

Eventos de sequía y transiciones hidrometeorológicas extremas en la Península Ibérica: un estudio del periodo 1950-2023

Secas e transicións hidrometeorolóxicas extremas na Península Ibérica: un estudo do período 1950-2023

Drought events and extreme hydrometeorological transitions in the Iberian Peninsula: a study of the period 1950-2023



Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ciencias Ambientales

Santiago Pérez Rey



Septiembre 2025

Dr. Rogert Sorí Gómez y Dra. Milica Stojanovic, investigadores del área de Física de la Tierra, del Departamento de Física Aplicada, de la Universidad de Vigo,

INFORMAN:

Que el trabajo titulado *“Eventos de sequía y transiciones hidrometeorológicas extremas en la Península Ibérica: un estudio del periodo 1950-2023”* presentado por Don. Santiago Pérez Rey, fue realizado bajo nuestra dirección y autorizamos su presentación como Trabajo de Fin de Grado del Grado de Ciencias Ambientales al considerarlo apto para su defensa.

Rogert Sorí Gómez

Milica Stojanovic

Ourense, 28 de agosto de 2025

Índice

- 1. Introducción y área de estudio**
 - 1.1. El fenómeno de la sequía**
 - 1.2. La sequía en la Península Ibérica (PI)**
 - 1.3. Región de estudio**

- 2. Materiales y Métodos**
 - 2.1. Datos**
 - 2.2. Análisis clúster**
 - 2.3. Índices de sequía**

- 3. Resultados y discusión**
 - 3.1. Regionalización de la precipitación**
 - 3.2. Ocurrencia de Sequías**
 - 3.2.1 Identificación Evolución temporal**
 - 3.2.2 Episodios de sequía**
 - 3.3.3 Transiciones hidrometeorológicas**

- 4. Conclusiones**

Resumen

Las sequías constituyen uno de los fenómenos hidrometeorológicos más relevantes por sus impactos en los ecosistemas, los recursos hídricos y las actividades socioeconómicas. Este trabajo analiza la ocurrencia, severidad y duración de sequías y transiciones hidrometeorológicas extremas en la Península Ibérica durante el periodo 1950–2023, empleando datos mensuales de precipitación del reanálisis ERA5-Land y el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI).

La regionalización climática mediante análisis de clústeres (K-means) permitió identificar cuatro regiones con comportamientos pluviométricos homogéneos. Posteriormente, se evaluó la frecuencia e intensidad de los episodios de sequía, así como las transiciones abruptas entre condiciones secas y húmedas. Los resultados muestran una marcada heterogeneidad espacial en la distribución de la precipitación, modulada por la orografía. Además, se detecta un incremento en la frecuencia y severidad de las condiciones secas y episodios de sequías, que han sido más frecuentes desde la década de 1990, con especial incidencia en el noroeste (Galicia y norte de Portugal) y en el centro-sur peninsular. Entre los episodios más significativos destacan las sequías de 2004–2005, 2011–2012 y la de enero–agosto de 2023, considerada la más severa del periodo analizado. En cuanto a las transiciones hidrometeorológicas, predominan los cambios de sequía moderada a condiciones húmedas en el sureste y noroeste, mientras que las transiciones inversas (de húmedo a sequía) son más frecuentes en Galicia, el norte de Portugal y el eje noreste peninsular.

Este estudio evidencia la vulnerabilidad de la Península Ibérica a déficits hídricos prolongados y a cambios abruptos en los regímenes de precipitación, fenómenos que se intensifican bajo el actual contexto de cambio climático. Se resalta la necesidad de ampliar estos análisis integrando otros índices de sequía y variables atmosféricas, con el fin de mejorar los sistemas de alerta temprana y apoyar el diseño de estrategias de adaptación y mitigación más eficaces.

1. Introducción

1.1 El fenómeno de la sequía

La sequía constituye uno de los fenómenos naturales más complejos del sistema climático. Se caracteriza por su desarrollo progresivo, propagación espacial y tanto corta como prolongada duración temporal (Vicente Serrano et al., 2006). Es por ello que la caracterización de la sequía requiere un enfoque multidimensional que tenga en cuenta sus diversas tipologías: meteorológica (déficit de precipitación), agrícola (déficit de humedad en el suelo), hidrológica (déficit en caudales y reservas) y socioeconómica (impacto en actividades humanas) (Wilhite y Glantz, 1985; WMO, 2012; Panu y Sharma, 2002). En el contexto del cambio climático global, este fenómeno hidrometeorológico extremo ha incrementado su frecuencia e intensidad, generando impactos socioeconómicos y ambientales de gran magnitud (Vicente-Serrano et al., 2020).

1.2 La sequía en la Península Ibérica (PI)

La Península Ibérica (PI), debido a su particular ubicación geográfica en la transición entre las zonas templadas y subtropicales del hemisferio norte, presenta una especial vulnerabilidad ante estos eventos de déficit hídrico. La variabilidad climática de la PI reconstruida para los últimos 2000 años se ha explicado a partir de fluctuaciones en los modos climáticos como la NAO y en la actividad solar y volcánica (Giralt et al., 2017), que afectan particularmente a los patrones y magnitud de la precipitación.

Estudios se han enfocado en estudiar la sequía en la PI usando metodologías y periodos de estudio. Andrade y Belo-Pereira (2015), investigaron la ocurrencia y evolución espacio-temporal de condiciones secas que afectaron la PI durante el periodo 1951-2007, mediante el uso del índice Weighted Anomaly of Standardized Precipitation (WASP) y cuatro conjuntos de datos. Sus resultados concluyen que desde 1980 la frecuencia y severidad de la sequía aumentaron en la PI, particularmente hacia su zona oeste. Algunos años han sido destacados por la severidad de la sequía que ha afectado a la PI. García-Herrera et al., (2007) analizaron la sequía de 2004-2005 que afectó a la PI dada la magnitud de su severidad en los últimos 140 años, y la notoriedad de sus impactos. Sus resultados demostraron que el año hidrológico 2004/05 se caracterizó por una intensa sequía que afectó a la mayor parte de Europa occidental, con afectaciones en la PI durante todos los meses de este período. Sus resultados mostraron que los déficits de precipitación fueron marcados, con déficits de más del 40% de la precipitación habitual para meses como junio de 2005.

La persistencia y la extensión de las sequías que han afectado la PI también fueron estudiadas por Liberato y Montero (2021), mediante el uso de índices como el SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index; (Vicente Serrano et al., 2010) y

el SPI (Standardized Precipitation Index; McKee et al., 1993). Sus resultados indican que, entre 1901 y 2016, los eventos aumentaron, algo observado en largas escalas temporales y zonas del oeste de la PI y Portugal. Estos mismos índices fueron usados por Páscoa y Russo, (2021), pero utilizando los datos observacionales Iberia01 (Herrera et al., 2019). Ello les permitió analizar los valores máximos y mínimos de las temperaturas y de los valores de precipitación. Sus resultados mostraron una clara tendencia negativa del SPI en la zona sur de la PI y tendencias positivas del SPI, en el sureste de Portugal (Páscoa et al., 2017) lo que confirma un claro aumento en las condiciones secas, como ya se ha visto en otros estudios (Ruiz-Sinoga et al., 2011; Vicente-Serrano et al., 2014; Páscoa et al., 2017).

Estudios se han enfocado en estudiar la sequía en la PI y otras regiones de Europa occidental y sur de Escandinavia e Italia, mediante el uso de los índices SPI, SPEI y el uso del FLEXPART v9.0 Lagrangian model (Stohl et al. 2005), para atribuir los cambios en la precipitación. Los resultados han mostrado que este evento fue uno de los más marcados en cuanto a su magnitud y extensión en el periodo 1979-2017, afectando no solo a la zona noroeste y centro de la PI, sino también a la zona sur de la PI. Autores como Sorí, R. y Vázquez, M., 2020 se centraron en el estudio del fenómeno de la sequía en la Demarcación Hidrológica Miño-Limia-Sil mediante del uso del índice SPEI, y el Surface Runoff Index (SRI) (McKee et al. 1993), para lo que utilizaron datos observacionales interpolados como el E-OBS v.18e gridded dataset (Cornes et al., 2018), el conjunto de datos ERA-Interim (ECMWF Reanalysis) reanalysis datasets (Dee et al., 2001), junto a otros parámetros y series temporales, para el periodo 1980-2017. Los resultados obtenidos muestran los eventos más severos en el periodo 1980-2017, destacando junio de 2016, enero de 2017 y septiembre de 2011. El impacto de este evento afectó a toda la PI, concretamente en la zona noroeste. Un análisis visual permite mostrar una variabilidad en cuanto a condiciones secas y húmedas en una escala temporal corta. Sin embargo, en los últimos 112 años se ha observado una tendencia descendente en cuanto a las precipitaciones sobre la PI, a excepción de la zona noroeste de la PI, P. Páscoa y C. M. Gouveia 2017 que resulta contradictorio si se tienen en cuenta los eventos de sequía que han afectado el noroeste de la PI en los últimos años (Sorí et al., 2017).

Los resultados antes discutidos indican que la sequía en la PI se presenta como un fenómeno hidroclimático de gran complejidad, caracterizado por su incremento en frecuencia e intensidad durante los últimos años, especialmente en el contexto del cambio climático. Los impactos se han percibido en los recursos hídricos, la agricultura y las actividades socioeconómicas en la región. La particular ubicación geográfica de la península, en la transición entre zonas templadas y subtropicales, la hace especialmente vulnerable a estos déficits hídricos. Sin embargo, a pesar de los avances significativos en la comprensión de los eventos de sequía que han afectado a la PI (Nogueras et al., 2024), persisten importantes lagunas de conocimiento respecto a la ocurrencia temporal de episodios de sequía, y de los cambios bruscos entre condiciones de sequía y exceso hídrico, y viceversa, y los mecanismos físicos

que los provocan, especialmente en un contexto de alteración de los patrones de circulación atmosférica y regionalización de regímenes hídricos y (Garijo y Mediero, 2019). Estas transiciones rápidas generan impactos cascada en los sistemas hidrológicos, edáficos y ecológicos que resultan especialmente difíciles de predecir y gestionar (Gu et al., 2025). Además, impactan las infraestructuras hídricas y sectores socioeconómicos dependientes del agua, cuya cuantificación y modelización presentan desafíos metodológicos sustanciales (Díaz et al., 2020). Las transiciones rápidas entre estados hidrometeorológicos opuestos han sido investigadas en estudios recientes a nivel global (Jordan et al., 2021; Chen et al., 2025), pero aún no en la PI.

