



Facultat de ciències

Memòria del Treball de Fi de Grau

Títol del Treball:

Ús dels índex climàtics per avaluació de
les sequeres a la Conca de l'Ebre a Catalunya

Estudiant: Munir Codina Quiroga

Correu electrònic: munir.codina@gmail.com

Grau en Ciències Ambientals

Tutor: Josep Mas Pla

Correu electrònic: josep.mas@udg.edu

Data de dipòsit de la memòria a través de la plataforma UDG: 7/06/2024

ÍNDIX

RESUM.....	3
RESUMEN.....	4
ABSTRACT	5
REFLEXIÓ SOBRE ÈTICA, SOSTENIBILITAT I PERSPECTIVA DE GÈNERE	6
1. INTRODUCCIÓ	7
2. OBJECTIVES	10
3. METODOLOGIA.....	10
4. RESULTATS	12
4.1. Tendències registrades.....	12
4.2. Anàlisi índexs de sequera.....	13
4.3. Anàlisi dels models EUROCORDEX.....	17
4.4. Projectió del balanç hídric del SPEI	20
4.5. Estudi de la projecció RCP 4.5 (2006-2100)	23
5. DISCUSSIÓ	28
6. CONCLUSIONS	29
7. BIBLIOGRAFIA.....	30

RESUM

El canvi climàtic originat per causes antròpiques està provocant un augment en la temperatura mitjana i una disminució de la precipitació a Catalunya. El canvi climàtic s'associa principalment a l'augment de la concentració en ppm de diòxid de carboni a l'atmosfera. Aquest increment de CO_2 es va detectar a partir de l'any 1970. A conseqüència d'aquest esdeveniment global, es preveu que hi haurà un increment de la durada i la intensitat de les sequeres a Catalunya. Actualment, hi ha diversos projectes europeus, com el EUROCORDEX per intentar predir les temperatures i les precipitacions amb alts nivells de resolució. Gràcies a aquesta àrea resolució, es pot estudiar el territori de la unió Europea amb cel·les. Per cada cel·la s'estudia detalladament un total de 16 models, els quals estan compostos per un model GCM (model de circulació general) i un model RCM (model de circulació regional). També hi ha iniciatives a Catalunya, com el Tercer Informe Sobre El Canvi Climàtic A Catalunya, el qual estudia aquestes variables i també estudia les projeccions climàtiques.

Aquest TFG se centra a estudiar les tendències climàtiques en la conca hidrogràfica de l'Ebre. En primer lloc, s'ha estudiat les tendències climàtiques i els índexs de sequera a Vielha, Tremp i Tivissa. En segon lloc, s'ha fet el mateix procés amb les dades dels models EUROCORDEX, amb l'objectiu de contrastar les semblances i discrepàncies entre les dades extretes del Meteocat i les dades proveïdes per AEMET. Per poder comparar les dades s'ha descarregat tres cel·les EUROCORDEX, les quals inclouen les estacions dins de l'àrea de les cel·les. En tercer lloc, s'ha fet la projecció de la temperatura, la precipitació i els índexs de sequera mitjançant un model EUROCORDEX acoblat per cada estació.

Els resultats d'aquest treball corroboren la necessitat de dissenyar els models EUROCORDEX amb un nivell més elevat d'exactitud. El model acoblat subestima l'increment de temperatura anual registrat per les tres estacions. Aquesta tendència encara es veu més accentuada en la precipitació, on les dades observades mostren una reducció anual més elevada que els models EUROCORDEX, tot i que ni les dades observades ni les predites són significatives. Tot i les inconsistències, les projeccions de les dades EUROCORDEX RCP 4.5 mostren una tendència a l'increment de la durada i la intensitat de les sequeres, fet que és consistent amb el Tercer Informe Sobre El Canvi Climàtic A Catalunya.

RESUMEN

El cambio climático originado por causas antrópicas está provocando un aumento en la temperatura media y una disminución de la precipitación en Cataluña. El cambio climático se asocia principalmente al aumento de la concentración en ppm de dióxido de carbono en la atmósfera. Este incremento de CO_2 se detectó a partir del año 1970. A consecuencia de este evento global, se prevé que habrá un incremento de la duración y la intensidad de las sequías en Cataluña. Actualmente, existen varios proyectos europeos, como el EUROCORDEX para intentar predecir las temperaturas y las precipitaciones con altos niveles de resolución. Gracias a esta área de resolución, se puede estudiar el territorio de la Unión Europea con celdas. Por cada celda se estudia detalladamente un total de 16 modelos, los cuales están compuestos por un modelo GCM (modelo de circulación general) y un modelo RCM (modelo de circulación regional). También existen iniciativas en Cataluña, como el “Tercer Informe Sobre El Canvi Climàtic A Catalunya”, que estudia estas variables y también estudia las proyecciones climáticas.

Este TFG se centra en estudiar las tendencias climáticas en la cuenca hidrográfica del Ebro. En primer lugar, se han estudiado las tendencias climáticas y los índices de sequía en Vielha, Tremp y Tivissa. En segundo lugar, se ha realizado el mismo proceso con los datos de los modelos EUROCORDEX, con el objetivo de contrastar las semejanzas y discrepancias entre los datos extraídos del Meteocat y los datos proveídos por AEMET. Para poder comparar los datos se han descargado tres celdas EUROCORDEX, las cuales incluían las estaciones dentro del área de las celdas. En tercer lugar, se ha realizado la proyección de la temperatura, la precipitación y los índices de sequía mediante un modelo EUROCORDEX ensamblado por cada estación.

Los resultados de este trabajo corroboran la necesidad de diseñar los modelos EUROCORDEX con un mayor nivel de exactitud. El modelo ensamblado subestima el incremento de temperatura anual registrado por las tres estaciones. Esta tendencia todavía se ve más acentuada en la precipitación, donde los datos observados muestran una reducción anual mayor que los modelos EUROCORDEX, aunque ni los datos observados ni los predichos son significativos. A pesar de las inconsistencias, las proyecciones de los datos EUROCORDEX RCP 4.5 muestran una tendencia al incremento de la duración y la intensidad de las sequías, consistente con el “Tercer Informe Sobre El Canvi Climàtic A Catalunya”.

ABSTRACT

Climate change originated by anthropogenic is causing an increase in average temperature and a decrease in precipitation in Catalonia. Climate change is mainly associated with the increase in ppm concentration of carbon dioxide in the atmosphere. This increase in CO_2 was detected from the year 1970. As a result of this global event, it is expected that there will be an increase in the duration and intensity of droughts in Catalonia. Currently, there are several European projects, such as EUROCORDEX, to try to predict temperatures and precipitation with high levels of resolution. Thanks to this area of resolution, the territory of the European Union can be studied with cells. A total of 16 models are studied in detail for each cell, which are composed of a GCM model (general circulation model) and an RCM model (regional circulation model). There are also initiatives in Catalonia, such as the " Tercer Informe Sobre El Canvi Climàtic A Catalunya ", which studies these variables and also studies climate projections.

This TFG focuses on studying climate trends in the Ebro river basin. First, the climatic trends and drought indices in Vielha, Tremp and Tivissa have been studied. Secondly, the same process has been carried out with the data from the EUROCORDEX models, with the aim of contrasting the similarities and discrepancies between the data extracted from Meteocat and the data provided by EUROCORDEX. To compare the data, three EUROCORDEX cells have been downloaded, which included the stations within the area of the cells. Thirdly, the temperature, precipitation and drought indices have been projected using a EUROCORDEX model assembled for each station.

The results of this work corroborate the need to design EUROCORDEX models with a higher level of accuracy. The assembled model underestimates the annual temperature increase recorded by the three stations. This tendency is even more accentuated in precipitation, where the observed data shows a greater annual reduction than the EUROCORDEX models, although neither the observed data nor the predictions are significant. Despite the inconsistencies, the projections of the EUROCORDEX RCP 4.5 data show a tendency to increase the duration and intensity of droughts, consistent with the "Tercer Informe Sobre El Canvi Climàtic A Catalunya".

REFLEXIÓ SOBRE ÈTICA, SOSTENIBILITAT I PERSPECTIVA DE GÈNERE

Reflexió sobre Ètica

En aquest TFG, s'han citat correctament totes les fonts consultades, tenint en compte els drets d'autor de tots els articles. A més, no s'ha fet cap manipulació de les dades per tal d'obtenir millors resultats. Tots els gràfics elaborats dels resultats són propis amb diversos scripts de Rstudio.

Reflexió sobre Sostenibilitat

És important comprendre amb detall l'impacte de les sequeres per poder saber amb precisió les prediccions de sequera de Catalunya. Catalunya ja ha experimentat diversos episodis greus de sequera, com entre els anys 2007-2008. Aquesta sequera va afectar greument al subministrament d'aigua potable a la població. A més, també es va requerir d'altres mesures d'emergència, com, d'importar d'aigua amb vaixells cisterna d'altres països. Aquesta mesura d'emergència també s'està aplicant l'any 2024. Ara bé, cal tenir en compte que aquesta mesura no és sostenible al llarg termini. Les projeccions RCP 4.5 mostren un agreujament de la durada tant en la intensitat com la durada, de tal manera que és probable que en el futur s'hauran de prendre mesures d'emergència més restrictives.

Per una altra banda, no s'hauria de instrumentalitzar políticament el tema de la sequera, on a vegades s'esbiaixa conscientment la informació, perdent el rigor científic. També és important conscienciar a la societat sobre les sequeres que es preveuen en el futur ja que seran més prolongades i amb més intensitat. Degut a l'escassetat de l'aigua serà necessari fer una bona gestió de l'aigua i optimitzar les solucions. Les persones que busquin i optimitzin les solucions han de basar-se en una objectivitat rigorosa, per tal de poder valorar exhaustivament els avantatges i desavantatges de cada solució proposada.

Reflexió sobre Gènere

Aquest treball està enfocat a un tractament de dades estadístic on la dimensió del gènere no ha estat rellevant. En referència a la bibliografia consultada, s'ha observat si els articles havien estat escrit per homes o dones, en la mesura de lo possible.

1. INTRODUCCIÓ

La disponibilitat d'aigua dolça cada vegada és més limitada degut a diversos factors com el canvi climàtic, el creixement demogràfic mundial, el desenvolupament econòmic i la mala gestió de l'aigua (IDPM, 2022). La manca de disponibilitat d'aigua comporta a episodis de sequeres. El concepte de sequera presenta múltiples definicions. Una definició generalista és la següent: la sequera és un fenomen climàtic que es pot donar en qualsevol lloc quan hi ha una reducció de la disponibilitat d'aigua en l'atmosfera, en el sòl o el subsòl. També, existeixen definicions més específiques, com, per exemple en funció de l'àmbit que afecta. Per exemple, World Bank classifica la sequera en sequera meteorològica, sequera hidrològica, sequera agrícola i sequera socioeconòmica (World Bank, 2019). El canvi climàtic està provocant un increment en les freqüències i/o en les magnituds de les sequeres a molts indrets (IPCC, 2021). L'escalfament global es va començar a registrar a partir de 1970 aproximadament que es quan es comença a incrementar significativament el CO₂ a l'atmosfera (Vasquez, 2008). L'increment de les temperatures, els vents forts i l'humitat relativament baixa provoquen un augment de la demanda atmosfèrica de l'aigua. Aquest fet comporta que les sequeres siguin més severes i amb una duració de temps major.

Les sequeres produeixen diversos impactes, tant socioeconòmics com naturals. Un exemple d'impacte socioeconòmic és la reducció de la productivitat industrial i agrícola a causa de l'escassetat d'aigua. Com a conseqüència, els consumidors s'exposen a una reducció de l'oferta dels productes i un encariment d'aquests (IDPM, 2022).

En el cas de Catalunya, s'ha observat que la temperatura s'incrementa amb una tendència clara mentre que la precipitació no presenta un patró definit. (Martín-Jide, 2016). Respecte a la temperatura, s'ha observat que la velocitat d'increment de la temperatura màxima és major que la temperatura mínima. L'estiu és l'època de l'any en la qual s'ha observat un increment més accelerat de la temperatura mitjana. Pel que fa a la precipitació, s'observa un decreixement anual, el qual no és significatiu. L'estiu i l'hivern són les úniques estacions en les quals es registra una tendència significativa en la precipitació, sent la reducció de precipitació més pronunciada a l'estiu. En el cas de la conca de l'Ebre, s'ha analitzat que les majors reduccions de precipitació es van produir els mesos de març i juny entre el 1946-2005 (Martín-Jide, 2016).

