



Facultad de Ciencias

**EVENTOS CLIMÁTICOS COMPUESTOS EN
ESPAÑA: CARACTERIZACIÓN,
EVALUACIÓN DE MODELOS Y
PROYECCIONES FUTURAS**

**Compound climate events in Spain:
Characterization, model evaluation and future
projections**

Trabajo de Fin de Máster
para acceder al

MÁSTER EN CIENCIA DE DATOS

Autor: Miriam Fuente González

**Directores: Rodrigo García Manzanas
Ana Casanueva Vicente**

Septiembre - 2024

Resumen

En este Trabajo Fin de Máster se presenta un análisis detallado de eventos climáticos extremos compuestos (CE, del inglés) sobre la España peninsular y las Islas Baleares. En concreto, se pone el foco en la combinación de temperaturas elevadas y condiciones de sequía, que ha sido raramente estudiada hasta la fecha a pesar de tener el potencial de provocar impactos muy negativos sobre la agricultura.

Para ello se han considerado tanto registros observacionales (para un periodo histórico reciente), como simulaciones de un Modelo Regional del Clima (RCM). Mientras que las primeras se utilizan para caracterizar adecuadamente los CE, las segundas permiten proyectar su evolución futura durante las próximas décadas, para lo cual es necesario algún tipo de postproceso estadístico que permita corregir los errores sistemáticos del RCM. En este contexto, se evalúa la idoneidad de dos métodos de corrección de sesgos distintos.

En cuanto al método de calibración, se ha aplicado una validación cruzada con $k=2$ que ha mostrado que el método que corrige todos los percentiles de la distribución de temperaturas y precipitación es el más adecuado para realizar los ajustes en este estudio. Los sesgos correspondientes a los CE se han reducido casi por completo, a pesar de que el ajuste se ha realizado sobre las variables de temperaturas y precipitación.

Los resultados obtenidos indican que la frecuencia de los CE estudiados aumentaría en torno a un 25% para el último tercio del siglo, particularmente en verano y sobre la costa Mediterránea y la meseta norte.

Palabras clave: *eventos climáticos extremos compuestos, modelos regionales del clima, métodos de corrección de sesgos, índice de evapotranspiración estandarizado, cambio climático*

Abstract

This Master Thesis presents a detailed analysis of compound climate extreme events (CE) over mainland Spain and the Balearic Islands. In particular, it focuses on the combination of high temperatures and drought conditions, which has been rarely studied to date despite having the potential to cause very negative impacts on agriculture.

For this purpose, both observational records (for a recent historical period) and simulations of a Regional Climate Model (RCM) have been considered. While the firsts ones are used to adequately characterise the CE, the latter allow their future evolution to be projected over the next decades, for which some type of statistical post-processing is necessary to correct the systematic errors of the RCM. In this context, the suitability of two different bias correction methods is evaluated.

As for the calibration method, a cross-validation with $k=2$ has been applied, which has shown that the method that corrects all percentiles of the temperature and precipitation distribution is the most suitable for making the adjustments in this study. The biases corresponding to the CE have been almost completely reduced, despite the adjustment has been made on the temperature and precipitation variables.

The results obtained indicate that the frequency of the studied CEs would increase by around 25% for the last third of the century, particularly in summer and over the Mediterranean coast and the northern plateau.

Keywords: *compound extreme climate events, regional climate models, bias correction methods, standardised evapotranspiration index, climate change*

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis directores Rodrigo García Manzanos y Ana Casanueva Vicente, por su tiempo, esfuerzo, dedicación y amabilidad durante esta investigación. Les agradezco enormemente haberme dado la oportunidad de participar en este proyecto y la confianza depositada en mí.

Y en segundo lugar, quiero dar las gracias a mi familia, en especial a mis padres y mi hermano, por el apoyo incondicional que me han brindado en todo momento.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estructura	2
2. Datos	5
2.1. Observaciones	5
2.2. Modelos Regionales del Clima	6
3. Metodología	9
3.1. Eventos extremos compuestos	9
3.2. Índice de sequías: SPEI	11
3.3. Análisis de tendencias	12
3.4. Corrección de sesgos	13
3.5. Validación cruzada	16
3.6. Métricas de validación	17
4. Resultados y Discusión	19
4.1. Variables climáticas esenciales	19
4.1.1. Observaciones: Climatologías y tendencias	19
4.1.2. Simulaciones con un Modelo Regional del Clima	21
4.2. Eventos extremos compuestos	27
4.2.1. Observaciones: Climatologías y tendencias	27
4.2.2. Simulaciones con un Modelo Regional del Clima	28
4.3. El índice SPEI	30

4.3.1. Simulaciones con un Modelo Regional del Clima	30
5. Principales conclusiones y trabajo futuro	37
5.1. Conclusiones principales	37
5.2. Trabajo Futuro	38
5.3. Reproducibilidad de los resultados	39
5.4. Contexto de la investigación	39
 Bibliography	 41

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1. Motivación

El cambio climático es uno de los desafíos más significativos a nivel global, ya que tiene efectos potenciales sobre la mayoría de sectores socio-económicos (salud, agricultura, turismo, etc.). El aumento de las temperaturas medias globales durante las últimas décadas han provocado olas de calor y eventos extremos cálidos más frecuentes (Hartmann et al., 2013). Los eventos extremos compuestos, que consisten en la combinación de dos o más factores climáticos, tienen el potencial de aumentar el efecto de cada uno de ellos por separado (Ionita et al., 2021). En concreto la combinación de temperaturas extremas con otros fenómenos climáticos, como la sequía puede derivar en impactos más graves (Casanueva et al., 2020). En el caso de la agricultura, se ha comprobado que la combinación de estos dos fenómenos afecta negativamente a la producción y desarrollo de los cultivos (Wu and Jiang, 2022).

Sin embargo, la mayoría de los estudios que se han llevado a cabo hasta el momento en el ámbito de los extremos climáticos se han centrado únicamente en eventos univariados. A nivel nacional, los escenarios desarrollados dentro del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) proporcionan proyecciones para índices como el número de heladas y de días secos consecutivos. Sin embargo, no se aporta información alguna sobre índices extremos compuestos. A nivel internacional, la Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ha impulsado el desarrollo de varias iniciativas para promover la agricultura

sostenible y productiva. Sin embargo, estos proyectos se basan en índices meteorológicos extremos univariados, sin tener en cuenta los eventos compuestos. Por tanto, el principal objetivo de este estudio es caracterizar un tipo concreto de eventos extremos compuestos (combinación de temperaturas altas y condiciones de sequía) y observar su comportamiento en el futuro sobre la España peninsular y Baleares. Para ello se utilizará un Modelo Regional del Clima de alta resolución del proyecto CORDEX-CORE, que requerirá un adecuado postproceso estadístico.

1.2. *Objetivos*

Basándonos en las anteriores consideraciones, este Trabajo Fin de Máster tiene tres objetivos fundamentales en relación a los eventos extremos compuestos y los episodios de sequía en España:

- Cuantificar su frecuencia de ocurrencia, así como sus tendencias de cambio durante las últimas décadas.
- Evaluar la utilidad de un Modelo Regional del Clima para simularlos. Para ello se analizará el efecto de dos métodos distintos de corrección de sesgos.
- Dar una estimación de su evolución futura (hasta final de siglo) bajo un escenario de calentamiento global.

1.3. *Estructura*

La estructura que sigue este Trabajo de Fin de Máster consta de cinco capítulos. Cada uno de ellos aborda ciertos aspectos del estudio que se ha llevado a cabo sobre la caracterización de eventos extremos compuestos mediante el ajuste estadístico de sesgos en simulaciones del clima haciendo uso de métodos univariados.

El presente capítulo destaca la motivación por la que se ha decidido realizar este Trabajo, así como los objetivos del mismo. Además presenta una breve descripción de la estructura del documento.

El Capítulo 2 describe qué tipo de datos han sido utilizados, así como el área geográfica en la que se ha llevado a cabo el estudio. Además, proporciona información sobre el tipo de simulaciones que han sido utilizadas, que provienen de Modelos Regionales del Clima (RCM, por sus siglas en inglés).

El marco teórico y la metodología que se han aplicado se recogen en el Capítulo 3. En él, se describen los eventos extremos compuestos, el índice de sequía SPEI, las técnicas de corrección de sesgos utilizadas y el marco de validación seguido.

Por otra parte, los resultados obtenidos se muestran y discuten a lo largo del Capítulo 4, con especial énfasis en el análisis de los CE y el índice SPEI. Se discute asimismo el efecto de los métodos de corrección de sesgo en función de distintas métricas de validación. Por último, las conclusiones principales se exponen en el Capítulo 5. Además, se comentan las futuras líneas de trabajo que pueden surgir a partir de este Trabajo y se facilita la información necesaria para la reproducibilidad de los resultados mostrados en esta memoria, que se adhiere por tanto a los principios FAIR (*findable, accessible, interoperable, reusable*).

CAPÍTULO 2

Datos

2.1. *Observaciones*

Este Trabajo de Fin de Máster se ha centrado en España debido a la falta de estudios sobre eventos compuestos y su fuerte dependencia del sector agrícola; así como la disponibilidad de datos observacionales de alta calidad y que cubren un periodo largo y por la variabilidad climática que ofrece. Las masas de agua que la rodean, el océano Atlántico y el mar Mediterráneo, provocan efectos muy diferentes. Mientras que el norte posee condiciones atlánticas húmedas, con temperaturas suaves y grandes y regulares cantidades de precipitación, el sur y el este, poseen un clima mediterráneo e incluso zonas semiáridas con condiciones de sequía severas. En el interior se localiza un clima más continental y puntualmente climas fríos alpinos (Sánchez Sánchez et al., 2018). Esta alta variabilidad de condiciones climáticas, junto con los diferentes tipos de cultivos que se producen en cada zona, hacen que la Península Ibérica sea un escenario idóneo para estudiar cómo los eventos compuestos extremos podrían llegar a influir sobre la agricultura.

Para poder caracterizar las condiciones climáticas de una región resulta conveniente trabajar con datos en rejilla, ya que proporcionan una cobertura espacial completa frente a las estaciones meteorológicas puntuales (p. ej. las estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología -AEMET- en España). Existen varios conjuntos de datos climáticos en formato de rejilla que cubren la España Peninsular y las Islas Baleares y que han sido ampliamente utilizados en multitud de estudios científicos. Entre ellos destacan Iberia01 (Herrera et al., 2019), caracterizado por ser un dataset

de datos diarios de precipitación y temperaturas mínima, media y máxima y que se basa en una red de miles de estaciones situadas por toda la Península Ibérica y las Islas Baleares. Este dataset cubre el periodo de 1971-2015 y tiene una resolución espacial de 0.1° (10 km aproximadamente).

Por otra parte, se tiene el dataset desarrollado por la AEMET (Peral et al., 2017), basado en la red de estaciones pluviométricas (3236), proporcionando valores de temperatura y precipitación diaria. Se caracteriza por ser una rejilla de alta resolución, aproximadamente 5 km, que abarca la España peninsular y las Islas Baleares. Cubre el periodo de 1951-2022 y se actualiza de forma periódica. Se ha desarrollado utilizando el método de interpolación óptima, que puede resultar más justo para la comparación con modelos.

En el uso del dataset Iberia01 se detectaron comportamientos anómalos, seguramente relacionados con datos muy dispares en estaciones cercanas que desestabilizaban el ajuste del método de interpolación. Por ese motivo, en este Trabajo se ha decidido utilizar el dataset AEMET, a pesar de que no tiene datos para toda la Península. Inicialmente, se ha elegido el periodo de 1971-2020 para la caracterización de eventos extremos compuestos observados. Seguidamente, para todos los análisis que involucran el uso del modelo numérico RACMO22E (ver Sección 2.2) se limitan al período 1976-2005, puesto que es el único para el que existen simulaciones históricas.

2.2. Modelos Regionales del Clima

Los Modelos Climáticos Globales (GCM, por sus siglas en inglés) son modelos computacionales que resuelven las ecuaciones que describen la dinámica y termodinámica atmosféricas a escala global, para lo cual es necesario discretizar el espacio en una rejilla tridimensional cuya resolución espacial suele situarse entre los 100 y 200 km. Su resolución espacial hace que el uso de los GCMs en estudios regionales o locales sea limitado. Por ello, en torno a la década de los años 90 surgieron técnicas de regionalización del clima que persiguen dar información climática a mayor resolución espacial. Así, los Modelos Regionales del Clima (RCMs, por sus siglas en inglés), resuelven de forma numérica las mismas ecuaciones del sistema climático que los GCMs, pero a mayor resolución y, dado el alto coste computacional, en un dominio espacial más reducido. Los RCMs utilizan las condiciones iniciales y de contorno de los GCMs, por lo que decimos que están anidados a los GCMs. Actualmente, los RCMs logran tener una resolución de aproximadamente 50km en amplias zonas del mundo. En Europa, con numerosos grupos de investigación realizando simulaciones,

la resolución estándar a nivel continental es de aproximadamente 12km y algunos estudios llegan a 2-3km en regiones más pequeñas (p.ej. sobre los Alpes o sobre grandes ciudades).

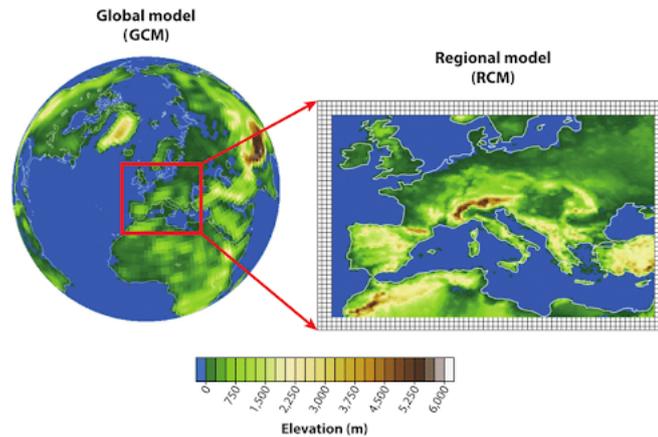


Figura 2.1: Diferencia de resolución espacial entre un Modelo Global del Clima (GCM) típico y un Modelo Regional del Clima (RCM) típico. Fuente: portaldoclima.pt.