Tanto los estudios de eventos de sequía como las transiciones hidroclimáticas se han enfocado a escala global, o en regiones de interés como cuencas hidrográficas, sin tener en cuenta el comportamiento diferenciado de la precipitación. Y tampoco se ha realizado este estudio para la PI. Es por ello que este estudio tiene como primer objetivo llevar a cabo una regionalización de la precipitación en la PI mediante una base de datos de extensa duración (1950-2023), que garantiza considerar la heterogeneidad climática de la PI. Como segundo objetivo y fundamental, determinar la ocurrencia de condiciones secas y su tendencia en estas regiones, así como eventos de sequía. La serie temporal extendida (1950-2023) que abarca este estudio proporciona una oportunidad excepcional para analizar la evolución del fenómeno de la sequía en la PI, contribuyendo a la comprensión de los impactos de déficits de precipitación en regiones hidroclimáticamente homogéneas y al desarrollo de estrategias adaptativas basadas en evidencia científica robusta.

1.3 Región de estudio

La PI se ubica en el extremo oeste de Europa, rodeada al oeste y norte por el Océano Atlántico y el Mar Cantábrico y al sur y sudeste por el Mar Mediterráneo. Esta presenta características geográficas propias, destacando su posición geográfica y relieve, que dan lugar a una gran variedad de climas: el mediterráneo, oceánico-mediterráneo, oceánico, subtropical húmedo, seco, semiárido, árido y montañoso (Martin-Vide y Olcina Campos, 2001). Sin embargo, predomina el clima mediterráneo en la mayor parte del territorio, teniendo veranos calurosos e inviernos suaves y lluviosos, especialmente en el este y sur de la PI. La zona norte, especialmente la zona noroeste, destaca por tener un clima oceánico, con temperaturas suaves y precipitaciones abundantes todo el año (Molina et al., 2000).

El relieve en la PI destaca por ser predominantemente montañoso (Figura 1). La mayor parte del territorio está ocupada por la Meseta Central (Díaz et al., 2021). En el interior de la placa ibérica, la morfoestructura está dominada por el Sistema Central Español, delimitada por las cuencas del Duero y del Tajo, las cuales se formaron en eventos compresivos alpinos relacionados con la convergencia de las placas africana y europea. Esta cordillera se extiende a lo largo de 450 km en dirección noreste y

suroeste desde Portugal hasta la Cordillera Ibérica, alcanzando alturas superiores a los 2500 m (Tejero et al., 2006). Respecto a la hidrografía, los principales ríos atraviesan la PI de este a oeste (Duero, Tajo, Guadiana) en la zona atlántica, o de oeste a este (Ebro) en la zona mediterránea. Los ríos ibéricos están sometidos a grandes variaciones hidromorfológicas, así como a una contaminación difusa y puntual generalizada.

La vegetación en la PI es una de las más ricas y variadas en Europa, destacando por tener más de 7000 especies de plantas vasculares, muchas de ellas endémicas. En el norte atlántico (Galicia, Cordillera Cantábrica, País Vasco) predominan los bosques caducifolios (robles, hayas y brezales). En la zona interior de la PI, concretamente en la Meseta y la depresión del Duero, se encuentran bosques de encinas y quejigos. El sur árido de la PI se caracteriza por presentar una vegetación especializada a esas regiones como los matorrales de tomillos, espartales y plantas gipsófilas (Loidi et al., 2017).

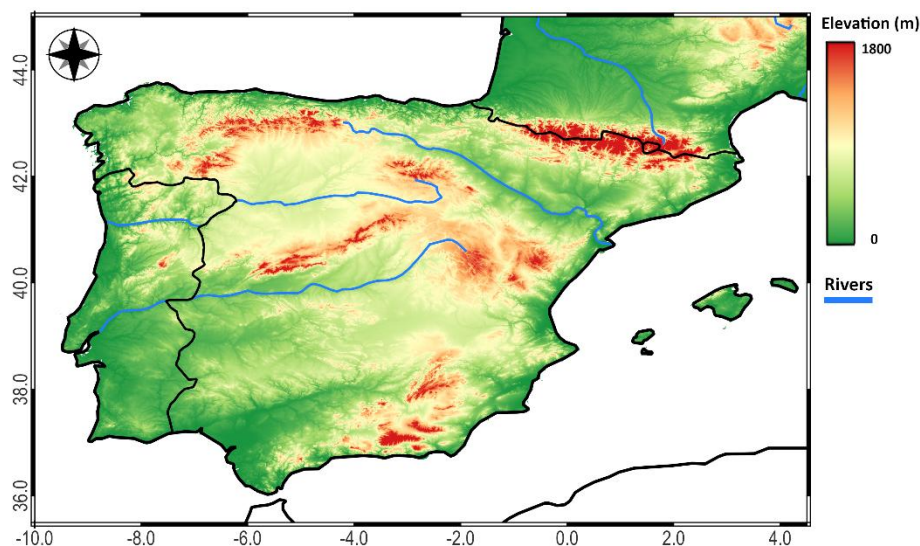


Figura 1. Extensión y ubicación geográfica de la Península Ibérica, su orografía y principales ríos. Datos obtenidos del proyecto HydroSHEDS (hydrological data and maps on shuttle elevation derivatives at multiple scales) disponible online en: <https://www.hydrosheds.org>.

2. Materiales y Métodos

2.1 Datos

Se utilizaron datos mensuales de precipitación total del Reanálisis ERA5 Land (Muñoz-Sabater, 2019), con resolución horizontal de 0.1°. Esta variable considera el

agua líquida y congelada acumulada, incluyendo lluvia y nieve, que cae a la superficie de la Tierra, y es la suma de la precipitación a gran escala (aquella precipitación que se genera por patrones meteorológicos a gran escala, como vaguadas y frentes fríos) y la precipitación convectiva (generada por la convección que ocurre cuando el aire en los niveles inferiores de la atmósfera es más cálido y menos denso que el aire de arriba, por lo que se eleva). Estas características constituyen una ventaja para su uso, como ha sido referido por otros estudios que han validado su grado de representación real de la precipitación a escala global (Muñoz-Sabater et al., 2021), regional (Xie et al., 2022) y de la Península Ibérica (Gómis-Cebolla et al., 2023). Por el contrario, esta variable no incluye la niebla, el rocío ni la precipitación que se evapora en la atmósfera antes de llegar a la superficie de la Tierra, lo que no resulta tan relevante para el diagnóstico de las condiciones de sequía, ya que afectan la humedad del suelo solo en las primeras capas.

2.2 Análisis clúster

Para identificar los patrones espaciales con comportamiento homogéneo de la precipitación sobre la PI, se aplicó un análisis de conglomerados utilizando el algoritmo K-means, utilizando datos de precipitación mensuales de la PI del periodo 1950-2023. Este método permite agrupar series temporales de precipitación con comportamientos similares en un número predefinido de clústeres, minimizando la variabilidad intra-cluster y maximizando la diferencia entre grupos (MacQueen et al., 1967., Mastrantonas et al., 2021) El análisis clúster es un método estadístico de datos que agrupa elementos de un conjunto según sus características, en clases no asignadas, como se representa de forma esquemática en la Figura 2 (Muñoz-Díaz y Rodrigo, 2004). En él se observan relaciones entre los datos no aparentes a primera vista entre el antes y el después de aplicar la técnica, que crea conjuntos homogéneos útiles para análisis posteriores (González-Flórez et al., 2022., Carvalho et al., 2016).

El algoritmo K-means se utiliza ampliamente debido a su simplicidad y eficiencia (MacQueen et al., 1967), siendo utilizado con diferentes métricas de distancia como la euclidiana. Precisamente, en este trabajo se tiene en cuenta la distancia euclidiana como métrica para establecer la distancia entre los datos. Esto permite minimizar la varianza intra-cluster asignando a cada punto el centroide más cercano y ajustando de forma iterativa las posiciones de los centroides.

Para determinar el número óptimo de agrupamientos espaciales con un comportamiento homogéneo de la precipitación, se aplicó el método del codo. Esta técnica es ampliamente utilizada para evaluar el punto de inflexión en la relación entre el número de clústeres (k) y la inercia del modelo, entendida como la suma de distancias cuadradas dentro de los grupos (Thorndike, 1953). De forma objetiva, permite calcular la distancia perpendicular de cada punto de la curva de inercia a la línea recta que conecta los extremos de dicha curva (Satopaa et al., 2011). Este método permite identificar el valor de k a partir del cual incrementar el número de

clústeres no mejora sustancialmente la explicación de la variabilidad de los datos. El valor de k correspondiente a la máxima distancia se consideró óptimo, proporcionando una solución balanceada entre simplicidad del modelo y capacidad explicativa. Esta metodología es fácil de implementar y no requiere supuestos fuertes sobre la distribución de los datos, aunque puede ser sensible a ruidos en la curva de inercia o a estructuras de datos con transiciones suaves entre clúster (Everitt et al., 2011).

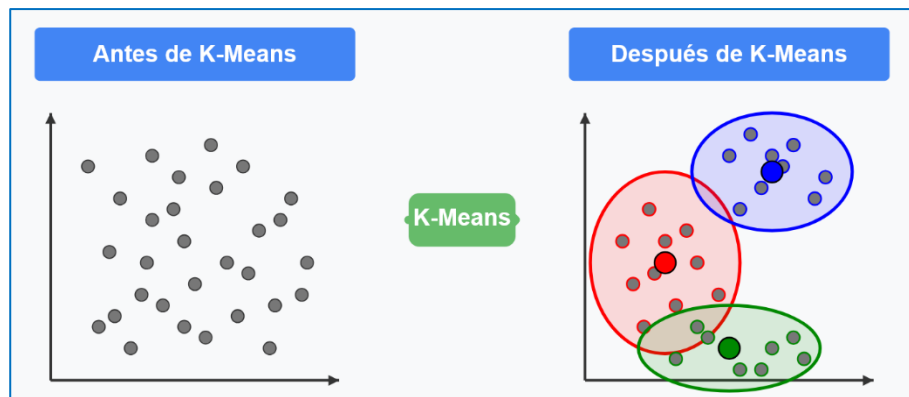


Figura 2. Representación esquemática del análisis de agrupamiento de clúster mediante el método de las K-medias.

2.3 Índices de sequía

En este estudio se utiliza el Índice de Precipitación Estandarizado (Standardized Precipitation Index; SPI), propuesto por McKee et al., (1993), para la identificación de condiciones secas. El SPI utiliza registros históricos de precipitación, preferiblemente más de 30 años de datos) para una ubicación, que se ajustan a una distribución estadística paramétrica Gamma, y posteriormente se normalizan utilizando una distribución estadística paramétrica normal estándar ($\mu = 0$, $\sigma = 1$), teniendo en cuenta la época del año y un período de referencia. El primer paso consiste en el ajuste de la precipitación acumulada a la distribución Gamma siguiendo las indicaciones de los autores del índice. Esta función describe cómo se distribuyen los valores de precipitación en el tiempo. Para ello se toma la serie de precipitación acumulada (x) en la escala temporal seleccionada (p. ej. 1, 3, 6 o 12 meses), y se estiman los parámetros de forma α y escala β de la distribución Gamma ($\Gamma(\alpha)$) mediante máxima verosimilitud, según la ecuación 1.

