



universidad
de león



FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y
AMBIENTALES

**EVALUACIÓN DEL CAMBIO
CLIMÁTICO EN LA PENÍNSULA
IBÉRICA A TRAVÉS DE ÍNDICES
EXTREMOS DE PRECIPITACIÓN**

**EVALUATION CLIMATE CHANGE
DURING EXTREME
PRECIPITATION INDICES IN THE
IBERIAN PENINSULA**

Autor: David Gómez Rodríguez

Tutor: Andrés Merino Suances

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Julio, 2023

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ÁREA DE ESTUDIO	3
3. MATERIAL Y MÉTODOS	5
3.1 Datos	5
3.2 Metodología	6
3.2.1 Indicadores de extremos.....	6
3.2.2 Tests estadísticos.....	7
3.2.3 Análisis de tendencias. Test de Mann-Kendall.....	7
3.2.4 Correlación de Pearson	8
4. RESULTADOS	9
4.1 Análisis exploratorio	9
4.2 Análisis de los Indicadores extremos de precipitación	12
4.3 Análisis de tendencias de los Índices de extremos de precipitación.....	14
4.4 Teleconexiones con los índices NAO y ENSO.....	17
5. DISCUSIÓN	19
6. CONCLUSIONES	22
7. REFERENCIAS	23

RESUMEN

Existe un consenso general en la comunidad climática de que los cambios en los eventos climáticos extremos afectarían profundamente a los ecosistemas y sistemas socioeconómicos. Algunos de estos cambios tienen que ver con la precipitación y pueden estudiarse a través de índices de extremos de precipitación. La Península Ibérica es una de las regiones en el planeta con mayor sensibilidad a dichos cambios, su gran variabilidad en frecuencia y distribución de las precipitaciones hacen muy interesante estudiar estos índices para esta región. En este trabajo analizamos las tendencias de índices extremos de precipitación para la Península Ibérica con el objetivo de identificar cambios en dichas tendencias en el contexto del cambio climático en el período 1971 - 2015. También se analizó la influencia de los patrones atmosféricos a gran escala NAO y ENSO sobre los cambios en la tendencia de los índices extremos de precipitación en el mismo período. Los datos empleados para este análisis provienen de una rejilla de datos diarios de precipitación de 5x5 km de resolución espacial. Las tendencias de los índices extremos de precipitación se calcularon a través de la Prueba Mann-Kendall. La correlación de los patrones atmosféricos con los índices extremos de precipitación a través de la Prueba de correlación de Pearson. Los resultados mostraron un descenso en la precipitación entre los meses de mayo y agosto y un cambio para algunas zonas del oeste peninsular que indica una transición hacia un patrón de precipitación más concentrado y de mayor intensidad.

ABSTRACT

There is a general consensus in the climate community that changes in extreme weather events would profoundly affect ecosystems and socioeconomic systems. Some of these changes are due to rainfall and can be studied through indices of precipitation extremes. The Iberian Peninsula is one of the regions on the planet with the greatest sensitivity to these changes, its great variability in frequency and distribution of rainfall make it very interesting to study these indices for this region. In this paper we analyze the trends of extreme precipitation rates for the Iberian Peninsula with the aim of identifying changes in these trends in the context of climate change during the period 1971 - 2015. The influence of large-scale atmospheric patterns NAO and ENSO was also analyzed about the changes in trends of extreme precipitation indices in the same period. The data used for this analysis come from a grid of daily precipitation data with 20x20 km spatial resolution. The trends of the extreme precipitation indices were calculated through the Mann-Kendall Test. Correlation of the atmospheric patterns with the extreme precipitation indices through the Pearson Correlation Test. The results showed a decrease in Precipitation between the months of May and August and a change for some areas of the Western Peninsula that indicates a transition towards a more concentrated and intense precipitation pattern.

Palabras clave: Cambio climático, Índices extremos de precipitación, Tendencias, Península Ibérica .

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios atribuyen el aumento de la temperatura global al forzamiento antropogénico (Stocker *et al.*, 2013). Este aumento de la temperatura a escala global, conocido como calentamiento global, propicia que aumenten en frecuencia, intensidad y magnitud fenómenos meteorológicos extremos como olas de calor, sequías o inundaciones (Mhyre *et al.*, 2019). En consecuencia, durante el siglo XX los impactos de estos eventos extremos han aumentado sobre los ecosistemas y los sistemas socioeconómicos (Fischer y Knutti, 2016). Es por ello que el estudio de los índices de extremos climáticos ha adquirido especial interés en los últimos años. Estos estudios tratan de identificar cambios en la frecuencia o severidad de eventos climatológicos extremos, lo que resulta imprescindible para poder prevenir los posibles impactos asociados o bien mitigar sus efectos (Zhang *et al.*, 2005). Sin embargo, comprender los cambios en la variabilidad climática y en los extremos climáticos se vuelve un desafío considerable. Requiere una gran combinación de observaciones, análisis de datos y esfuerzos multidisciplinarios para abordar la comprensión de los sistemas climáticos (Meehl *et al.*, 2000). Cada zona del planeta puede tener una respuesta diferente a los efectos del calentamiento global, las condiciones extremas en una zona determinada pueden resultar normales para otra región. Si bien, los eventos extremos forman parte de la variabilidad natural del clima, los cambios en su frecuencia e intensidad se relacionan con la intensificación de los efectos del cambio climático, como podría ser el aumento de duración de una sequía o de los eventos de precipitaciones intensas. Para medir y evaluar la magnitud y frecuencia de estos eventos climáticos extremos se utilizan índices de extremos climáticos (IEC). Muchos de estos índices dependen de la precipitación y permiten analizar y comprender patrones en su variabilidad. La región del suroeste Europeo, en la que se encuentra la Península Ibérica (IP), es una de las zonas más afectadas por fenómenos meteorológicos extremos (Pereira *et al.*, 2017). Por este motivo, el análisis de estos índices climáticos en la IP es de particular importancia. En la última década el análisis de los cambios en la frecuencia intensidad y magnitud de estos índices en la IP ha dado lugar a multitud de estudios de diferentes tipos. Algunos utilizan simulaciones climáticas para recrear y predecir el comportamiento atmosférico de una zona y, por lo tanto, identificar la naturaleza y los cambios futuros de estas variables. (Rajczak *et al.*, 2017) empleando multimodelos climáticos regionales (RCMs), analizaron las proyecciones de precipitación y sus extremos en toda Europa, el resultado de estos modelos fue una previsión de que se intensifiquen los eventos extremos de precipitación al menos un 20%, así como la disminución de la precipitación media estival para la región Mediterránea. Otros estudios emplean datos

observacionales en diferentes escalas y períodos de tiempo para estudiar índices de precipitación. (Gallego *et al.*, 2006) investigaron para el período 1958 - 1997 varios índices extremos de precipitación (IEP) en la IP a partir de datos diarios de precipitación, observando una tendencia negativa para la frecuencia de episodios de lluvia ligera.

Para realizar un análisis de los IEP también pueden emplearse conjuntos de datos diarios de precipitación regionalizados. Estos conjuntos de datos se crean combinando mediciones tomadas en observatorios meteorológicos, con técnicas de interpolación espacial. A partir de los datos observacionales, se interpolan los valores de precipitación en las ubicaciones donde no existen observaciones directas. El resultado es una rejilla de datos con un valor de precipitación para cada punto, que representa gráficamente la precipitación de una zona. Estas rejillas de datos resultan muy efectivas para analizar patrones espaciales en las características diarias de la precipitación (Serrano-Notivoli *et al.*, 2017). Sin embargo, la interpolación de los datos puede resultar en un suavizamiento de los eventos extremos, debido a que este tipo de eventos suelen darse a escala local (Fernández y Saenz, 2003). Por ende, para utilizar datos diarios interpolados en el análisis de IEP, es necesario emplear rejillas interpoladas de alta resolución espacio temporal, en las que el suavizamiento resulta mínimo (Herrera *et al.*, 2012). En general los estudios sobre IEP analizados han mostrado un aumento en la frecuencia e intensidad de episodios extremos de precipitaciones (EPEs), así como una tendencia negativa en la precipitación total de la IP, y, en mayor medida, para la región mediterránea. Pero los resultados son heterogéneos, la naturaleza de la variable precipitación se caracteriza por su poca coherencia espacial y una alta variabilidad interanual. Además, las diferentes bases de datos y métodos empleados, propician la variación de los resultados en diferentes regiones. A pesar de la fuerte variación espacial y temporal en la precipitación, los patrones de circulación atmosférica a gran escala tienen una importante influencia sobre los eventos medidos por los IEP (Hidalgo-Muñoz *et al.*, 2011). Uno de estos patrones atmosféricos es la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), siendo el principal proceso que influye en la variabilidad climática en el oeste de Europa y por consiguiente en el clima de la IP (Gallego *et al.*, 2005). La relación entre EPEs e índices de circulación atmosférica como la NAO, han sido analizados por algunos autores para el territorio peninsular. (Vicente-Serrano *et al.*, 2009) encontraron patrones sinópticos asociados a lluvias intensas para valores NAO negativos en la zona occidental de la IP. (Merino *et al.*, 2016) analizaron la ocurrencia de EPEs y su asociación con patrones atmosféricos, obteniendo que los eventos en el suroeste de la IP sucedieron con fases NAO y Oscilación Mediterránea (MO) negativas.

Otro de los índices de circulación atmosférica que influye en menor medida el clima de la IP es

el índice de El Niño/ La Niña – Oscilación del Sur (ENSO). Los efectos de ENSO producen un impacto global en el clima, siendo capaz de aumentar la temperatura global cuando ENSO se manifiesta bajo el fenómeno de El Niño (Kiladis y Diaz, 1989). Dada la lejanía de la IP con el área de influencia del ENSO, los efectos de este fenómeno sobre la península no se encuentran claramente definidos. Aun así, algunos autores como (Mariotti *et al.*, 2005) señalaron que en eventos de El Niño, es posible identificar cambios abruptos en las condiciones climáticas en la región Europea, como sucesos de periodos secos en primavera o episodios de lluvias intensas en otoño. (Lorenzo *et al.*, 2010) establecieron conexiones entre el fenómeno de La Niña y periodos de sequía en el noroeste de la IP en primavera. En el caso de la NAO las teleconexiones con los eventos son evidentes, sobre todo en invierno. Para el índice ENSO parecen bastante claras en otoño y primavera.

En este trabajo se presenta un análisis de las tendencias de varios índices de extremos climáticos de precipitación en la península Ibérica. Estos se han calculado a través de una rejilla de alta resolución de datos diarios de precipitación en el periodo de 1971 a 2015 para la España peninsular e islas Baleares. Se espera que estos índices se vean afectados por cambios en su variabilidad, frecuencia y magnitud en consonancia con las tendencias observadas por otros autores.