Los GCMs y RCMs proporcionan simulaciones tanto para períodos pasados (retrospectivas o históricas) como para las próximas décadas (típicamente hasta final de siglo). Teniendo como punto inicial las concentraciones actuales de gases de efecto invernadero y otros contaminantes en la atmósfera, se establecen una serie de escenarios futuros asumiendo distintas variaciones de dichos gases e incluyendo distintos cambios en la sociedad (p. ej. en la población). Actualmente, esos escenarios se denominan Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Las simulaciones de futuro de los modelos climáticos (GCMs y RCMs) proyectan y modelan diferentes circunstancias en base a esas trayectorias (escenarios). Existen varias trayectorias y se etiquetan en función del valor de forzamiento radiativo (diferencia entre la energía recibida por la Tierra y la irradiada de vuelta al espacio) que se tendrá globalmente en el planeta en 2100. Los cuatro escenarios más utilizados son el RCP2.6, RCP4.5, RCP6 y RCP8.5, cuyos forzamientos radiativos corresponden con 2.6, 4.5, 6 y 8.5 W/m^2 respectivamente, de más a menos optimista (Van Vuuren et al., 2011).

Sin embargo, las simulaciones de modelos del clima, tanto globales como regionales, presentan a menudo importantes sesgos (desviaciones sistemáticas respecto del clima observado en el periodo histórico) lo que imposibilita su utilización directa en aplicaciones concretas. Por ello, se aplican con frecuencia métodos estadísticos de

corrección, que toman como referencia las observaciones disponibles ajustando algunas características de la distribución del modelo como la media u otros momentos de mayor orden. De esta manera, los errores sistemáticos de las simulaciones se ven reducidos, no solo en los estadísticos corregidos sino también en otros valores derivados (Casanueva et al., 2016). Existen varios métodos para la corrección de sesgos, en este estudio nos centraremos únicamente en los univariados, que actúan sobre una única variable.

Este Trabajo se centra en el uso de un único RCM para profundizar en el efecto que tienen las técnicas de corrección de sesgos y estimar, a modo ilustrativo, cambios futuros. Sin embargo, para dar una información más completa y robusta sobre dichos cambios futuros habría que considerar conjuntos (*ensembles*) de modelos. El RCM utilizado está incluido en la iniciativa internacional CORDEX (*Coordinated Regional Downscaling Experiment*), que constituye una estructura internacional coordinada para mejorar los escenarios regionales del clima. La iniciativa EURO-CORDEX (centrada en Europa) proporciona proyecciones para Europa a dos resoluciones espaciales distintas: en torno a los 50 km (EUR-44) y en torno a 12 km (EUR-11) (Jacob et al., 2014).

En concreto, hemos considerado el modelo RACMO22E, anidado al GCM ICHEC-EC-EARTH dentro del experimento EUR-11 (que proporciona una resolución espacial de unos 12km). El RCM elegido es uno de los modelos que mejor representa el clima sobre la región estudiada, para valores extremos, tiene el menor sesgo y es uno de los que menor variabilidad presenta y de los que mejor ranking posee de varios RCMs estudiados por Herrera et al. (2020).

Por un lado, se ha utilizado el experimento “historical”, que proporciona la simulación retrospectiva que, hasta cierto punto, puede compararse con las observaciones. Por otro lado, para el futuro, se ha considerado, a modo ilustrativo, el escenario RCP85 (el más pesimista de todos).

CAPÍTULO 3

Metodología

En este capítulo se describen los distintos tipos de eventos meteorológicos que se analizan en este TFM, así como algunos índices relacionados y los métodos estadísticos empleados para su adecuado tratamiento.

3.1. *Eventos extremos compuestos*

Muchos de los efectos ambientales más adversos se producen debido a la combinación de varios factores meteorológicos, a los que se denomina eventos compuestos. Cuando estos factores dan condiciones intensas, se consideran eventos extremos compuestos (CE, del inglés *Compound Events*, Bevacqua et al., 2023). Estos fenómenos compuestos pueden ser de naturaleza temporal (eventos que suceden simultáneamente, o uno desencadena a otro), espacial (lo que ocurre en un sitio tiene consecuencias en otro lugar), multi-variable (combinación de varias variables relacionadas), etc. De tal forma que la combinación (temporal, espacial, multi-variable) da lugar a un impacto mayor que el debido a eventos individuales. En este Trabajo nos hemos enfocado en compuestos que ocurren simultáneamente en el tiempo, que dependen de varias variables (precipitación y temperatura) y que son potencialmente dañinos para la agricultura.

Los eventos extremos como sequías y altas temperaturas pueden llegar a causar importantes daños, sin embargo cuando ocurren de manera simultánea sus efectos aumentan. Durante las últimas décadas, se ha producido un aumento de estas combinaciones bajo la influencia del calentamiento global y cuya tendencia es seguir

umentando (Yu and Zhai, 2020). Debido a los importantes impactos que producen las sequías y las temperaturas extremas de manera combinada, se han implantado índices a escala regional y global con el fin de monitorear y predecir estos eventos (Hao et al., 2019). El estudio de Russo et al. (2019) que se centra en la región Mediterránea demuestra que la Península Ibérica, el norte de Italia y los Balcanes son los puntos más afectados por las temperaturas extremadamente altas en verano, y relacionan este evento con la ocurrencia de sequía en la primavera o principios del verano.

Por tanto, este Trabajo se ha centrado en las variables precipitación y temperatura máxima para determinar eventos extremos compuestos relacionados con situaciones de sequía y altas temperaturas en España. Contabilizamos como evento compuesto el día en el que la precipitación no alcanza a cierto valor diario y la temperatura máxima rebasa cierto valor. La caracterización de eventos extremos compuestos se ha realizado considerando umbrales absolutos, en particular, más de 30^o C para la temperatura máxima diaria y menos de 0.1 mm para la precipitación (Figura 3.1). Estos valores determinan unas condiciones a partir de las cuales algunos de los principales cultivos del país comienzan a sufrir un estrés hídrico que puede desembocar en la muerte de la planta, por ejemplo. Una vez se han determinado los días que se exceden (o no) los umbrales indicados para cada variable, se observa cuando se dan ambos eventos extremos a la vez y se obtienen sus climatologías (valores promedio sobre largos periodos de tiempo).

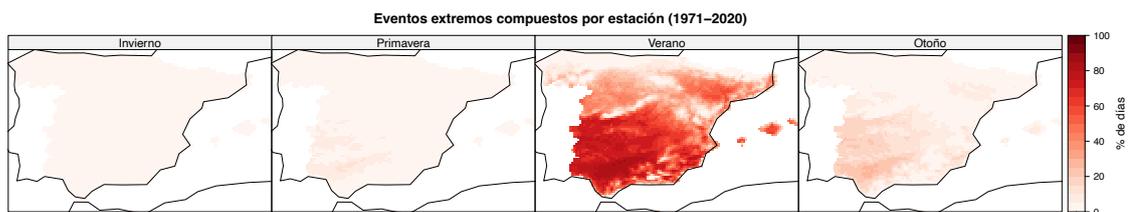


Figura 3.1: Porcentaje de días con eventos extremos compuestos para cada estación del año en España (promedio para el periodo 1971-2020). Se observa que en amplias zonas del sur de España la mayoría de los días de verano se sobrepasan los umbrales que determinan estos eventos. En otoño, se producen eventos compuestos en torno al 20 % de los días en la cuenca de los ríos del sur peninsular y apenas tienen lugar en invierno y primavera.

3.2. Índice de sequías: SPEI

El índice de evapotranspiración estandarizado (*Standardised Evapotranspiration Index*, SPEI) es un indicador utilizado para monitorizar, evaluar y medir las condiciones de sequía (valores negativos) y/o humedad (valores positivos). Es un índice que se basa en un balance hídrico simple que se obtiene a partir de la precipitación y de la evapotranspiración potencial (PET) (Tirivarombo et al., 2018).

El cálculo del PET es algo complejo debido a la multitud de variables que lo conforman (temperatura de superficie, humedad del aire, radiación...). Sin embargo, existen varios métodos que facilitan su obtención (Thornthwaite, Penman-Monteith, Hargreaves-Samani, etc.) (ver Lu et al., 2005). En este Trabajo, se ha utilizado el método Hargreaves-Samani, implementado en *climate4R* (Iturbide et al., 2019). La elección de este método se debe a la naturaleza de la escala temporal de las variables utilizadas, siendo el único que permite calcular el PET con datos diarios de las temperaturas.

Tanto la precipitación como el PET se agregan a escala mensual (utilizando la acumulada y el promedio, respectivamente) para calcular un balance hídrico que sigue una distribución log-logística (ver Vicente-Serrano et al., 2010) a partir de la cual se obtiene el SPEI tras aplicar una estandarización adecuada. Para ello, es habitual considerar distintas escalas temporales, lo cual permite evaluar tanto episodios de sequía a corto plazo como a largo plazo. En concreto: sequías meteorológicas (1 mes), agrícolas (3 a 6 meses) e hidrológicas (12 meses) (Spinoni et al., 2020). Para este Trabajo se ha decidido utilizar la estandarización del SPEI con los 5 meses anteriores junto con el mes objetivo por su interés para el sector agrícola (Heim Jr, 2002). Por ejemplo, para calcular el SPEI en el mes de julio, la estandarización se realiza con los meses febrero, marzo, abril, mayo, junio y julio.

Además, para este TFM resultan particularmente interesantes los valores negativos del SPEI, que son los que corresponden a situaciones de sequía. Sin embargo, hay ambigüedad a la hora de clasificar a partir de qué valores se considera un nivel de sequía ligero, normal o severo. Es por esto, que en este estudio, se ha seguido la siguiente clasificación: sequía severa ($\text{SPEI} < -1.65$), moderada ($-1.65 < \text{SPEI} < -1.28$), sequía leve ($-1.28 < \text{SPEI} < -0.84$) y sin sequía ($\text{SPEI} > -0.84$), propuesta por Vicente-Serrano et al. (2022).

Nótese que además del SPEI también existen otros índices capaces de monitorizar sequías que históricamente han sido utilizados. Por ejemplo, el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI, Palmer, 1965), que se basa en un balance hídrico del suelo. Por otro lado, el índice de precipitación estandarizado (SPI, McKee et al.,

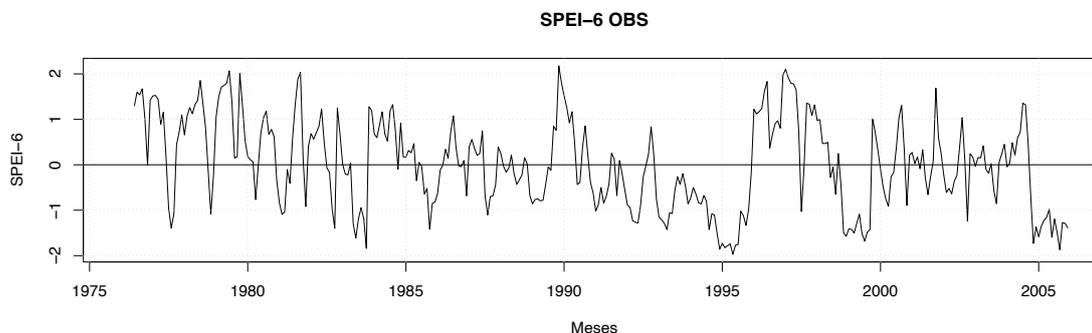


Figura 3.2: Serie temporal del índice de evapotranspiración estandarizado (SPEI) para un gridbox cercano a Jaén (-3.79, 37.77).

1993) se basa en un enfoque probabilístico de la precipitación, dado que típicamente ajusta los datos de precipitación a una distribución Gamma y los transforma a una distribución normal con media cero. De manera que cada valor del SPI puede interpretarse como el número de desviaciones típicas en que la anomalía se aparta de la media. Sin embargo, estos dos índices tienen deficiencias, el PDSI tiene una fuerte influencia del periodo de calibración, lo que hace que el índice se ajuste al área y período fijado, lo cual provoca limitaciones en áreas distintas a la calibrada. Otra desventaja, es que utiliza una escala temporal fija entre 9 y 12 meses, imposibilitando mostrar cambios rápidos en las condiciones de sequía. Por otra parte, el SPI pese a estar ampliamente aceptado por su posibilidad de comparación en el tiempo y el espacio, tiene como principal defecto que su cálculo únicamente tiene en cuenta la precipitación, y no la temperatura, que es una variable que puede afectar en gran medida a la severidad de las sequías (Vicente-Serrano et al., 2010), así como a los cultivos.

3.3. *Análisis de tendencias*

Para obtener las tendencias se ha estimado la pendiente de una regresión lineal simple ajustada a la serie temporal que se ha querido estudiar, de esta manera se obtiene el cambio de la variable a lo largo del tiempo. Las tendencias se han calculado sobre los promedios mensuales de las temperaturas (mínima y máximas diarias) y la precipitación acumulada mensualmente. Por otra parte, para determinar la significancia de las tendencias previamente calculadas, se evalúa el p-valor asociado a la pendiente de la regresión lineal. El nivel de confianza escogido para el análisis de tendencias ha sido del 95 %, por lo que una tendencia se considera estadísticamente

significativa si el p-valor es menor que 0.05. En todos los mapas de tendencias que se muestran en esta memoria se indican con puntos blancos las no significativas y con el color correspondiente las significativas.

3.4. Corrección de sesgos

Las simulaciones de los modelos regionales del clima a menudo presentan importantes desviaciones promedio con respecto al clima observado (sesgos), lo que dificulta su aplicación directa en estudios de impactos climáticos sin antes aplicar ciertos métodos estadísticos de corrección.

Análogamente a otras técnicas estadísticas, la corrección de sesgos consta de dos partes, una primera fase en que se calibra (fase de *train* o entrenamiento) la función de corrección y una segunda fase en que se aplica la corrección a los datos objetivo (fase de *test* o de aplicación). Los métodos univariados descritos a continuación, actúan de manera independiente en cada variable estudiada a corregir. Una vez corregidas se combinan de nuevo para obtener los eventos compuestos y el SPEI, que engloban más de una variable.

