

TRABAJO FIN DE MÁSTER

“APROXIMACIÓN AL ESTUDIO DE LAS SEQUÍAS EN LAS SUBCUENCAS DE CABECERA DE LA ESPAÑA PENINSULAR: ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE ÍNDICES DE SEQUÍA CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS, TIPOS DE VEGETACIÓN Y ACTIVIDAD VEGETAL”

Autor: CATALINA ROCA FERNÁNDEZ

Directores: Sergio M. Vicente Serrano; M. Isabel Rabanaque Hernández

Máster Universitario en

**Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del territorio:
sistemas de información geográfica y teledetección**

Septiembre de 2019



Universidad
Zaragoza

**Departamento de Geografía y
Ordenación del Territorio**



Agradecimientos

Agradecer a Sergio Vicente por haber aceptado a dirigirme el trabajo final de máster aprovechando la beca *JAE Intro 2018* que realicé en el Instituto Pirenaico de Ecología en Zaragoza, y también a su equipo de investigación, sobre todo a Marina Peña, que fueron las personas que me proporcionaron las variables para poder calcular y analizar los índices, y me ayudaron a solventar los problemas técnicos que iban surgiendo durante el proceso. Gracias a ellos he tenido la oportunidad de poder aprender mucho más sobre las sequías y sus indicadores, y de programación en RStudio.

Asimismo, agradecer a Isabel Rabanaque, profesora del máster en Tecnologías de la Información Geográfica por la Universidad de Zaragoza, que aceptó a co-dirigir este trabajo, ofreciéndome unos consejos sobre buenas praxis para la realización del mismo. También al profesor Miguel Sevilla, quien me ha solventado algunas cuestiones técnicas puntuales. Y en este contexto, a la dirección y profesorado del máster por haberme apoyado en estos dos años y en mi elección del trabajo.

Finalmente, a mis padres y a David por su apoyo incondicional durante todos estos meses y por esas estancias cortas cuando el trabajo lo permitía.

Resumen

En el presente trabajo se analiza la interacción entre las sequías climáticas e hidrológicas y sus variaciones espaciales en las subcuencas de cabecera de la España peninsular. Además, también se analiza la influencia que presenta la vegetación en la relación entre ambos tipos de sequía. Para ello se utilizan dos índices de sequía climática y uno de sequía hidrológica, un índice de vegetación y cartografía de la ocupación del suelo en España. Mediante un análisis de correlación se compara el comportamiento de las sequías en la zona de estudio y se determina la respuesta de los diferentes sistemas naturales a las sequías climáticas e hidrológicas.

Palabras Clave: *sequía climática, sequía hidrológica, índice de sequía, coberturas o cubiertas del suelo, actividad vegetal.*

Abstract

This paper analyses the interaction between meteorological and hydrological droughts and their spatial variability in the basins of the mainland Spain. In addition, the influence of vegetation on the relationship between both kinds of drought is also analysed. For this purpose, two meteorological drought indices and one hydrological drought index, one vegetation index and Spain land covers cartography are used. A correlation analysis compares the behaviour of droughts in the study area and determines the response of different natural systems to meteorological and hydrological droughts.

Key Words: *meteorological drought, hydrological drought, drought index, land cover, vegetation activity.*

ÍNDICE

I. Introducción	pág. 1
- Objetivos	pág. 1
- Hipótesis	pág. 2
- Consideraciones	pág. 2
- Espacio geográfico analizado y contextualización de la zona de estudio	pág. 3
II. Marco teórico-conceptual	pág. 5
III. Metodología de análisis y técnicas de trabajo utilizadas: explotación de los datos y tratamiento de la información geográfica	pág. 18
- Metodología objetivo 1a	pág. 19
- Metodología objetivo 1b	pág. 25
IV. Resultados: relación entre las sequías climáticas e hidrológicas en las subcuencas de cabecera de la España peninsular	pág. 28
- Resultados objetivo 1a	pág. 28
- Resultados objetivo 1b	pág. 39
V. Conclusiones	pág. 67
Referencias bibliográficas y webgrafía	pág. 72
Materiales cartográficos	pág. 78
Anexos	pág. 80
- Anexo 1: Glosario	pág. 80
- Anexo 2: Otras herramientas y funciones softwares ArcGIS 10.5 y RStudio	pág. 84
- Anexo 3: Scripts software RStudio	pág. 85

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura I.1. Contextualización de la zona de estudio.....	pág. 4
Tabla II.1. Definiciones del término de sequía (algunos ejemplos)	pág. 5
Figura II.2. Ecuaciones para el cálculo del índice de vegetación NDVI	pág. 12
Figura II.3. Ecuaciones para el cálculo de los índices de vegetación MSI, NDWI y NDDI.....	pág. 13
Figura III.1. Modelo cartográfico de modelado hidrológico	pág. 20
Tabla III.2. Codificación y reclasificación de la ocupación del suelo en España del proyecto europeo CLC para las subcuencas de cabecera de la España peninsular	pág. 25
Figura IV.1. Tabla explicativa y cartografía de las escalas temporales de acumulación de la anomalía de precipitación del índice SPI con mayor correlación con el índice SSI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)	pág. 28
Figura IV.2. Tabla explicativa y cartografía de las correlaciones más elevadas entre los índices SPI y SSI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)	pág. 29
Figura IV.3. Tabla explicativa y cartografía de las correlaciones más elevadas entre los índices SPI y SSI agrupadas según su escala temporal (214 subcuencas de cabecera – España peninsular).....	pág. 30
Figura IV.4. Tabla explicativa y cartografía de las escalas temporales de acumulación de la anomalía del BHC del índice SPEI con mayor correlación con el índice SSI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular).....	pág. 32
Figura IV.5. Tabla explicativa y cartografía de las correlaciones más elevadas entre los índices SPEI y SSI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)	pág. 33
Figura IV.6. Tabla explicativa y cartografía de las correlaciones más elevadas entre los índices SPEI y SSI agrupadas según su escala temporal (214 subcuencas de cabecera – España peninsular).....	pág. 34
Figura IV.7. Tabla explicativa y cartografía de las coincidencias de las escalas temporales y de las correlaciones entre los índices SPI – SSI y SPEI – SSI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular).....	pág. 36
Tabla IV.8. Escalas temporales de acumulación de la anomalía climática de los índices SPI y SPEI descartadas (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)	pág. 38
Figura IV.9. Tabla explicativa y cartografía de las escalas temporales de acumulación de la anomalía de precipitación del índice SPI con mayor correlación con el NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)	pág. 40
Figura IV.10. Tabla explicativa y cartografía de las correlaciones más elevadas entre los índices SPI y NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular).....	pág. 41
Figura IV.11. Tabla explicativa y cartografía de las correlaciones más elevadas entre los índices SPI y NDVI agrupadas según su escala temporal (214 subcuencas de cabecera – España peninsular).....	pág. 42

Figura IV.12. Tabla explicativa y cartografía de las escalas temporales de acumulación de la anomalía del BHC del índice SPEI con mayor correlación con el NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular).....	pág. 44
Figura IV.13. Tabla explicativa y cartografía de las correlaciones más elevadas entre los índices SPEI y NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular).....	pág. 45
Figura IV.14. Tabla explicativa y cartografía de las correlaciones más elevadas entre los índices SPEI y NDVI agrupadas según su escala temporal (214 subcuencas de cabecera – España peninsular).....	pág. 46
Figura IV.15. Tabla explicativa y cartografía de las correlaciones entre los índices SSI y NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)	pág. 48
Figura IV.16. Tabla explicativa y cartografía de las coincidencias de las escalas temporales y de las correlaciones entre los índices SPI – NDVI, SPEI – NDVI y SSI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)	pág. 49
Tabla IV.17. Escalas temporales de acumulación de la anomalía climática de los índices SPI y SPEI descartadas (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)	pág. 51
Figura IV.18. Distribución de las cubiertas del CLC-1990 en relación a las correlaciones máximas entre los índices SPI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)	pág. 53
Figura IV.19. Distribución de las cubiertas del CLC-2000 en relación a las correlaciones máximas entre los índices SPI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)	pág. 54
Figura IV.20. Distribución de las cubiertas del CLC-2006 en relación a las correlaciones máximas entre los índices SPI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)	pág. 55
Figura IV.21. Distribución de las cubiertas del CLC-2012 en relación a las correlaciones máximas entre los índices SPI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)	pág. 56
Figura IV.22. Distribución de las cubiertas del CLC-1990 en relación a las correlaciones máximas entre los índices SPEI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)	pág. 57
Figura IV.23. Distribución de las cubiertas del CLC-2000 en relación a las correlaciones máximas entre los índices SPEI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)	pág. 58
Figura IV.24. Distribución de las cubiertas del CLC-2006 en relación a las correlaciones máximas entre los índices SPEI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)	pág. 59
Figura IV.25. Distribución de las cubiertas del CLC-2012 en relación a las correlaciones máximas entre los índices SPEI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)	pág. 60
Figura IV.26. Distribución de las cubiertas del CLC-1990 en relación a las correlaciones entre los índices SSI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular).....	pág. 61
Figura IV.27. Distribución de las cubiertas del CLC-2000 en relación a las correlaciones entre los índices SSI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular).....	pág. 62
Figura IV.28. Distribución de las cubiertas del CLC-2006 en relación a las correlaciones entre los índices SSI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular).....	pág. 63
Figura IV.29. Distribución de las cubiertas del CLC-2012 en relación a las correlaciones entre los índices SSI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular).....	pág. 64

I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo final de máster se ha desarrollado con motivo de la beca *JAE Intro 2018* realizada en el Instituto Pirenaico de Ecología en Zaragoza (IPE) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Se trata de una aproximación al estudio de las sequías en las subcuencas de cabecera de la España peninsular en diferentes períodos según la información disponible a través de un análisis de correlación entre distintos indicadores climáticos e hidrológicos: 1) Índice Estandarizado de Precipitación (SPI); 2) Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI); 3) Índice Estandarizado de Caudales (SSI). Además de ello se ha utilizado información de variables auxiliares como el caso de: 1) el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI); 2) las coberturas del suelo del *Corine Land Cover* (CLC) 1990, 2000, 2006 y 2012.

En el trabajo se ha relacionado el índice de sequía hidrológica SSI, el índice de vegetación NDVI y las coberturas del suelo del CLC con la variabilidad climática recogida en los índices SPI y SPEI. Con ello se puede determinar el retardo temporal y las escalas temporales óptimas en la evaluación de la relación entre las sequías climáticas y las hidrológicas. Además, el NDVI y las coberturas del CLC se relacionan con el SSI para analizar la posible influencia de la cubierta vegetal en la relación existente entre los índices de sequía climáticos e hidrológicos.

Objetivos

- **Objetivo general:**

1) Analizar la relación existente entre índices de sequía climáticos e hidrológicos en las subcuencas de cabecera de la España peninsular mediante índices de sequía climática SPI y SPEI e índice de sequía hidrológica SSI, según los distintos tipos de vegetación y valores de actividad vegetal NDVI.

- **Objetivos específicos:**

1a) Determinar las escalas temporales de respuesta más características de las sequías hidrológicas a las sequías climáticas, mediante el análisis de correlación entre los índices SPI – SSI y SPEI – SSI a diferentes escalas temporales.

A continuación se detallan los períodos y las variables utilizadas para calcular los índices:

- Período 1962 – 2013 a escala mensual. El período se ha escogido por la disponibilidad de los datos de caudal: no se dispone de datos con anterioridad a 1962, y con posterioridad a 2013, la mayoría de las confederaciones hidrográficas no cuentan con datos validados.
- Las escalas temporales de acumulación de la anomalía climática de los índices SPI y SPEI han sido de 1 a 48 meses. Dichas escalas se han correlacionado con la del SSI, reservando para análisis posteriores las de mayor correlación entre los índices SPI – SSI y SPEI – SSI.
- Para el análisis se han utilizado datos mensuales de evapotranspiración de referencia (ETO) y precipitación para el cálculo de los índices SPI y SPEI, y caudales mensuales para el cálculo del índice SSI.

1b) Relacionado con el objetivo anterior, analizar en qué medida la relación entre los índices de sequía climática e hidrológica varía según los distintos tipos de vegetación y valores de actividad vegetal NDVI.

A continuación se detallan el período y las variables utilizadas para el análisis:

- Período julio de 1981 – diciembre de 2013 a escala mensual. La fecha inicial se ha escogido con relación a la disponibilidad de los datos de NDVI: con anterioridad a julio de 1981 no se dispone de datos NDVI derivados del sensor AVHRR a bordo del satélite NOAA. Indicar igualmente que la primera carto-

grafía pública de la que se dispone con información de las coberturas del suelo para el territorio español procedente del CLC es la del año 1990; asimismo, se ha escogido la última del año 2012.

- Para el análisis se han utilizado los índices de sequía SPI, SPEI y SSI, las coberturas del suelo del CLC de los años 1990, 2000, 2006 y 2012, y los valores de actividad vegetal NDVI.

Hipótesis

De acuerdo con los objetivos planteados, se formulan las siguientes hipótesis:

- **Relacionada con el objetivo 1a:** la interacción entre las sequías climáticas e hidrológicas varía en función de la escala temporal de la sequía climática con importantes variaciones espaciales, previendo correlaciones de mayor magnitud entre los índices SPEI – SSI.
- **Relacionada con el objetivo 1b:** la vegetación interfiere en las relaciones entre las sequías climáticas e hidrológicas, presentando las correlaciones encontradas diferencias en función del tipo de vegetación y de la actividad vegetal.

Consideraciones

- **En cuanto a los índices utilizados para el análisis:**

La principal ventaja de los índices de sequía climática analizados con relación a otros índices, es que permiten el análisis de los impactos de las sequías en distintas escalas temporales de acumulación de la anomalía climática (Peña et al., 2016). Además, los diferentes sistemas naturales y sectores económicos pueden responder a las condiciones de sequía en escalas temporales muy diferentes, siendo éstas a corto, medio o largo plazo (Vicente et al., 2012, dentro de Peña et al., 2016).

- **En cuanto a las variables utilizadas:**

Se ha trabajado con valores promedio correspondientes a cada subcuenca de cabecera y no con la información extraída de los observatorios o de las estaciones de aforo, ya que con la segunda opción las variables estudiadas se hubiesen analizado en un punto concreto del espacio. Por el contrario, la aproximación seguida permite relacionar los datos observados en ese punto con la superficie total; asimismo, *“los datos de las series temporales derivados de observaciones de estaciones no son necesariamente precisos ni homogéneos en el tiempo”* (Peña et al., 2016).

- **En cuanto a la escala temporal de acumulación de la anomalía climática utilizada:**

Se han considerado escalas temporales de 1 a 48 meses para recoger la diversidad en los tipos de respuesta que se pueden registrar en cuencas tan diversas (Peña et al., 2016).

Tal y como indica AEMET (s.f.), los caudales suelen responder a anomalías pluviométricas a largo plazo. Según Lorenzo et al. (2013) y González et al. (2018), las escalas temporales más largas son más útiles para evaluar las sequías hidrológicas y para detectar condiciones anuales de sequía por su persistencia durante períodos de tiempo más largos. En este contexto, Lorenzo et al. (2010) demostraron que los grandes embalses del centro de España responden a escalas temporales de más de 24 meses.

Vicente et al. (2010) hicieron distinciones entre los diferentes subsistemas hidrológicos, determinando que las escalas temporales a corto plazo se relacionan principalmente con el contenido en humedad del suelo y con las descargas de los cauces fluviales en áreas de cabecera, las escalas temporales medias se relacionarían con las descargas en el curso medio de los ríos, y las escalas temporales a largo plazo con las

variaciones en el almacenamiento de las aguas subterráneas. Por tanto, diferentes escalas temporales son útiles para el monitoreo de las condiciones de sequía (Szalai et al., 2000; Vicente y López, 2005; Vicente 2007).

- **En cuanto a la metodología seguida. De forma breve, la metodología se basa en:**

- 1) La aplicación del coeficiente de correlación de Pearson (r de Pearson) para comparar el comportamiento de las sequías en las subcuencas de cabecera de la España peninsular y analizar la respuesta de los diferentes sistemas naturales a las sequías climáticas e hidrológicas, así como las diferencias entre ellas.
- 2) Conocer los tiempos de respuesta de los diferentes sistemas naturales a las sequías climáticas, determinando las escalas temporales de respuesta más características a través del análisis de correlación.

Espacio geográfico analizado y contextualización de la zona de estudio

Se han utilizado 214 subcuencas de cabecera de la España peninsular. En el apartado metodológico se explica el procedimiento para la obtención de las mismas.

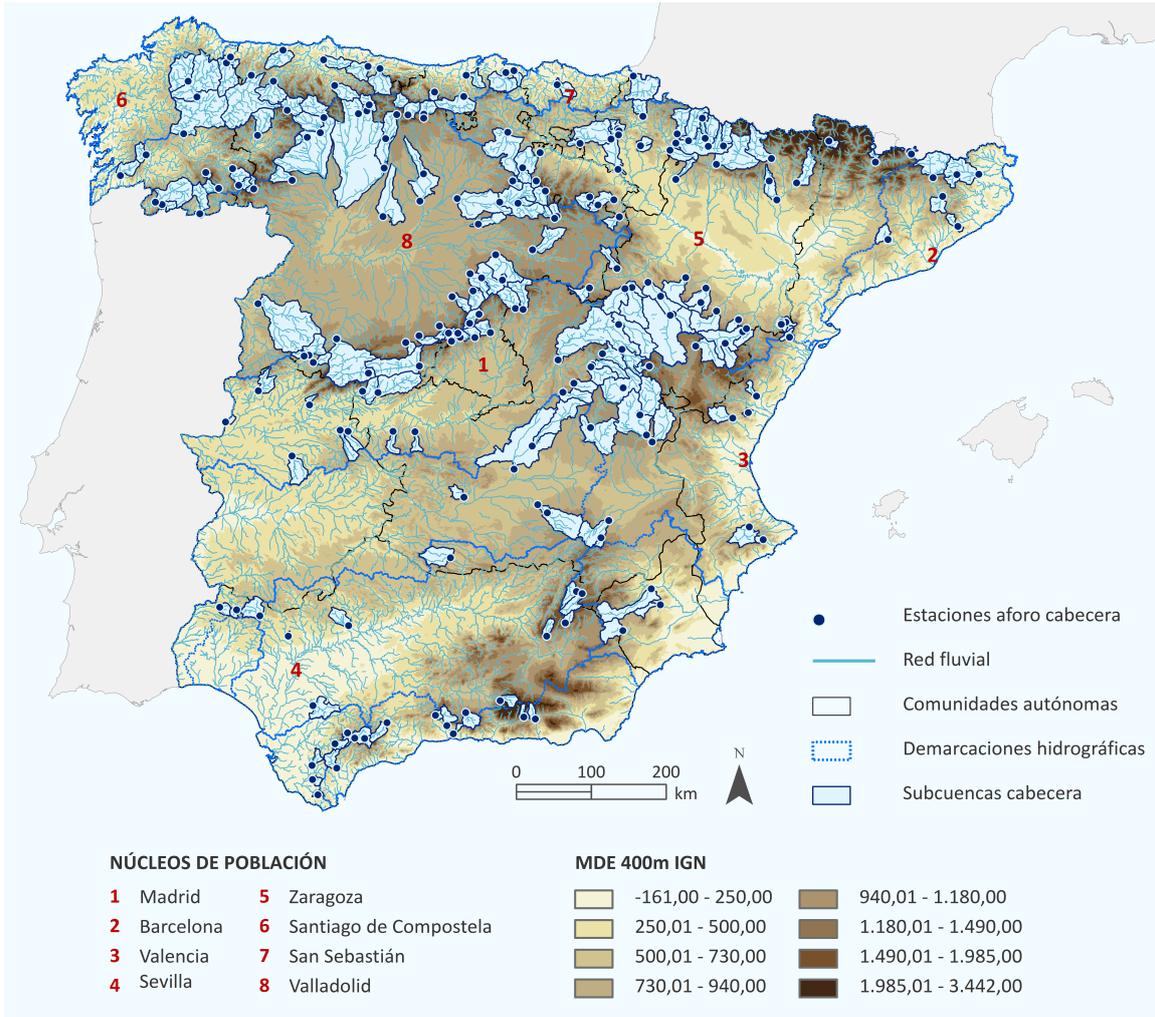
El motivo por el cual se ha decidido trabajar sobre subcuencas de cabecera es porque estas áreas están generalmente poco afectadas por influencias antrópicas, como pueden ser la regulación de las aguas, la presencia de cultivos de regadío, abastecimientos urbanos o industriales, etc. Este trabajo pretende analizar los indicadores en un entorno lo más natural posible.

Asimismo, se utilizará el término subcuenca y no cuenca hidrográfica, pues estas superficies pertenecen a otras cuencas hidrográficas más grandes no analizadas en el presente trabajo, cuya escorrentía superficial fluye hacia un determinado punto del curso fluvial y no hacia el mar.

En la figura I.1 se ilustra cartográficamente la contextualización de la zona de estudio, en la cual se observan las 214 subcuencas de cabecera analizadas. Se representan también otros elementos para facilitar, de manera más concreta, la ubicación en el espacio de las mismas.

Las cabeceras hacen referencia a las partes más altas de las cuencas, en el nacimiento de los ríos, que reciben agua por precipitación o nieve, y que además tienen la capacidad de acumular el agua en forma de glaciares, masas de nieve, humedales o aguas subterráneas. Se entiende por cuenca el área de drenaje que tiene el curso fluvial, considerando las pendientes topográficas para determinar la dirección y la acumulación de flujo de la red hídrica. De este modo, según el orden fluvial, las pendientes, y la dirección y acumulación hídricas, las cuencas varían en dimensiones, configuración y perfil topográfico.

Figura I.1. Contextualización de la zona de estudio



Sistema de coordenadas proyectadas ETRS 1989 UTM Zone 30N (EPSG 25830)

Fuente: elaboración propia – software ArcGIS 10.5

II. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

Las sequías, uno de los principales riesgos naturales con efectos evidentes después de un período de tiempo prolongado de escasez de precipitaciones, son una de las principales causas de daños agrícolas, económicos y ambientales, siendo difícil determinar su inicio y final, así como cuantificar objetivamente las características de los episodios o eventos de sequía en términos de duración, intensidad, magnitud y extensión espacio-temporal, ya que no existe una variable física determinada que permita medir la severidad de las sequías (Beguería et al., s.f.; Vicente et al., 2012a; Vicente et al., 2017). Además, pueden afectar a cualquier región del mundo. Por ello, desde la comunidad científica se han dedicado muchos esfuerzos al desarrollo de técnicas para el análisis y monitoreo de las sequías, sobre todo en materia de índices climáticos cuantitativos —indicadores indirectos basados en datos climáticos (Peña et al., 2016)—, existiendo dificultades en el establecimiento de un índice de sequía único y universal debido a la subjetividad en la definición del término de sequía (Beguería et al., s.f.) (tabla II.1). La mayoría de los estudios relacionados se han realizado utilizando el Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (PDSI), desarrollado por Palmer en 1965 y basado en una ecuación del balance hídrico del suelo, y el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), desarrollado por McKee et al. en 1993 y basado en un enfoque probabilístico de precipitación.

