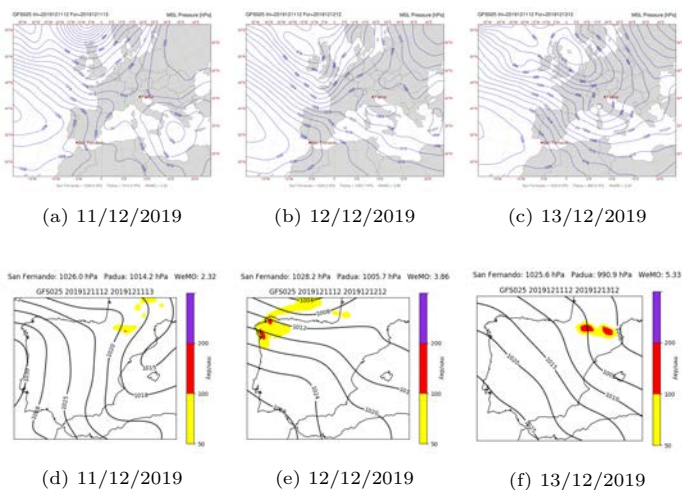


Figura 6.23: Sortides del GFS de PRSM i APCP del dia 11 per als dies de l'11 al 13 de desembre de 2019, a les 12 h.

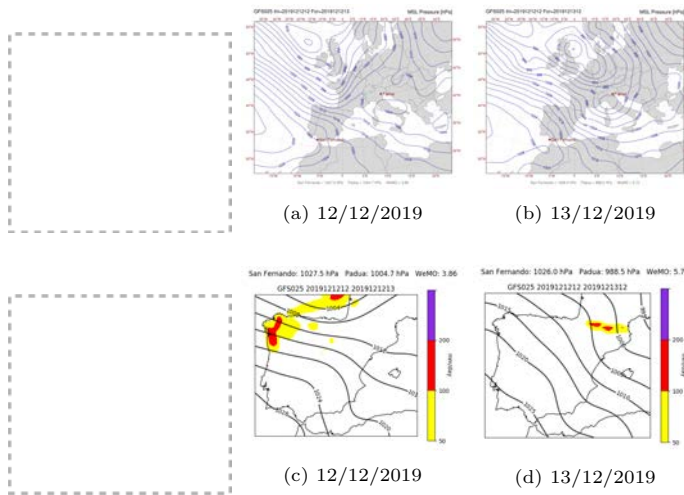


Figura 6.24: Sortides del GFS de PRSML i APCP del dia 12 per als dies de l'11 al 13 de desembre de 2019, a les 12 h.

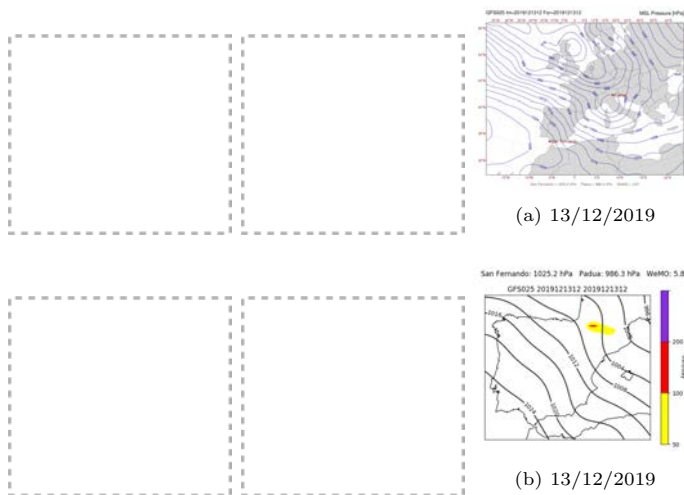


Figura 6.25: Sortides del GFS de PRSML i APCP del dia 13 per al dia 13 de desembre de 2019, a les 12 h.

Ara bé, a continuació, i per tal d'esbrinar la situació sinòptica que es va donar, així com l'abast de la precipitació real, es mostren les següents figures extretes d'anàlisi de *Wetterzentrale*: la figura 6.26a, per al camp de pressió, i la figura 6.26b, per a la precipitació:

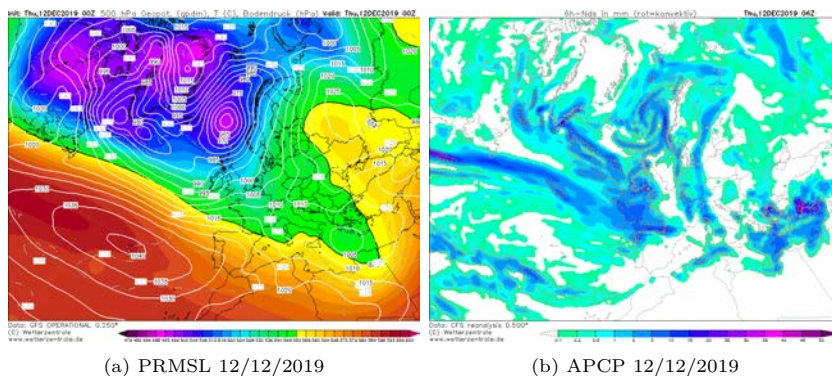


Figura 6.26: Mapa de reanàlisi del GFS de la situació sinòptica per al dia 12 de desembre de 2019: (a) centres d'acció i (b) precipitació. Font: *Wetterzentrale*.

El dia 12 de desembre de 2019 va ser el dia en què el $WeMO_i$ va assolir el valor més positiu, amb dades provinents d'instrumental, com amb els GFS, del WeMOTool. S'observa de manera molt clara la configuració baromètrica que defineix la fase positiva de la WeMO: l'anticicló situat al sud-oest de la península Ibèrica i una baixa pressió al nord de la península Itàlica, a la mar Lígur o a l'Adriàtic, que afavoreix els millors fluxos de component nord circulant sobre la conca occidental de la Mediterrània Occidental, amb un temps estable a la façana mediterrània peninsular ibèrica i precipitacions al nord d'Itàlia. El conjunt de figures resultants de la WeMOTool dibuixen aquestes configuracions isobàriques descrites coincidents amb la figura 6.26. S'observa també com les figures dels dies de predicció de la WeMOTool marquen aquesta configuració i la precipitació localitzada al nord i nord-oest peninsulars. I és que només amb el gràfic d'evolució temporal del valor previst de l'índex i tenint en compte el catàleg que s'ha creat anteriorment amb les diverses categoritzacions en funció del rang de $WeMO_i$ (vegeu la secció 5.1), ambdues figures espacials del camp de pressió i de precipitació resultants de la WeMOTool només es veuen reforçades. Ho validen, finalment, els mapes de reanàlisi sinòptica de *Wetterzentrale*.

Fase negativa de la WeMO ($WeMO_i \leq 1$)

Contràriament, la fase negativa correspon a una baixa al golf de Cadis o a l'àrea delimitada per Açores-Madeira i el sud-oest ibèric, juntament amb altes pressions a Europa central i el nord d'Itàlia. Tal situació comporta fluxos advectionals de component est a bona part de la conca occidental de la Mediterrània i, així, produeix temps plujós sobre la façana oriental del litoral peninsular ibèric, i temps estable al nord d'Itàlia, per la proximitat a l'anticicló centreeuropeu. Aquesta fase s'exemplifica, de manera més extensa, amb el cas d'estudi corresponent al temporal Glòria del 20 al 23 de gener de 2020.

El dia 17 de gener de 2020 un sistema de baixa pressió anomenat *Glòria*¹⁴, procedent de l'Atlàntic, va tocar terra a la part nord-oest de la península Ibèrica. Durant els dies posteriors, aquest sistema de baixa pressió va evolucionar cap al sud-est, fins a arribar al mar Mediterrani occidental el 19 de gener, intensificat i afectant greument les regions nord i est de la península ibèrica. No obstant això, el cicle de vida del Glòria va durar aproximadament 24 h, ja que va ser absorbit per un sistema de baixa pressió més gran que es va centrar al mar d'Alborán [Amores et al., 2020]. Per simplicitat, es parlarà del temporal Glòria com el període d'activitat més intens d'aquesta baixa que va oscil·lar entre el 20 i el 23 de gener de 2020.

Durant l'esdeveniment del temporal, la situació sinòptica era dominada per un sistema de baixa pressió profunda situat al sud de la península Ibèrica, que va generar forts vents de llevant que, associats amb aire fred en alçada, van afavorir la inestabilitat potencial sobre el continent i el mar Mediterrani occidental. Es tracta, a més, d'un temporal especial des que hi ha registres a l'àrea mediterrània, ja que a sobre d'Anglaterra es trobava posicionat un anticicló anòmal en intensitat (superior a 1050 hPa, valor més alt registrat pel servei meteorològic britànic des del 1957), com també en extensió. A nivells baixos, el sistema inicial de baixa pressió es va desplaçar i es va aprofundir, amb vents de llevant i aportant aire humit a la part oriental de la costa catalana. Aquest fet, juntament amb la destacada orografia associada a aquestes regions mediterrànies, actua com a mecanisme desencadenant de convecció, que, en aquest cas, va provocar fortes precipitacions i inundacions. A més, l'acoblament prolongat dels forts vents de

¹⁴L'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET), al costat de les seves homòlogues Météo France i Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), juntes bategen des l'1 de desembre de 2018 les borrasques profundes, que són aquells ciclons que transcorren per latituds mitjanes, entre els 30 i els 60 graus.

llevant juntament amb la superfície del mar va generar fortes ràfegues de vent a totes regions costaneres de tota la conca.

La negativització del $WeMO_i$ és clara i disminueix ja a partir del dia 19 de gener del 2020, mentre que assoleix els valors mínims per als dies 20, 21 i 22 del mateix mes, tal com mostra el gràfic 6.27, d'evolució temporal de la WeMOTool. Es mostra de manera més precisa a la figura 6.28, dia a dia, per al seu horitzó de pronòstic, i s'assoleixen valors horaris puntuals de $WeMO_i \geq -4$.

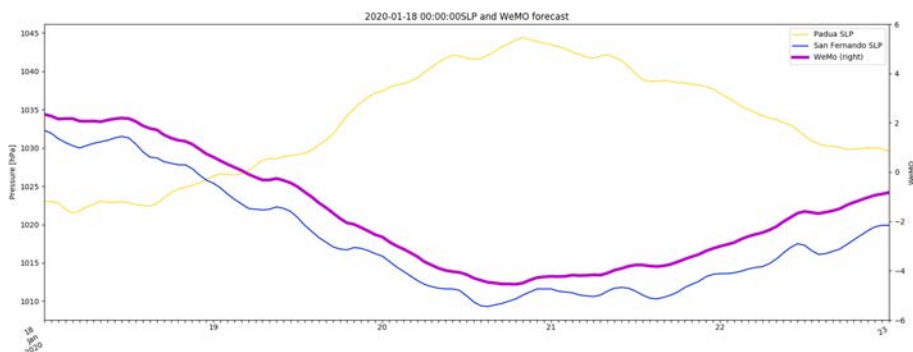


Figura 6.27: Gràfic d'evolució temporal del $WeMO_i$ del dia 18/01/2020 a les 00 h per a les següents 144 h

D'aquesta manera, si es compara els valors del $WeMO_i$ que es van donar per als dies centrals de l'episodi (del 20 al 23), es comprova que, diàriament, el valor esperat de la WeMOTool assoleix valors molt negatius, però no tant com ho fan els valors de l'índex d'instrumental:

Data	$WeMO_i$	$WeMO_i$
	Instrumental	GFS
20/01/2020	-3.93	-3.84
21/01/2020	-4.31	-3.78
22/01/2020	-3.03	-2.45
23/01/2020	-2.38	-1.75

Taula 6.4: Valors del $WeMO_i$ d'instrumental i de la WeMOTool per als dies del 20 al 23 de gener de 2020.

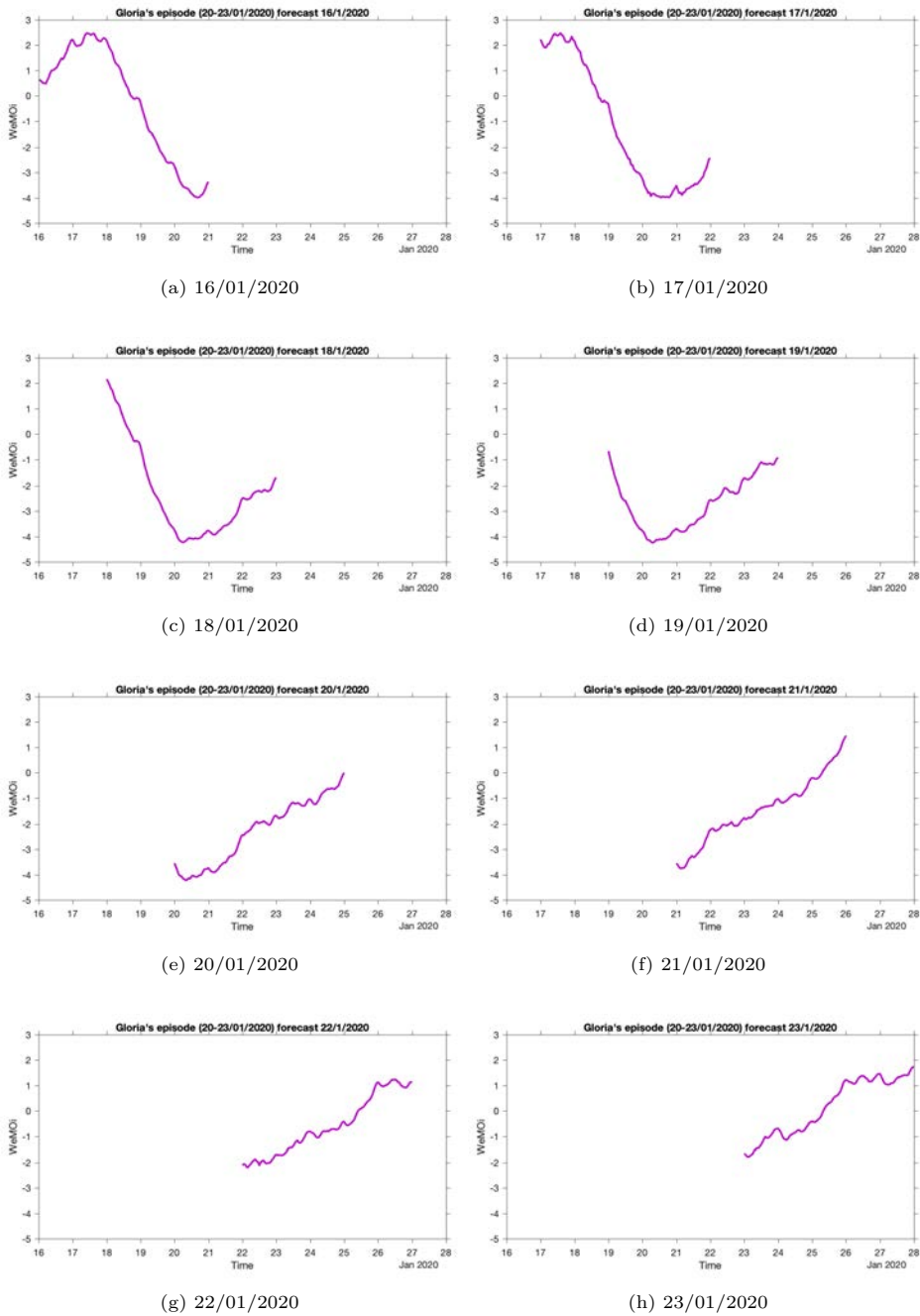


Figura 6.28: Evolució del valor del $WeMO_i$ esperat per al temporal Glòria.