- Escalado Lineal (*Linear Scaling*): es la técnica de corrección de sesgo más simple y ha sido aplicada en multitud de estudios (Räisänen and Rätty, 2013; Gutiérrez et al., 2019). Es un método paramétrico que se basa en ajustar únicamente el valor medio de la distribución en las simulaciones del modelo (Shrestha et al., 2017). Dependiendo de la variable a corregir se aplica de una manera u otra. Para la precipitación se aplica un escalado lineal multiplicativo (Eq. 3.1), mientras que para la temperatura se aplica una corrección aditiva (Eq. 3.2):

$$X_{corr} = X_{raw} \frac{\mu_{obs}}{\mu_{raw}} \quad (3.1)$$

$$X_{corr} = X_{raw} + \mu_{obs} - \mu_{raw} \quad (3.2)$$

donde X hace referencia a la variable estudiada, el subíndice *corr* indica la variable corregida y *raw* sin corregir. Por otra parte, μ indica la media mensual a largo plazo.

Este método permite corregir el sesgo en la media (por construcción). Sin embargo, debido a su sencillez estadística, presenta limitaciones a la hora de corregir las colas de la distribución (Fang et al., 2015).

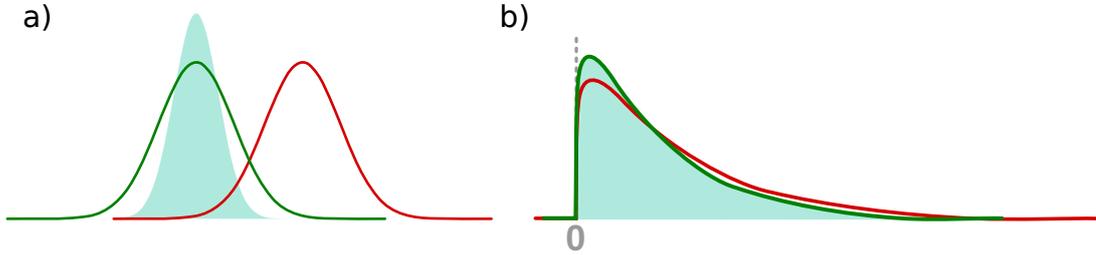


Figura 3.3: Diagrama de los métodos de *scaling* aditivo (panel a, para temperaturas) y multiplicativo (panel b, para precipitación). El sombreado verde indica la función de densidad de probabilidad (PDF) observada, la línea roja representa la del modelo antes de la corrección y la línea verde después de la corrección. Se observa que en el caso de temperatura es un mero desplazamiento de la PDF (mantiene la variabilidad, apuntamiento, etc. originales) y en el caso de la precipitación se escala toda la distribución, ajustando en gran medida otras partes de la distribución. Fuente: Casanueva (2016)

- Mapeo cuantil-cuantil empírico (*Empirical Quantile Mapping*, EQM): se trata de un método que permite corregir las simulaciones de los modelos mediante la calibración de funciones de corrección entre los cuantiles o percentiles simulados y observados de la variable a corregir. Viene dado por la siguiente expresión:

$$q_{corr} = F_{obs}^{-1}(F_{raw}(q_{raw})) \quad (3.3)$$

donde q_{corr} y q_{raw} corresponden con el cuantil corregido y la simulación sin corregir de la variable, mientras que F_{obs} y F_{raw} corresponden con la función de distribución acumulada empírica observada y simulada, respectivamente. En la implementación utilizada para este TFM se corrigen todos los percentiles entre el 1 y el 99 (Déqué, 2007). Los valores de las correcciones entre dos percentiles consecutivos se interpolan linealmente. A los valores que se encuentran fuera del rango de calibración, es decir, por debajo del percentil 1 y por encima del percentil 99, se les aplica una extrapolación constante (Thiemeßl et al., 2012).

En el caso de la precipitación, se ajusta automáticamente la frecuencia de días secos y húmedos cuando el modelo es más húmedo que la observación (Figura 3.4), de tal forma que después de la corrección ambas coinciden. Los 99 percentiles ajustados se calculan sobre la distribución de días húmedos, es decir, con precipitación superior a 1mm. Por otro lado, si el modelo es más seco que la observación, se aplica la adaptación de frecuencias (Thiemeßl et al., 2012) mediante la generación aleatoria de valores de precipitación muestreados

a partir de una distribución Gamma ajustada con el primer bin de datos observados.

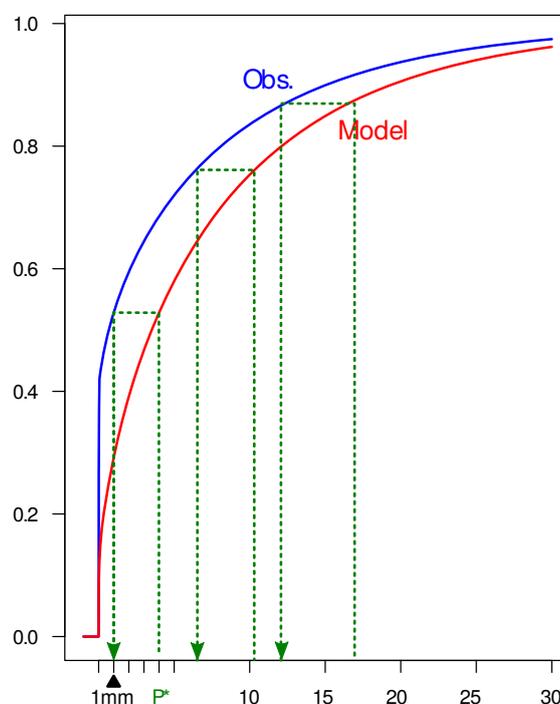


Figura 3.4: Diagrama del método de corrección de sesgos EQM, para el caso de precipitación. La curva roja representa la función de distribución acumulada (CDF) para el modelo sin corregir y la curva azul para las observaciones. En este ejemplo, considerando días secos aquellos con precipitación por debajo de 1mm, las observaciones presentan un 55 % de días secos, mientras que el modelo tiene un 30 % (el modelo es más húmedo que la observación). Así, se establece una corrección entre el valor simulado y el valor observado (es decir, entre P^* y 1mm) para que la frecuencia de días secos coincida en modelo y observaciones. El proceso de repite sucesivamente para todos los percentiles que se desean corregir. Fuente: Casanueva (2016)

Ambos métodos se encuentran implementados en la librería *climate4R* (Iturbide et al., 2019) y se han aplicado para las variables climáticas esenciales (temperaturas y precipitación). *climate4R* incluye paquetes para el acceso de forma remota a datos, su transformación, corrección de sesgos y regionalización, además de visualización. Tiene un paquete específico para el cálculo de índices de sequía *drought4R*, que está basado en el paquete *SPEi* (Beguería and Vicente-Serrano, 2017). El paquete *transformeR*, está compuesto por varias funciones que permiten manipular y transformar datos climáticos, crear subconjuntos y convertir datos. El paquete *downloadeR* (Bedia et al., 2020), es un paquete de R para downscaling empírico-estadístico que se centra

en datos diarios, con una de sus funciones, *biasCorrection*, se ha realizado la corrección de sesgos. A continuación se muestra la llamada a la función dependiendo del método de corrección de sesgo utilizado.

3.5. Validación cruzada

En cuanto al modo de calibración y aplicación de los métodos de corrección de sesgos, se ha realizado una validación cruzada (*cross-validation*) con $k=2$. La validación cruzada consiste en utilizar subconjuntos de datos independientes para la calibración y aplicación del método estadístico (función de corrección en este caso) para evitar el sobreajuste. Se ha dividido el conjunto de datos correspondiente al periodo 1976-2005 de manera aleatoria en dos subconjuntos, de quince años cada uno. Los nuevos subconjuntos actúan, a turnos, como periodos de *train* y de *test*, lo que permite evaluar la robustez y generalización que tiene el método de corrección de sesgo, a la vez que se minimiza el riesgo de sobreajuste.

Debido a que los sesgos en las variables esenciales pueden variar según la época del año (un mismo modelo puede tener un sesgo frío en invierno y cálido en verano, ver, por ejemplo, Kotlarski et al., 2014), normalmente se calibran las funciones de corrección estación a estación, mes a mes, o usando una ventana móvil. Debido a la naturaleza del índice SPEI (índice estandarizado en base a meses previos, ver Sec. 3.2) y a la elección de 6 meses como escala temporal, se han contemplado dos maneras de llevar a cabo la calibración de las funciones de corrección. La primera, escoger un mes y calibrar la corrección sobre ese mismo mes y los cinco anteriores (para todos los años de entrenamiento) y aplicar la corrección entrenada al mes objetivo, logrando la corrección mensual teniendo en cuenta únicamente los meses anteriores (Figura 3.5, panel a). La segunda, para cada mes objetivo, se calibra la corrección sobre ese mes, considerando los tres anteriores y los tres posteriores, además del objetivo teniendo un total de siete meses (Figura 3.5, panel b). Es decir, para corregir agosto, con la primera metodología el mes objetivo es agosto y se entrena con marzo, abril, mayo, junio, julio y agosto; mientras que con la segunda metodología, el mes objetivo sigue siendo el mismo pero se entrena con mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre.

Ambos métodos de calibración no han mostrado grandes diferencias en la reproducción del SPEI, por lo que se ha decidido utilizar la calibración que considera una ventana móvil de 7 meses centrada en el mes objetivo, por ser más general (no exclusiva del SPEI). Una vez corregidas las variables climáticas esenciales (temperaturas máxima y mínima diarias y precipitación diaria acumulada) se utilizan esas

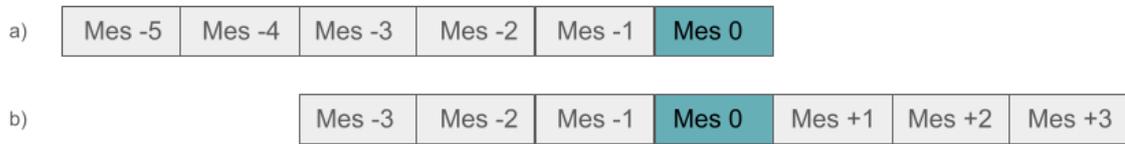


Figura 3.5: Diagrama de los dos tipos de calibración realizada. (a) Entrenando con los 5 meses previos al mes objetivo (“Mes 0”). (b) Entrenando con una ventana móvil de 7 meses centrada en el mes objetivo.

series corregidas para la detección de eventos compuestos y sequías.

3.6. Métricas de validación

El efecto que producen los métodos de corrección de sesgo se analiza comparando el sesgo del modelo histórico sin corregir y el sesgo una vez se han corregido las simulaciones históricas del modelo, tanto en las variables esenciales como en los eventos compuestos y las sequías. Además, se estudia también la habilidad de los modelos corregidos a la hora de reproducir los percentiles 5 y 95 de la distribución observada para analizar las diferencias que puedan surgir entre los dos métodos de corrección utilizados (*scaling* y EQM).

Por otra parte, para el SPEI se ha descartado para la validación el uso de métricas relativas al promedio (por ejemplo, climatologías o sesgos en la media), puesto que al tratarse de un índice estandarizado, estas métricas son 0 por construcción (ver Figura 3.2). En su lugar se han explorado otras métricas más adecuadas como duración, frecuencia y severidad de distintos tipos de sequía de acuerdo con Ansari et al. (2023). En el presente Trabajo, se han considerado las categorías del SPEI descritas en la Sección 3.2, evaluando para cada una de ellas la frecuencia de eventos de duración de uno, dos y tres meses consecutivos. En particular, por brevedad, todos los resultados que se muestran en este TFM se refieren únicamente a la frecuencia de ocurrencia de los distintos tipos de sequía.

CAPÍTULO 4

Resultados y Discusión

4.1. *Variables climáticas esenciales*

4.1.1. *Observaciones: Climatologías y tendencias*

En primer lugar se han estudiado los valores observados para las variables climáticas esenciales empleadas en este Trabajo, es decir, precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima. Se consideran esenciales aquellas variables que tienen un impacto directo sobre el clima a partir de las cuales se pueden obtener otras variables y/o índices derivados, como CE y SPEI.

En primer lugar, se han obtenido sus climatologías (valores promedio sobre periodos largos de tiempo), que se pueden observar en la Figura 4.1, cuyas filas corresponden respectivamente con las variables esenciales anteriormente mencionadas y las columnas a las estaciones del año para el periodo 1971-2020. Los valores más altos de precipitación se dan en la zona norte, en especial en el área de Galicia. Estos valores altos de precipitación se mantienen durante las estaciones excepto en verano, sin embargo sigue siendo la zona que más milímetros diarios recoge de España. En cuanto a temperatura máxima cabe destacar sus elevados valores durante el verano y haciendo hincapié en la cuenca del Guadalquivir, que se mantiene como la zona con mayores temperaturas máximas durante todas las estaciones. Por el contrario, las zonas con menores temperaturas máximas son los sistemas montañosos de la Península, la Cordillera Cantábrica, los Pirineos, el Sistema Central y el Ibérico y la depresión del Ebro. Respecto a temperatura mínima, tiene un comportamiento

similar a la temperatura máxima, localizándose lo valores más altos en el sur de España, mientras que los valores mínimos se encuentran en el norte y Meseta Norte.