Les prediccions climàtiques apunten a diferents tendències en funció de les diferents condicions climàtiques de Catalunya (Litoral i Prelitoral, Interior i el Pirineu) (Figura 1). L'àrea amb major increment de temperatura anual es produirà al Pirineu. En canvi, la major reducció anual de precipitació tindrà lloc al litoral i prelitoral. Els últims estudis mostren que el nombre de dies de pluja es reduirà, disminuint especialment a la primavera i a l'estiu, de tal manera que els períodes de sequera esdevindrien més llargs (López Franca et al, 2014). A més, també s'observa que a partir de la meitat del segle (2050) els episodis de sequera seran més llargs (López Bustins et al., 2013)

		Hivern	Primavera	Estiu	Tardor	Anual
Litoral/ Prellitoral	ΔT (°C)	1,2 (0,8/1,9)	1,2 (0,5/2,2)	1,8 (0,7/2,5)	1,7 (0,6/2,1)	1,4 (0,9/2,0)
	ΔPPT (%)	-6,0 (-40,2/35,7)	-12,0 (-37,5/6,9)	-11,7 (-33,8/11,7)	-9,1 (-30,2/11,5)	-8,3 (-27,1/2,3)
Interior	ΔT (°C)	1,2 (0,8/1,9)	1,2 (0,4/2,3)	1,9 (0,7/2,7)	1,7 (0,8/2,2)	1,4 (0,9/2,1)
	ΔPPT (%)	-1,1 (-30,9/42,0)	-11,5 (-32,2/6,4)	-9,9 (-28,1/11,5)	-8,9 (-27,5/11,0)	-6,5 (-23,7/1,4)
Pirineu	ΔT (°C)	1,4 (0,9/2,1)	1,4 (0,6/2,5)	1,9 (0,6/2,8)	1,8 (0,8/2,3)	1,6 (0,9/2,2)
	ΔPPT (%)	-1,8 (-11,0/22,5)	-8,4 (-24,4/5,8)	-9,0 (-24,3/8,2)	-9,3 (-25,4/0,7)	-5,3 (-16,1/-1,2)
Catalunya	ΔT (°C)	1,3 (0,8/2,1)	1,2 (0,5/2,4)	1,8 (0,7/2,6)	1,7 (0,7/2,2)	1,4 (0,9/2,0)
	ΔPPT (%)	-3,8 (-28,2/20,7)	-10,7 (-31,4/4,0)	-10,2 (-28,1/9,8)	-9,4 (-27,5/4,7)	-6,8 (-22,0/-0,7)

Figura 1. Projeccions regionalitzades pel període 2031-2050, respecte el període històric (1971-2000) per les diferents regions climàtiques de Catalunya. Font: MARTÍN-JIDE, 2016.

Per estudiar, les sequeres es poden emprar diversos índexs de sequera. Cada un d'aquests empra diferents paràmetres i és més adient per una tipologia de sequera. En aquest cas, s'ha estudiat la sequera meteorològica.

Sectors affected (and relevant time scale)	Drought type	Time scales	Drought indices
<ul style="list-style-type: none"> • Rainfed agriculture • Domestic water supply (self-sufficient) 	Meteorological	Dekade, month	SPI, PDSI, AAI, AI, CZI, DRI, Palmer Z Index, ADI, MSDI, Deficit Indices, Deciles, PNP, Weighted Anomaly, Palmer Z Index, WASP, EDI, RAI, sc-PDSI, SAI, SPEI, DAI
<ul style="list-style-type: none"> • Rainfed agriculture • Terrestrial ecosystems • Financial sector 	Agricultural	Dekade, month	KBDI, CMI, NDI, ARID, CSDI, SMA, ETDI, SMDI, EVI, NDVI, TCI, VCI, VegDRI, VHI, WRSI, NDWI, SAVI, ESI, ADI, MSDI, Deficit Indices, Deciles, PNP, WASP, EDI, RAI, sc-PDSI, SPEI, SAI
<ul style="list-style-type: none"> • Irrigated agriculture • Hydropower (energy) • Energy and Industry (cooling) • Industry (water resource) • Domestic water supply • Navigation • Aquatic and terrestrial ecosystems • Recreation 	Hydrological	Month, season, year	GWDT, SGI, GRI, GWI, DDV, RDI, PHDI, SRSI, SSFI, SRI, SWI, SDI, SWSI, SMRI, IDR, DAI, SPEI
<ul style="list-style-type: none"> • Energy and industry (cooling) • Industry (consumptive water use) • Domestic water supply (distribution) • Financial sector (water dependent businesses) 	Socioeconomic	Season, year	MSRRI, WSI, WSR, Falkenmark Index, Watergap

Figura 2. Tipologies de sequera, sectors afectats i índexs de sequera emprats. Cada tipologia de sequera presenta diferents escales temporals. Font: (World Bank, 2019).

A continuació es detalla els índexs emprats en aquest estudi, els quals són el SPI, SPEI i el PDSI.

L'índex SPI es calcula a través de la precipitació mensual d'una localització concreta per un període determinat. Aquest índex es pot computar per diverses escales temporals, concretament entre 1 i 48 mesos (IDMP, s.d). Una vegada calculat el índex, aquest s'ajusta a una distribució, la qual potser, una distribució Gamma, Pearson tipus III, lognormal, valor extrem i exponencial (Mishra i Singh, 2010). Segons (Vicente-Serrano et al., 2009) la distribució que millor s'ajusta és Gamma. És important assegurar que les dades s'ajusten correctament a una distribució Gamma per climes secs (Mishra i Singh, 2010). Això es deu a que quan s'escull escales temporals petites, les dades no sempre s'ajusten a la distribució gamma (Mishra i Singh, 2010). Per estudiar si les dades segueixen la distribució es realitza un ks-test (Rathore, sd.). Posteriorment, l'índex es transforma en una probabilitat acumulativa emprant els paràmetres Alfa i Beta, on cada valor de probabilitat s'associa a un valor de SPI. Els valors del SPI es classifiquen en categories de sequera (Figura 3). Els detalls matemàtics es troben detallats en el següent article (Rathore, s.d).

El índex SPEI és semblant a l'índex SPI, però té en compte una nova variable, la qual és l'evapotranspiració (PET). Hi ha múltiples mètodes per calcular l'evapotranspiració (Stagge et al., 2014). En el cas del SPEI, la distribució que millor s'ajusta és la log-logística (Vicente-Serrano et al., 2009). Aquest índex també requereix comprovar que les dades s'ajusten a aquesta distribució mitjançant un K-test. En aquest cas, els paràmetres calculats són Alfa, Beta i Gamma. Seguidament, es calcula la probabilitat acumulada a partir d'aquests tres paràmetres. Aquesta probabilitat acumulada es relaciona directament amb el valor SPEI. El rang de les categories del SPEI és el mateix que el SPI (Figura 3). Els detalls matemàtics es poden trobar en el següent article (CSIC, s.d).

Respecte l'índex de Palmer (PDSI), aquest, a diferència dels dos anteriors, té en compte el comportament del sòl. La variable que té en compte el sòl s'anomena AWC (capacitat de retenció de l'aigua). El PDSI va ser desenvolupat per Palmer, el qual va fixar els paràmetres del índex en base a les condicions locals al centre dels d'Estats Units (NCAR, s.d). Per poder exportar aquest mètode a altres zones amb condicions climàtiques diferents, es va dissenyar el SC-PDSI, el qual permet calcular els coeficients enlloc d'emprar els coeficients fixats per Palmer. El nombre total de paràmetres en aquest índex és 4 (Alfa, Beta, Gamma i Delta). El procediment matemàtic és més complex que els índexs SPI i SPEI. En aquest cas, el rang de categories en el PDSI és diferent als índexs SPI i SPEI (Figura 3). En el següent article es poden trobar els detalls matemàtics (Wells et al., 2004).

SPI and SPEI value	PDSI value	Class
Greater than 2.00	Greater than 4.00	Extremely wet
1.50 to 1.99	3.00 to 3.99	Severely wet
1.00 to 1.49	2.00 to 2.99	Moderately wet
0.50 to 0.99	1.00 to 1.99	Slightly wet
-0.49 to 0.49	-0.99 to 0.99	Near normal
-0.99 to -0.50	-1.99 to -1.00	Mild dry
-1.49 to -1.00	-2.99 to -2.00	Moderately dry
-1.99 to -1.50	-3.99 to -3.00	Severely dry
Less than -2.00	Less than -4.00	Extremely dry

Figura 3. Valors i categories pels índexs de sequera SPI, SPEI i PDSI. Font: (Nam et al., 2015).

Un cop computats els tres mètodes, es pot observar la seva variació temporal. Les sequeres s'estudien a través de la intensitat i durada. A més a més, es pot combinar les dues variables anteriors per calcular la severitat (Figura 4).

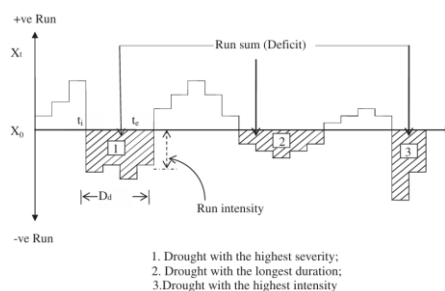


Figura 4. Esquema conceptual de la severitat, duració i intensitat de una sequera per un període de temps determinat. Font: (Mishra i Singh, 2010).

2. OBJECTIVES

This TFG has been splitted in two main objectives.

The first one main objective is applying the drought indexes in three points in the Ebro basin, with different climatic conditions. Therefore, the Vielha metereological station is selected for the Pyrenees, Tremp metereological station for the interior, and Tivissa metereological station for the litoral/prelitoral. Before that, it is determined if there is a clear correlation with average precipitation and temperature since 1970. After that, this study examines which drought index can better explain the data since 1950.

The second one main objective is forecasting the drought conditions in scenario RCP 4.5. for the three places. The first specific objective is determining which of the EUROCORDEX fits and explains better the record data provided by the stations. The second specific objective is analysing the rate of increase and decrease of average temperature and precipitation annually and monthly assessing the differences between record data and the best model fitted. The third specific objective is understanding the monthly behaviour of each site in order to forecast which area will be more affected in Ebre Basin. Finally, the last objective is comparing the RCP 4.5 scenario projected and the observed data in order to determine discrepancies. Furthermore, this TFG studies the frequency, severity and duration of drought for different periods from 2006 to 2100 using RCP data and examining the differences with observed data.

3. METODOLOGIA

Per assolir els objectius d'aquest treball, s'han dut a terme diversos passos. S'ha programat diversos SCRIPTS a Rstudio per computar els resultats.

En primer lloc, per respondre el primer objectiu s'ha descarregat les dades meteorològiques de les estacions de Vielha, Tremp i Tivissa entre els anys 1950-2022 (Servei Metereològic de Catalunya, s.d). Per poder ampliar la sèrie temporal, s'ha descarregat les dades de l'any 2023, les quals només estaven disponibles per Tremp i Tivissa (Ruralcat, s.d). Després, s'ha calculat les tendències climàtiques de temperatura i precipitació a partir de 1970 per cada estació.

Les dades descarregades del meteocat van ser ajustades per poder calcular el SPI i el SPEI mitjançant el package SPEI. Les distribucions assignades als índexs climàtics per el SPI i el SPEI han sigut Gamma i Log-Logistic (Vicente-Serrano et al., 2010). Els índexs s'han programat amb una escala de 24 mesos (Mishra i Singh, 2010). El mètode utilitzat per determinar l'evaporatranspiració ha sigut Thornthwaite. La latitud requerida s'ha transformat del sistema UTM a graus. Els detalls del mètode de programació de Thornthwaite es troben especificats en el següent article (Rdocumentation, s.d). Finalment, s'ha emprat el test de Kolmogorov-Smirnov test per determinar si les distribucions assignades s'ajustaven correctament per cada mes (Mahn Hung le, 2016).

En segon lloc, per calcular el PDSI, s'ha descarregat un arxiu raster de l'AWC del sòl europeu, amb cel·les de 1kmx1km de precisió (Hiederer, 2013). Per tal de poder sobreposar la ubicació de les estacions en el raster AWC, s'ha hagut de convertir el format UTM 31 de la ubicació de les estacions al sistema de coordenades del raster (ETRS 89 LAEA), per extreure els valors AWC de cada ubicació en concret. Per fer aquest procés s'ha emprat el package Raster. A continuació, es va computar el PDSI, utilitzant el AWC, i les variables anteriors emprades en el SPEI mitjançant el Package PDSI. A continuació, es va fer un gràfic de l'evolució temporal dels tres índexs entre 1950 i 2022 a través del Package GGPlot 2. Seguidament s'ha programat un histograma per cada índex de sequera, calculant la mitjana, la desviació estandard, l'asimetria, la curtosis i els quantils 25, 50 i 75.

Posteriorment, s'ha programat la correlació entre els índexs durant tota la sèrie temporal (Paulo et al.,2012). Si una de les variables era el PDSI, s'ha fet dues rectes de regressió en funció de si els valors del índex eren positius o negatius. Per cada regressió computada, s'ha calculat el coeficient de determinació, la significació estadística, i el pendent de la recta. Posteriorment, s'ha seleccionat l'índex que millor s'ajustava i s'ha programat un histograma amb l'evolució temporal de l'índex per diversos períodes.