A continuació, es mostren les figures resultants de la WeMOTool, de PRMSL i APCP del dia 18 al 23 per als dies del 20 al 23 de gener de 2020:

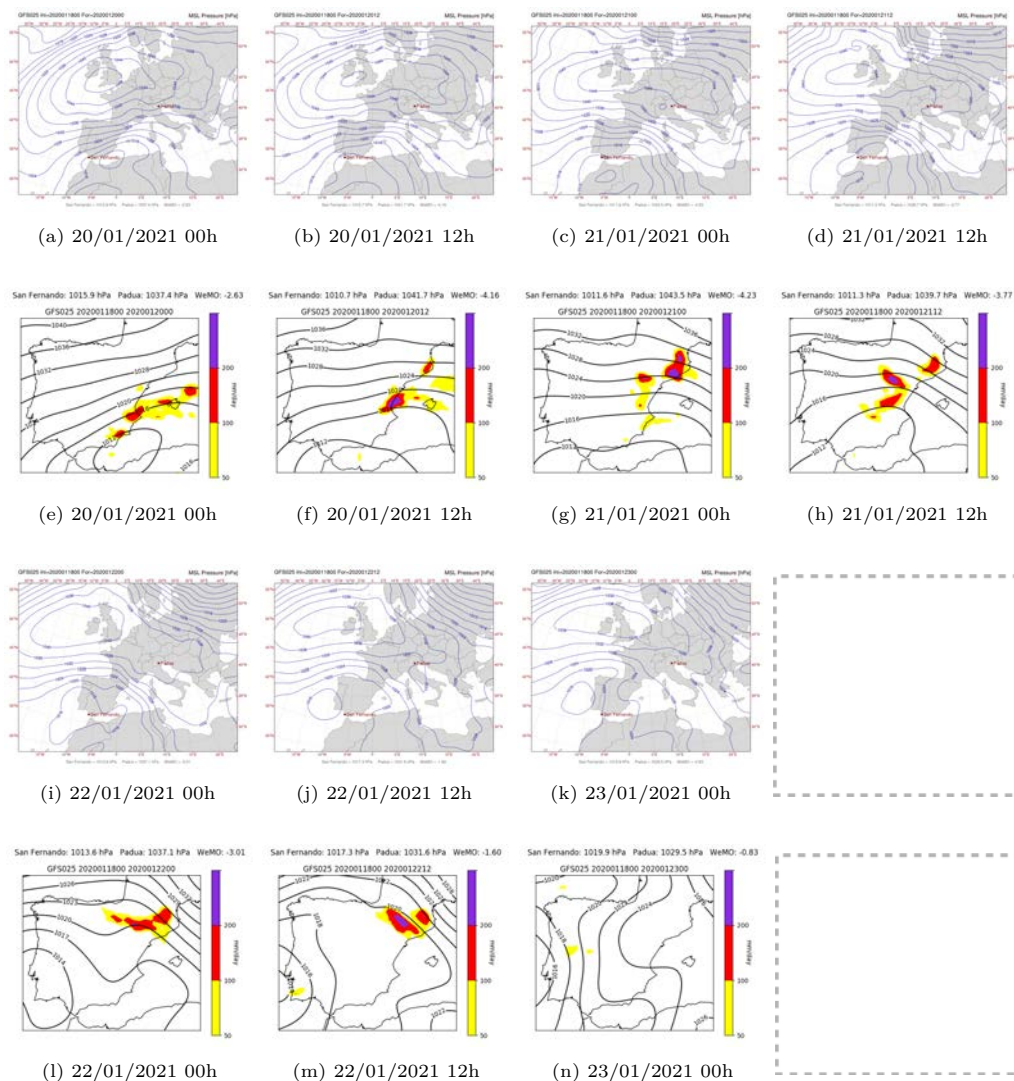


Figura 6.29: Mapes de pressió atmosfèrica i de precipitació resultants de l'eina WeMOTool del dia 18 per als dies del 20 al 23 de gener de 2021, a les 00 i a les 12 h.

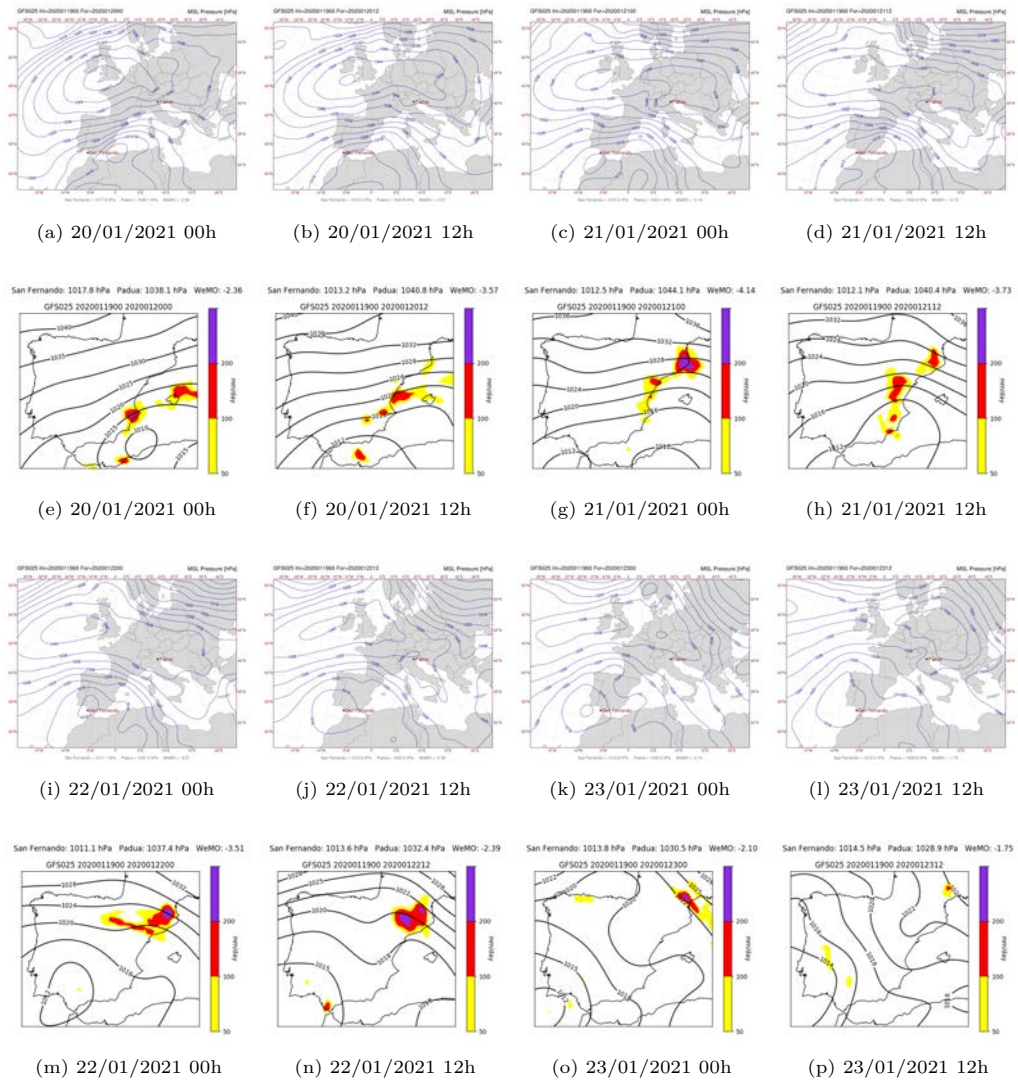


Figura 6.30: Mapes de pressió atmosfèrica i de precipitació resultants de l'eina WeMOTool del dia 19 per als dies del 20 al 23 de gener de 2021, a les 00 i les 12 h.

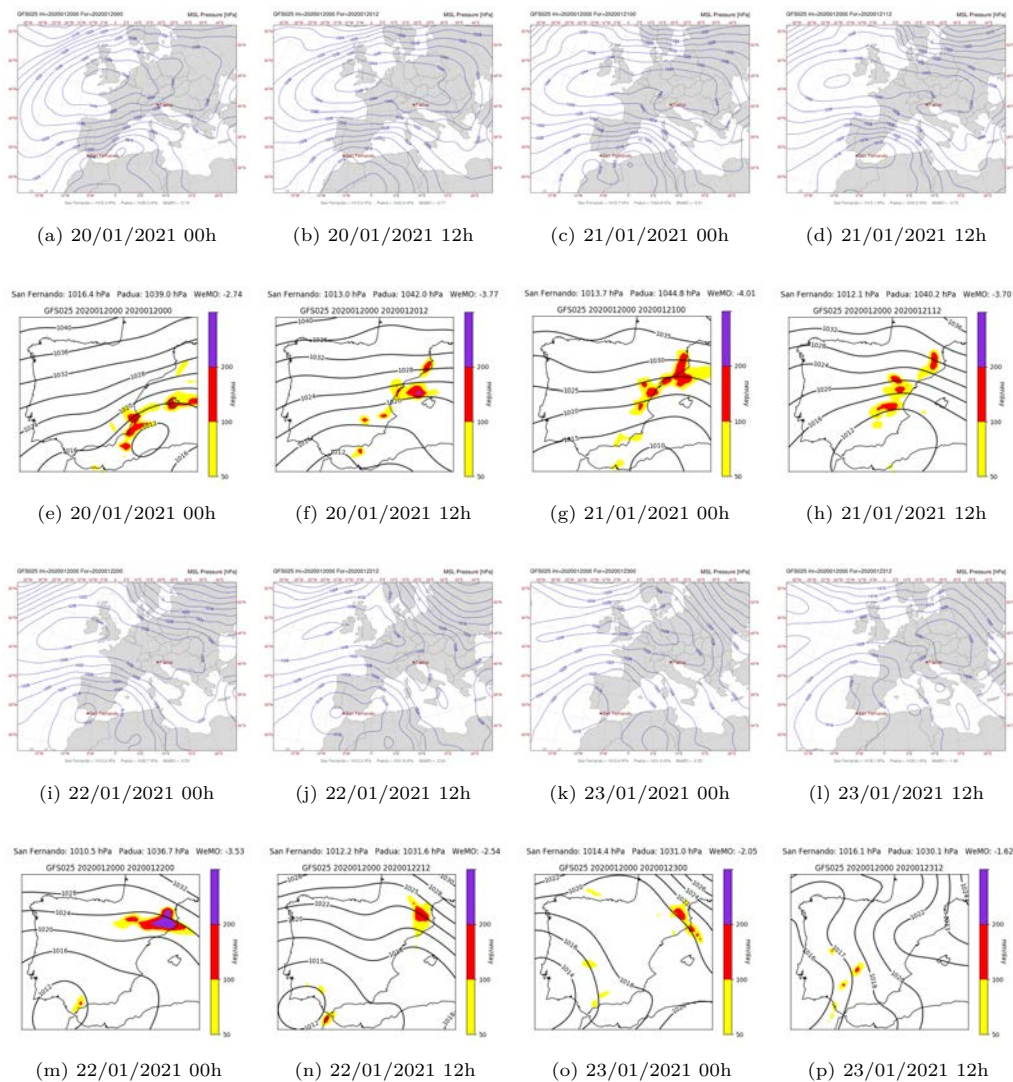


Figura 6.31: Mapes de pressió atmosfèrica i de precipitació resultants de l'eina WeMOTool del dia 20 pel dia 20 a 23 de gener de 2021 a les 00 i les 12h.

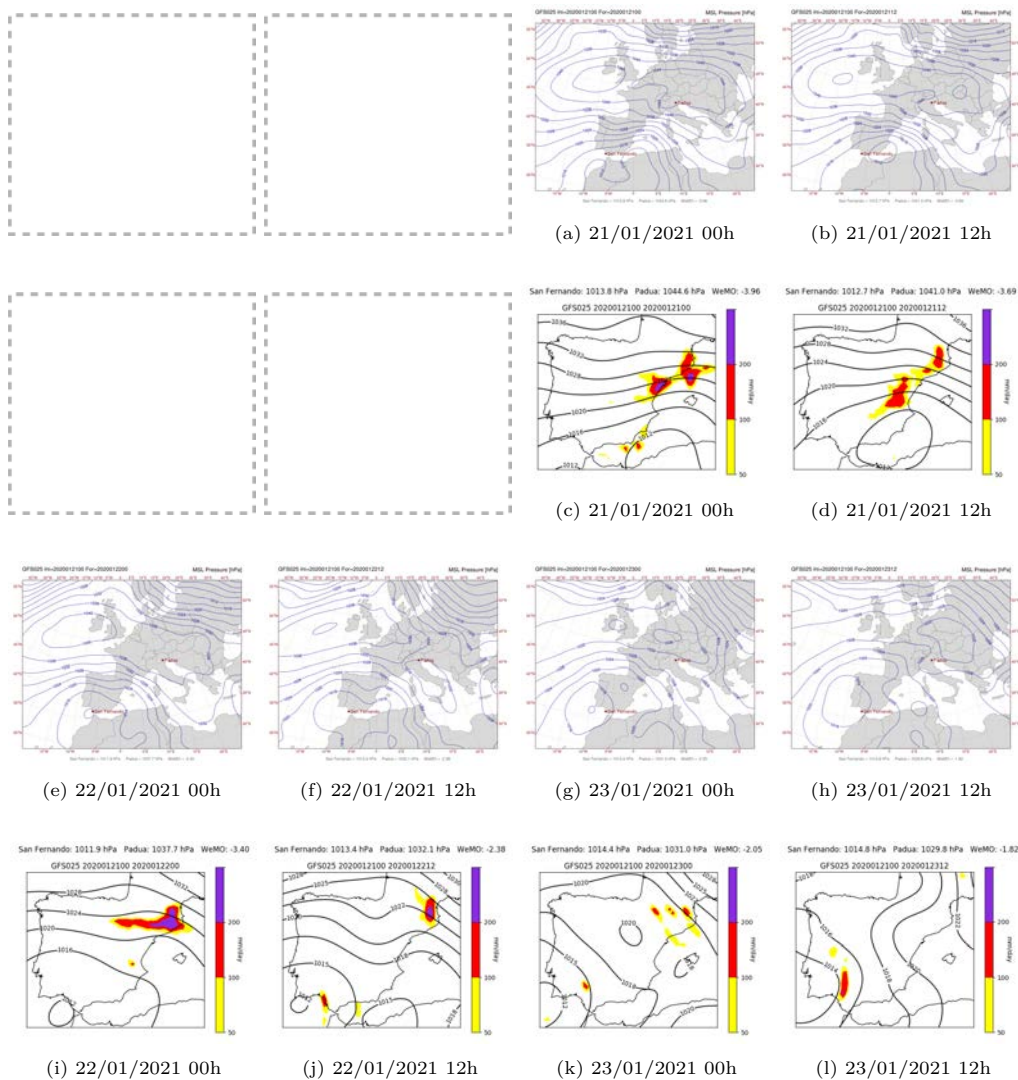


Figura 6.32: Mapes de pressió atmosfèrica i de precipitació resultants de l'eina WeMOTool del dia 21 pel dia 21 a 23 de gener de 2021 a les 00 i les 12h.