Tabla II.1. Definiciones del término de sequía (algunos ejemplos)

Referencia	Definición	Región
Kulik (1958)	Inicio de sequía o semisequía: período de más de 10 días con humedad en el suelo inferior a 20 mm Sequía: cuando la humedad en el suelo es inferior a 10 mm	URSS
Linseley et al. (1959)	Período mantenido con lluvias no significativas	
Ramdass (1960)	Situación en la que la precipitación estacional anual es deficiente en al menos 2 veces la desviación típica	India
Hudson y Hazen (1964)	Precipitación anual inferior a 180 mm Período de 6 días sin precipitación	Libia, Bali, Indonesia
Palmer (1965)	Intervalo de tiempo, generalmente con una duración del orden de meses o años, durante el cual el aporte de humedad en un determinado lugar cae consistentemente por debajo de lo climatológicamente esperado	
Russell (1970)	Falta prolongada de precipitación inferior a la media	
Dhar (1979)	Cantidad de precipitación inferior al 80% de la lluvia normal	India
Krishnan (1979)	Período de 10 días con lluvia total inferior a 5 mm	URSS
Agencia para el desarrollo del noreste del Brasil (SUDENE) (1981)	Precipitaciones mensuales durante el período lluvioso inferiores a 100 mm o inferiores al 80% de la media a lo largo de 90 días, durante los cuales se producen intervalos superiores a 10 días con valores inferiores a 10 mm	Noreste de Brasil
Organización para la alimentación y agricultura de la ONU (FAO) (1983)	Porcentaje de años en los que los cultivos se arruinan por déficit de humedad en el suelo	
Organización británica de precipitación (GOUDIE) (1985)	Período de al menos 15 días consecutivos con precipitación diaria inferior a 0,25 mm	Gran Bretaña
Organización Meteorológica Mundial (OMM) (1986)	Déficit de precipitación mantenido y duradero Secuencia atmosférica caracterizada por el desarrollo de precipitaciones inferiores al 60% de las normales durante más de dos años consecutivos	

Rind (1990)	Condición resultante de exceso de evapotranspiración mayor que la precipitación	
Convención contra la sequía y desertificación (UN) (1994)	Fenómeno natural caracterizado por niveles de lluvia significativamente inferiores a los normales, causante de desequilibrios hidrológicos que afectan a la producción	
Schneider (1996)	Período suficientemente extenso, de duración estacional a varios años, con déficit de lluvias regionales al estadístico estimado de series multianuales	
Gil et al. (2000) Marcos (2001) Olcina (2001)	Año seco: curso anual con precipitación total inferior al 60% de la media normal calculada con una serie de al menos 30 años Indigencia pluviométrica: mantenimiento de condiciones secas por más de un año Sequía: precipitación inferior entre 40 – 60% según zonas de estudio, respecto a la media normal durante más de dos años consecutivos	España
Redmond (2002)	Fenómeno natural que ocurre cuando la disponibilidad de agua está significativamente por debajo de los niveles normales por largos períodos de tiempo, y no puede satisfacer la demanda	
Heim (2002)	15 días consecutivos sin lluvia, o precipitación inferior al 85% de la normal, o precipitación anual menor al 75%, o precipitación mensual inferior al 65%	
Servicio Meteorológico Nacional de los EEUU	Período de 21 días o más con lluvia inferior en al menos un 30% respecto a la normal	EEUU
Baldwin	Intervalo de 3 meses o más con precipitación inferior al 50% de la media normal	

Fuente: elaboración propia a partir de la información consultada (Vicente et al., 2012b; Centro de Estudios Hidrográficos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013)

En este contexto, según Vicente et al. (2012b), las condiciones de sequía son mucho más difíciles de identificar que otros riesgos naturales porque: 1) la sequía es el resultado de una serie de factores que sólo son evidentes después de un largo período de déficit de precipitación y, en consecuencia es muy difícil determinar el inicio, la extensión y el final de las sequías, dificultando así su identificación en el tiempo (Wilhite, 1993); 2) es difícil de identificar en el espacio porque afecta a amplias áreas durante largos períodos de tiempo; 3) es difícil cuantificar objetivamente la severidad de las sequías, ya que se trata de una combinación de la duración, la magnitud y la extensión espacial (Dracup et al., 1980).

Aunque la escasez de precipitaciones es la principal variable meteorológica que determina la severidad de las sequías, la otra variable necesaria que añaden Vicente et al. (2017) es la demanda de agua por parte de la atmósfera, considerándolas como los dos factores asociados a la creciente severidad de las sequías como conductores de la degradación terrestre en regiones vulnerables, y argumentando que los índices de sequía climática son esenciales para medir y cuantificar la severidad de las sequías, evaluar sus impactos, determinar la magnitud e identificar posibles cambios en la frecuencia y duración de los riesgos de sequía, y para el desarrollo de sistemas de monitorización y vigilancia que permitan una mejor preparación y mitigación de los riesgos de sequía, facilitando la evaluación espacio-temporal de las variables climáticas y siendo de utilidad para estimar la degradación terrestre; una característica clave de estos índices es que deben permitir la comparación de la severidad de las sequías en diferentes lugares, independientemente de las características climáticas locales y estacionales (Vicente et al., 2012b). Como ejemplo, algunos de los trabajos desarrollados tratan sobre la morbilidad y mortalidad arbórea en diversas escalas espaciales, sobre

la identificación de la reducción del rendimiento de los cultivos y la pérdida de cosechas, los incendios forestales y el decrecimiento de la actividad vegetal. Como indican los mismos autores, algunos de los índices se basan únicamente en datos de precipitación, mientras que otros son más precisos, como el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI) desarrollado por Vicente et al. en 2010 y basado en un enfoque similar al SPI, aunque considerando la evapotranspiración.

Según Vicente et al. (2012b), uno de los principales objetivos de los índices de sequía es su uso para el monitoreo de las sequías, la alerta temprana y mejorar la preparación y mitigación de las sequías (Svoboda et al., 2002 y 2004). Pero los sistemas de monitoreo se basan en gran medida en los índices de sequía climática. Con la inclusión de los índices de sequía hidrológica se podría mejorar el rendimiento de estos sistemas, agregando información confiable, directa y comparable sobre la extensión espacial y la gravedad de las condiciones de sequía hidrológica. Así pues, dados los regímenes fluviales diferenciados entre cuencas, la magnitud y la estacionalidad de los caudales al cuantificarlos, ha sido conveniente desarrollar un indicador estandarizado de sequía hidrológica que permita comparaciones de la severidad de este tipo de sequías tanto espacialmente como temporalmente, incluso entre cuencas con diferentes características en términos de regímenes, variabilidad, magnitud y estacionalidad del flujo. Asimismo, podría ser implementado siguiendo el mismo enfoque teórico utilizado para el cálculo de los índices de sequía climática, comprobando el rendimiento de varias distribuciones de probabilidad y asumiendo que cada mes puede ser ajustado a las mismas, con un procedimiento preciso para obtener un índice de sequía hidrológica útil para realizar dichas comparaciones, independientemente de los regímenes y de las características de los caudales (Vicente et al., 2012b). Por ello se elaboró el Índice Estandarizado de Caudales (SSI), desarrollado por Vicente et al. en 2012 y basado en las anomalías de caudal.

En cuanto a los términos utilizados para determinar las sequías, a continuación se establecen algunas de las definiciones a considerar en este apartado: 1) **duración**: el tiempo, medido en número total de días, meses o años consecutivos, durante el cual la precipitación o el caudal totales registrados son inferiores a la media de ese mismo período (Marcos, 2001); 2) **extensión espacio-temporal**: superficie total concreta sobre la que se registra déficit hídrico durante un determinado tiempo transcurrido entre diversos períodos secos, proporcionando información sobre la regularidad o aleatoriedad del fenómeno y sobre la previsibilidad de la sequía (Marcos, 2001); 3) **frecuencia**: número de casos de sequía que se producen durante un período determinado, pudiéndose medir a partir de la probabilidad empírica de que la precipitación o el caudal sean inferiores a la media, o del período de retorno del evento seco a partir del intervalo medio de tiempo dentro del que puede esperarse que ocurra una sequía de determinada magnitud (Marcos, 2001); 4) **intensidad**: mínimo valor dado durante el período de duración del evento seco (Moreno, 2017); 5) **magnitud**: déficit medio de precipitación o de caudal durante el período de duración del evento seco, pudiéndose medir como la anomalía en porcentaje o como la diferencia en valor absoluto para el período seleccionado (Marcos, 2001); 6) **severidad**: déficit acumulado de precipitación o de caudal para la duración del período seco (Dracup et al., 1980, dentro de Marcos, 2001).

Para comparar el comportamiento entre varios índices de sequía, es necesario diferenciar entre sequías climáticas e hidrológicas, ya que los índices analizados han sido tres, dos de ellos relacionados con la sequía climática (SPI y SPEI) y el otro relacionado con la sequía hidrológica (SSI). A continuación se explican las diferencias entre estos dos tipos de sequía, aunque existen otras (agrícolas, socioeconómicas y urbanas), y entre los índices analizados.

- **Sequías climáticas o meteorológicas** (Beguiría et al., s.f.; Marcos, 2001; Moreno, 2017; Vicente et al., 2017):

Basadas en datos climáticos, es una expresión de la desviación de la precipitación respecto a la media durante un período de tiempo determinado.

Como se ha comentado en líneas anteriores, ante la dificultad de establecer su inicio y final, así como cuantificar objetivamente las características de los episodios o eventos de sequía en términos de duración, intensidad, magnitud y extensión espacio-temporal del déficit pluviométrico, siendo estas variables diferentes para cada área geográfica, algunas definiciones de sequía optan por no especificar umbrales fijos y, en la mayoría de los casos, éstas presentan información específica para cada región particular con variaciones según las características del clima regional. No existe por tanto una definición universal del concepto de sequía, siempre requiere de matices, ya que las sequías se relacionan con la falta o escasez temporal de agua en una región por comparación con las condiciones habituales, pero a partir de aquí los criterios que se pueden aplicar son muy diversos, principalmente diferenciando en función del espacio y del lugar afectado.

- **Sequías hidrológicas** (Marcos, 2001; Vicente et al., 2012b; Lorenzo et al., 2013a):

Refieren a una disminución de los recursos hídricos superficiales y/o subterráneos, comúnmente caudales, depósitos de reservas y acuíferos (Tallaksen y Van Lanen, 2004), que pueden tener impactos generalizados al reducirse o eliminarse los suministros de agua o deteriorarse la calidad del agua, como por ejemplo en la agricultura, en la generación de energía y en la perturbación de los hábitats ribereños, con afectaciones ambientales, económicas y sociales (Mishra y Singh, 2010).

Aunque el origen de las sequías hidrológicas, habitualmente viene dado por las sequías climáticas (Zaidman et al., 2001), la cuantificación de las primeras como fenómeno independiente también está recibiendo mucha atención por parte de la comunidad científica. Ésto es debido a que no suele haber una correspondencia directa ni espacial ni temporal entre la ocurrencia de las sequías climáticas y las hidrológicas (Vicente y López, 2005), ya que las segundas pueden demorarse meses después desde el inicio de la escasez pluviométrica o, si la precipitación retorna en poco tiempo, pueden no llegar a manifestarse. Además, aunque la falta de precipitación es la principal variable que habitualmente se suele relacionar con las sequías hidrológicas, la gestión de los recursos hídricos tanto en depósitos naturales como artificiales también es determinante: 1) López et al. (2009) evaluaron los efectos de una presa transfronteriza entre España y Portugal en la cuenca del Tajo, demostrando cambios severos en la sequía aguas abajo de la presa asociados con un aumento de la duración y la magnitud de los episodios de sequía, como consecuencia de la gestión de la presa y con implicaciones negativas en la disponibilidad de los recursos hídricos; 2) Lorenzo et al. (2010) demostraron que en la cabecera del Tajo, la presa con fines de riego y para la transferencia de agua alteró el régimen natural del río e hizo aumentar la duración y magnitud del caudal aguas abajo, con implicaciones negativas sobre la disponibilidad y la calidad del agua en el curso medio del río.

- **Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)** (AEMET, s.f.; Beguería et al., s.f.; Marcos, 2001; Vicente et al., 2012a; OMM, 2016; Peña et al., 2016; Vicente et al., 2019):

Índice estandarizado de sequía climática marcado por la OMM como punto de partida para la vigilancia de este tipo de sequías, que se basa en la acumulación de la anomalía de precipitación (período de tiempo desde la llegada de las entradas de agua hasta la disponibilidad de un recurso hídrico utilizable), diseñado con el objeto de investigar las diferentes maneras en que el déficit de precipitación afecta a los distintos sistemas hídricos (humedad del suelo, aguas superficiales y subterráneas, etc.), permitiendo el cálculo y comparación a diferentes escalas temporales de acumulación de la anomalía de precipitación (índice de sequía multiescalar basado en datos climáticos), y en base a ello poder evaluar el impacto del déficit de precipitación entre zonas con climas muy diferentes y sobre la disponibilidad de los distintos recursos hídricos (cambios, tendencias, duración, intensidad y magnitud de las sequías); por ello, para que los índices de sequía sean útiles para el monitoreo y la gestión de los diferentes recursos hídricos utilizables, deben asociarse con una escala de tiempo específica. Además, al poder ser calculado sobre un amplio rango de escalas temporales de acumulación, puede ser utilizado como indicador de sequías a corto, medio y

largo plazo, y para caracterizar sequías climáticas de larga duración conducentes a sequías hidrológicas, así como para la identificación de distintos tipos de sequía, ya que los diferentes sistemas naturales y sectores económicos pueden responder a las condiciones de sequía en escalas temporales muy diferentes (respuesta temporal a las sequías) (Vicente y López, 2005; Vicente, 2007; Pasho et al., 2011; Vicente et al., 2011).

Para el cálculo del SPI se parte de una serie histórica de precipitaciones mensuales correspondiente al período analizado, ajustada a la distribución teórica de probabilidad que se considere conveniente. A continuación, se transforma en una distribución normal, de manera que la media del SPI sea 0 (Edwards y McKee, 1997) y la desviación estándar 1; en sus inicios, McKee et al. (1993) utilizaron la distribución Gamma para transformar las series de precipitación a unidades estandarizadas. Se define como un valor numérico de -3 a +3 (entre -1 y +1 se considera un período como “normal” al indicar que se está en la parte central de la distribución), representando el número de desviaciones estándar de la precipitación caída a lo largo del período de acumulación del que se trate respecto a la media, una vez que la distribución original de la variable ha sido transformada en una distribución normal de los datos. Dado que el SPI está normalizado, las series son comparables en el espacio y tiempo y con las series de otros índices, así como que también permite la comparación entre los períodos húmedos y secos.

En cuanto al período o escala temporal de acumulación de la anomalía de precipitación, éste se define como el período de acumulación de la desviación estándar del valor de la variable climática respecto a su media: a modo de ejemplo, un valor de SPI para 3 meses de referencia (período de acumulación) de -2,3 desviaciones estándar (anomalía climática), indicaría que la cantidad de precipitación que se ha registrado a lo largo de ese período se ha situado en -2,3 desviaciones estándar respecto a su media, teniendo en cuenta que los valores positivos del SPI indican una precipitación superior a la media y los negativos inferior. La anomalía climática puede ser positiva o negativa y la respuesta de las cubiertas terrestres puede ser a corto o largo plazo (e.g., la condiciones de humedad de los suelos son sensibles a las anomalías de precipitación a corto plazo, mientras que los embalses, acuíferos y caudales responden a anomalías pluviométricas a largo plazo).

Edwards y McKee (1997) establecieron también el criterio para definir un período de sequía, considerándose como período seco cuando el SPI presenta una secuencia continua de valores negativos iguales o inferiores a -1, y que este evento no finaliza hasta que dicho índice vuelve a tomar un valor positivo; así pues, cada período seco puede caracterizarse de acuerdo a su duración, intensidad y magnitud, entendiendo por duración del evento de sequía como la longitud del período en el que los valores del SPI cumplen las condiciones requeridas por dicha definición, por intensidad como el máximo valor negativo dado en ese período seco, y por magnitud como la suma de los valores del SPI correspondientes a todos los meses comprendidos dentro del período seco analizado. Siguiendo esta delimitación, escogida para su aplicación en Colorado (EE.UU), cuando el SPI supera el umbral de -1 se habla de sequía moderada, si es inferior a -1,5 de sequía severa, y para valores iguales o inferiores a -2 de sequía extrema.

Beguiría et al. (s.f.) añaden la importancia de incluir datos de temperatura y de evapotranspiración en el análisis de las sequías climáticas, dado que los índices de sequía basados en la precipitación se basan en dos supuestos: 1) a diferencia de la temperatura y la evapotranspiración, la variabilidad de la precipitación es mucho mayor; 2) la tendencia temporal es inherente a la precipitación. Así pues, indican que, en ambos supuestos, la importancia de las otras dos variables es despreciable y que las sequías están controladas por la variabilidad temporal de la precipitación, añadiendo que diversos estudios empíricos han demostrado que el aumento de las temperaturas afecta notablemente a la severidad de las sequías inducida por el calentamiento terrestre y el consecuente cambio climático: 1) análisis de los impactos de la sequía en la producción primaria neta y la mortalidad de los árboles (Martínez et al., 2008; McGuire et al., 2010; Linares y Camarero, 2011; Williams et al., 2011); 2) la ola de calor centroeuropea del año 2003, en la que las tempe-

raturas extremadamente elevadas aumentaron drásticamente la evapotranspiración y exacerbaron el estrés por sequía estival (Rebetez et al., 2006); 3) patrones similares se observaron en el verano del año 2010, en el que una fuerte ola de calor hizo aumentar el estrés por sequía en los bosques y produjo grandes incendios forestales en Europa oriental y Rusia (Barriopedro et al., 2011); 4) temperaturas más elevadas conjuntamente con la escasez de precipitaciones hicieron aumentar el estrés hídrico y la mortalidad de los bosques (Adams et al., 2009); 5) los procesos del calentamiento global también son probablemente el factor desencadenante de la disminución en las producciones agrícolas mundiales observadas en los últimos años (Lobell et al., 2011), reforzando el estrés por sequía y los impactos ecológicos relacionados a nivel mundial, ya que se ha registrado un aumento general de las temperaturas entre 0,5 y 2°C durante los últimos 150 años y los modelos de cambio climático predicen un aumento marcado durante el s. XXI, esperándose consecuencias negativas para las condiciones de sequía, con un aumento en la demanda de agua por parte de la atmósfera debido a la evapotranspiración. Por tanto, los mismos autores indican que es preferible el uso de índices de sequía que incluyan datos de temperatura en su formulación, preferiblemente de carácter multiescalar al igual que el SPI para poder evaluar las sequías en relación con los diferentes sistemas hidrológicos, y para diferenciar entre sequías a corto, medio y largo plazo. Para ello, se desarrolló el otro índice de sequía climática analizado en el presente trabajo, el SPEI, que combina la sensibilidad del índice PDSI a los cambios de la evapotranspiración con la simplicidad del cálculo y la naturaleza multitemporal del SPI, siendo preferible la utilización del SPEI para la identificación, análisis y monitoreo de las condiciones de sequía en cualquier región climática del mundo, dada la mejor capacidad al incluir la evapotranspiración para detectar los cambios en la demanda de agua por parte de la atmósfera, y en particular en áreas como la península Ibérica (Peña et al., 2016); estudios recientes han encontrado tendencias significativas en el aumento de las temperaturas y de la evapotranspiración que afectan a las condiciones de sequía en la península Ibérica, provocando una aceleración en la severidad de las mismas (Vicente et al., 2014), habitualmente asociadas a una disminución en los flujos de agua y almacenamiento de los acuíferos (Lorenzo et al., 2010 y 2013).

- **Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI)** (Beguería et al., s.f.; Vicente et al., 2012a):

Índice estandarizado de sequía climática que se basa en la acumulación de la anomalía del balance hídrico climático (BHC) —diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración—.

Al igual que los índices PDSI y SPI, el SPEI puede medir la severidad de las sequías según su duración, intensidad y magnitud. Las similitudes con el SPI es que también permite la comparación espacio-temporal de las sequías, con él mismo y con otros índices, que puede calcularse en una amplia gama de climas y períodos de acumulación (índice de sequía multiescalar basado en datos climáticos), y que permite la identificación del inicio y final de los episodios de sequía.

El SPEI se basa en el procedimiento de cálculo del índice SPI original, aunque añadiendo una serie histórica de evapotranspiración de carácter mensual; debido a los impactos de las sequías en el contexto del calentamiento global, se destaca la necesidad de la utilización del índice SPEI en lugar del SPI, ya que también considera la evapotranspiración, variable relacionada con las temperaturas. Además, según los resultados obtenidos en diferentes estudios basados en la comparación objetiva de diferentes índices de sequía, *“parece razonable recomendar el uso del SPEI para la monitorización de las condiciones de sequía a escala global”* (Vicente et al., 2012a) y *“para detectar, monitorear y explorar las consecuencias del calentamiento global en condiciones de sequía”* (Vicente et al., 2010). Asimismo, la interpretación es la misma que la del índice SPI.

Según diversos autores, se trata de uno de los índices de sequía climática más utilizados: 1) análisis del aumento de las temperaturas sobre los impactos del calentamiento global referente a la disponibilidad de

agua y a los sistemas agrícolas, ecológicos e hidrológicos (Solomon et al., 2007); 2) análisis de sequías ambientales (Vicente et al., 2012; Bachmair et al., 2018); 3) análisis de sequías socioeconómicas (Bachmair et al., 2015; Sagge et al., 2015); 4) análisis de sequías agrícolas (Peña et al., 2018).

- **Índice Estandarizado de Caudales (SSI)** (Vicente et al., 2012ab; Lorenzo et al., 2013a):

Índice estandarizado de sequía hidrológica que facilita la comparación entre regímenes y cuencas, independientemente de los regímenes de los ríos y de las magnitudes de caudal, además de una comparación espacial y temporal de las condiciones hidrológicas, basándose en la anomalía de caudal.

De igual modo que los dos índices anteriores, para el cálculo del SSI también se parte de una serie histórica de caudales mensuales correspondiente al período analizado, ajustada a la distribución teórica de probabilidad que se considere conveniente. Después se transforma en una distribución normal, de manera que la media del SSI sea 0 y la desviación estándar 1, y también se define como un valor numérico de -3 a +3. Asimismo, dado que los tres índices están normalizados, aparte de poderse comparar las series de cada uno de los índices, también es posible la comparación entre ellos, ayudando así al estudio de las complejas interacciones entre los fenómenos.

Los mismos autores establecieron también los criterios para definir un evento de sequía hidrológica, considerando el período cuando la variable hidrológica está por debajo de un cierto nivel predeterminado, la duración como el tiempo en el que el caudal está por debajo de ese nivel predeterminado, la severidad como la desviación acumulada por debajo del nivel predeterminado durante el período, y la magnitud como el déficit acumulado del índice SSI, teniendo en cuenta el nivel predeterminado y la suma de los valores correspondientes a un cierto número de meses.

Además de comparar el comportamiento entre los tres índices de sequía, también se compara cada uno de ellos con el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), y finalmente conjuntamente con las cubiertas del suelo propuestas en las cartografías de *Corine Land Cover* (CLC) de los años 1990, 2000, 2006 y 2012. A continuación se explica en qué consiste el NDVI y algunas de las características correlacionales que presenta con las sequías según distintos autores.

- **Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)** (Centro de Estudios Hidrográficos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013; Pérez, 2019; Vicente et al., 2019):

La teledetección (*remote sensing*) permite cuantificar las condiciones de la vegetación, ya que tanto la salud como la biomasa responden de manera diferente a la radiación electromagnética recibida en las bandas del visible y del infrarrojo cercano (NIR). Con la información espectral registrada por los sensores a bordo de plataformas satelitales, es posible calcular índices de vegetación y, en consecuencia, evaluar la actividad de la vegetación (Knipling, 1970; Tucker, 1979).

El índice NDVI, desarrollado por Rouse et al. en 1974, se calcula como el cociente de la diferencia normalizada y suma de reflectividades de las bandas del NIR y rojo visible, proporcionando información sobre el contenido de clorofila de la vegetación (rojo visible), sobre el vigor vegetal (NIR) y por lo tanto sobre el estado de la vegetación, cuyo rango varía entre -1 y +1 (de menor a mayor vigor vegetal). También puede calcularse según los niveles digitales de una imagen de teledetección, multiplicando por 0,801 la banda del rojo visible en el caso de imágenes obtenidas a través del satélite LANDSAT, o por 0,633 en el caso del satélite SPOT (Guyot y Gu, 1994); de este modo, se propone una corrección que hace equivalente el cálculo del NDVI con niveles digitales o reflectividades, penalizando al canal rojo visible por el efecto de la dispersión atmosférica, más perceptible en esta banda del espectro electromagnético que no en la del NIR (figura II.2).

Figura II.2. Ecuaciones para el cálculo del índice de vegetación NDVI

$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - R_{\text{vis}}}{\text{NIR} + R_{\text{vis}}}$	$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - 0,801 \cdot R_{\text{vis}}}{\text{NIR} + 0,801 \cdot R_{\text{vis}}}$	$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - 0,633 \cdot R_{\text{vis}}}{\text{NIR} + 0,633 \cdot R_{\text{vis}}}$
Cálculo del NDVI con reflectividades	Cálculo del NDVI con niveles digitales (LANDSAT)	Cálculo del NDVI con niveles digitales (SPOT)

Fuente: elaboración propia a partir de la información consultada

En condiciones de sequía y en ambientes áridos y semiáridos, el agua se convierte en un factor limitante del crecimiento y del estado de la vegetación, presentando correlaciones positivas con el contenido en clorofila y con el NDVI; así pues, el NDVI también presentará correlaciones positivas con el contenido en humedad del suelo, con la precipitación y con los indicadores de sequía (Peters et al., 2002). Sin embargo, se destacan algunas carencias: 1) como que el NDVI responde al contenido de clorofila de la vegetación (rojo visible), al vigor vegetal (NIR) y al estado de la vegetación, y no estrictamente al estrés hídrico que pueda presentar la planta, Kogan (2001) destaca la necesidad de combinar el uso del NDVI con otros índices basados en la reflectividad del infrarrojo térmico (IRT) para poder distinguir las situaciones de falta de agua de otras situaciones climáticas; 2) como que la señal del NDVI se retrasa respecto al momento en el que llueve (retraso existente entre la falta de lluvia y la respuesta de la vegetación), el índice parece mostrar mejor relación con el contenido en humedad acumulado en el suelo que no con la precipitación caída directamente, demostrándose también que es escasamente sensible a las lluvias elevadas y a las posteriores a la etapa de crecimiento de la vegetación debido al umbral de consumo de agua por parte de la planta, dependiendo el NDVI de factores fisiológicos, edáficos, hidrológicos y climáticos (Bayarjargal et al., 2006; Vicente et al., 2006; Rahimzadeh et al., 2012). Aún así, se ha demostrado que, aunque no es un indicador directo de la precipitación o de la humedad del suelo y las relaciones dependen de la región analizada, de las condiciones climáticas, de la estacionalidad y de la fase de crecimiento de la planta, el NDVI presenta buenas correlaciones con estas dos variables.