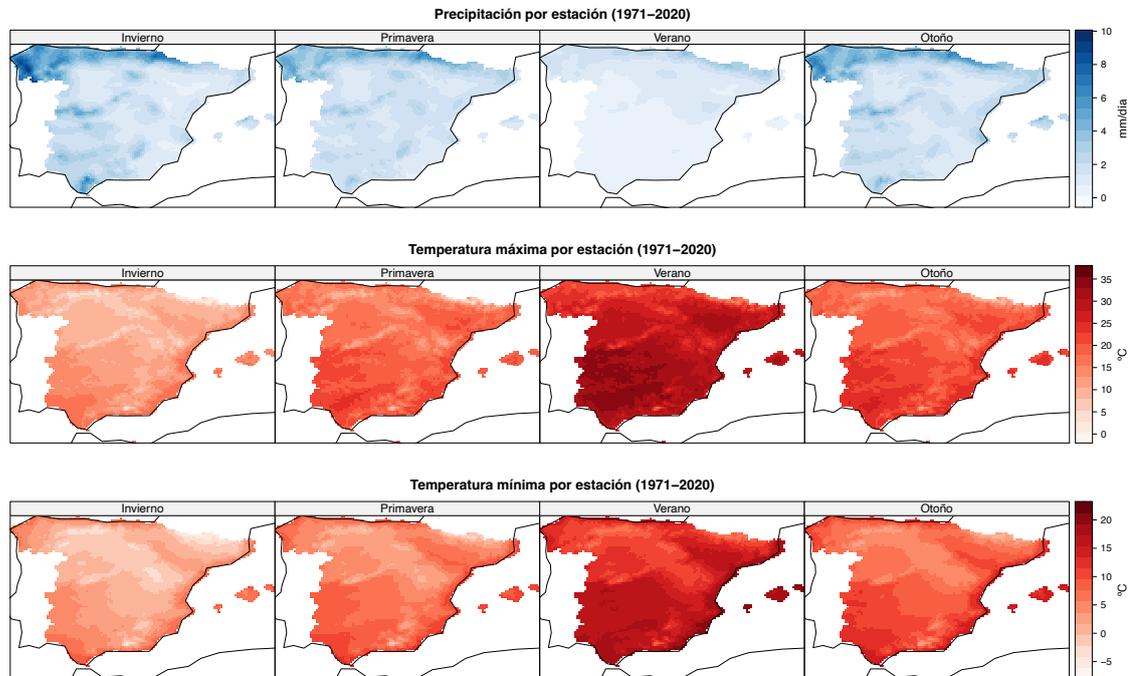


Figura 4.1: Climatologías de las variables esenciales (filas) para las estaciones del año (columnas) en el periodo 1971-2020 según la rejilla de observaciones de AEMET (Sección 2.1).

Por otra parte, se han analizado las tendencias de las variables esenciales en los últimos 50 años (Figura 4.2). Los resultados obtenidos son, en general, los esperados dentro del contexto de cambio climático actual. Para la precipitación se tiene tendencia significativa negativa excepto en otoño (que aumenta en unas pocas regiones) y en primavera (que apenas presenta cambios significativos). La disminución de precipitación afecta a prácticamente toda España en verano (excepto en la zona norte que las tendencias son no significativas), a regiones del norte en primavera, y a regiones del centro y oeste (especialmente Galicia, donde más llueve habitualmente, ver Figura 4.1) en invierno. En cambio, las temperaturas muestran tendencias significativas positivas en todas las estaciones. También es importante señalar que en ciertas zonas de España, generalmente en el sur, se tiene una tendencia mayor en la temperatura mínima que en la máxima durante el verano, esto nos hace sospechar que las noches se vuelven más cálidas y uno de los posibles motivos puede ser la humedad y la reducción de radiación nocturna debido a los gases de efecto invernadero. Los cambios observados (disminución de precipitación y aumento de temperatura

máxima) pueden favorecer al aumento paulatino de los eventos compuestos que se estudian en este Trabajo (Sección 3.1).

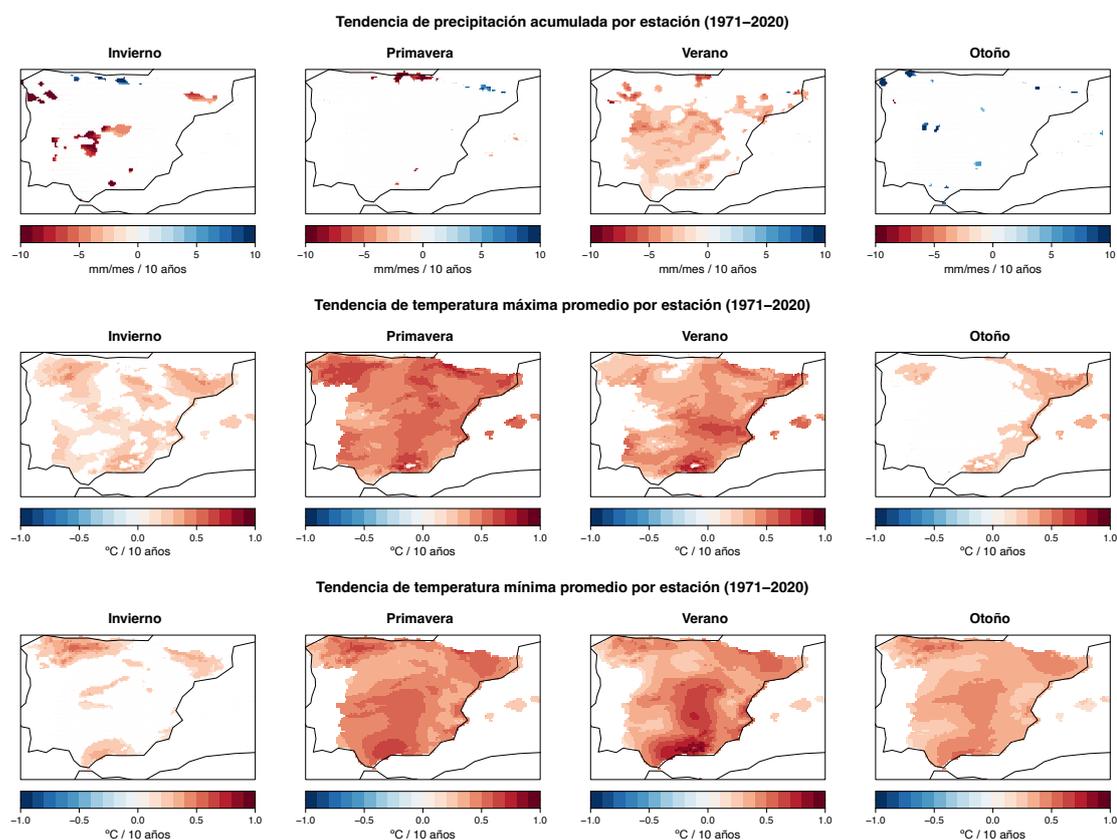


Figura 4.2: Tendencias observadas en el periodo 1971-2020 para las variables esenciales (filas) para las cuatro estaciones del año (columnas) en España peninsular y las Islas Baleares. La tendencia se ha calculado como se indica en Sección 3.3. Los valores de las tendencias se expresan en cambios por década. Se muestran en color las tendencias estadísticamente significativas y en blanco los puntos con tendencias no significativas a un nivel de confianza del 95 % (notar que no hay datos para Portugal ni Francia).

4.1.2. Simulaciones con un Modelo Regional del Clima

Evaluación de los métodos de corrección de sesgos

Se han analizado a su vez las simulaciones históricas del RCM, tanto la simulación original como la que resulta tras aplicar los dos métodos de corrección de sesgos (Sección 3.4). De esta manera se estudian los sesgos originales del RCM y se evalúa cuál de los dos métodos de corrección es más adecuado utilizar en este estudio. En

la Figura 4.3, se muestran valores promedio anuales observados (primera columna) y los sesgos del modelo respecto de ese valor en la simulación original y corregida (resto de columnas), para cada una de las tres variables (filas).

El RCM presenta un sesgo pequeño en cuanto a la precipitación, excepto en algunos puntos de orografía compleja en el Sistema Central, Pirineos y norte de España. Es posible que el error tan pequeño se deba a una compensación de errores a lo largo del año. En cuanto a temperaturas, el RCM es un modelo frío y subestima más de 3°C la temperatura máxima y más de 2°C la temperatura mínima en grandes regiones de España, siendo más acusada la subestimación en las zonas montañosas. Después de aplicar los métodos de corrección de sesgos (Figura 4.3) los errores en las tres variables, en su promedio anual, se reducen enormemente y son inapreciables.

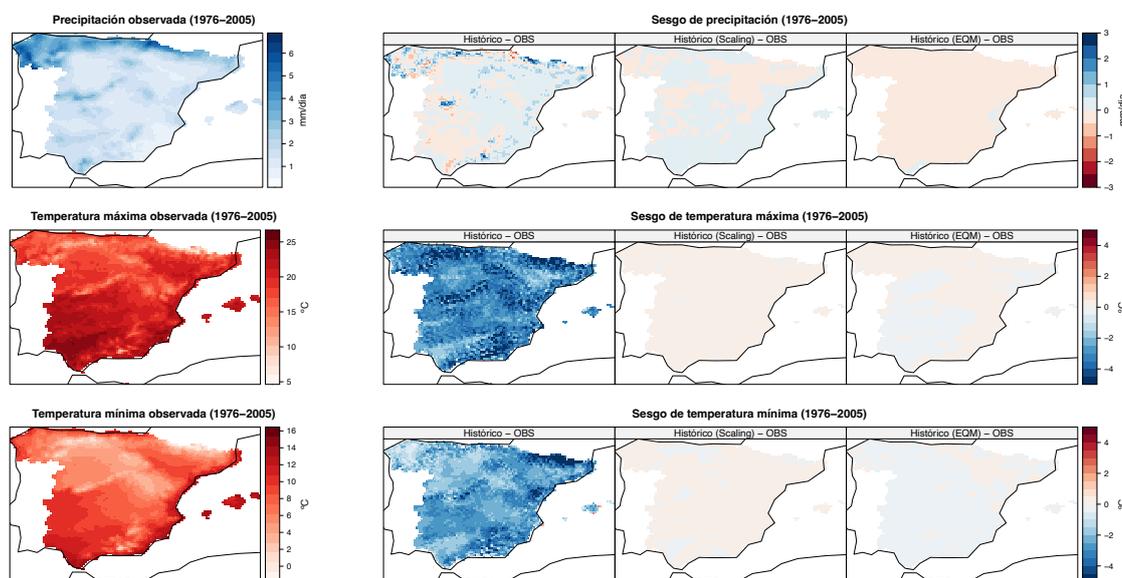


Figura 4.3: Observaciones (promedio anual) de cada una de las variables esenciales estudiadas en el periodo 1976-2005 (primera columna) junto con el correspondiente sesgo del modelo RACMO22E respecto a ese valor observado, para la simulación sin corregir (segunda columna) y corregidas mediante dos métodos (tercera y cuarta columnas).

Dado que ambos métodos de corrección proporcionan resultados similares para la media (Figura 4.3), a continuación se analizan los sesgos en las colas de la distribución (percentiles 5 y 95 de las variables esenciales). Estos resultados se muestran en la Figura 4.4, que permite valorar cuál de los dos métodos de corrección de sesgo resulta más adecuado.

El sesgo tan pequeño en la cola inferior de la precipitación (Figura 4.4, panel

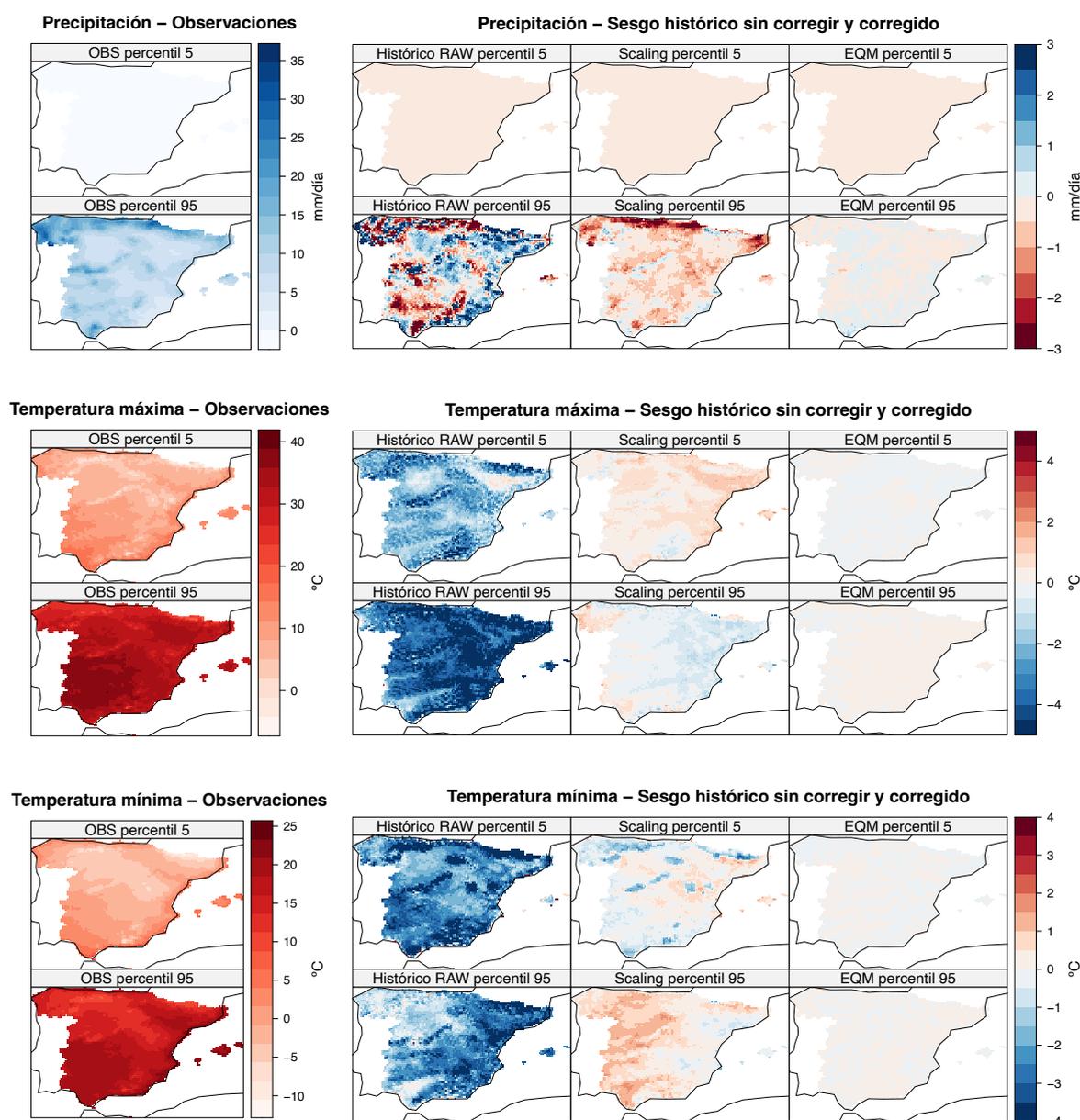


Figura 4.4: Percentiles 5 y 95 (en filas) para las observaciones, simulaciones del RCM en el escenario histórico sin corregir y corregido mediante *scaling* y EQM (en columnas). El panel superior/intermedio/inferior corresponde a la precipitación/temperatura máxima/temperatura mínima.

superior) se debe a que se han obtenido los percentiles a partir de toda la distribución, no solo de la parte húmeda, y ese percentil es cero en muchos puntos de España. En cuanto a la cola superior de la precipitación, el sesgo del modelo sin

corregir muestra una gran variabilidad espacial, con sesgos húmedos en la vertiente Mediterránea y secos en general por el norte (excepto Galicia, donde se observan sesgos positivos). La corrección del modelo mediante el método *scaling*, produce una disminución de en torno a -1 mm/día en grandes zonas de España (excepto en la zona norte, cuya corrección donde la disminución es de -3 mm/día). Por último, tras la corrección utilizando el método EQM se obtienen unos sesgos más suaves en torno a cero en toda España. Respecto a temperaturas, se mantiene o intensifica en las colas el sesgo que se había obtenido para la media (Figura 4.3). En ambas se tienen sesgos fríos a diferencia de que para la temperatura máxima, la cola superior tiene sesgos más pronunciados que en la cola inferior, ocurriendo lo contrario en la temperatura mínima, donde los sesgos más intensos se dan para el percentil 5. Siguiendo esta línea, el método *scaling* corrige en gran medida los sesgos del modelo. Para la temperatura máxima, sobreestima y subestima en torno a 1 °C el percentil 5 y 95, respectivamente. Mientras que para la temperatura mínima, el percentil 5 tiene un sesgo negativo en general en torno a 1 °C (excepto en zonas montañosas que aumenta a -2 °C), el percentil 95 muestra un sesgo positivo sobre 1 y 2 °C con la excepción de la costa Mediterránea, que tiene un suave sesgo negativo. Estos resultados son coherentes con publicaciones previas, que concluyeron que un simple centrado o escalado de la distribución permite reducir, hasta cierto punto, los errores en las colas de la distribución (Casanueva et al., 2013, 2016). Tras la aplicación del método EQM, en ambas temperaturas se observan sesgos inapreciables en ambas colas de la distribución, siendo en general fríos excepto para la cola superior de la temperatura máxima que muestra un sesgo ligeramente positivo.