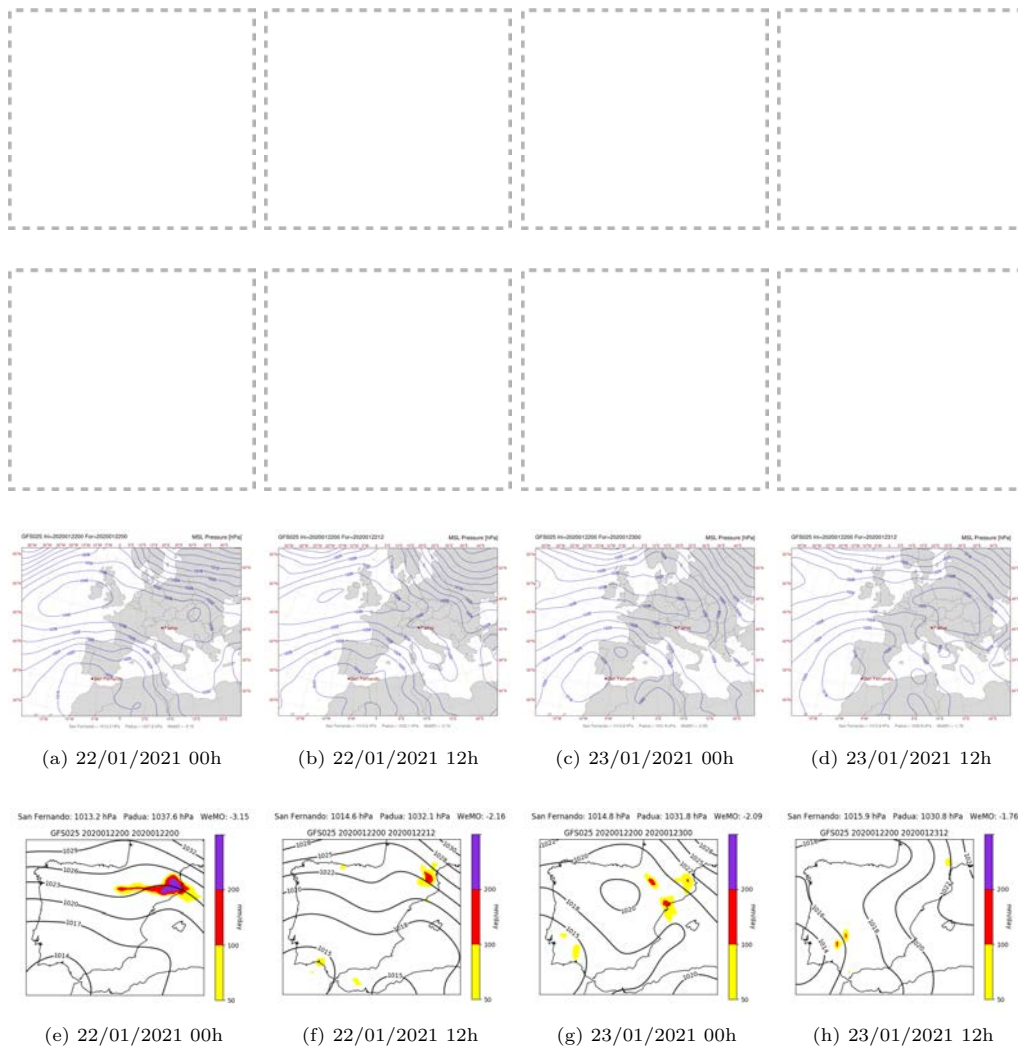


Figura 6.33: Mapes de pressió atmosfèrica i de precipitació resultants de l'eina WeMOTool del dia 22 pel dia 22 a 23 de gener de 2021 a les 00 i les 12h.

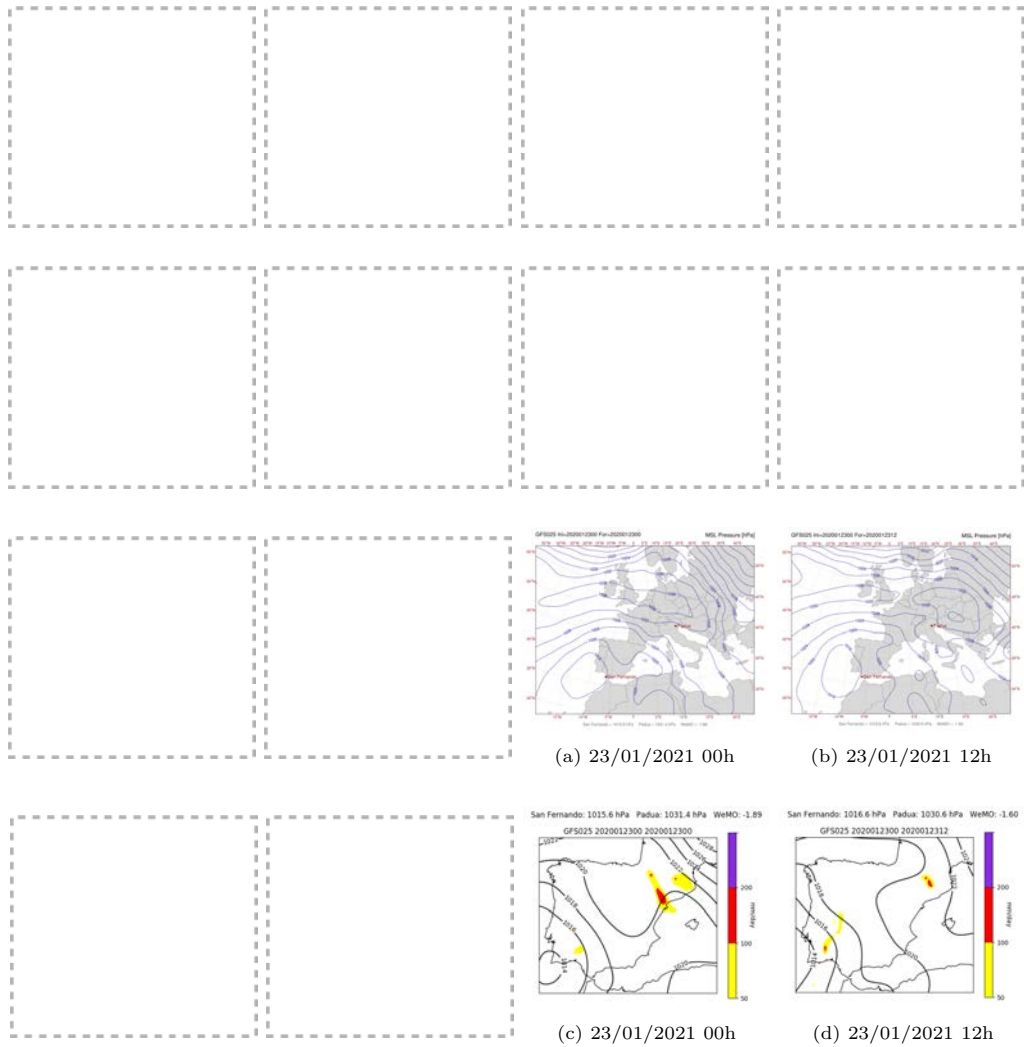


Figura 6.34: Mapes de pressió atmosfèrica i de precipitació resultants de l'eina WeMOTool del dia 23 pel dia 23 de gener de 2021 a les 00 i les 12h.

I la situació sinòptica d'aquells dies i la precipitació, extreta de reanàlisi de *wetterzentrale* va ser la següent:

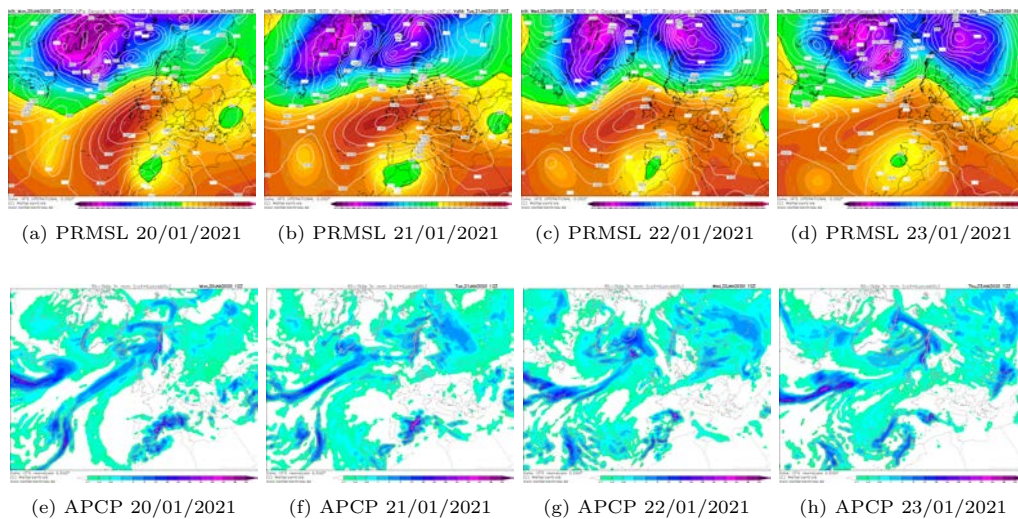


Figura 6.35: Reanàlisi de pressió atmosfèrica i de precipitació dels dies 20 a 23 de gener de 2021, a les 00 h. Font: *Wetterzentrale*.

Amb les figures resultants de la *WeMOTool* i les reanàlisis provinents de *Wetterzentrale* s'observa la forta entrada d'una advecció de l'est, que, lligada a una DANA en alçada, va acumular quantitats de precipitació molt generalitzades. Alguns dels registres al llarg de l'episodi van ser els següents:

Estació	Dia	Precipitació (mm)
Horta de Sant Joan (Tarragona)	21	227.4
Barx (València)	20	190.4
Sant Hilari (Girona)	22	183.2
Coín (Màlaga)	23	183.0
La Val de Vianya (Girona)	21	173.2
Tortosa (Tarragona)	21	161.6
Escorca, Lluc (I. Balears)	20	156.5
Alcoi (Alacant)	20	152.0
Sant Pau de Segúries (Girona)	22	147.6
Morella (Castelló)	21	145.4
La Pobla de Benifassà (Castelló)	21	144.2
Portocolom (I. Balear)	19	135.6
Barcelona - aeroport	21	122.8

Taula 6.5: Precipitació acumulada durant el període del temporal Glòria.
Font: Agència Estatal de Meteorologia Espanyola (AEMET).

Els mapes de la circulació atmosfèrica previstos ja des de dies anteriors mostren els vents de component est configurats per la depressió del golf de Cadis i l'anticicló centreeuropeu, els quals defineixen el dipol baromètric de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental en la seva fase negativa. La negativització del l'índex observat ja amb el gràfic d'evolució temporal 6.27 i 6.28 explicita l'arribada d'un temporal de caràcter fort, molt torrencial. Horàriament, la WeMOTool assoleix valors extremament negatius, mai vistos segons el registre instrumental des del 1821, però que, si s'observa el valor diari calculat (vegeu la taula 6.4), queda, igualment, per sobre del valor instrumental, en tots els quatre dies d'episodi. Aquí s'han adjuntat les sortides del model GFS de la WeMOTool des del dia 18 al 23 per als dies del 20 al 23 de gener del 2020 per a les 00 h i les 12 h, ja que es tracta d'un temporal extremament fort, en què és interessant com la dinàmica de la borrasca, en ambdues hores diàries, és estàtica i, així, és, doncs, una previsió força acurada i fina quant a quantitat de precipitació i a localització d'aquesta precipitació. Així ho confirmen les figures 6.35 de reanàlisi de la situació sinòptica i de la precipitació.

Tanmateix, els episodis torrencials, tals com el *Glòria*, es defineixen per una situació sinòptica que és típica de la tardor [Martín-Vide et al., 2008], en què les grans quantitats de precipitació venen afavorides per una superfície del mar que es troba encara relativament càlida, i és un reservori energètic important

de transmissió de calor latent [Pastor et al., 2019]. Però fora del calendari SON poden produir també episodis de precipitació forta i extremament forta. Solen ser menys greus, tot i que ocasionalment poden causar danys significatius si les pluges intenses associades es concentren en un lloc vulnerable ¹⁵ [Insua-Costa et al., 2021], tal com va passar en aquest cas exemplificat. Com més sensibilitat i exposició, més vulnerabilitat per a una mateixa capacitat adaptativa. Això explicaria, per exemple, els estralls o danys en indrets del delta de l'Ebre provocats pel temporal sobre, majoritàriament, equipaments i infraestructures públiques, si bé també en cases, camps de conreu i altres.

Per tant, en relació amb les hipòtesis específiques plantejades a l'inici d'aquest capítol:

- La WeMOTool prediu el valor del $WeMO_i$ per a les properes hores. **Hipòtesi confirmada.**
- L'eina WeMOTool esdevé una eina de suport predictiva de les pluges torrencials, en extensió i en intensitat. **Hipòtesi confirmada.**

¹⁵Segons l'IPCC, la vulnerabilitat d'un territori, d'un ecosistema o d'un sector socioeconòmic es manifesta com la sensibilitat d'aquest territori, ecosistema i/o sector vers un esdeveniment climàtic en funció del grau d'exposició. L'impacte final, però, no depèn només de la sensibilitat i del grau d'exposició, sinó també de la capacitat adaptativa, element decisiu per fer-los menys vulnerables

Capítol 7

DISCUSSIÓ

La possibilitat de disposar de registres instrumentals el més amplis i continus possibles, com els presentats i actualitzats en aquesta tesi, és un element clau per definir, caracteritzar i analitzar el clima, la variabilitat i el canvi climàtic actual, en què l'atmosfera es troba canviant a causa d'aquest escalfament global. Els canvis en la circulació de l'atmosfera i l'oceà són una part integral de la variabilitat i el canvi climàtic i, en conseqüència, les variacions regionals del clima poden ser complexes i, de vegades, contraintuïtives [Solomon et al., 2007]. Degut a això, els corrents atmosfèrics i marítims tal com els coneixem i els centres d'acció varien, de manera que es modifiquen, en conseqüència, els *actuals* climes i l'àrea del Mediterrani se'n veurà greument afectada [IPCC, 2014]. El canvi global, que no només és climàtic, és també, entre molts altres aspectes, demogràfic i, per bé que la major part de la població de la regió s'assenta a les zones costaneres, algunes de les principals ciutats de l'arc mediterrani estan fortament exposades a les pluges torrencials [Miró et al., 2018]. Per aquest motiu, és important la disponibilitat de sèries instrumentals llargues, en què les variables observacionals i objectives mostren dades històriques i pretenen mesurar el comportament del país en el passat recent [Prohom et al., 2012]. Aquest comportament proporciona informació suficient per entreveure el que esdevindrà en un futur. En aquest context, doncs, s'ha continuat amb la reconstrucció de l'índex de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental mitjançant les sèries instrumentals de pressió atmosfèrica reduïda a nivell del mar, per a l'estació de San Fernando, al sud oest de la península Ibèrica, i a l'estació de Pàdua, al nord de la península Itàlica. Aquesta última s'ha hagut de canviar per causa de la no continuïtat i cercar una de nova en aquesta tesi. S'ha escollit per la situació geogràfica i per la llarga disponibilitat i la potencial durabilitat (es tracta d'una estació situada en un aeroport militar), i posteriorment s'ha ajustat estadísticament amb les altres bases de dades (vegeu el capítol 4.1). Ara bé, la comprensió del clima del segle passat també depèn de l'elaboració de models acoblats oceà-terra-atmosfera i de sistemes d'assimilació que processen les dades [Haiden et al., 2021], de tal manera que amb els models de reanàlisi es milloren la comprensió i les dades d'inicialització de cada model numèric. Conseqüentment, en aquesta tesi, tal com es pot veure a l'apartat 3.1, s'ha volgut estudiar la variabilitat estacional del clima mitjançant l'anàlisi de quatre tipus diferents de models de reanàlisi per a la variable pressió a nivell del mar, en ambdós punts d'estudi, i s'ha reconstruït el $WeMO_i$. S'ha determinat que el mínim de l'índex construït a partir de l'ERA-Interim, igualment com el $WeMO_i$ instrumental, coincideix amb el màxim d'episodis de pluges torrencials, a la segona dècada de dies del mes d'octubre [López-Bustins, 2007]; més acuradament, entre els dies 8 i 14 del mes d'octubre.