Dado el comportamiento estacional del NDVI y las carencias que presenta este índice en relación a las correlaciones con la precipitación, el contenido en humedad del suelo y con los indicadores de sequía, se plantean las siguientes propuestas, entre otras: 1) la utilización de la Anomalía del NDVI (NDVIA) en lugar del NDVI, ya que al calcularse las anomalías del NDVI respecto a la media mensual, el NDVIA puede utilizarse como indicador de sequía (González et al., 2001; Bayarjargal et al., 2006; Lin et al., 2010); 2) la utilización del Índice de Estrés Hídrico (MSI) en lugar del NDVI, el cual tiene en cuenta la banda del SWIR del infrarrojo medio (IRM) en la que se observa mejor la variación del contenido de agua de las hojas y por lo tanto el estrés hídrico que pueda presentar la vegetación, aunque cabe indicar que los autores Hunt y Rock (1986) destacan la insuficiencia del MSI para identificar situaciones de estrés hídrico y de sequía en las plantas bajo condiciones de superficie cubierta de vegetación, y Cohen (2001) señala que esta insuficiencia también depende del tipo de vegetación (figura II.3); 3) la utilización del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) en lugar del NDVI, ya que este índice permite la identificación de condiciones severas de estrés hídrico en las plantas (Rahimzadeh et al., 2012), detectando estados de vegetación como la desecación y la marchitez y por lo tanto considerándose un indicador de sequía más sensible y de respuesta más rápida que el NDVI, aunque Rhee et al. (2010) concluyen que no produce resultados significativamente mejores que el NDVI en regiones áridas (figura II.3); 4) la utilización del Índice de Sequía de Diferencia Normalizada (NDDI) en lugar del NDVI, el cual corrige el retraso existente que presenta el NDVI respecto al momento en el que llueve debido a que incorpora el NDVI y el NDWI, y aunque es sensible a la estacionalidad, el NDDI presenta buenas correlaciones con la precipitación y la humedad del suelo, pero es importante destacar

que la combinación de dos índices para su cálculo puede resultar en una cierta acumulación de errores (figura II.3).

Figura II.3. Ecuaciones para el cálculo de los índices de vegetación MSI, NDWI y NDDI

$MSI = \frac{SWIR}{NIR}$	$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$	$NDDI = \frac{NDVI - NDWI}{NDVI + NDWI}$
--------------------------	--	--

Fuente: elaboración propia a partir de la información consultada

Seguidamente se exponen brevemente las características absortivas y reflectivas de la vegetación según las bandas del espectro electromagnético anteriormente mencionadas para el cálculo de los índices de vegetación (Juan Ramón de la Riva, comunicación académica, octubre de 2017):

- **Rojo visible (0,6 – 0,7 µm):** absorción de la radiación electromagnética por los pigmentos foliares clorofila (pigmento verde), xantofila, antocianinas y carotenos (pigmentos rojos y amarillos) para la actividad fotosintética de la planta. La clorofila mayoritariamente absorbe en el azul y rojo visibles (mayor absorción y menor reflectividad), pero si el vegetal se marchita, éste pierde la actividad fotosintética asociada a la clorofila y actuarán más los otros pigmentos foliares (menor absorción y mayor reflectividad).

- **NIR (0,7 – 0,9 µm):** absorción por la estructura celular para el vigor vegetal. Es en las cavidades situadas en el mesófilo esponjoso por donde se dispersa la radiación electromagnética en el NIR, aumentando la reflectividad en estas longitudes de onda cuanto menos degradada esté la estructura celular de la planta (menor absorción y mayor reflectividad).

- **SWIR (1,3 – 2,5 µm):** absorción por el contenido en agua para detectar el estrés hídrico de la vegetación, ya que esta banda proporciona información sobre el contenido en humedad de las cubiertas, disminuyendo la reflectividad en estas longitudes de onda cuanto mayor contenido en humedad contenga la planta (mayor absorción y menor reflectividad).

Finalmente, aparte de las referencias anteriormente mencionadas, a continuación se citan otros de los estudios realizados por la comunidad científica que también han servido como base para desarrollar el presente análisis y enmarcarlo teórico-conceptualmente:

- **Estudio de Vicente et al. (2010):** comparación a nivel mundial de los índices de sequía climática SPI, SPEI y el Índice Autocalibrado de Palmer (sc-PDSI) para un conjunto de observatorios con diferentes características climáticas (1910 – 2007). El SPI se calculó de acuerdo con la distribución de Pearson tipo III y el método de L-momentos (Vicente, 2006), y el SPEI se obtuvo a partir de la distribución Log-logística; la escala temporal de acumulación de la anomalía climática utilizada fue de 1 a 24 meses de referencia. Los resultados demostraron que: 1) se detectaron pocas diferencias entre el SPI y el SPEI debido a que ambos índices responden principalmente a la variabilidad de la precipitación, y la correlación entre ellos fue elevada independientemente de la escala temporal de acumulación de la anomalía climática analizada; 2) el SPI y el sc-PDSI mostraron correlaciones altas, y en condiciones climáticas con baja variabilidad temporal de las temperaturas el SPI fue superior al sc-PDSI por su carácter multiescalar; 3) las correlaciones más elevadas se encontraron con el índice SPEI (mayor respuesta a las sequías); 4) las correlaciones se redujeron drásticamente bajo el aumento progresivo de las temperaturas previsto por los modelos actuales del calentamiento global y el cambio climático, destacando los resultados del SPEI como consecuencia de la acumulación de los déficits de evapotranspiración; 5) en zonas frías, la relación entre el SPI y el SPEI bajo este aumento de las temperaturas no supuso cambios contrastados, ya que la evapotranspiración se mantuvo

relativamente baja; 6) en condiciones de calentamiento global, el SPEI y el sc-PDSI identificaron un aumento de la severidad de las sequías asociado al aumento de las temperaturas y por lo tanto a la evapotranspiración, pero el SPEI frente al sc-PDSI, tiene la ventaja de ser un índice multiescalar, una de las características más importantes para el análisis y el monitoreo de las sequías, para evaluarlas en relación a los diferentes sistemas hidrológicos y para diferenciar entre tipos de sequía, así pues, con una evolución similar entre el SPEI y el sc-PDSI, los principales episodios de sequía se identificaron mejor con el SPEI. Asimismo, los autores indican que si la tendencia de la precipitación no cambia, el aumento de la temperatura-evapotranspiración jugará un papel importante en la determinación y el aumento de la severidad de las sequías futuras como consecuencia del calentamiento global (Hu y Willson, 2000; Beniston et al., 2007; Sheffield y Wood, 2008), y que los índices que consideran la evapotranspiración para monitorear las sequías ofrecen mejores resultados que los únicamente basados en la precipitación (Narasimhan y Srinivasan, 2005), aunque allí donde las tendencias temporales de las temperaturas no son aparentes se encuentran pocas diferencias entre los valores obtenidos utilizando uno u otro índice.

- **Estudio de Vicente et al. (2012a):** evaluación a nivel mundial de la capacidad de distintos índices de sequía climática (4 versiones del PDSI, SPI y SPEI), mediante su comparación para la detección y cuantificación de los impactos en caudales, humedad del suelo, crecimiento de los bosques y rendimientos de los cultivos. Indican que existen análisis recientes que llevan a cabo una revisión de los indicadores de sequía (Heim, 2002; Mishra y Singh, 2010), pero que hay muy pocos estudios que realicen comparaciones estadísticas y establezcan recomendaciones sobre la base de criterios objetivos entre los distintos índices (Guttman, 1998; Quiring, 2009; Vicente et al., 2010; Anderson et al., 2011), así como que hayan comparado sus capacidades para identificar los impactos de sequía en los diferentes sistemas (Quiring y Ganesh, 2010; Zhai et al., 2010). Para este estudio, el SPI se calculó utilizando la distribución de Pearson tipo III, ya que muestra una mejor capacidad de adaptación a las series de precipitación computadas a diferentes escalas temporales (Guttman, 1999; Vicente, 2006; Quiring, 2009), considerando una escala temporal de acumulación de la anomalía de precipitación de 1 a 48 meses; del mismo modo para el cálculo del SPEI. Para obtener los índices de sequía climática se utilizaron datos de precipitación y de temperatura media mensual (1901 – 2009), y para determinar la capacidad de los diferentes índices de sequía en la identificación de impactos se utilizaron datos globales de 4 variables —datos mensuales de caudal (1945 – 2004) con los que se calculó el índice SSI, datos globales de humedad del suelo entre abril y octubre, series dendrocronológicas (1945 – 2009) y datos sobre el rendimiento de los cultivos de trigo (1960 – 2009)—. Mediante el coeficiente de correlación de Pearson se analizó la correlación entre los índices SPI, SPEI y SSI, la humedad del suelo, las series dendrocronológicas y la producción de trigo, para conocer los tiempos de respuesta de los diferentes sistemas a las sequías, y de este modo desarrollar el análisis en base a las escalas temporales de acumulación de la anomalía climática que registraron una correlación de mayor magnitud (mayor respuesta a las sequías). Los resultados demostraron que: 1) los índices SPI y SPEI, al poderse calcular a diferentes escalas temporales de acumulación de la anomalía climática, aportaron mejores resultados que los PDSI para explicar los impactos de sequía (las correlaciones tendieron a ser mayores entre los índices SPI y SPEI que para los diferentes índices de Palmer); 2) el análisis estacional de las correlaciones permitió observar como las correlaciones resultaron mucho más elevadas en verano, comprobando que el SPEI suele presentar correlaciones más elevadas debido a que la evapotranspiración es mayor durante esos meses; 3) existieron grandes diferencias entre cuencas, representando mayores correlaciones con el SPEI en un 44,40%, con el SPI en un 38,40% y con los 4 índices de Palmer en un 17,30%; 4) asimismo, se observó una mayor respuesta con el SPEI en el caso de la humedad del suelo, el crecimiento de los bosques y el rendimiento de los cultivos de trigo (estos sistemas presentaron correlaciones más elevadas con el SPEI que no con los otros índices de sequía climática); 5) por tanto, el SPEI mostró una mejor capacidad para identificar los impactos de sequía.

- **Estudio de Lorenzo et al. (2013a):** análisis de la variabilidad espacio-temporal de las sequías de los cauces fluviales en la península Ibérica mediante el índice de sequía hidrológica SSI a escala mensual (1945 – 2005), e identificación y caracterización de los eventos de sequía en base a su duración, magnitud y área afectada. A partir de las estaciones de aforo se estimaron las áreas de drenaje y los valores del SSI se obtuvieron a partir de los datos de caudal, fijándose el nivel umbral para definir el evento de sequía hidrológica en $SSI = -0,84$ ($SSI > -0,84$ = sin sequía; $-1,65 < SSI < -0,84$ = sequía; $SSI < -1,65$ = sequía severa). En el análisis se realizaron correlaciones entre distintas variables, que se reflejan en el comportamiento de los caudales de los ríos, y el SSI: 1) con la variabilidad de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), que ha demostrado ser el factor dominante que influye en los flujos de caudal en la Europa occidental y en la península Ibérica (Lorenzo et al., 2011), debido a que es la principal fuente de las masas de aire húmedo responsables de la precipitación en esta región; 2) con la Oscilación del Mediterráneo Occidental (WeMO), que determina la precipitación en zonas adyacentes al Golfo de Vizcaya (Martín y López, 2006); 3) con el índice SPI, ya que las sequías de caudal están relacionadas con la variabilidad climática, para evaluar el tiempo que transcurre desde que se da la sequía climática hasta que se desencadena la sequía hidrológica, considerando una escala temporal de acumulación de la anomalía de precipitación de 1 a 25 meses; 4) con la transferencia de agua Tajo – Segura en unidades SSI en la cuenca del Segura para estimar su dependencia de agua transferida. Los resultados demostraron que: 1) existe una elevada variabilidad sobre el comportamiento de los cauces fluviales y sobre los impactos de sequía inducidos como consecuencia de las variaciones de precipitación mensual, de la orografía compleja, de la regulación de las aguas (sequías más largas y severas se detectaron en cuencas con un alto grado de regulación, y además la regulación plurianual puede causar retrasos temporales desde la falta de precipitación hasta la ocurrencia del déficit hídrico (Lorenzo et al., 2010)), de la exposición en menor o mayor medida a la NAO (López et al., 2007; Lorenzo et al., 2011), de la descarga directa de agua de los sistemas montañosos a las cabeceras o por el contrario actuando estas formaciones como desvío del régimen hídrico, de las altitudes (determinan los regímenes de nieve y de precipitación (Morán et al., 2011), retrasando la respuesta del SSI a las condiciones climáticas), de las pendientes y de la litología; 2) la duración, magnitud y cobertura espacial de las sequías dependen principalmente de las condiciones climáticas y de las estrategias de almacenamiento de agua en cada cuenca, alterando los regímenes fluviales; 3) aunque existe una elevada variabilidad en la frecuencia temporal, duración, intensidad y magnitud de los episodios de sequía entre períodos secos y húmedos según la región peninsular en la que se localice la cuenca, se detectó una tendencia incremental de las sequías en la mayoría de las regiones; 4) en cuencas no reguladas se observó un aumento de la duración y la magnitud de las sequías, ya que la ausencia de depósitos para suavizar los impactos en los caudales naturalizados hace incrementar la vulnerabilidad de estas cuencas a los eventos de sequía; 5) la precipitación después de las sequías, generalmente fue incapaz de generar los excedentes necesarios para restaurar las condiciones hidrológicas previas, tal vez debido al aumento del consumo de agua para el riego y el turismo (Lorenzo et al., 2010); 6) se obtuvieron coeficientes de correlación elevados entre las distintas variables y el índice SSI o, en su defecto, correlaciones significativas.

- **Estudio de Lorenzo et al. (2013b):** 1) evaluación de los impactos de las sequías climáticas en 187 cuencas fluviales de la península Ibérica mediante la correlación de Pearson entre los índices SPI y SSI (1945 – 2005 de carácter mensual), a una escala temporal de acumulación de la anomalía de precipitación de 1 a 48 meses de referencia, considerando también los efectos de la construcción de presas y la utilización de reservorios en los cambios en la respuesta de las sequías hidrológicas; 2) evaluación del tiempo de respuesta de las sequías de caudal al índice SPI para determinar la mejor escala temporal y monitorear las sequías hidrológicas. Los resultados demostraron que: 1) en el sector norte peninsular existe una mayor respuesta de las sequías de caudal a escalas temporales del SPI cortas, destacando las de entre 1 y 4 meses, en las que se obtuvieron las mayores correlaciones; 2) en las cuencas centrales y meridionales de la península

Ibérica existe una mayor respuesta de las sequías de caudal a escalas temporales del SPI más largas; 3) todas las correlaciones fueron positivas; 4) en el caso de cuencas reguladas se encontró que la respuesta a las sequías climáticas de una cuenca depende de las estrategias de gestión del agua, alterando significativamente la respuesta hidrológica natural a las sequías climáticas, retrasando los impactos del déficit de precipitación a largo plazo especialmente aguas abajo de los embalses; 5) en el caso de cuencas no reguladas se encontró que la respuesta a las sequías climáticas de una cuenca depende de la litología de esa cuenca, destacando que las rocas solubles en agua, las formaciones de drenaje libre o los materiales permeables facilitan las recargas de los acuíferos, pero que la respuesta de las sequías hidrológicas a las climáticas en esas cuencas se produce a escalas temporales más largas como consecuencia del déficit hídrico más continuado dado en superficie; 6) los grandes reservorios, artificiales o naturales, alteran significativamente la respuesta hidrológica natural a las sequías climáticas, mitigando los impactos de sequía en los cauces fluviales a escalas temporales cortas pero agravándolos a escalas temporales más largas, ya que cuando los episodios de sequía persisten, la capacidad de los depósitos para moderar sus impactos negativos disminuye.

- **Estudio de Peña et al. (2016):** análisis y evolución temporal de los episodios de sequía en Andalucía durante el período 1901 – 2012, mediante la comparación del comportamiento de los índices de sequía climática SPI, SPEI y el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (IESP). El SPI se calculó utilizando la distribución Gamma, considerando una escala temporal de acumulación de la anomalía de precipitación de 1 a 12 meses; los valores del SPEI se obtuvieron a través del *Global SPEI Database* del Instituto Pirenaico de Ecología (IPE) y de la Estación Experimental de Aula Dei del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) (Vicente et al., 2017). Mediante el coeficiente de correlación de Pearson se analizó la correlación entre los distintos pares de índices para analizar la similitud entre ellos, y se comparó el comportamiento de los mismos en cada uno de los distintos puntos de la rejilla climática. La máxima correlación obtenida fue para los índices SPI – SPEI, mientras que los coeficientes de correlación fueron más bajos para los índices SPEI – IESP y SPI – IESP, respectivamente. *“Los resultados demostraron que no todos los índices responden de la misma manera en la identificación de la intensidad y duración de los períodos de sequía”*.

- **Estudio de Vicente et al. (2017):** cálculo de 7 índices de sequía climática utilizando datos de precipitación y evapotranspiración, destacando los índices SPI y SPEI. El SPI se calculó siguiendo las recomendaciones de la OMM, utilizando la distribución Gamma; el SPEI se calculó utilizando la distribución Log-logística y el método de Momentos Ponderados de Probabilidad (PWMs).

- **Estudio de González et al. (2018):** identificación de los principales eventos de sequía en España mediante la comparación de los índices de sequía climática SPI y SPEI (1961 – 2014), y análisis de la propagación espacial de las condiciones de sequía a partir de un conjunto de datos espaciales de alta resolución (1,1 km). Las escalas temporales de acumulación de la anomalía climática utilizadas para el análisis fueron 12, 24 y 36 meses. Los resultados demostraron que: 1) durante la primera mitad del período, el SPI fue determinante para la identificación de áreas de sequía, pero a partir de 1990 lo fue el SPEI, lo que sugiere un aumento de la evapotranspiración a partir de este año como consecuencia del calentamiento global como factor desencadenante de las sequías (estudios recientes detectaron un aumento general de las temperaturas entre 1951 y 2010, particularmente entre 1970 y 1990 (González et al., 2015 y 2017), y un aumento de la evapotranspiración en 125 mm desde 1960 (Vicente et al., 2014)); 2) las escalas temporales variaron indistintamente según los eventos de sequía y patrón y propagación espacio-temporal.

- **Estudio de Vicente et al. (2019):** análisis de un conjunto de datos espaciales de alta resolución (1,1 km) del NDVI, para toda España de 1981 a 2015, combinado con el índice de sequía climática SPEI para evaluar la sensibilidad de la vegetación, y con la cartografía del CLC 2000 para determinar cómo las cubiertas del suelo pueden afectar en la respuesta del NDVI a la severidad de las sequías. Se determinaron posibles

diferencias en la respuesta de la actividad de la vegetación a la sequía en función de los diferentes tipos de cobertura del suelo y condiciones climáticas, y se exploraron las escalas temporales de sequía del SPEI de 1 a 48 meses en la que la actividad de la vegetación del NDVI mostró la respuesta más elevada a la severidad de la sequía en diferentes momentos del año. Mediante el coeficiente de correlación de Pearson se analizó la correlación entre los índices NDVI – SPEI para evaluar la relación existente entre la variabilidad semestral interanual, fijándose un p-valor inferior a 0,05 para que hubiese correlación significativa entre los datos a la escala temporal de acumulación de la anomalía del BHC que mayor correlación presentó con el NDVI. Se detectó una componente estacional, espacial y temporal entre las correlaciones, mostrando los resultados que: 1) el área total presentó correlaciones significativas y no significativas, siendo las significativas positivas las predominantes en todo el territorio sobre todo durante la estación cálida (mayor respuesta a las sequías); 2) además, se encontraron considerables diferencias espaciales, así como en lo referente a la utilización de las escalas temporales en las que se obtuvieron las correlaciones máximas, no pudiendo determinar la utilización de una única escala temporal para el análisis de las sequías; 3) en cuanto a las coberturas del suelo, la magnitudes de correlación variaron considerablemente en función del tipo, del período del año en el que se registraron las correlaciones más elevadas y de las condiciones de aridez, presentando los tipos de vegetación ubicados en regiones áridas mayor respuesta a las sequías y observando grandes diferencias entre los tipos de vegetación para las escalas temporales en las que se obtuvieron las correlaciones máximas.

- **Otras referencias bibliográficas consultadas a destacar, en la línea de las citadas anteriormente:** Martínez et al. (2013); Haslinger et al. (2014); Van Loon et al. (2014); Van Loon (2015); Barker et al. (2016); Gouveia et al. (2016); Kumar et al. (2016).

III. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS Y TÉCNICAS DE TRABAJO UTILIZADAS: EXPLOTACIÓN DE LOS DATOS Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

La síntesis bibliográfica y el análisis cuantitativo son las técnicas principales que dan forma a este trabajo, aunque es necesario tener en cuenta que hay un conjunto de técnicas aplicadas de manera simultánea al análisis cuantitativo: la representación cartográfica, gráfica y en forma tablas, que explica la información elaborada a través de la explotación de los datos y su tratamiento con diferentes herramientas adecuadas para ello (e.g. ArcGIS, RStudio).

En cuanto a la síntesis bibliográfica, se ha realizado una búsqueda y consulta de material web sobre los conceptos clave que se hacen referencia en este trabajo. En relación a este punto, también se han recopilado los materiales cartográficos necesarios para desarrollar el análisis.

Respecto al análisis cuantitativo, a continuación se detallarán las fases metodológicas y en los próximos apartados se analizarán los datos para la obtención de resultados. Cabe indicar que el presente trabajo se ha realizado en base a la información disponible según datos proporcionados por el IPE.

Los datos necesarios para la realización del proyecto se han obtenido en formato shape (shp) —en el caso de ser una capa de datos vectorial—, en formato ráster (grid) —en el caso de ser una capa de datos ráster—, y en formato excel (xls) o valores separados por comas (csv) —en el caso de tratarse de una base de datos—. Para el tratamiento de la información geográfica con software ArcGIS, los datos han sido almacenados en formato geodatabase (gdb), así como los geoprosesos derivados para la obtención de resultados.

Las fuentes de las cuales se han obtenido los datos para el tratamiento de información geográfica han sido varias; se especificará en cada caso la procedencia de los datos, aunque a continuación se detallan las fuentes utilizadas:

- Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) del Instituto Geográfico Nacional (IGN) – Ministerio de Fomento – Gobierno de España.
- Esri Servicios Online.
- Instituto Pirenaico de Ecología en Zaragoza (IPE) – Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) – Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades – Gobierno de España.
- Servicio de descargas del Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO) – Gobierno de España.
- Servicio de descargas del Sistema Integrado de Información del Agua (SIA) – Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – Gobierno de España.

El sistema de coordenadas proyectadas utilizadas para todo el proyecto ha sido ETRS 1989 UTM Zone 30N (EPSG 25830). Con la herramienta 'Project' de ArcMAP se han reproyectado aquellas capas vectoriales que no estaban en el sistema de referencia indicado, y con la herramienta 'Project Raster' se han reproyectado las capas ráster.

Metodología objetivo 1a

1. Seleccionar las subcuencas de cabecera de la España peninsular y los datos necesarios para calcular los índices de sequía climática SPI y SPEI. Tratamiento de la información geográfica con software ArcGIS 10.5 y excel o valores separados por comas

Límites administrativos de España descargados de Esri: capa de las provincias y de las comunidades autónomas en formato shape; sistema de referencia espacial ETRS 1989 UTM Zone 30N (EPSG 25830). Al ser el espacio geográfico analizado la España peninsular, se han descartado las Islas Baleares, las Islas Canarias, Ceuta y Melilla.

Demarcaciones hidrográficas terrestres de España descargadas del MITECO: capa de las demarcaciones hidrográficas en formato shape; sistema de referencia espacial GCS ETRS 1989 (EPSG 4258). Del mismo modo que en la capa de los límites administrativos, se han eliminado aquellas demarcaciones hidrográficas que se encontraban fuera de los límites de la España peninsular.

Red fluvial de la España peninsular descargada del SIA: capa de la red fluvial en formato shape; sistema de referencia espacial GCS ETRS 1989 (EPSG 4258).