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, \quad x > 0 \quad (1)$$

Posteriormente obtenemos la probabilidad acumulada de observar un valor x o menor de precipitación, $G(x)$, según la siguiente formulación:

$$G(x) = \frac{\gamma(\alpha, x/\beta)}{\Gamma(\alpha)} \quad (2)$$

Donde $\gamma(\alpha, x/\beta)$ es la función gamma incompleta inferior, y $\Gamma(\alpha)$ la función gamma completa.

Posteriormente se corrige la probabilidad acumulada y la corregida teniendo en cuenta la proporción de observaciones con precipitación igual a cero, dado que la función gamma solo es válida para valores de precipitación superiores a cero ($x > 0$), pero en la práctica existen meses con precipitación nula. Finalmente, los valores resultantes estandarizados del SPI, se transforman a una distribución normal estándar según la ecuación 3.

$$SPI = \Phi^{-1}(H(x)) \quad (3)$$

Donde Φ^{-1} : función inversa de la normal estándar (cuantil). De esta forma se convierte la probabilidad acumulada en un valor **Z** de la distribución normal estándar, lo que permite comparar condiciones secas o húmedas en cualquier clima.

Teniendo en cuenta el carácter multiescalar de este índice, se calculará de 1 a 24 meses. Este método permite analizar eventos y húmedos (positivos) y secos (negativos) y asociar los mismos a impactos relativos. En un corto plazo (SPI-1, SPI-3): refleja condiciones de humedad del suelo y sequías agrícolas, en medio plazo (SPI-6, SPI-12): se relaciona con la recarga de embalses, flujos en ríos, reservas subterráneas, y a largo plazo (SPI-24 y más): indica sequías hidrológicas y cambios prolongados en el balance hídrico (WMO, 2012).

Tabla 1. Clasificación del SPI según Agnew (2000).

SPI	Probabilidad	Categoría
>1.65	0.05	Extremadamente húmedo
>1.28	0.1	Severamente húmedo
>0.84	0.2	Moderadamente húmedo
>-0.84 and <0.84	0.6	Normal
-1.28 < SPI <-0.84	0.2	Moderadamente seco
-1.65 < SPI <-1.28	0.1	Severamente seco
SPI <-1.65	0.05	Extremadamente seco

En este trabajo se ha considerado el periodo de estudio como referencia y la clasificación propuesta por Agnew (2000) para clasificar en clases el SPI, según se observa en la Tabla 1. Esta clasificación se basa en las clases de probabilidad más

que en las magnitudes del SPI y, por lo tanto, se sugiere como un enfoque más racional. El valor de $-1,65$ identifica aquellos meses en los que las condiciones extremadamente secas regresarían con una probabilidad del 5%, es decir, una vez cada 20 años.

Se identificará un episodio de sequía siguiendo el criterio utilizado en estudios previos (Sorí et al., 2020, 2023). Un episodio comienza cuando el SPI desciende de 0 y llega al menos al valor de $-0,84$, y persiste hasta el último mes en que es negativo el índice. La duración del episodio es la suma de la cantidad de meses y la severidad, el módulo de la suma de todos los valores del SPI durante el episodio. Las transiciones hidrometeorológicas se determinarán siguiendo los umbrales presentados en la tabla 1. En la figura 3 se observa gráficamente mediante la línea 1, la transición de condiciones severamente secas a extremadamente húmedas, y de moderadamente húmedas a extremadamente secas en la línea 2. Esta figura muestra en bandas de color las condiciones de secas húmedas de las cuales se puede inferir las posibles transiciones, siendo en su generalidad húmedas aquellas en las que el índice pasa de un valor inferior a $-0,84$ a uno superior a $0,84$, y secas cuando ocurre lo contrario.

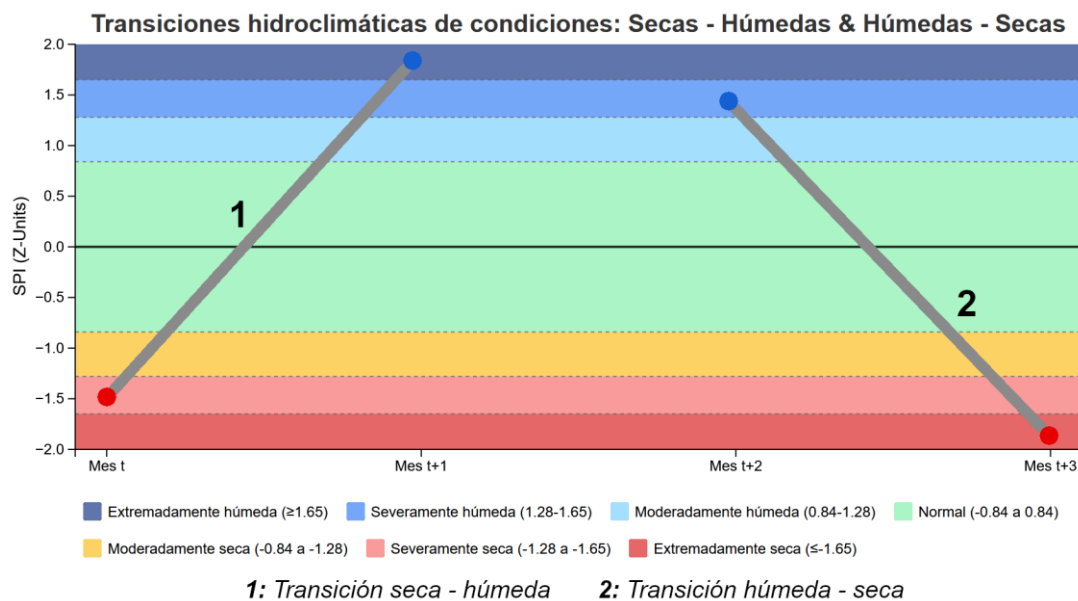


Figura 3. Representación esquemática de las transiciones secas y húmedas.

3. Resultados y Discusión

3.1 Regionalización de la precipitación

En la Figura 4a se observa el resultado de la implementación del método de Elbow o del codo para determinar el número óptimo de clústeres en los que puede diferenciarse la precipitación espacial sobre la PI. La línea roja discontinua vertical muestra que 4 clústeres representan el número óptimo de agrupaciones. La

identificación espacial de cada uno de los clústeres se ilustra en la Figura 4b. La región 1 (R1) identificada por el clúster 1, marca una región que ocupa el noreste de la PI, y se extiende desde el centro y norte de Portugal, abarcando además toda Galicia. Esta regionalización coincide en gran medida con los patrones de regionalización y el mismo número de clústeres obtenidos por Parracho et al., (2016), quienes estudiaron la regionalización de la precipitación sobre la PI, a escala estacional, mediante el uso de datos observacionales Iberia 02, creada mediante datos de estaciones recogidas en la base de datos PT02 (Belo-Pereira et al., 2011) y Spain02 (Herrera et al., 2012). Sin embargo, la extensión espacial de los clústeres 2 y 4 hallados en este trabajo, varía con respecto a los resultados obtenidos por estos autores. La diferencia radica en que el clúster 4 presentado en la Figura 4b, presenta una mayor extensión espacial latitudinal de sur a norte, hacia el centro de la PI, contrario a lo obtenido por estos autores, que confinaban esta región más al oeste, dando lugar a una mayor extensión de la región hidroclimática definida en el sudeste de la PI. Estas diferencias sugieren la posible influencia dominante del flujo de humedad proveniente del Océano Atlántico sobre la región oeste y centro de la PI. A pesar de estas diferencias, se obtuvo el mismo número de clústeres con una disposición muy similar, lo que sugiere que los datos utilizados en este estudio (ERA5 Land), son capaces de representar la variabilidad espacial de la precipitación sobre la PI. La región 2 (R2) correspondiente al clúster 2, abarca el suroeste y la mitad centro-oeste de la PI, extendiéndose hasta el centro norte del territorio español. La región 3 (R3) se extiende a través de una estrecha extensión de tierra desde la frontera este de la comunidad gallega hasta los márgenes al este de Cataluña, y finalmente la región 4 (R4), que ocupa el sureste y una extensión que se extiende hacia el norte en la PI. Otros estudios coinciden en que la orografía resulta un factor crucial en la distribución espacial de las precipitaciones en la PI (Sotillo et al., 2003, Costa et al., 2010). Un análisis de la variabilidad de los principales modos de variabilidad de la precipitación mensual sobre la PI durante el periodo 1919-1992, a través de un análisis de componentes principales, y clústeres (Serrano et al., 1999), demostró que 7 patrones espaciales explican más del 75% de la varianza explicada de la precipitación entre diciembre y abril y un 20% solo en julio y agosto. De estos patrones, dos revelaron una diferenciación clara entre el noroeste y el sudeste de la PI, también revelada por los clústeres 1 y 4 en la Figura 4b. El comportamiento diferenciado de la precipitación en la Península Ibérica, particularmente en la costa mediterránea, también fue descrito por Ramis et al., (2009), y coincide con la división espacial de la costa mediterránea determinada por la frontera entre la región 2 y 4.

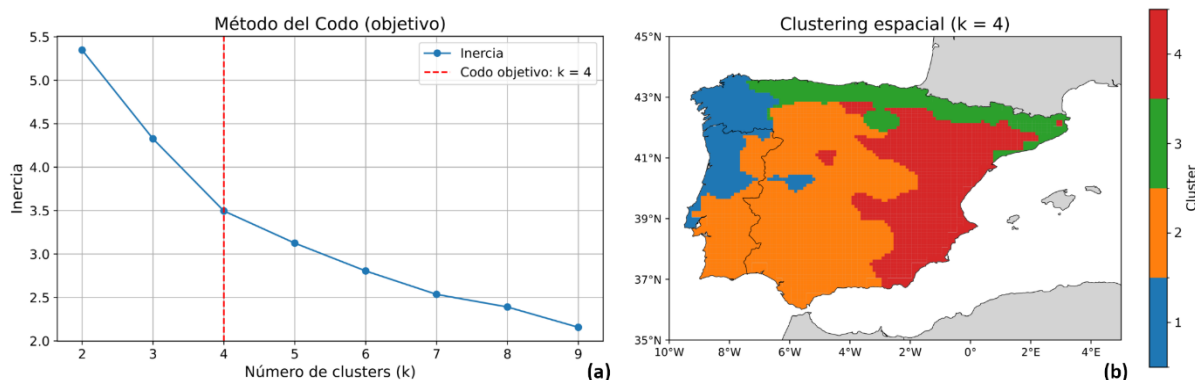


Figura 4. Clasificación gráfica del número óptimo de clústeres en los que se agrupa la precipitación (a) y su representación espacial en la PI (b).