A partir de les finestres d'estudi amb el model ERA-Interim s'ha trobat la

finestra òptima en què el patró de circulació atmosfèrica a gran escala és recurrent i persistent i el seu índex en descriu la variabilitat climàtica a l'est del de la península Ibèrica, àrea en què es dedueix que el principal factor d'aparició de pluges torrencials és la proximitat a la costa [Insua-Costa et al., 2021] i, per conseqüència, els seus impactes superficials són, sobretot, litorals. La distribució peninsular de les precipitacions per a cada fase és ben coneguda [Martín-Vide and Lopez-Bustins, 2006, López-Bustins, 2007] i la regionalització aplicada de les precipitacions amb el *package SynoptReg* [Lemus-Canovas et al., 2019] confirma les dues regions diferenciades d'influència $WeMO_i < 0$ i > 0 . Tot i així, el catàleg exposat a l'apartat 5.1 mostra, detalladament, que, quan es donen els valors més negatius de $WeMO_i$ (per tant, en fase negativa), la precipitació queda restringida a l'est, sud-est i sud-oest peninsulars, en què l'orientació sud o est de la costa sembla ser també un factor determinant, i suggereix que els fluxos de components de vent del sud o de l'est a nivells baixos sovint s'associen a situacions d'inestabilitat tèrmica o dinàmica forta [Millán et al., 2005], mentre que els valors més positius descriuen el comportament de la pluja al nord de la península Ibèrica, coincidint amb la fase positiva de la WeMO. La correlació descrita per fases de la WeMO i la precipitació diària per als mesos SONDGF, mesos en què aquesta té més incidència [Martín-Vide, 2004], mostren una correlació estadísticament significativa en tots els mesos i és que, tot i que els mesos més favorables per desenvolupar situacions de pluja torrencial són els mesos SON, en què es concentra el 40% dels casos registrats cada any, els episodis de major magnitud presenten una estacionalitat estricta; la gran majoria, més del 75%, es concentra en aquests tres mesos [Insua-Costa et al., 2021], com també s'ha vist en aquesta tesi. És interessant veure una alta incidència d'episodis torrencials fora de la temporada de tardor. De desembre a setembre es poden produir, però l'atmosfera no mostra un alt potencial per produir quantitats extraordinàries de pluja. Per tant, els episodis que es registren a l'hivern, a la primavera o a l'estiu solen ser menys importants o de menor rellevància, tot i que ocasionalment poden causar danys importants si les pluges intenses associades es concentren en un lloc vulnerable [Martín-Vide, 1987] i un augment de les precipitacions torrencials extremes (amb poca efectivitat i alt risc) en punts de la costa i prelitorals [Miró et al., 2018]. El desplaçament típic de les borrasques mediterrànies és des del sud-est cap al nord-est, i envien vents marítims de mar cap a terra [AEMET, 2010], i això va en concordança amb els resultats obtinguts de la correlació del $WeMO_i$ amb la precipitació dels tres dies consecutius, on aquesta és més alta al centre i est peninsular, desplaçant-se cap a la costa central catalana i Girona.

El fenomen que s'estudia, la WeMO, associada a les pluges torrencials a l'arc mediterrani peninsular en determinades èpoques és una àrea on hi conflueixen

diversos factors exposats en què un possible error a la predicció de la precipitació torrencial i, des del punt de vista d'extensió i d'intensitat, pot ser causant d'un dispendi de recursos ambientals, econòmics, socials i vitals [Moreno et al., 2005]. L'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental és un bon predictor de pluges abundants en aquesta zona [Lopez-Bustins and Lemus-Canovas, 2020]. Per causa de la necessitat sorgida en el transcurs d'aquesta tesi per donar suport en l'anàlisi i previsió d'esdeveniments torrencials en què la climatologia sempre explica el temps present s'ha creat l'eina WeMOTool. WeMOTool pot ajudar i complementar els pronòstics, cada cop són millors, malgrat que el ciutadà és cada dia més exigent, i demana més concreció en la predicció. Tal com s'ha demostrat amb l'estudi de l'Oscil·lació de l'Atlàntic Nord o amb El Niño i el registre del clima global dels últims 1.500 anys, les teleconnexions ajuden a avaluar els efectes del canvi climàtic actual i futur. Aquesta variabilitat no depèn merament de la variabilitat climàtica; tal com es conclou de manera comuna en una àmplia gamma d'estudis realitzats, ja a finals del segle passats, els quals van demostrar que els canvis climàtics observats no es poden explicar només per factors naturals [Santer et al., 1995, Hegerl et al., 2000, Hasselmann, 1997], sinó que es requereix una influència antròpica substancial per explicar millor els canvis observats. L'evidència d'aquest conjunt de treballs confirma el cas científic d'una influència humana discernible sobre el clima global.

Des de la informació climàtica i les prediccions, s'ha mostrat un alt potencial per a la seva aplicació en diferents sectors socioeconòmics, com l'agricultura [Ceglar et al., 2017], l'energia [García-Morales and Dubus, 2007, De Felice et al., 2015, Torralba Fernández, 2019], el transport [Palin et al., 2016] o la salut [Lowe et al., 2016]. No obstant això, la manca d'informació climàtica a mida i integrada fàcilment en diferents processos de presa de decisions ha impedit una major penetració d'aquesta font d'informació. Per solucionar aquest buit, cal desenvolupar metodologies robustes que es puguin emprar per generar productes adaptats a les necessitats específiques. En aquest marc, sectors sensibles al clima, com la gestió de l'aigua [Lavaysse et al., 2018], han mostrat interès per entendre la utilitat dels patrons de circulació atmosfèrica com una eina addicional a la informació climàtica actual disponible per guiar els processos de presa de decisions. Mètodes de projeccions climàtiques 2051-2100 detecten possibles canvis en la precipitació en algunes regions: s'esperen disminucions en pocs quilòmetres cap a l'interior, però amb un possible augment de la costa, on es van registrar les precipitacions més extremes [Monjo et al., 2016]. Episodis com el del temporal Glòria, exposat anteriorment, posen de rellevància tots aquests aspectes i, a més, que l'eina WeMOTool va predir de manera òptima: (i) amb la configuració ja dies anteriors de

la fase negativa de la $WeMO$ (ii), afavorint els vents de components del sud i de l'est [Martín-Vide et al., 2008], (iii) assolint valors extremament negatius, i (iv) definint l'àrea geogràfica en què la precipitació va ser torrencial. De fet, d'entre el període 1951-2000 s'han detectat només una trentena de dies en què el valor del $WeMO_i$ hagi esdevingut tan negatiu [Martín-Vide and Lopez-Bustins, 2006], de manera que es confirma l'excepcionalitat de l'episodi, ja que els valors extremament negatius, ≤ -2 només ocorren un 4% de dies de l'any [Lopez-Bustins and Lemus-Canovas, 2020].

El gran repte, a nivell global, però d'escala local, és millorar la predicció meteorològica immediata, és a dir, el sistema d'alerta primerenca. Casos com la borrasca Glòria (gener de 2020) o les inundacions del riu Francolí (octubre de 2019) en són un clar exemple. Molts són els autors que determinen potencials indicadors a utilitzar en l'anàlisi de la vulnerabilitat de les inundacions [Messner and Meyer, 2006] [Tascon-Gonzalez et al., 2020] [Llasat et al., 2010], i és que és, de ben segur, un repte per a la investigació sobre les inundacions trobar enfocaments nous i innovadors per superar el problema de deficiències dels mètodes actuals d'anàlisi de danys per inundació i vulnerabilitat i, per tant, enfortir l'enfocament general de la gestió del risc d'inundació, tenint en compte especialment els seus components socioeconòmics. Aquí, l'ordenació i la planificació territorial des de la perspectiva de la ciència geogràfica és, sens dubte, una altra eina disponible per reduir els riscos naturals. L'enfocament geogràfic del risc, en quant al perill natural, la vulnerabilitat social i l'exposició del territori, és el més adequat, perquè la tecnologia per sí sola no resol tots els problemes [Martín-Vide, 2020].

En un debat no exempt de controvèrsia [Lor, 2019], en què els estudis de cas esdevenen la base de la gran majoria d'anàlisis comparatives [Campbell, 1975], raó per la qual alguns autors creuen que l'estudi de cas pot equiparar-se, en realitat, a un veritable mètode comparatiu, mentre que altres autors ho refusen. Sense voluntat d'entrar en aquest debat, es pot considerar que la metodologia utilitzada en la present recerca es basa en l'estudi de casos i, alhora, en l'aplicació del mètode comparatiu. En clau d'anàlisi i de mètode, els sistemes d'informació geogràfica han esdevingut primordials i, de fet, són ja imprescindibles com a eines espacials per entendre el món i donar resposta als problemes territorials, ambientals o econòmics. I en aquest context aplicat s'entén aquesta tesi, perquè no es pot entendre l'existència de mapes predictius, guies model i anàlisis espacials sense una ordenació i gestió del territori, una legislació urbanística integradora dels riscos naturals i la rectificació de moltes zones urbanitzades actuals, perquè es puguin prendre mesures d'adaptació a temps per reduir l'impacte, salvar vides i minimitzar els costos de danys per inundació en zones més susceptibles [Thieken et al., 2016], com el cas vist del temporal Glòria al delta de l'Ebre.

Els fenòmens extrems de precipitació són característics del clima mediterrani i l'est peninsular, i en particular el seu litoral, continuarà essent un territori de risc de precipitacions torrencials i inundacions. D'altra banda, els models numèrics de predicció i de projeccions climàtiques, amb un nivell de confiança acceptable, sobre l'ocurrència futura de precipitacions torrencials són gairebé inexistent. Aquest tipus de precipitació, que esdevé forta i torrencial, deixa grans quantitats d'aigua en pocs dies i, fins i tot, pot assolir el valor mitjà total anual de precipitació. No hi ha dubte que amb el canvi global, en què ja estem immersos, aquests extrems augmentaran a un ritme tal que obliga a una planificació territorial i la seva gestió, més tenint en compte que cada cop són àrees més poblades i més exposades als riscos. La densitat de població de la costa mediterrània és alta, precisament on les precipitacions potencialment catastròfiques són més freqüents, i hi augmenta, doncs, significativament el risc d'inundació de les zones costaneres. Aquestes problemàtiques es poden minimitzar, si més no amb l'aparició de nous models numèrics, noves variables d'inicialització de models i noves eines de suport a la predicció, per fer que la seva conjunció pugui presidir qualsevol gestió i planificació del territori. Es vol remarcar que la WeMOTool treballa amb dades diàries i horàries, i que aquesta última climatologia inclou la predicció de la majoria dels episodis de durada molt curta ($\geq 50mm$ en 1 h) associats a una forta convecció. Aquests episodis, breus, ocasionalment poden abocar grans quantitats d'aigua a llocs molt vulnerable i poden causar inundacions molt devastadores. No obstant això, la majoria d'aquests episodis curts poden arribar a causar danys locals, però no solen estar associats a desastres importants. L'avinentesa entre les institucions amb competències oficials i públiques en meteorologia, com el Servei Meteorològic de Catalunya i la delegació regional de l'Agència Estatal de Meteorologia, hauria de ser total, i també, per descomptat, la universitat i la ciència que s'hi fa, que sovint queda al marge de la seva aplicació. La conjunció seria positiva per a la seguretat de la població, és a dir, en la reducció de la seva exposició i vulnerabilitat. Els avantatges en l'optimització de recursos tècnics i tecnològics (estacions meteorològiques automàtiques i radars), acadèmics (conèixer obertament els estudis que s'hi duen a terme per poder-los aplicar), de gestió (alertes comunes davant situacions meteorològiques de risc, afavorint l'intercanvi permanent de dades meteorològiques) i de personal/accessibilitat (la gestió compartida de tasques o de codis estàndard en obert) podrien reduir moltes de les conseqüències negatives de les precipitacions torrencials. El factor clau és que cal comprendre que en un futur, els impactes d'aquests temporals estaran més relacionats amb la gestió del territori i, en particular, del litoral que no pas amb un increment de la seva freqüència. El canvi climàtic i els seus impactes en els esdeveniments meteorològics que afecten directament les persones de tot del món ja són notoris: l'augment de

les temperatures mundials, l'augment del nivell del mar, el canvi en els patrons de precipitació i la seva intensitat, i les moltes altres condicions climàtiques locals i regionals d'arreu. El canvi climàtic regional, tal com reconeixia ja la Tercera Conferència Mundial del Clima (Ginebra, 2009), podria alterar els boscos, els rendiments de les collites i el subministrament d'aigua. També podria afectar la salut humana, els animals i molts tipus d'ecosistemes. L'expansió dels deserts cap a nous territoris i canvis profunds en els ecosistemes podrien ser irreversibles. En aquest context, s'incrementen els reptes plantejats als governs locals, regionals i estatals; als serveis meteorològics, i als grups de recerca, i no només enfocats al serveis climàtiques i àrees de tecnologia i innovació, sinó dirigits també cap als sectors socioeconòmics i a la ciutadania.

El canvi climàtic és el repte ambiental més rellevant a què ha de fer front la humanitat al segle XXI i cap país en pot restar-ne al marge.

L'*ODS 13* en què s'emmarca aquesta tesi, ens commina a aplicar mesures per combatre el canvi climàtic, centrades en la reducció d'emissions de gasos amb efecte d'hivernacle, d'acord amb el que estableix el Conveni marc de les Nacions Unides sobre el canvi climàtic.

Això comporta integrar les accions contra el canvi climàtic en totes les polítiques públiques (de l'economia a la salut, passant per tots els àmbits de govern), implementar mesures d'adaptació als efectes del canvi climàtic, desenvolupar plans de prevenció i d'actuació davant fenòmens extrems, i educar intensament la ciutadania perquè actui en conseqüència i aprengui a protegir-se de forma autònoma en situacions crítiques.

És important, més que mai, la geografia, la transversalitat àmplia de la qual fa que, integrant diverses variables, com és, per exemple, en un aiguat, les dades de cada estació, els models meteorològics, la coneixença del clima de la zona, els models hidrològics, amb una millor planificació territorial i una reeducació poblacional, faciliti la presa de decisions i es pugui disminuir el risc i l'emergència.

De manera que no només seran comprensibles els fenòmens sinó que a la vegada, s'obtindrà la síntesi necessària, per a emmarcar típicament aquests processos i també per ser abordats metodològicament des del camp de la Geografia en què que cada regió en concret precisa d'un estudi del seu entorn macro i microgeogràfic i més quan es presenta amb un vigor suficient. No només la descripció geogràfica és vàlida per si sola sinó que necessita de l'elaboració d'una cartografia que ajudi a comprendre els conflictes i les solucions i que facilitin la presa de decisions per a fer-los front amb elements consolidats en aquesta disciplina [Olcina, 2020]: el coneixement de les tècniques i dels mètodes de tractament estadístic de les dades que assegurin la internacionalització dels resultats d'anàlisi; l'elaboració de carto-

grafia climàtica precisa gràcies a l'ús de sistemes d'informació geogràfica; la visió àmplia dels processos i dels fenòmens estudiats que permet oferir propostes pràctiques d'actuació a la vista dels resultats obtinguts; la integració d'investigacions en plans d'actuació de les administracions en matèria climàtica (canvi climàtic) o de riscos naturals.

Capítol 8

CONCLUSIONS

Different methods have been employed throughout the present research to calculate the $WeMO_i$ and to study its potential for predicting daily rainfall. In general terms, these methods have been materialised in our study which employs instrumental, reanalysis and PCA databases; they classify the index according to ranges and time periods, and they establish the applicability thereof to meteorology through the design of the tool WeMOTool.

Research aimed at finding a new instrumental source in order to continue the reconstructed series of surface pressure in Padova identifies the automatic station Istrana - Sant'Angelo, belonging to the Italian Air Force, as the best option. Updating the 1821-2021 series has enabled the days to be established on which most torrential rainfall episodes were recorded, and when the $WeMO_i$ was at its most negative – specifically the 8th to the 14th of October. The thesis then proceeds to analyse the stations recording atmospheric pressure, as well as the $WeMO_i$ provided by the mathematical model ERA-Interim. Once four other reanalyses had been analysed, it was decided which one constituted the best fit. Thus, when this reanalysis had been selected, the PCA multivariate method was applied to establish the synoptic windows, within the general atmospheric circulation pattern, defining each phase of the Western Mediterranean Oscillation. Having analysed five study windows, all of them displaying the presence of this teleconnection, the window $30^\circ\text{ N} - 60^\circ\text{ N}$ y $15^\circ\text{ O} - 20^\circ\text{ E}$ was chosen. In relation to each phase of the WeMo, the likelihood of rainfall has been represented, as well as the rainfall average on the Iberian Peninsula, with the aim of observing the spatial distribution: the east coast of the Peninsula and the southwest present maximum values for both variables, with $WeMO_i < 0$, whereas on the other hand, as is to be expected, with $WeMO_i > 0$, the Mediterranean coast of the Iberian Peninsula falls outside the area of influence of rainfall due to being located in the north and northwest of the Peninsula. In line with the objective of establishing the area most likely to be affected by torrential rainfall, there is a vital need to create the regionalisation of $WeMO_i$ ranges. This guide is classified according to ranges of values of the $WeMO_i$ and rainfall; also indicating the spatial difference in the teleconnection phases of rainfall over the Iberian Peninsula. Furthermore, the results for the correlations between the $WeMO_i$ and rainfall for day D and consecutive days ($D + 1$, $D + 2$ i $D + 3$) are in accordance with the movement of a typical Mediterranean depression which starts in the south and ends in the northeast of the Peninsula. Rainfall can be localised and associated in area and intensity by consulting the regionalisation classified according to $WeMO_i$ ranges; it can be associated with the classification of consecutive days, thus establishing the likelihood of the average rainfall in an episode. At the later stages of our research, the WeMOTool was created. This tool accurately predicts the $WeMO_i$,

graphically indicating the area and accumulation of the rainfall to be expected in the coming hours.