Queda de manifiesto que la corrección de sesgo mediante el método EQM modifica de forma más precisa las simulaciones que el *scaling*. Este resultado sería más evidente incluso si en lugar de percentiles se analizaran sesgos en otros índices no calibrados (directa o indirectamente) por el método de *scaling*, como los relacionados con la superación de umbrales absolutos, que precisamente son una parte fundamental de la definición de eventos compuestos en este Trabajo (Sección 3.1). Por lo tanto, en todos los análisis que se muestran a partir de este punto en los que se ha aplicado una corrección de sesgos se ha optado por el método EQM.

Proyecciones futuras

A continuación, se ha procedido a analizar las simulaciones futuras del RCM para dos periodos diferentes: 2041-2070 y 2071-2100. En la Figura 4.5, se muestra la precipitación, donde la primera fila corresponde a las observaciones, la segunda a las

simulaciones históricas del modelo corregidas mediante el método de corrección de sesgo EQM, la tercera y cuarta fila corresponden con las señales de cambio climático del modelo corregido para los periodos 2041-2070 y 2071-2100 respectivamente. Todas ellas se encuentran divididas por columnas en función de estaciones. La señal de cambio climático es la diferencia entre el valor promedio de las simulaciones futuras y las correspondientes al periodo histórico, que se toman como referencia. Cuando se obtienen valores positivos (negativos) la señal indica que la variable analizada aumenta (disminuye) en el futuro. Para este tipo de cálculo se suelen considerar periodos en torno a 30 años, debido a este criterio se han escogido los periodos.

Entre las dos primeras filas se observa el efecto de la aplicación de la corrección de sesgo. La señal de cambio climático para el primer periodo, 2041-2070, muestra una disminución de la cantidad de milímetros diarios en general para las cuatro estaciones, especialmente en la zona sur en invierno y primavera y en la zona norte en verano. Sin embargo, durante el invierno en la zona norte se tiene una señal de cambio climático positiva. Durante el segundo periodo, 2071-2100, la señal de cambio climático se intensifica en comparación con la del periodo anterior. En primavera se tiene una disminución de la cantidad de precipitación diaria importante, sobre 1 mm/día, siendo algo más pronunciado en Galicia y el sur de España. Sin embargo, en invierno se han obtenido resultados de aumento, en especial en la zona oeste, llegando a alcanzar 1 mm/diario positivo. Durante el verano, la zona norte es la que más afectada se ve ya que se puede llegar a producir una disminución de 1 mm/diario, ocurriendo lo mismo para el otoño, estación en la zona sur también se ve afectada.

Se ha realizado el mismo análisis, en función de las estaciones y para las mismas simulaciones y periodos para las temperaturas máxima y mínima.

La Figura 4.6 es igual que la que corresponde con la de precipitación, Figura 4.5, pero para temperatura máxima. En general, se tiene un aumento de la temperatura de cerca de 2°C en el periodo 2041-2070. El menor aumento se produce en invierno, mientras que el mayor en verano, incidiendo en la zona oeste, lindando con Portugal. La cuarta fila corresponde con la señal de cambio del periodo 2071-2100, obteniendo valores superiores respecto al periodo anterior, siendo invierno la estación con una menor subida (3°C) y verano la que mayor aumento experimenta, siguiendo el patrón del periodo anterior y con zonas donde llega a aumentar 6°C. En primavera se produce un aumento superior en la zona central, mientras que otoño tiene un aumento general.

El análisis obtenido para la temperatura mínima se observa en la Figura 4.7, donde de nuevo las primeras dos filas corresponden con climatologías por estaciones

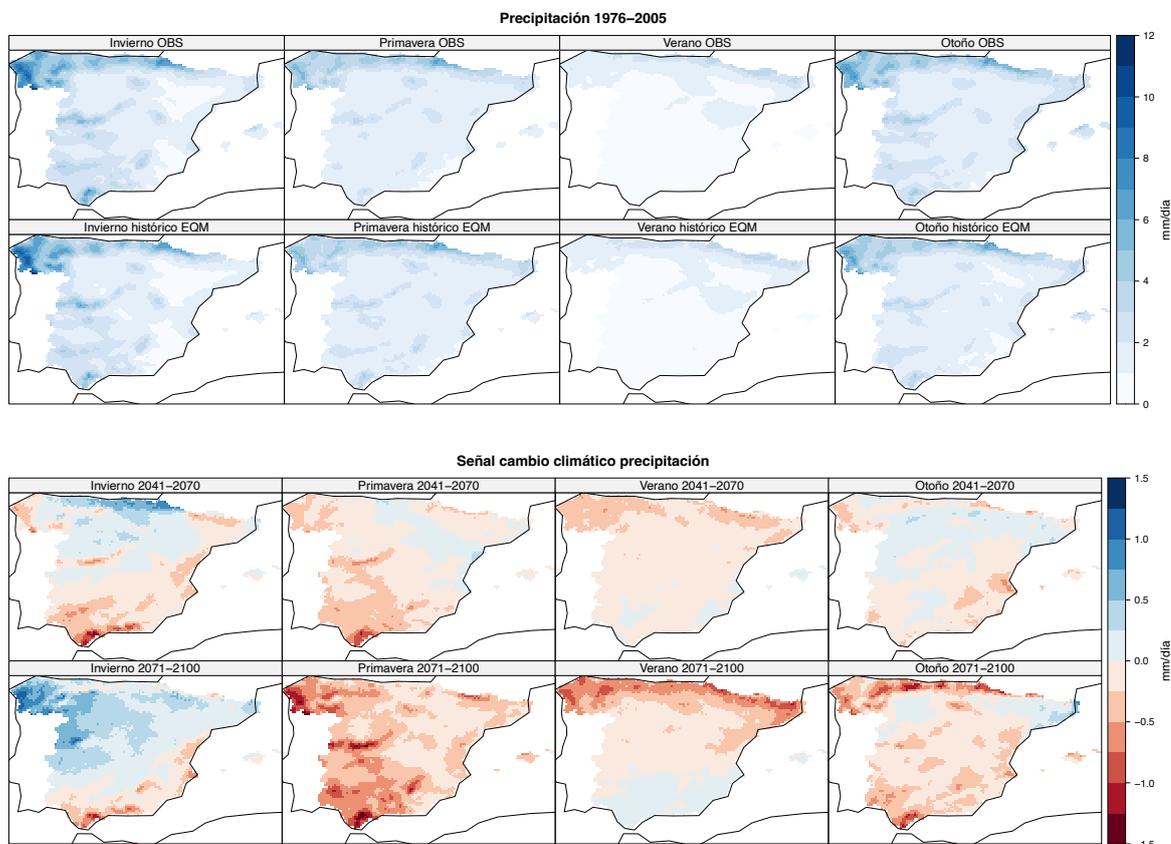


Figura 4.5: Precipitación observada (primera fila) y simulada por el RCM corregido con EQM (segunda fila) en el periodo 1976-2005, por estaciones del año. La tercera y cuarta filas muestran la señal de cambio climático para dos periodos futuros distintos (2041-2070 y 2071-2100), calculada respecto al valor histórico (segunda fila).

y se observa el efecto de la corrección de sesgo en el modelo histórico. En cuanto a la señal de cambio climático, el primer periodo (tercera fila) muestra un aumento de la temperatura, levemente superior para las estaciones de verano y otoño, en torno a 3°C , respecto a primavera e invierno, 2°C . El aumento de temperatura mínima es más importante en el segundo periodo (cuarta fila), siguiendo el patrón indicado en el periodo anterior. El mayor aumento de temperatura se registra en verano llegando hasta los 6°C en la zona centro y la menor subida en invierno en torno a 3°C .

De los análisis anteriormente realizados, se intuye un decrecimiento generalizado de la precipitación y de las temperaturas para periodos futuros hasta finales de siglo. Lo que sugiere un aumento de los eventos extremos compuestos.

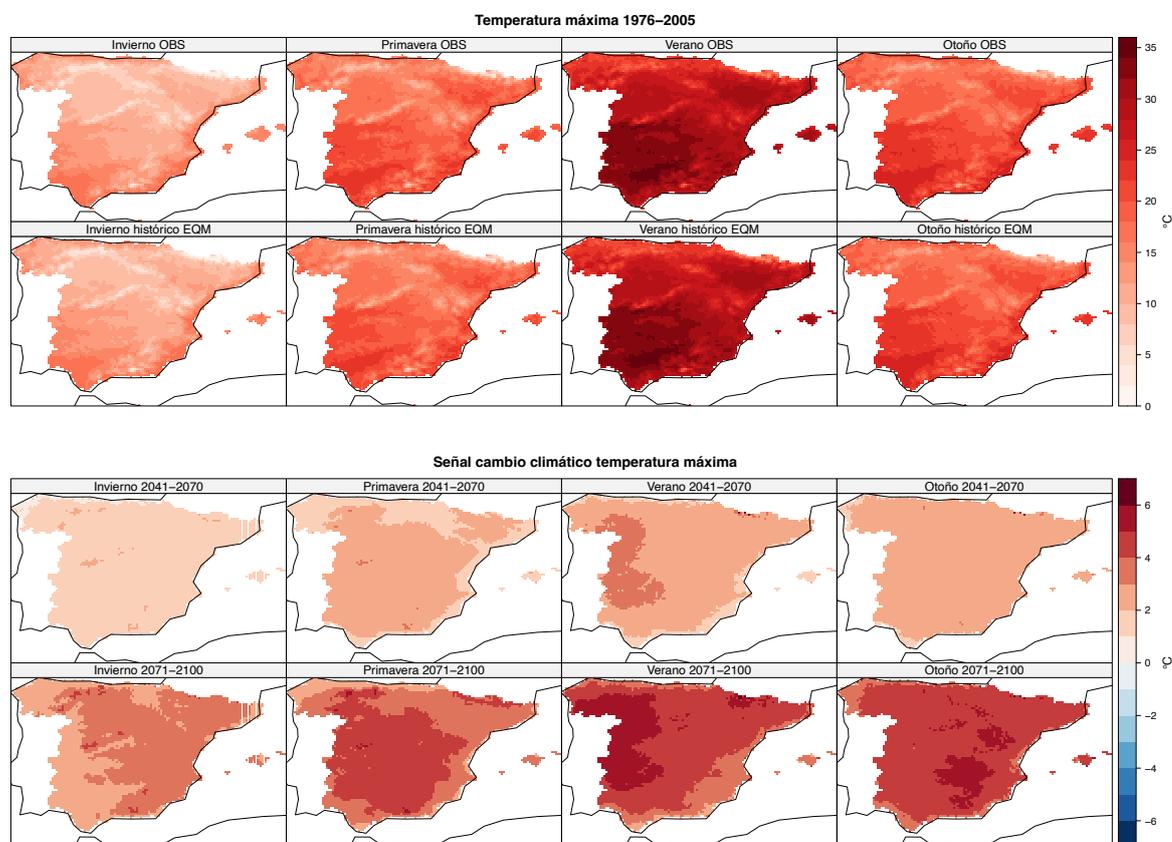


Figura 4.6: Como la Figura 4.5, pero para temperatura máxima.

4.2. *Eventos extremos compuestos*

Al igual que en la sección anterior, inicialmente se han analizado datos observacionales del periodo 1971-2020. A continuación, se han analizado las simulaciones del RCM y se las ha aplicado su correspondiente corrección de sesgos.

4.2.1. *Observaciones: Climatologías y tendencias*

La Figura 3.1, muestra el porcentaje de días en los que se han registrado eventos extremos compuestos en el periodo 1971-2020 en la región estudiada. Se observa que la estación en la que más CE se producen es verano, seguida de otoño, mientras que en invierno apenas se producen, esto es debido a que no hay apenas días en los que la temperatura máxima supere los 30°C.