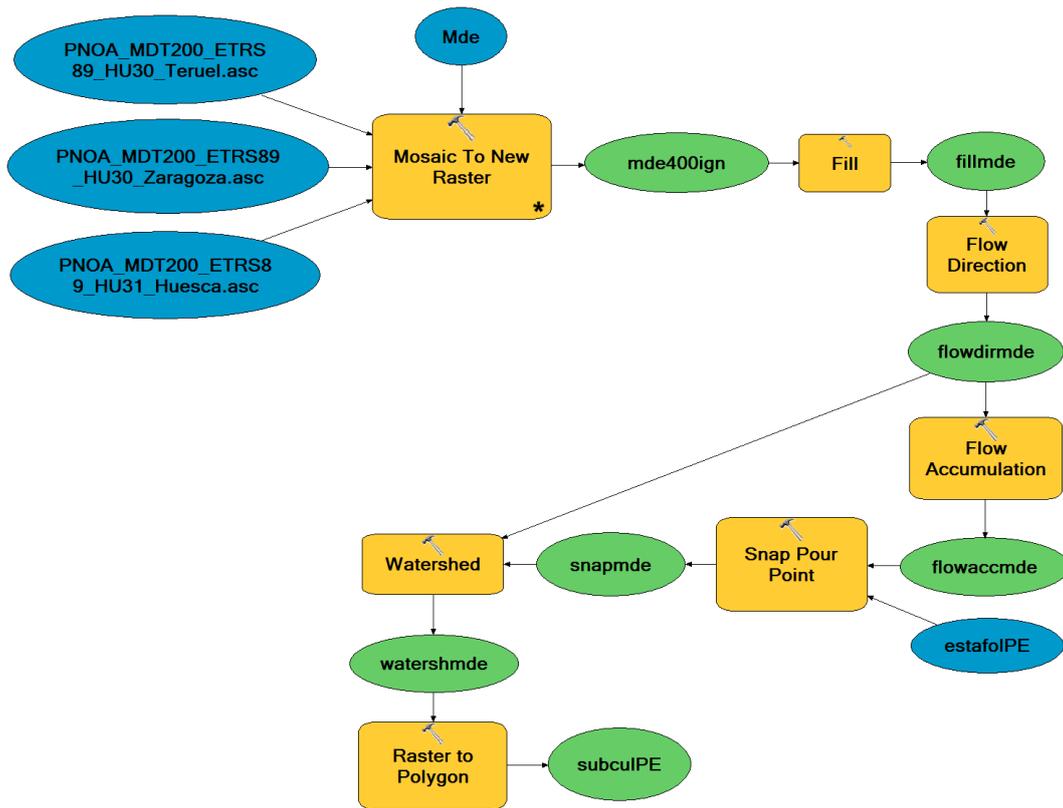
Coordenadas y caudales de las estaciones de aforo de la España peninsular proporcionadas por el IPE (1962 – 2013 a escala mensual): fichero de las estaciones de aforo en formato valores separados por comas; sistema de referencia espacial GCS ETRS 1989 (EPSG 4258). El IPE obtuvo las coordenadas y los datos de caudal de las estaciones de aforo activas e inactivas a través del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) para el período 1962 – 2013 a escala mensual.

Red de embalses de la España peninsular proporcionada por el IPE: capa de los embalses en formato shape; sistema de referencia espacial GCS ETRS 1989 (EPSG 4258). El IPE consideró los embalses funcionales de la red de embalses que ofrecía el SAIH. Además, se ha tenido en cuenta la Red Oficial de Estaciones de Aforo en Embalses elaborada por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) descargada del SIA: capa de las estaciones de aforo en embalses en formato shape; sistema de referencia espacial GCS ETRS 1989 (EPSG 4258). Se han seleccionado las estaciones de aforo en embalses del CEDEX que no coincidían con la capa de embalses del IPE, siempre y cuando en la actualidad se encontrasen en funcionamiento. Para ello se ha utilizado la página web iAgua Data, una iniciativa de iAgua (la web del sector del agua), cuyo objetivo es recopilar todos los datos disponibles sobre el sector del agua en España y proporcionar información sobre el estado de los embalses. Se han eliminado aquellas estaciones de aforo en embalses que se encontraban a 0 hm³ de su capacidad. Finalmente, se han unido ambas capas para tener todos los embalses en una única capa.

Seleccionar las estaciones de aforo de cabecera de la España peninsular: a partir de las capas con las coordenadas de las estaciones de aforo y de la de la red de embalses funcionales, se han determinado las estaciones necesarias. Para la selección de las estaciones de aforo candidatas se han considerado aquellas que no tuviesen un embalse aguas arriba y las que se encontraban en un embalse, siempre y cuando no tuviesen otro aguas arriba; el resto han sido descartadas. Para realizar la selección de manera más cuidadosa se ha utilizado la capa de la red fluvial.

Subcuencas de la España peninsular proporcionadas por el IPE: capa de las subcuencas en formato shape; sistema de referencia espacial GCS ETRS 1989 (EPSG 4258). El IPE modeló las subcuencas en función de todas las estaciones de aforo, considerando estas últimas como áreas de drenaje de la red hidrológica y utilizando un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de alta resolución espacial. Mediante diferentes geoprocursos el programa delimitó las subcuencas aguas arriba para cada una de las estaciones de aforo (Marina Peña, comunicación personal, 22 de enero de 2019) (figura III.1):

Figura III.1. Modelo cartográfico de modelado hidrológico



* Ejemplo 'Mosaic to New Raster' con tres de las hojas necesarias del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) → aplicar la herramienta con todas las hojas PNOA a la vez

Fuente: elaboración propia a partir de la información consultada

Siguiendo el modelo cartográfico anterior (figura III.1), el IPE obtuvo del CNIG las hojas necesarias de los MDE en formato ASCII, y con la herramienta 'Mosaic to New Raster' generó una única capa ráster MDE. Seguidamente, a través de las herramientas de modelado hidrológico contenidas en 'Hydrology' ('Spatial Analyst Tools'), disponible con una licencia de 'Spatial Analyst', se modelaron las subcuencas (ArcGIS for Desktop, 2016ab; Learn ArcGIS, 2018):

- 1) Con la herramienta 'Fill' el programa rellenó los sumideros para eliminar pequeñas imperfecciones en los datos del ráster MDE, y así prepararlo para el análisis hidrológico y que no estuviese fragmentada la red fluvial; si los sumideros no se rellenan, una red de drenaje puede ser discontinua. Los sumideros son áreas de drenaje internas rodeadas por valores de mayor elevación, conocidos también como depresión o concavidad. Si bien muchos sumideros son imperfecciones de los MDE, por ejemplo como consecuencia del redondeo en los valores de las celdas al rasterizar, algunos pueden ser naturales, en particular en áreas de glaciares o cársticas (Mark, 1988, dentro de ArcGIS for Desktop, 2016a). Teniendo en cuenta las estaciones de aforo como áreas de drenaje de la red hidrológica, se consideraron como error todos los sumideros iniciales del MDE y se eliminaron antes de derivar cualquier información de superficie.
- 2) Con la herramienta 'Flow Direction' el programa calculó la dirección de flujo de la red hídrica desde cada celda hasta su vecina con la pendiente descendente más empinada.

- 3) Con la herramienta 'Flow Accumulation' el programa calculó la acumulación de flujo para cada celda de la red hídrica, determinada por la acumulación de los pesos de todas las celdas que fluyen hacia cada celda de pendiente descendente.
- 4) Con la herramienta 'Snap Pour Point' el programa ajustó los puntos de fluidez a las celdas de acumulación de flujo más elevadas dentro de una distancia especificada, entendiendo por punto de fluidez como aquellas ubicaciones para las cuales se desea conocer la cuenca hidrográfica de contribución. Los puntos de fluidez fueron las estaciones de aforo, consideradas como áreas de drenaje de la red hidrológica. Para una cuenca hidrográfica concreta, el punto de fluidez debe ubicarse con precisión en el curso de agua representado en el MDE con las siguientes herramientas:
 - Con 'Flow Accumulation' se determinó la ubicación exacta del curso de agua calculando las áreas en las que más se acumula el agua.
 - Con 'Snap Pour Point' se alinearon las ubicaciones de los puntos de fluidez para que coincidiesen exactamente con el curso de agua.
- 5) Con la herramienta 'Watershed' el programa calculó el área de contribución sobre un conjunto de celdas del ráster MDE, y delineó las cuencas hidrográficas aguas arriba de las estaciones de aforo.

Finalmente, se convirtió la capa ráster obtenida de las cuencas hidrográficas a capa vectorial de polígonos con la herramienta 'Raster to Polygon' en 'Conversion Tools'.

El modelado hidrológico se hubiese podido realizar únicamente para las estaciones de aforo de cabecera, pero el inconveniente hubiese sido que el espacio geográfico delimitado para cada subcuenca no se hubiese ajustado al modelo inicial con todas las estaciones de aforo del IPE, tomando las estaciones candidatas áreas de subcuenca de otras estaciones vecinas y habiendo discrepancias geográficas entre ellas.

Seleccionar las subcuencas de cabecera de la España peninsular: una vez conocidas las estaciones de aforo de cabecera y teniendo la capa de las subcuencas que delimitó el IPE, se ha procedido a la selección de las subcuencas que se corresponden con las estaciones candidatas.

Se han detectado errores de topología en la capa de las subcuencas, presuponiéndose que los MDE para el modelado hidrológico presentaban errores como consecuencia de las presas: "*éstas generan triángulos porque en la medición para los MDE se toman las medidas del lecho de la presa y los SIG los interpreta como una especie de valle*" (Marina Peña, comunicación personal, 31 de enero de 2019). Efectivamente, los errores topológicos encontrados han sido triángulos vacíos en el interior de las entidades 'subcuencas' y se ha procedido a su corrección, considerándose como parte perteneciente a la subcuenca en la cual se encontraban contenidos. En la creación de la topología, la tolerancia XY considerada ha sido de 0,001 m (distancia mínima entre las coordenadas antes de que se las considere iguales), en el campo *rank* (rango) se ha indicado 1 m (tolerancia de *snapping* o alineación), y las reglas topológicas han sido *Must Not Overlap* y *Must Not Have Gaps*.

Variables climáticas —evapotranspiración de referencia (ETO), precipitación, temperaturas máxima y mínima— de las subcuencas de la España peninsular proporcionadas por el IPE (1961 – 2016 a escala mensual): fichero de las variables climáticas en formato valores separados por comas. El IPE reconstruyó las series climáticas obtenidas a través de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para el período 1961 – 2016 a escala diaria. A continuación se explica el proceso de reconstrucción de las series climáticas que desarrolló el IPE, según Vicente et al. (2017):

- 1) El conjunto inicial de los datos estaba compuesto por 10.718 estaciones con datos diarios de precipitación y 5.110 de temperatura, variando el alcance de la cobertura temporal entre las variables.

- 2) Las series diarias se convirtieron a series semanales: 1) los datos de la ETO se obtuvieron utilizando la ecuación FAO-56 Penman-Monteith (PM) a partir de varias variables meteorológicas —temperaturas máxima y mínima, temperatura del punto de rocío (se calculó combinando los datos de temperatura y humedad relativa), velocidad del viento a una altura de 2 m y duración solar diaria—; 2) las precipitaciones se obtuvieron mediante la suma de los valores diarios; 3) la media semanal de las temperaturas se estimó con una tolerancia de un día faltante en los datos.
- 3) Se reconstruyeron las series semanales incompletas que tuviesen al menos 25 años de datos mediante el cálculo de promedios ponderados en función del vecino más próximo con una zona de influencia de 100 km: 1) se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson (r de Pearson) entre los períodos comunes de las series candidatas y las de sus vecinas a 100 km, considerando, para la reconstrucción de las series, un coeficiente de correlación igual o superior a 0,6; 2) para evitar la asimetría o sesgo en la reconstrucción de las series debido a las diferencias en la distribución de los parámetros de la media y la varianza entre los datos, se realizó una corrección de sesgo en los datos de las estaciones antes de calcular el promedio ponderado; 3) los datos de las series a reconstruir se reescalaron para que coincidiesen con la distribución estadística de las mediciones realizadas en sus estaciones vecinas; 4) la homogeneidad del conjunto de datos fue chequeada con el Test de Homogeneidad Normal Estandarizado (SNHT), y la falta de homogeneidad se corrigió utilizando la relación media o la diferencia entre las series; 5) el proceso resultó en 2.269 series de precipitación y 1.304 de temperatura, que se utilizaron para crear las cartografías.
- 4) Con las series meteorológicas reconstruidas se creó una malla climática semanal con resolución espacial de 1,1 km, para que coincidiese con productos satelitales derivados del sensor AVHRR (NOAA) y del satélite MODIS: 1) se aplicó el método de interpolación geoestadístico Kriging, considerando un máximo de 50 observatorios vecinos en un rango de 250 km, y como variables independientes del clima se utilizaron la latitud, la longitud y la elevación para cada celda de la malla; 2) el proceso de interpolación se validó con el procedimiento de remuestreo Jackknife; 3) se calcularon los errores residuales —diferencia entre los valores estimados y los observados— de los datos para cada observatorio; 4) el proceso se repitió para cada semana, observatorio y variable climática; 5) se calculó el Error Medio Absoluto (MAE) y el Índice de Concordancia D para cada variable analizada.
- 5) Finalmente, para obtener los datos de las variables climáticas a escala mensual, *“las mallas climáticas semanales se convirtieron a mensuales: primero se extrajeron las series semanales de cada variable climática y después se promediaron los valores para respetar la resolución espacial de 1,1 km”*, y para calcular las mallas climáticas mensuales a la superficie de cada subcuenca *“se promediaron los valores de los píxeles a 1,1 km que formaban parte de cada subcuenca”* (Marina Peña, comunicación personal, 22 de enero de 2019).

Seleccionar las variables climáticas de las subcuencas de cabecera de la España peninsular y ajustar el período para calcular los índices de sequía climática SPI y SPEI (1962 – 2013 a escala mensual): una vez conocidas las subcuencas de cabecera y teniendo los datos de las variables climáticas, se ha procedido a la selección de las variables necesarias para calcular los índices de sequía climática SPI y SPEI de las subcuencas candidatas. Las variables climáticas utilizadas para el cálculo de ambos índices han sido la ETO y la precipitación para el período 1962 – 2013 a escala mensual.

2. Calcular los índices de sequía climática SPI y SPEI de las subcuencas de cabecera de la España peninsular para el análisis de correlación entre los índices SPI – SSI y SPEI – SSI (1962 – 2013 a escala mensual). Tratamiento de la información geográfica con software RStudio mediante la instalación del paquete ‘SPEI’

Como se ha comentado, las series temporales de los datos son de carácter mensual entre 1962 – 2013. De este modo, a mayor período temporal, el cálculo de los índices de sequía climática es más preciso debido a que éstos van acumulando las anomalías climáticas en el tiempo, entendidos como *proxys* climáticos ampliamente utilizados para la cuantificación y el monitoreo de las sequías, basándose el índice SPI en la acumulación de la anomalía de precipitación y el índice SPEI en la acumulación de la anomalía del balance hídrico climático (BHC) —diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración— (Beguería y Vicente, 2017).

Continuando con los mismos autores, el paquete ‘SPEI’ en RStudio sirve para calcular varios índices de sequía climática, entre ellos el SPI y el SPEI, estandarizando una variable climática siguiendo una función de distribución de probabilidad. Además, permite el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP) mediante un conjunto de funciones integradas, indicando que usualmente la ETO y la ETP son consideradas equivalentes.

Por defecto, para el cálculo del índice SPI se utiliza una distribución Gamma y para el SPEI una distribución Log-logística, aunque a través del ajuste de parámetros estas distribuciones pueden ser modificadas por el usuario.

Como que ambos índices van acumulando las anomalías climáticas en el tiempo, éstos se pueden calcular a diferentes escalas temporales de acumulación, de este modo es posible incorporar la influencia de los valores pasados de la variable climática en el cálculo del índice, y esto permite que el índice se adapte a la memoria del período de estudio para observar las diferentes respuestas temporales a las sequías. La magnitud de esta memoria está controlada por la escala de parámetros, considerándose para este trabajo una escala temporal de acumulación de la anomalía climática de 1 a 48 meses (e.g., un valor de 6 implicaría que los datos del mes actual y de los últimos 5 meses se utilizan para el cálculo del SPI o del SPEI para ese mes). Así pues, hay que tener en cuenta que el primer mes con datos válidos en las series de ambos índices es el correspondiente al de la escala temporal elegida, pudiéndose escoger entre 1 y 48 meses. Esto significa que si se escoge 2 como escala temporal, en el cálculo del índice se tiene en cuenta el mes observado y el anterior, la acumulación de la anomalía climática en el tiempo es de 2 meses y los datos son válidos desde el 2º mes del período, y así sucesivamente hasta 48, que se tiene en cuenta el mes observado y los 47 anteriores, la acumulación de la anomalía climática en el tiempo es de 48 meses y los datos son válidos desde el 48º mes del período.

Por defecto, todos los datos pasados tienen el mismo peso en el cálculo del índice, aunque para suavizar la variabilidad temporal se pueden utilizar otros pesos aplicando el parámetro Kernel a los datos antes de calcular los índices. Asimismo, el mayor peso se le da a la observación del mes actual, sin embargo, es posible modificarlo configurando el parámetro.

Para obtener la serie del índice SPI es necesario una serie temporal de precipitación, mientras que para obtener la serie del índice SPEI existen dos opciones para calcularlo: 1) calcular la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración, ya sea esta última la ETO o la ETP; 2) calcular la diferencia entre la precipitación y alguna de las funciones integradas en el paquete ‘SPEI’ de RStudio que sirven para calcular la ETP, como por ejemplo *thornthwaite()*, *hargreaves()* o *penman()*, y utilizando las variables de temperaturas máxima y mínima, y latitudes. Para este trabajo se ha utilizado la serie temporal de la ETO para el cálculo del índice SPEI.

Ambos índices se han calculado para cada subcuenca de cabecera a partir de los datos obtenidos. En el ‘Anexo 3: Scripts software RStudio’ están disponibles los *scripts* desarrollados. Asimismo, se han extraído las escalas temporales de 1 a 48 meses para calcular, más adelante, las correlaciones de Pearson entre cada una de ellas y el índice de sequía hidrológica SSI. El motivo de haber calculado las correlaciones de Pearson es porque los índices, al estar estandarizados, ofrecen una distribución normal de los datos y permiten una precisa comparación espacial y temporal entre las variables.

3. Extraer el índice de sequía hidrológica SSI de las subcuencas de cabecera de la España peninsular para el análisis de correlación entre los índices SPI – SSI y SPEI – SSI (1962 – 2013 a escala mensual). Tratamiento de la información geográfica con software RStudio

A diferencia de los índices de sequía climática SPI y SPEI, *“el índice de sequía hidrológica SSI es un índice que no se acumula, es uniescalar, así que no se puede sustentar la ventaja de conocer la acumulación de las anomalías de caudal en el tiempo con este índice”* (Marina Peña, comunicación personal, 22 de enero de 2019).

No existe paquete ‘SSI’ en RStudio para el cálculo del índice de sequía hidrológica, pero se ha utilizado RStudio para extraer el índice SSI de las subcuencas de cabecera del fichero en formato valores separados por comas proporcionado por el IPE. En el ‘Anexo 3: Scripts software RStudio’ está disponible el *script* desarrollado.

El índice SSI ha sido calculado por el IPE a través de una macro de excel, y aunque se desconoce exactamente la metodología seguida, a continuación se exponen brevemente las bases metodológicas que han servido para calcularlo, según una aproximación en la cuenca del Ebro con motivo de su variabilidad espacial, climática, estacional e hidrológica (Vicente et al., 2012b). Se utilizaron los datos de caudal de 98 estaciones de aforo para el período 1945 – 2005 a escala mensual proporcionados por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). Mediante regresión lineal múltiple entre las estaciones vecinas se reconstruyeron aquellas series incompletas con menos del 10% de datos faltantes que presentaban como mínimo un coeficiente de correlación de Pearson de 0,8. Para el cálculo del SSI y seleccionar la distribución más adecuada, se aplicaron 6 distribuciones de probabilidad ajustadas a los datos —Log-normal, Pearson tipo III, Log-logística, Valor Extremo, Pareto y Weibull— y 2 aproximaciones —Mejor Ajuste Mensual (BMF) y Distancia Ortogonal Mínima (MD)—. Pero debido a los distintos factores físicos y/o climáticos inherentes a las diferentes zonas de la cuenca del Ebro, los resultados no ofrecieron una única distribución de probabilidad que mostrase un mejor ajuste general para todo el conjunto de datos, así que la situación más habitual fue tener que encontrar la distribución más adecuada de acuerdo con las aproximaciones BMF y MD basadas en la distribución que mostrase el mejor ajuste para cada una de las 12 series mensuales de cada estación.

4. Calcular los coeficientes de correlación de Pearson entre los índices SPI – SSI y SPEI – SSI de las subcuencas de cabecera de la España peninsular. Tratamiento de la información geográfica con excel o valores separados por comas y software RStudio

Para determinar las escalas temporales de respuesta más características de las sequías hidrológicas a las sequías climáticas, aquellas que presenten las correlaciones de mayor magnitud entre los índices SPI – SSI y SPEI – SSI, se ha aplicado el coeficiente de correlación de Pearson entre cada escala temporal de 1 a 48 meses de los índices de sequía climática y el índice de sequía hidrológica.

Metodología objetivo 1b**5. Reclasificar y extraer las coberturas del suelo del CLC 1990-2000-2006-2012 de las subcuencas de cabecera de la España peninsular para analizar la distribución según los distintos tipos de vegetación. Tratamiento de la información geográfica con software ArcGIS 10.5**

Para poder conocer los tipos de vegetación de las subcuencas de cabecera y analizar la correlación entre las sequías y esta variable, se han utilizado las capas descargadas del CNIG sobre la ocupación del suelo en España correspondiente al proyecto europeo CLC de los años 1990, 2000, 2006 y 2012: capas del CLC en formato geodatabase; sistema de referencia espacial ETRS 1989 UTM Zone 30N (EPSG 25830).

El proyecto CLC, incluido dentro del programa europeo *Copernicus*, es un proyecto de la Agencia Europea del Medio Ambiente basado en imágenes de teledetección, nacido en 1985 y con el objetivo de obtener una base de datos europea de ocupación del suelo actualizada a varios años de referencia —1990, 2000, 2006, 2012 y 2018— (CNIG, 1990, 2000 y 2015). Para la realización de la versión 2012 del CLC España, se continuó con el sistema integrado de producción de la versión 2006, basado en la generación del CLC conjuntamente con la base de datos de ocupación del suelo en España del SIOSE, trabajando con las mismas imágenes de referencia, siguiendo las directrices INSPIRE y acorde con las especificaciones CLC (CNIG, 2015). Para la elaboración del CLC España 2006 se integró el SIOSE España 2005, y para el CLC España 2012 el SIOSE España 2011.

Dado que no es necesario trabajar con todas las cubiertas que aparecen en las cartografías del CLC, se propone una reclasificación para los cuatro años. Primero de todo se han establecido las coberturas de las subcuencas de cabecera en su conjunto y, una vez conocidas, se ha procedido a la reclasificación de las mismas (tabla III.2). El criterio seguido para la reclasificación ha sido el siguiente: 1) al no analizar las superficies artificiales (nivel 1 CLC), éstas se han reclasificado como antropizado; 2) las zonas agrícolas (nivel 2 CLC), las zonas forestales con vegetación natural y espacios abiertos (nivel 3 CLC) y las zonas húmedas (nivel 4 CLC) se han mantenido; 3) las superficies de agua (nivel 5 CLC) se han reclasificado como masas de agua.

Tabla III.2. Codificación y reclasificación de la ocupación del suelo en España del proyecto europeo CLC para las subcuencas de cabecera de la España peninsular

CODE_CLC	USOS_CLC	RECLASS
111	Urbano continuo	Antropizado
112	Urbano discontinuo	Antropizado
121	Zonas industriales y comerciales	Antropizado
122	Redes viarias y ferroviarias	Antropizado
123	Zonas portuarias	Antropizado
124	Aeropuertos	Antropizado
131	Extracción minera	Antropizado
132	Vertederos	Antropizado
133	Zonas en construcción	Antropizado
141	Zonas verdes urbanas	Antropizado
142	Instalaciones deportivas y recreativas	Antropizado

211	Labor secano	Labor secano
212	Regadío	Regadío
213	Arrozales	Arrozales
221	Viñedos	Viñedos
222	Frutales	Frutales
223	Olivares	Olivares
231	Praderas	Praderas
241	Cultivos anuales/permanentes	Cultivos anuales/permanentes
242	Mosaico cultivos	Mosaico cultivos
243	Terrenos agrícolas con vegetación natural	Terrenos agrícolas con vegetación natural
244	Sistema agroforestal	Sistema agroforestal
311	Frondosas	Frondosas
312	Coníferas	Coníferas
313	Bosque mixto	Bosque mixto
321	Pastizales naturales	Pastizales naturales
322	Landas y matorrales	Landas y matorrales
323	Vegetación esclerófila	Vegetación esclerófila
324	Matorral boscoso de transición	Matorral boscoso de transición
331	Playas, dunas y arenales	Playas, dunas y arenales
332	Roquedo	Roquedo
333	Vegetación escasa	Vegetación escasa
334	Zonas quemadas	Zonas quemadas
335	Glaciares y nieves perpetuas	Glaciares y nieves perpetuas
411	Humedales y zonas pantanosas	Humedales y zonas pantanosas
412	Turberas	Turberas
422	Salinas	Salinas
511	Cursos de agua	Masas de agua
512	Láminas de agua	Masas de agua
523	Mares y océanos	Masas de agua

Fuente: elaboración propia a partir de la información consultada

6. Extraer el índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI de las subcuencas de cabecera de la España peninsular para el análisis de correlación según los valores de actividad vegetal (1981 – 2013 a escala mensual). Tratamiento de la información geográfica con software RStudio

En este caso, las series temporales de los datos son de carácter mensual entre julio 1981 – diciembre 2013.

Del mismo modo que para el índice de sequía hidrológica SSI, se ha utilizado RStudio para extraer los valores de actividad vegetal NDVI de las subcuencas de cabecera del fichero en formato valores separados por comas proporcionado por el IPE.