With regard to the validation of the case study of October 2016, the data provided by the WeMOTool indicate that, with relative temporal and spatial accuracy, it predicts highly convective episodes at the local scale in the western Mediterranean, as occurred in the Maresme case study. The present study does not attempt to consider the GFS meteorological model; it does, however, address the output models and can therefore predict the torrential rainfall associated with the value of the $WeMO_i$.

Conclusions of the Chapter *Characterisation of the values of the $WeMO_i$*

- The instrumental series that presents the best fit with the series of the 1821-2013 $WeMO_i$, replacing that of Padua, is the one referring to Istrana - Sant'Angelo.
- The most favourable days for the development of situations of torrential rainfall events fall within the 8th-14 October period, when the value of the $WeMO_i$ becomes more negative in relation to the number of cases of rainfall.
- The variable atmospheric pressure provided by reanalysis causes a negative bias in the real instrumental value and consequently, the value of the $WeMO_i$ is not as negative during torrential rainfall events.
- The previous conclusion highlights the importance of instrumental climate databases.
- Synoptic classifications provide a better understanding of the dynamics of the atmosphere by means of standard patterns (*CWT*), which simplify atmospheric dynamics and define each phenomenon according to two *CWT*: the ones that give rise to torrential episodes.
- Analysis of the five synoptic windows of the study revealed that the teleconnection of the Western Mediterranean Oscillation can be observed in all of them, albeit more evidently in one of the synoptically larger windows: 30° N - 60° N y 15°O - 20°E.
- Two *CWT* spatially characterise the probability of rainfall, as well as the rainfall average on the Iberian Peninsula, for the two phases of the WeMO, with differentiated effects depending on geography. In its negative phase (*CWT4*), which is defined by high pressure between central Europe and the British Isles, and low pressures towards the west of the Iberian Peninsula,

the probability of rainfall and the rainfall average maintain their maxima in the Gulf of Valencia, along the whole Mediterranean coast, as well as in the southwestern sector of the Iberian Peninsula. These zones are the ones presenting a rainfall maximum during the negative phase of the $WeMO_i$, as can be seen in the case studies. On the contrary, during the positive phase ($CWT8$), defined by the Azores Anticyclone and the Iceland Low displaced northwards of Great Britain, rainfall on the Mediterranean coast of the Iberian Peninsula is practically non-existent.

Conclusions of the Chapter *Regionalisation by means of the values of the $WeMO_i$*

- The regionalisation according to ranges of the $WeMO_i$ constitutes an essential tool for identifying the likelihood of rainfall in each geographic location of the study area.
- Rainfall episodes with an extremely negative $WeMO_i$ are recorded on the Mediterranean coast of the Iberian Peninsula and in the southwest of the Peninsula, fitting well with the definition of the Western Mediterranean Oscillation.
- The correlation between the $WeMO_i$ and rainfall on day D matches well with the pluviometric effects to be expected from the pattern of the Western Mediterranean Oscillation. Thus, the regionalisation presented of the influence of the WeMO differentiates the Cantabria region and Galicia from the rest of the Peninsula.
- The correlation between the $WeMO_i$ and rainfall on day D for all the months of the study period is approximately 0, as the study was conducted over many days, from 1979 to 2013 and the definition of the Western Mediterranean Oscillation is therefore smoothened.
- The $WeMO_i$, in its negative phase and correlated with rainfall on day D is located in the southwest and southeast of the Peninsula, and is displaced eastwards on the Peninsula for rainfall on day $D + 1$, and towards the northeast in Catalonia for days $D + 1$, $D + 2$ i $D + 3$.
- The fact that the correlation between the $WeMO_i$ and rainfall on day $D + 3$ is low during all the months means that the storms do not last so many days and are, in general terms, not very persistent.

Conclusions of the Chapter *Application of the WeMO_i: Prediction of rainy days*

- The WeMOTool constitutes an instrument for predicting torrential rainfall events, both in area and in intensity.
- The climatic history of extreme phenomena accounts for the meteorological conditions of the following 72 hours. In accordance with climatology and climatic variability, the ideal synoptic configuration for the development of torrential rainfall related to the value of the $WeMO_i$, enables impending intense rainfall events to be predicted.
- As a predictive tool, the WeMOTool requires the inclusion of other variables in order to enhance its performance. It also requires the use of freely accessible regional and non-global models.

CONCLUSIONS

català

Globalment, es pot concloure que els diversos mètodes utilitzats al llarg de la present investigació per calcular el $WeMO_i$ i estudiar-ne el potencial predictiu en la precipitació diària s'han concretat en l'estudi i l'anàlisi amb base de dades instrumental, de reanàlisi, de PCAs, amb la catalogació de l'índex per rangs i per temps, i l'aplicabilitat a la meteorologia amb la creació de l'eina WeMOTool. La cerca i recerca d'una nova font instrumental per continuar la sèrie reconstruïda de pressió en superfície a Pàdua és l'estació automàtica Istrana-Sant'Angelo, de l'*Aeronautica Militare*. Amb l'actualització de la sèrie 1821-2021, s'han pogut establir els dies en què es donen més episodis de pluges torrencials i el $WeMO_i$ es troba més negatiu; concretament, del 8 al 14 d'octubre. A continuació, la tesi procedeix a analitzar les estacions de pressió atmosfèrica i el $WeMO_i$ provinents de l'ERA-Interim, un cop analitzades quatre altres reanàlisis i després de concloure que aquest és el que té millor ajust. Així, amb la reanàlisi escollida s'ha aplicat el mètode multivariant PCA per tal d'esbrinar quines finestres sinòptiques, dins de la circulació general de l'atmosfera, són les que defineixen cada fase de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental. D'entre l'anàlisi de cinc finestres d'estudi, en què totes denoten la presència d'aquesta teleconnexió, s'ha escollit la finestra $30^\circ\text{N} - 60^\circ\text{N}$ i $15^\circ\text{O} - 20^\circ\text{E}$.

De cada fase de la WeMO, s'hi ha representat la probabilitat de precipitació i la mitjana de precipitació a la península Ibèrica, per tal d'observar-ne la distribució espacial: la costa est peninsular i el sud-oest presenten uns valors màxims d'ambdues variables amb $WeMO_i < 0$, mentre que, contràriament i com és d'esperar, amb $WeMO_i > 0$, l'arc mediterrani queda fora de la influència de la precipitació, per ser-hi el nord i nord-oest peninsulars. Seguint amb la línia de poder concloure espacialment on hi ha la màxima probabilitat de l'afectació de les pluges torrencials, la creació del catàleg per rangs de $WeMO_i$ és imprescindible. És una guia categoritzada per rangs de valors de $WeMO_i$ i precipitació en què s'observa, també, la diferència espacial en les fases de la teleconnexió en les pluges a la península Ibèrica. D'altra banda, els resultats de les correlacions entre el $WeMO_i$ i la precipitació per al dia D i els consecutius ($D + 1$, $D + 2$ i $D + 3$) són concordants amb el moviment d'una borrasca típica del Mediterrani, en què l'inici serà al sud i culminarà al nord-est peninsular. És possible afinar i associar la precipitació en extensió i intensitat recurrent al catàleg categoritzat per rangs de $WeMO_i$ i associar-lo temporalment amb la catalogació de dies consecutius i, així doncs, aproximar la probabilitat de precipitació mitjana que es donarà en un episodi. Després d'aquesta anàlisi espacial, es va crear, més avançada la investigació, l'eina WeMOTool. Es tracta d'una eina que prediu de manera eficient el $WeMO_i$ i mostra gràficament l'extensió i l'acumulació de la pluja esperada les properes hores.

En relació amb la validació del cas d'estudi de l'octubre del 2016, les figures resultants de la WeMOTool mostren com, amb més o menys precisió, temporalment i espacial, es prediuen localment episodis altament convectius sobre la Mediterrània occidental, tal com va succeir al Maresme. En aquesta tesi no és procedent valorar el model meteorològic GFS, però sí els models de sortida i, per tant, la predicció de la pluja torrencial associada al valor del $WeMO_i$.

Conclusions del capítol *Caracterització dels valors del $WeMO_i$*

- La sèrie instrumental que millor s'ajusta a la sèrie del $WeMO_i$ 1821-2013, en substitució de la de Pàdua, és la d'Istrana-Sant'Angelo.
- Els dies més favorables per al desenvolupament de situacions de pluja torrencial són els dies del 8 al 14 del mes d'octubre, en què el valor del $WeMO_i$ queda més negativitzat en relació amb el nombre de casos de precipitació.
- La variable pressió atmosfèrica provinent de reanàlisi esbiaixa negativament el valor real instrumental i, en conseqüència, el valor del $WeMO_i$ no es negativitza tan en episodis de pluja torrencial.
- La conclusió anterior denota la importància de les bases de dades climàtiques instrumentals.
- Les classificacions sinòptiques ajuden a entendre la dinàmica de l'atmosfera, mitjançant patrons tipus (*CWT*), els quals aconsegueixen simplificar la dinàmica de l'atmosfera, defineixen cada fenomen, i focalitzen dos *CWT*, les que condueixen al fet que esdevingui un episodi torrencial.
- Amb l'anàlisi de cinc finestres sinòptiques d'estudi, s'ha pogut establir que la teleconnexió de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental s'aprecia en totes elles, però més clarament en una de les finestres més grans sinòpticament: 30° N – 60° N i 15° O – 20° E.
- Dos *CWT* caracteritzen espacialment la probabilitat de pluja i la mitjana de pluja a la península Ibèrica per a les dues fases de la *WeMO*, amb afectacions geogràfiques diferenciades. En la fase negativa (*CWT4*), que es configura amb una alta pressió entre l'Europa central i les illes britàniques, i baixes pressions cap a l'oest de la península Ibèrica, la probabilitat de pluja i la mitjana de precipitació mantenen un màxim al golf de València, tota la costa del litoral mediterrani, així com el sector sud-occidental de la península Ibèrica. Aquestes zones són les que registren un màxim de precipitació quan es dona $WeMO_i$ negatiu, tal com s'ha vist amb els casos d'estudi. Contràriament, en la fase positiva (*CWT8*), que està configurada per l'anticicló de les Açores i la baixa d'Islàndia desplaçada al nord de la Gran Bretanya, la precipitació a l'arc mediterrani és gairebé nul·la.

Conclusions del capítol *Catalogació dels valors del $WeMO_i$*

- El catàleg categoritzat per rangs del $WeMO_i$ és una eina essencial per identificar la probabilitat de precipitació a cada ubicació geogràfica a l'àrea d'estudi.
- Els episodis de precipitació amb $WeMO_i$ extremament negatiu es registren a l'arc mediterrani i al sud-oest peninsulars, cosa que encaixa amb la definició de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental.
- La correlació entre el $WeMO_i$ i la precipitació del dia *D* s'ajusta bé als efectes pluviomètrics esperables del patró de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental.

Així, la regionalització presentada de la influència de la WeMO distingeix la zona cantàbrica i de Galícia com a diferenciada de la resta peninsular.

- La correlació entre el $WeMO_i$ i la precipitació del dia D , per a tots els mesos d'estudi, és propera al 0, ja que l'estudi s'ha fet amb molts dies, d'entre el període 1979-2013, i, per tant, la definició de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental queda més suavitzada.
- El $WeMO_i$, en la seva fase negativa, correlacionat amb la precipitació del dia D , queda localitzat al sud-oest i sud-est peninsulars, i es desplaça cap a l'est peninsular per a la precipitació del dia $D + 1$, fins al nord-est, a Catalunya, per al dia $D + 2$.
- Que la correlació del $WeMO_i$ amb la precipitació del dia $D + 3$ sigui nul·la en tots els mesos significa que els temporals no duren tants dies: són, en general, poc persistents.

Conclusions del capítol *Aplicació del WeMO_i: Predicció de dies de pluja*

- La WeMOTool esdevé un suport predictiu de les pluges torrencials, en extensió i en intensitat.
- L'històric climàtic de fenòmens extrems explica les condicions meteorològiques de les properes 72 h. Seguint la climatologia i la variabilitat climàtica, la configuració sinòptica idònia per al desenvolupament de pluges torrencials relacionada amb el valor del $WeMO_i$ fa possible preveure pròxims esdeveniments de pluges intenses.
- La WeMOTool, com a eina predictiva, necessita la inclusió d'altres variables per millorar-la, i també models regionals i no globals, d'accés lliure.

CONCLUSIONES

castellà

Se han empleado diferentes métodos a lo largo de la presente investigación para calcular el $WeMO_i$ y para estudiar su potencial predictivo de las precipitaciones diarias. En términos generales, estos métodos se han materializado en nuestro estudio con el uso de bases de datos instrumentales, reanálisis y PCA; con la clasificación del índice según rangos y periodos de tiempo, y la aplicabilidad del mismo a la meteorología a través del diseño de la herramienta WeMOTool.

La investigación centrada en encontrar una nueva fuente instrumental para continuar la serie reconstruida de presión superficial en Padua identifica concluye con la estación automática Istrana - Sant'Angelo, perteneciente al Ejército del Aire italiano, como la mejor opción. La actualización de la serie 1821-2021 ha permitido establecer los días en los que se registraron la mayoría de los episodios de lluvias torrenciales y en los que el $WeMO_i$ fue más negativo, concretamente del 8 al 14 de octubre. Posteriormente, la tesis procede a analizar las estaciones que registran la presión atmosférica, así como el $WeMO_i$ proporcionado por el modelo matemático ERA-Interim. Una vez analizados otros cuatro reanálisis, se decidió que éste último constituía el mejor ajuste. Así, con el reanálisis escogido, se aplica el método multivariante PCA para establecer las ventanas sinópticas, dentro del patrón general de circulación atmosférica, definiendo cada fase de la Oscilación del Mediterráneo Occidental. Con el análisis de cinco distintas ventanas sinópticas de estudio, las cuales muestran la presencia de esta teleconexión, se escoge la ventana 30° N - 60° N y 15°O - 20°E. En relación a cada fase del WeMO, se ha representado la probabilidad de lluvia, así como la media de precipitación en la península Ibérica, con el objetivo de observar la distribución espacial: la costa este de la Península y el suroeste presentan valores máximos para ambas variables, con $WeMO_i < 0$, mientras que, contrariamente, como era de esperar, con $WeMO_i > 0$, la costa Mediterránea de la península Ibérica queda fuera del área de influencia de las precipitaciones marcando la precipitación ubicada en el norte y noroeste de la Península. En consonancia con el objetivo de establecer el área con mayor probabilidad de verse afectada por lluvias torrenciales, surge la necesidad de crear la regionalización de los rangos de $WeMO_i$. Esta guía está clasificada según rangos de valores del $WeMO_i$ y precipitación; indicando también la diferencia espacial en las fases de teleconexión de las precipitaciones sobre la península Ibérica. Además, los resultados de las correlaciones entre el $WeMO_i$ y la precipitación para el día D y los días consecutivos ($D + 1$, $D + 2$ i $D + 3$) están de acuerdo con el movimiento de una depresión Mediterránea típica que comienza en el sur y termina en el noreste de la Península. Las precipitaciones se pueden localizar y asociar en extensión e intensidad consultando la regionalización clasificada según rangos $WeMO_i$; se puede asociar a la clasificación de días consecutivos, estableciendo así la probabilidad de precipitación media en un episodio. En las últimas etapas de nuestra investigación, se creó la WeMOTool. Esta herramienta predice con precisión el $WeMO_i$, indicando gráficamente el área y la acumulación de lluvia que se espera en las próximas horas.