El ciclo anual de precipitación en la PI, analizado mediante series regionalizadas para cuatro regiones (Figura 5), evidencia la coexistencia de regímenes pluviométricos contrastantes. La región identificada por el clúster 1 revela un régimen atlántico, caracterizado por altas precipitaciones invernales y otoñales con una moderada sequía estival, mientras que las regiones identificadas por el clúster 2 y 4 presentan régimen mediterráneo, más marcado en la región sudeste de la PI, donde los totales se reducen progresivamente. Sin embargo, el periodo seco estival se intensifica más en la región 2. El predominio del régimen mediterráneo sobre la PI está condicionado por una marcada heterogeneidad pluviométrica, con altibajos en la distribución estacional explicados por la influencia combinada de flujos oceánicos y patrones de circulación que modulaban la variabilidad diaria y regional de las lluvias (Cortesi et al., 2014; Serrano et al., 1999). Estos patrones estacionales son consistentes con estudios climatológicos que describen una alta variabilidad espacial y temporal de la precipitación ibérica, así como la concentración de mayores valores en el semestre frío (octubre–marzo) frente a veranos secos (Esteban-Parra et al., 1998; Moemken et al., 2022b).

El clúster 3, localizado en la franja septentrional de la península (Galicia norte, Cordillera Cantábrica y Pirineos), muestra un régimen de precipitación caracterizado por una mayor regularidad anual y menores contrastes estacionales respecto al resto de regiones. Aunque las precipitaciones invernales siguen siendo dominantes, la disminución en verano es menos acusada que en regiones mediterráneas, lo que atenúa la sequía estival. Esta distribución más homogénea se asocia con la influencia directa de las masas de aire húmedas procedentes del Atlántico norte y el mar Cantábrico, junto con el efecto orográfico de las cadenas montañosas septentrionales, que favorecen la condensación y la persistencia de precipitaciones a lo largo del año (Rodríguez-Puebla et al., 1998; Serrano-Notivoli et al., 2018).

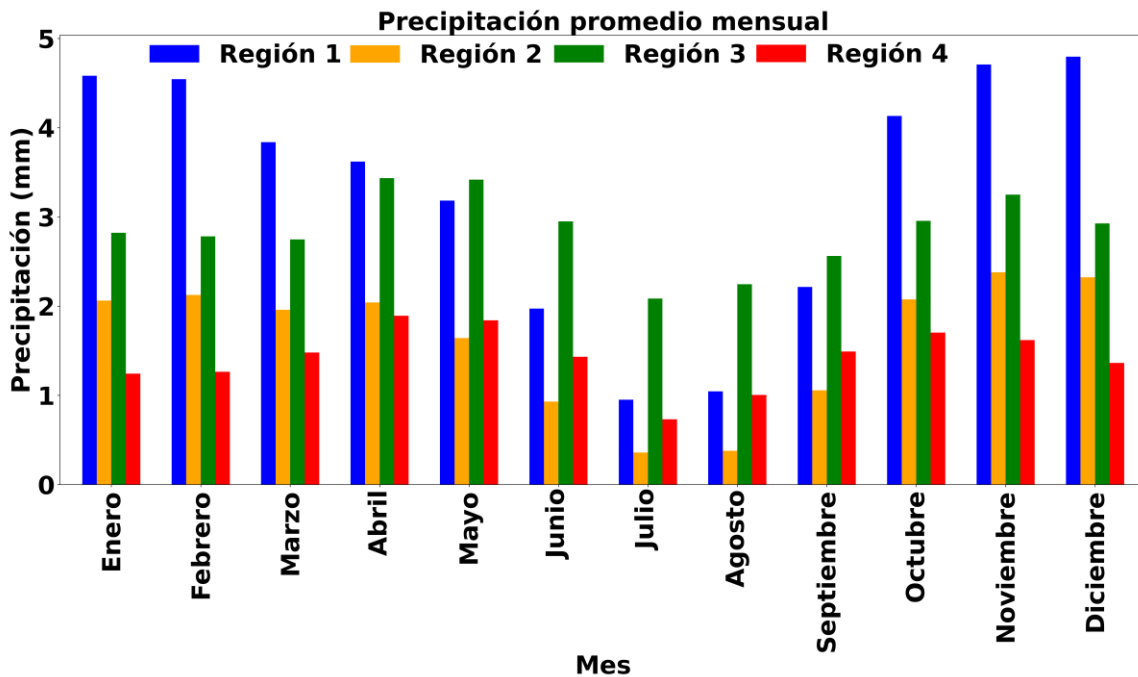


Figura 5. Ciclo anual de precipitación en cada clúster representado en la figura 4b. Período: 1950 – 2023.

La figura 6 muestra los patrones medios estacionales de la precipitación sobre la PI, con líneas que separan cada región. En diciembre-enero-febrero (DEF), considerado el invierno boreal, se observa que la precipitación media sobre la PI presenta los mayores valores en el noroeste de la PI, abarcando la comunidad gallega y el centro-norte de Portugal, coincidiendo con el área que ocupa el clúster 1. Este patrón coincide con el descrito en estudios previos, con modos de variabilidad dominantes como la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), la Oscilación del Atlántico Este y la del Oeste de Rusia (Rodríguez-Puebla et al., 2001). En marzo-abril-mayo (MAM), se puede apreciar que los valores de la precipitación y la configuración del patrón coinciden en gran medida con lo observado en los meses de DEF, aunque se observa una disminución de la precipitación en el área que ocupa el clúster 2, y contrariamente, un ligero incremento en la zona que ocupa el clúster 4.

En el verano boreal, junio-julio-agosto (JJA), se observa una reducción de la precipitación en gran parte de la PI, más acentuada en la zona centro y sur, en correspondencia con la extensión del clúster 2. Los valores más elevados de precipitación se observan en la zona cantábrica y al sur de los Pirineos, en correspondencia con los valores del ciclo anual representados en la Figura 5. El clima estival inherentemente seco de la PI está sufriendo una sequía agravada por un calentamiento más intenso y la reducción de las precipitaciones (Liu et al., 2022), por lo que regiones caracterizadas por menor volumen de precipitación, tienen mayor riesgo de afectación. En septiembre-octubre-noviembre (SON), el otoño del hemisferio norte, se observa un incremento notable de la precipitación en toda la PI,

destacándose nuevamente el noroeste, en correspondencia con el clúster 1. Este incremento, observable en toda la PI, destaca por valores más elevados en la zona norte de Galicia y en la zona central de Portugal, correspondientes con el Clúster 1. Cabe destacar que septiembre se considera como el único periodo lluvioso en gran parte de la PI, y en particular la región del clúster 1.

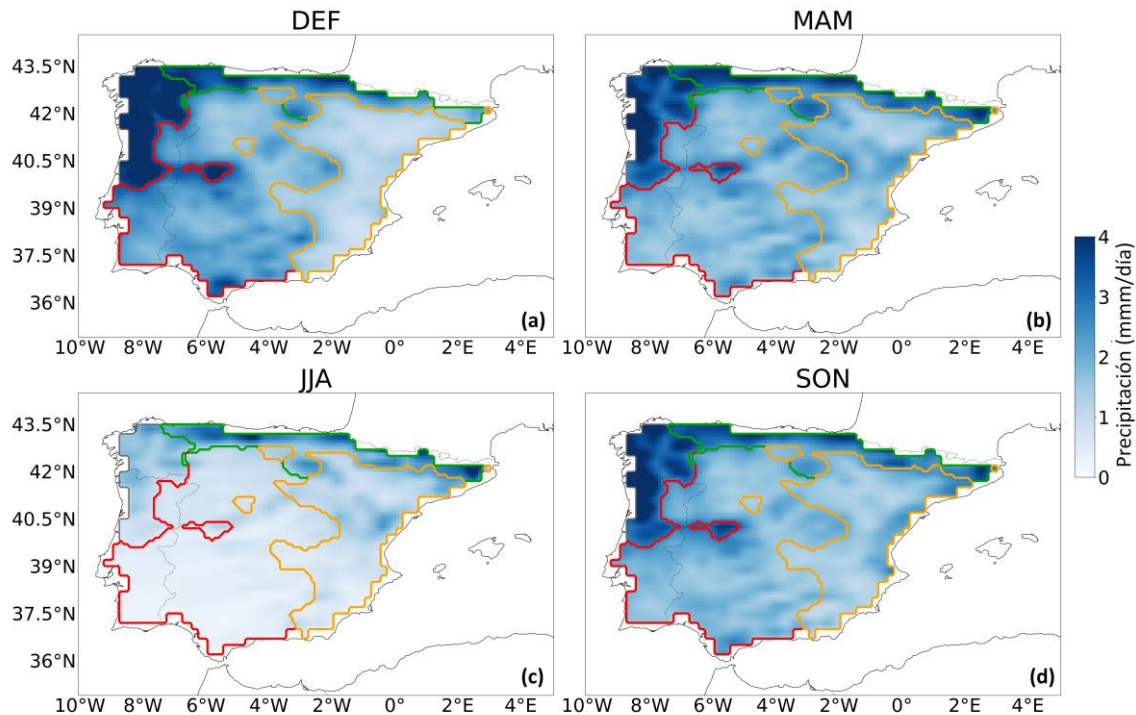


Figura 6. Patrón espacial de la precipitación promedio estacional de: a) diciembre-enero-febrero (DEF), b) marzo-abril-mayo (MAM), c) junio-julio-agosto (JJA), y d) septiembre-octubre-noviembre (SON), sobre la Península Ibérica. Periodo: 1950 – 2023.

3.2 Ocurrencia de Sequías

3.2.1 Identificación Evolución temporal

La evolución temporal de condiciones secas moderadas, severas y extremas en múltiples escalas temporales del SPI (1–24 meses), correspondientes a las regiones de la península ibérica definidas por los clústeres previamente identificados, se muestra en la Figura 7. Para el clúster 1 se aprecia un periodo de condiciones secas recurrentes a lo largo del periodo de estudio. Destacan aquellos periodos donde las condiciones secas se propagan en el tiempo y en varias o todas las escalas temporales del SPI, alcanzando varias magnitudes de severidad. Un análisis visual permite identificar los periodos más evidentes, de 1953-1954, 1975-1976, 1990-1994, 2004-2006, 2011, 2016, y 2021-2023, con afectaciones más recurrentes después del

año 1990. Muestra un intervalo de mayor intensidad de eventos extremos en 1990, 2000-2010 y 2020-2023. Cabe destacar que las condiciones atmosféricas asociadas a las fases +NAO y -WeMO, han condicionado en gran medida el incremento de condiciones secas en la PI (Martínez-Artigas et al., 2021).