El objetivo principal se trata de determinar la influencia del cambio climático en la tendencia de los índices de extremos de precipitación para la IP, así como el de identificar tendencias positivas o negativas para estos índices. También se incluye una correlación de estos índices con los procesos de circulación atmosférica de la NAO y el ENSO, cuyo objetivo será el de analizar la influencia de NAO y ENSO en la variación de frecuencia o intensidad de los índices de extremos climáticos estudiados.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La Península Ibérica, situada en el suroeste de Europa, se encuentra en una zona de transición entre el clima tropical y el templado (Fig. 1a). Una de las influencias climáticas en la IP más determinante proviene de ser un territorio delimitado por dos grandes masas de aguas, al norte y oeste peninsular por el Océano Atlántico y al este por el Mar Mediterráneo. También juega un papel fundamental su compleja configuración orográfica, multitud de sistemas montañosos con una disposición periférica que dificultan la entrada de masas de aire húmedo al interior peninsular (Fig. 1b). Gracias a su situación geográfica y a su compleja orografía esta región presenta una gran variabilidad espacio temporal para la precipitación. (Liu *et al.*, 2022), esta variabilidad en la precipitación ha sido fruto de multitud de estudios como en (Rodríguez-

Puebla *et al.*, 1998). A su vez la variabilidad climática en esta región viene determinada por la variación de ciertos índices climáticos que actúan a escala planetaria. Uno de estos índices se trata de NAO, su relación ha sido mostrada en estudios como (Rodríguez-Fonseca *et al.*, 2006), y en menor escala también tiene su influencia en la precipitación peninsular el índice de ENSO (Rocha, 1999). La variabilidad climática en la IP, clasificada según la escala de Köppen elaborada por (Chazarra Bernabé *et al.*, 2022) nos muestra la diversidad de climas que coexisten en esta región (Fig. 1 c). Para caracterizar cómo es el reparto espacial de la precipitación en la IP en líneas generales empleamos la división en zonas homogéneas de precipitación realizada por (Muñoz-Díaz y Rodrigo, 2004).

1. Costa norte: Alta precipitación anual entre 1000 y 2500 mm, que recibe constantemente sistemas frontales desde el Océano Atlántico.
2. Zona central: Baja precipitación anual, inferiores a 500 mm.
3. Costa este: Baja precipitación anual, inferiores a 700 mm y se manifiestan eventos extremos de precipitación provenientes de inclusiones de masas de aire cálido húmedo del Mediterráneo.
4. Zona sureste: Clima desértico con precipitaciones muy bajas inferiores a 100 mm.
5. Zona suroeste: Precipitaciones superiores a 900 mm, influenciadas por vientos Atlánticos.

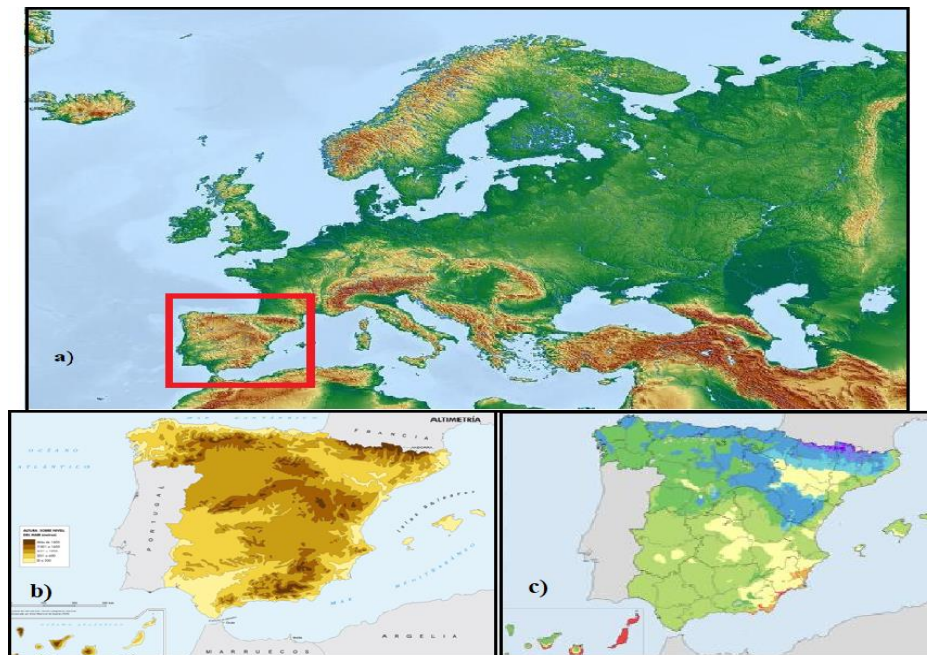


Figura1: a) Localización de la Península Ibérica, b) Orografía de IP elaborado por IGN, c) Clasificación climática de Köppen, colores amarillos corresponden a climas semiáridos Bs, colores verdes corresponden a climas templados con estación seca Cs, Azules son climas templados sin estación seca Cf y morados clima de alta montaña Ds.

En cuanto a los efectos que tiene el cambio climático en la IP (Bednar-Friedl *et al.*, 2022) sitúan este territorio como una de las zonas de especial vulnerabilidad frente al cambio climático, señalando además que la frecuencia y la intensidad de las precipitaciones intensas han aumentado desde la década de 1950 en la mayor parte de las superficies continentales. El aumento de la temperatura media en la IP se sitúa en 1.4°C respecto a los valores del siglo XIX, lo que provoca un aumento en la frecuencia de las olas de calor y pronostica una disminución en la precipitación especialmente en verano (Cramer *et al.*, 2018). No se ha llegado a un consenso en la variación de la precipitación en la IP dado que es una variable que cambia dependiendo de las bases de datos y períodos estudiados, pero las observaciones sí que muestran una tendencia hacia la disminución de las precipitaciones en la IP, así como un aumento de los eventos extremos de precipitación.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 Datos

Los datos para la realización del trabajo se han obtenido a partir de observaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Se han utilizado los datos observacionales de Spain02 (versión 5) para España peninsular e Islas Baleares. Estos datos Proviene de 2756 estaciones de la AEMET de alta calidad que recogen datos diarios de precipitación, los datos son sometidos a métodos de interpolación para formar el conjunto de datos Spain02 V5.0, el cual corresponde a una rejilla de 0.05° de resolución (5 km aproximadamente) que cubre a España Peninsular y Baleares. El procesado de los datos ha sido desarrollado por (Herrera *et al.*, 2016). Dentro de este conjunto de datos se trabaja con los datos comprendidos entre el periodo 1971 a 2015.

Respecto a los valores de los índices NAO y ENSO, se han obtenido del Climate Prediction centre (CPC) en forma de valores mensuales. Los valores del índice NAO corresponden a la diferencia de presión normalizada calculada entre una estación en el suroeste de Islandia y otra en Gibraltar, en forma de valores mensuales estandarizados para el periodo 1948 - 2017 según (Jones *et al.*, 1998). Los valores del índice ENSO han sido calculados por el CPC en forma de valores estandarizados mensuales para el periodo 1950 – 2022, mediante análisis combinado para el periodo de 1950 - 1994 y a partir de 1995, mediante un esquema de interpolación óptima (Climate Prediction Center, 2023). Este índice se calcula a partir de la diferencia de temperatura promedio superficial del mar en la región central del Pacífico, con la temperatura promedio de larga duración. Valores positivos indican condiciones de El Niño, valores negativos indican condiciones de La Niña.

3.2 Metodología

A partir de los datos diarios de precipitación Spain02 V5.0 en formato NETCDF se emplea el software libre R versión 3.3.3 (RCore Team, 2021). Este software dispone de librerías desarrolladas por la comunidad que permiten realizar diferentes análisis. Principalmente hemos empleado las librerías: Kendall (McLeod, 2015) para el análisis estadístico, sp (Bivand, 2022) y sf (Pebesma, 2018) en el análisis espacial. Mediante el uso de estos paquetes en el software R calculamos una serie de IEP y sus relaciones con NAO y ENSO para el período 1971 - 2015.

3.2.1 Indicadores de extremos de Precipitación

Se han calculado algunos de los IEP propuestos por el equipo de expertos de la asociación meteorológica mundial (OMM) en detección y monitoreo de índices de cambio climático (ETCCDMI). Estos índices provienen de un esfuerzo coordinado para desarrollar, calcular y analizar un conjunto de índices de extremos climáticos, recogidos en (Sillmann y Roeckner, 2008). Se han empleado ampliamente para caracterizar la frecuencia, duración e intensidad de eventos de precipitación extrema en estudios de todo el mundo (Ahmad *et al.*, 2022). El presente estudio consideró los IEP descritos en la (Tabla 1). También fueron calculados el índice de precipitación media anual y precipitación media mensual para establecer relaciones con los demás IEP.

Tabla 1: Índices extremos de precipitación definidos por el ETCCDMI empleados en este trabajo.

Nombre	Descripción	Unidades
CDD	Cuenta del número de días consecutivos donde $RR(i, j) < 1$	días
CWD	Cuenta del número de días consecutivos donde $RR(i, j) > 1$	días
CWD5	Cuenta del número de días consecutivos donde $RR(i, j) > 5$	días
CWD10	Cuenta del número de días consecutivos donde $RR(i, j) > 10$	días
R1	$RR(i, j)$ cantidad diaria de precipitación en el día i , en el periodo j ; $RR(i, j) \geq 1$ mm	días
R10	$RR(i, j)$ cantidad diaria de precipitación en el día i , en el periodo j ; $RR(i, j) \geq 10$ mm	días
R20	$RR(i, j)$ cantidad diaria de precipitación en el día i , en el periodo j ; $RR(i, j) \geq 20$ mm	días
R25	$RR(i, j)$ cantidad diaria de precipitación en el día i , en el periodo j ; $RR(i, j) \geq 25$ mm	días
R50	$RR(i, j)$ cantidad diaria de precipitación en el día i , en el periodo j ; $RR(i, j) \geq 50$ mm	días

Estos índices pueden ser clasificados en subclases en función de la duración (CDD, CWD, CWD5) o umbral (R1, R10, R50). El uso combinado de estos índices permitirá realizar el análisis de la variación a lo largo del tiempo y análisis de tendencia para el periodo de tiempo que abarca nuestro estudio. Los IEP se calcularon a escala anual, estableciendo sus valores medios anuales, excepto en el caso de la precipitación media mensual. Las relaciones entre los índices Rx con NAO y ENSO se calcularon en escala anual y mensual.

3.2.2 Tests estadísticos

Las posibles tendencias positivas, negativas o nulas de la serie temporal de datos de precipitación pueden ser identificadas a través del análisis de tendencias, con métodos paramétricos o no paramétricos. Los métodos paramétricos resultan más efectivos para determinar tendencias en series de datos climáticos, pero requieren de una distribución normal de los datos (Lettenmaier *et al.*, 1994), lo que no es usual en series de datos temporales como la que estudiamos en este trabajo. Es por ello que en estudios de este tipo suelen emplearse generalmente métodos no paramétricos para el análisis de tendencias ya que no presentan las limitaciones mencionadas anteriormente. Posteriormente para el estudio de la correlación entre índices de variabilidad NAO, ENSO y los IEP se emplean pruebas paramétricas ya que se tratan de variables estandarizadas. A continuación, se analizan los métodos estadísticos que hemos utilizado.

3.2.3 Análisis de tendencias. Test de Mann-Kendall

En este trabajo se ha empleado el test de Mann-Kendall para analizar las tendencias anuales y mensuales de los IEP para la España peninsular a través del paquete Kendall implementado en el software R. El test Mann-Kendall es un test no paramétrico basado en un test anterior debido a (Mann, 1945) y ampliado por (Kendall, 1976). Este Test se utiliza para analizar tendencias en series hidro-climáticas ya que a diferencia de las pruebas paramétricas no necesita una distribución normal de los datos, únicamente que estos sean independientes (Blanco-Gómez *et al.*, 2019).

Consiste en la comparación de los valores que componen una serie temporal en orden secuencial. Para ello establece como hipótesis nula H_0 una serie temporal de observaciones $(X_1, X_1 \dots X_n)$ que son variables aleatorias idénticas e independientemente distribuidas. La hipótesis alternativa H_1 establece que se distribuyen con una tendencia creciente o decreciente. Con esta prueba obtenemos dos resultados, *tau* (T) y el estadístico *p*.

La expresión es la siguiente siendo el estadístico del test la T de Kendall:

$$T = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_i - X_j)$$

Donde la función $\text{sgn}(X)$ es la función signo, toma valores -1, 0 o 1.