El índice de vegetación NDVI ha sido calculado por el IPE, y aunque se desconoce exactamente la metodología seguida, a continuación se exponen brevemente las bases metodológicas que han servido para calcularlo. Según Vicente et al. (2019), debido a la falta de datos sobre las condiciones y el crecimiento de las formaciones boscosas, a la insuficiente resolución temporal de los inventarios forestales, y a la falta de datos espacio-temporales de los cultivos (Grissino y Fritts, 1997; Jenkins et al., 2003; Ji y Peters, 2003; Wan et al., 2004), numerosos estudios están empleando la teledetección para evaluar los impactos de las sequías en la actividad vegetal (Kogan, 1997; Mu et al., 2013). En este contexto, destaca la aplicación de los índices de vegetación, como por ejemplo el NDVI. Los datos más utilizados para calcular el NDVI y evaluar la posible influencia de las sequías en la dinámica de la vegetación en diferentes regiones del mundo, son los productos satelitales derivados del sensor AVHRR (NOAA) y los del satélite MODIS (Tucker et al., 2005; Gu et al., 2007; Sona et al., 2012; Pinzon y Tucker, 2014; Ma et al., 2015), pero los datos del sensor AVHRR están disponibles a escala semestral a partir de 1981 y la resolución espacial es baja (64 km^2), lo cual dificulta capturar la elevada variabilidad espacial de la cobertura vegetal de España, y los datos del NDVI derivados del satélite MODIS se remontan al 2001, período insuficiente para una aproximación a la respuesta a largo plazo de la actividad vegetal a las sequías. Por ello se elaboró y se validó, de acuerdo con el conjunto de datos de los Estudios de Inventario Global de Cartografía y Modelado (GIMMS), un conjunto de datos NDVI de alta resolución espacial (1,1 km) a escala mensual de 1981 a 2015 para toda España, con el fin de poderlo superponer a las mallas climáticas mensuales calculadas. Se obtuvieron buenos resultados en comparación con otros conjuntos de datos NDVI disponibles. El conjunto de datos fue estandarizado (sNDVI), de modo que cada serie temporal tiene media 0 y desviación estándar 1, siendo comparables las series sNDVI en el espacio y tiempo, y también con los índices de sequía SPI, SPEI y SSI. Finalmente, los datos se ajustaron a una distribución Log-logística, ya que ésta muestra una mejor habilidad en la estandarización de variables ambientales (Vicente y Beguería, 2016).

7. Calcular los coeficientes de correlación de Pearson entre los índices de sequía y el NDVI de las subcuencas de cabecera de la España peninsular. Tratamiento de la información geográfica con excel o valores separados por comas y software RStudio

Para analizar en qué medida la relación entre los índices de sequía climática e hidrológica varía según la actividad vegetal NDVI, se ha aplicado el coeficiente de correlación de Pearson entre las escalas temporales de los índices de sequía climática obtenidas anteriormente y la actividad vegetal. Además, se ha aplicado el coeficiente de correlación de Pearson entre cada escala temporal de 1 a 48 meses y el NDVI para determinar las escalas temporales de respuesta más características de la actividad vegetal a las sequías climáticas, aquellas que presenten las correlaciones de mayor magnitud entre los índices SPI – NDVI y SPEI – NDVI. También se ha aplicado el coeficiente de correlación de Pearson entre el índice de sequía hidrológica y la actividad vegetal.

Finalmente, para analizar en qué medida la relación entre los índices de sequía climática e hidrológica varía según la actividad vegetal y el tipo de vegetación, se han añadido las coberturas del suelo del CLC al análisis.

IV. RESULTADOS: RELACIÓN ENTRE LAS SEQUÍAS CLIMÁTICAS E HIDROLÓGICAS EN LAS SUBCUENCAS DE CABECERA DE LA ESPAÑA PENINSULAR

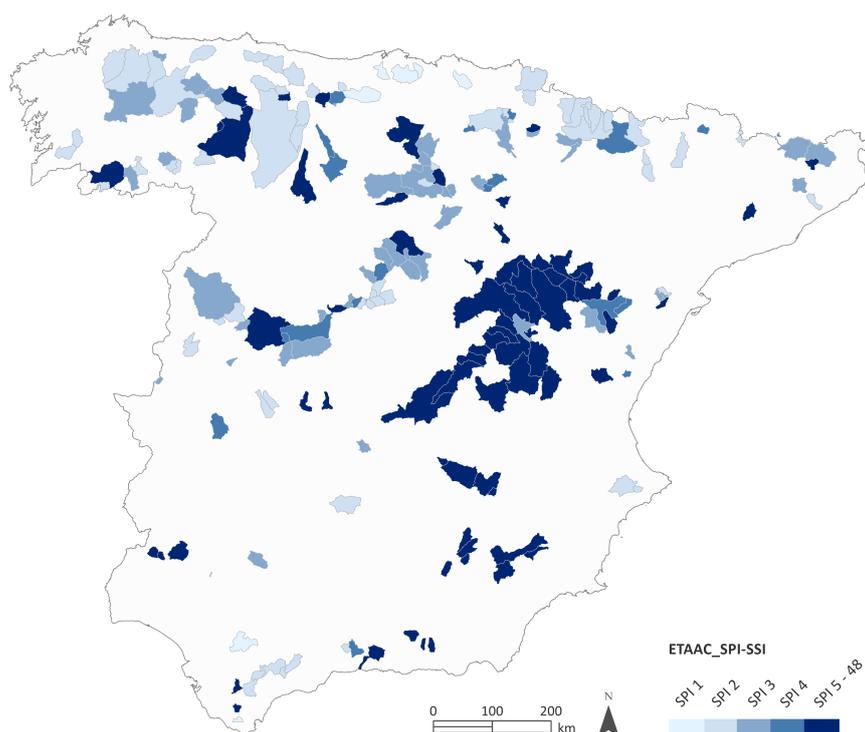
Resultados objetivo 1a

Determinar las escalas temporales de respuesta más características de las sequías hidrológicas a las sequías climáticas, mediante el análisis de correlación entre los índices SPI – SSI y SPEI – SSI a diferentes escalas temporales. Para este objetivo se formula la siguiente hipótesis: la interacción entre las sequías climáticas e hidrológicas varía en función de la escala temporal de la sequía climática con importantes variaciones espaciales, previendo correlaciones de mayor magnitud entre los índices SPEI – SSI.

La figura IV.1 muestra las escalas temporales de acumulación de la anomalía de precipitación del índice de sequía climática SPI que han presentado las correlaciones de mayor magnitud con el índice de sequía hidrológica SSI. Además, también muestra el número de cuencas que han registrado la máxima correlación para cada una de ellas y el porcentaje que representan respecto el total.

Figura IV.1. Tabla explicativa y cartografía de las escalas temporales de acumulación de la anomalía de precipitación del índice SPI con mayor correlación con el índice SSI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)

ETAAC_SPI-SSI	Núm Cuencas SPI-SSI	% Cuencas SPI-SSI
EtaacSPI1	7	3,27
EtaacSPI2	68	31,78
EtaacSPI3	48	22,43
EtaacSPI4	19	8,88
EtaacSPI5	7	3,27
EtaacSPI6	4	1,87
EtaacSPI7	2	0,93
EtaacSPI8	6	2,80
EtaacSPI9	6	2,80
EtaacSPI10	6	2,80
EtaacSPI11	6	2,80
EtaacSPI12	4	1,87
EtaacSPI13	3	1,40
EtaacSPI14	2	0,93
EtaacSPI16	2	0,93
EtaacSPI17	1	0,47
EtaacSPI19	2	0,93
EtaacSPI20	1	0,47
EtaacSPI21	1	0,47
EtaacSPI22	1	0,47
EtaacSPI23	2	0,93
EtaacSPI24	4	1,87
EtaacSPI26	1	0,47
EtaacSPI28	2	0,93
EtaacSPI30	2	0,93
EtaacSPI36	2	0,93
EtaacSPI39	1	0,47
EtaacSPI40	1	0,47
EtaacSPI41	1	0,47
EtaacSPI48	2	0,93
214	100,00	
Total Subcuencas Cabecera		



ETAAC: escala temporal de acumulación de la anomalía climática

Se observa que para 135 de las subcuencas de cabecera analizadas (más de la mitad) y representando el 63,09% respecto el total, la sequía hidrológica responde a escalas temporales de acumulación de la anomalía de precipitación principalmente a corto plazo (SPI 2, SPI 3 y SPI 4) (figura IV.1). Esto significa que la

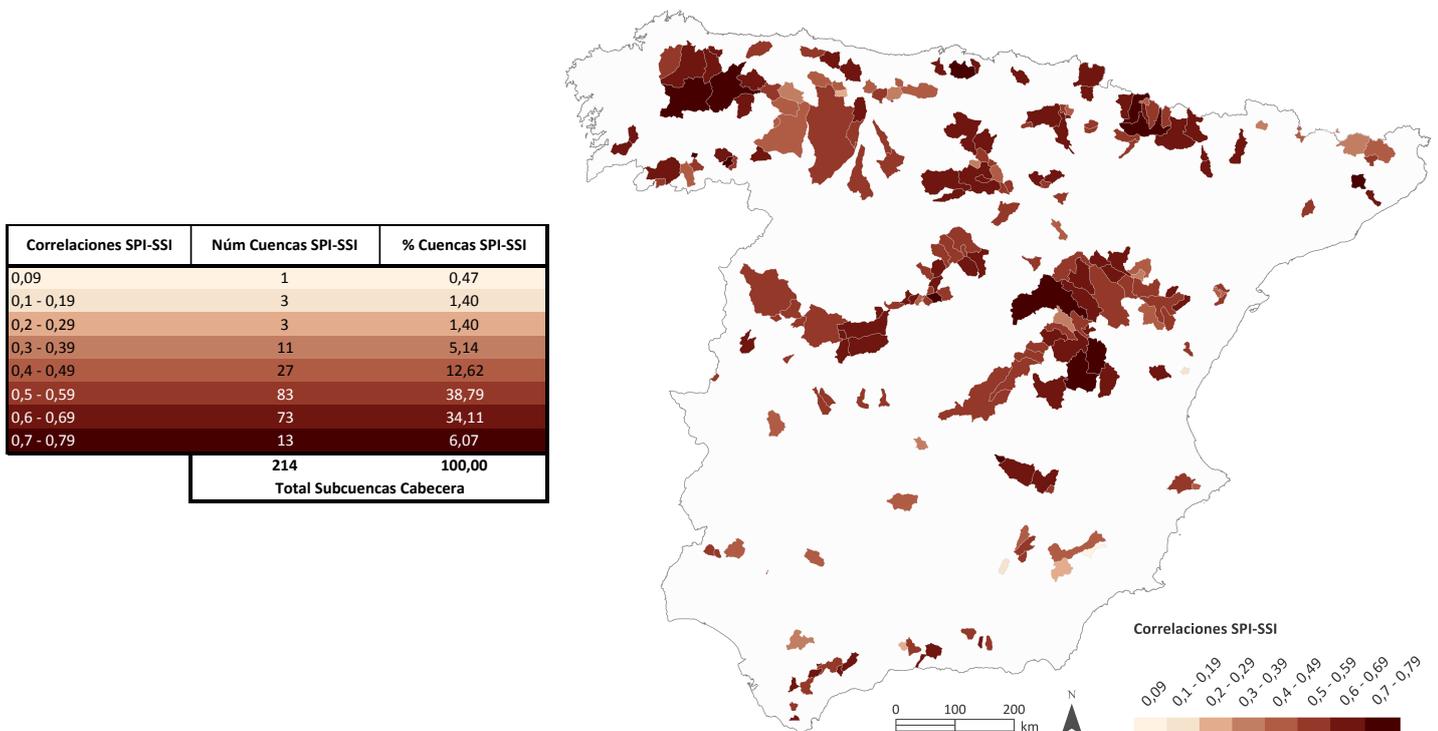
respuesta de las sequías hidrológicas es a una acumulación de la anomalía de precipitación de al menos 2 meses, respondiendo en un 63,09% a las condiciones climáticas registradas de hace 2, 3 y 4 meses, pudiendo determinar sequías de corta duración —déficit hídrico menor y menos prolongado de manera continuada en el tiempo— y estimando mayor frecuencia temporal de sequía en el período 1962 – 2013. En este contexto, cabe destacar la escala temporal de acumulación del SPI a 1 mes, que aunque se trata también de una escala temporal a corto plazo, la más corta, ésta únicamente ha presentado las mayores correlaciones con el índice de sequía hidrológica SSI para 7 de las subcuencas de cabecera.

Para el resto, SPI 5 – SPI 48, se detecta que, individualmente la sequía hidrológica de pocas subcuencas responde a estas escalas temporales, pero observándolas en su conjunto se obtienen 72 subcuencas de cabecera representando el 33,64% respecto el total (figura IV.1).

En la cartografía (figura IV.1), destacar que la respuesta del SSI a las escalas temporales del SPI más cortas (SPI 1 – SPI 4), principalmente se localiza en la zona norte de España y en la mayoría de las subcuencas de cabecera del Sistema Central, mientras que la respuesta a las escalas de 5 a 48 meses se localiza básicamente en la parte central y sur del Sistema Ibérico, en la mayoría de las subcuencas de la Meseta Sur y en la Cordillera Subbética. Para las subcuencas más dispersas sobre el territorio, en las localizadas en costas levantinas, en la Cordillera Penibética, en la Depresión del Guadalquivir, en Sierra Morena y en el Valle del Tajo, la respuesta del SSI a las escalas temporales del SPI ha sido variada, destacando igualmente la respuesta de las sequías hidrológicas a una acumulación de la anomalía de precipitación de 2, 3 y 4 meses.

La figura IV.2 muestra los coeficientes de correlación más elevados que se han encontrado entre los índices SPI y SSI a las escalas temporales anteriormente presentadas. Además, también muestra el número de cuencas que han registrado estos coeficientes y el porcentaje que representan respecto el total.

Figura IV.2. Tabla explicativa y cartografía de las correlaciones más elevadas entre los índices SPI y SSI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)



Se han encontrado correlaciones positivas en todos los casos, tomando magnitudes entre 0,5 y 0,79 en un importante número de cuencas (78,97%), destacando que las correlaciones son fuertes y directas, y tanto más fuertes cuanto más se aproxime r a 1 (figura IV.2).

Para el resto de las subcuencas, una de ellas ha presentado la correlación más elevada entre los índices SPI – SSI en 0,09, seis entre 0,1 y 0,29, once entre 0,3 – 0,39 y veintisiete entre 0,4 – 0,49, representando el 21,03% respecto el total, y destacando que las correlaciones son débiles si éstas toman magnitudes cercanas a 0 (figura IV.2).

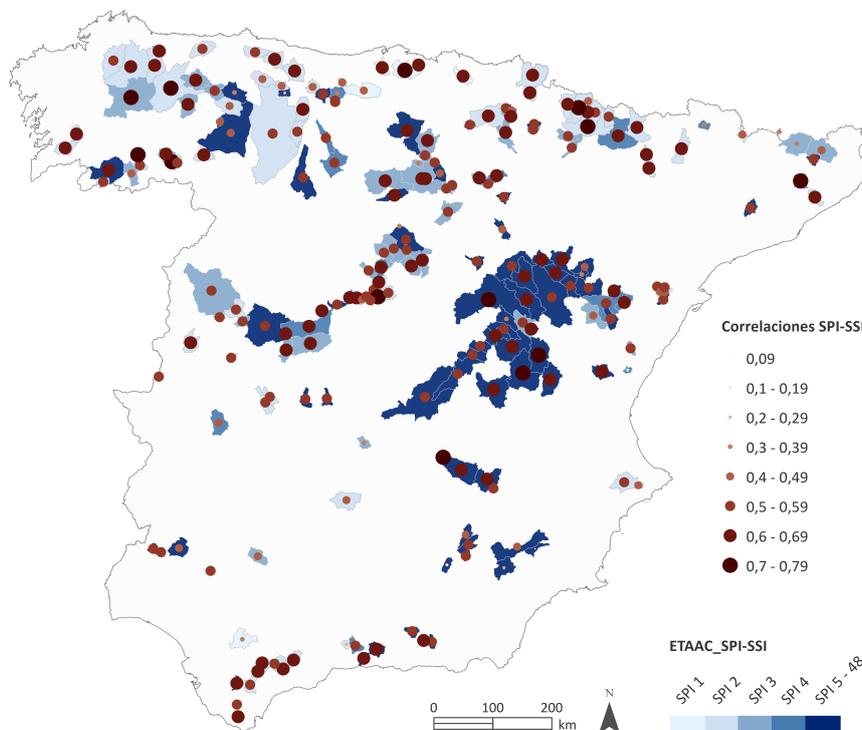
En la cartografía (figura IV.2), las máximas correlaciones se encuentran localizadas por todo el territorio, no pudiendo relacionar ningún patrón espacial con las mismas.

La figura IV.3 muestra una combinación de las dos anteriores (figuras IV.1 y IV.2), presentando los coeficientes de correlación más elevados encontrados entre los índices SPI y SSI agrupados según la escala temporal en la cual se han obtenido. Además, también muestra el número de cuencas registradas y el porcentaje que representan respecto el total.

Figura IV.3. Tabla explicativa y cartografía de las correlaciones más elevadas entre los índices SPI y SSI agrupadas según su escala temporal (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)

ETAAC_SPI-SSI	Núm Cuencas SPI-SSI	% Cuencas SPI-SSI	Correlaciones SPI-SSI	Núm Cuencas SPI-SSI	% Cuencas SPI-SSI
EtaacSPI1	7	3,27	0,3 - 0,39	1	0,47
			0,4 - 0,49	1	0,47
			0,6 - 0,69	4	1,87
			0,7 - 0,79	1	0,47
EtaacSPI2	68	31,78	0,1 - 0,19	1	0,47
			0,2 - 0,29	1	0,47
			0,4 - 0,49	10	4,67
			0,5 - 0,59	24	11,21
			0,6 - 0,69	26	12,15
			0,7 - 0,79	6	2,80
EtaacSPI3	48	22,43	0,3 - 0,39	3	1,40
			0,4 - 0,49	6	2,80
			0,5 - 0,59	22	10,28
			0,6 - 0,69	15	7,01
EtaacSPI4	19	8,88	0,7 - 0,79	2	0,93
			0,1 - 0,19	1	0,47
			0,3 - 0,39	3	1,40
			0,4 - 0,49	2	0,93
			0,5 - 0,59	6	2,80
EtaacSPI5	7	3,27	0,6 - 0,69	7	3,27
			0,3 - 0,39	1	0,47
			0,5 - 0,59	4	1,87
EtaacSPI6	4	1,87	0,6 - 0,69	2	0,93
			0,5 - 0,59	1	0,47
EtaacSPI7	2	0,93	0,6 - 0,69	3	1,40
			0,5 - 0,59	1	0,47
EtaacSPI8	6	2,80	0,6 - 0,69	1	0,47
			0,4 - 0,49	1	0,47
			0,5 - 0,59	2	0,93
			0,6 - 0,69	2	0,93
EtaacSPI9	6	2,80	0,7 - 0,79	1	0,47
			0,1 - 0,19	1	0,47
			0,4 - 0,49	2	0,93
EtaacSPI10	6	2,80	0,5 - 0,59	3	1,40
			0,4 - 0,49	1	0,47
			0,6 - 0,69	2	0,93
EtaacSPI11	6	2,80	0,4 - 0,49	1	0,47
			0,5 - 0,59	3	1,40
			0,6 - 0,69	1	0,47
			0,7 - 0,79	1	0,47
EtaacSPI12	4	1,87	0,3 - 0,39	1	0,47
			0,4 - 0,49	1	0,47
			0,6 - 0,69	1	0,47
			0,7 - 0,79	1	0,47
EtaacSPI13	3	1,40	0,5 - 0,59	2	0,93
			0,6 - 0,69	1	0,47

EtaacSPI14	2	0,93	0,2 - 0,29	1	0,47
EtaacSPI16	2	0,93	0,5 - 0,59	1	0,47
EtaacSPI17	1	0,47	0,09	1	0,47
EtaacSPI19	2	0,93	0,3 - 0,39	1	0,47
EtaacSPI20	1	0,47	0,7 - 0,79	1	0,47
EtaacSPI21	1	0,47	0,5 - 0,59	1	0,47
EtaacSPI22	1	0,47	0,5 - 0,59	1	0,47
EtaacSPI23	2	0,93	0,3 - 0,39	1	0,47
EtaacSPI24	2	0,93	0,5 - 0,59	1	0,47
EtaacSPI26	4	1,87	0,6 - 0,69	2	0,93
EtaacSPI28	1	0,47	0,6 - 0,69	1	0,47
EtaacSPI28	2	0,93	0,4 - 0,49	1	0,47
EtaacSPI30	2	0,93	0,5 - 0,59	1	0,47
EtaacSPI30	2	0,93	0,6 - 0,69	1	0,47
EtaacSPI36	2	0,93	0,5 - 0,59	2	0,93
EtaacSPI39	1	0,47	0,6 - 0,69	1	0,47
EtaacSPI40	1	0,47	0,6 - 0,69	1	0,47
EtaacSPI41	1	0,47	0,5 - 0,59	1	0,47
EtaacSPI48	2	0,93	0,2 - 0,29	1	0,47
EtaacSPI48	2	0,93	0,4 - 0,49	1	0,47
214		100,00	Total Subcuencas Cabecera		



Teniendo en cuenta las correlaciones de una magnitud entre 0,5 y 0,79, éstas han aparecido en 27 escalas temporales utilizadas para el análisis (30), mientras que las correlaciones inferiores han aparecido en 16 (figura IV.3). Asimismo, 14 escalas temporales han presentado correlaciones de magnitud únicamente entre 0,5 y 0,79, y tres de ellas inferiores o iguales a 0,4 – 0,49, destacando SPI 17 con $r = 0,09$ como coeficiente de correlación de mayor magnitud obtenido para una de las subcuencas resultado de las correlaciones encontradas entre los índices SPI y SSI.

Finalmente se puede apreciar que, considerando las correlaciones con magnitudes a partir de 0,5, este grado de relación entre los índices SPI y SSI se registra tanto en escalas temporales a corto, medio y largo plazo (figura IV.3). Además, a menos subcuencas registradas para una escala temporal determinada mayor ha sido la correlación obtenida (iguales o superiores a 0,5), mezclándose muy poco con correlaciones infe-

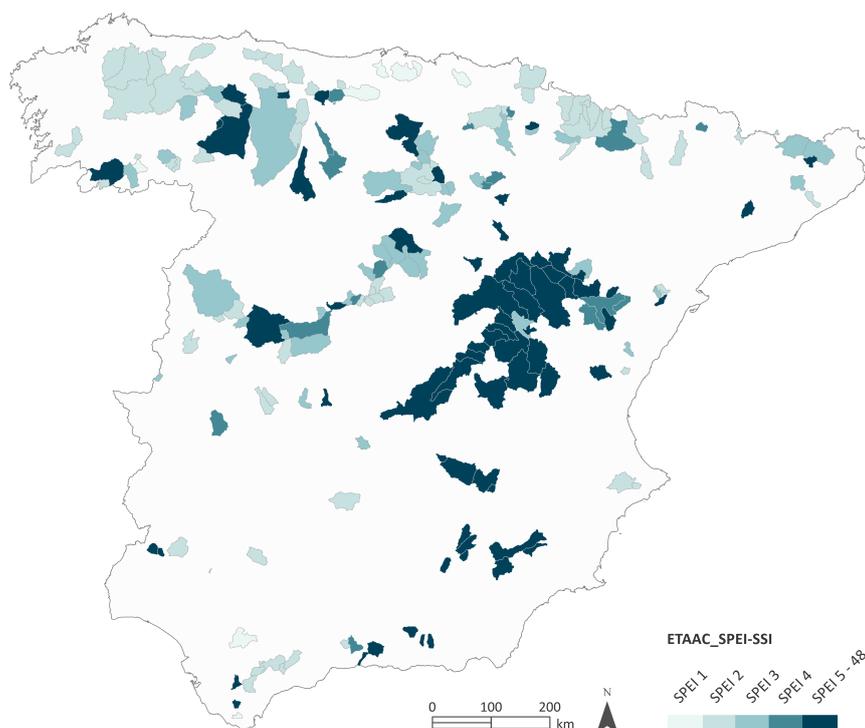
riores o iguales a 0,4 – 0,49, viéndose estos resultados de forma más evidente en las escalas temporales más largas.

En la cartografía de la figura IV.3 es posible distinguir sobre el territorio que, independientemente de la escala temporal del SPI que ha presentado las correlaciones de mayor magnitud con el índice SSI y de su localización, éstas tienden a ser fuertes en la mayoría de las subcuencas de cabecera analizadas (iguales o superiores a 0,5), destacando las subcuencas más occidentales y septentrionales, las del interior de Cataluña, las del Sistema Ibérico, el Sistema Central, la Meseta Sur y las de la Cordillera Penibética.

La figura IV.4 muestra las escalas temporales de acumulación de la anomalía del BHC del índice de sequía climática SPEI que han presentado las correlaciones de mayor magnitud con el índice de sequía hidrológica SSI. Además, también muestra el número de cuencas que han registrado la máxima correlación para cada una de ellas y el porcentaje que representan respecto el total.