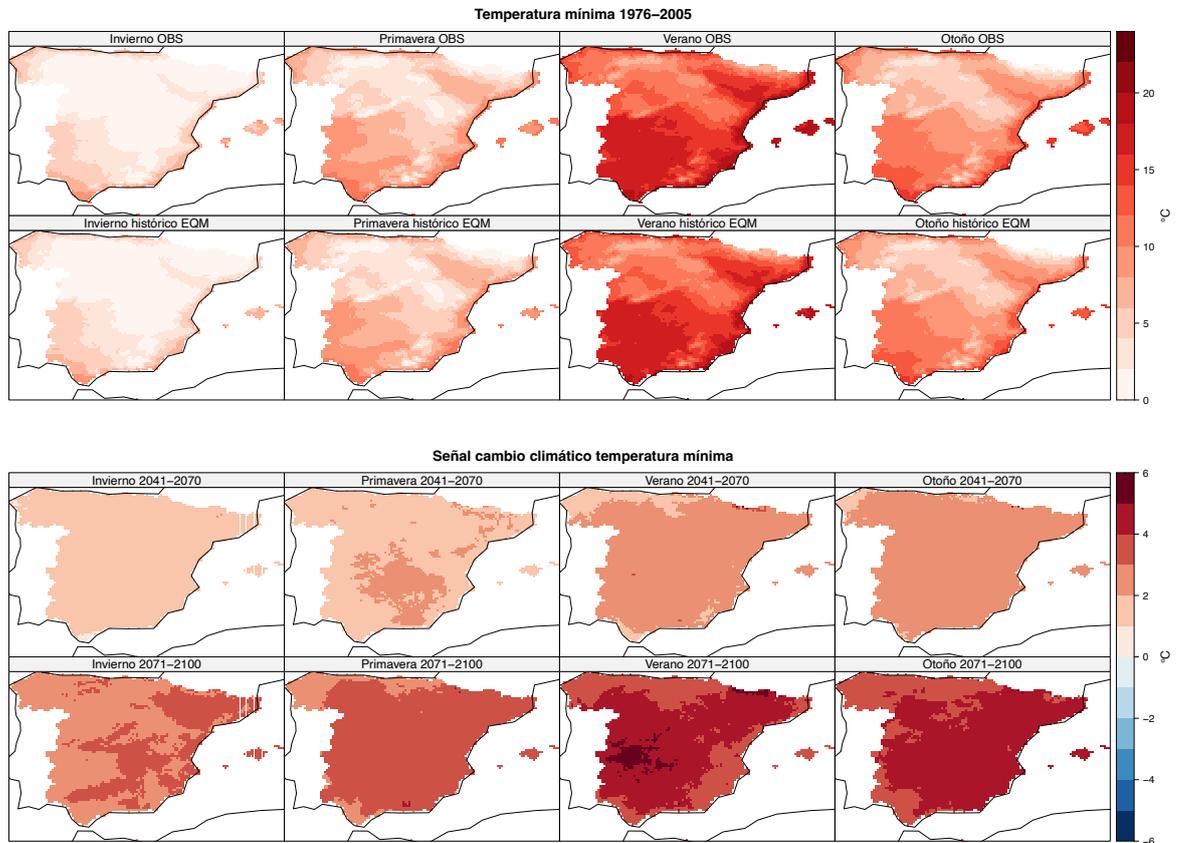


Figura 4.7: Como la Figura 4.5, pero para temperatura mínima.

4.2.2. Simulaciones con un Modelo Regional del Clima

Evaluación de los métodos de corrección de sesgos

Una vez analizadas las climatologías del periodo observacional de los eventos extremos compuestos, se ha continuado el análisis de las simulaciones del RCM sin corregir y corregidas.

Como se ha visto en las Figuras 4.5, 4.6 y 4.7; se produce una disminución y un aumento, respectivamente de la precipitación y las temperaturas. En la Figura 4.8, se puede observar el efecto de estas variaciones en un periodo futuro para los eventos extremos compuestos. La primera fila corresponde a la frecuencia absoluta de eventos compuestos en las observaciones, obteniendo resultados similares a la Figura 3.1, pero durante el periodo de tiempo que cubre la simulación del RCM (1976-2005). El mayor número de eventos compuestos se da en verano, seguido de otoño, mientras que en invierno no se han encontrado debido a los umbrales de

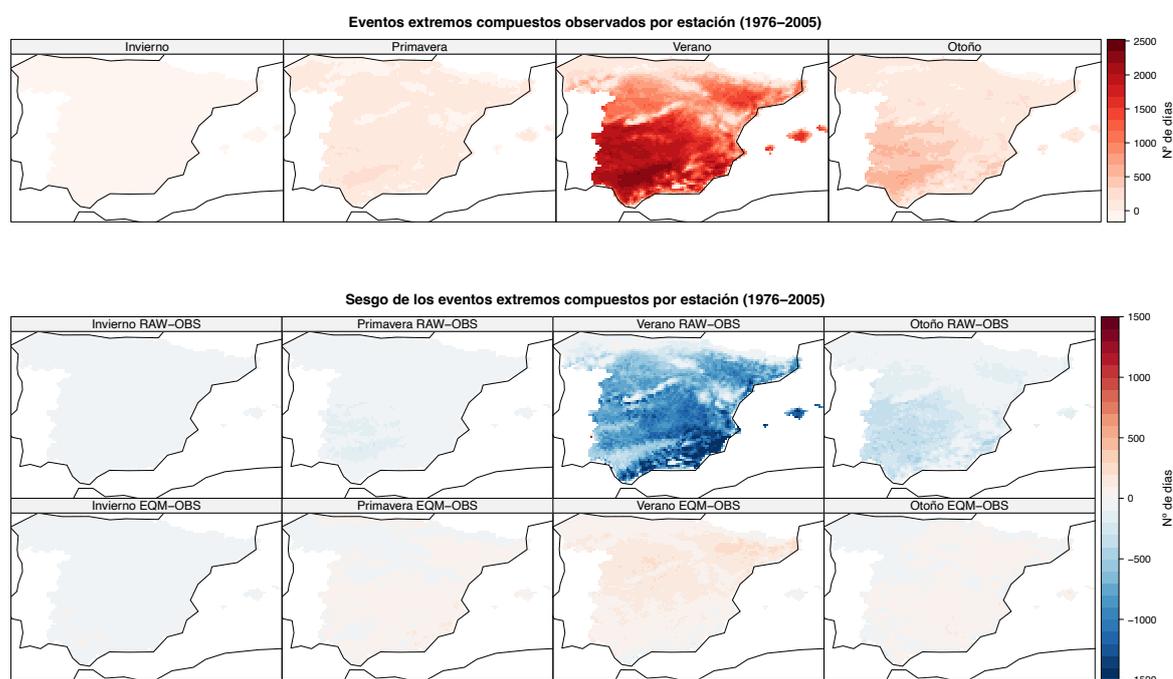


Figura 4.8: Eventos extremos compuestos observados (primera fila) y sesgos del Modelo Regional del Clima sin corregir (segunda fila) y corregido (tercera fila) para el mismo periodo (1976-2005) y en función de las estaciones.

temperatura escogidos ($30\text{ }^{\circ}\text{C}$). La segunda fila corresponde con el sesgo del modelo sin corregir; se trata de un modelo frío (ver también Figura. 4.3), ya que subestima el número de eventos compuestos. La estación en la que mejor se observa este hecho es en verano, donde el sesgo llega a tomar valores negativos de hasta 1500 días. Una vez corregido el modelo (tercera fila) apenas presenta sesgos, siendo la estación con mayor nivel verano, pero considerándose suaves.

Una vez comprobada la corrección de sesgo en los eventos extremos compuestos, se ha pasado a realizar un análisis sobre sus proyecciones futuras.

Proyecciones futuras

Se han analizado los eventos extremos compuestos para dos periodos futuros, 2041-2070 y 2071-2100, en función de las estaciones del año. Como se observa en la Figura 4.9, la primera fila corresponde con el número de eventos extremos compuestos para cada estación del año según las simulaciones del modelo histórico corregido. Comparándolo con la primera fila de la Figura 4.8, se observa cómo la corrección de sesgo se ha realizado correctamente. En cuanto a la señal de cambio climático, para

el primer periodo el aumento más significativo se produce en verano, en la costa este y el norte de España, sin incluir la costa. Esta señal apunta hacia una subida de unos 500 eventos compuestos en la zona comentada. Nótese que ese aumento es mayor en esas regiones que en el sur de Península, dado que en el sur la mayoría de los días de verano ya son días con eventos compuestos en el periodo histórico. La primavera y el otoño muestran subidas en el número de eventos en torno a 300 días más en el sur peninsular, mientras que el invierno no las experimenta. El segundo periodo, sigue los patrones del anterior pero con un aumento mayor, en este caso se produce un aumento de más de 1200 eventos compuestos durante el verano en la costa este y en la meseta norte. La primavera y el otoño tienen su mayor aumento en la zona sur, con una subida de unos 700 días más en los que se producen eventos compuestos.

Ambos periodos futuros muestran señales de cambio climático positivo, especialmente en verano, donde la subida de número de días en los que se producen eventos extremos compuestos es notable. Esta subida es mucho más relevante a finales de siglo donde los eventos compuestos aumentan hasta los 1200 días en verano. Sin embargo, durante el verano apenas se produce un gran aumento de estos eventos en la zona sur. Esto se debe a que el porcentaje de eventos compuestos extremos en el histórico ronda el 90 %, por lo que no hay gran margen de aumento. Sin embargo, es interesante observar cómo en las zonas no saturadas en el histórico, la señal de cambio climático muestra un aumento alto del número de eventos compuestos.

4.3. *El índice SPEI*

Al igual que en la sección anterior, inicialmente se han analizado datos observacionales del periodo 1976-2005. A continuación, se han analizado las simulaciones del RCM y se las ha aplicado su correspondiente corrección de sesgos.

4.3.1. *Simulaciones con un Modelo Regional del Clima*

Evaluación de los métodos de corrección de sesgos

El estudio del SPEI se ha realizado directamente en el periodo 1976-2005 tanto para las observaciones como para las simulaciones del RCM en el escenario histórico.

En la Figura 4.10 se observa la frecuencia de ocurrencia de las sequías para el periodo mencionado y correspondiente a las observaciones. Se analiza cómo el número de sequías disminuye para el mismo umbral de SPEI a medida que su duración aumenta. Por otro lado, se produce una reducción en el número de episodios de sequía

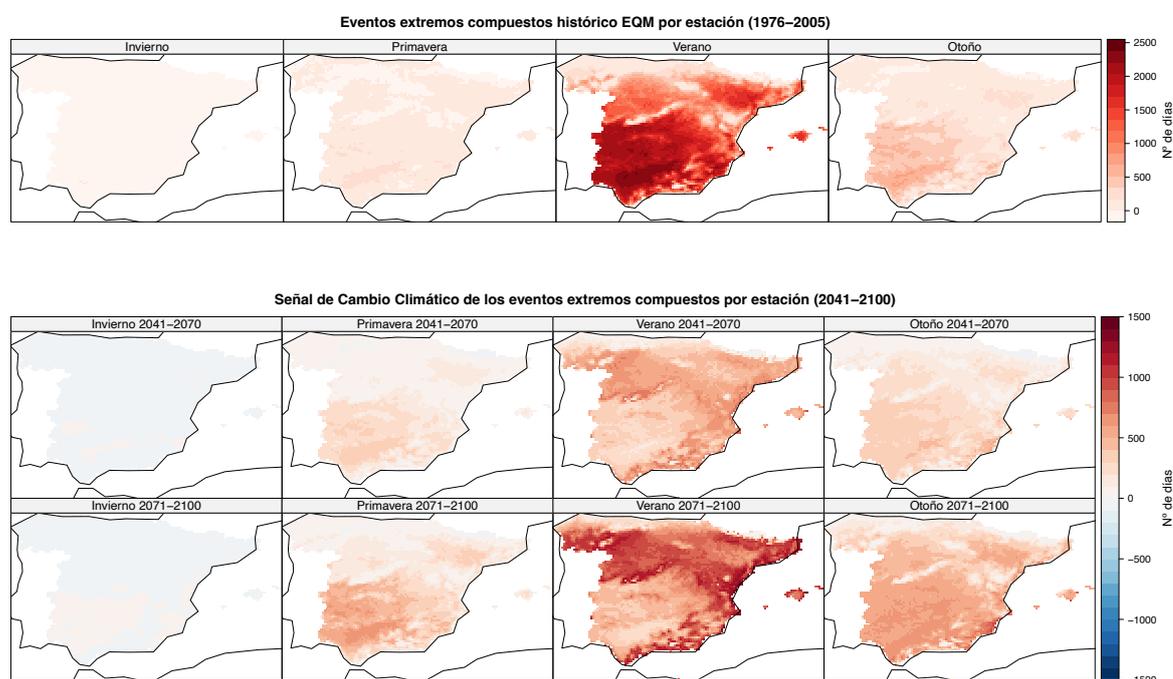


Figura 4.9: Eventos extremos compuestos correspondientes al histórico del modelo corregido y señal de cambio climático de las proyecciones a futuro del modelo para dos periodos distintos.

a medida que aumenta la severidad. Las mayores frecuencias se encuentran para el umbral de SPEI leve mientras que las menores frecuencias son las correspondientes a sequías extremas.

En la Figura 4.11, se muestran los sesgos de la frecuencia de las simulaciones del modelo sin corregir. Los sesgos obtenidos son generalmente negativos con zonas de sesgos positivos (en especial en la zona de Galicia y de Murcia) para sequías leves y moderadas. Mientras que para las severas y extremas las zonas donde disminuye el número de sequías es mayor.

Para obtener el índice SPEI ajustado, el primer paso ha sido ajustar las simulaciones que proporciona el modelo, con la idea de corregir las variables esenciales que están involucradas en el cálculo del índice (precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima). Es importante mencionar, que no se ha corregido de manera directa el SPEI, si no las variables esenciales, y a partir de su corrección, se ha calculado el PET y en último lugar el SPEI.