Para que H_0 sea verdadera T debe presentar una distribución aproximadamente normal con

media 0, la varianza de T bajo la hipótesis nula es:

$$var(T) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

El resultado de T indica la posible existencia de tendencias si es significativamente diferente de 0, si es así la H_0 puede ser rechazada y sería aceptada la H_1 . Los valores positivos indican tendencias positivas y al contrario para los valores negativos. Cuanto más cercanos sean los valores de *tau* a 1 o -1 mayor será la tendencia.

$$T' = T - \text{sgn}(T)$$

$$p = \frac{T'}{\sqrt{var(T)}}$$

p representa el valor del test estadístico, si obtenemos un valor *p* menor a 0.05 se rechaza la H_0 existiendo una tendencia significativa, que a su vez vendrá determinada en magnitud y dirección por el valor *tau*.

3.2.4 Correlación de Pearson

Empleamos este test para analizar la correlación positiva o negativa entre cada uno de los IEP y los índices de variabilidad climática NAO y ENSO mediante el software R.

Se trata de una prueba paramétrica de dependencia lineal entre dos variables que mide la correlación entre ellas, los valores de la correlación oscilan entre 1 y -1. Los valores cercanos a 1 indicarán una alta correlación entre las dos variables, valores cercanos a -1 implican que las variables están inversamente correlacionadas. Valores cercanos a 0 indican la baja existencia de correlaciones, tanto positivas como negativas. Cabe destacar que para los índices precipitación media anual, R1, R10, R20, R25 y R50 se realizaron tanto correlaciones con los valores anuales como con los valores mensuales con los índices NAO y ENSO.

4. RESULTADOS

4.1 Análisis exploratorio

La precipitación media anual de la serie temporal de datos Spain02 V5.0 se muestra en la (Fig. 2), los valores de la precipitación anual en la IP presentan una diferente distribución debido a su diversidad geográfica y climática, que se manifiesta en un gradiente de precipitación de norte a sur. En la zona al norte de la Cordillera Cantábrica y en Galicia los valores de precipitación superan los 1000 mm, encontrando máximos de alrededor de 2000 mm en la costa gallega, norte de País Vasco y Navarra. En el noroeste de Castilla y León y Extremadura obtenemos valores medios de precipitación entre los 600 y 800 mm. Por debajo de los 500 mm de precipitación se encuentran las zonas interiores de la submeseta norte y submeseta sur. El este y sureste peninsular presenta un clima más seco con precipitaciones entre 250 y 600 mm, siendo los valores de precipitación mínimos en la región de Murcia y Almería.

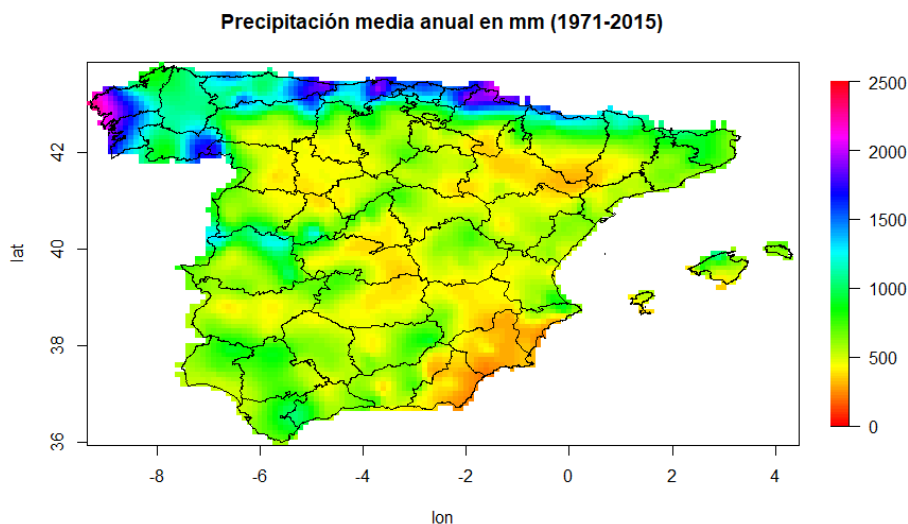


Figura 2: Precipitación media anual IP en mm para el período (1971 -2015). Fuente: elaboración propia en R datos rejilla Spain02 V5.0.

El resultado de la prueba Mann-Kendall para el análisis de tendencias en la precipitación media anual se muestra en la (Fig. 3), en él se observan tendencias negativas para el valor de la precipitación media anual en la mayoría del territorio peninsular, excepto para Galicia y algunas regiones aisladas repartidas a lo largo de todo el territorio. Las tendencias negativas significativas en la precipitación media anual (95%) se registran sobre todo en zonas interiores, del centro y sureste peninsular pero también en Cataluña. Este análisis también mostró la aparición de tendencias positivas en zonas puntuales de la península localizadas principalmente en el oeste peninsular, los aumentos en la tendencia fueron significativos para zonas correspondientes a la costa este Asturiana, norte de Burgos, norte de Extremadura y al este de la provincia de Sevilla.

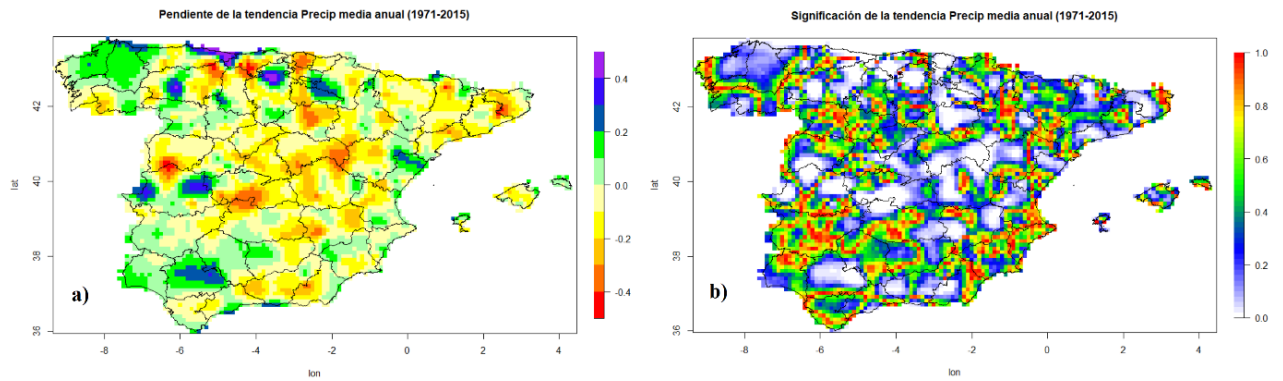
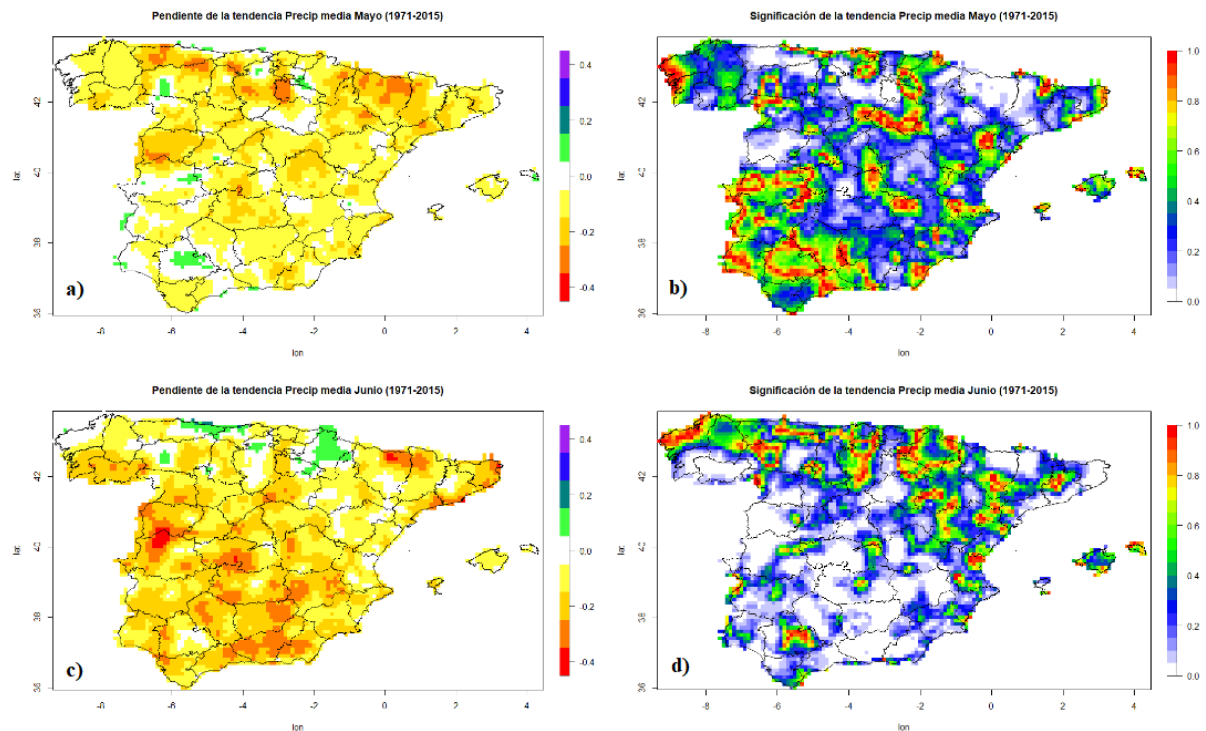


Figura 3: Resultados Mann-Kendall para la precipitación media anual. a) Valor tau, colores cálidos, amarillo, naranja, rojo, indican tendencias negativas en el valor de la precipitación, colores fríos verde azul morado indican tendencias positivas para la precipitación. b) P value, indica significación de los resultados, los valores significativos al 95% aparecen representados en color blanco.

También se analizaron los valores de la precipitación media mensual para la serie temporal, para estos valores de precipitación mensual obtuvimos una disminución de las tendencias para la mayoría de los meses, exceptuando los meses de septiembre, octubre y noviembre con tendencias positivas. Las tendencias negativas más fuertes se dieron para los últimos meses de la primavera y principios de verano, haciéndose notorias estas tendencias negativas en el valor de la precipitación para los meses de mayo junio y julio (Fig. 4). En el mes de mayo, se observaron disminuciones significativas en la precipitación media en el norte peninsular y ligeramente significativas (90%) para áreas del centro peninsular, región de Murcia y Almería.