En segon lloc, amb l'objectiu d'estudiar les tendències climàtiques, s'ha extret les dades diàries de temperatura mínima, temperatura màxima i precipitació del EUROCORDEX, tant les dades històriques (1971-2005), com les projeccions futures (2006-2100) per l'escenari RCP 4.5 (AEMET, 2024). També s'ha dissenyat un model acoblat, dissenyat a partir de la mitjana dels 16 models, de tal manera que s'ha analitzat 17 models per cada estació. Per saber quin model climàtic s'ajustava millor a cada estació s'ha calculat l'arrel quadrada de l'error quadràtic mitjà (RMSE), la desviació estandard (STD) i la correlació (COR) amb les dades observades de l'estació (José et al., 2023). A més, també s'ha fet un gràfic mensual per estudiar la diferència entre les mitjanes mensuals de precipitació i temperatura entre els 17 models i les dades registrades a cada estació (Colmet-Daage et al., 2022) . A continuació, s'ha estudiat la correlació mensual i anual per les dades registrades a l'estació i el millor model climàtic.

En tercer lloc, una vegada seleccionat el model climàtic adient, s'ha programat la projecció climàtica des del 2006 fins al 2100. Abans de fer la projecció, s'ha utilitzat el mètode Delta per poder dur a terme les projeccions, ajustant les dades del passat per períodes aproximats de 30 anys per a cada localitat (Navarro-Racinés et al., 2020). A més, anterior a la projecció, s'ha estudiat el balanç hídric (D) del SPEI, per cada estació i la variabilitat del factor al llarg del temps. Per determinar si hi havia tendències, s'ha programat un model lineal. Seguidament, per observar el total de reducció de balanç hídric anualment, s'ha comparat la mitjana dels 10 primers anys i dels últims 10 anys a nivell mensual, i, també, la pèrdua en percentatge per les tres estacions.

Finalment, s'ha estudiat el grau de sequera de cada àrea, fent la projecció del SPEI. El SPEI projectat s'ha comparat amb el SPEI observat de cada estació, i també s'ha fet un mapa de calor (Jose et al., 2023). Després, s'ha dividit la projecció en períodes aproximats de 17 anys, i s'ha analitzat la distribució de les categories, les freqüències, les intensitats i les durades de les sequeres per cada estació. A més, per fer una comparativa del primer període predit pel RCP 4.5 (2006-2023) i les dades observades, s'ha comparat els mateixos paràmetres esmentats anteriorment per cada estació entre el 2006 i el 2022/23.

4. RESULTATS

4.1. Tendències registrades

Les tres localitzacions indiquen una tendència significativa en l'increment de la temperatura presentant la mateixa velocitat d'escalfament de graus per any (Figura 5). En canvi, la precipitació només presenta tendència significativa a Vielha i Trepç. La reducció de precipitació es registre a Trepç, seguit de Vielha i Tivissa.

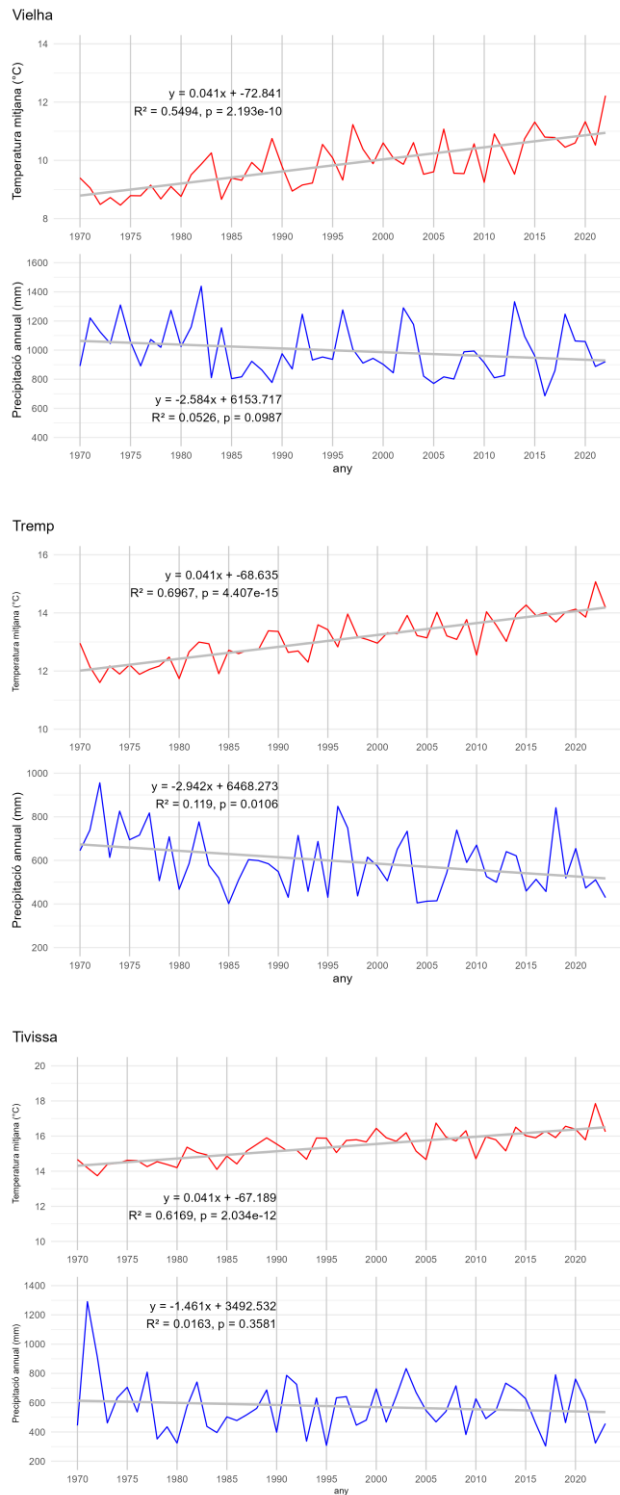


Figura 5. Correlació entre temperatura i precipitació per les estacions de Vielha, Trepç i Tivissa. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del Meteocat i Ruralcat.

4.2. Anàlisi índexs de sequera

En les tres localitzacions s'observa que els índexs SPI, SPEI són similars, mentres que el PDSI és l'índex que difereix més respecte els altres dos índexs (Figura 6). Les tres localitzacions presenten períodes més humits a l'inici i després aquests episodis humits es redueixen al llarg del temps.

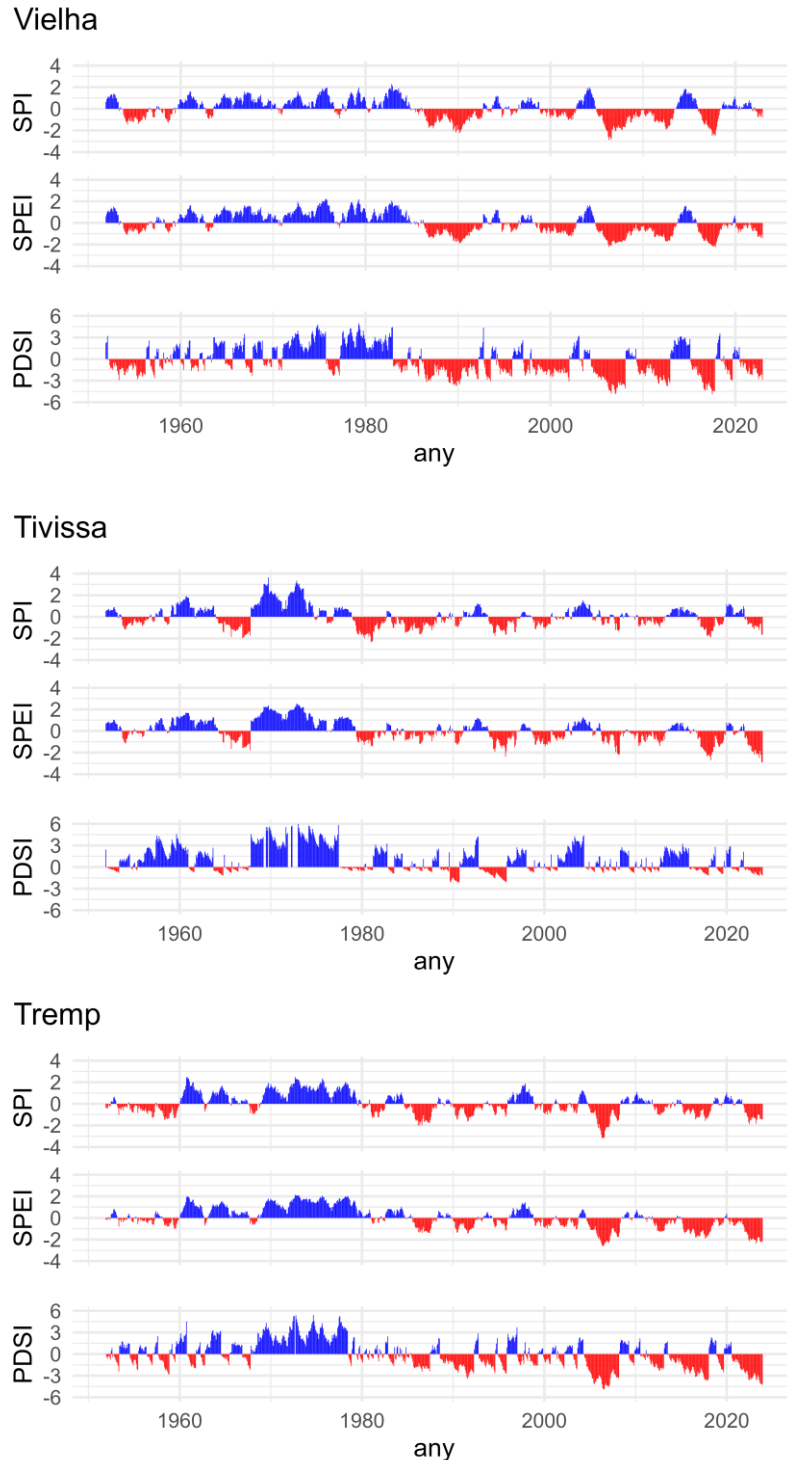


Figura 6. Distribució temporal dels índexs de sequera per les estacions de Vielha, Tremp i Tivissa entre 1950-2022. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del Meteocat.

El índex que mostra menor asimetria és el índex SPEI per les tres localitats (Taula 1). A més, el menor valor de curtosis també es dona en aquest índex, a excepció de l'estació de Tivissa. Com el valor de curtosis és menor, els valor del índex SPEI es concentren més aprop de la mediana. També, en el cas del SPEI el valor de la mediana és el més proper a zero.

Taula 1. Anàlisi estadístic dels índexs de sequera en les tres estacions. Font: Elaboració pròpia a partir de dades de Meteocat i Ruralcat.

Índex	Variable	Vielha	Tremp	Tivissa
SPI	Mitjana	0.001	0.001	0.002
	Desviació estandard	0.985	0.987	0.984
	Asimetria	-0.243	0.045	0.598
	Curtosis	2.543	2.906	3.629
	Percentil 25	-0.690	-0.660	-0.676
	Percentil 50	0.067	-0.059	-0.068
	Percentil 75	0.723	0.654	0.606
SPEI	Mitjana	-0.001	0.004	0.007
	Desviació estandard	0.990	0.994	0.995
	Asimetria	-0.027	-0.018	0.010
	Curtosis	2.155	2.628	2.789
	Percentil 25	-0.762	-0.624	-0.651
	Percentil 50	-0.038	-0.056	-0.044
	Percentil 75	0.776	0.652	0.712
PDSI	Mitjana	-0.305	-0.123	0.271
	Desviació estandard	2.114	2.015	1.563
	Asimetria	0.254	0.227	0.813
	Curtosis	2.184	2.657	3.606
	Percentil 25	-1.850	-1.586	-0.724
	Percentil 50	-0.841	-0.409	-0.192
	Percentil 75	1.554	1.319	1.256

La correlació més ben ajustada entre els tres índexs és el SPI i el SPEI per les tres estacions, amb valors superiors a 0,8 (Figura 7) . També, s'observa que el PDSI presenta dos pics de densitat per valors superiors i inferiors a zero. Respecte la correlació entre el PDSI i els altres dos índexs, hi ha valors de la correlació on el PDSI presenta un valor positiu mentre que l'altre índex mostra el valor negatiu, produint una inconsistència en la relació dels índexs.