En la Figura 4.12, se muestra el sesgo de la frecuencia de sequía de las simulaciones históricas corregidas. A diferencia que en secciones anteriores, esta frecuencia

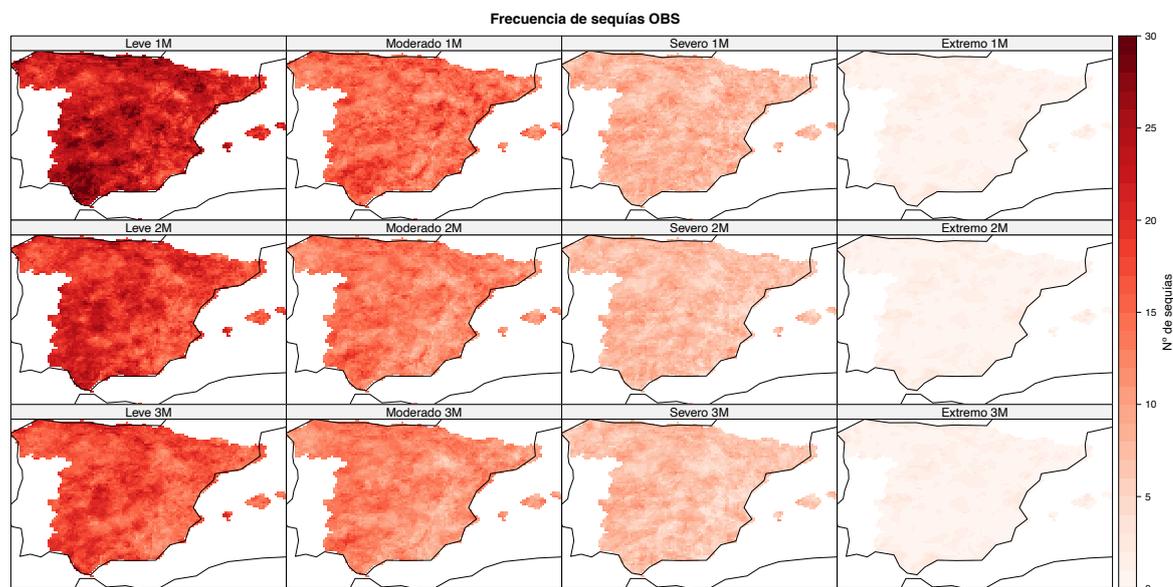


Figura 4.10: Frecuencia de eventos de sequía observados caracterizados por el uso del índice SPEI. Las columnas dependen del umbral de SPEI utilizado, que determina sequías leves, moderadas, severas o extremas (ver Sección. 3.2), mientras que las filas indican la duración del evento en meses consecutivos.

no se ve corregida por el método de corrección de sesgo utilizado (EQM). El efecto que ha producido ha sido un aumento de los sesgos con valores negativos en la frecuencia de sequías leves y moderadas, mientras que las severas y extremas permanecen semejantes. Esto indica que el método seleccionado para la corrección de sesgos no produce resultados satisfactorios sobre este índice. Por lo que en líneas de investigación futuras será necesario probar esta corrección con métodos de ajuste diferentes.

Proyecciones futuras

Pese a que se ha observado que el método de corrección de sesgo utilizado no proporciona buenos resultados, se ha decidido realizar un estudio de la señal de cambio climático a finales de siglo, con el fin de contemplar los resultados obtenidos

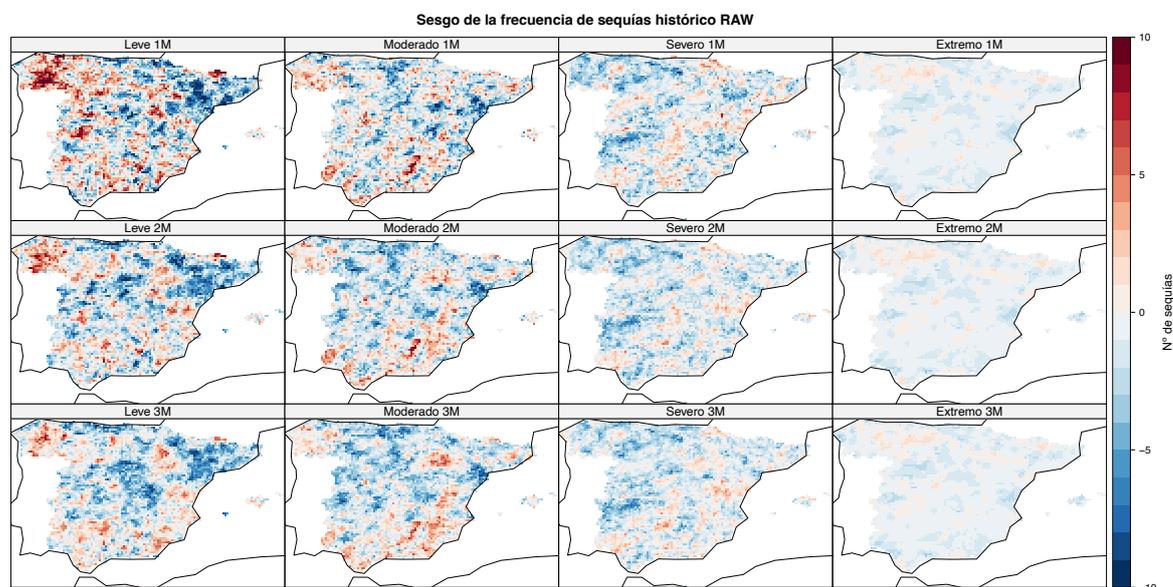


Figura 4.11: Sesgo de la frecuencia de eventos de sequías históricas del modelo sin corregir caracterizadas por el uso del índice SPEI.

para el modelo sin corregir, a falta de una mejor corrección para el periodo futuro. Este análisis se encuentra en la Figura 4.13.

La señal de cambio climático muestra una disminución importante para todas las frecuencias de sequías leves en el sur de España. De igual manera, se produce una disminución de sequías para frecuencias moderadas y severas. Esta disminución general no se esperaba debido a las señales de cambio climático obtenidas para la precipitación y las temperaturas en el periodo futuro (Sección 4.1.2); al igual que la señal correspondiente para los eventos compuestos, que ha sugerido un aumento de entorno el 25 % a finales de siglo (Sección 4.2.2). Pese a que el ajuste ha sido satisfactorio para las variables esenciales como se puede observar en la Sección 4.1.1, este efecto no se ve reflejado a la hora de calcular el SPEI.

Esto podría estar relacionado con la propia naturaleza del índice (estandarizado) que depende del periodo de estandarización utilizado, que podría limitar la capacidad de reflejar los cambios proyectados. En este Trabajo se ha estandarizado cada periodo

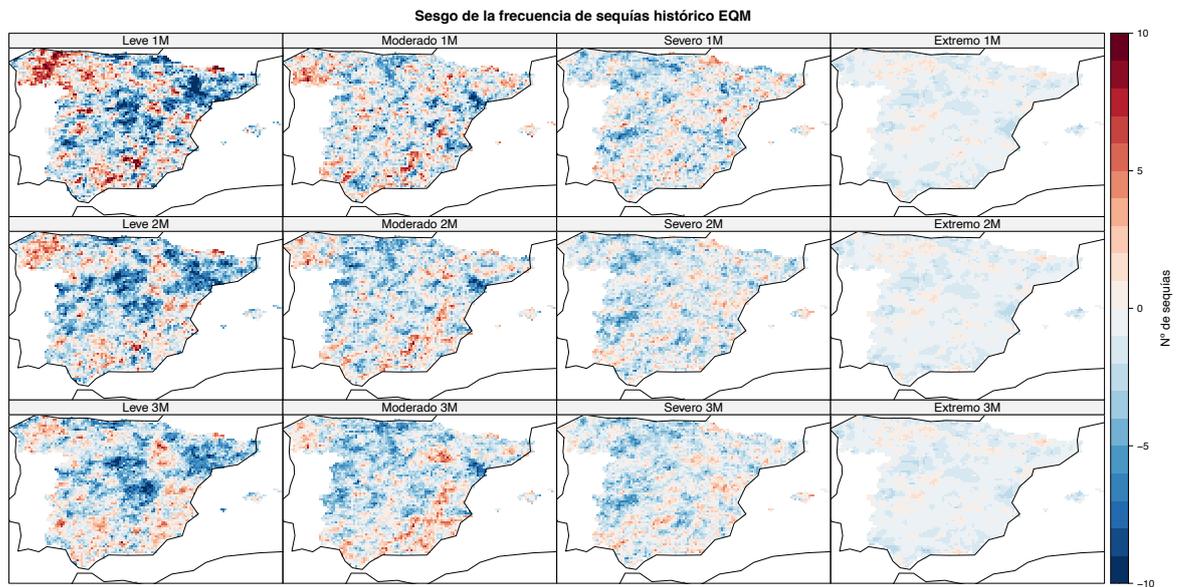


Figura 4.12: Como Figura 4.11 pero para la simulación corregida con EQM.

respecto a sí mismo, y es posible para una mejor estimación del cambio que hubiera que considerar el periodo histórico en la estandarización. La necesidad de estudiar la aplicación adecuada de la estandarización en periodos futuros deja la puerta abierta a seguir investigando en más detalle el SPEI.

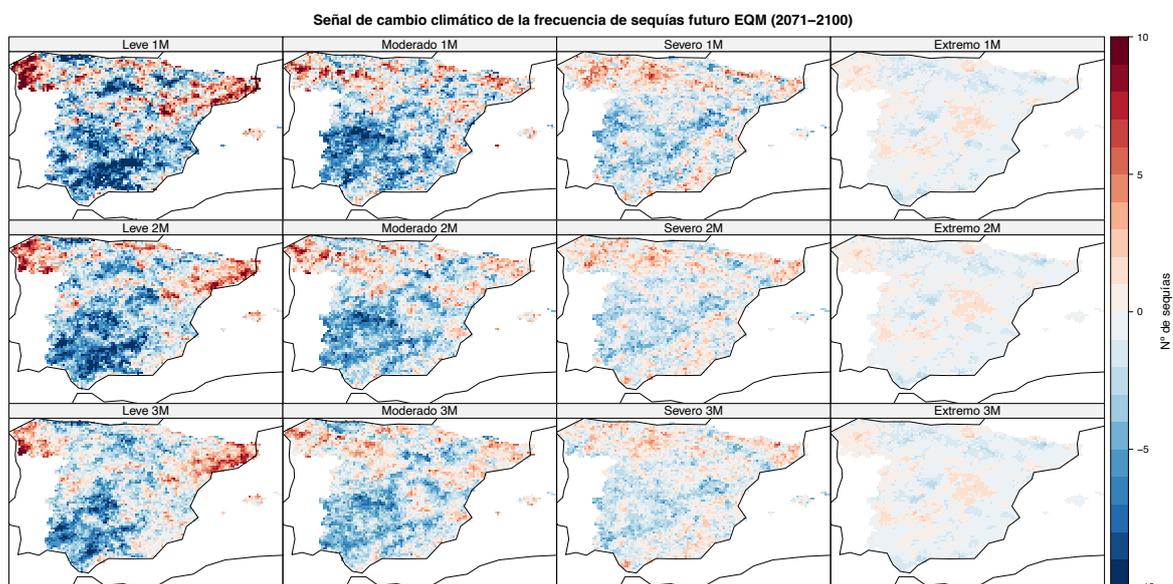


Figura 4.13: Señal de cambio climático de la frecuencia de eventos de sequías del periodo 2071-2100 respecto del periodo histórico del modelo sin corregir, caracterizadas por el uso del índice SPEI.

CAPÍTULO 5

Principales conclusiones y trabajo futuro

5.1. Conclusiones principales

A continuación, se exponen las principales conclusiones que se pueden extraer de este Trabajo, que se alinean con los objetivos presentados en la Sección 1.2:

- Se ha caracterizado la ocurrencia de eventos extremos compuestos (CE) observados en el periodo 1971-2020, identificando que el mayor número de CE en la zona sur de España durante el verano. A su vez, se ha analizado el índice de evapotranspiración estandarizado (SPEI), un indicador ampliamente utilizado para monitorizar las condiciones de sequía. Se han contabilizado la frecuencia de ocurrencia de distintos tipos de sequía (definidos en base a su severidad y su duración), obteniendo los mayores valores en el sur de España, especialmente para el caso de las sequías leves de un único mes de duración.
- Se ha evaluado un Modelo Regional del Clima (RCM), en concreto el *RACMO22E* para simular los eventos extremos compuestos y el índice SPEI. Sin embargo, ha sido necesario realizar una corrección de sesgo a las simulaciones del modelo para obtener resultados precisos. Se han analizado los resultados de dos métodos de corrección de sesgo distintos sobre las variables precipitación y temperaturas (máxima y mínima), *scaling* y EQM. De entre los dos métodos, el análisis de las climatologías de los percentiles 5 y 95 ha permitido comprobar que el EQM proporciona mejores resultados que el *scaling*. Por lo que es el que ha sido utilizado durante el Trabajo. Una vez calculados los CE

con las variables corregidas con EQM, se ha observado una gran precisión en el ajuste en las simulaciones sin corregir del RCM. A su vez se ha analizado el comportamiento del método de corrección de sesgos EQM sobre el índice SPEI, cuyo resultado no ha sido el esperado. En consecuencia, se ha de investigar otros posibles métodos de corrección de sesgos que den lugar a mejores resultados sobre este índice.

- Se han analizado los eventos compuestos en dos periodos futuros (2041-2070 y 2071-2100) y se ha observado que la señal de cambio climático de los CE, proporciona valores positivos. Por lo que se puede concluir que la tendencia de ocurrencia de los eventos compuestos tienda a aumentar aproximadamente un 25% a finales de siglo. Por otra parte, se ha estudiado el índice SPEI en el periodo 2071-2100 para ver su evolución, obteniendo una disminución importante para todas las frecuencias de sequías, resultado que no se esperaba por los resultados obtenidos tanto para la precipitación y las temperaturas como para los CE.

5.2. Trabajo Futuro

En esta sección se presentan algunas actividades futuras que constituyen la continuación natural de este Trabajo y que se abordarán durante los próximos meses, en el seno del grupo de investigación “Meteorología y Computación”, del Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación de la Universidad de Cantabria:

- Se analizarán otros Modelos Regionales del Clima distintos al utilizado en este Trabajo. Esto permitirá un análisis más riguroso, puesto que se tendrá en cuenta la incertidumbre asociada al uso de distintos RCMs.
- Se llevará a cabo una caracterización de los eventos extremos compuestos en base a umbrales relativos, de forma que la comparación entre distintas regiones sea más justa.
- Se explorará el uso de métodos multivariados para la corrección de sesgos de los RCMs. Este tipo de métodos ajustan simultáneamente dos o más variables climáticas conservando sus dependencias, por lo que se espera que puedan resultar especialmente útiles para el caso de los CE.