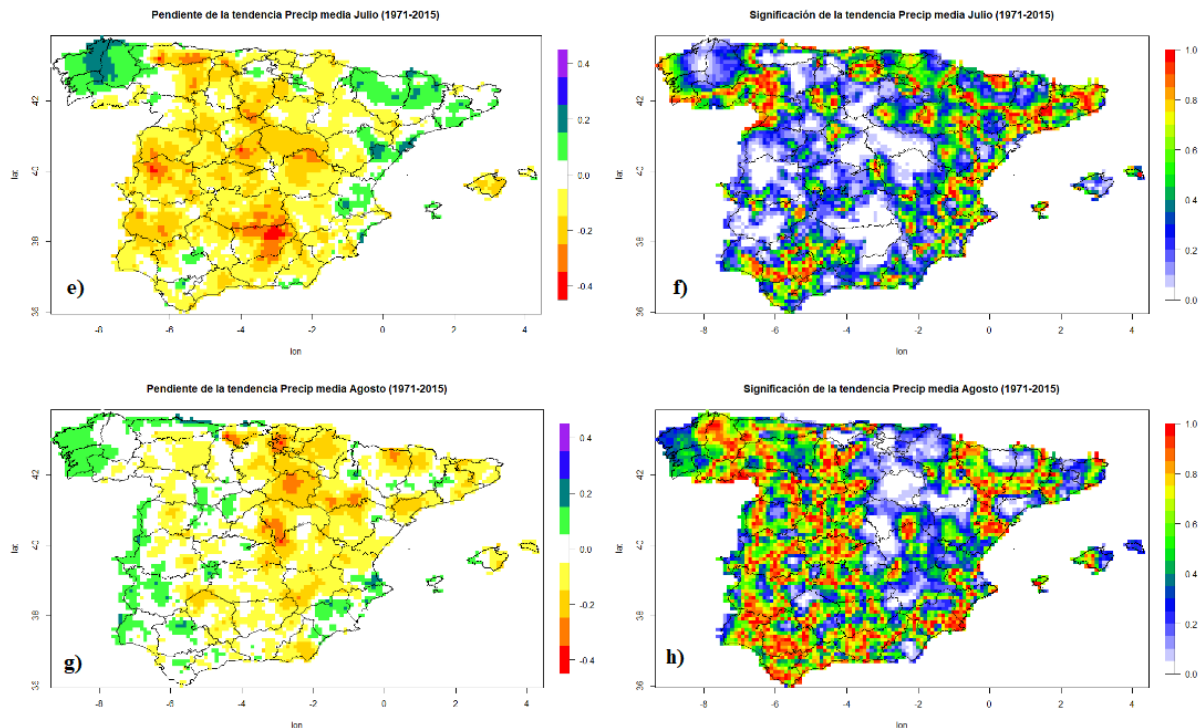


Figura 4: Valores pruebas no paramétricas precipitación media mensual. a) Valor tau para el mes de mayo. b) Significación mes de mayo. c) Valor tau mes de junio. d) Significación mes de junio. e) Valor tau mes de julio. f) Significación mes de julio. g) Valor tau mes de agosto. h) Valor significación mes de agosto.

Es en el mes de junio en el que se encontró una disminución general de la precipitación para todo el territorio con valores significativos, exceptuando la franja norte de Galicia a Navarra y el valle del Ebro. Las tendencias de la precipitación fueron negativas también para el mes de julio en gran parte del territorio, siendo significativas en la zona central de la IP y al norte en Asturias, Palencia y Burgos. En el mes de agosto empiezan a desaparecer las tendencias negativas, pero todavía puede observarse en la región correspondiente a País Vasco, La Rioja, Soria y Zaragoza claras tendencias negativas significativas.

En contraste, obtenemos que en los primeros meses del otoño existen tendencias positivas que indican un aumento de la precipitación, sobre todo para los meses de septiembre y octubre (Fig. 5). Las tendencias fueron positivas y repartidas de forma muy homogénea para toda la mitad oriental de la IP con límite en la cordillera Cantábrica en el mes de octubre, siendo el mes en el que mayor superficie de significación presentó. En el mes de septiembre, la mayor parte del territorio correspondiente a la mitad sur peninsular presenta tendencias positivas y significativas, con aumento de la precipitación. Al igual que en el mes anterior, se encontraron repartidas de forma muy homogénea en toda esta zona. La superficie con aumento de significación fue menor que en octubre. Para el resto de los se obtuvieron tendencias más débiles y no significativas, estos meses coincidieron con el periodo de diciembre a abril.

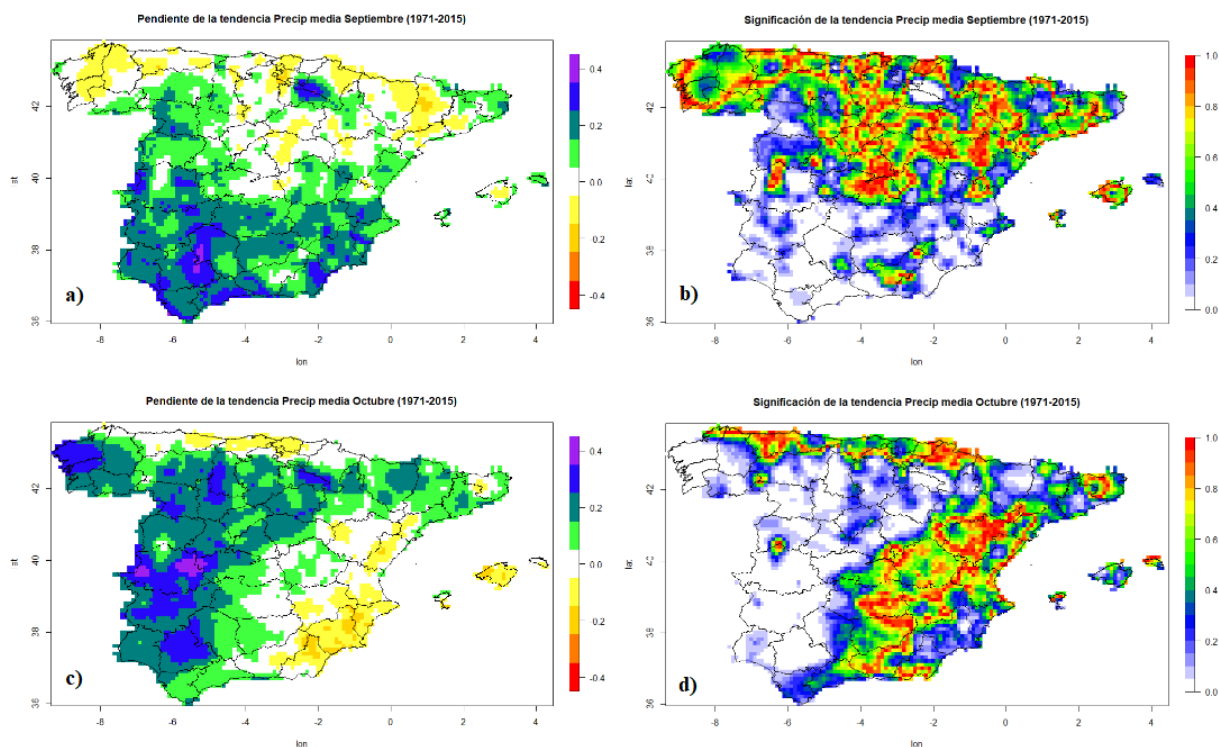


Figura 5: Valores pruebas Mann-Kendall meses septiembre y octubre. a) Valor tau para la IP para septiembre. b) Valor significación septiembre. c) Valor tau IP mes de octubre. d) Valor significación mes de octubre.

Como resumen del análisis exploratorio encontramos reducciones en la tendencia de la precipitación anual para la mayoría del territorio, las tendencias negativas mensuales más destacables son las correspondientes a los últimos meses de primavera y meses de verano siendo significativas en una gran parte del territorio en los meses de mayo, junio y julio y también destacables en agosto, pero con menor significación.

También se observa un aumento significativo de la tendencia en los meses de septiembre y octubre para la mitad sur y mitad oriental respectivamente.

4.2 Análisis de los Indicadores extremos de precipitación

La (Fig. 6) muestra el patrón espacial de los indicadores de rachas de días secos y días húmedos consecutivos, en ellas se observan las diferencias en la distribución y frecuencia de las precipitaciones de la IP. El gradiente latitudinal en la distribución de las precipitaciones en la IP se manifiesta en el indicador CDD (Fig. 6a), con valores de más de 50 días en el sur en contraste con los valores del norte de períodos máximos de 15 días sin precipitación. El indicador CWD también se expresa como un gradiente, pero en este caso longitudinal, la parte oriental peninsular en general tiene valores superiores a los 15 días, en cambio, en el este los valores no superan rachas de 10 días consecutivos con precipitación. Este gradiente se manifiesta de igual manera para los indicadores CWD5mm y CWD10mm, que siguen un patrón de distribución muy similar al CWD, y permiten ver que los eventos de días consecutivos con

precipitación en la IP suelen ser de intensidades al menos moderadas.

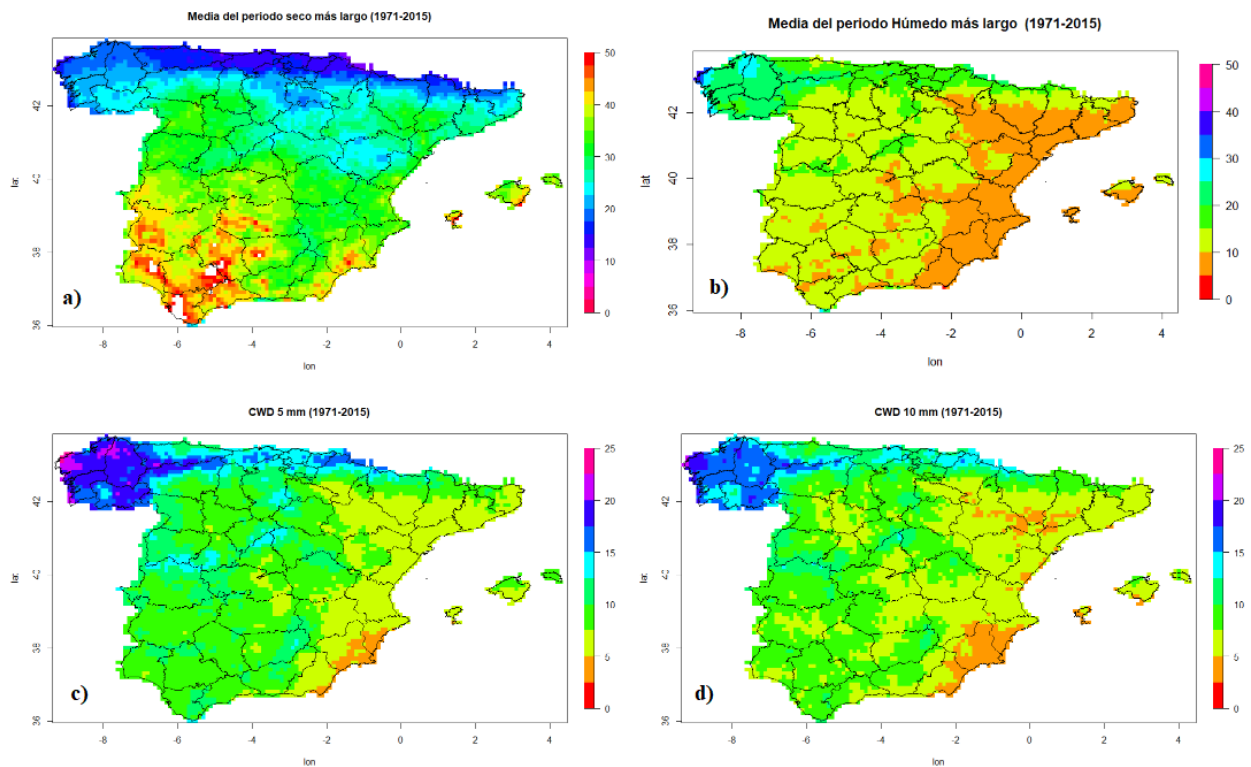


Figura 6: Valores media anual de ocurrencia de precipitación. a) CDD. b) CWD. c) Número de días consecutivos en un año en los que la precipitación es superior a 5 mm. d) Número de días anuales en los que la precipitación es superior a 10 mm.

En lo que respecta a los índices de intensidad de precipitación, se calcularon los índices del número de días al año con precipitaciones por encima de ciertos valores de precipitación, detallados en la Tabla 1, los resultados se muestran en la (Fig. 7). Los índices R1, R10, R20 y R50 muestran un patrón de distribución espacial muy similar al de la precipitación media anual, con valores altos al noroeste y zonas elevadas y bajos para el sureste peninsular. El índice R1 en la franja norte supera valores de 150 días con precipitación al año lo que indica un buen reparto temporal de las precipitaciones. Destaca el alto número de días con precipitación superior a 10 mm, con más de 20 días excepto para el centro y la región de Murcia - Almería y más de 40 días para la zona de la costa norte atlántica. Los índices R20 y R25 fueron muy similares en cuanto a su distribución. El número de días con precipitaciones intensas o muy intensas de R20 a R50 son muy poco frecuentes en la zona centro peninsular y muestran que las zonas susceptibles de sufrir precipitaciones intensas o extremadamente intensas son zonas costeras cercanas a masas de agua. Zonas de la costa atlántica norte, sobre todo en Galicia con más de 30 días de R20 y de 1 a 6 días de R50 anualmente y la franja de la costa mediterránea con al menos un evento al año de R50 y de 5 a 10 días con R20.