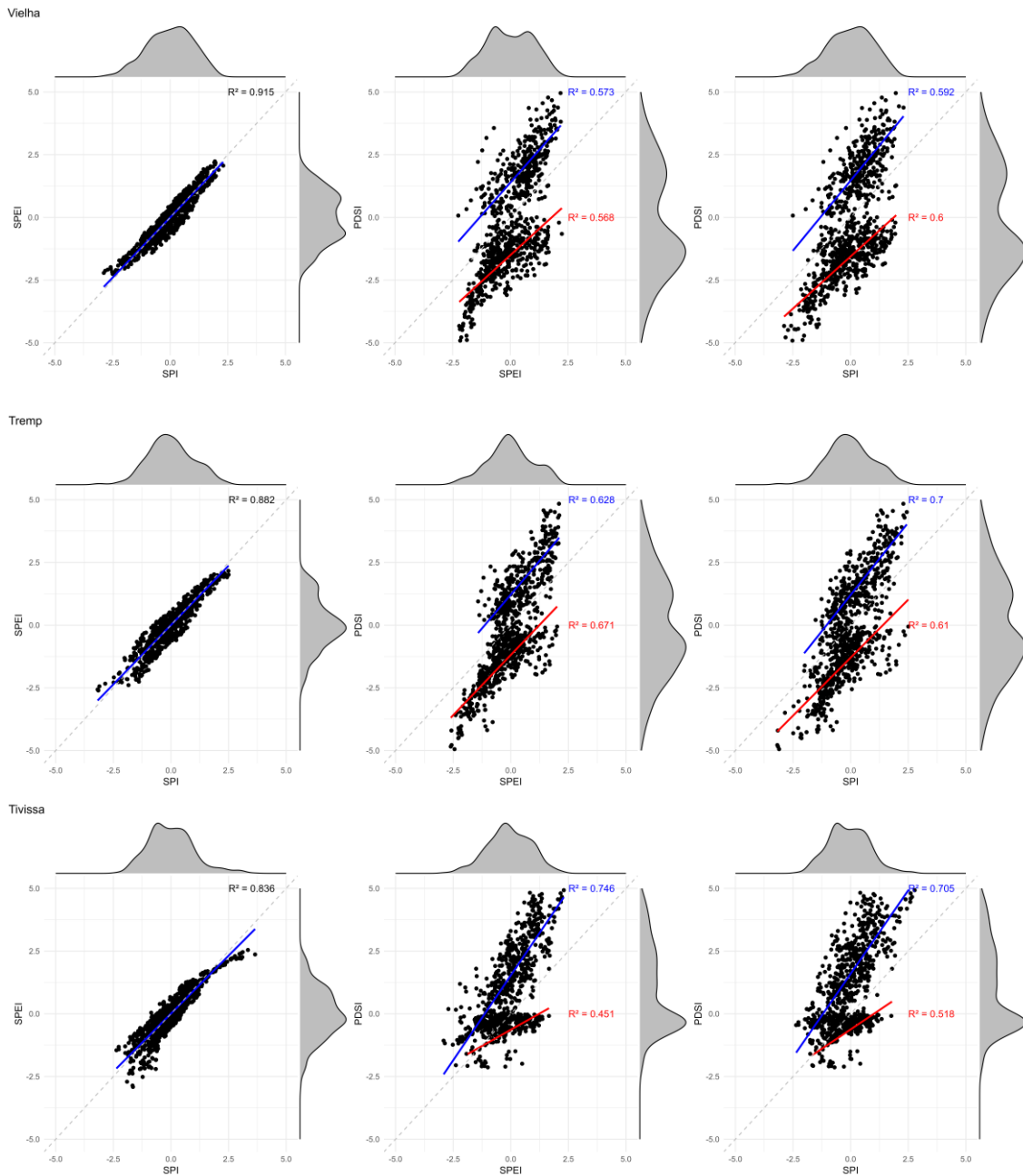


Figura 7. Correlació dels índexs de sequera per les estacions de Vielha, Tremp i Tivissa. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del Meteocat i Ruralcat.

S'observa que a mesura que incrementa el període, el SPEI es desplaça cap a valors més negatius en les tres estacions (Figura 8). Per tant, s'observa una tendència cap a sequeres més intenses i de major durada, ja que incrementa els mesos amb valors negatius. L'estació que presenta sequeres més intenses en l'últim període és Tivissa.

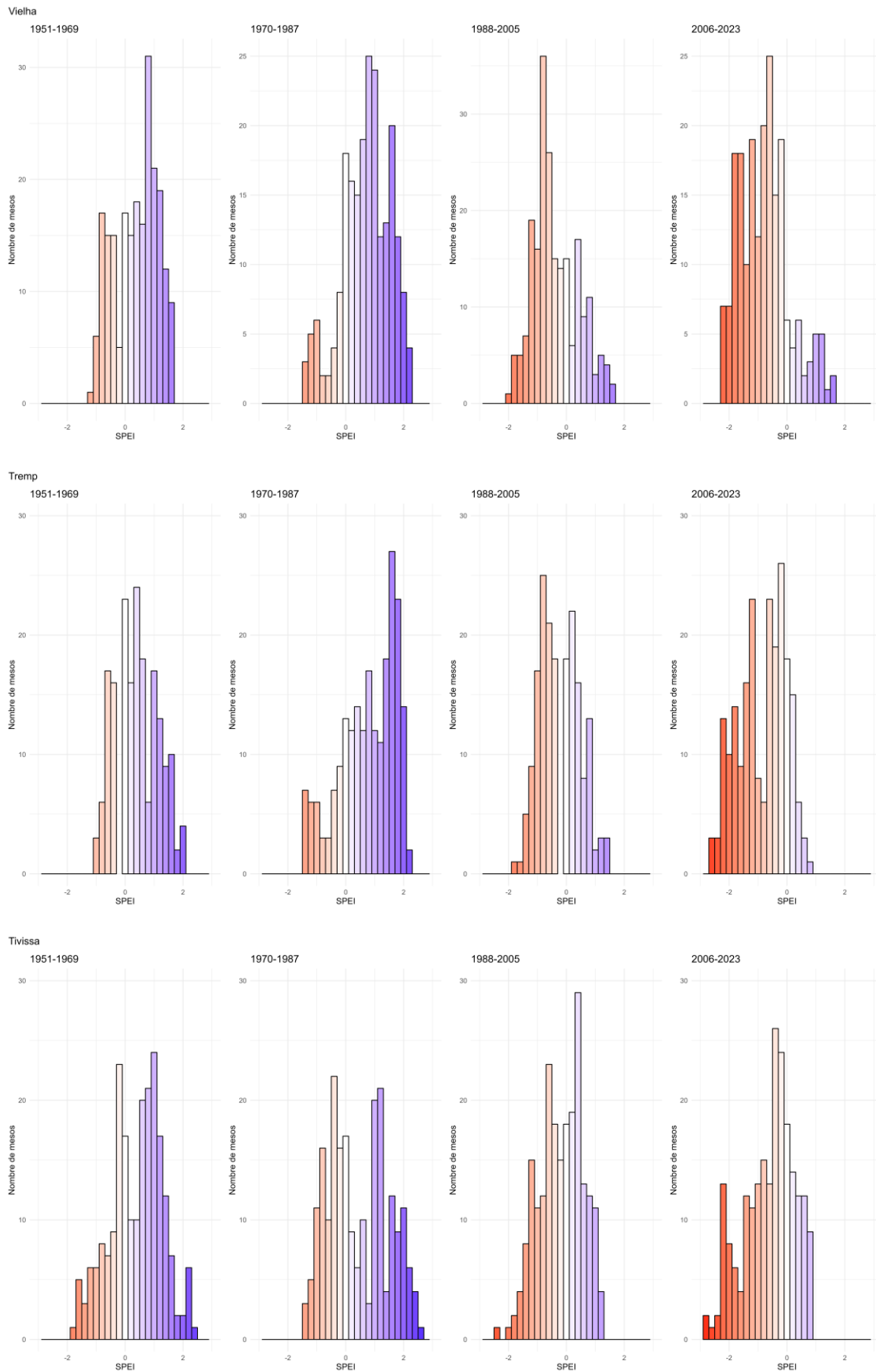


Figura 8. Distribució mensual del SPEI per diferents períodes en les tres estacions. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del Metecat i Ruralcat.

4.3. Anàlisi dels models EUROCORDEX

El model que millor s'ajusta entre els anys 1970 i el 2023 és el model acoblat, el qual és el model que presenta menor RMSE i STD i una correlació més elevada per les dues variables (Figura 9). Les tres localitats mostren que la correlació amb la temperatura és elevada, mentre que la correlació de la precipitació és menor. El millor valor de correlació de precipitació es dona en Tremp, seguit de Tivissa i Vielha.



Figura 9. RMSE, STD i COR pels 16 models EUROCORDEX i el model acoblat. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del AEMET, 2024.

Seguidament, s'ha observat que les mitjanes mensuals del model acoblat difereixen de les mitjanes mensuals registrades en cada estació en els anys 1971-2023 (Figura 10). El grau de variabilitat entre les mitjanes és més elevat en la precipitació mensual que en la temperatura mitjana mensual. Els models de temperatura tendeixen a seguir una tendència mentre que els models de precipitació presenten una elevada variabilitat.

L'estació de Vielha tendeix a sobreestimar els valors de precipitació mensual entre els mesos d'agost i desembre amb valors superiors a 10 mm mensuals. Més al sud, es situa Tremp que presenta una diferència de mitjanes inferior a 5 mm mensuals. Finalment, s'observa que els models subestimen la precipitació mensual a Tivissa, amb valors inferiors a 10 mm mensuals pels mesos de gener, març, abril, novembre i desembre.

Per una altra banda, la temperatura mitjana també presenta diferències de mitjanes en les tres estacions. Vielha, tendeix a sobreestimar la temperatura mitjana entre els mesos de juny i setembre amb valors superiors a 1,5 graus. En el cas de Tremp, s'observa que el model sobreestima la temperatura amb 1,5 graus el mes de desembre. Finalment, l'estació de Tivissa presenta una diferència de mitjana inferior a 1,5 graus en tots els mesos.

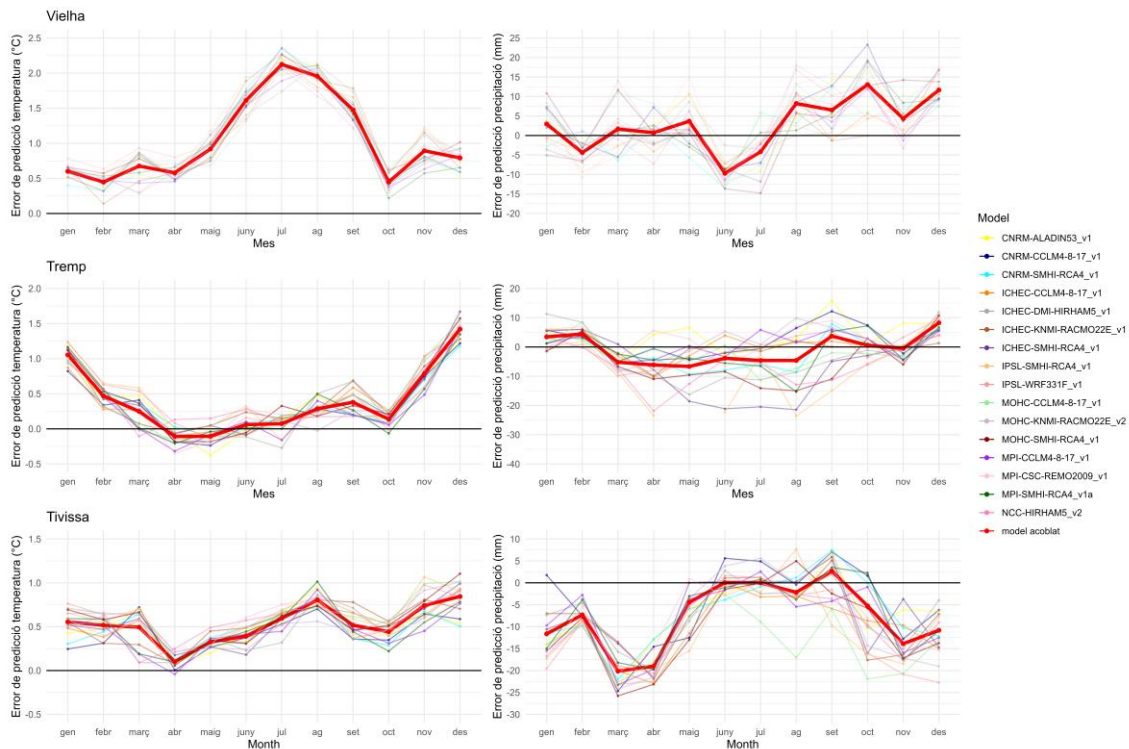


Figura 10. Diferències de mitjanes mensuals de temperatura mitjana i precipitació per les estacions de Vielha, Tremp i Tivissa pels 16 models i el model acoblat. Font: Elaboració pròpia a partir de Meteocat i AEMET.