Figura IV.4. Tabla explicativa y cartografía de las escalas temporales de acumulación de la anomalía del BHC del índice SPEI con mayor correlación con el índice SSI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)

ETAAC_SPEI-SSI	Núm Cuencas SPEI-SSI	% Cuencas SPEI-SSI
EtaacSPEI1	8	3,74
EtaacSPEI2	78	36,45
EtaacSPEI3	42	19,63
EtaacSPEI4	17	7,94
EtaacSPEI5	10	4,67
EtaacSPEI6	6	2,80
EtaacSPEI7	1	0,47
EtaacSPEI8	4	1,87
EtaacSPEI9	5	2,34
EtaacSPEI10	6	2,80
EtaacSPEI11	6	2,80
EtaacSPEI12	3	1,40
EtaacSPEI13	2	0,93
EtaacSPEI14	1	0,47
EtaacSPEI16	2	0,93
EtaacSPEI17	2	0,93
EtaacSPEI20	1	0,47
EtaacSPEI22	1	0,47
EtaacSPEI23	1	0,47
EtaacSPEI24	3	1,40
EtaacSPEI27	1	0,47
EtaacSPEI28	1	0,47
EtaacSPEI29	1	0,47
EtaacSPEI30	3	1,40
EtaacSPEI36	1	0,47
EtaacSPEI39	1	0,47
EtaacSPEI40	1	0,47
EtaacSPEI41	2	0,93
EtaacSPEI44	1	0,47
EtaacSPEI45	1	0,47
EtaacSPEI47	1	0,47
EtaacSPEI48	1	0,47
214	100,00	
Total Subcuencas Cabecera		



Se observa que para más de la mitad de las subcuencas de cabecera analizadas, 137, representando el 64,02% respecto el total, la sequía hidrológica responde a escalas temporales de acumulación de la anomalía del BHC principalmente a corto plazo (SPEI 2, SPEI 3 y SPEI 4) (figura IV.4). Esto significa que la respuesta de las sequías hidrológicas es a una acumulación de la anomalía del BHC de al menos 2 meses, respondiendo en un 64,02% a las condiciones climáticas registradas de hace 2, 3 y 4 meses, pudiendo determinar sequías de corta duración y estimando mayor frecuencia temporal de sequía en el período 1962 – 2013. En este contexto, cabe destacar la escala temporal de acumulación del SPEI a 1 mes, que aunque se trata tam-

bién de una escala temporal a corto plazo, la más corta, ésta únicamente ha presentado las mayores correlaciones con el índice de sequía hidrológica SSI para 8 de las subcuencas de cabecera.

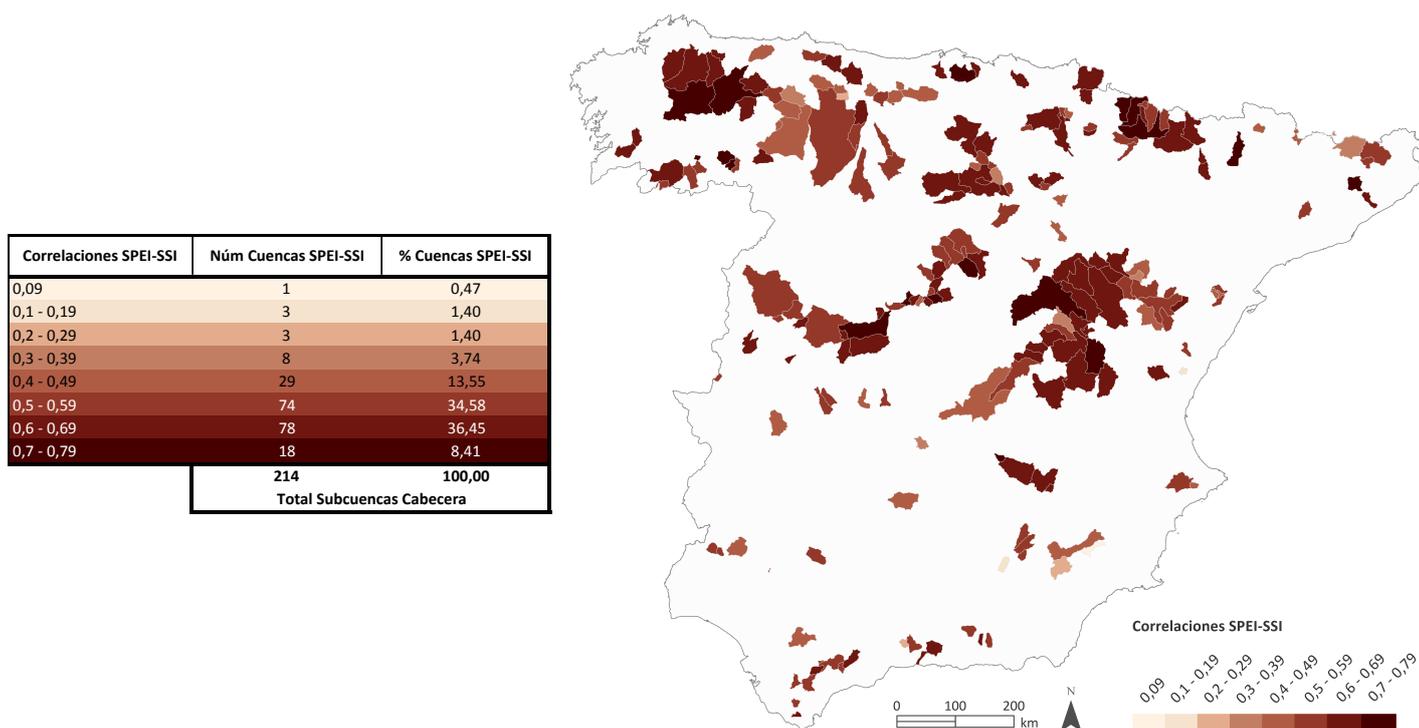
Para el resto, SPEI 5 – SPEI 48, se detecta que, individualmente la sequía hidrológica de pocas subcuencas responde a estas escalas temporales, destacando la escala SPEI 5 (10 subcuencas), pero observándolas en su conjunto se obtienen 69 subcuencas de cabecera representando el 32,24% respecto el total (figura IV.4).

En líneas generales, los resultados entre ambos índices de sequía climática han sido prácticamente iguales, respondiendo la sequía hidrológica a escalas temporales de acumulación de la anomalía climática principalmente a 2, 3 y 4 meses (63,09% con el índice SPI y 64,02% con el índice SPEI). La respuesta de la sequía hidrológica a las escalas temporales entre 5 y 48 meses también ha sido similar (33,64% con el índice SPI y 32,24% con el índice SPEI).

La distribución espacial de la respuesta del SSI a las escalas temporales del SPEI ha sido semejante a la obtenida a las escalas temporales del SPI, destacando la respuesta del SSI a las escalas temporales del SPEI entre 1 y 4 meses localizada en la zona norte de España y en la mayoría de las subcuencas de cabecera del Sistema Central, y la respuesta del SSI a las escalas temporales del SPEI entre 5 y 48 meses localizada básicamente en la parte central y sur del Sistema Ibérico, en la mayoría de las subcuencas de la Meseta Sur y en la Cordillera Subbética (figura IV.4). Asimismo, predomina la respuesta de las sequías hidrológicas a una acumulación de la anomalía del BHC de 2, 3 y 4 meses en costas levantinas, en la Cordillera Penibética, en la Depresión del Guadalquivir, en Sierra Morena y en el Valle del Tajo.

La figura IV.5 muestra los coeficientes de correlación más elevados que se han encontrado entre los índices SPEI y SSI a las escalas temporales anteriormente presentadas. Además, también muestra el número de cuencas que han registrado estos coeficientes y el porcentaje que representan respecto el total.

Figura IV.5. Tabla explicativa y cartografía de las correlaciones más elevadas entre los índices SPEI y SSI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)



Se han encontrado correlaciones positivas en todos los casos, tomando magnitudes entre 0,5 y 0,79 en un importante número de cuencas (79,44%), destacando que las correlaciones son fuertes y directas, y tanto más fuertes cuanto más se aproxime r a 1 (figura IV.5). Dentro de esta agrupación, el número de subcuencas obtenidas con magnitudes de correlación entre 0,5 y 0,59 entre los índices SPEI y SSI a las escalas temporales anteriormente presentadas, ha sido inferior que las obtenidas entre los índices SPI y SSI (83 subcuencas con el índice SPI y 74 subcuencas con el índice SPEI).

Para el resto de las subcuencas, una de ellas ha presentado la correlación más elevada entre los índices SPEI – SSI en 0,09, seis entre 0,1 y 0,29, ocho entre 0,3 – 0,39 y veintinueve entre 0,4 – 0,49, representando el 20,56% respecto el total, y destacando que las correlaciones son débiles si éstas toman magnitudes cercanas a 0 (figura IV.5).

A simple vista, los resultados entre ambos índices de sequía climática son muy similares, aunque se ha registrado un mayor número de cuencas con correlaciones de mayor magnitud (0,5 – 0,79) entre los índices SPEI y SSI (78,97% con el índice SPI y 79,44% con el índice SPEI).

De igual modo, en la cartografía (figura IV.5), las máximas correlaciones se encuentran localizadas por todo el territorio, no pudiendo relacionar ningún patrón espacial con las mismas. Aunque cabe señalar las subcuencas de cabecera localizadas en el Sistema Central y en el Sistema Ibérico, las cuales, comparando las cartografías de los coeficientes de correlación más elevados encontrados entre los índices SPI – SSI y SPEI – SSI a las escalas temporales presentadas, se detecta que son las que han presentado más variaciones entre ambos resultados con pequeñas diferencias en las magnitudes de correlación.

La figura IV.6 muestra una combinación de las dos anteriores (figuras IV.4 y IV.5), presentando los coeficientes de correlación más elevados encontrados entre los índices SPEI y SSI agrupados según la escala temporal en la cual se han obtenido. Además, también muestra el número de cuencas registradas y el porcentaje que representan respecto el total.

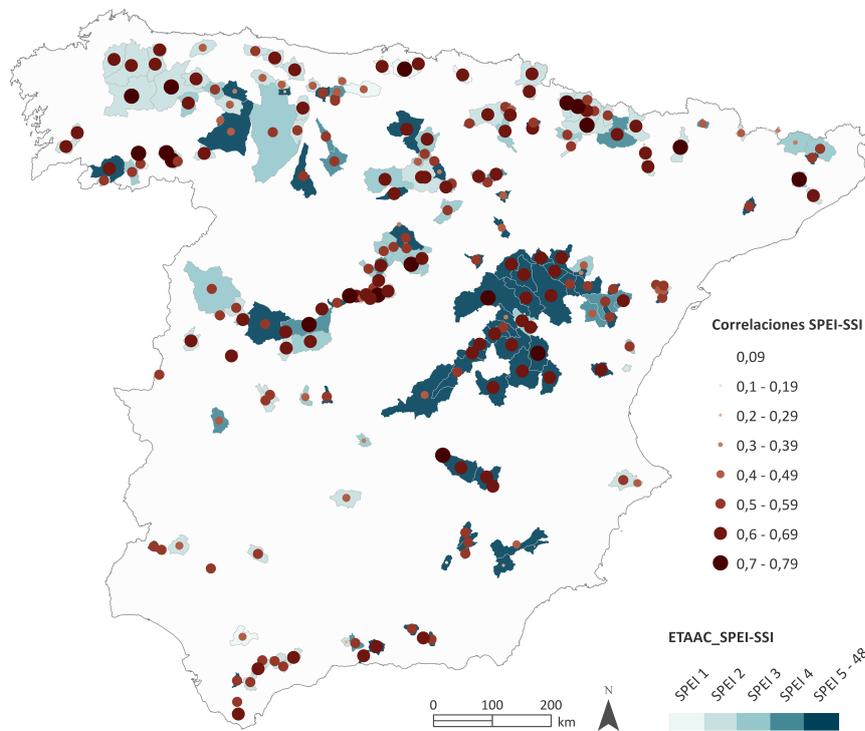
Figura IV.6. Tabla explicativa y cartografía de las correlaciones más elevadas entre los índices SPEI y SSI agrupadas según su escala temporal (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)

ETAAC_SPEI-SSI	Núm Cuencas SPEI-SSI	% Cuencas SPEI-SSI	Correlaciones SPEI-SSI	Núm Cuencas SPEI-SSI	% Cuencas SPEI-SSI
EtaacSPEI1	8	3,74	0,4 - 0,49	2	0,93
			0,5 - 0,59	1	0,47
			0,6 - 0,69	4	1,87
			0,7 - 0,79	1	0,47
EtaacSPEI2	78	36,45	0,1 - 0,19	2	0,93
			0,2 - 0,29	1	0,47
			0,3 - 0,39	1	0,47
			0,4 - 0,49	12	5,61
			0,5 - 0,59	23	10,75
			0,6 - 0,69	30	14,02
EtaacSPEI3	42	19,63	0,7 - 0,79	9	4,21
			0,3 - 0,39	2	0,93
			0,4 - 0,49	4	1,87
			0,5 - 0,59	18	8,41
EtaacSPEI4	17	7,94	0,6 - 0,69	14	6,54
			0,7 - 0,79	4	1,87
			0,4 - 0,49	5	2,34
			0,5 - 0,59	6	2,80
EtaacSPEI5	10	4,67	0,6 - 0,69	5	2,34
			0,7 - 0,79	1	0,47
			0,3 - 0,39	2	0,93
			0,5 - 0,59	6	2,80
EtaacSPEI6	6	2,80	0,6 - 0,69	1	0,47
			0,7 - 0,79	1	0,47
EtaacSPEI7	1	0,47	0,5 - 0,59	3	1,40
			0,6 - 0,69	3	1,40
			0,5 - 0,59	1	0,47

Aproximación al estudio de las sequías en las subcuencas de cabecera de la España peninsular

EtaacSPEI8	4	1,87	0,5 - 0,59	2	0,93
			0,6 - 0,69	2	0,93
EtaacSPEI9	5	2,34	0,4 - 0,49	2	0,93
			0,5 - 0,59	3	1,40
			0,3 - 0,39	1	0,47
EtaacSPEI10	6	2,80	0,5 - 0,59	2	0,93
			0,6 - 0,69	2	0,93
			0,7 - 0,79	1	0,47
EtaacSPEI11	6	2,80	0,4 - 0,49	1	0,47
			0,5 - 0,59	2	0,93
			0,6 - 0,69	3	1,40
EtaacSPEI12	3	1,40	0,3 - 0,39	1	0,47
			0,5 - 0,59	1	0,47
			0,6 - 0,69	1	0,47
EtaacSPEI13	2	0,93	0,4 - 0,49	1	0,47
			0,6 - 0,69	1	0,47
EtaacSPEI14	1	0,47	0,2 - 0,29	1	0,47
EtaacSPEI16	2	0,93	0,5 - 0,59	1	0,47
			0,6 - 0,69	1	0,47
EtaacSPEI17	2	0,93	0,09	1	0,47
			0,7 - 0,79	1	0,47
EtaacSPEI20	1	0,47	0,5 - 0,59	1	0,47
EtaacSPEI22	1	0,47	0,6 - 0,69	1	0,47
EtaacSPEI23	1	0,47	0,6 - 0,69	1	0,47
EtaacSPEI24	3	1,40	0,6 - 0,69	3	1,40
EtaacSPEI27	1	0,47	0,4 - 0,49	1	0,47
EtaacSPEI28	1	0,47	0,5 - 0,59	1	0,47
EtaacSPEI29	1	0,47	0,1 - 0,19	1	0,47
EtaacSPEI30	3	1,40	0,6 - 0,69	3	1,40
EtaacSPEI36	1	0,47	0,5 - 0,59	1	0,47
EtaacSPEI39	1	0,47	0,6 - 0,69	1	0,47
EtaacSPEI40	1	0,47	0,6 - 0,69	1	0,47
EtaacSPEI41	2	0,93	0,3 - 0,39	1	0,47
			0,5 - 0,59	1	0,47
EtaacSPEI44	1	0,47	0,6 - 0,69	1	0,47
EtaacSPEI45	1	0,47	0,5 - 0,59	1	0,47
EtaacSPEI47	1	0,47	0,2 - 0,29	1	0,47
EtaacSPEI48	1	0,47	0,4 - 0,49	1	0,47

214 100,00
Total Subcuencas Cabecera



Teniendo en cuenta las correlaciones de una magnitud entre 0,5 y 0,79, éstas han aparecido en 27 escalas temporales utilizadas para el análisis (32), mientras que las correlaciones inferiores han aparecido en 17 (figura IV.6). Asimismo, 15 escalas temporales han presentado correlaciones de magnitud únicamente entre 0,5 y 0,69, ninguna ha presentado correlaciones de magnitud únicamente entre 0,7 y 0,79, y cinco de ellas han presentado correlaciones de magnitud inferiores o iguales a 0,4 – 0,49, destacando SPEI 17 con $r = 0,09$ como coeficiente de correlación de mayor magnitud obtenido para una de las subcuencas resultado de las correlaciones encontradas entre los índices SPEI y SSI, y también con $r \geq 0,7$ para otra de las subcuencas.

Finalmente se puede apreciar que, considerando las correlaciones con magnitudes a partir de 0,5, este grado de relación entre los índices SPEI y SSI se registra tanto en escalas temporales a corto, medio y largo plazo (figura IV.6). Además, a menos subcuencas registradas para una escala temporal determinada mayor ha sido la correlación obtenida (iguales o superiores a 0,5), mezclándose muy poco con correlaciones inferiores o iguales a 0,4 – 0,49, viéndose estos resultados de forma más evidente en las escalas temporales más largas.

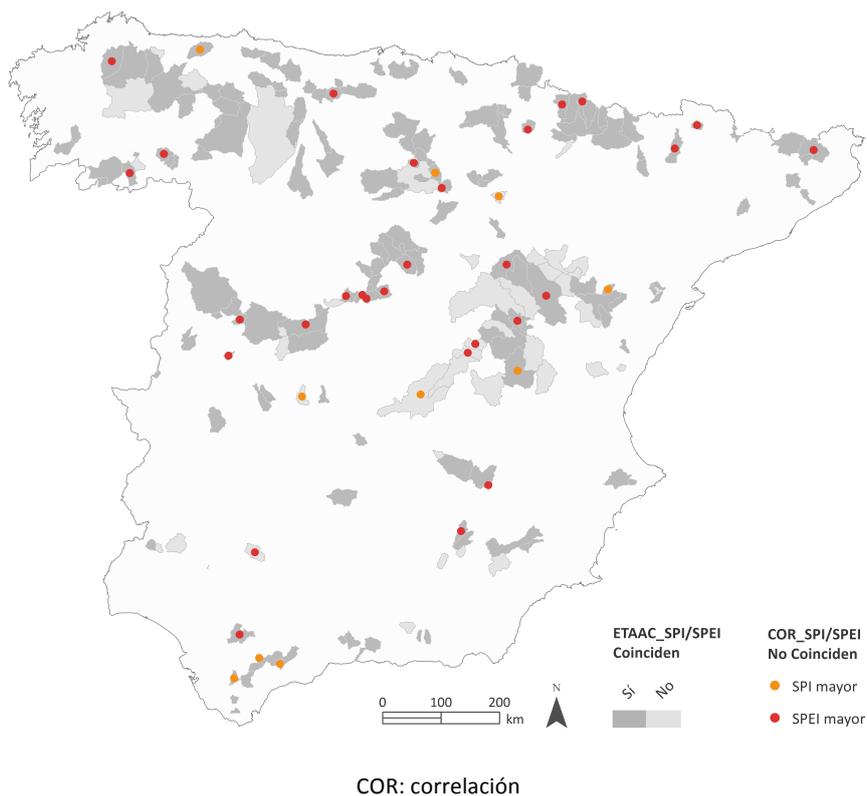
Los resultados entre ambos índices de sequía climática son muy similares en cualquiera de los casos, no apreciándose grandes diferencias entre ellos: se ha comprobado que la sequía hidrológica responde a escalas temporales de acumulación de la anomalía climática principalmente más cortas (2, 3 y 4 meses), tomando magnitudes de correlación del orden entre 0,5 y 0,79 en un importante número de cuencas registradas tanto en escalas temporales a corto, medio y largo plazo.

En la cartografía de la figura IV.6 es posible distinguir sobre el territorio que, independientemente de la escala temporal del SPEI que ha presentado las correlaciones de mayor magnitud con el índice SSI y de su localización, éstas tienden a ser fuertes en la mayoría de las subcuencas de cabecera analizadas (iguales o superiores a 0,5), destacando, igualmente que en los resultados obtenidos con el índice SPI, las subcuencas más occidentales y septentrionales, las del interior de Cataluña, las del Sistema Ibérico, el Sistema Central, la Meseta Sur y las de la Cordillera Penibética, aunque obteniendo magnitudes de correlación más elevadas entre los índices SPEI y SSI en algunas de estas subcuencas.

La figura IV.7 muestra las coincidencias de las escalas temporales de acumulación de la anomalía climática y de las correlaciones obtenidas entre ambos índices de sequía climática, resultado de las máximas correlaciones encontradas con el índice de sequía hidrológica.

Figura IV.7. Tabla explicativa y cartografía de las coincidencias de las escalas temporales y de las correlaciones entre los índices SPI – SSI y SPEI – SSI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)

	Núm Cuencas	% Cuencas		Núm Cuencas	% Cuencas	Correlaciones
ETAAC SPI/SPEI Coinciden Sí =	170	79,44				
ETAAC SPI/SPEI Coinciden No =	44	20,56				
COR SPI/SPEI Coinciden Sí =	175	81,78				
COR SPI/SPEI Coinciden No =	39	18,22				
			COR SPI mayor de 0,1 =	10	4,67	= 0,3 - 0,4 - 0,5 - 0,6 - 0,7
			COR SPEI mayor de 0,1 =	29	13,55	



Resultado de las máximas correlaciones encontradas con el índice SSI en las subcuencas de cabecera, en primer lugar se observa que 170 subcuencas coinciden en escala temporal del SPI y del SPEI representando el 79,44% respecto el total, y en segundo lugar, que la magnitud de las correlaciones ha coincidido en 175 subcuencas representando el 81,78% respecto el total (figura IV.7). Por tanto, aparte de que es posible afirmar la predominancia correlacional entre los índices SPI – SSI y SPEI – SSI, también es posible afirmar la relación existente entre los dos índices de sequía climática, tanto en cuanto a la escalas temporales que han presentado las correlaciones de mayor magnitud con el índice SSI, como a los coeficientes de correlación registrados entre los índices.

Centrando el análisis de la figura IV.7 en las subcuencas en las que no coincide la magnitud de correlación de los índices climáticos (39), se ha obtenido que el 13,55% presentan una magnitud de correlación más elevada entre los índices SPEI – SSI, mientras que el 4,67% de las subcuencas presentan magnitudes de correlación superiores entre los índices SPI – SSI. Estas diferencias entre los coeficientes de correlación obtenidos entre los índices han sido de 0,1 entre los intervalos a partir de correlaciones de 0,3.

En la cartografía de la figura IV.7, se distingue que las coincidencias entre las escalas temporales de los índices SPI y SPEI no responden a ningún patrón espacial concreto, aunque sí se detecta que la mayoría de las subcuencas localizadas en costas cantábricas y en la Cordillera Cantábrica, en la zona pirenaica, en el Sistema Central y en la Cordillera Penibética coinciden en la respuesta temporal de las sequías hidrológicas a las condiciones climáticas registradas por los índices SPI y SPEI.

Asimismo, contrastando las diferencias espaciales de los coeficientes de correlación obtenidos entre los índices SPI – SSI y SPEI – SSI, son en el Sistema Central y en el Sistema Ibérico en donde se han encontrado más variaciones entre ambos resultados, predominando magnitudes de correlación superiores entre los índices SPEI – SSI (figura IV.7). Por el contrario, destacar las subcuencas de la Cordillera Penibética, que allí donde existen diferencias entre los coeficientes de correlación predominan los obtenidos entre los índices

ces SPI – SSI. Las subcuencas que no tienen implantación puntual han registrado coincidencias entre las correlaciones obtenidas entre los índices SPI – SSI y SPEI – SSI (175).

Finalmente, la tabla IV.8 indica las escalas temporales de los índices SPI y SPEI que han sido descartadas por no haber presentado las correlaciones más elevadas con el índice de sequía hidrológica SSI: la sequía hidrológica no responde a estas escalas temporales de acumulación y por tanto tampoco a las condiciones climáticas registradas en estos períodos. Cabe señalar que no se ha descartado ninguna escala temporal a corto plazo.

Tabla IV.8. Escalas temporales de acumulación de la anomalía climática de los índices SPI y SPEI descartadas (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)

ETAAC_SPI-SSI	ETAAC_SPEI-SSI
15	15
18	18
	19
	21
25	25
	26
27	
29	
31	31
32	32
33	33
34	34
35	35
37	37
38	38
42	42
43	43
44	
45	
46	46
47	

Resultados objetivo 1b

Relacionado con el objetivo anterior, analizar en qué medida la relación entre los índices de sequía climática e hidrológica varía según los distintos tipos de vegetación y valores de actividad vegetal NDVI. Para este objetivo se formula la siguiente hipótesis: la vegetación interfiere en las relaciones entre las sequías climáticas e hidrológicas, presentando las correlaciones encontradas diferencias en función del tipo de vegetación y de la actividad vegetal.