El clúster 3, correspondiente a la franja norte (Pirineos, Cordillera Cantábrica), presenta una menor persistencia de sequías prolongadas en comparación con las regiones de los clústeres 1 y 2. Sin embargo, se detectan episodios intensos desde finales de la década de 1980 y a inicios del siglo XXI, en coincidencia con el resto de las regiones. La recurrencia en escalas largas es más limitada, lo que refleja el efecto amortiguador de la influencia oceánica y la orografía que favorecen precipitaciones más regulares a lo largo del año (Moreno et al., 2020). El Clúster 4 que delimita el sureste peninsular muestra un patrón similar de intensificación post-1990, con eventos particularmente severos durante los últimos años. En los clústeres 1, 2, y 4, a diferencia del clúster 3, se puede apreciar mejor la ocurrencia de condiciones secas severas y extremas descritas en estudios previos para el periodo 2004-2005 (García-Herrera et al., 2007). En general, en todos los clústeres podemos observar un periodo claro (1960-1990) donde las condiciones de sequía se ven reducidas notablemente, lo que coincide con los resultados de otros estudios previos (Vicente Serrano et al., 2006). El análisis de todos los clústeres para todas las escalas temporales del SPI permite visualizar un claro aumento en la frecuencia de estos eventos. Resultados de Chidean et al., (2025), también informan que luego de 1975, la PI ha experimentado años más secos.

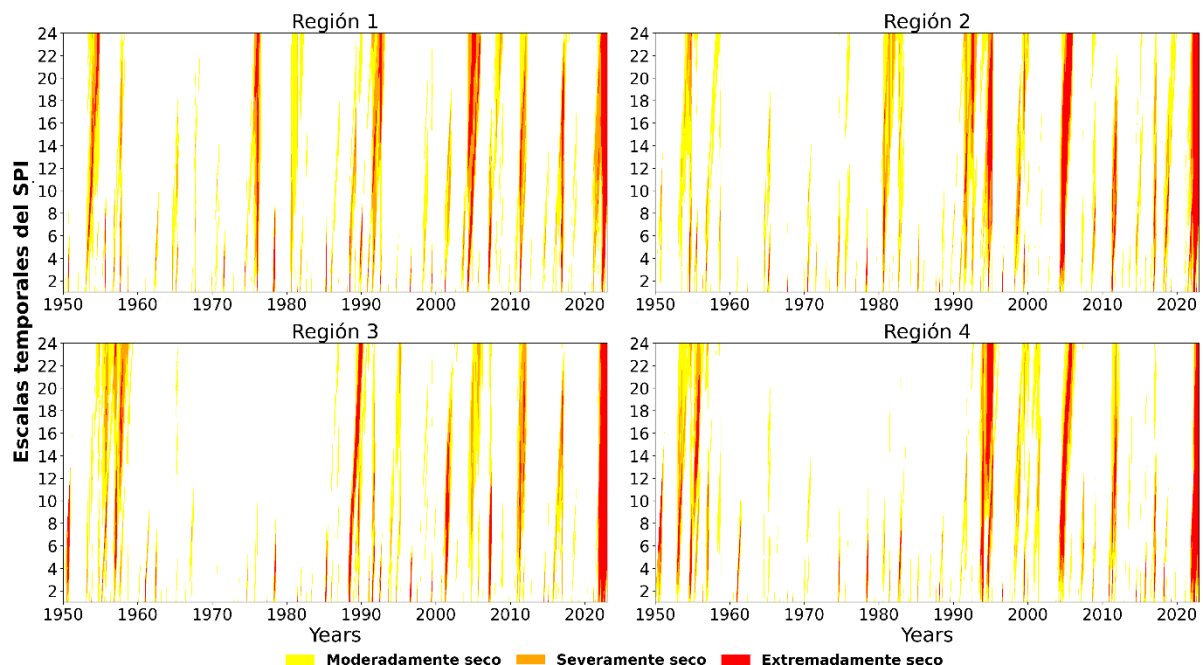


Figura 7. Evolución temporal de condiciones moderadas, severas y extremas de sequía según el SPI. Periodo: 1950 – 2023.

Con el fin de determinar cuantitativamente la tendencia de las condiciones secas que afectaron cada región, se determinó la tendencia del SPI12 del mes de diciembre. La evolución temporal y la línea de tendencia de estas series, aparecen representadas en la Figura 8. El SPI12 del mes de diciembre permite cuantificar las condiciones húmedas/secas teniendo en cuenta el acumulado anual de las precipitaciones, lo que posibilita caracterizar anualmente el estado de la sequía en cada región de estudio, siendo crucial para la caracterización de los recursos hídricos. El análisis confirma las tendencias anuales negativas durante el período 1950-2023, con patrones diferenciados de aridificación a escala regional en la PI (Figura 8). La tendencia hacia condiciones más secas en la Región 1, coincide con lo obtenido por Lorenzo et al., (2022), quienes investigaron mediante datos observados la tendencia del SPI en Galicia. La Región 2 exhibe la tendencia más pronunciada y estadísticamente significativa ($p < 0.01$) hacia condiciones secas (-0.12/década), siendo la única estadísticamente significativa, lo que confirma que el centro continentalizado es el núcleo de intensificación de la sequía.

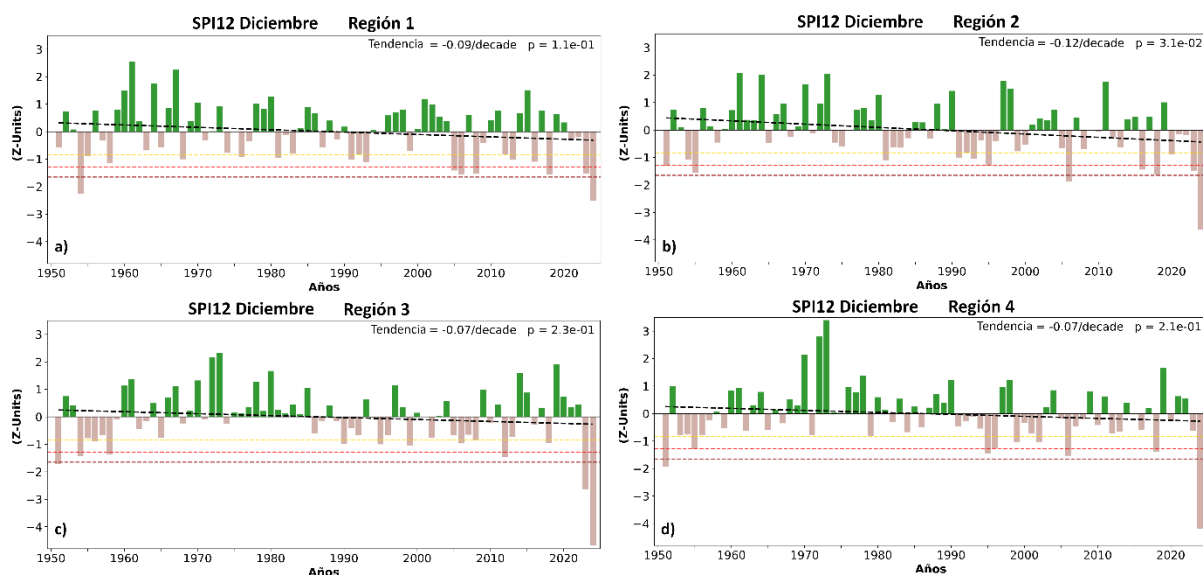


Figura 8. Evolución temporal y tendencia de las condiciones húmedas y secas según el SPI12 para el mes de diciembre en cada región. Las líneas amarilla, roja y marrón representan el umbral de condiciones secas moderadas, severas y extremas respectivamente. Periodo 1950-2023.

La Región 3 exhibe tendencias negativas más débiles que el resto de regiones, lo que sugiere que la influencia oceánica y orográfica sigue actuando como un amortiguador frente a déficits prolongados, aunque la magnitud de las condiciones secas que afectaron 2022 y 2023, revela que incluso estas áreas tradicionalmente más húmedas son cada vez más vulnerables, un hallazgo que refuerza la idea de que la intensificación reciente de las sequías no es exclusiva del dominio mediterráneo.

Resultados previos también han destacado periodos invernales secos que afectaron la PI en 2011-2012, y (Trigo et al., 2013), que influyen en las condiciones anuales de esos años y que se observan en las regiones clasificadas. Los análisis estacionales son más reveladores y se proponen para próximos estudios, ya que evitan enmascarar condiciones medias anuales y permiten clasificar periodos hidroclimáticos homogéneos. Finalmente, la Región 4 confirma la condición de “hotspot” semiárido, pero con una tendencia comparable a la de la Región 3.

El rol de la temperatura en la severidad de la sequía es un tema también debatido para la PI, con resultados que indican, además de una disminución de la precipitación, que el aumento de la evapotranspiración ha incidido en la tendencia de la severidad de la sequía (Pascoa et al., 2021). Otros resultados indican que los veranos cálidos relacionados con la sequía dependen de la región y la escala temporal, con el noreste, oeste y centro de la PI como los más propensos a veranos cálidos inducidos por la sequía (Riberio et al., 2020) lo que indica que un efecto memoria incide no solamente en la propagación de la sequía, sino que el proceso de retroalimentación inverso, aumento el calor del verano, puede ser un efecto que debe ser más estudiado.

3.3.2 Episodios de sequía

Se contabilizó el total de episodios de sequía que afectaron la PI durante el periodo de estudio, teniendo en cuenta el SPI en las escalas temporales 1, 3, 6, 12, 18 y 24 meses. La Tabla 2 muestra el total de episodios para cada región. Los resultados muestran un patrón muy homogéneo teniendo en cuenta la diversidad climática de la PI. En general, el total de episodios disminuye conforme aumenta la escala temporal del índice, lo que resulta normal, dado que disminuye la variabilidad del índice, y refleja la menor frecuencia, pero mayor persistencia, de los déficits pluviométricos prolongados. La Región 1 presenta el mayor número de episodios con 122 casos en el SPI1, 66 en el SPI3, y 21 en el SPI12, 17 en el SPI18 y 12 en el SPI24, lo que confirma la elevada variabilidad interanual de las precipitaciones atlánticas, caracterizadas por la sucesión de déficits cortos y recurrentes que han conllevado a episodios en escalas más largas del SPI. En las demás regiones, los valores son también elevados para las escalas temporales más cortas, lo que sugiere que esta zona continentalizada combina sequías de corta duración con episodios multianuales de mayor severidad.

Tabla 2. Total de episodios de sequía que afectaron cada región según el SPI en las escalas temporales de 1 (SPI1), 3 (SPI3), 6 (SPI6), 12 (SPI12), 18 (SPI18) y 24 (SPI24) meses. Periodo 1950-2023.