Respecte les correlacions anuals, la temperatura màxima i mínima anual del model acoblat presenten una temperatura inicial superior a l'ordenada origen de les dades registrades (Figura 11). Tot i això, el pendent és superior en les dades registrades, indicant que el model acoblat no reflecta correctament les dades enregistrades de les estacions (Taula 2). En el cas de la precipitació anual, l'ordenada origen és subestimada pels model acoblat en les tres estacions, però el seu pendent menor, de tal manera que el model no és capaç de predir correctament la predicció de la precipitació (Taula 3). Totes les tendències de temperatura són significatives. En canvi, no totes les tendències de precipitació són significatives.

Pel que fa les correlacions mensuals de temperatura, la majoria de correlacions són significants en les tres estacions (Figura 12). El pendent de la recta de les dades observades és més gran que el pendent de les dades predites. Els mesos predits i els mesos observats no presenten els pendents més elevats en els mateixos mesos. Respecte la precipitació, la majoria de mesos no presenten tendències significatives. A més, hi ha mesos que la precipitació incrementa perquè el pendent de la recta és positiu. Per exemple, les tres estacions registren un augment de precipitació en el mes de Novembre per les dades observades, tot i que aquestes regressions no són significatives.

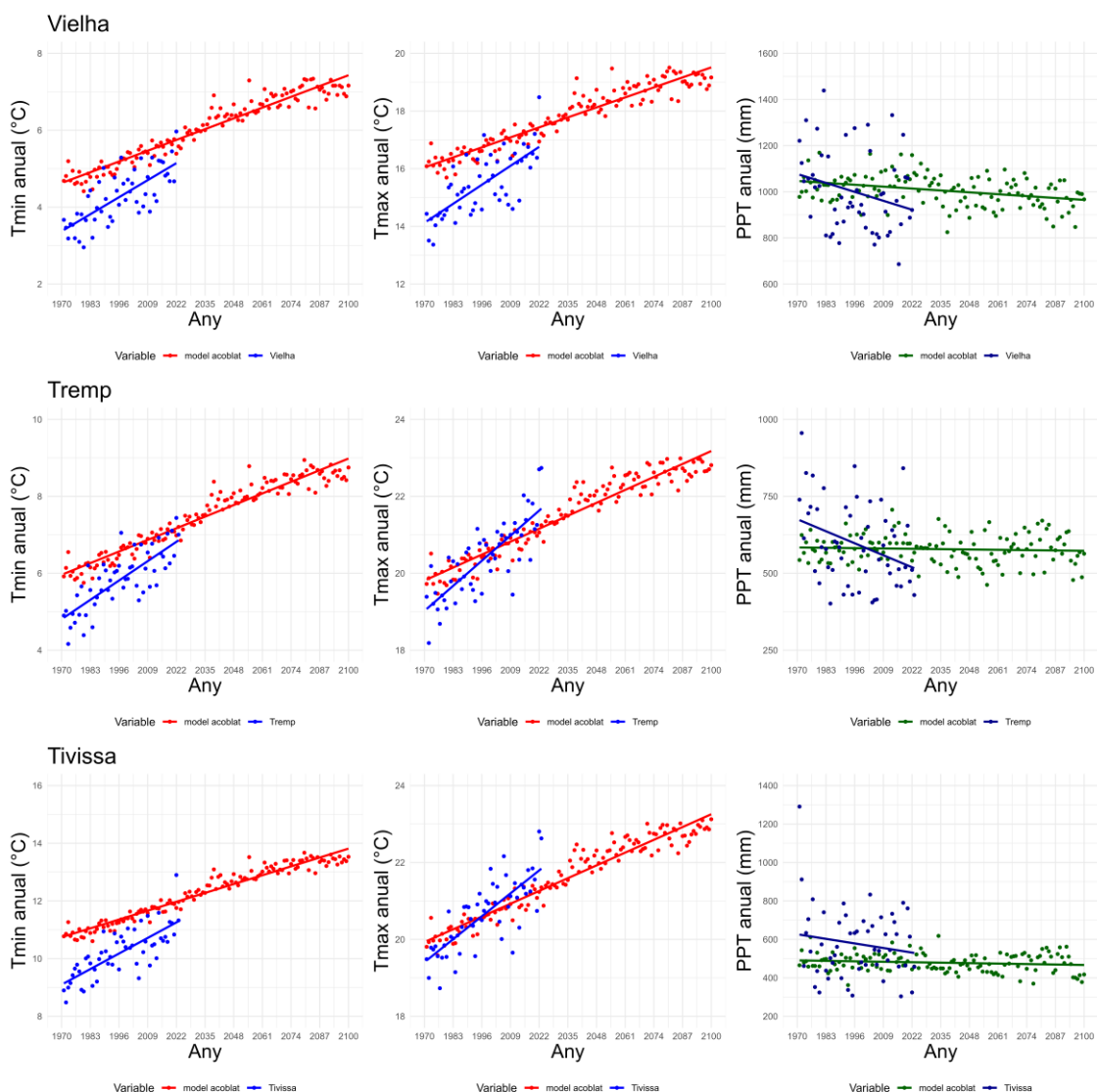


Figura 11. Correlació anual entre el model acoblat i les dades registrades desde el 1971 fins l'any 2022 per Vielha, i l'any 2023 per Tremp i Tivissa. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del Meteocat, AEMET i Ruralcat.

Taula 2. Valors de correlació, p-valors i pendents per les correlacions per la temperatura màxima i mínima de les estacions de Vielha, Tremp i Tivissa. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del Meteocat, AEMET i Ruralcat.

Estació	categoria	Temperatura màxima			Temperatura mínima		
		R ²	P- valor	pendent	R ²	P- valor	pendent
Vielha	predit	0,89	$8,29 * 10^{-65}$	0,026	0,92	$2,88 * 10^{-73}$	0,021
	observat	0,52	$6,02 * 10^{-3}$	0,051	0,54	$3,84 * 10^{-10}$	0,034
Tremp	predit	0,92	$4,36 * 10^{-75}$	0,026	0,93	$3,07 * 10^{-75}$	0,023
	observat	0,63	$1,06 * 10^{-12}$	0,050	0,62	$3,57 * 10^{-12}$	0,038
Tivissa	predit	0,93	$3,5 * 10^{-80}$	0,025	0,94	$1,37 * 10^{-81}$	0,023
	observat	0,60	$8,63 * 10^{-12}$	0,042	0,57	$4,62 * 10^{-11}$	0,041

Taula 3. Valors de correlació, p-valors i pendents per les correlacions per la precipitació mensual de les estacions de Vielha, Trepç i Tivissa. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del Meteocat, AEMET i Ruralcat.

Estació	Categoria	Precipitació		
		R ²	P- valor	pendent
Vielha	predit	0.128	$2.953 \cdot 10^{-5}$	-0.628
	observat	0.006	0.065	-2.973
Trepç	predit	0.004	0.453	-0.083
	observat	0.118	0.010	-3.003
Tivissa	predit	0.02	0.101	-0.183
	observat	0.001	0.264	-1.823



Figura 12. Pendents de la recta per cada correlació mensual per la temperatura mitjana mensual i la precipitació mensual per les estacions de Vielha, Trepç i Tivissa. S'ha indicat les correlacions significatives amb un asterisc. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del Meteocat, AEMET i Ruralcat.

4.4. Projecció del balanç hídric del SPEI

La projecció del balanç hídric mensual, mostra una reducció del valor D temporal (Figura 13). Cada mes de cada estació evoluciona amb una tendència diferent, tot i que la majoria de tendències no són significatives. També, la majoria de R² són molt petites, mostrant una baixa correlació lineal. Tivissa és l'estació que presenta els valors de balanç hídric menors per tots els mesos. No tots els mesos presenten tendències negatives. Per exemple, el mes de Febrer presenta un pendent positiu per les tres estacions (Taula 4, 5 i 6). Les estacions de Vielha i Trepç presenten el màxim pendent negatiu a l'agost mentre que l'estació de Tivissa presenta el màxim pendent negatiu en el mes de maig. Les tendències amb els màxims pendents negatius són significatives.

A més, Vielha és l'estació que presenta el màxim pendent de pèrdua de balanç hídric en el mes d'agost. Aquesta estació és la que presenta els màxims pendents negatius per 8 dels 12 mesos (Taula 4,5 i 6).

Respecte al balanç hídric total anual, Tivissa és la ubicació que perd més percentatge de balanç hídric a nivell anual (Taula 7), comparant la mitjana dels 10 primers anys i els últims 10 anys.

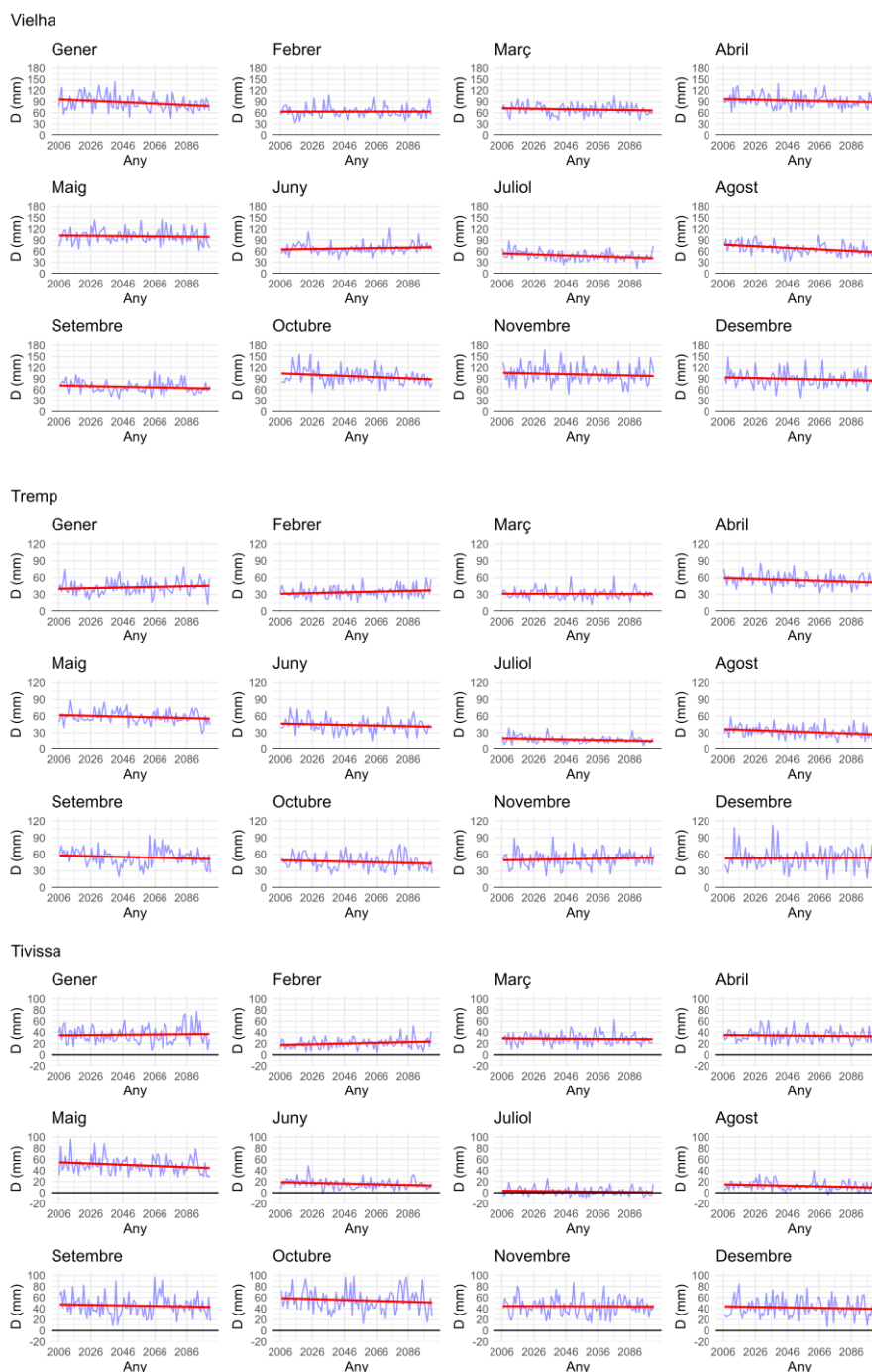


Figura 13. Regressió del valor D del SPEI per cada mes de cada una de les estacions entre els anys 2006 i el 2100. Font: Elaboració pròpia a partir de dades de AEMET.

Taula 4. Valors de la correlació del balanç hídric del SPEI per l'estació de Vielha. Font: Elaboració pròpia a partir de dades de AEMET.