En cuanto a la validación del caso de estudio de octubre de 2016, los datos aportados por el WeMOTool indican que, con relativa precisión temporal y espacial, predice episodios altamente convectivos a escala local en el Mediterráneo occidental, como ocurrió en el caso de estudio del Maresme. El presente estudio no intenta considerar el modelo meteorológico GFS; sin embargo, sí aborda los modelos de salida y, por lo tanto, puede predecir las lluvias

torrenciales asociadas con el valor del $WeMO_i$.

Conclusiones del Capítulo *Caracterización de los valores del $WeMO_i$*

- La serie instrumental que mejor se ajusta con la serie del $WeMO_i$ 1821-2013, en sustitución de la de Padua, es la referida a Istrana - Sant'Angelo.
- Los días más favorables para el desarrollo de situaciones de eventos de lluvias torrenciales son del 8 al 14 de octubre, cuando el valor del $WeMO_i$ se vuelve más negativo en relación al número de casos de lluvias.
- La variable presión atmosférica proporcionada por el reanálisis causa un sesgo negativo en el valor instrumental real y, en consecuencia, el valor del $WeMO_i$ no se negativiza durante los eventos de lluvias torrenciales.
- La conclusión anterior destaca la importancia de las bases de datos climáticas instrumentales.
- Las clasificaciones sinópticas permiten comprender mejor la dinámica de la atmósfera mediante patrones estándar (CWT), que simplifican la dinámica atmosférica y definen el fenómeno según dos CWT : los que definen las fases de la WeMO.
- El análisis de las cinco ventanas sinópticas del estudio reveló que la teleconexión de la Oscilación del Mediterráneo Occidental se puede observar en todas ellas, aunque más evidentemente en una de las ventanas más grandes sinópticamente: 30° N - 60° N y 15°O - 20°E.
- Dos CWT caracterizan espacialmente la probabilidad de lluvia, así como la media de precipitaciones en la península Ibérica, para las dos fases de la WeMO, con efectos diferenciados según la geografía. En su fase negativa (CWT_4), que se define por las altas presiones entre Europa central y las islas británicas, y las bajas presiones hacia el oeste de la península Ibérica, la probabilidad de lluvias y la media de precipitaciones mantienen sus máximos en el golfo de Valencia, a lo largo de toda la costa Mediterránea, así como en el sector suroeste de la península Ibérica. Estas zonas son las que presentan un máximo de precipitaciones durante la fase negativa del $WeMO_i$, como se puede apreciar en los casos de estudio. Por el contrario, durante la fase positiva (CWT_8), definida por el anticiclón de las Azores y la depresión de Islandia desplazado hacia el norte de Gran Bretaña, las precipitaciones en la costa Mediterránea de la península Ibérica son prácticamente inexistentes.

Conclusiones del Capítulo *Regionalización mediante los valores del $WeMO_i$*

- La regionalización según rangos del $WeMO_i$ constituye una herramienta fundamental para identificar la probabilidad de lluvias en cada ubicación geográfica del área de estudio.
- Se registran episodios de precipitaciones con un $WeMO_i$ extremadamente negativo en la costa Mediterránea de la península Ibérica y en el suroeste de la Península, encajando bien con la definición de Oscilación del Mediterráneo Occidental.

- La correlación entre el $WeMO_i$ y la lluvia el día D coincide bien con los efectos pluviométricos que se esperan del patrón de teleconexión de la Oscilación del Mediterráneo Occidental. Así, la regionalización presentada de la influencia de la WeMO diferencia a la región de Cantabria y Galicia del resto de la Península.
- La correlación entre el $WeMO_i$ y la precipitación en el día D para todos los meses del período de estudio es aproximadamente 0, ya que el estudio se llevó a cabo durante un número elevado de días desde 1979 hasta 2013 y, por lo tanto, la definición de Oscilación del Mediterráneo Occidental se suaviza.
- El $WeMO_i$, en su fase negativa y correlacionado con las precipitaciones del día D se sitúa en el centro, suroeste y sureste de la Península, y se desplaza hacia el este en la Península para las precipitaciones del día $D + 1$, y hacia el noreste en Cataluña durante días $D + 2$ y $D + 3$.
- El hecho de que la correlación entre el $WeMO_i$ y la precipitación del día $D + 3$ sea baja durante todos los meses indica que las tormentas no duren tantos días y sean, en términos generales, poco persistentes.

Conclusiones del Capítulo *Aplicación del $WeMO_i$: Predicción de días lluviosos*

- El WeMOTool constituye un instrumento para predecir eventos de lluvias torrenciales, tanto en superficie como en intensidad.
- La historia climática de fenómenos extremos explica las condiciones meteorológicas de las siguientes 72 horas. De acuerdo con la climatología y la variabilidad climática, la configuración sinóptica ideal para el desarrollo de lluvias torrenciales relacionadas con el valor del $WeMO_i$, permite predecir eventos de lluvias intensas inminentes.
- Como herramienta predictiva, la WeMOTool requiere la inclusión de otras variables para mejorar su rendimiento. También requiere el uso de modelos regionales y no globales de libre acceso.

Capítol 9

LÍNIES FUTURES

L'elaboració de la sèrie climàtica i la construcció de l'índex de l'Oscil·lació de la Mediterrània Occidental històrica, així com la seva aplicació a l'est peninsular a partir de dades instrumentals, models numèrics de reanàlisi, l'anàlisi per calendaris i dels episodis torrencials extrems, i la seva definició mitjançant el catàleg per rangs de $WeMO_i$, han estat fonamentals per poder crear l'eina WeMOTool. L'eina, que vol ser un suport a les prediccions d'aquestes pluges torrencials de la costa mediterrània, proporciona una millora de les previsions, ja que està subjecta a l'estudi del passat climàtic. No obstant això, amb el canvi climàtic, totes les variables a acoblar són importants a l'hora de saber l'abast de l'exposició a aquest risc, així com la sinergia amb l'Administració pública. Ateses les aportacions d'aquesta tesi, hauria de ser possible implementar millores en la gestió del territori en aspectes d'urbanisme i protecció contra els perills d'inundació sobtada. De la mateixa manera, el progrés en la comprensió del funcionament i dels desencadenants d'aquests esdeveniments extrems permetrà optimitzar les advertències de la vulnerabilitat i l'exposició per part de l'Administració.

La tesi presentada aquí pot servir de base per a futurs projectes climàtics de l'est peninsular mediterrani relacionats amb els riscos naturals, la modelització hidràulica, l'anàlisi dels usos del sòl i, finalment, l'alerta primerenca. Ara és important, més que mai, la geografia, en què la transversalitat d'estudi tan àmplia fa que la combinació de diverses variables (com és, per exemple, en un aiguat, les dades de cada estació, els models meteorològics, la coneixença del clima de la zona i els models hidrològics) permet que existeixi la possibilitat de disminuir el risc i l'emergència, amb la finalitat de facilitar la presa de decisions.

És, sens dubte, important continuar aquesta investigació, per esbrinar quin és el paper del mar Mediterrani en el desenvolupament d'aquestes pluges torrencials, que, en efecte, en té, però s'ha de cercar la manera d'acoblar aquesta variable a la WeMOTool. Amb l'interès d'entendre aquest mecanisme, seria òptim l'estudi climàtic de l'escalfament del mar i els episodis torrencials del passat per, així, poder-ne estimar la probabilitat de la torrencialitat en funció de la temperatura del mar. Aquesta va ésser una línia que es va iniciar, però que no s'ha explotat al llarg de la tesi i que es presenta a continuació.

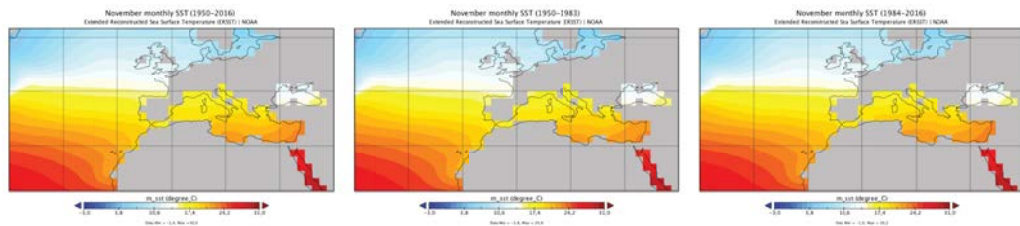


Figura 9.1: Temperatura del mar per als mesos de setembre, octubre i novembre (1984-2016).

En aquest sentit, entre altres objectes clau per seguir investigant, es pot esmentar l'estudi de l'existència d'una connexió sincronitzada entre la temperatura de l'oceà At-

làntic davant la costa andalusa-portuguesa i la temperatura del mar Mediterrani davant el golf de Gènova. Per tant, l'estudi d'aquesta teleconnexió podria ser acoblada a l'eina WeMOTool, en què es poden continuar millorant els models numèrics i en què l'estudi a escala estacional i amb *downscaling* afinaria les prediccions presentades al llarg d'aquesta tesi. També seria òptima l'anàlisi presentada amb el nou model de reanàlisi ERA5, que va sortir a la llum mesos després de tancar aquesta recerca. Un altre aspecte molt interessant que cal tenir en compte en el futur són els agents locals, regionals i estatals, així com els serveis meteorològics i departaments que tinguin competències en gestió i disseny del territori, ja que involucrar-los significaria una òptima gestió dels recursos i de l'espai.

Bibliografía

- [Abdi and Williams, 2010] Abdi, H. and Williams, L. J. (2010). Principal component analysis.
- [AEMET, 2010] AEMET (2010). Informe mensual climatológico. octubre 2010. *Informe Mensual AEMET*.
- [Agencia Estatal de Meteorología de España, 2011] Agencia Estatal de Meteorología de España, Departamento de Meteorología e Clima, I. d. M. d. P. (2011). Atlas climático ibérico. temperatura del aire y precipitación (1971-2000). *Catálogo General de publicaciones oficiales*.
- [Aguilar et al., 2003] Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T. C., and Wieringa, J. (2003). Guidelines on Climate Metadata and Homogenization. *World Meteorol. Organ.*
- [Almazroui et al., 2015] Almazroui, M., Dambul, R., Islam, M. N., and Jones, P. (2015). Principal components-based regionalization of the saudi arabian climate. *International Journal of Climatology*, 35(9):2555–2573.
- [Amores et al., 2020] Amores, A., Marcos, M., Carrió, D. S., and Gómez-Pujol, L. (2020). Coastal impacts of storm gloria (january 2020) over the north-western mediterranean. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(7):1955–1968.
- [Armengot, 1994] Armengot, R. (1994). Temporals de llevant. *Atlas climatic de la Comunitat Valenciana (1961–1990)*, pages 50–51.
- [Armengot, 2000] Armengot, R. (2000). *Caracterización de las precipitaciones intensas a escala diaria en el País Valenciano*. PhD thesis, Doctoral Thesis. University of Valencia.
- [Baddour and Kontongomde, 2007] Baddour, O. and Kontongomde, H. (2007). Función de las normales climatológicas en un clima cambiante. *Ginebra: Organización Meteorológica Mundial*.
- [Baklanov et al., 2002] Baklanov, A., Rasmussen, A., Fay, B., Berge, E., and Finardi, S. (2002). Potential and shortcomings of numerical weather prediction models in providing meteorological data for urban air pollution forecasting. *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, 2(5):43–60.

- [Bárdossy, 1997] Bárdossy, A. (1997). Downscaling from gcms to local climate through stochastic linkages. *Journal of Environmental Management*, 49(1):7–17.
- [Barnolas and Llasat, 2007] Barnolas, M. and Llasat, M. C. (2007). A flood geodatabase and its climatological applications: the case of catalonia for the last century. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(2):271–281.
- [Barnston and Livezey, 1987] Barnston, A. G. and Livezey, R. E. (1987). Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Weather Rev.*
- [Barrera-Escoda and Llasat, 2015] Barrera-Escoda, A. and Llasat, M. C. (2015). Evolving flood patterns in a Mediterranean region (1301-2012) and climatic factors - The case of Catalonia. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*
- [Barriendos et al., 2002] Barriendos, M., Martín-Vide, J., Peña, J. C., and Rodríguez, R. (2002). Daily meteorological observations in Cádiz - San Fernando. Analysis of the documentary sources and the instrumental data content (1786-1996). *Clim. Change*.
- [Barriopedro et al., 2014] Barriopedro, D., Gallego, D., Alvarez-Castro, M. C., García-Herrera, R., Wheeler, D., Peña-Ortiz, C., and Barbosa, S. M. (2014). Witnessing north atlantic westerlies variability from ships’ logbooks (1685–2008). *Climate dynamics*, 43(3-4):939–955.
- [Beck and Philipp, 2010] Beck, C. and Philipp, A. (2010). Evaluation and comparison of circulation type classifications for the european domain. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35(9-12):374–387.
- [Bladé et al., 2012] Bladé, I., Liebmann, B., Fortuny, D., and van Oldenborgh, G. J. (2012). Observed and simulated impacts of the summer NAO in Europe: Implications for projected drying in the Mediterranean region. *Clim. Dyn.*
- [Bolle, 2003] Bolle, H.-J. (2003). Mediterranean climate variability and trends.
- [Burgueño, 1992] Burgueño, J. (1992). Caracterització bàsica de la irregularitat de les precipitacions a catalunya. *Notes de Geografia Física, 1991-1992, núm. 20-21, p. 25-32.*
- [Campbell, 1975] Campbell, D. T. (1975). Iii.“degrees of freedom” and the case study. *Comparative political studies*, 8(2):178–193.
- [Camuffo et al., 2006] Camuffo, D., Cocheo, C., and Sturaro, G. (2006). Corrections of systematic errors, data homogenisation and climatic analysis of the Padova pressure series (1725-1999).
- [Casanueva et al., 2014] Casanueva, A., Frías, M. D., Herrera, S., San-Martín, D., Zaninovic, K., and Gutiérrez, J. M. (2014). Statistical downscaling of climate impact indices: testing the direct approach. *Climatic change*, 127(3):547–560.