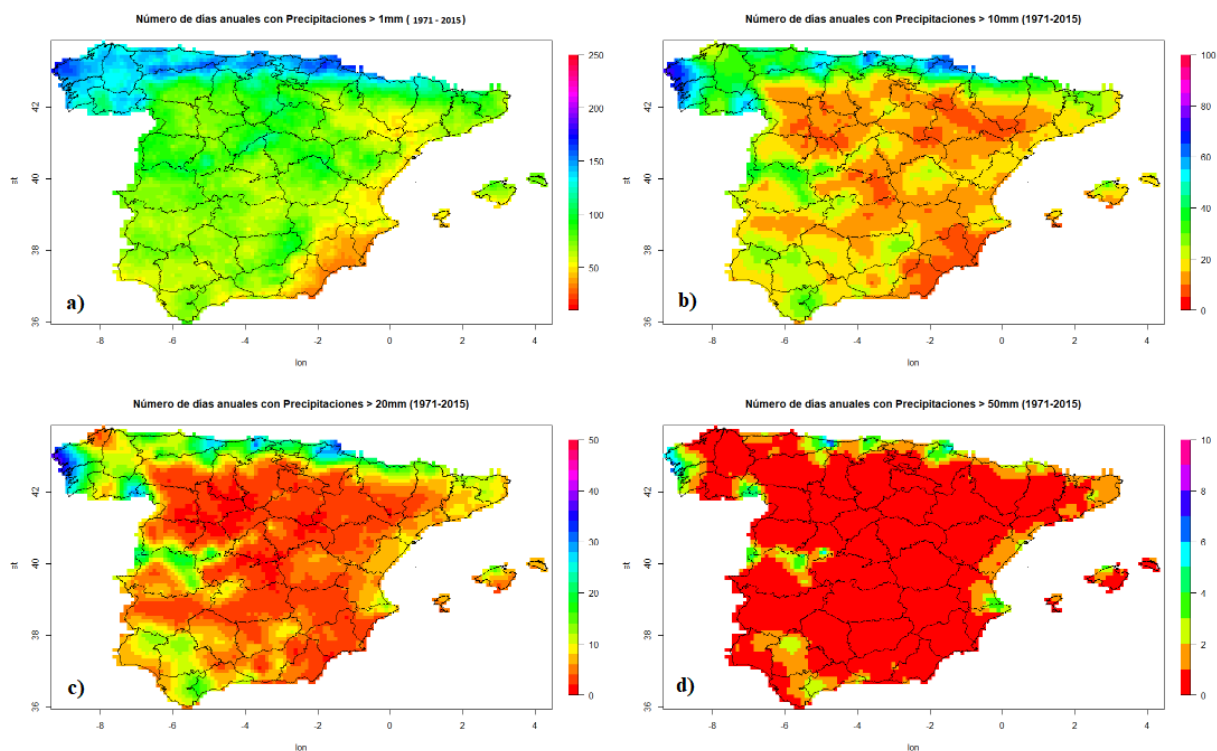


Figura 7: a) Número de días superiores a 1mm (R1mm). b) Número de días superiores a 10 mm (R10mm). c) Número de días superiores a 20mm (R20mm). d) Número de días superiores a 50 mm (R50mm).

En la región suroeste de la IP desde el norte de Extremadura a Cádiz también presenta un alto número de días con precipitaciones intensas o muy intensas con valores cercanos a 20 días de R20 y de 2 a 4 días de R50.

4.3 Análisis de tendencias de los Índices de extremos de precipitación

Se analizaron las tendencias para cada uno de los IEP calculados a través de Mann-Kendall test. Estas tendencias variaron ampliamente en signo y significado debido a la variabilidad de la precipitación en nuestra área de estudio. En la (Fig. 8) se muestran los análisis de tendencias de las rachas de días secos y días húmedos. Para el índice CDD en general las tendencias negativas y positivas obtuvieron valores cercanos a cero, siendo poco significativas. Las tendencias positivas se sitúan mayormente en la parte norte de la IP y las negativas al sur de la cornisa Cantábrica, en la zona central de la IP de Castilla la Mancha encontramos un aumento de la tendencia pero con bajos valores de significación. En cuanto a los índices CWD, tuvimos en cuenta el número de días consecutivos con precipitación superior a 5mm y a 10 mm, CWD5mm y CWD10mm respectivamente, las tendencias de estos índices mostraron una disminución de las rachas de días húmedos en la mayoría del territorio, excepto para una pequeña franja de territorio localizada a lo largo de las provincias de Albacete y Murcia donde las tendencias fueron positivas.

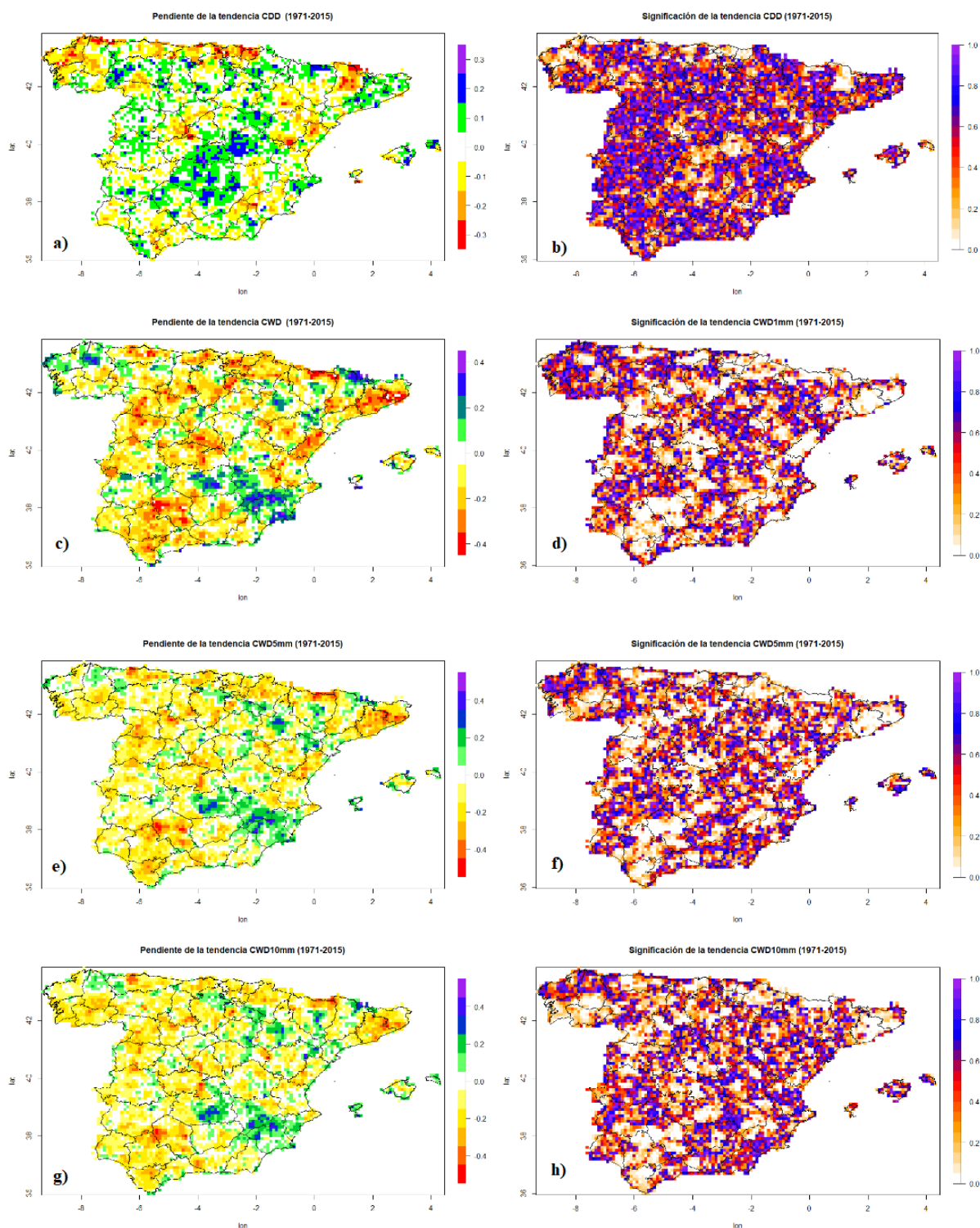


Figura 8: Análisis de tendencias Mann-Kendall para índices de rachas secas y húmedas. a) Pendiente de la tendencia CDD. b) Significación de la tendencia CDD. c) Pendiente de la tendencia CWD. d) Significación de la tendencia CWD. e) Pendiente de la tendencia CWD5 mm. f) Significación de la tendencia CWD 5 mm. g) Pendiente de la tendencia CWD 10 mm. h) Significación de la tendencia CWD 10 mm.

Las tendencias negativas significativas se dieron en zonas de Cataluña, centro de Andalucía, zona central, zona Orensana – Zamorana y cornisa Cantábrica. Cabe destacar que tanto las tendencias y como los niveles de significación se suavizaron al aumentar el valor de la

precipitación en los índices de rachas húmedas. Por último, se analizaron las tendencias de los índices correspondientes al número de días con precipitación por encima de un valor de precipitación (Fig. 9), Para los que se obtuvieron diferentes tendencias dependiendo del índice analizado.