Mes	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny
R²	6.653e-02	1.330e-05	1.470e-02	1.844e-02	3.856e-03	1.364e-02
p valor	1.162e-02	9.720e-01	2.419e-01	1.894e-01	5.500e-01	2.596e-01
Pendent	-5.290e-04	5.266e-06	-1.731e-04	-2.443e-04	-1.137e-04	1.633e-04
Mes	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
R²	8.400e-02	1.437e-01	2.433e-02	5.077e-02	1.070e-02	1.560e-02
p valor	4.386e-03	1.513e-04	1.312e-01	2.814e-02	3.184e-01	2.277e-01
Pendent	-3.744e-04	-5.830e-04	-2.299e-04	-4.595e-04	-2.478e-04	-2.523e-04

Taula 5. Valors de la correlació del balanç hídric del SPEI per l'estació de Tremp. Font: Elaboració pròpia a partir de dades de AEMET.

Mes	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny
R²	1.463e-02	3.387e-02	2.158e-04	4.565e-02	2.947e-02	1.763e-02
p valor	0.243	0.074	0.888	0.038	0.096	0.200
Pendent	1.533e-04	1.805e-04	-1.254e-05	-2.315e-04	-1.871e-04	-1.640e-04
Mes	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
R²	5.145e-02	7.268e-02	1.640e-02	1.735e-02	8.351e-03	2.997e-04
p valor	0.027	0.008	0.216	0.203	0.378	0.868
Pendent	-1.461e-04	-2.728e-04	-1.864e-04	-1.714e-04	1.289e-04	3.192e-05

Taula 6. Valors de la correlació del balanç hídric del SPEI per l'estació de Tivissa. Font: Elaboració pròpia a partir de dades de AEMET.

Mes	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny
R²	1.932e-03	4.302e-02	2.166e-03	4.274e-03	4.148e-02	4.452e-02
p valor	0.672	0.044	0.654	0.529	0.048	0.040
Pendent	6.451e-05	1.802e-04	-4.542e-05	-6.858e-05	-2.972e-04	-1.740e-04
Mes	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
R²	1.353e-02	3.913e-02	4.911e-03	1.269e-02	1.833e-04	5.664e-03
p valor	0.262	0.055	0.500	0.277	0.896	0.469
Pendent	-8.013e-05	-1.593e-04	-1.277e-04	-2.264e-04	-2.165e-05	-1.249e-04

Taula 7. Balanç hídric promig dels anys (2006-2016) i (2090-2100), pèrdua del balanç hídric en valor absolut i en percentatge. Font: Elaboració pròpia a partir de dades de AEMET.

Estació	BH promig (2006-2016)	BH promig (2090-2100)	Pèrdua BH	% perdut
Vielha	988.69	911.92	- 76.77	-7,76%
Tremp	550.97	497.15	- 53.82	-9,77%
Tivissa	407.89	346	- 61.89	- 15,17%

4.5. Estudi de la projecció RCP 4.5 (2006-2100)

Les projeccions del escenari RCP 4.5 no reflecteixen les condicions que es van enregistrar en les tres estacions, ja que els valors positius del SPEI són sobreestimats (Figura 14). El model subestima la durada de les sequeres i la intensitat d'aquestes comparant el període 2006 fins 2022 per Vielha, i del 2023 per Tivissa i Tremp.

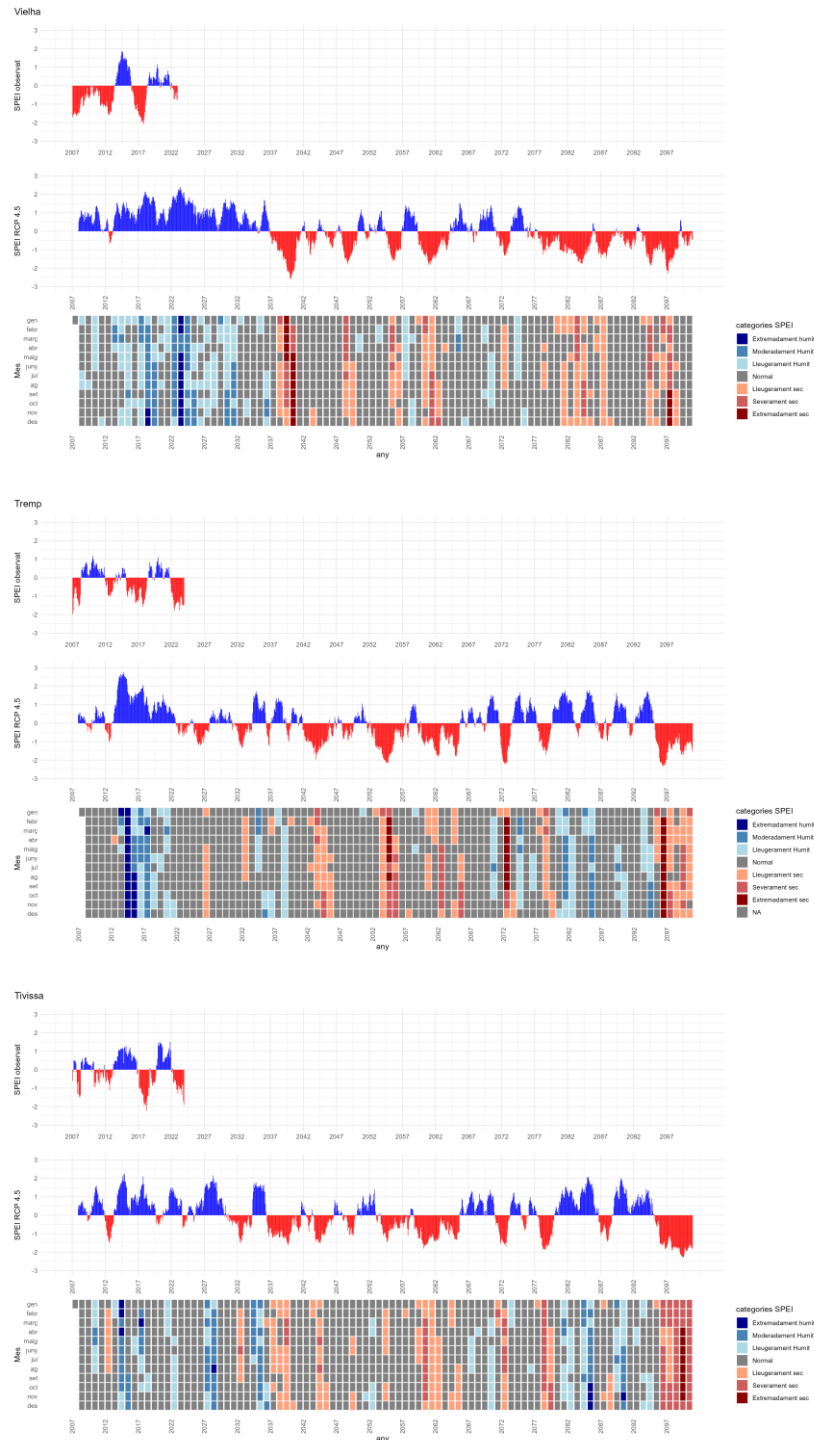


Figura 14. SPEI temporal observat a partir de 2006 fins 2022/23 , SPEI predit per l'escenari RCP 4.5 desde el 2006 fins el 2100 i mapa de calor mensual del valor del SPEI per les tres estacions. Font: Elaboració pròpia a partir de dades de AEMET, Meteocat i Ruralcat.

Les tres estacions tendeixen a disminuir el nombre de mesos humits per cada període, tot i que amb una alta variabilitat (Figura 15). S'observa que en el cas de Vielha, els mesos en categoria normal tendeixen a incrementar en diferents períodes, i que en el següents períodes es redueix aquesta categoria, incrementant les categories de sequera. Trep i Tivissa no mostren aquesta tendència, ja que presenten mesos humits en el últim període 2081-2100.

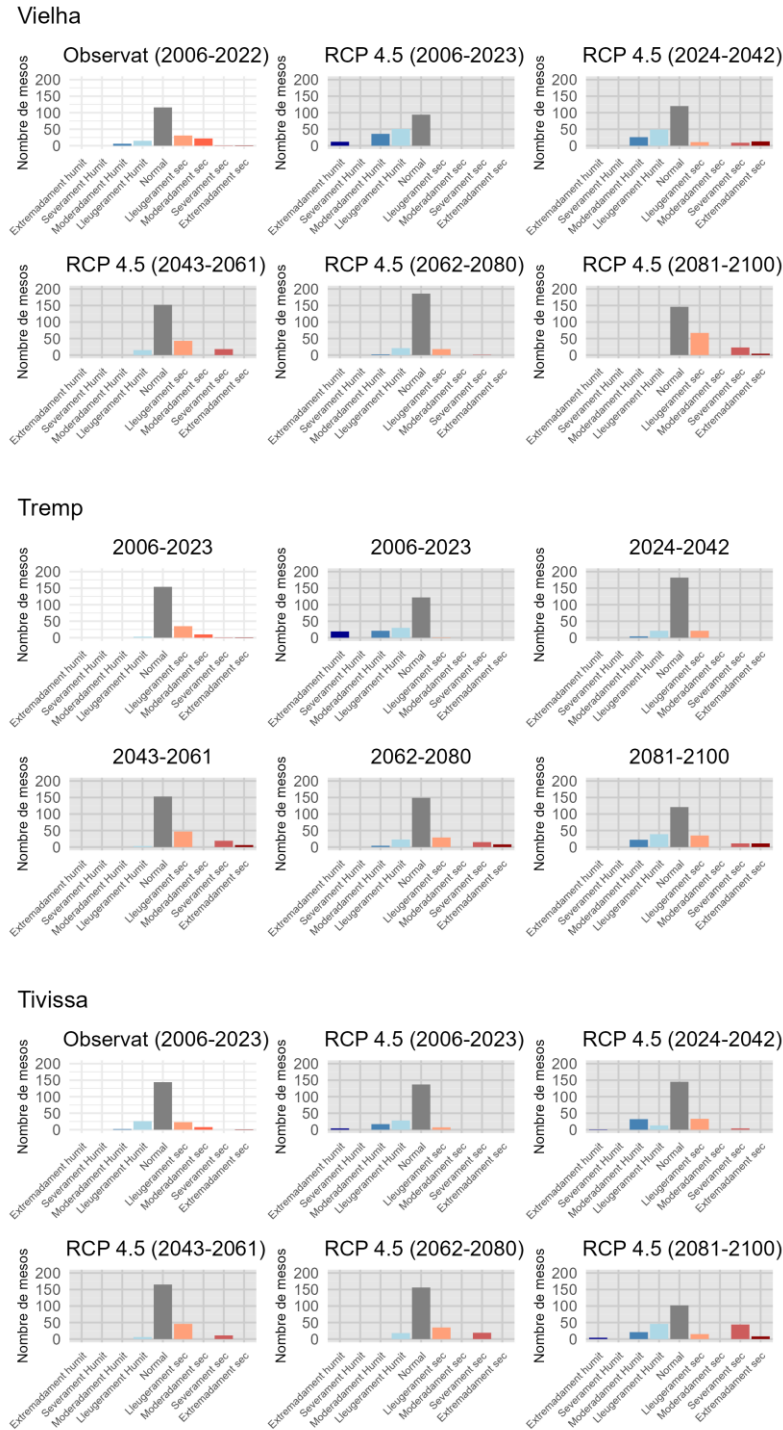


Figura 15. Histogrames dels mesos en funció de la categoria de SPEI dividits pel període observat i els períodes RCP 4.5 per les estacions de Vielha, Trep i Tivissa. Font: Elaboració pròpia a partir de dades AEMET, Meteocat i Ruralcat.

Pel que fa a la freqüència de percentils, el model acoblat de cada estació subestima el valor del SPEI registrat en les estacions respecte el percentil 50 (Figura 16). Per exemple, el SPEI observat a Vielha en el percentil 50 presenta un valor proper a -0,5 mentre que el predit preveia un SPEI de 1. No sempre hi ha una relació directe entre el període i la disminució del SPEI en el percentil 50. Per exemple, en el cas de Tremp i Tivissa s'observa que el spei amb menor valor respecte el percentil 50 pertany al període 2043-2061.