- [Castro-Díez et al., 2002] Castro-Díez, Y., Pozo-Vázquez, D., Rodrigo, F., and Esteban-Parra, M. (2002). Nao and winter temperature variability in southern europe. *Geophysical Research Letters*, 29(8):1–1.
- [Cattell, 1966] Cattell, R. B. (1966). The scree test for the number of factors. *Multivariate behavioral research*, 1(2):245–276.
- [Cattiaux et al., 2013] Cattiaux, J., Douville, H., Ribes, A., Chauvin, F., and Plante, C. (2013). Towards a better understanding of changes in wintertime cold extremes over europe: a pilot study with cnrm and ipsl atmospheric models. *Climate dynamics*, 40(9-10):2433–2445.
- [Ceglar et al., 2017] Ceglar, A., Turco, M., Toreti, A., and Doblas-Reyes, F. J. (2017). Linking crop yield anomalies to large-scale atmospheric circulation in europe. *Agricultural and forest meteorology*, 240:35–45.
- [Comas-Bru and McDermott, 2014] Comas-Bru, L. and McDermott, F. (2014). Impacts of the ea and sca patterns on the european twentieth century nao–winter climate relationship. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140(679):354–363.
- [Compo et al., 2011] Compo, G. P., Whitaker, J. S., Sardeshmukh, P. D., Matsui, N., Allan, R. J., Yin, X., Gleason, B. E., Vose, R. S., Rutledge, G., Bessemoulin, P., BroNnimann, S., Brunet, M., Crouthamel, R. I., Grant, A. N., Groisman, P. Y., Jones, P. D., Kruk, M. C., Kruger, A. C., Marshall, G. J., Maugeri, M., Mok, H. Y., Nordli, O., Ross, T. F., Trigo, R. M., Wang, X. L., Woodruff, S. D., and Worley, S. J. (2011). The Twentieth Century Reanalysis Project.
- [Cropper et al., 2015] Cropper, T., Hanna, E., Valente, M. A., and Jónsson, T. (2015). A daily Azores–Iceland North Atlantic Oscillation index back to 1850. *Geosci. Data J.*
- [Cubasch et al., 2013] Cubasch, U., Wuebbles, D., Chen, D., Facchini, M., Frame, D., Mahowald, N., and Winther, J.-G. (2013). Introduction. page 119–158.
- [Das et al., 2010] Das, H., Doblas-Reyes, F., Garcia, A., Hansen, J., Mariani, L., Nain, A., Ramesh, K., Rathore, L., Venkataraman, R., and Garcia, A. (2010). Weather and climate forecasts for agriculture. *Guide to Agricultural Meteorological Practices*, pages 5–1.
- [De Felice et al., 2015] De Felice, M., Alessandri, A., and Catalano, F. (2015). Seasonal climate forecasts for medium-term electricity demand forecasting. *Applied Energy*, 137:435–444.
- [Decuyper et al., 2020] Decuyper, M., Chávez, R. O., Čufar, K., Estay, S. A., Clevers, J. G. P. W., Prislán, P., Gričar, J., Črepinšek, Z., Merela, M., de Luis, M., Notivoli, R. S., del Castillo, E. M., Rozendaal, D. M. A., Bongers, F., Herold, M., and Sass-Klaassen, U. (2020). Spatio-temporal assessment of beech growth in relation to climate extremes in Slovenia – An integrated approach using remote sensing and tree-ring data. *Agric. For. Meteorol.*

- [Dee et al., 2011a] Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M., Balsamo, G., Bauer, d. P., et al. (2011a). The era-interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656):553–597.
- [Dee et al., 2011b] Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J. J., Park, B. K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J. N., and Vitart, F. (2011b). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*
- [Di Lorenzo et al., 2008] Di Lorenzo, E., Schneider, N., Cobb, K. M., Franks, P., Chhak, K., Miller, A. J., McWilliams, J. C., Bograd, S. J., Arango, H., Curchitser, E., et al. (2008). North pacific gyre oscillation links ocean climate and ecosystem change. *Geophysical Research Letters*, 35(8).
- [Diez-Sierra and del Jesus, 2017] Diez-Sierra, J. and del Jesus, M. (2017). A rainfall analysis and forecasting tool. *Environ. Model. Softw.*
- [Doblas-Reyes et al., 2003] Doblas-Reyes, F., Garcia, A., Hansen, J., Mariani, L., Nain, A., Ramesh, K., Rathore, L., and Venkataraman, R. (2003). Weather and climate forecasts for agriculture. *Guide to agricultural, meteorological practices*, page 57.
- [Doswell III et al., 1998] Doswell III, C. A., Ramis, C., Romero, R., and Alonso, S. (1998). A diagnostic study of three heavy precipitation episodes in the western mediterranean region. *Weather and Forecasting*, 13(1):102–124.
- [Dunne and Ghosh, 2013] Dunne, S. and Ghosh, B. (2013). Weather adaptive traffic prediction using neurowavelet models. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(1):370–379.
- [Durman et al., 2001] Durman, C. F., Gregory, J. M., Hassell, D. C., Jones, R. G., and Murphy, J. M. (2001). A comparison of extreme European daily precipitation simulated by a global and a regional climate model for present and future climates. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*
- [Edwards and Owens, 1991] Edwards, W. and Owens, L. (1991). Large storm effects on total soil erosion. *Journal of Soil and water Conservation*, 46(1):75–78.
- [Esteban et al., 2005] Esteban, P., Jones, P. D., Martín-Vide, J., and Mases, M. (2005). Atmospheric circulation patterns related to heavy snowfall days in andorra, pyrenees. *International Journal of Climatology*, 25(3):319–329.
- [Esteban et al., 2006] Esteban, P., Martín-Vide, J., and Mases, M. (2006). Daily atmospheric circulation catalogue for western Europe using multivariate techniques. *Int. J. Climatol.*

- [Esteban Veà et al., 2012] Esteban Veà, P. et al. (2012). *Classificació de tipus de circulació atmosfèrica: proposta metodològica i aplicacions*. PhD thesis, Universitat de Barcelona.
- [Estrela et al., 2000] Estrela, M., Peñarrocha, D., Pastor, F., and Millán, M. (2000). Torrential events on the spanish mediterranean coast (valencian region): spatial precipitation patterns and their relation to synoptic circulation. In *Mediterranean Storms. Proceedings of the EGS Plinius Conference*, pages 97–106. Bios Cosenza.
- [Fernández et al., 2003] Fernández, F., Montávez, J. P., González-Rouco, J. F., and Valero, F. (2003). A pca analysis of the uhi form of madrid. pages 1–5.
- [Fernández-Martínez et al., 2017] Fernández-Martínez, M., Vicca, S., Janssens, I. A., Espelta, J. M., and Peñuelas, J. (2017). The north atlantic oscillation synchronises fruit production in western european forests. *Ecography*, 40(7):864–874.
- [Fortuny et al., 2015] Fortuny, D. et al. (2015). *Climate change and precipitation trends in the northern Mediterranean*. PhD thesis, Universitat de Barcelona.
- [Framework, 2015] Framework, A. C. R. (2015). 100 resilient cities. *The Rockefeller Foundation: New York, NY, USA*.
- [Frei and Robinson, 1999] Frei, A. and Robinson, D. A. (1999). NORTHERN HEMISPHERE SNOW EXTENT : REGIONAL. *Int. J. Climatol*.
- [García-Morales and Dubus, 2007] García-Morales, M. B. and Dubus, L. (2007). Forecasting precipitation for hydroelectric power management: how to exploit gem’s seasonal ensemble forecasts. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(12):1691–1705.
- [Gelaro et al., 2017] Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, C. A., Darmenov, A., Bosilovich, M. G., Reichle, R., Wargan, K., Coy, L., Cullather, R., Draper, C., Akella, S., Buchard, V., Conaty, A., da Silva, A. M., Gu, W., Kim, G. K., Koster, R., Lucchesi, R., Merkova, D., Nielsen, J. E., Partyka, G., Pawson, S., Putman, W., Rienecker, M., Schubert, S. D., Sienkiewicz, M., and Zhao, B. (2017). The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *J. Clim*.
- [Gómara et al., 2014] Gómara, I., Pinto, J. G., Woollings, T., Masato, G., Zurita-Gotor, P., and Rodríguez-Fonseca, B. (2014). Rossby wave-breaking analysis of explosive cyclones in the euro-atlantic sector. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140(680):738–753.
- [González-Hidalgo et al., 2011a] González-Hidalgo, J. C., Brunetti, M., and De Luis, M. (2011a). A new tool for monthly precipitation analysis in spain: Mopredas database (monthly precipitation trends december 1945–november 2005). *International Journal of Climatology*, 31(5):715–731.

- [González-Hidalgo et al., 2011b] González-Hidalgo, J. C., Brunetti, M., and De Luis, M. (2011b). A new tool for monthly precipitation analysis in spain: Mopredas database (monthly precipitation trends december 1945–november 2005). *International Journal of Climatology*, 31(5):715–731.
- [Gonzalez-Hidalgo et al., 2015] Gonzalez-Hidalgo, J. C., Peña-Angulo, D., Brunetti, M., and Cortesi, N. (2015). Motedas: a new monthly temperature database for mainland spain and the trend in temperature (1951–2010). *International Journal of Climatology*, 35(15):4444–4463.
- [González-Rouco et al., 2001] González-Rouco, J. F., Jiménez, J. L., Quesada, V., and Valero, F. (2001). Quality control and homogeneity of precipitation data in the southwest of europe. *Journal of climate*, 14(5):964–978.
- [Haiden et al., 2021] Haiden, T., Janousek, M., Vitart, F., Ben-Bouallegue, Z., Ferranti, L., Prates, C., and Richardson, D. (2021). Evaluation of ecmwf forecasts, including the 2020 upgrade. (880).
- [Hasselmann, 1997] Hasselmann, K. (1997). Multi-pattern fingerprint method for detection and attribution of climate change. *Climate dynamics*, 13(9):601–611.
- [Hegerl et al., 2000] Hegerl, G., Stott, P., Allen, M., Mitchell, J., Tett, S., and Cubasch, U. (2000). Optimal detection and attribution of climate change: Sensitivity of results to climate model differences. *Climate Dynamics*, 16(10-11):737–754.
- [Herrera et al., 2012] Herrera, S., Gutiérrez, J. M., Ancell, R., Pons, M., Frías, M., and Fernández, J. (2012). Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over spain (spain02). *International Journal of Climatology*, 32(1):74–85.
- [Hersbach et al., 2020] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., et al. (2020). The era5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730):1999–2049.
- [Hoegh-Guldberg et al., 2018] Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I., Diedhiou, A., Djalante, R., Ebi, K., Engelbrecht, F., Guiot, J., et al. (2018). Impacts of 1.5 c global warming on natural and human systems. *Global warming of 1.5 C. An IPCC Special Report*.
- [Hueso-González et al., 2018] Hueso-González, P., Muñoz-Rojas, M., and Martínez-Murillo, J. F. (2018). The role of organic amendments in drylands restoration.
- [Hurrell, 1995] Hurrell, J. W. (1995). Decadal trends in the north atlantic oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Science*, 269(5224):676–679.
- [Insua-Costa et al., 2021] Insua-Costa, D., Lemus-Cánovas, M., Miguez-Macho, G., and Llasat, M. C. (2021). Climatology and ranking of hazardous precipitation events in the western mediterranean area. *Atmospheric Research*, 255:105521.

- [IPCC, 2001] IPCC (2001). *Cambio climático 2001: Impactos, adaptación y vulnerabilidad*.
- [IPCC, 2007] IPCC (2007). Working Group I Report The Physical Science Basis.
- [IPCC, 2014] IPCC (2014). *Climate Change 2014*.
- [Irannezhad et al., 2017] Irannezhad, M., Chen, D., Kløve, B., and Moradkhani, H. (2017). Analysing the variability and trends of precipitation extremes in finland and their connection to atmospheric circulation patterns. *International journal of climatology*, 37:1053–1066.
- [Jerez et al., 2013] Jerez, S., Montavez, J. P., Jimenez-Guerrero, P., Gomez-Navarro, J. J., Lorente-Plazas, R., and Zorita, E. (2013). A multi-physics ensemble of present-day climate regional simulations over the iberian peninsula. *Climate dynamics*, 40(11-12):3023–3046.
- [Jiang et al., 2020] Jiang, Y., Cooley, D., and Wehner, M. F. (2020). Principal component analysis for extremes and application to us precipitation. *Journal of Climate*, 33(15):6441–6451.
- [Jiménez et al., 2012] Jiménez, J. A., Sancho-García, A., Bosom, E., Valdemoro, H. I., and Guillén, J. (2012). Storm-induced damages along the catalan coast (nw mediterranean) during the period 1958–2008. *Geomorphology*, 143:24–33.
- [Jolliffe, 1986] Jolliffe, I. T. (1986). Principal components in regression analysis. In *Principal component analysis*, pages 129–155. Springer.
- [Kalnay et al., 1996] Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., and Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*
- [KOPPEN, 1936] KOPPEN, W. d. (1936). Das geographische system der klimat. *Handbuch der klimatologie*, page 46.
- [Lana et al., 2016] Lana, X., Burgueño, A., Martínez, M., and Serra, C. (2016). Complexity and predictability of the monthly western mediterranean oscillation index. *International Journal of Climatology*, 36(6):2435–2450.
- [Lavaysse et al., 2018] Lavaysse, C., Vogt, J., Toreti, A., Carrera, M. L., and Pappenberger, F. (2018). On the use of weather regimes to forecast meteorological drought over europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(12):3297–3309.
- [Lavee et al., 1998] Lavee, H., Imeson, A. C., and Sarah, P. (1998). The impact of climate change on geomorphology and desertification along a mediterranean-arid transect. *Land degradation & development*, 9(5):407–422.

- [Lehner et al., 2012] Lehner, F., Raible, C. C., and Stocker, T. F. (2012). Testing the robustness of a precipitation proxy-based North Atlantic Oscillation reconstruction. *Quat. Sci. Rev.*
- [Lemus-Canovas et al., 2019] Lemus-Canovas, M., Lopez-Bustins, J. A., and Martín-Vide, Javierand Royé, D. (2019). synoptreg: An r package for computing a synoptic climate classification and a spatial regionalization of environmental data. *Environmental modelling & software*, 118:114–119.
- [Lionello et al., 2006] Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P., Boscolo, R., Alpert, P., Artale, V., Li, L., Luterbacher, J., May, W., Trigo, R., Tsimplis, M., et al. (2006). The mediterranean climate: an overview of the main characteristics and issues.
- [Llasat et al., 2010] Llasat, M., Llasat-Botija, M., Rodriguez, A., and Lindbergh, S. (2010). Flash floods in catalonia: a recurrent situation. *Advances in Geosciences*, 26:105–111.
- [Lledó et al., 2019] Lledó, L., Torralba, V., Soret, A., Ramon, J., and Doblas-Reyes, F. J. (2019). Seasonal forecasts of wind power generation. *Renewable Energy*, 143:91–100.
- [López-Bustins, 2007] López-Bustins, J. A. (2007). L' Oscil·lació de la Mediterrània Occidental i la Precipitació als Països Catalans. *Vide Sci. Tech. Appl.*
- [López Bustins and Azorín Molina, 2004] López Bustins, J. A. and Azorín Molina, C. (2004). Aplicación del índice diario de la oscilación del mediterráneo occidental al estudio de la tipología pluviométrica en alicante.
- [Lopez-Bustins and Lemus-Canovas, 2020] Lopez-Bustins, J. A. and Lemus-Canovas, M. (2020). The influence of the western mediterranean oscillation upon the spatio-temporal variability of precipitation over catalonia (northeastern of the iberian peninsula). *Atmospheric Research*, 236:104819.
- [López-Bustins and Martín-Vide, 2020] López-Bustins, J. A. and Martín-Vide, J. (2020). Causes meteorològiques i contextualització climàtica de la precipitació del temporal glòria. *Treballs de la Societat Catalana de Geografia*, pages 39–54.
- [López Bustins et al., 2016] López Bustins, J. A., Martín-Vide, J., Prohom, M., and Corcobilla, M. J. (2016). Variabilidad intraanual de la oscilación del mediterráneo occidental (wemo) y ocurrencia de episodios torrenciales en cataluña.
- [Lor, 2019] Lor, P. J. (2019). *International and comparative librarianship: A thematic approach*. Walter de Gruyter GmbH.
- [Lowe et al., 2016] Lowe, R., García-Díez, M., Ballester, J., Creswick, J., Robine, J.-M., Herrmann, F. R., and Rodó, X. (2016). Evaluation of an early-warning system for heat wave-related mortality in europe: Implications for sub-seasonal to seasonal forecasting and climate services. *International journal of environmental research and public health*, 13(2):206.