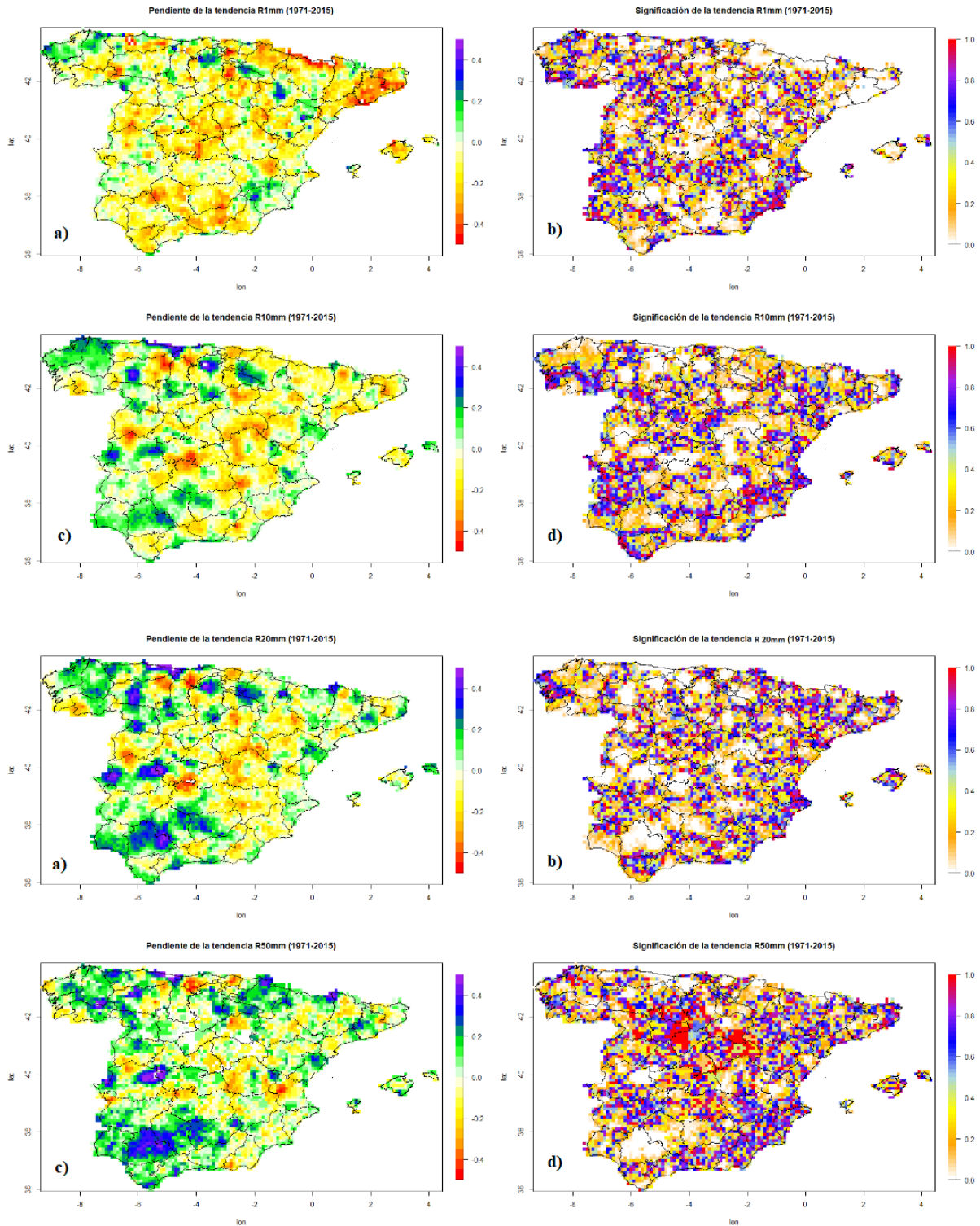


Figura 9: Pendiente y significación de Índices de Frecuencia de precipitación. a) Pendiente R1. b) Significación R1. c) Pendiente R10. d) Significación R10. e) Pendiente R20. f) Significación R20. g) Pendiente R50. h) Significación R50.

Lo observado en el índice R1 refuerza los resultados obtenidos en la (Fig. 3). Tanto la cantidad de precipitación, como el número de días con precipitaciones débiles, muestran tendencias negativas para la mayoría del territorio y son significativas en ambos índices en regiones del centro y sur peninsular. Los aumentos puntuales que se observaron en el análisis de la precipitación media solo se verifican para este índice para la zona norte de Burgos y La Rioja, donde se ve un aumento de la tendencia. Tendencias negativas con cierta significación aparecen también en índices R10 y R20 en zonas del centro peninsular, estas tendencias negativas disminuyen a medida que aumentamos el valor del índice. Destaca la aparición de un patrón de tendencias positivas y significativas en zonas puntuales de la IP ubicadas a lo largo de la mitad oeste, estas zonas coinciden espacialmente con aquellas en las que aumentaba la precipitación media anual en la (Fig. 3). Para los índices R25 y R50 se repite el mismo patrón con aumento de las tendencias para esas zonas puntuales.

4.4 Teleconexiones con los índices NAO y ENSO

Se analizó la influencia de la NAO sobre los IEP calculados para la IP mediante la prueba de correlación de Pearson. Los resultados mostraron que cuando se realiza la correlación con valores anuales entre NAO e IEP no aparecen correlaciones entre ambos. Es por ello que se analizó la correlación entre la NAO y algunos de los IEP en forma de valores mensuales para el periodo de estudio. Al analizar valores mensuales de precipitación media mensual aparecen correlaciones para los meses de invierno y verano, siendo los meses de diciembre y agosto los que mayores valores de correlación presentaron en la mayoría de la IP (Fig. 10). De la misma forma se realizó para los índices R1, R10, R20, R25 y R50. Los resultados de la correlación de estos índices con NAO muestran resultados similares para los índices de precipitaciones moderadas R1 y R10, coincidiendo la correlación en meses de invierno y verano. De manera que se va aumentando el valor de intensidad de precipitación para estos índices, se va suavizando los valores de correlación en diciembre y agosto en R20 y R25. Para el índice R50 ya no se encuentran correlaciones con NAO. También analizamos las correlaciones NAO con los índices CDD y CWD con los datos anuales de estos índices. Obtuvimos valores de correlación bajos de 0.2 a 0.5 que indican correlaciones positivas para ambos índices.

En los meses de invierno las correlaciones encontradas fueron negativas, lo que indica una relación entre valores negativos de NAO y la precipitación. A su vez en verano las correlaciones fueron positivas, indicando relación entre NAO positiva y los valores de las precipitaciones en la IP.

Por último se realizó también la correlación de los IEP con el índice ENSO. Al igual que con el índice NAO aparecen correlaciones cuando analizamos los datos de los índices con valores

mensuales. Los resultados de la comparación de estos índices mostraron correlaciones por encima de 0.5 entre los índices precipitación media mensual y los R1, R10, R20, en este caso se da entre los meses de transición entre verano e invierno, siendo los que más correlación presentan los meses de abril en primavera y octubre en otoño. Los índices CDD y CWD no presentan ningún tipo de correlación con ENSO para el periodo de datos estudiado.

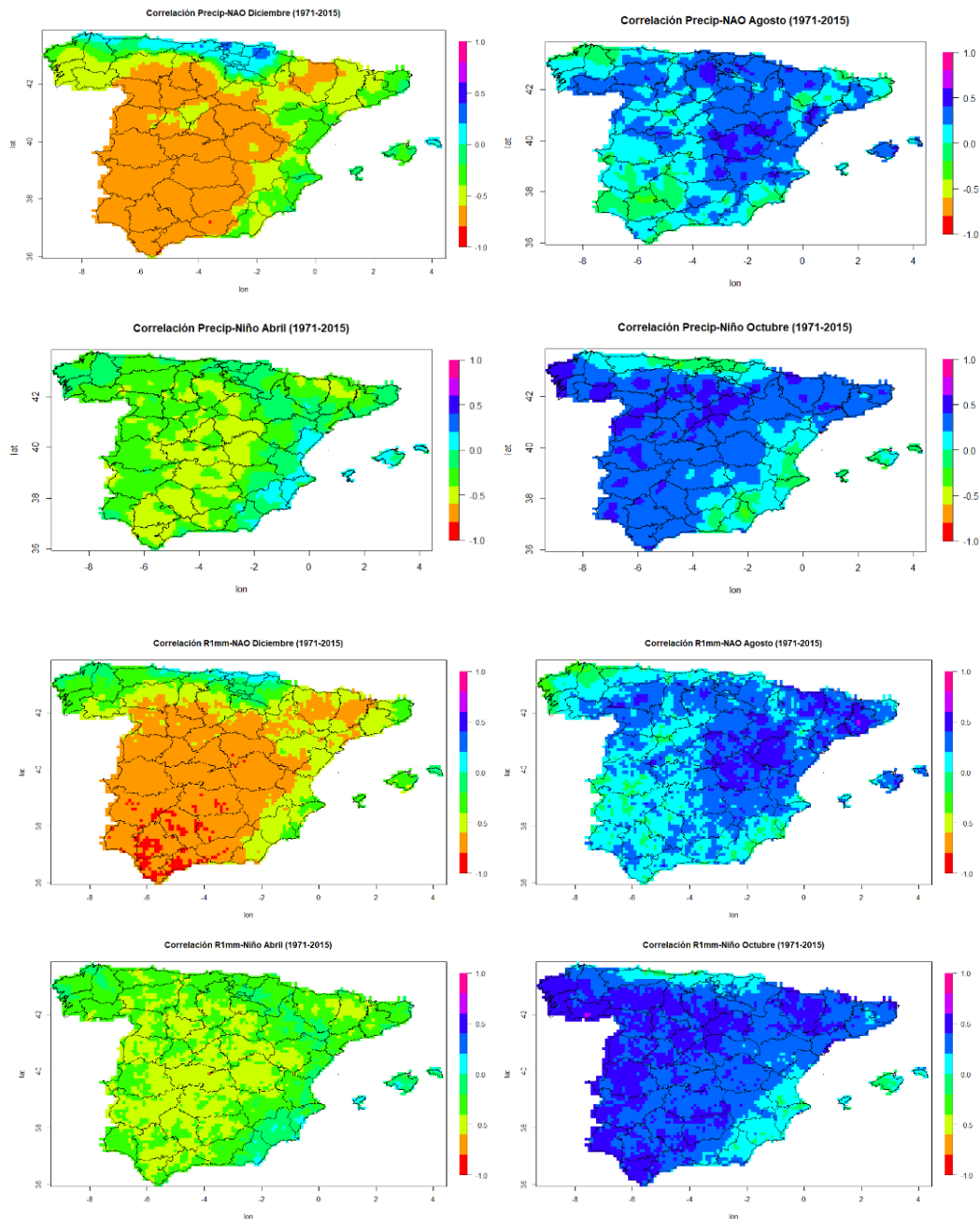


Figura 10: Correlaciones NAO y ENSO con índices de precipitación mensuales. a) NAO-Precipitación media diciembre. b) NAO-Precipitación media agosto. c) ENSO-Precipitación media abril. d) ENSO-Precipitación media octubre. e) NAO-R1 diciembre. f) NAO-R1 agosto. g) ENSO-R1 abril. h) ENSO-R1 octubre.

En cuanto a la correlación de los IEP con el índice ENSO, aparecen correlaciones cuando analizamos los datos de los índices con valores mensuales. Los resultados de la comparación

de estos índices mostraron correlaciones por encima de 0.5 entre los índices precipitación media mensual y los R1, R10, R20, en este caso se da entre los meses de transición entre verano e invierno, siendo los que más correlación presentan los meses de abril en primavera y octubre en otoño. Los índices CDD y CWD no presentan ningún tipo de correlación con ENSO para el periodo de datos estudiado.

5. DISCUSIÓN

La precipitación es una variable que se caracteriza por su baja coherencia espacial y una alta variabilidad temporal. Comprender los patrones espaciales y temporales de la precipitación es de gran importancia para la planificación de los recursos hídricos, prevención de eventos extremos y desarrollo de actividades económicas. Nuestra primera observación fue una disminución de la tendencia en la cantidad de precipitación media anual. Numerosos estudios han abordado el análisis en los cambios en la cantidad y la frecuencia de la precipitación en la IP. Entre las investigaciones más destacadas, se encuentran los trabajos de (Liu *et al.*, 2022) que utilizando el Modelo 2-layers con datos ERA-5, observaron descensos en la precipitación media de verano cercanos al 20%. (Rajczak y Schär, 2017) Mostraron una reducción del número de días con precipitación utilizando modelos de clima regional (RCMs). (Gonzalez-Hidalgo *et al.*, 2010) Analizaron la tendencia de las precipitaciones de 1946 a 2006, obteniendo tendencias negativas en la precipitación para los meses de marzo y junio. Estos estudios emplean diferentes metodologías y fuentes de datos, pero tanto los que se basan en modelos de precipitación, como en datos observacionales, apuntan en la misma dirección, la reducción en la cantidad de precipitación anual se debe a la reducción en los meses de verano y primavera. Nuestros resultados van en consonancia con estos estudios, en los meses de mayo a julio obtuvimos tendencias negativas en la cantidad de precipitación (Fig. 4), lo que podría explicar la disminución del total de precipitación anual. Aun así, es muy difícil pensar que esta reducción en la cantidad de precipitación se deba solamente a un factor en concreto. Relacionar este descenso con los cambios de tendencias de IEP puede proporcionar una comprensión más detallada de sus causas. Uno de los IEP que tuvo tendencias negativas fue R1, indicando una reducción en la frecuencia de precipitaciones en gran parte de la IP. Esto contrasta con los resultados de (Serrano-Notivoli *et al.*, 2018) que empleando una rejilla de alta resolución con datos de 1950 a 2012, obtuvieron tendencias positivas en la región mediterránea en el índice R1. (Gallego *et al.*, 2011) encontraron diferencias en R1 entre dos periodos distintos, de 1903 a 1953 con tendencias positivas y de 1954 a 2003 con tendencias negativas. Por lo que parece, el periodo de datos estudiado influye en las tendencias obtenidas para R1.