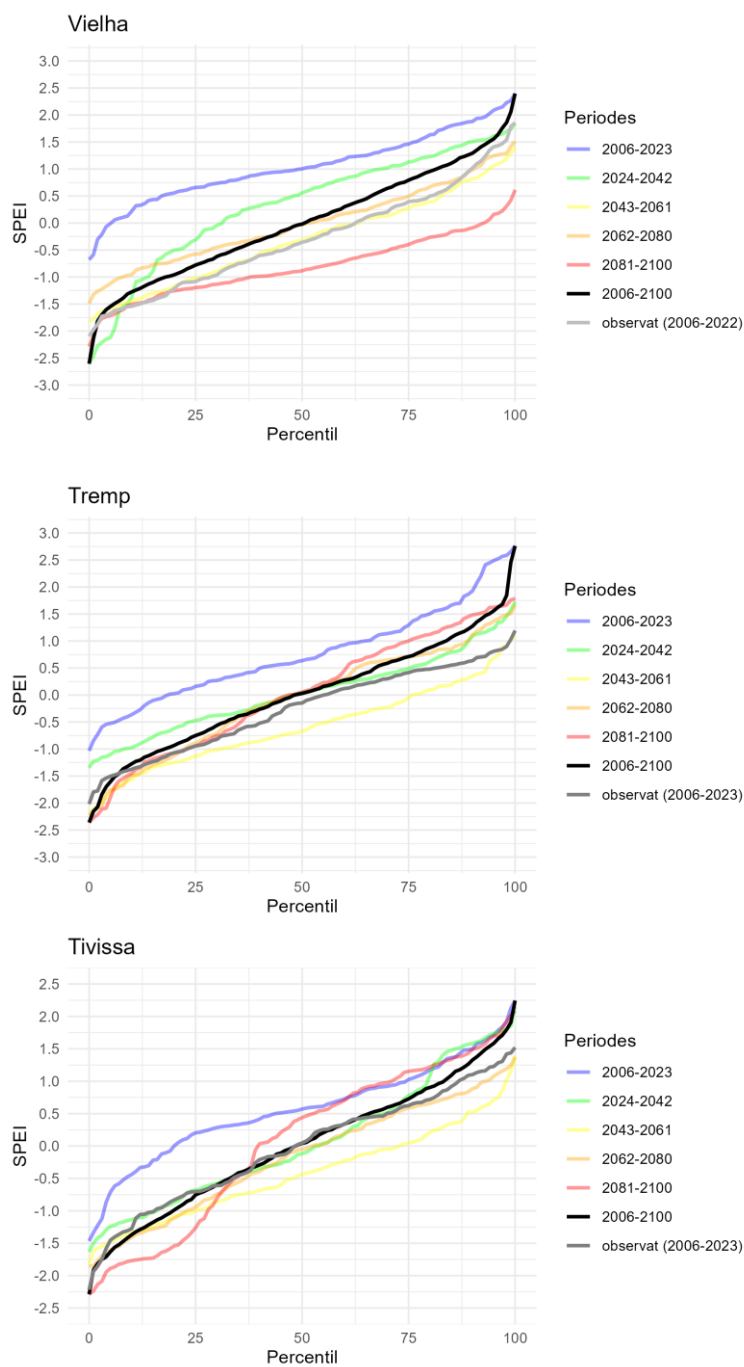


Figura 16. Variació dels percentils del SPEI pel períodes observat i pels períodes RCP 4.5 per les estacions de Vielha, Tremp i Tivissa. Font: Elaboració pròpia a partir de dades de AEMET, Meteocat i Ruralcat.

Respecte la intensitat, s'observa que el període observat és més sever que el primer període predit per les tres estacions (Figura 17). Per tant, el model RCP 4.5 subestima la intensitat mediana dels esdeveniments de sequera. Respecte l'estació de Vielha, a mesura que incrementa el temps, la mediana del SPEI tendeix a disminuir, indicant un augment en la intensitat de les sequeres. No s'observa la mateixa tendència per Tremp i Tivissa, ja que la major intensitat es registra en el període 2043-2061. L'estació amb una intensitat mediana major pel període (2081-2100) és Vielha. L'estació amb una intensitat mediana menor pel període (2081-2100) és Tivissa.

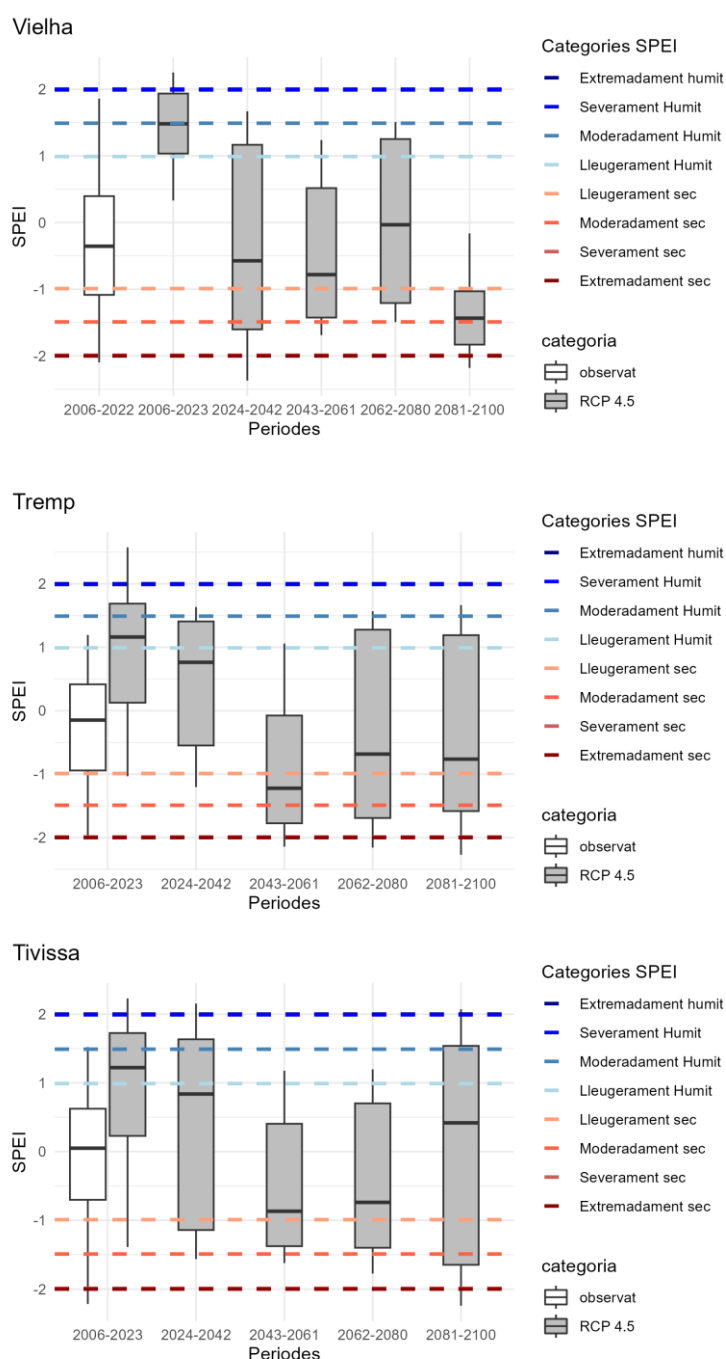


Figura 17. Diagrames de caixes del valor SPEI pel període observat i els períodes RCP 4.5 per les estacions de Vielha, Tremp i Tivissa. Font: Elaboració pròpia a partir de dades de AEMET, Meteocat i Ruralcat.

Pel que fa a la durada de les sequeres de cada període, s'observa un patró d'increment de mesos en sequera al llarg del temps (Figura 18). En les tres estacions hi ha una gran inconsistència, entre les dades RCP 4.5 i les dades observades. Igual que s'ha comentat anterior, les dades predites del primer període RCP 4.5 de les tres estacions subestimen les sequeres. Com més incrementa el període, més mesos de sequera es registren, i més secs són aquests. Tot i això, hi ha excepcions. Per exemple, el període 2043-2061 de Tremp presenta més mesos de sequera que pel període 2062-2080. Vielha és l'estació que presenta més mesos secs pel últim període (2081-2100).

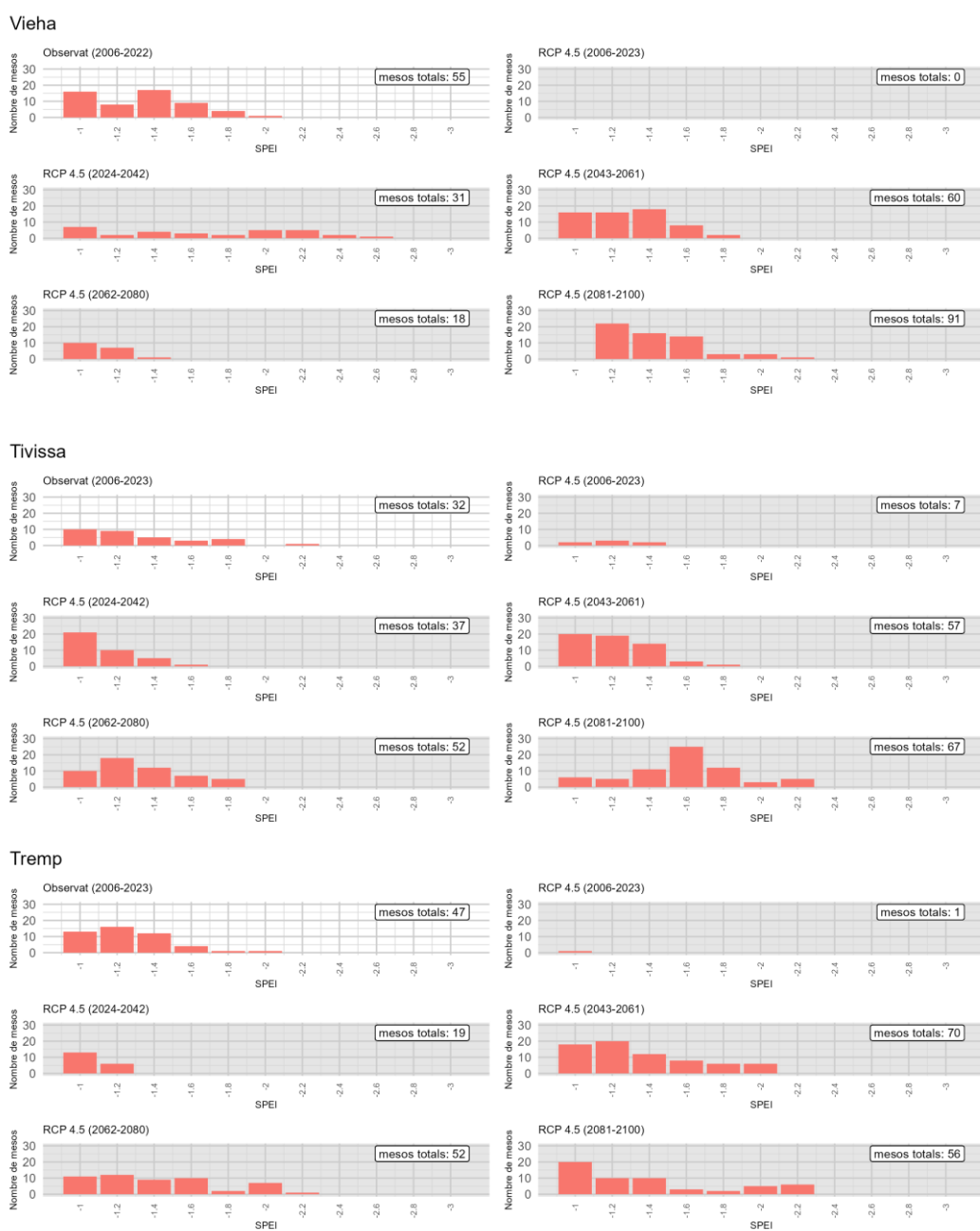


Figura 18. Histograma dels valors de SPEI inferiors a -1 pel períodes observat i pels períodes RCP 4.5 per les estacions de Vielha, Tremp i Tivissa. També s'ha anotat el nombre de mesos en sequera per cada període. Font: Elaboració pròpia a partir de dades de AEMET, Meteocat i Ruralcat.

5. DISCUSSIÓ

En primer lloc, s'ha observat que l'índex SPEI és el índex que millor s'ajusta dels tres (Taula 1). Aquest resultat obtingut és consistent amb el article (Stagge et al., 2014). Aquest article explica que quan es compara el índex SPI i SPEI, el SPI no té en consideració, ni la temperatura mitjana ni el valor de evapotranspiració el qual presenta una influència elevada a l'estiu al mediterrani i al nord d'Europa de tal manera que limita el índex SPI. A més, l'estudi també menciona que dintre dels mètodes per calcular l'evapotranspiració, Thornthwaite és el mètode menys precís. Tot i això, en aquest TFG, degut a la manca de disposició de les variables requerides per computar aquests mètode més complexos, s'ha hagut d'emprar Thornthwaite.

D'altra banda, en el nostre estudi, el PDSI també presenta limitacions. Això es deu a la dificultat per calcular el valor AWC. Hi ha múltiples factors que influencien el AWC. Alley (1984) explica que el balanç hídric de l'índex no té en compte el desenvolupament vegetal en el sòl, la qual cosa, és una variable que influencia a la capacitat del sòl per poder retenir aigua. Aquests desenvolupament vegetal, entre altres factors, produeix que el valor AWC no sigui un valor constant al llarg del temps.