	SPI1	SPI3	SPI6	SPI12	SPI18	SPI24
Región 1	122	66	37	21	17	12
Región 2	105	62	38	20	14	10
Región 3	106	58	36	17	10	9
Región 4	103	58	32	19	10	6

En conjunto, estos resultados evidencian que el noroeste e interior peninsular concentran la mayor frecuencia de eventos de sequía en múltiples escalas, mientras que el sureste destaca por una menor frecuencia, aunque no significativa. Por el contrario, estudios previos señalan la dualidad climática ibérica, donde las regiones atlánticas se caracterizan por una alta recurrencia de sequías breves y las mediterráneas por sequías menos frecuentes, pero más intensas y persistentes (Vicente-Serrano et al., 2010; Spinoni et al., 2015). En la Tabla 3 se informan las fechas de inicio, fin, severidad y duración de los 10 episodios más severos que afectaron cada región según el SPI1. En esta escala temporal, el SPI refleja mejor la variabilidad interna de la precipitación. La clasificación de los diez eventos de sequía más severos en el periodo 1950–2023 (Tabla 2) revela diferencias espaciales notables en la intensidad y duración de los episodios entre las regiones de la península ibérica. En la Región 1, los eventos más severos se concentraron en las décadas de 1970, 2000 y en años recientes, destacando 2023 (severidad 10.1) y 2004–2005 (8.9), en correspondencia con lo observado en las figuras 7 y 8. Estos episodios muestran que, pese a la elevada pluviosidad media de la fachada atlántica, las sequías pueden alcanzar valores extremos cuando los déficits se prolongan durante varios meses, en consonancia con lo documentado para la sequía 2004–2005 en el oeste peninsular (García-Herrera et al., 2007).

La Región 2 concentra los episodios más severos de todo el dominio, incluyendo el evento de 2023 (13.6) y el de 2004–2005 (11.1), ambos de larga duración (8 y 11 meses).

En la Región 3 los episodios alcanzaron severidades similares a las de la Región 1, aunque con menor duración. Los eventos de 1997 (8.2) y 1988–1989 (8.1) destacan como los más severos, el primero incluso en un periodo de 3 meses. Esto evidencia que incluso las zonas tradicionalmente más húmedas experimentan sequías extremas bajo determinadas configuraciones atmosféricas, como ya señalaron Lorenzo-Lacruz et al. (2010). Finalmente, la Región 4 confirma su condición de hotspot mediterráneo, registrando episodios prolongados y severos como el de 1993–1994 (9.9, 10 meses) y el de 1952–1953 (7.1, 9 meses). La recurrencia de sequías

prolongadas en esta región refleja un patrón característico de los climas semiáridos. En conjunto, los resultados ponen de manifiesto que, si bien todas las regiones de la península han experimentado sequías extremas, la regionalización mediante clústeres resulta una herramienta adecuada para discriminar la respuesta diferenciada a la sequía en la PI en condiciones pluviométricas diferenciadas.

Tabla 3. Clasificación de los 10 eventos de sequía más severos que afectaron cada región según el SPI1 en el periodo 1950-2023.

Región 1				Región 2			
<u>Inicio</u>	<u>Fin</u>	<u>Severidad</u>	<u>Duración</u>	<u>Inicio</u>	<u>Fin</u>	<u>Severidad</u>	<u>Duración</u>
2023-01	2023-09	10.1	9	2023-01	2023-08	13.6	8
2004-11	2005-09	8.9	11	2004-11	2005-09	11.1	11
1978-07	1978-11	7.6	5	1954-04	1954-10	6.7	7
1975-10	1976-06	6.8	9	2022-05	2022-11	6.3	7
2011-12	2012-03	6.1	4	1985-08	1985-10	6.3	3
1997-02	1997-04	5.3	3	1978-07	1978-11	6.1	5
1985-08	1985-10	5.0	3	2011-12	2012-03	6.1	4
1971-09	1971-12	4.7	4	1997-02	1997-04	5.9	3
1956-10	1957-01	4.6	4	1965-04	1965-08	5.8	5
1990-02	1990-07	4.5	6	1999-11	2000-03	5.4	5
Región 3				Región 4			
<u>Inicio</u>	<u>Fin</u>	<u>Severidad</u>	<u>Duración</u>	<u>Inicio</u>	<u>Fin</u>	<u>Severidad</u>	<u>Duración</u>
1997-02	1997-04	8.2	3	1993-11	1994-08	9.9	10
1988-08	1989-01	8.1	6	1982-12	1983-05	7.5	6
1950-03	1950-11	7.4	9	1952-09	1953-05	7.1	9
2007-09	2008-02	7.2	6	2005-01	2005-07	6.7	7
2001-08	2002-04	6.2	9	1950-06	1950-11	6.6	6
1978-07	1978-11	6.1	5	1961-01	1961-08	6.2	8
1985-08	1985-10	5.8	3	1954-07	1954-12	6.2	6

1991-12	1992-02	5.6	3	1994-11	1995-05	5.9	7
1993-01	1993-03	5.2	3	1978-07	1978-11	5.9	5
1961-02	1961-03	5.1	2	1999-11	2000-03	5.3	5

3.3.3 Transiciones hidrometeorológicas

Se hizo con el SPI1 por presentar la mayor variabilidad temporal y representar así las condiciones de cambios abruptos en la precipitación.

Las transiciones hidrometeorológicas en la PI muestran una clara diferenciación espacial en cuanto a su frecuencia e intensidad, con patrones contrastantes entre las cuatro regiones definidas por clústeres (Figura 9). Estas transiciones, que representan cambios abruptos entre estados secos y húmedos, se clasifican en dos grandes categorías: de sequía a húmedo y de húmedo a sequía, cada una subdividida en transiciones moderadas, severas y extremas.

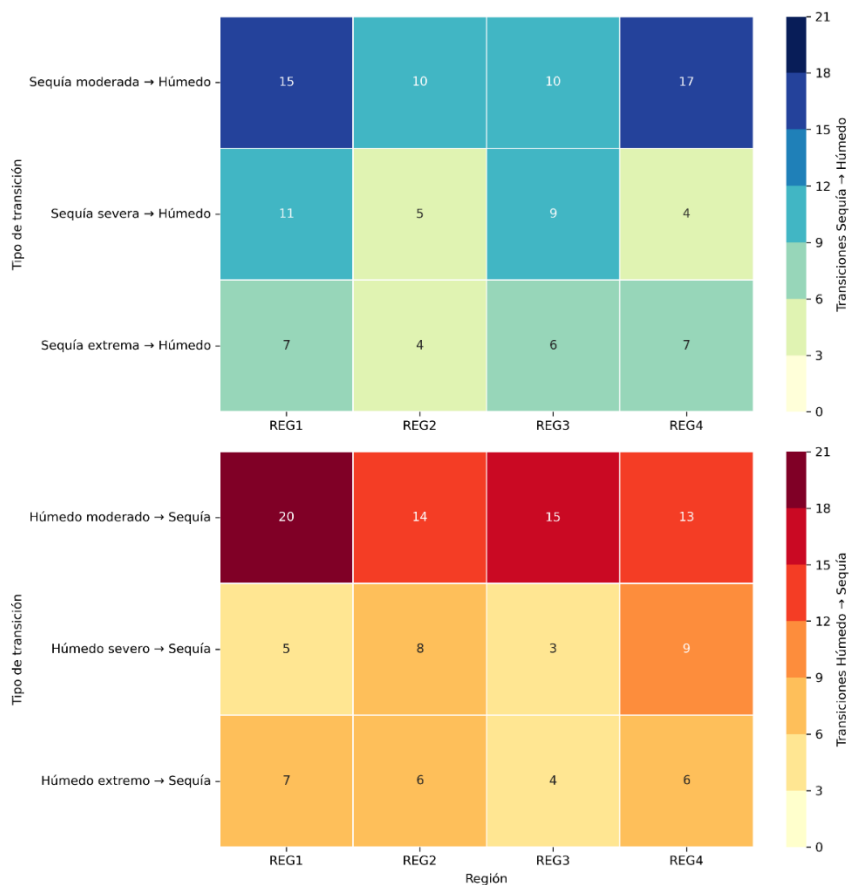


Figura 9. Categorización espacial de los distintos tipos de transición para 4 regiones independientes.

Este enfoque permite caracterizar los denominados eventos de *whiplash hidroclimático*, que resultan particularmente relevantes por sus impactos en sectores sensibles como la gestión de recursos hídricos y la agricultura, ya que implican un cambio repentino y de gran magnitud en cortos intervalos de tiempo (Swain et al., 2018; Ansari et al., 2022).

Los resultados indican que las transiciones más frecuentes corresponden a los pasos de sequía moderada a húmedo, especialmente en la Región 4 y en la Región 1. Esto era de esperar, dado que, en la escala temporal de 1 mes, los cambios entre condiciones menos abruptas deben ser más frecuentes dada la variabilidad interna de la precipitación, y además, dado que los valores del índice son normalizados. En contraste, las transiciones de húmedo moderado a sequía dominan en la Región 1 y la Región 3, lo que refleja una mayor exposición de estas áreas a cambios súbitos hacia condiciones deficitarias.

Consecuentemente, la frecuencia de los cambios entre condiciones severas y extremadamente secas a húmedas, y húmedas a secas, decrece. La principal aportación de este estudio es la aplicación de un enfoque regionalizado en la península ibérica, que permite identificar diferencias espaciales en la ocurrencia de transiciones y subraya que la volatilidad climática asociada a estos eventos compuestos es un riesgo emergente, cuya frecuencia creciente podría intensificarse en un contexto de calentamiento global (Swain et al., 2025). A pesar de los pocos eventos registrados, los resultados de Brunner et al., (2025), ya documentaron los impactos de estas transiciones a escala estacional sobre el caudal de ríos en cuencas hidrográficas de Europa. Sus resultados muestran que entre un 10% y un 25% de las transiciones, el cambio meteorológico se propaga a la hidrosfera, con los aumentos o decrecimientos bruscos de caudales. La frecuencia de propagación de estos casos sobre la PI resulta mayor en el área que ocupan las regiones 2 y 3, lo que constituye un tema para profundizar en posteriores estudios. Este patrón es consistente con estudios europeos que muestran una intensificación de las transiciones húmedo–seco en el Mediterráneo y Europa central (Brunner et al., 2021; Rousi et al., 2022), y difiere de investigaciones en Asia, donde se han analizado sobre todo transiciones en sistemas fluviales (Liu et al., 2021).