En cuanto a los IEP de duración de eventos de precipitación, las tendencias de CDD fueron negativas al norte y positivas para el sur, pero con bajos valores de significación, lo que no permite establecer cambios en la duración de los periodos secos. Para el índice CWD sí que obtuvimos tendencias claras. En la costa mediterránea y regiones del centro y sur peninsular, las tendencias indicaron una disminución en la duración de eventos húmedos, a diferencia de lo que ocurrió en la zona de Murcia y Castilla la Mancha, que registraron tendencias positivas. Los resultados de otros estudios como el anteriormente mencionado o de (Merino *et al.*, 2016) señalaron un aumento en la duración de eventos húmedos de baja precipitación en la costa mediterránea y una disminución en duración de eventos de precipitación alta. Para nuestro estudio solo se observaron disminuciones en la duración de eventos CWD10 y en la duración del periodo húmedo en Murcia, pero no para el resto del territorio, donde la tendencia fue negativa. Las diferentes tendencias observadas en estos índices podrían deberse al periodo de datos estudiado, las diferentes bases de datos empleadas y los métodos estadísticos utilizados para su tratamiento. Estas diferencias también resaltan la dificultad de verificar tendencias de los IEP en la IP, que presenta una compleja distribución temporal y espacial de la precipitación. Por otro lado, destacamos la aparición de un patrón espacial para varios de los índices estudiados. Este patrón se manifestó para zonas puntuales de la franja occidental de la IP. Las zonas afectadas mostraron tendencias positivas y significativas en la precipitación media anual (Fig. 3), en la precipitación media de septiembre y octubre (Fig. 4) y en los índices R10, R20, R25 y R50 (Fig. 9). Además, a medida que se aumentó la intensidad de los índices Rx este patrón fue más evidente. Esto sugiere un cambio en el régimen de precipitaciones para estas zonas en otoño, donde los EPEs son cada vez más frecuentes. (De Lima *et al.*, 2013) observaron para Portugal un aumento de la frecuencia y magnitud de EPEs en otoño, utilizando una serie de datos de 1941 a 2007. (Gonzalez-Hidalgo *et al.*, 2010) también encontraron tendencias positivas para el mes de octubre en la precipitación media en el oeste peninsular, siendo más representativas para la región de Galicia. (Merino *et al.*, 2016) indicaron que la alta temperatura de los mares y océanos en otoño provocan flujos de humedad más fuertes, capaces de producir estas precipitaciones. Asimismo (Fernández-Montes *et al.*, 2014) detectó en otoño un incremento en la frecuencia del flujo oeste propicia que se produzcan con mayor frecuencia EPEs en el noroeste peninsular. Estos resultados parecen indicar un incremento en la frecuencia del flujo oeste probablemente causado por la temperatura del Océano, que incide en el aumento en la frecuencia de IEP y provoca el incremento de la precipitación otoñal en el oeste de la IP (Lorenzo *et al.*, 2010). Esta interpretación explica las tendencias positivas encontradas para zonas localizadas repartidas por el oeste peninsular para los índices R10, R20, R25 y R50 así

como el aumento observado de la precipitación media en octubre y septiembre. Finalmente, (Hidalgo-Muñoz *et al.*, 2011) estableció que los patrones atmosféricos dominantes producen precipitaciones fuertes en el suroeste de la IP, cuando se establecen centros de bajas presiones en el noroeste peninsular y altas en el este de la costa británica. (Rodrigo y Trigo, 2007) mostraron que hay una fuerte relación entre NAO y la Oscilación del Mediterráneo (MO) y la frecuencia e intensidad de EPES en el suroeste. Todo parece indicar que cambios de las circulaciones atmosféricas inciden en la probabilidad de sucesos de eventos de precipitación extrema y en la variabilidad del régimen de precipitaciones en la IP. Es por ello que en este trabajo se analizó la correlación entre NAO y los IEP así como en la variabilidad de las precipitaciones. Los resultados obtenidos en la correlación entre NAO y la precipitación media mensual mostraron altos niveles de correlación en los meses de invierno y verano sobre todo en los meses de agosto y diciembre. Obtuvimos los mismos resultados para los índices R1, R10, R20 y R25, estos altos valores de correlación se deben a la variabilidad interanual de NAO. En invierno predomina fases NAO negativas, haciendo que las masas de aire procedan del suroeste siendo cálidas y húmedas, en contraposición, las fases positivas predominan en verano y provocan que las masas de aire provengan del noroeste siendo secas y frías (Rodríguez de la Puebla *et al.*, 2010). Pero la NAO también sufre variaciones interdecadales, con prolongadas fases positivas o negativas. La variación en esta escala en la NAO se ha relacionado con la duración de las sequías, (Vicente-Serrano y Cuadrat, 2007) emplearon el índice Standardized precipitation Index (SPI) para realizar esta correlación, obteniendo correlaciones positivas entre fases positivas de NAO y este índice. Por lo que realizamos la correlación de los índices CWD y CDD con NAO. Los resultados no mostraron altos valores de correlación para ninguno de los índices, lo que indica que la correlación entre ambos no es un buen medidor de la duración de las sequías en la IP.

Algunos autores señalan que la influencia de la NAO no ha sido estacionaria a lo largo del siglo XX por efecto del calentamiento global. (Vicente-Serrano y López-Moreno, 2008) empleando modelos de predicción climática, pronosticaron mayor frecuencia de fases NAO positivas en el sur de Europa bajo el aumento de los niveles de gases de efecto invernadero. Una mayor frecuencia en las fases positivas de NAO, implicaría una reducción en la cantidad y frecuencia de la precipitación en la IP. En nuestro trabajo observamos un descenso de la precipitación media mensual sobre todo en verano, cuando predominan las fases positivas de NAO. Según (Trenberth *et al.*, 2007) la NAO puede explicar un 33% del descenso de la precipitación en la IP para el periodo 1968 -1997. A su vez, se han establecido relaciones entre NAO y ENSO. Se trata de una relación débil que indica que las señales ENSO, como el fenómeno El Niño, pueden

influir en el clima en la región euroatlántica y manifestarse en patrones similares a NAO (Pérez y Boscolo, 2010). La influencia de ENSO en la IP se manifiesta relacionada con episodios de precipitación, los cuales tienen lugar en primavera y en otoño. En primavera favorece la ocurrencia de períodos secos en el este y en otoño el aumento de las precipitaciones (Rodó *et al.*, 1997). Los resultados obtenidos corroboraron esta relación. Las correlaciones negativas se dieron en el mes abril en los índices precipitación media mensual y R1 en valores mensuales, con un valor de correlación superior a 0.5 en la mayoría del territorio. En los meses de otoño también encontramos correlaciones positivas por encima de 0.5, siendo octubre el mes que más correlaciones positivas presentó. También encontramos correlaciones con índices de frecuencia de precipitación moderadas e intensas R10 y R20.

6. CONCLUSIONES

La investigación de índices de extremos de precipitación a través del conjunto de datos diarios Spain 02 V5.0 permitió caracterizar algunos de los cambios en los patrones de frecuencia y distribución de la precipitación en la IP en el contexto del cambio climático.

De acuerdo a este estudio, las precipitaciones totales anuales en algunas zonas de la IP han sufrido una disminución en los últimos años, tanto en cantidad como en frecuencia, esta disminución en la cantidad de las precipitaciones en parte se debe a la reducción en los valores medios mensuales para los meses comprendidos entre mayo y agosto. Los índices de frecuencia de precipitación también indican el descenso en el número de días con precipitaciones no intensas. Los territorios más afectados por esta reducción son zonas del interior peninsular y zonas interiores de Cataluña y sureste peninsular. En este descenso generalizado de la precipitación influyen las fases positivas NAO en sobre todo en agosto, según los estudios el calentamiento global puede llevar al fortalecimiento de esta fase positiva de la NAO. A pesar de esto el índice de sequía CDD no mostró cambios significativos y tampoco nos permitió evaluar la relación entre los patrones de sequía y NAO.

En zonas concretas del oeste de la IP la cantidad de precipitación anual está aumentando. Este aumento se debe a una mayor ocurrencia de eventos de precipitación muy intensa y muy localizados. Los patrones de distribución espacial en la precipitación mensual de octubre y septiembre coinciden con las zonas donde se dan estos aumentos. A su vez, el descenso en la tendencia de R1 indica una disminución de episodios con lluvias ligeras. Esto indica un cambio en el régimen de precipitaciones para estas zonas, tendiendo a concentrarse temporal y espacialmente, aumentando a su vez los riesgos asociados a estos eventos extremos. Los patrones atmosféricos estudiados influyen en la frecuencia e intensidad de las precipitaciones

en la IP, las correlaciones con ENSO para diferentes índices indican que puede ser un impulsor de estos aumentos de precipitación en octubre y tiene un efecto más ligero pero influyente en la precipitación media del mes de abril. Las fases positivas de NAO en agosto provocan un descenso de las precipitaciones, las fases negativas en diciembre, favorecen un aumento tanto en la precipitación media como para precipitaciones muy intensas en toda la región mediterránea de la IP.

7. REFERENCIAS

- Ahmad, I., Wang, L., Ali, F. y Zhang, F. (2022) "Spatiotemporal Patterns of Extreme Precipitation Events over Jhelum River Basin", *Sustainability (Switzerland)*. MDPI, 14(23), pp.70-88. doi:10.3390/su142315558.
- Bednar-Friedl, B., Biesbroek, R. y Schmidt, D. (2022). IPCC Sixth Assessment Report (AR6): Climate Change - Impacts, Adaptation and Vulnerability: Regional Factsheet Europe. Switzerland. Retrieved from https://policycommons.net/artifacts/2264317/ipcc_ar6_wgii_factsheet_europe/3023371/ on 25 Jun 2023. CID: 20.500.12592/96prcq.
- Bivand, R. (2022) "R Packages for Analyzing Spatial Data: A Comparative Case Study with Areal Data". *Geographical análisis*, 54(3), pp. 488-518.
- Blanco-Gómez, P., Jimeno-Sáez, P., Senent-Aparicio, J. y Pérez-Sánchez, J. (2019) "Impact of climate change on water balance components and droughts in the Guajoyo River Basin (El Salvador)", *Water (Switzerland)*. MDPI AG, 11(11), pp. 340-351. doi:10.3390/w11112360.
- Chazarra Bernabé, A., Lorenzo Mariño, B., Romero Fresneda, R. y Moreno García, J. V. (2022) "Evolución de los climas de Köppen en España en el periodo 1951-2020", Madrid, Agencia estatal de Meteorología. doi:10.31978/666-22-011-4.
- Cimate Prediction Center (2023) *National Weather Service: Climate Prediction Center*. Disponible en: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/> Accedido: 28/05/2023.
- Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabow, J. et al. (2018) "Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean". *Nature, Nature Clim Change* 8, pp. 972–980.
- De Lima, M. I. P., Santo, F. E., Ramos, A. M. y de Lima, J. L. M. P. (2013) "Recent changes in daily precipitation and surface air temperature extremes in mainland Portugal, in the period 1941-2007", *Atmospheric Research*, 127, pp. 195-209. doi:10.1016/j.atmosres.2012.10.001.
- Fernández, J. y Saenz, J. (2003) "Improved field reconstruction with the analog method: searching the CCA space". *Climate Research*. 24(3), pp. 199-213.
- Fernández-Montes S., Seubert S., Rodrigo FS., Rasilla Álvarez DF., Hertig E., Esteban P. y Philipp A. (2014) "Circulation types and extreme precipitation days in the Iberian Peninsula in the transition seasons: spatial links and temporal changes". *Atmospheric Research*. Res. 138, pp. 41–58.
- Fischer, E. y Knutti, R. (2016) "Observed heavy precipitation increase confirms theory and early models". *Nature. Clim. Chang*, 6, pp. 986–991.
- Gallego, M. C., García, J. A. y Vaquero, J. M. (2005) "The NAO signal in daily rainfall series over the Iberian Peninsula", *Climate Research*. Inter-Research, 29(2), pp. 103-109. doi:10.3354/cr029103.
- Gallego, M.C., García, J.A., Vaquero, J.M. y Mateos, V.L. (2006) "Changes in frequency and intensity of daily precipitation over the Iberian Peninsula". *Journal of Geophysical Research*, 111(24), pp. 1-15.