- Asimismo, el uso de métodos de corrección de sesgo condicionados a procesos (Manzanas and Gutiérrez, 2019) o a tipos de tiempo (Fernández-Granja et al., 2023) es otro punto que también se pretende explorar, especialmente para la reproducción del SPEI.

5.3. *Reproducibilidad de los resultados*

El paquete *climate4R* es una suite de librerías en R desarrolladas por el Grupo de Meteorología de Santander que permite el uso y procesamiento, transformación, post-procesamiento y visualización de datos climáticos. Se ha utilizado como herramienta central para el desarrollo de este TFM.

Se ha realizado un esfuerzo importante para garantizar la reproducibilidad de todos los resultados presentados en este Trabajo, adoptando en la medida de lo posible los principios FAIR (Wilkinson et al., 2016). Por ello, todos los datos y el código necesarios para reproducir los resultados que se muestran en esta memoria están disponibles en un repositorio abierto de GitHub:

<https://github.com/miriamfuente/PracticasMETEO>, incluyendo también varios cuadernos que sirven de ayuda en la plena reproducibilidad de los resultados y su escrutinio, y constituyen un extenso material complementario a la propia memoria. Finalmente, todo el proyecto se desarrolló en el lenguaje libre *R*.

5.4. *Contexto de la investigación*

Me gustaría agradecer en a las instituciones, proyectos y personas que han colaborado para poder llevar a cabo este Trabajo de Fin de Máster.

En primer lugar, al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), por brindarme la oportunidad de adentrarme en el mundo de la investigación gracias a la concesión de una Beca JAE INTRO. También agradezco al Grupo de Investigación “Meteorología y Computación”, que forma parte del Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación de la Universidad de Cantabria, donde se ha realizado este Trabajo de Fin de Máster. Este grupo, junto con el Grupo de Investigación “Meteorología y Minería de Datos”, adscrito al Instituto de Física de Cantabria y perteneciente al CSIC, conforman el Grupo de Meteorología de Santander (GMS).

En segundo lugar, a la Agencia Estatal de Meteorología, AEMET, por la gran cobertura espacial que ofrece y por tener los datos observacionales en abierto, permitiendo de esta manera realizar análisis detallados y contribuyendo al avance de

investigaciones científicas.

Asimismo, me gustaría agradecer al grupo internacional World Climate Research Project por llevar a cabo el proyecto CORDEX, que ha proporcionado las simulaciones del Modelo Regional del Clima, *RACMO22E*, utilizadas en este Trabajo.

También quiero expresar mi agradecimiento al Grupo de Meteorología de Santander, en particular a las personas encargadas de la creación, mantenimiento y funcionamiento del paquete *climate4R*, cuyas librerías han sido fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

Por último quiero mencionar que este Trabajo de Fin de Máster se enmarca dentro de las actividades del proyecto COMPOUND “Eventos extremos compuestos para la evaluación de los impactos del cambio climático en la agricultura” de la convocatoria de “Proyectos de Transición Ecológica y Transición Digital”, financiado por la Agencia Estatal de Investigación (MCIU/AEI/10.13039/501100011033) y por los fondos NextGenerationEU/PRTR de la Unión Europea.

Bibliografía

- ANSARI, R., CASANUEVA, A., LIAQAT, M. U., and GROSSI, G. (2023). Evaluation of bias correction methods for a multivariate drought index: case study of the upper jhelum basin. *Geoscientific Model Development*, 16(7):2055–2076.
- BEDIA, J., BAÑO-MEDINA, J., LEGASA, M. N., ITURBIDE, M., MANZANAS, R., HERRERA, S., CASANUEVA, A., SAN-MARTÍN, D., COFIÑO, A. S., and GUTIÉRREZ, J. M. (2020). Statistical downscaling with the downscaler package (v3.1.0): contribution to the value intercomparison experiment. *Geoscientific Model Development*, 13(3):1711–1735.
- BEGUERÍA, S. and VICENTE-SERRANO, S. M. (2017). Spei: calculation of the standardised precipitation-evapotranspiration index. *R package version*, 1(7).
- BEVACQUA, E., SUAREZ-GUTIERREZ, L., JÉZÉQUEL, A., LEHNER, F., VRAC, M., YIOU, P., and ZSCHEISCHLER, J. (2023). Advancing research on compound weather and climate events via large ensemble model simulations. *Nature Communications*, 14(1):2145.
- CASANUEVA, A. (2016). *Comparison of statistical and dynamical climate downscaling techniques: screening of methods for their use in impact studies*. Ph.D. thesis, Universidad de Cantabria. URL <http://hdl.handle.net/10902/8321>.
- CASANUEVA, A., HERRERA, S., FERNÁNDEZ, J., FRÍAS, M., and GUTIÉRREZ, J. M. (2013). Evaluation and projection of daily temperature percentiles from statistical and dynamical downscaling methods. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(8):2089–2099.

- CASANUEVA, A., HERRERA, S., FERNÁNDEZ, J., and GUTIÉRREZ, J. M. (2016). Towards a fair comparison of statistical and dynamical downscaling in the framework of the euro-cordex initiative. *Climatic Change*, 137:411–426.
- CASANUEVA, A., KOTLARSKI, S., FISCHER, A. M., FLOURIS, A. D., KJELLSTROM, T., LEMKE, B., NYBO, L., SCHWIERZ, C., and LINIGER, M. A. (2020). Escalating environmental summer heat exposure—a future threat for the european workforce. *Regional Environmental Change*, 20:1–14.
- DÉQUÉ, M. (2007). Frequency of precipitation and temperature extremes over france in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57(1-2):16–26.
- FANG, G., YANG, J., CHEN, Y., and ZAMMIT, C. (2015). Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in china. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(6):2547–2559.
- FERNÁNDEZ-GRANJA, J. A., BRANDS, S., BEDIA, J., CASANUEVA, A., and FERNÁNDEZ, J. (2023). Exploring the limits of the jenkinson–collison weather types classification scheme: A global assessment based on various reanalyses. *Climate Dynamics*, 61(3):1829–1845.
- GUTIÉRREZ, J. M., MARAUN, D., WIDMANN, M., HUTH, R., HERTIG, E., BENESTAD, R., RÖSSLER, O., WIBIG, J., WILCKE, R., KOTLARSKI, S., ET AL. (2019). An intercomparison of a large ensemble of statistical downscaling methods over europe: Results from the value perfect predictor cross-validation experiment. *International journal of climatology*, 39(9):3750–3785.
- HAO, Z., HAO, F., XIA, Y., SINGH, V. P., and ZHANG, X. (2019). A monitoring and prediction system for compound dry and hot events. *Environmental Research Letters*, 14(11):114034.
- HARTMANN, D. L., TANK, A. M. K., RUSTICUCCI, M., ALEXANDER, L. V., BRÖNNIMANN, S., CHARABI, Y. A. R., DENTENER, F. J., DLUGOKENCKY, E. J., EASTERLING, D. R., KAPLAN, A., ET AL. (2013). Observations: atmosphere and surface. In *Climate change 2013 the physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, pp. 159–254. Cambridge University Press.

- HEIM JR, R. R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the united states. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8):1149–1166.
- HERRERA, S., CARDOSO, R. M., SOARES, P. M., ESPÍRITO-SANTO, F., VITERBO, P., and GUTIÉRREZ, J. M. (2019). Iberia01: a new gridded dataset of daily precipitation and temperatures over iberia. *Earth System Science Data*, 11(4):1947–1956. URL <https://essd.copernicus.org/articles/11/1947/2019/>.
- HERRERA, S., SOARES, P. M. M., CARDOSO, R. M., and GUTIÉRREZ, J. M. (2020). Evaluation of the euro-cordex regional climate models over the iberian peninsula: Observational uncertainty analysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(12):e2020JD032880. URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020JD032880>. E2020JD032880 10.1029/2020JD032880.
- IONITA, M., CALDARESCU, D. E., and NAGAVCIUC, V. (2021). Compound hot and dry events in europe: Variability and large-scale drivers. *Frontiers in Climate*, 3:688991.
- ITURBIDE, M., BEDIA, J., HERRERA, S., BAÑO-MEDINA, J., FERNÁNDEZ, J., FRÍAS, M., MANZANAS, R., SAN-MARTÍN, D., CIMADEVILLA, E., COFIÑO, A., and GUTIÉRREZ, J. (2019). The R-based climate4R open framework for reproducible climate data access and post-processing. *Environmental Modelling & Software*, 111:42–54. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364815218303049>.
- JACOB, D., PETERSEN, J., EGGERT, B., ALIAS, A., CHRISTENSEN, O. B., BOUWER, L. M., BRAUN, A., COLETTE, A., DÉQUÉ, M., GEORGIEVSKI, G., ET AL. (2014). Euro-cordex: new high-resolution climate change projections for european impact research. *Regional environmental change*, 14:563–578.
- KOTLARSKI, S., KEULER, K., CHRISTENSEN, O. B., COLETTE, A., DÉQUÉ, M., GOBIET, A., GOERGEN, K., JACOB, D., LÜTHI, D., VAN MEIJGAARD, E., ET AL. (2014). Regional climate modeling on european scales: a joint standard evaluation of the euro-cordex rcm ensemble. *Geoscientific Model Development*, 7(4):1297–1333.
- LU, J., SUN, G., McNULTY, S. G., and AMATYA, D. M. (2005). A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern

- united states 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 41(3):621–633.
- MANZANAS, R. and GUTIÉRREZ, J. M. (2019). Process-conditioned bias correction for seasonal forecasting: a case-study with enso in peru. *Climate Dynamics*, 52(3):1673–1683. URL <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4226-z>.
- MCKEE, T. B., DOESKEN, N. J., KLEIST, J., ET AL. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, vol. 17, pp. 179–183. Boston.
- PALMER, W. C. (1965). *Meteorological drought*, vol. 30. US Department of Commerce, Weather Bureau.
- PERAL, C., NAVASCUÉS, B., and RAMOS, P. (2017). Nota técnica 24 de AEMET. Tech. rep. URL https://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/NT_24_AEMET.
- RÄISÄNEN, J. and RÄTY, O. (2013). Projections of daily mean temperature variability in the future: cross-validation tests with ensembles regional climate simulations. *Climate dynamics*, 41:1553–1568.
- RUSSO, A., GOUVEIA, C., DUTRA, E., SOARES, P., and TRIGO, R. M. (2019). The synergy between drought and extremely hot summers in the mediterranean. *Environmental Research Letters*, 14(1):014011.
- SÁNCHEZ SÁNCHEZ, E., RODRÍGUEZ FONSECA, B., BLADÉ, I., BRUNET, M., AZNAR LECOCQ, R., CACHO, I., CASADO CALLE, M. J., GIMENO, L., GUTIÉRREZ LLORENTE, J. M., JORDÀ, G., ET AL. (2018). Progresos en la detección y proyecciones de cambio climático en españa desde el informe 2010 de evaluación regional del clima pasado, presente y futuro del comité clivar-españa. *Agencia Estatal de Meteorología*.
- SHRESTHA, M., ACHARYA, S. C., and SHRESTHA, P. K. (2017). Bias correction of climate models for hydrological modelling—are simple methods still useful? *Meteorological Applications*, 24(3):531–539.
- SPINONI, J., BARBOSA, P., BUCCHIGNANI, E., CASSANO, J., CAVAZOS, T., CHRISTENSEN, J. H., CHRISTENSEN, O. B., COPPOLA, E., EVANS, J., GEYER, B., ET AL. (2020). Future global meteorological drought hot spots: a study based on cordex data. *Journal of Climate*, 33(9):3635–3661.

- THEMESSL, M. J., GOBIET, A., and HEINRICH, G. (2012). Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Climatic Change*, 112:449–468.
- TIRIVAROMBO, S., OSUPILE, D., and ELIASSON, P. (2018). Drought monitoring and analysis: standardised precipitation evapotranspiration index (spei) and standardised precipitation index (spi). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 106:1–10.
- VAN VUUREN, D. P., EDMONDS, J., KAINUMA, M., RIAHI, K., THOMSON, A., HIBBARD, K., HURTT, G. C., KRAM, T., KREY, V., LAMARQUE, J.-F., ET AL. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109:5–31.
- VICENTE-SERRANO, S. M., BEGUERÍA, S., and LÓPEZ-MORENO, J. I. (2010). A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7):1696–1718.
- VICENTE-SERRANO, S. M., DOMÍNGUEZ-CASTRO, F., REIG, F., BEGUERÍA, S., TOMAS-BURGUERA, M., LATORRE, B., PEÑA-ANGULO, D., NOGUERA, I., RABANAQUE, I., LUNA, Y., ET AL. (2022). A near real-time drought monitoring system for Spain using automatic weather station network. *Atmospheric Research*, 271:106095.
- WILKINSON, M. D., DUMONTIER, M., AALBERSBERG, I. J., APPLETON, G., AXTON, M., BAAK, A., BLOMBERG, N., BOITEN, J.-W., DA SILVA SANTOS, L. B., BOURNE, P. E., BOUWMAN, J., BROOKES, A. J., CLARK, T., CROSAS, M., DILLO, I., DUMON, O., EDMUNDS, S., EVELO, C. T., FINKERS, R., GONZALEZ-BELTRAN, A., GRAY, A. J., GROTH, P., GOBLE, C., GRETHE, J. S., HERINGA, J., 'T HOEN, P. A., HOOFT, R., KUHN, T., KOK, R., KOK, J., LUSHER, S. J., MARTONE, M. E., MONS, A., PACKER, A. L., PERSSON, B., ROCCA-SERRA, P., ROOS, M., VAN SCHAIK, R., SANSONE, S.-A., SCHULTES, E., SENGSTAG, T., SLATER, T., STRAWN, G., SWERTZ, M. A., THOMPSON, M., VAN DER LEI, J., VAN MULLIGEN, E., VELTEROP, J., WAAGMEESTER, A., WITTENBURG, P., WOLSTENCROFT, K., ZHAO, J., and MONS, B. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 3(1):160018. URL <http://www.nature.com/articles/sdata201618>.

- WU, X. and JIANG, D. (2022). Probabilistic impacts of compound dry and hot events on global gross primary production. *Environmental Research Letters*, 17(3):034049.
- YU, R. and ZHAI, P. (2020). Changes in compound drought and hot extreme events in summer over populated eastern china. *Weather and Climate Extremes*, 30:100295.