Conclusiones:

A lo largo de este trabajo se ha puesto de manifiesto la complejidad del régimen hidroclimático de la Península Ibérica y su creciente vulnerabilidad frente a episodios de déficit hídrico y transiciones abruptas entre estados húmedos - secos y secos - húmedos. El análisis efectuado con datos de ERA5-Land y el índice SPI para el periodo 1950–2023 ha permitido identificar patrones espaciales y temporales que aportan nuevas evidencias sobre la dinámica de la sequía en la región.

De manera más específica, se concluye que:

- Regionalización climática: la clasificación en cuatro regiones mediante K-means revela una marcada heterogeneidad en la distribución de la precipitación, reflejando la influencia combinada de la orografía y los patrones atmosféricos de gran escala. Región 1: Noroeste de la Península Ibérica; Región 2: Norte-Centro-Sur de la Península Ibérica; Región 3: Extremo norte de la Península Ibérica; Región 4: Sudeste de la Península Ibérica.
- Incremento de la severidad de las sequías: se constata una tendencia hacia condiciones secas, con el aumento más claro en la frecuencia y magnitud de los episodios secos desde la década de 1990. Entre los eventos más destacados sobresale la sequía de enero–agosto de 2023, la más severa de toda la serie analizada.
- Transiciones hidrometeorológicas: se observa un predominio de cambios de sequía moderada a condiciones húmedas en el sureste y noroeste de la península, mientras que las transiciones inversas, de húmedo a sequía, se concentran en la región de Galicia y el norte de Portugal y una franja norte perteneciente a la región 3, que se extiende hasta Cataluña. Estos eventos de tipo whiplash constituyen un riesgo emergente para la gestión del agua y la agricultura.
- Vulnerabilidad climática creciente: los resultados refuerzan la idea de que la Península Ibérica constituye un punto caliente de variabilidad climática en Europa, donde la intensificación de sequías y transiciones abruptas podría agravarse bajo escenarios de cambio climático.

Perspectivas futuras: se subraya la necesidad de ampliar los análisis incorporando otros índices de sequía (p. ej. SPEI, SSMI), variables atmosféricas y forzamientos climáticos, lo que permitirá comprender mejor los mecanismos subyacentes, mejorar los sistemas de alerta temprana y diseñar estrategias de adaptación y mitigación más eficaces.

Referencias

1. Ansari, R. and Grossi, G. (2022). Spatio-temporal evolution of wet–dry event features and their transition across the Upper Jhelum Basin (UJB) in South Asia. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 22, 287–302. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-287-2022>
2. Belo-Pereira, M., Dutra, E. Dutra and P. Viterbo (2011). Evaluation of global precipitation data sets over the Iberian Peninsula, *J. Geophys. Res.*, 116, D201101, doi: <https://doi.org/10.1029/2010JD015481>
3. Bezak, N., and Mikoš, M. (2020). Changes in the Compound Drought and Extreme Heat Occurrence in the 1961–2018 Period at the European Scale. *Water*, 12(12), 3543. <https://doi.org/10.3390/w12123543>
4. Blunden, J., and Arndt, D. S. (2016). State of the Climate in 2015. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 97, Si–S275. <https://doi.org/10.1175/2016BAMSStateoftheClimate.1>
5. Brunner, M., Anderson, B., & Muñoz-Castro, E. (2025). Meteorological and hydrological dry-to-wet transition events are only weakly related over European catchments. *Environmental Research Letters*, 20. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ade72c>
6. Chen, Z., Li, X., Zhang, X., et al. (2025). Global drought-flood abrupt alternation: Spatio-temporal patterns, drivers, and projections. *The Innovation Geoscience*, 3, 100113. <https://doi.org/10.59717/j.xinn-geo.2024.100113>
7. Chidean, M. I., Pérez-Aracil, J., Casillas-Pérez, D., Caamaño-Fernández, A., and Salcedo-Sanz, S. (2025). Spatio-temporal analysis of droughts in the Iberian Peninsula using complex climate networks over precipitation data. *Journal of Environmental Management*, 390, 126106. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126106>
8. Christian, J.I., Basara, J.B., Hunt, E.D. et al. (2021). Global distribution, trends, and drivers of flash drought occurrence. *Nat Commun*, 12, 6330. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26692-z>
9. Cornes, R. C., van der Schrier, G., van den Besselaar, E. J. M., & Jones, P. D. (2018). An ensemble version of the E-OBS temperature and precipitation data sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 9391–9409. <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>

10. Cortesi, N., Gonzalez-Hidalgo, J. C., Brunetti, M., & de Luis, M. (2012). Spatial variability of precipitation in Spain. *Regional Environmental Change*, 14(5), 1687–1698. <https://doi.org/10.1007/s10113-012-0402-6>
11. Costa, M. J., Salgado, R., Santos, D., Levizzani, V., Bortoli, D., Silva, A., & Pinto, P. (2010). Modelling of orographic precipitation over Iberia: A springtime case study. *Advances in Geosciences*, 25, 103-110. <https://doi.org/10.5194/adgeo-25-103-2010>
12. Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J. et al. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137, 553-597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
13. Diaz, J., Torne, M., Vergés, J. et al. (2021). Four decades of geophysical research on Iberia and adjacent margins. *Earth-Science Reviews*, 222, 103841. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103841>
14. Díaz, S., Zafra-Calvo, N., Purvis, A. et al. (2020). Set ambitious goals for biodiversity and sustainability. *Science*, 370, 411-413. <https://doi.org/10.1126/science.abe1530>
15. Esteban-Parra, M.J., Rodrigo, F.S. and Castro-Diez, Y. (1998), Spatial and temporal patterns of precipitation in Spain for the period 1880–1992. *Int. J. Climatol.*, 18: 1557-1574. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19981130\)18:14<1557::AID-JOC328>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19981130)18:14<1557::AID-JOC328>3.0.CO;2-J)
16. Everitt, B.S., Landau, S., Leese, M. and Stahl, D. (2011). An Introduction to Classification and Clustering. In *Cluster Analysis*. <https://doi.org/10.1002/9780470977811.ch1>
17. García-Herrera, R., Hernández, E., Barriopedro, D. et al. (2007). The Outstanding 2004/05 Drought in the Iberian Peninsula: Associated Atmospheric Circulation. *J. Hydrometeor.*, 8, 483–498. <https://doi.org/10.1175/JHM578.1>
18. García-Herrera, R., and Coauthors (2019). The European 2016/17 Drought. *J. Climate*, 32, 3169–3187. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0331.1>
19. Garijo, C., & Mediero, L. (2019). Quantification of the Expected Changes in Annual Maximum Daily Precipitation Quantiles under Climate Change in the Iberian Peninsula. *Proceedings*, 7(1), 23. <https://doi.org/10.3390/ECWS-3-05819>

20. Gomis-Cebolla, J., Rattayova, V., Salazar-Galán, S., & Francés, F. (2023). Evaluation of ERA5 and ERA5-Land reanalysis precipitation datasets over Spain (1951–2020). *Atmospheric Research*, 284, 106606. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106606>
21. González-Flórez, C., González-Cervera, Á., & Durán, L. (2022). Characterising Large-Scale Meteorological Patterns Associated with Winter Precipitation and Snow Accumulation in a Mountain Range in the Iberian Peninsula (Sierra de Guadarrama). *Atmosphere*, 13, 1600. <https://doi.org/10.3390/atmos13101600>
22. González-Hidalgo, J.C., Vicente-Serrano, S.M., Peña-Angulo, D. et al. (2018). High-resolution spatio-temporal analyses of drought episodes in the western Mediterranean basin (Spanish mainland, Iberian Peninsula). *Acta Geophys.*, 66, 381–392. <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0138-x>
23. Gu, L., Schumacher, D.L., Fischer, E.M. et al. (2025). Flash drought impacts on global ecosystems amplified by extreme heat. *Nat. Geosci.*, 18, 709–715. <https://doi.org/10.1038/s41561-025-01719-y>
24. Harris, I., Jones, P.D., Osborn, T.J., and Lister, D.H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *Int. J. Climatol.*, 34, 623-642. <https://doi.org/10.1002/joc.3711>
25. Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P. et al. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci Data*, 7, 109. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
26. Herrera García, S., Gutiérrez, J. M., Ancell, R., Pons, M., Frías, M. D., & Fernández, J. (2012). Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02). *International Journal of Climatology*, 32(1), 74–85. <https://doi.org/10.1002/joc.2256>
27. Herrera, S., Cardoso, R. M., Soares, P. M. et al. (2019). Iberia01: a new gridded dataset of daily precipitation and temperatures over Iberia. *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 1947–1956. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1947-2019>
28. Índice normalizado de precipitación (2012). Guía del usuario. World Meteorological Organization, OMM-No 1090. ISBN 978-92-63-31090-3. Disponible en: https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_es_2012.pdf
29. Liberato, M. L. R., Montero, I., Gouveia, C., Russo, A., Ramos, A. M., and Trigo, R. M. (2021). Rankings of extreme and widespread dry and wet events in the

- Iberian Peninsula between 1901 and 2016. *Earth Syst. Dynam.*, 12, 197–210. <https://doi.org/10.5194/esd-12-197-2021>
30. Libonati, R. et al. (2022). *Environ. Res. Lett.*, 17, 015005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac497e>
31. Liu, X., Yang, M., Zhou, F., et al. (2024). Understanding the Dry-to-Wet Transition of Summer Precipitation over the Three-Rivers Headwater Region: Atmospheric Circulation Mechanisms. *Sustainability*, 16(15), 6299. <https://doi.org/10.3390/su16156299>
32. Liu, Y., Garcia, M., Zhang, C., and 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*, 26(7), 1925–1936. <https://doi.org/10.5194/hess-26-1925-2022>
33. Loidi, J. (2017). The Vegetation of the Iberian Peninsula. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-54867-8>
34. Lonita, M. and Nagavciuc, V. (2021). Changes in drought features at the European level over the last 120 years. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 1685–1701. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-1685-2021>
35. Lorenzo, M. N., Alvarez, I., and Taboada, J. J. (2022). Drought evolution in the NW Iberian Peninsula over a 60 year period (1960–2020). *Journal of Hydrology*, 610, 127923. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127923>
36. Lorenzo, M.N., Iglesias, I., Taboada, J.J. and Gómez-Gesteira, M. (2010). Relationship between monthly rainfall in northwest Iberian Peninsula and North Atlantic Sea surface temperature. *Int. J. Climatol.*, 30, 980-990. <https://doi.org/10.1002/joc.1959>
37. MacQueen, J.B. (1967). Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations. In: *Proceedings of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 1: Statistics*, University of California Press, Berkeley, 281-297. <http://projecteuclid.org/euclid.bsm/1200512992>
38. Manning, C., Widmann, M., Bevacqua, E. et al. (2019). Increased probability of compound long-duration dry & hot events in Europe during summer (1950–2013). *Environmental Research Letters*, 14. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab23bf>