- Gallego, M. C., Trigo, R. M., Vaquero, J. M., Brunet, M., García, J. A., Sigró, J. y Valente, M. A. (2011) "Trends in frequency indices of daily precipitation over the Iberian Peninsula during the last century", *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. Blackwell Publishing Ltd, 116(2), pp. 455-472.
- Gonzalez-Hidalgo, J., Brunetti, M. y De Luis, M. (2010) "Precipitation trends in Spanish hydrological divisions, 1946–2005", *Climate Research*. 43(3), pp. 215-228. doi:10.2307/24870364.
- Herrera, S., Gutiérrez, J. M., Ancell, R., Pons, M. R., Frías, M. D. y Fernández, J. (2012) "Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02)", *International Journal of Climatology*, 32(1), pp. 74-85. doi:10.1002/joc.2256.
- Herrera, S., Fernández, J. y Gutierrez, J.M. (2016) "Update of the Spain02 Gridded Observational Dataset for Euro-CORDEX evaluation: Assessing the Effect of the Interpolation Methodology". *International Journal of Climatology*, 36, pp. 900-908.
- Hidalgo-Muñoz, J.M., Argüeso, D., Gámiz-Fortis, S.R., Esteban-Parra, M.J. y Castro-Díez, Y. (2011) "Trends of extreme precipitation and associated synoptic patterns over the southern Iberian Peninsula", *Journal of Hydrology*, 409(1-2), pp. 497-511.
- Instituto Geográfico Nacional (2013) *Mapas físicos de la Península Ibérica*. Disponible en: <https://www.ign.es/web/catalogo-cartoteca/apibadasid/cartoteca/searchAuthority/T650&18931>. (Accedido: 3/05/2023)
- Jones, P.D., Jonsson, T. y Wheeler, D. (1997) "Extension to the North Atlantic oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and south-west Iceland", *International Journal of Climatology*, 17(13), pp. 1433-1450.
- Kendall, M.G. (1976) "Rank Correlation Methods". 4th Edition, Charles Griffin, London.
- Kiladis, G.N. y Diaz, H.F. (1989) "Global Climatic Anomalies Associated with Extremes in the Southern Oscillation". *Journal Climate*, 2, pp. 1069–1090.
- Lettenmaier, D. P., Wood, E. F. y J. R. Wallis (1994), "Hydro-climato-logical trend in the continental United States", 1948–88, *International Journal of Climatology*. 7, pp. 586–607.
- Liu, Y., Garcia, M., Zhang, C. y Tang, Q. (2022) "Recent decrease in summer precipitation over the Iberian Peninsula closely links to reduction in local moisture recycling", *Hydrology and Earth System Sciences*. Copernicus GmbH, 26(8), pp. 1925-1936. doi:10.5194/hess-26-1925-2022.
- Lorenzo, M.N., Taboada, J.J., Iglesias, I. y Gómez-Gesteira, M. (2010) "Predictability of the spring rainfall in northwestern Iberian Peninsula from sea surface temperatures of ENSO areas". *Climatic Change*. 108(7), pp. 399-422.
- Mann, H.B. (1945) "Non-Parametric Test against Trend". *Econometrica*, 13, pp. 245-259.
- Mariotti, A., Ballabrera-Poy, J. y Zeng, N. (2005) "Tropical influence on Euro-Asian autumn rainfall variability". *Climate Dynamics*. 24, pp. 511–521. doi:10.1007/s00382-004-0498-6.
- McLeod, A.I. (2015) "Package Kendall". R software. London, UK.
- Meehl, G.A., Karl, T., Easterling, D.R., Changnon, S., Pielke, R., Changnon, D., Evans, J., Groisman, P.Y., Knutson, T.R., Kunkel, K.E., Mearns, L.O., Parmesan, C., Pulwarty, R., Root, T., Sylves, R.T., Whetton, P. y Zwiers, F. (2000) "An Introduction to Trends in Extreme Weather and Climate Events: Observations, Socioeconomic Impacts, Terrestrial Ecological Impacts, and Model Projections". *Bulletin of the American Meteorological Society*. 81, (3), pp. 413–416.
- Merino, A., Fernández-Vaquero, M., López, L., Fernández-González, S., Hermida, L., Sánchez, J. L., García-Ortega, E. y Gascón, E. (2016) "Large-scale patterns of daily precipitation extremes on the Iberian Peninsula", *International Journal of Climatology*. John Wiley and Sons Ltd, 36(11), pp. 3873-3891. doi:10.1002/joc.4601.

- Muñoz-Díaz, D. y Rodrigo F.S. (2004). "Spatio-temporal patterns of seasonal rainfall in Spain (1912-2000) using cluster and principal component analysis: comparison". *Annales Geophysicae*, 22, pp. 1435-1448.
- Myhre, G., Alterskjær, K., Stjern, C.W., Hodnebrog, Ø., Marelle, L., Samset, B.H., Sillmann, J., Schaller, N., Fischer, E., Schulz, M. y Stohl, A. (2019) "Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming". *Nature*. Science report, 9, num.16063.
- Pebesma, E. (2018) "Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data". *The R Journal*, 10(1), pp. 439 -446.
- Pereira, S., Marta-Almeida, M., Carvalho, y Rocha, A. (2017) "Heat wave and cold spell changes in Iberia for a future climate scenario". *International Journal of Climatology*. 37(15), pp. 5,192-5,205.
- Pérez, Fiz F.; Boscolo, Roberta "(eds.)". *Climate in Spain: past, present and future*. Regional climate change assessment report. Madrid, CLIVAR : Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino : Ministerio de Ciencia e Innovacion (MICINN), november 2010. 83 p.
- Rajczak, J. y Schär, C. (2017) "Projections of Future Precipitation Extremes Over Europe: A Multimodel Assessment of Climate Simulations", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. Blackwell Publishing Ltd, 122(20), pp. 10,773-10,800. doi:10.1002/2017JD027176.
- Rocha, A. (1999) "Low-frequency variability of seasonal rainfall over the Iberian Peninsula and ENSO", *International Journal of Climatology*, 19(8), pp. 889-901.
- R core Team (2021). *RStudio: Integrated Development for R* (Versión 3.3.3). RStudio. Disponible en: URL <http://www.rstudio.com/>. (Accedido: 3 de Marzo de 2023).
- Rodó, X., Baert, E. y Comin, F.A. (1997) "Variations in seasonal rainfall in southern Europe during the present century: Relationships with the North Atlantic Oscillation and the El Niño Southern Oscillation". *Climate Dynamics*. 13(2), p. 275-284.
- Rodríguez-Fonseca, B., Polo, I., Serrano, E. y de Castro, M. (2006) "Evaluation of the North Atlantic SST forcing on the European and northern African winter climate". *International Journal of Climatology*, 26, pp. 179-191.
- Rodrigo, F.S. y Trigo, R.M. (2007) "Trends in daily rainfall in the Iberian Peninsula from 1951 to 2002". *International Journal of Climatology*. 27, pp. 513-529.
- Rodríguez-Puebla, C., Encinas, A.H., Nieto, S. y Garmendia, J. (1998) "Spatial and temporal patterns of annual precipitation variability over the Iberian Peninsula". *International Journal of Climatology* 18, pp. 299-316.
- Rodríguez-Puebla, C. y Nieto, S. (2010) "Trends of Precipitation over the Iberian Peninsula and the North Atlantic Oscillation under Climate Change Conditions". *International Journal of Climatology*. 30, pp. 1807-1815. doi: 10.1002/joc.2035.
- Serrano-Notivoli, R., Beguería, S., Saz, M. Á., Longares, L. A. y De Luis, M. (2017) "SPREAD: A high-resolution daily gridded precipitation dataset for Spain - An extreme events frequency and intensity overview", *Earth System Science Data*. Copernicus GmbH, 9(2), pp. 721-738. doi:10.5194/essd-9-721-2017.
- Serrano-Notivoli, R., Beguería, S., Saz, M. Á. y De Luis, M. (2018) "Recent trends reveal decreasing intensity of daily precipitation in Spain", *International Journal of Climatology*. 38, pp. 4,211-4,224.
- Sillmann, J. y Roeckner, E. (2008) "Indices for extreme events in projections of anthropogenic climate change", *Climatic Change*, 86(1-2), pp. 83-104. doi:10.1007/s10584-007-9308-6.
- Stocker, T.F., Qin, G.-K. Plattner, L.V. Alexander, S.K. Allen, N.L. Bindoff, F.-M. Bréon, J.A. Church, U. Cubasch, S. Emori, P. Forster, P. Friedlingstein, N. Gillett, J.M. Gregory, D.L. Hartmann, E. Jansen, B. Kirtman, R. Knutti, K. Krishna Kumar, P. Lemke, J. Marotzke, V. Masson-Delmotte, G.A. Meehl, I.I. Mokhov, S. Piao, V. Ramaswamy, D. Randall, M. Rhein, M. Rojas, C. Sabine, D. Shindell, L.D. Talley, D.G. Vaughan y S.-P. Xie, 2013: *Resumen técnico*. En: *Cambio climático 2013. Bases físicas*. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D.

Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.]). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

Trenberth, K.E., Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor M. y H.L. Miller “(eds.)”. (2007) *Observations: Surface and Atmospheric Climate Change*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Vicente-Serrano, S.M. y Cuadrat, J.M. (2007) “North Atlantic oscillation control of droughts in north-east Spain: evaluation since 1600 A. D”. *Climatic Change*, 85, pp. 357-379.

Vicente-Serrano, S. M. y López-Moreno, J. I. (2008) "Differences in the non-stationary influence of the North Atlantic Oscillation on European precipitation under different scenarios of greenhouse gas concentrations", *Geophysical Research Letters*, 35(18), pp.282-295. doi:10.1029/2008GL034832.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I., El Kenawy, A. M. y Angulo-Martínez, M. (2009) "Daily atmospheric circulation events and extreme precipitation risk in northeast Spain: Role of the North Atlantic Oscillation, the Western Mediterranean Oscillation, and the Mediterranean Oscillation", *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. Blackwell Publishing Ltd, 114(8), pp. 344-357. doi:10.1029/2008JD011492.

Zhang, X., Aguilar, E., Sensoy, S., Melkonyan, H., Tagiyeva, U., Ahmed, N., Kotaladze, N., Rahimzadeh, F., Taghipour, A., Hantosh, T. H., Albert, P., Semawi, M., Karam Ali, M., Said Al-Shabibi, M. H., Al-Oulan, Z., Zafari, T., Khelet, I. A. D., Hamoud, S., Sagir, R., Demircan, M., Eken, M., Adiguzel, M., Alexander, L., Peterson, T. C. y Wallis, T. (2005) "Trends in Middle East climate extreme indices from 1950 to 2003", *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. Blackwell Publishing Ltd, 110(22), pp. 1-12.