Para este análisis se han utilizado las escalas temporales consideradas en el objetivo anterior, siendo las que presentaron las máximas correlaciones con el índice SSI. Dichas escalas se han correlacionado con la del NDVI para analizar las diferencias que se registran en las relaciones entre las sequías climáticas e hidrológicas en función de la actividad vegetal. Además, teniendo en cuenta las escalas temporales utilizadas (de 1 a 48 meses), éstas se han correlacionado con la del NDVI, reservando las de mayor correlación entre los índices SPI – NDVI y SPEI – NDVI. De este modo se comparan ambas aproximaciones para saber si son coincidentes o no, y realizar el análisis en función de las escalas temporales que mayores correlaciones han presentado con el NDVI. También se correlacionan las series del índice SSI con las del NDVI.

Una vez extraídos los resultados de ambas aproximaciones se han comparado, y la primera, considerando las mismas escalas temporales que en el objetivo anterior, ha sido descartada por no ser las que han presentado las correlaciones máximas con el NDVI. Asimismo, a partir de las escalas temporales presentadas anteriormente, las magnitudes de correlación obtenidas entre los índices SPI – NDVI y SPEI – NDVI han estado muy por debajo que las registradas entre los índices SPI – SSI y SPEI – SSI, siendo más elevadas las obtenidas a través del análisis de correlación entre los índices SSI – NDVI que las obtenidas entre los índices SPI – NDVI y SPEI – NDVI.

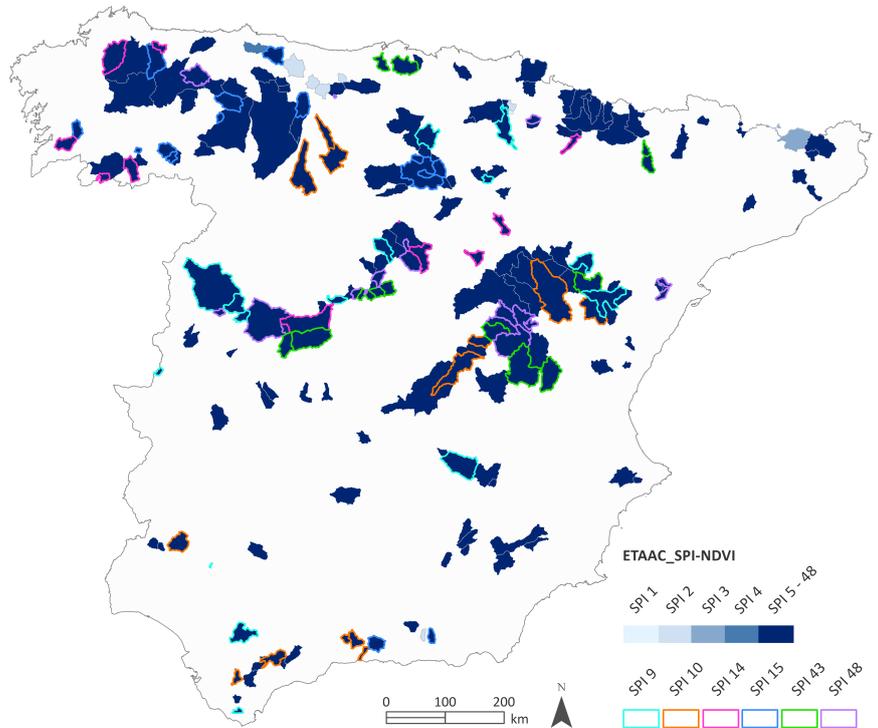
Por consiguiente, a continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de la segunda aproximación, considerando las escalas temporales de los índices SPI y SPEI de 1 a 48 meses que mayores correlaciones han presentado con el NDVI. De este modo se puede valorar si la actividad vegetal responde a escalas temporales de sequía climática más largas que la sequía hidrológica. Así, aunque se ha obtenido que la relación existente entre los índices de sequía climática e hidrológica varía en función de la actividad vegetal, además se pueden determinar las escalas temporales de respuesta más características de la actividad vegetal NDVI a las sequías climáticas y compararlas con los tiempos de respuesta de las sequías hidrológicas, profundizando más en cuanto a las diferencias encontradas en función de la actividad vegetal y saber con más exactitud en qué medida esa relación varía añadiendo la actividad vegetal NDVI, además de conocer la influencia de las sequías climáticas. En cualquiera de los casos se consideran las magnitudes de correlación entre los índices SSI – NDVI. Cabe indicar que el conjunto de datos NDVI está estandarizado y desestacionalizado (sNDVI) con el fin de que las series sean comparables (se ha eliminado la estacionalidad porque en verano siempre hay más actividad vegetal que en invierno, independientemente de las anomalías climáticas).

Finalmente se añaden las coberturas del suelo del CLC 1990, 2000, 2006 y 2012 al análisis, para analizar las diferencias que se registran en las relaciones entre las sequías climáticas e hidrológicas en función de la actividad vegetal y del tipo de vegetación.

La figura IV.9 muestra las escalas temporales de acumulación de la anomalía de precipitación del índice de sequía climática SPI que han presentado las correlaciones de mayor magnitud con el NDVI. Además, también muestra el número de cuencas que han registrado la máxima correlación para cada una de ellas y el porcentaje que representan respecto el total.

Figura IV.9. Tabla explicativa y cartografía de las escalas temporales de acumulación de la anomalía de precipitación del índice SPI con mayor correlación con el NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)

ETAAC_SPI-NDVI	Núm Cuencas SPI-NDVI	% Cuencas SPI-NDVI
EtaacSPI1	1	0,47
EtaacSPI2	6	2,80
EtaacSPI3	3	1,40
EtaacSPI4	1	0,47
EtaacSPI5	5	2,34
EtaacSPI6	8	3,74
EtaacSPI7	3	1,40
EtaacSPI8	6	2,80
EtaacSPI9	15	7,01
EtaacSPI10	13	6,07
EtaacSPI11	7	3,27
EtaacSPI12	8	3,74
EtaacSPI13	6	2,80
EtaacSPI14	12	5,61
EtaacSPI15	15	7,01
EtaacSPI16	3	1,40
EtaacSPI18	1	0,47
EtaacSPI20	5	2,34
EtaacSPI22	3	1,40
EtaacSPI23	8	3,74
EtaacSPI24	2	0,93
EtaacSPI25	2	0,93
EtaacSPI26	1	0,47
EtaacSPI31	1	0,47
EtaacSPI32	1	0,47
EtaacSPI33	5	2,34
EtaacSPI34	9	4,21
EtaacSPI35	2	0,93
EtaacSPI36	1	0,47
EtaacSPI38	1	0,47
EtaacSPI40	2	0,93
EtaacSPI41	1	0,47
EtaacSPI42	4	1,87
EtaacSPI43	15	7,01
EtaacSPI44	6	2,80
EtaacSPI45	7	3,27
EtaacSPI46	4	1,87
EtaacSPI47	3	1,40
EtaacSPI48	18	8,41
Total Subcuencas Cabecera	214	100,00



Se observa que las escalas temporales del SPI a corto plazo ya no tienen la relevancia que habían tenido puestas en relación con el índice de sequía hidrológica SSI (figura IV.9). Por el contrario, correlacionándolas con el NDVI, se obtiene que son algunas de las de a medio y largo plazo las que más se han presentado en los resultados (SPI 9, SPI 10, SPI 14, SPI 15, SPI 43 y SPI 48), representando el 41,12% respecto el total con 88 subcuencas de cabecera analizadas.

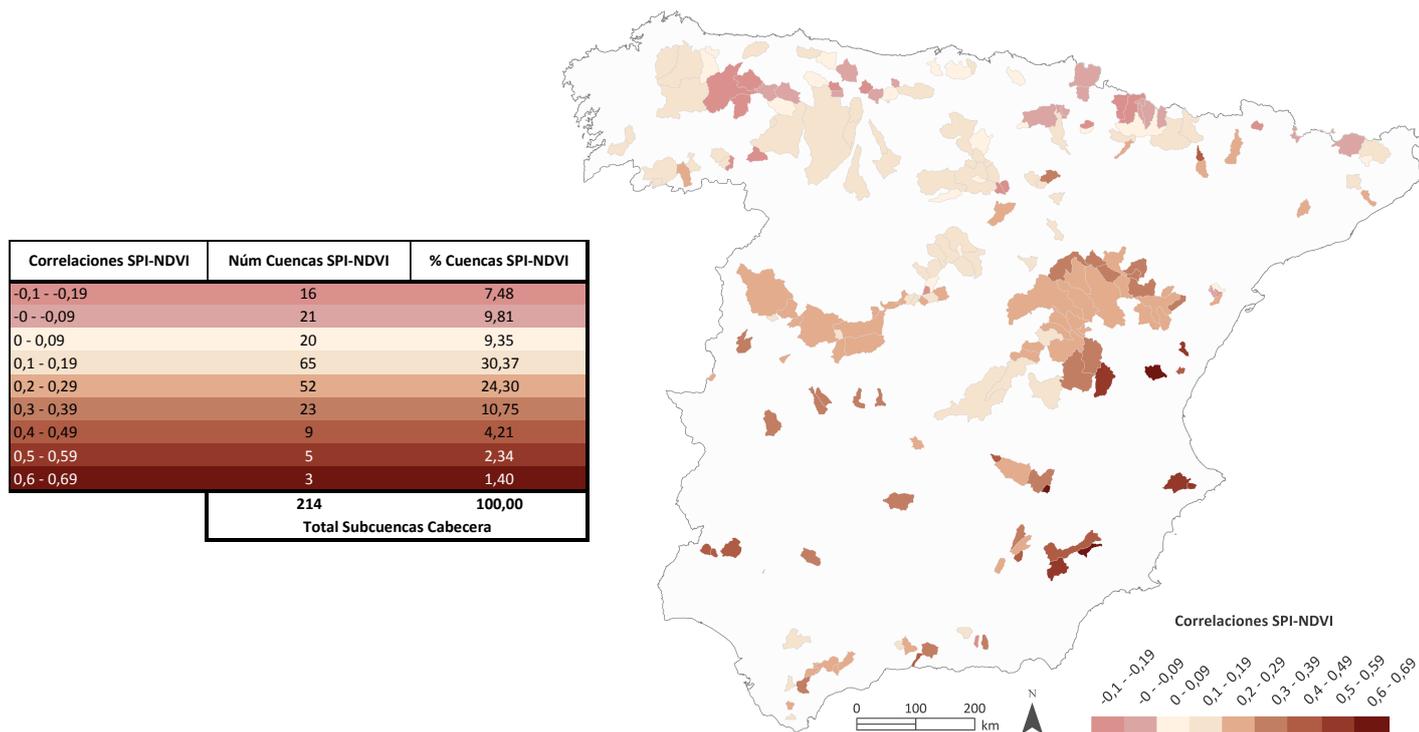
Como se aprecia en la figura IV.9, los resultados ofrecen una mayor distribución correlacional entre las diferentes escalas temporales del SPI y el NDVI, destacando las de a medio y largo plazo. Esto significa que, mayoritariamente, en subcuencas de cabecera el NDVI responde a escalas temporales de acumulación de la anomalía de precipitación más largas, acumulando la anomalía en esos períodos, pudiendo determinar sequías de mayor duración —déficit hídrico mayor y más prolongado de manera continuada en el tiempo— y estimando menor frecuencia temporal de sequía en el período 1981 – 2013.

En la cartografía (figura IV.9), destacar que la respuesta del NDVI a las escalas temporales del SPI más cortas se localiza en algunas de las subcuencas de la Cordillera Cantábrica, del Pirineo catalán y en la parte noreste de la Cordillera Penibética. Asimismo, indicar que la respuesta a las escalas temporales predominantes (SPI 9, SPI 10, SPI 14, SPI 15, SPI 43 y SPI 48) se presenta principalmente en subcuencas de la zona

central y noroeste de España, del Sistema Central, del Sistema Ibérico, de la Meseta Sur y de la Cordillera Penibética, y en unas pocas repartidas entre la Depresión del Guadalquivir, Sierra Morena y el Valle del Tajo.

La figura IV.10 muestra los coeficientes de correlación más elevados que se han encontrado entre los índices SPI y NDVI a las escalas temporales anteriormente presentadas. Además, también muestra el número de cuencas que han registrado estos coeficientes y el porcentaje que representan respecto el total.

Figura IV.10. Tabla explicativa y cartografía de las correlaciones más elevadas entre los índices SPI y NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)



Se han encontrado correlaciones positivas en la mayoría de los casos, tomando magnitudes entre 0 y 0,69 (82,71%), y no destacan las correlaciones fuertes, representando el 3,74% con magnitudes entre 0,5 y 0,69 (figura IV.10). Así pues, para el 78,97% de las subcuencas se han encontrado correlaciones con magnitudes entre 0 y 0,49, destacando que las correlaciones son débiles y directas, y tanto más débiles cuanto más se aproxime r a 0.

Cabe señalar que se han encontrado correlaciones negativas en el 17,29% de las subcuencas, tomando magnitudes entre -0,19 y -0, destacando que las correlaciones son débiles e inversas, y tanto más débiles cuanto más se aproxime r a -0 (figura IV.10).

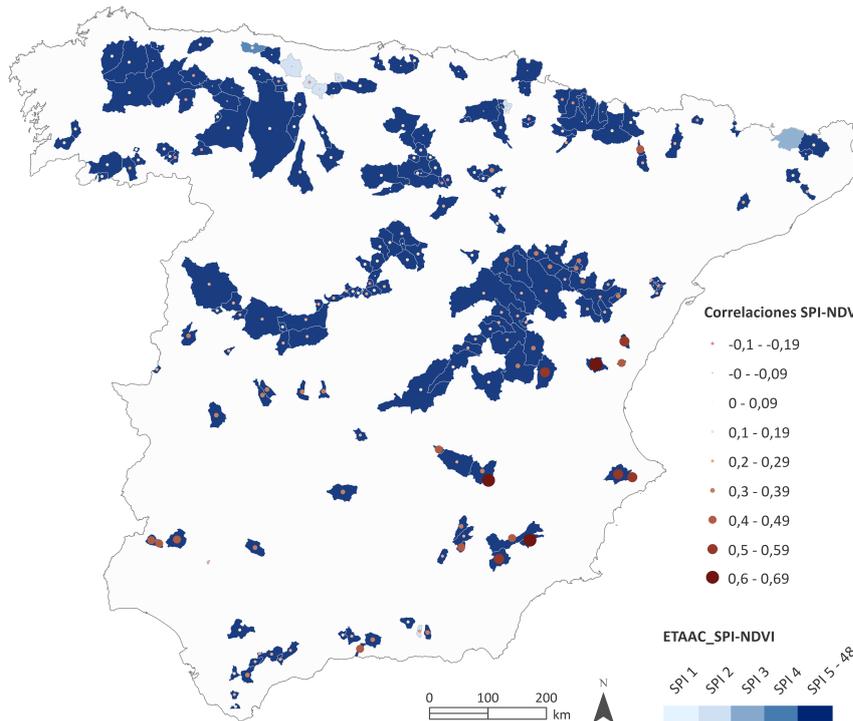
En la cartografía (figura IV.10), las máximas correlaciones se encuentran localizadas en algunas de las subcuencas de las costas levantinas, del Sistema Ibérico, de la Meseta Sur y de la Cordillera Subbética, seguidamente de Sierra Morena y del Valle del Tajo.

La figura IV.11 muestra una combinación de las dos anteriores (figuras IV.9 y IV.10), presentando los coeficientes de correlación más elevados encontrados entre los índices SPI y NDVI agrupados según la escala temporal en la cual se han obtenido. Además, también muestra el número de cuencas registradas y el porcentaje que representan respecto el total.

Figura IV.11. Tabla explicativa y cartografía de las correlaciones más elevadas entre los índices SPI y NDVI agrupadas según su escala temporal (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)

ETAAC_SPI-NDVI	Núm Cuencas SPI-NDVI	% Cuencas SPI-NDVI	Correlaciones SPI-NDVI	Núm Cuencas SPI-NDVI	% Cuencas SPI-NDVI
EtaacSPI1	1	0,47	-0 - -0,09	1	0,47
EtaacSPI2	6	2,80	-0,1 - -0,19	2	0,93
EtaacSPI3	3	1,40	-0 - -0,09	4	1,87
EtaacSPI4	1	0,47	0,1 - 0,19	3	1,40
EtaacSPI5	5	2,34	-0,1 - -0,19	1	0,47
EtaacSPI6	8	3,74	-0 - -0,09	4	1,87
EtaacSPI7	3	1,40	-0,1 - -0,19	4	1,87
EtaacSPI8	6	2,80	-0 - -0,09	1	0,47
EtaacSPI9	15	7,01	0 - 0,09	2	0,93
EtaacSPI10	13	6,07	0,1 - 0,19	1	0,47
EtaacSPI11	7	3,27	0,1 - 0,19	1	0,47
EtaacSPI12	8	3,74	0,2 - 0,29	1	0,47
EtaacSPI13	6	2,80	0,2 - 0,29	1	0,47
EtaacSPI14	12	5,61	0,3 - 0,39	1	0,47
EtaacSPI15	15	7,01	0 - 0,09	1	0,47
EtaacSPI16	3	1,40	0,1 - 0,19	8	3,74
EtaacSPI18	1	0,47	0,1 - 0,19	1	0,47
EtaacSPI20	5	2,34	0,2 - 0,29	1	0,47
EtaacSPI22	3	1,40	0,3 - 0,39	6	2,80
EtaacSPI23	8	3,74	0,3 - 0,39	5	2,34
EtaacSPI24	2	0,93	0,4 - 0,49	2	0,93
EtaacSPI25	2	0,93	0 - 0,09	2	0,93
EtaacSPI26	1	0,47	0,1 - 0,19	2	0,93
EtaacSPI31	1	0,47	0,2 - 0,29	1	0,47
EtaacSPI32	1	0,47	0,3 - 0,39	1	0,47
EtaacSPI33	5	2,34	0,4 - 0,49	1	0,47
EtaacSPI34	9	4,21	0,5 - 0,59	1	0,47
EtaacSPI35	2	0,93	0,1 - 0,19	2	0,93
EtaacSPI36	1	0,47	0,3 - 0,39	1	0,47
EtaacSPI38	1	0,47	0,4 - 0,49	1	0,47
EtaacSPI40	2	0,93	0,5 - 0,59	1	0,47
EtaacSPI41	1	0,47	0,1 - 0,19	2	0,93
EtaacSPI42	4	1,87	0,2 - 0,29	2	0,93
EtaacSPI43	15	7,01	0,3 - 0,39	1	0,47

EtaacSPI44	6	2,80	0,1 - 0,19	1	0,47
			0,2 - 0,29	4	1,87
			0,3 - 0,39	1	0,47
EtaacSPI45	7	3,27	0,1 - 0,19	2	0,93
			0,2 - 0,29	3	1,40
			0,3 - 0,39	2	0,93
EtaacSPI46	4	1,87	0 - 0,09	1	0,47
			0,2 - 0,29	2	0,93
			0,3 - 0,39	1	0,47
EtaacSPI47	3	1,40	0 - 0,09	1	0,47
			0,1 - 0,19	1	0,47
			0,3 - 0,39	1	0,47
EtaacSPI48	18	8,41	-0,1 - -0,19	2	0,93
			0 - 0,09	4	1,87
			0,1 - 0,19	5	2,34
			0,2 - 0,29	7	3,27
214		100,00	Total Subcuencas Cabecera		



Teniendo en cuenta las correlaciones de una magnitud entre 0,5 y 0,69, éstas han aparecido en seis escalas temporales utilizadas para el análisis (39) (SPI 23, SPI 32, SPI 33, SPI 34, SPI 42 y SPI 43), señalando que se tratan de las más largas, mientras que las correlaciones inferiores han aparecido en 38 (figura IV.11). Asimismo, una escala temporal ha presentado correlaciones de magnitud únicamente entre 0,6 y 0,69 (SPI 32).

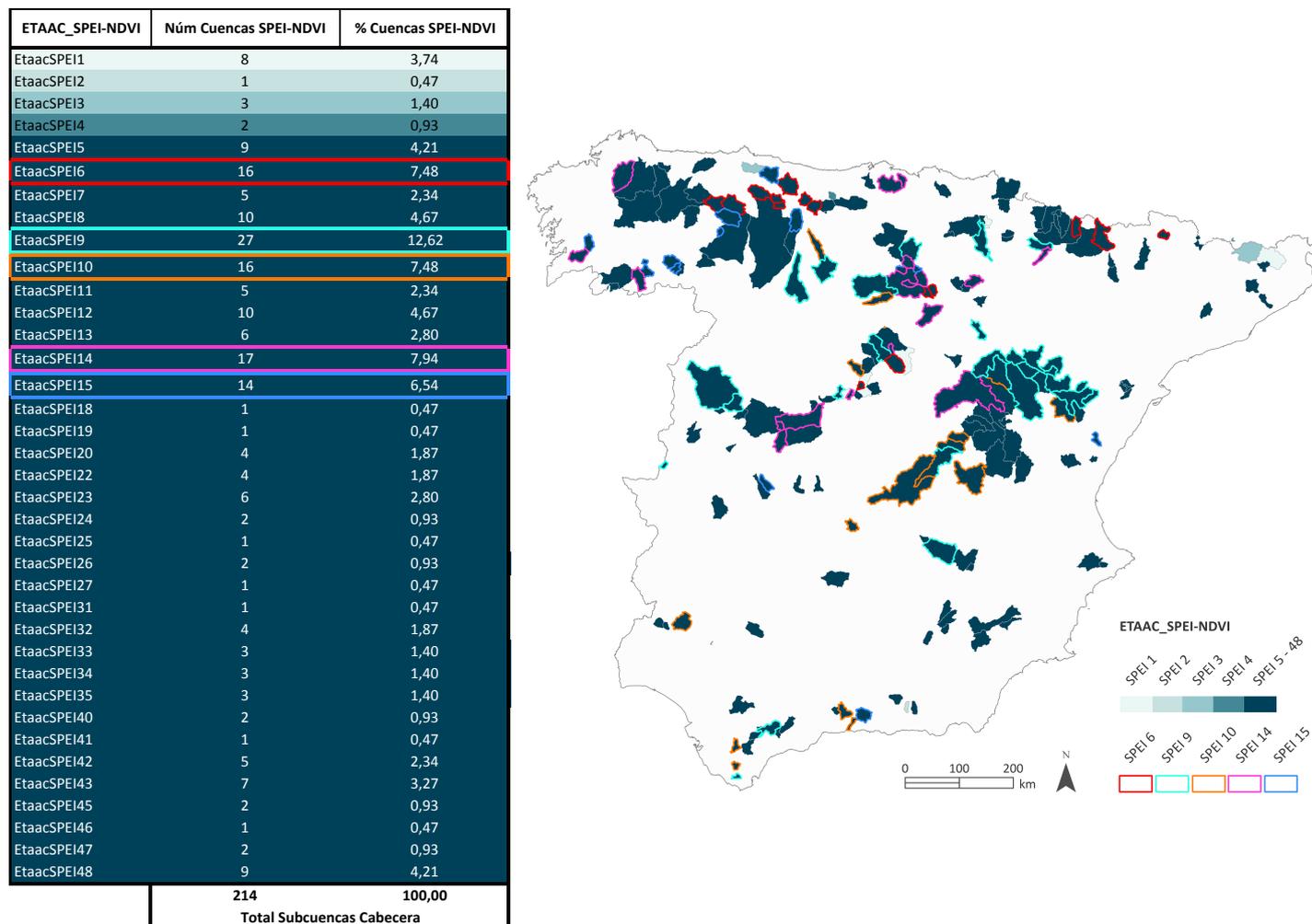
Las correlaciones negativas se han encontrado en doce escalas temporales del SPI, concentradas en escalas temporales cortas (SPI 1, SPI 2, SPI 3, SPI 5, SPI 6, SPI 7 y SPI 8) y más largas (SPI 24, SPI 40, SPI 41, SPI 42 y SPI 48) (figura IV.11).

En la cartografía de la figura IV.11 es posible distinguir sobre el territorio que, independientemente de la escala temporal del SPI que ha presentado las correlaciones de mayor magnitud con el NDVI y de su localización, éstas tienden a ser débiles en la mayoría de las subcuencas de cabecera analizadas. Las correlaciones más fuertes (0,5 – 0,69) se localizan en las subcuencas de la zona este y sureste de la España peninsular.

La figura IV.12 muestra las escalas temporales de acumulación de la anomalía del BHC del índice de sequía climática SPEI que han presentado las correlaciones de mayor magnitud con el NDVI. Además, tam-

bién muestra el número de cuencas que han registrado la máxima correlación para cada una de ellas y el porcentaje que representan respecto el total.

Figura IV.12. Tabla explicativa y cartografía de las escalas temporales de acumulación de la anomalía del BHC del índice SPEI con mayor correlación con el NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)



Del mismo modo que con el índice SPI, las escalas temporales del SPEI más cortas tampoco tienen la relevancia que habían tenido puestas en relación con el índice SSI (figura IV.12). Por el contrario, correlacionándolas con el NDVI y en comparación con el SPI, se obtiene que son las de a 6 meses, 9, 10, 14 y 15 las que más se han presentado en los resultados (42,06%), siendo éstas más cortas que las obtenidas a través del análisis de correlación con el índice SPI (SPI 9, SPI 10, SPI 14, SPI 15, SPI 43 y SPI 48, representando el 41,12%).