39. Martín, J., García, M., Dávila, F., & Soriano, L. (2014). Regimes of intense precipitation in the Spanish Mediterranean area. *Atmospheric Research*, 137, 66–79. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.09.010>
40. Martín-Vide, J. and Olcina Cantos, J. (2001). *Climas y tiempos de España*. Alianza Editorial. ISBN: 84-206-5777-8.
41. Martín-Vide, J., Sánchez-Lorenzo, A., López-Bustins, J., et al. (2008). Torrential rainfall in northeast of the Iberian Peninsula: Synoptic patterns and WeMO influence. *Adv. Sci. Res.*, 2. <https://doi.org/10.5194/asr-2-99-2008>
42. Martínez-Artigas, J., Lemus-Canovas, M., & López-Bustins, J. A. (2021). Precipitation in peninsular Spain: Influence of teleconnection indices and spatial regionalisation. *International Journal of Climatology*, 41, E1320-E1335.
43. Mastrantonas, N., Herrera-Lormendez, P., Magnusson, L. et al. (2021). Extreme precipitation events in the Mediterranean: Spatiotemporal characteristics and connection to large-scale atmospheric flow patterns. *International Journal of Climatology*, 41. <https://doi.org/10.1002/joc.6985>
44. McKee, T., Doesken, N., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, 17–22 January, Anaheim, California.
45. Merino, A., Fernández, S., Hermida, L. et al. (2014). Snowfall in the northwest Iberian Peninsula: synoptic circulation patterns and their influence on snow day trends. *ScientificWorldJournal*, 2014, 480275. <https://doi.org/10.1155/2014/480275>
46. Moemken, J., Koerner, B., Ehmele, F., Feldmann, H. and Pinto, J.G. (2022b) 'Recurrence of Drought Events Over Iberia. Part II: Future Changes Using Regional Climate Projections', *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 74(1), p. 262–279.
47. Molina, J. (2000). *El Clima de la Península Ibérica*.
48. Moreno, A., Iglesias, M., Azorin-Molina, C., Pérez-Mejías, C., Bartolomé, M., Sancho, C., Stoll, H., Cacho, I., Frigola, J., Osácar, C., Muñoz, A., Delgado Huertas, A., Bladé, I., and Vimeux, F. (2020). Spatial variability of northern Iberian rainfall stable isotope values: Investigating climatic controls on daily and monthly timescales. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 20, 1–27. <https://doi.org/10.5194/acp-2020-861>

49. Muñoz Sabater, J. (2019). ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present.
50. Muñoz-Díaz, D., and Rodrigo, F. S. (2004). Spatio-temporal patterns of seasonal rainfall in Spain (1912-2000) using cluster and principal component analysis: comparison. *Ann. Geophys.*, 22, 1435–1448. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-1435-2004>
51. Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Augustí-Panareda, A. et al. (2021). ERA5-Land: a state of the global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13, 4349–4383.
52. Noguera, I., Domínguez-Castro, F., Vicente-Serrano, S. M. et al. (2024). Unravelling the atmospheric dynamics involved in flash drought development over Spain. *International Journal of Climatology*, 44(12), 4478–4494. <https://doi.org/10.1002/joc.8592>
53. PANU, U. S., & SHARMA, T. C. (2002). Challenges in drought research: some perspectives and future directions. *Hydrological Sciences Journal*, 47(sup1), S19–S30. <https://doi.org/10.1080/02626660209493019>
54. Parracho, A.C., Melo-Gonçalves, P., & Rocha, A. (2016). Regionalisation of precipitation for the Iberian Peninsula and climate change. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 94, 146-154. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.07.004>
55. Páscoa, P., Gouveia, C. M., Russo, A., & Trigo, R. M. (2017). Drought Trends in the Iberian Peninsula over the Last 112 Years. *Advances in Meteorology*, 2017, 4653126. <https://doi.org/10.1155/2017/4653126>
56. Páscoa, P., Russo, A., Gouveia, C., Soares, P. M. M., Cardoso, R., Careto, J., and Ribeiro, A. F. S. (2021). A high-resolution view of the recent drought trends over the Iberian Peninsula. *Weather and Climate Extremes*, 32, 100320. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100320>
57. Ramis, C., Romero, R., Homar, V., & Alonso, S. (2009). The role of mathematics in the understanding of the dynamics of meteorological Situations that produce heavy rain over the Spanish Mediterranean zone. *Monografías de la Real Academia de Ciencias de Zaragoza*, 31, 175-198.

58. Ribeiro, A. F. S., Russo, A., Gouveia, C., and Pires, C. (2020). Drought-related hot summers: A joint probability analysis in the Iberian Peninsula. *Weather and Climate Extremes*, 30, 100279. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100279>
59. Rodríguez-Puebla, C., Encinas, A., Nieto-Isidro, S., and Garmendia, J. (1998). Spatial and temporal patterns of annual precipitation variability over the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 18(3), 299–316. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19980315\)18:3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19980315)18:3)
60. Rodríguez-Puebla, C., Encinas, A. H., and Sáenz, J. (2001). Winter precipitation over the Iberian Peninsula and its relationship to circulation indices. *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(2), 233–244. <https://doi.org/10.5194/hess-5-233-2001>
61. Ruiz Sinoga, J. D., Garcia Marin, R., Martinez Murillo, J. F., & Gabarron Galeote, M. A. (2011). Precipitation dynamics in southern Spain: trends and cycles. *International journal of climatology*, 31(15), 2281-2289.
62. Sabater, S., Elosegí, A., Feio, M.J. et al. (2022). The Iberian rivers, Chapter 4. In: Tockner, K., Zarfl, C., & Robinson, C. (Eds.), *Rivers of Europe* (Second Edition) (pp. 181–224). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102612-0.00004-3>
63. Santiago Giralt, A., Moreno, A., Cacho, I., & Valero-Garcés, B. (2017). CLIVAR Exchanges, Núm. 73, septiembre.
64. Satopaa, V., Albrecht, J., Irwin, D., & Raghavan, B. (2011). Finding a Kneedle in a Haystack: Detecting Knee Points in System Behavior. <https://doi.org/10.1109/ICDCSW.2011.20>
65. Serrano, A., García, J., Mateos, V. L., Cancillo, M. L., & Garrido, J. (1999). Monthly Modes of Variation of Precipitation over the Iberian Peninsula. *Journal of Climate*, 12(9), 2894-2919. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2894:MMOVOP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2894:MMOVOP>2.0.CO;2)
66. Serrano-Notivol R, Beguería S, Saz MA, de Luis M. Recent trends reveal decreasing intensity of daily precipitation in Spain. *Int J Climatol*. 2018; 38: 4211-4224. <https://doi.org/10.1002/joc.5562>
67. Sorí, R., Gimeno-Sotelo, L., Nieto, R., Liberato, M. L. R., Stojanovic, M., Pérez-Alarcón, A., Fernández-Alvarez, J. C., & Gimeno, L. (2023). Oceanic and terrestrial origin of precipitation over 50 major world river basins: Implications

for the occurrence of drought. *Science of The Total Environment*, 859(Part 2), 160288. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160288>

68. Sorí, R., Vázquez, M., Stojanovic, M., Nieto, R., Liberato, M. L. R., and Gimeno, L. (2020). Hydrometeorological droughts in the Miño–Limia–Sil hydrographic demarcation (northwestern Iberian Peninsula): the role of atmospheric drivers. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 20, 1805–1832. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1805-2020>
69. Sotillo, M., Ramis, C., Romero, R., Alonso, S., & Homar Santaner, V. (2003). Role of orography in the spatial distribution of precipitation over the Spanish Mediterranean zone. *Climate Research*, 23, 247-261. <https://doi.org/10.3354/cr023247>
70. Stohl, A., Forster, C., Frank, A., Seibert, P., and Wotawa, G. (2005). Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2. *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 2461–2474. <https://doi.org/10.5194/acp-5-2461-2005>
71. Swain, D. L., Prein, A. F., Abatzoglou, J. T., Albano, C. M., Brunner, M. I., Diffenbaugh, N. S., Singh, D., Skinner, C. B., and Touma, D. (2025). Hydroclimate volatility on a warming Earth. *Nature Reviews Earth & Environment*, 6(1), 35–50. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00624-z>
72. Tejero, R., González-Casado, J. M., Gómez-Ortiz, D., & Sánchez-Serrano, F. (2006). Insights into the “tectonic topography” of the present-day landscape of the central Iberian Peninsula (Spain). *Geomorphology*, 76(3–4), 280-294. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.11.007>
73. Thorndike, R.L. (1953). Who belongs in the family?. *Psychometrika*, 18, 267–276. <https://doi.org/10.1007/BF02289263>
74. Trigo, R., Añel, J.A., Barriopedro, D. et al. (2013). The record winter drought of 2011–2012 in the Iberian Peninsula. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 94, S41-S45.
75. Umargono, E., Suseno, J.E., & Gunawan, V.G.S.K. K-Means Clustering Optimization Using the Elbow Method and Early Centroid Determination Based on Mean and Median Formula.
76. Vicente-Serrano, S. M. (2006). Spatial and temporal analysis of droughts in the Iberian Peninsula (1910–2000). *Hydrological Sciences Journal*, 51(1), 83–97. <https://doi.org/10.1623/hysj.51.1.83>
77. Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., and López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized

Precipitation Evapotranspiration Index. *J. Climate*, 23, 1696–1718.
<https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

78. Vicente-Serrano, S. M. et al. (2014). *Environ. Res. Lett.*, 9, 044001.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/4/044001>

79. Vicente-Serrano, S., Quiring, S., Peña-Gallardo, M. et al. (2019). A review of environmental droughts: Increased risk under global warming?. *Earth-Science Reviews*, 201, 102953. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102953>

80. Vicente-Serrano, S.M., McVicar, T.R., Miralles, D.G. et al. (2020). Unraveling the influence of atmospheric evaporative demand on drought and its response to climate change. *WIREs Climate Change*, 11, e632.
<https://doi.org/10.1002/wcc.632>

81. Wilhite, D.A., & Glantz, M.H. (1985). Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10(3), 111–120.

82. Xie, W., Yi, S., Leng, C., et al. (2022). The evaluation of IMERG and ERA5-Land daily precipitation over China with considering the influence of gauge data bias. *Scientific Reports*, 12, 8085. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12307-0>

83. Yang, J., Ma, Y., Zhang, X. et al. (2017). An initialization method based on hybrid distance for k-means algorithm. *Neural computation*, 29(11), 3094-3117.

84. Yang, J., Wang, YK., Yao, X., Lin, CT. (2021). Adaptive Initialization Method for K-Means Algorithm. *Front Artif Intell.*, 4, 740817.
<https://doi.org/10.3389/frai.2021.740817>