Les correlacions dels índexs són consistents amb la literatura presentada per Vicente-Serrano i altres autors (2014) i també amb l'anterior citat (Stagge et al., 2014). Els autors del primer article citat (Vicente-Serrano et al., 2014) indiquen que els valors de correlació entre els dos índex, SPI i SPEI es situen entre 0.65-0.95. Aquest estudi mostra que la correlació del SPI i SPEI són elevades mentre que les correlacions del PDSI són baixes. A més, el rang de correlació del SPI i el SPEI sempre és positiu, mentres que el PDSI pot presentar valors positius i negatius de correlació.

Respecte les prediccions dels models RCP 4.5, un altre estudi (Colmet-Daage et al., 2018), assenyala els errors al model EUROCORDEX. Els models RCM tendeixen a sobreestimar les precipitacions a les regions muntanyoses i subestimar les precipitacions a les regions costaneres.

Pel que fa a la temperatura, una altra recerca (Careto et al., 2002) menciona que la temperatura diürna tendeix a ser sobreestimada en algunes regions i que hi ha dificultats per registrar correctament les temperatures inferiors a 0 graus. A més, les localitzacions més a l'interior presenten un increment de DAV (distribució de valor afegit) de temperatura més elevat que les costes, consistent amb els resultats d'aquest TFG (figura 10). Per altra banda, els mateixos autors també afegeixen que el mètode de reducció de l'escala emprat en el EUROCORDEX és convenient per les costes. Tot i això, també indiquen que els valors introduïts són poc realistes a causa de la interpolació i la orografia. A més, aquest mètode no té en consideració la interacció entre el sòl i l'atmosfera, la qual és un factor que afecta a la temperatura.

Els resultats dels anàlisis de les projeccions d'aquest TFG s'han contrastat també amb una recerca el qual ha investigat la projecció climàtica de les àrees del Fluvià, Tordera i Siurana (Lopez-Bustins et al., 2013). Aquest estudi mostra quatre conclusions rellevants que a continuació es comparen amb els resultats d'aquest treball. La primera conclusió és que la projecció climàtica en el període de 1985-2000 només presenta períodes humits. Aquest fet és inconsistent amb els resultat obtinguts en aquest treball (mesurat a través del gràfic SPEI no introduït a l'apartat de resultats), que mostren mesos humits i secs pels passats corregits entre 1971-2005.

La segona conclusió de López-Bustins i altres autors (2013), prediuen que les sequeres seran més severes i més llargues a partir del 2050 al sud de Catalunya. Aquest fet és consistent amb els resultats obtinguts en aquest TFG ja que Tivissa presenta una severitat mitjana major en els tres últims períodes comparat amb el període 2024-2042, i també amb el nombre de mesos secs per període. La tercera conclusió assenyala (Lopez-Bustins et al., 2013) que les sequeres del final del segle seran més intenses i severes que la sequera registrada entre 2006-2008, fet consistent amb els resultats obtingut en el TFG. Per últim, la quarta conclusió indica que els esdeveniments extremadament secs del SPEI tendeixen a desaparèixer al llarg del temps, fet inconsistent amb els resultats del TFG. Aquest fet és incoherent amb els resultats obtinguts ja que els histogrames i els percentils no mostren una disminució clara dels mesos extremadament secs (Figura 15 i 16).

6. CONCLUSIONS

This TFG exposes distinct conclusions.

Firstly, there is a clear pattern of an increased temperature from observed and predicted data since 1971. This consistency is also found in the RCP 4.5 projection annual data with significant tendencies and high R^2 values. Despite that, the increase rate in temperature of projected data differs from observed data stations, where the RCP model underestimated the slope. Also, the mean monthly average temperature is overestimated from 1971-2023 due to how the EUROCORDEX models were designed, especially for Tivissa, with a clear deviation of the mean in the summer. Furthermore, the increase rate is significant in most of the months. But, again, there are discrepancies in the slope between observed and predicted data.

Secondly, all the stations present a tendency to reduce precipitation annually, but the rate of decrease differs from observed and predicted data. Also, the correlations R^2 values are poor and most of them are not significant. As with the temperature, the slope is underestimated. The mean average precipitation is underestimated in the coast and overestimated in Pyrenees. When looking at month tendencies, the majority of months slopes of each station are not significant. In addition, some months have a positive significant statistical slope.

Thirdly, the area that loss more water balance in absolute is Vielha, while Tivissa is the are most affected site because its value of D is the lowest of all of them, where in July the D value fluctuates around 0.

Finally, there is a discrepancy between observed and predicted SPEI. Also, each place performs in unique way. In the first place, histograms tend to show a tendency to drought conditions, but high variability. In second place, severity, frequency and duration of droughts are not always worse in the last part of the century (2100). Only for Vielha is there a direct relationship, were the last period (2081-2100) has the lowest percentile at 50, the less average value of SPEI and the biggest number of droughts months. Additionally, not always the three categories are directly linked. For instance, Tivissa has the biggest median severity in the period 2043-2061, but the period that accumulates more drought months is 2081-2100.

In summary, this research shows the tendencies of drought periods from historical meteorological record data and from climate projections. This analysis indicates that dry periods, of distinct intensities, has increased from 1950 to 2023, and will also be more frequent in the future. Nevertheless, comparison of historical vs projected data shows that EUROCORDEX projections since 1970 present discrepancies with observed T and P records; therefore the drought analysis based on climate projections should be carefully considered. Nevertheless, a clear tendency to drier conditions will occur, affecting the availability of water resources in the studied areas from the Pyreness to the Mediterranean coast, being a warning to water resources managers and to all stakeholders and agents, and society as a whole, about future occurrence of droughts

Agraïments. - Agraïm a la Comissió Europea i a la Agencia Española de Investigación, el finançament en el marc del consorci internacional col·laboratiu TREASURE (PCI2024-153494) finançat en virtut de la convocatòria conjunta de 2022 de l'Associació Europea 101060874 — Water4All.

7. BIBLIOGRAFIA

AEMET. (s.d). *AdaptCCa.es: Visor de Escenarios de Cambio Climático*. Recuperat el 25 de maig de 2024 de: https://escenarios.adaptecca.es/#&model=EURO-CORDEX-EQM.average&variable=tasmax&scenario=rsp85&temporalFilter=year&layers=AREAS&period=MEDIUM_FUTURE&anomaly=RAW_VALUE

Careto, J. A. M., Soares, P. M. M., Cardoso, R. M., Herrera, S., & Gutiérrez, J. M. (2022). Added value of EURO-CORDEX high-resolution downscaling over the Iberian Peninsula revisited- Part 2: Max and Min temperature. *Geoscientific Model development*, 15, 2653-2671. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-2653-2022>

Colmet-Daage, A., Sanchez-Gomez, E., Ricci, S., Llovel, C., Borrell Estupiñá, V., Quintana-Seguí, P., Llasaft, M. C., & Servat, E. (2018). Evaluation of uncertainties in mean and extreme precipitation under climate change for northwestern Mediterranean watersheds from high-resolutions Med and Euro-CORDEX ensembles. *Hydrology and Earth System services*, 22(2), 673-687. <https://doi.org/10.5194/hess-22-673-2018>

CSIC. (s.d). *About the SPEI: Drought monitoring and analysis based on climatic indices*. Recuperat el 5 de maig de 2024 de: <https://spei.csic.es/home.html>

Lopez-Bustins, J. A., Pascual, D., Pla, E., & Retana, J. (2013). Future variability of droughts in three Mediterranean catchments. *Natural Hazards*, 69(1), 1405-1421. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0754-3>

López-Franca, N., Gámiz-Fortis, S. R., Castro-Díez, Y., Esteban-Parra, M. J., & Cárdenas-Castro, C. (2013). Dry spells analysis over the Mediterranean basin for present climate and climate change conditions using ENSEMBLES regional climate models. *Revistas UCM: Física de la Tierra*, 25 (1), 123-136. <https://revistas.ucm.es/index.php/FITE/article/view/43439/41093>

Generalitat de Catalunya. (2016). *Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. <https://Martín-Jide.gencat.cat/web/.content/Documents/Publicacions/tercer-informe-sobre-canvi-climatic-catalunya/TERCER INFORME CANVI CLIMATIC web.pdf>

Hiederer, R. (2013). *Mapping soil typologies - Spatial decision support applied to European soil database* (EUR25932EN). Luxembourg: Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2788/87286>

IDMP. (2022). *Drought and Water Scarcity: Integrated Drought Management Programme*. https://www.droughtmanagement.info/literature/1284_IDMP_Water_Scarcity_Report.pdf

IDMP. (s.d). *Standardized Precipitation Index (SPI)*. Recuperat el 15 de maig de 2024 de: <https://www.droughtmanagement.info/standardized-precipitation-index-spi/>

IPCC. (s.d). *Climate change 2021: The Physical Science Basis*. Recuperat el 15 de maig de 2024 de: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Martín-Vide, J. (Ed.). (2016). *Tercer informe sobre el Canvi climàtic a Catalunya*. Publicació del consell. <https://cads.gencat.cat/ca/detalls/detallpublicacio/Tercer-informe-sobre-el-Canvi-Climatic-a-Catalunya>

Meteocat. (s.d). *Series climàtiques des de 1950*. Recuperat el 5 d'abril de 2024 de: <https://www.meteo.cat/wpweb/climatologia/dades-i-productes-climaticos/series-climatiques-des-de-1950/>

Mishra, A. & Singh, V. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1), 202-216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>

Montes-Vega, M. J., Guardiola-Albert, C., & Rodríguez-Rodríguez, M. (2023). Calculation of SPI, SPEI and GRI for historical data from Doñana National Park: Forecasting climatic series (2030-2059), using two climatic scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5 by IPCC. *Water*, 15 (13), 1-15. <https://doi.org/10.3390/w15132369>

Nam, W.-H., Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Tadesse, T., & Wilhite, D. A. (2015). Drought Hazard assesment in the context of climate change for South Korea. *Journal of Environmental Management*, 160, 106-117. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.029>

NCAR. (s.d). Palmer Drought Severity Index (PDSI). Recuperat el 5 de maig de 2024 de: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/palmer-drought-severity-index-pdsi>

Navarro-Racines, C., Tarapues, J., Thornton, P., Jarvis, A., & Ramirez-Villegas, J. (2020). High-resolution and bias corrected CMIP5 projections for climate change impact assessments. *Scientific data*, 7, 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0343-8>

Paulo, A. A., Rosa, R. D., & Pereira, L. S. (2012). Climate trends and behaviour of droughts indices based on precipitation and evaporatranspiration in Portugal. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(5), 1481-1491. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-1481-2012>

R documentation. (s.d). Function to calculate Thorntwhaite potential evaporatranspiration. Recuperat el 22 de maig 2024 de: <https://search.r-project.org/CRAN/refmans/bioclim/html/thornthwaite.html>

Rathore, S. (s.d). *STANDARIZED PRECIPITATION INDEX (SPI)*. Recuperat el 14 de maig de 2024 de: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Ruralcat. (s.d). *Dades agrometrològiques*. Recuperat el 20 d'abril de 2024 de: https://ruralcat.gencat.cat/web/guest/agrometeo.estacions?p_auth=QncZPUQk&p_p_id=AgrometeoEstacioxns_WAR_AgrometeoEstacions100SNAPSHOT&p_p_lifecycle=1&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_pos=2&p_p_col_count=4&AgrometeoEstacions_WAR_AgrometeoEstacions100SNAPSHOT_action=goEstacion

Stagge, J. H., Tallaksen, L. M., Xu, C.-Y., & van Lanen, H. A. J. (2014). Standardized precipitation-evaporatranspiration index (SPEI): Sensitivity to potential evaporatranspiration model and parameters. *IAHS-AISH Proceedings and Reports series*, 363, 367-373. <https://iahs.info/uploads/dms/16617.66-367-373-363-55-Paper-213-Stagge.pdf>

Vasquez, K. How Charles Keeling Measured the Rise of Carbon Dioxide. (20 d'abril de 2021). <https://daily.jstor.org/how-charles-keeling-measured-rise-carbon-dioxide/>

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2009). A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23, 1698-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J. J., López-Moreno, J. I., Azorín-Molina, C., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E., & Sánchez-Lorenzo, A. (s.d). ANÁLISIS COMPARATIVO DE DIFERENTES ÍNDICES DE SEQUÍA PARA APLICACIONES ECOLÓGICAS, AGRÍCOLAS E HIDROLÓGICAS. *Asociación Española de climatología*, 680-689. https://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/02/0066_PU-SA-VIII-2012-SM_VICENTE.pdf

Wells, N., Goddard, S., & Hayes, M. (2004). A self-calibrating Palmer Drought severity index. *Papers in Natural RESOURCES*, 17, 2335-2351. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<2335:ASPDSI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2335:ASPDSI>2.0.CO;2)

World Bank. (2019). *Assesing Drought Hazard and Risk: Principles and Implementation Guidance*. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/989851589954985863/pdf/Assessing-Drought-Hazard-and-Risk-Principles-and-Implementation-Guidance.pdf>