- [MacQueen et al., 1967] MacQueen, J. et al. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability*, volume 1, pages 281–297. Oakland, CA, USA.
- [Maestre et al., 2016] Maestre, F. T., Eldridge, D. J., Soliveres, S., Kéfi, S., Delgado-Baquerizo, M., Bowker, M. A., García-Palacios, P., Gaitán, J., Gallardo, A., Lázaro, R., et al. (2016). Structure and functioning of dryland ecosystems in a changing world. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 47:215–237.
- [Martín-Vide, 1987] Martín-Vide, J. (1987). Característiques climatològiques de la precipitació en la franja costera mediterrània de la península ibèrica.
- [Martín-Vide and Fernández Belmonte, 2001a] Martín-Vide, J. and Fernández Belmonte, D. (2001a). El índice nao y la precipitación mensual en la España peninsular. *Investigaciones geográficas*, n^o 26, 2001; pp. 41-58.
- [Martín-Vide and Fernández Belmonte, 2001b] Martín-Vide, J. and Fernández Belmonte, D. (2001b). El índice nao y la precipitación mensual en la España peninsular. *Investigaciones geográficas*, n^o 26, 2001; pp. 41-58.
- [Martín-Vide et al., 2016] Martín-Vide, J., Prohom, M., Busto, M., Pascual, J., and Camins, J. (2016). Evolució recent de la temperatura, la precipitació i altres variables climàtiques a Catalunya. *Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*, pages 93–112.
- [Martín-Vide, 1994] Martín-Vide, J. (1994). Diez características de la pluviometría española decisivas en el control de la demanda y el uso del agua. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (18):9–16.
- [Martín-Vide, 2004] Martín-Vide, J. (2004). Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain. *Int. J. Climatol.*, 24(8):959–971.
- [Martín-Vide, 2020] Martín-Vide, J. (2020). Precipitacions torrencials a Catalunya: el temporal gloria i perspectives de futur. *Sobre el temporal Gloria (19-23.01.20), els seus efectes sobre el país i el que se'n deriva : Report de Resposta Ràpida (R³) / Edició a cura de Miquel Canals i Jaume Miranda*, pages 13–21.
- [Martín-Vide et al., 2000] Martín-Vide, J., Esteban, P., Prohom, M., and Fernández, D. (2000). Nao influence on rainfall in Spain. the modifying role of orography. In *AGU Chapman Conference on “The North Atlantic Oscillation”, Ourense (Galicia)*. Póster.
- [Martín-Vide et al., 2014] Martín-Vide, J., Lopez-Bustins, and Barriendos, M. (2014). Actualización de los valores del índice de la oscilación del mediterráneo occidental (wemoi): 1821-2013. *Cambio Climático y Cambio Global*, page 283.
- [Martín-Vide and Lopez-Bustins, 2006] Martín-Vide, J. and Lopez-Bustins, J. A. (2006). The Western Mediterranean Oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula. *Int. J. Climatol.*

- [Martín-Vide et al., 2008] Martín-Vide, J., Sanchez-Lorenzo, A., Lopez-Bustins, J. A., Cordobilla, M. J., Garcia-Manuel, A., and Raso, J. (2008). Torrential rainfall in north-east of the iberian peninsula: synoptic patterns and wemo influence. *Advances in Science and Research*, 2(1):99–105.
- [Mathbout et al., 2021] Mathbout, S., Lopez-Bustins, J. A., Royé, D., and Martin-Vide, J. (2021). Mediterranean-scale drought: Regional datasets for exceptional meteorological drought events during 1975–2019. *Atmosphere*, 12(8):941.
- [Matthews, 2018] Matthews, J. (2018). IPCC, 2018: Annex I: Glossary.
- [Matthews et al., 2016] Matthews, T., Mullan, D., Wilby, R. L., Broderick, C., and Murphy, C. (2016). Past and future climate change in the context of memorable seasonal extremes. *Climate Risk Management*, 11:37–52.
- [Maugeri et al., 2004] Maugeri, M., Brunetti, M., Monti, F., and Nanni, T. (2004). Sea-level pressure variability in the Po Plain (1765–2000) from homogenized daily secular records. *Int. J. Climatol.*
- [Maunder, 2019] Maunder, W. J. (2019). The value of the weather.
- [Messner and Meyer, 2006] Messner, F. and Meyer, V. (2006). Flood damage, vulnerability and risk perception—challenges for flood damage research. In *Flood risk management: hazards, vulnerability and mitigation measures*, pages 149–167. Springer.
- [Millán et al., 2005] Millán, M., Estrela, M. J., and Miró, J. (2005). Rainfall components: variability and spatial distribution in a mediterranean area (valencia region). *Journal of Climate*, 18(14):2682–2705.
- [Miró et al., 2018] Miró, J. J., Estrela, M. J., Caselles, V., and Gómez, I. (2018). Spatial and temporal rainfall changes in the júcar and segura basins (1955–2016): Fine-scale trends. *International Journal of Climatology*, 38(13):4699–4722.
- [Monjo et al., 2016] Monjo, R., Gaitán, E., Pórtoles, J., Ribalaygua, J., and Torres, L. (2016). Changes in extreme precipitation over spain using statistical downscaling of cmip5 projections. *International Journal of Climatology*, 36(2):757–769.
- [Moreno et al., 2005] Moreno, J., Aguiló, E., Alonso, S., Cobelas, M., Anadón, R., Ballester, F., et al. (2005). A preliminary assessment of the impacts in spain due to the effects of climate change. *Madrid, SP: Ministerio del Medio Ambiente*.
- [Moreno, 2005] Moreno, J. M. (2005). 12. impactos sobre los riesgos naturales de origen climático c. riesgo de incendios forestales.
- [Murillo et al., 2019] Murillo, U. S. T. R., Torres-Pinzón, C. A., and Forero-García, E. F. (2019). Estimación del potencial fotovoltaico mediante minería de datos en cuatro ciudades de Colombia. *TecnoLógicas*.
- [Nations, 2018] Nations, U. (2018). Revision of world urbanization prospects. *United Nations: New York, NY, USA*.

- [Ninyerola et al., 2007] Ninyerola, M., Pons, X., and Roure, J. M. (2007). Monthly precipitation mapping of the iberian peninsula using spatial interpolation tools implemented in a geographic information system. *Theoretical and Applied Climatology*, 89(3):195–209.
- [Norrant and Douguedroit, 2005] Norrant, C. and Douguedroit, A. (2005). Predictability of the march precipitation in the mediterraneo-atlantic region by the pna pattern. *CLIVAR Exchanges*.
- [Olcina, 2020] Olcina, J. (2020). Clima, cambio climático y riesgos climáticos en el litoral mediterráneo: oportunidades para la geografía. *Documents d’anàlisi geogràfica*, 66(1):0159–182.
- [Olcina et al., 2016] Olcina, J., Miró Pérez, J. J., et al. (2016). El clima, recurso básico del turismo alicantino. de la valoración del clima invernal al aprovechamiento intensivo del clima estival.
- [Oliver, 1980] Oliver, J. E. (1980). Monthly precipitation distribution: A comparative index. pages 300–309.
- [Osborn et al., 1999] Osborn, T. J., Briffa, K. R., Tett, S. F., Jones, P. D., and Trigo, R. M. (1999). Evaluation of the north atlantic oscillation as simulated by a coupled climate model. *Climate Dynamics*, 15(9):685–702.
- [Palin et al., 2016] Palin, E. J., Scaife, A. A., Wallace, E., Pope, E. C., Arribas, A., and Brookshaw, A. (2016). Skillful seasonal forecasts of winter disruption to the uk transport system. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55(2):325–344.
- [Palmer and Räisänen, 2002] Palmer, T. N. and Räisänen, J. (2002). Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate. *Nature*.
- [Pascual, 1999] Pascual, R. (1999). Estudio de precipitaciones intensas en la comarca catalana del maresme. *Nota Técnica del Centro Meteorológico Territorial de Catalunya*, 1.
- [Pastor et al., 2019] Pastor, F., Valiente, J. A., and Palau, J. L. (2019). Sea surface temperature in the mediterranean: Trends and spatial patterns (1982–2016). In *Meteorology and climatology of the Mediterranean and Black Seas*, pages 297–309. Springer.
- [Peel et al., 2007] Peel, M. C., Finlayson, B. L., and McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the köppen-geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences*, 11(5):1633–1644.
- [Peña-Angulo et al., 2018] Peña-Angulo, D., Nadal-Romero, E., González-Hidalgo, J. C., Albaladejo, J., Andreu Pérez, V., Bagarello, V., Barhi, H., Batalla, R. J., Bernal, S., Bienes, R., et al. (2018). Analysis of the spatial variability of the relationships between rainfall, runoff, erosion and sediment yield and synoptic atmospheric patterns around the mediterranean basin.

- [Peñarrocha et al., 2002] Peñarrocha, D., Estrela, M. J., and Millán, M. (2002). Classification of daily rainfall patterns in a mediterranean area with extreme intensity levels: the valencia region. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 22(6):677–695.
- [Philipp et al., 2016] Philipp, A., Beck, C., Huth, R., and Jacobeit, J. (2016). Development and comparison of circulation type classifications using the COST 733 dataset and software. *Int. J. Climatol.*
- [Pielke et al., 2007] Pielke, R., Prins, G., Rayner, S., and Sarewitz, D. (2007). Lifting the taboo on adaptation. *Nature*.
- [Pita Rodríguez et al., 1999] Pita Rodríguez, G., Macias Matos, C., Pérez, A., Serrano Sintes, G., and Rebozo Pérez, J. (1999). Evaluación nutricional de un grupo de adultos mayores en un consultorio médico de familia. *Rev. cuba. aliment. nutr.*, pages 91–7.
- [Prohom et al., 2012] Prohom, M., Barriendos, M., Aguilar, E., and Ripoll, R. (2012). Recuperación y análisis de la serie de temperatura diaria de barcelona, 1780-2011. *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A*; 8.
- [Ragin, 2014] Ragin, C. C. (2014). *The comparative method: Moving beyond qualitative and quantitative strategies*. Univ of California Press.
- [Ramis et al., 1995] Ramis, C., Alonso, S., and Llasat, M. (1995). A comparative study of two cases of heavy rain in catalonia: synoptic and mesoscale mechanisms. *Surv. Geophys.*, 16:141–61.
- [Redolat et al., 2020] Redolat, D., Monjo, R., Paradinas, C., Pórtoles, J., Gaitán, E., Prado-Lopez, C., and Ribalaygua, J. (2020). Local decadal prediction according to statistical/dynamical approaches. *International Journal of Climatology*, 40(13):5671–5687.
- [Richman, 1986] Richman, M. B. (1986). Rotation of principal components. *Journal of climatology*, 6(3):293–335.
- [Rodríguez, 2017] Rodríguez, F. C. (2017). Los fenómenos pluviométricos extremos en el escenario de cambio climático antropogénico en galicia. gestión de la incertidumbre. *Sémata: Ciencias Sociais e Humanidades*, (29).
- [Rodwell and Hoskins, 2001] Rodwell, M. J. and Hoskins, B. J. (2001). Subtropical anticyclones and summer monsoons. *Journal of Climate*, 14(15):3192–3211.
- [Sánchez, 1975] Sánchez, L. A. (1975). La aplicación del método estadístico en climatología: 105 años de lluvias en Barcelona (1866-1970). *Rev. Geogr.*
- [Santer et al., 1995] Santer, B. D., Taylor, K. E., Wigley, T. M., Penner, J. E., Jones, P. D., and Cubasch, U. (1995). Towards the detection and attribution of an anthropogenic effect on climate. *Climate Dynamics*, 12(2):77–100.

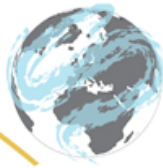
- [Santos Burguete et al., 2018] Santos Burguete, C., Simarro, J. P., and Fuertes Marrón, D. (2018). Física del caos.
- [Sanz et al., 2021] Sanz, M. et al. (2021). Impactor y riesgos derivadors del cambio climático en españa. *Oficina Española de Cambio climático*.
- [Sarricolea et al., 2019] Sarricolea, P., Meseguer-Ruiz, Ó., Serrano-Notivoli, R., Soto, M. V., and Martín-Vide, J. (2019). Trends of daily precipitation concentration in Central-Southern Chile. *Atmos. Res.*
- [Schumacher, 2017] Schumacher, R. S. (2017). Heavy rainfall and flash flooding. In *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*.
- [Sela, 1980] Sela, J. G. (1980). Spectral modeling at the National Meteorological Center. *Mon. Weather Rev.*
- [Serrano-Notivoli et al., 2017] Serrano-Notivoli, R., Beguería, S., Saz, M. Á., Longares, L. A., and Luis, M. D. (2017). SPREAD: A high-resolution daily gridded precipitation dataset for Spain - An extreme events frequency and intensity overview. *Earth Syst. Sci. Data*.
- [Serrano Notivoli et al., 2020] Serrano Notivoli, R., de Luis, M., Pueyo, Á., Zúñiga-Antón, M., Saz, M. Á., and Beguería, S. (2020). Climate and population: risk exposure to precipitation concentration in mainland spain (1950-2010). Technical report.
- [Serrano-Notivoli et al., 2018] Serrano-Notivoli, R., Martín-Vide, J., Saz, M. A., Longares, L. A., Beguería, S., Sarricolea, P., Meseguer-Ruiz, O., and de Luis, M. (2018). Spatio-temporal variability of daily precipitation concentration in Spain based on a high-resolution gridded data set. *Int. J. Climatol.*
- [Solomon et al., 2007] Solomon, S., Manning, M., Marquis, M., Qin, D., et al. (2007). *Climate change 2007. The physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC*, volume 4. Cambridge university press.
- [Stathis et al., 2009] Stathis, D., Myronidis, D., et al. (2009). Principal component analysis of precipitation in thessaly region (central greece). *Global NEST Journal*, 11(4):467–476.
- [Storch and Zwiers, 1999] Storch, H. v. and Zwiers, F. W. (1999). Statistical analysis in climate research.
- [Tascón et al., 2018] Tascón, G. C., Pascual, R., Callado, A., and Compte, M. (2018). Lluvias torrenciales en el maresme (barcelona) el 12 de octubre de 2016. *Acta de las Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española*, 1(35).
- [Tascon-Gonzalez et al., 2020] Tascon-Gonzalez, L., Ferrer-Julia, M., Ruiz, M., and Garcia-Melendez, E. (2020). Social vulnerability assessment for flood risk analysis. *Water*, 12(2):558.

- [Thieken et al., 2016] Thieken, A. H., Cammerer, H., Dobler, C., Lammel, J., and Schöberl, F. (2016). Estimating changes in flood risks and benefits of non-structural adaptation strategies—a case study from tyrol, austria. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 21(3):343–376.
- [Torralba Fernández, 2019] Torralba Fernández, V. (2019). Seasonal climate prediction for the wind energy sector: Methods and tools for the development of a climate service.
- [Trewin, 2010] Trewin, B. (2010). Exposure, instrumentation, and observing practice effects on land temperature measurements. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Chang.*
- [Uppala et al., 2005] Uppala, S. M., Kållberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., da Costa Bechtold, V., Fiorino, M., Gibson, J. K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G. A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R. P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M. A., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hólm, E., Hoskins, B. J., Isaksen, L., Janssen, P. A. E. M., Jenne, R., McNally, A. P., Mahfouf, J. F., Morcrette, J. J., Rayner, N. A., Saunders, R. W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K. E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., and Woollen, J. (2005). The ERA-40 re-analysis.
- [(US), 2014] (US), C. C. S. P. (2014). *Climate change impacts in the United States, highlights: US national climate assessment*. US Global Change Research Program.
- [Valero et al., 2009] Valero, F., Martín, M., Sotillo, M., Morata, A., and Luna, M. (2009). Characterization of the autumn iberian precipitation from long-term datasets: comparison between observed and hindcasted data. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(4):527–541.
- [Van Loon and Rogers, 1978] Van Loon, H. and Rogers, J. C. (1978). The seesaw in winter temperatures between greenland and northern europe. part i. general description. *Monthly Weather Review*, 106(3):296–310.
- [Vicente-Serrano et al., 2009] Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I., El Kenawy, A. M., and Angulo-Martínez, M. (2009). Daily atmospheric circulation events and extreme precipitation risk in northeast spain: Role of the north atlantic oscillation, the western mediterranean oscillation, and the mediterranean oscillation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D8).
- [Vicente-Serrano et al., 2006] Vicente-Serrano, S. M., Grippa, M., Delbart, N., Toan, T. L., and Kergoat, L. (2006). Influence of seasonal pressure patterns on temporal variability of vegetation activity in central Siberia. *Int. J. Climatol.*
- [Von Storch and Zwiers, 2001] Von Storch, H. and Zwiers, F. W. (2001). *Statistical analysis in climate research*. Cambridge university press.
- [Walker, 1928] Walker, G. (1928). World weather. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 54(226):79–87.

- [Walker and Bliss, 1928] Walker, G. and Bliss, E. (1928). World weather iv. some applications to seasonal foreshadowing. *Memoirs of the Royal Meteorological Society*, 3(24):81–95.
- [Wilks, 2011] Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences*, volume 100. Academic press.
- [Zhang et al., 2018] Zhang, W., Zhou, T., Zou, L., Zhang, L., and Chen, X. (2018). Reduced exposure to extreme precipitation from 0.5 c less warming in global land monsoon regions. *Nature communications*, 9(1):1–8.
- [Àrea de Climatologia. Servei Meteorològic de Catalunya, 2016] Àrea de Climatologia. Servei Meteorològic de Catalunya (2016). Butlletí climàtic estacional. tardor del 2016.

Climate is what we know and we expect, weather is what we get.

Mark Twain (1835-1910)



Climatology
Group



UNIVERSITAT DE
BARCELONA