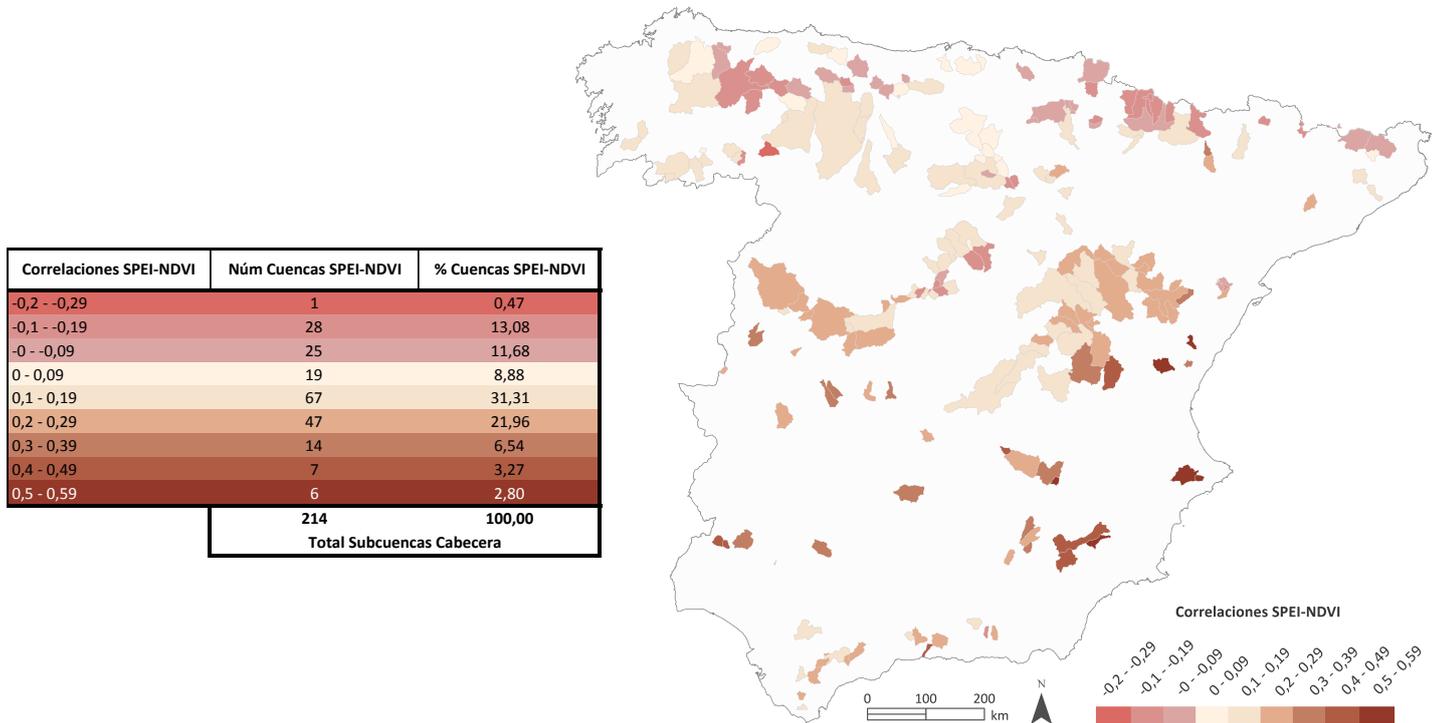
Como se aprecia en la figura IV.12, los resultados ofrecen una mayor distribución correlacional entre las diferentes escalas temporales del SPEI y el NDVI, destacando las escalas temporales medias. Esto significa que, mayoritariamente, en subcuencas de cabecera el NDVI responde a escalas temporales de acumulación de la anomalía del BHC más largas que el índice SSI, pero más cortas que las obtenidas a través del análisis de correlación entre el SPI y el NDVI para el período 1981 – 2013.

En la cartografía (figura IV.12), destacar que, de manera similar que la respuesta temporal del NDVI al SPI, la respuesta del NDVI a las escalas temporales del SPEI más cortas se localiza en algunas de las sub-

cuencas de la Cordillera Cantábrica, del Pirineo catalán y en la parte noreste de la Cordillera Penibética, además de en el Sistema Central. Asimismo, indicar que la respuesta a las escalas temporales predominantes (SPEI 6, SPEI 9, SPEI 10, SPEI 14 y SPEI 15) se presenta principalmente en subcuencas de la zona central y noroeste de España, del Sistema Central, del Sistema Ibérico, de la Meseta Sur y de la Cordillera Penibética, además de en los Pirineos aragoneses, y en unas pocas repartidas entre Sierra Morena y el Valle del Tajo.

La figura IV.13 muestra los coeficientes de correlación más elevados que se han encontrado entre los índices SPEI y NDVI a las escalas temporales anteriormente presentadas. Además, también muestra el número de cuencas que han registrado estos coeficientes y el porcentaje que representan respecto el total.

Figura IV.13. Tabla explicativa y cartografía de las correlaciones más elevadas entre los índices SPEI y NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)



Se han encontrado correlaciones positivas en la mayoría de los casos, tomando magnitudes entre 0 y 0,59 (74,77%) —con el índice SPI se encontraron magnitudes entre 0 y 0,69 para el 82,71% de las subcuencas—, y no destacan las correlaciones fuertes, representando el 2,80% con magnitudes entre 0,5 y 0,59 (figura IV.13). Así pues, para el 71,97% de las subcuencas se han encontrado correlaciones con magnitudes entre 0 y 0,49, destacando que las correlaciones son débiles y directas.

Asimismo, se han encontrado correlaciones negativas en el 25,23% de las subcuencas, tomando magnitudes entre -0,29 y -0 (17,29% con magnitudes entre -0,19 y -0 con el índice SPI), destacando que las correlaciones son débiles e inversas (figura IV.13).

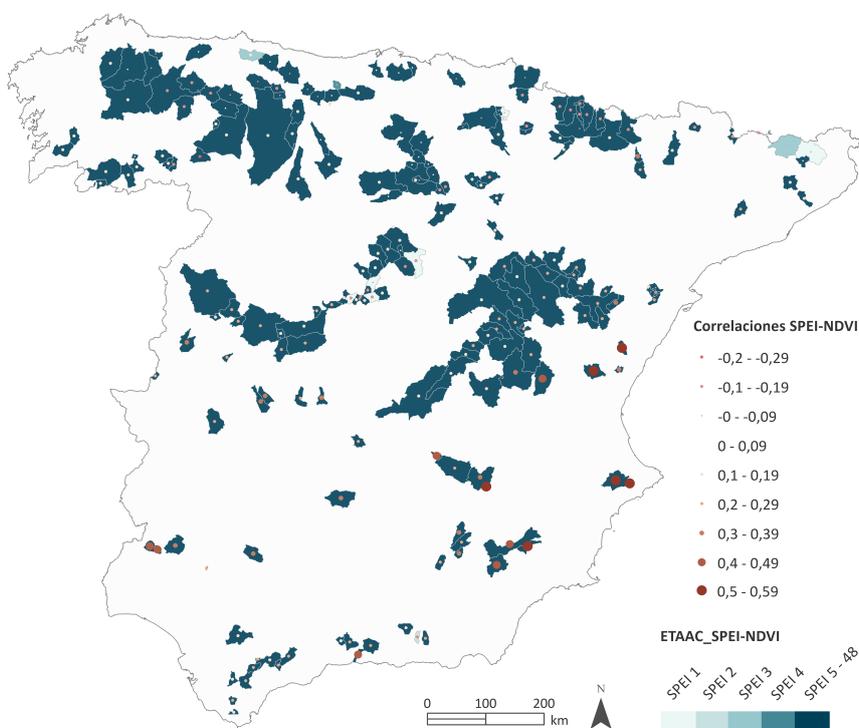
De igual modo, en la cartografía (figura IV.13), las máximas correlaciones se encuentran localizadas en algunas de las subcuencas de las costas levantinas, del Sistema Ibérico, de la Meseta Sur y de la Cordillera Subbética, seguidamente de Sierra Morena y del Valle del Tajo, destacando el Sistema Ibérico con magnitudes de correlación SPEI – NDVI más bajas que las obtenidas con el índice SPI.

La figura IV.14 muestra una combinación de las dos anteriores (figuras IV.12 y IV.13), presentando los coeficientes de correlación más elevados encontrados entre los índices SPEI y NDVI agrupados según la escala temporal en la cual se han obtenido. Además, también muestra el número de cuencas registradas y el porcentaje que representan respecto el total.

Figura IV.14. Tabla explicativa y cartografía de las correlaciones más elevadas entre los índices SPEI y NDVI agrupadas según su escala temporal (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)

ETAAC_SPEI-NDVI	Núm Cuencas SPEI-NDVI	% Cuencas SPEI-NDVI	Correlaciones SPEI-NDVI	Núm Cuencas SPEI-NDVI	% Cuencas SPEI-NDVI
EtaacSPEI1	8	3,74	-0,1 - -0,19	4	1,87
			-0 - -0,09	4	1,87
EtaacSPEI2	1	0,47	-0,1 - -0,19	1	0,47
EtaacSPEI3	3	1,40	-0,1 - -0,19	1	0,47
			-0 - -0,09	1	0,47
			0,1 - 0,19	1	0,47
EtaacSPEI4	2	0,93	-0 - -0,09	2	0,93
EtaacSPEI5	9	4,21	-0,1 - -0,19	5	2,34
			-0 - -0,09	4	1,87
EtaacSPEI6	16	7,48	-0,1 - -0,19	9	4,21
			-0 - -0,09	7	3,27
EtaacSPEI7	5	2,34	-0,1 - -0,19	1	0,47
			-0 - -0,09	1	0,47
			0,1 - 0,19	1	0,47
			0,2 - 0,29	1	0,47
EtaacSPEI8	10	4,67	0,3 - 0,39	1	0,47
			0,1 - 0,19	4	1,87
			0,2 - 0,29	6	2,80
			0 - 0,09	1	0,47
EtaacSPEI9	27	12,62	0,1 - 0,19	12	5,61
			0,2 - 0,29	13	6,07
			0,3 - 0,39	1	0,47
EtaacSPEI10	16	7,48	0 - 0,09	2	0,93
			0,1 - 0,19	7	3,27
			0,2 - 0,29	5	2,34
			0,3 - 0,39	1	0,47
EtaacSPEI11	5	2,34	0,4 - 0,49	1	0,47
			0 - 0,09	1	0,47
			0,1 - 0,19	3	1,40
			0,2 - 0,29	1	0,47
EtaacSPEI12	10	4,67	0,1 - 0,19	7	3,27
			0,2 - 0,29	2	0,93
			0,3 - 0,39	1	0,47
EtaacSPEI13	6	2,80	0 - 0,09	1	0,47
			0,1 - 0,19	5	2,34
EtaacSPEI14	17	7,94	0 - 0,09	5	2,34
			0,1 - 0,19	10	4,67
			0,2 - 0,29	2	0,93
EtaacSPEI15	14	6,54	0 - 0,09	5	2,34
			0,1 - 0,19	6	2,80
			0,2 - 0,29	1	0,47
			0,3 - 0,39	1	0,47
EtaacSPEI18	1	0,47	0,5 - 0,59	1	0,47
			-0,1 - -0,19	1	0,47
EtaacSPEI19	1	0,47	0,3 - 0,39	1	0,47
EtaacSPEI20	4	1,87	0,1 - 0,19	1	0,47
			0,2 - 0,29	1	0,47
			0,3 - 0,39	1	0,47
			0,4 - 0,49	1	0,47
EtaacSPEI22	4	1,87	0,2 - 0,29	3	1,40
			0,4 - 0,49	1	0,47
EtaacSPEI23	6	2,80	0,2 - 0,29	3	1,40
			0,3 - 0,39	2	0,93
			0,5 - 0,59	1	0,47
EtaacSPEI24	2	0,93	-0 - -0,09	2	0,93
EtaacSPEI25	1	0,47	0 - 0,09	1	0,47
EtaacSPEI26	2	0,93	0 - 0,09	1	0,47
			0,1 - 0,19	1	0,47
EtaacSPEI27	1	0,47	0,1 - 0,19	1	0,47
EtaacSPEI31	1	0,47	0,5 - 0,59	1	0,47
EtaacSPEI32	4	1,87	0,3 - 0,39	1	0,47
			0,4 - 0,49	2	0,93
			0,5 - 0,59	1	0,47
EtaacSPEI33	3	1,40	0,2 - 0,29	1	0,47
			0,3 - 0,39	1	0,47
			0,4 - 0,49	1	0,47

EtaacSPEI34	3	1,40	0,1 - 0,19	1	0,47
			0,3 - 0,39	1	0,47
			0,5 - 0,59	1	0,47
EtaacSPEI35	3	1,40	-0 - -0,09	1	0,47
			0,1 - 0,19	1	0,47
			0,3 - 0,39	1	0,47
EtaacSPEI40	2	0,93	-0,1 - -0,19	1	0,47
			0,1 - 0,19	1	0,47
EtaacSPEI41	1	0,47	-0,1 - -0,19	1	0,47
EtaacSPEI42	5	2,34	-0,2 - -0,29	1	0,47
			-0,1 - -0,19	3	1,40
			-0 - -0,09	1	0,47
EtaacSPEI43	7	3,27	0,1 - 0,19	1	0,47
			0,2 - 0,29	4	1,87
			0,3 - 0,39	1	0,47
			0,4 - 0,49	1	0,47
EtaacSPEI45	2	0,93	0 - 0,09	2	0,93
EtaacSPEI46	1	0,47	0,1 - 0,19	1	0,47
EtaacSPEI47	2	0,93	0,1 - 0,19	1	0,47
			0,2 - 0,29	1	0,47
EtaacSPEI48	9	4,21	-0,1 - -0,19	1	0,47
			-0 - -0,09	2	0,93
			0,1 - 0,19	2	0,93
			0,2 - 0,29	3	1,40
			0,5 - 0,59	1	0,47
214		100,00			
Total Subcuencas Cabecera					



Teniendo en cuenta las correlaciones de una magnitud entre 0,5 y 0,59, éstas han aparecido en seis escalas temporales utilizadas para el análisis (37) (SPEI 15, SPEI 23, SPEI 31, SPEI 32, SPEI 34 y SPEI 48), señalando que se tratan de las más largas a excepción de la escala temporal a 15 meses, mientras que las correlaciones inferiores han aparecido en 36 (figura IV.14). Asimismo, una escala temporal ha presentado correlaciones de magnitud únicamente entre 0,5 y 0,59 (SPEI 31).

Las correlaciones negativas se han encontrado en catorce escalas temporales del SPEI, concentradas en escalas temporales cortas (SPEI 1, SPEI 2, SPEI 3, SPEI 5, SPEI 6, SPEI 7) y más largas (SPEI 18, SPEI 24, SPEI 35, SPEI 40, SPEI 41, SPEI 42 y SPEI 48) (figura IV.14).

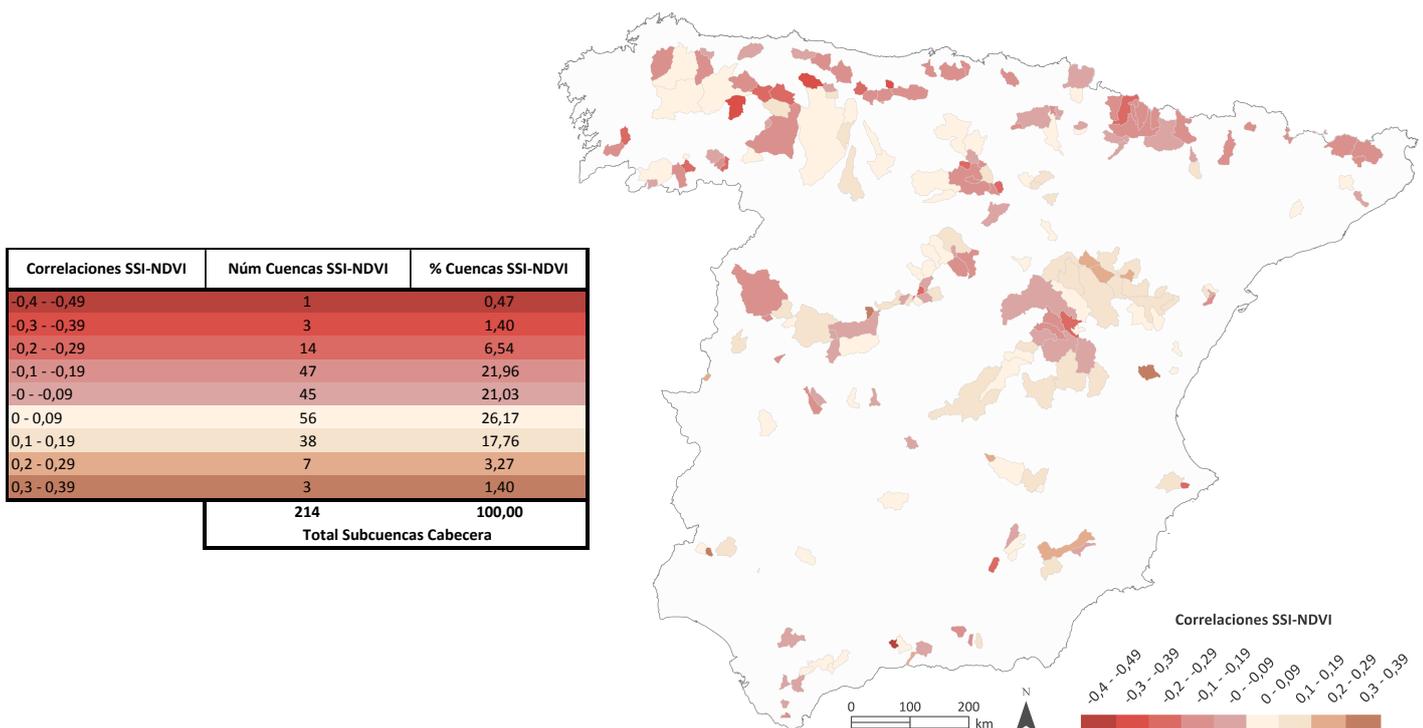
Los resultados entre ambos índices de sequía climática son muy similares en cualquiera de los casos, no apreciándose grandes diferencias entre ellos: se ha comprobado que la actividad vegetal responde a

escalas temporales de acumulación de la anomalía de precipitación principalmente medias y largas, y a escalas temporales de acumulación de la anomalía del BHC medias, tomando magnitudes de correlación del orden entre 0 y 0,49 en un importante número de cuencas registradas en todas las escalas temporales presentadas, intuyendo correlaciones más débiles entre los índices SPEI – NDVI, señalando que no destacan las correlaciones fuertes —éstas registradas en escalas temporales más largas— y que se han encontrado correlaciones negativas registradas en escalas temporales cortas y más largas.

Respondiendo prácticamente a los mismos resultados que los obtenidos entre los índices SPI y NDVI, en la cartografía de la figura IV.14 es posible distinguir sobre el territorio que, independientemente de la escala temporal del SPEI que ha presentado las correlaciones de mayor magnitud con el NDVI y de su localización, éstas tienden a ser débiles en la mayoría de las subcuencas de cabecera analizadas. Las correlaciones más fuertes (0,5 – 0,59) se localizan en las subcuencas de la zona este y sureste de la España peninsular.

La figura IV.15 muestra los coeficientes de correlación que se han encontrado entre los índices SSI y NDVI. Además, también muestra el número de cuencas que han registrado estos coeficientes y el porcentaje que representan respecto el total.

Figura IV.15. Tabla explicativa y cartografía de las correlaciones entre los índices SSI y NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)



Se han encontrado correlaciones positivas en el 48,60% de las subcuencas de cabecera analizadas, tomando magnitudes entre 0 y 0,39, destacando que las correlaciones son débiles y directas (figura IV.15). Asimismo, se han encontrado correlaciones negativas en el 51,40% de los casos, tomando magnitudes entre -0,49 y 0, destacando que las correlaciones son débiles e inversas.

Comparándolas con las obtenidas entre los índices SPI – NDVI y SPEI – NDVI, en este caso predominan las subcuencas con correlaciones con valores negativos, representando el 51,40% con magnitudes entre -

0,49 y -0 para los índices SSI – NDVI, frente al 25,23% con magnitudes entre -0,29 y -0 para los índices SPEI – NDVI, y al 17,29% con magnitudes entre -0,19 y -0 para los índices SPI – NDVI. Las subcuencas con correlaciones con valores positivos predominan en los otros dos casos, representando el 82,71% con magnitudes entre 0 y 0,69 para los índices SPI – NDVI, y el 74,77% con magnitudes entre 0 y 0,59 para los índices SPEI – NDVI, frente al 48,60% con magnitudes entre 0 y 0,39 para los índices SSI – NDVI.

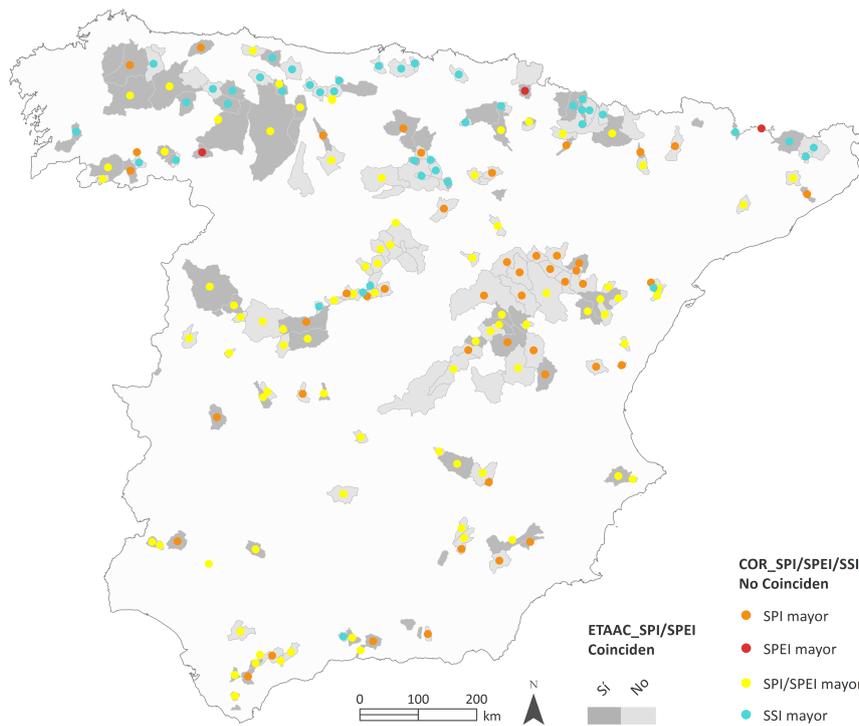
Finalmente, indicar que, aun habiendo obtenido correlaciones débiles en los tres análisis de correlación, los valores son más cercanos a 0 en los coeficientes de correlación encontrados entre los índices SSI – NDVI, pudiendo afirmar que la actividad vegetal guarda más correlación con los índices de sequía climática que no con el índice de sequía hidrológica. En este contexto, se registra el 86,92% de las subcuencas de cabecera tomando magnitudes de correlación del orden entre -0,19 y 0,19 para los índices SSI – NDVI, el 64,95% para los índices SPEI – NDVI y el 57,01% para los índices SPI – NDVI.

La cartografía de la figura IV.15 no permite relacionar ningún patrón espacial en cuanto a las magnitudes de correlación presentadas. Aunque comparando los coeficientes de correlación negativos representados en las tres cartografías (SPI – NDVI, SPEI – NDVI y SSI – NDVI), éstos se registran en las subcuencas de cabecera de la zona norte para los obtenidos con los índices climáticos, mientras que para los obtenidos con el índice hidrológico, éstos se registran también en esta misma zona y en el resto de los sectores peninsulares.

La figura IV.16 muestra las coincidencias de las escalas temporales de acumulación de la anomalía climática y de las correlaciones obtenidas entre los índices de sequía, resultado de las correlaciones encontradas con la actividad vegetal NDVI.

Figura IV.16. Tabla explicativa y cartografía de las coincidencias de las escalas temporales y de las correlaciones entre los índices SPI – NDVI, SPEI – NDVI y SSI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)

	Núm Cuencas	% Cuencas		Núm Cuencas	% Cuencas	Correlaciones
ETAAC SPI/SPEI Coinciden Sí =	88	41,12				
ETAAC SPI/SPEI Coinciden No =	126	58,88				
COR SPI/SPEI/SSI Coinciden Sí =	40	18,69				
COR SPI/SPEI/SSI Coinciden No =	174	81,31				
			COR SPI mayor =	46	21,50	0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,6
			COR SPEI mayor =	3	1,40	-0,2 - -0,1
			COR SPI/SPEI Mayor =	83	38,79	-0,1 - 0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,5
			COR SSI mayor =	42	19,63	-0,4 - -0,3 - -0,2 - -0,1 - 0,1 - 0,3



Resultado de las máximas correlaciones encontradas con el NDVI en las subcuencas de cabecera, en primer lugar se observa que 126 subcuencas no comparten la misma escala temporal del SPI y del SPEI representando el 58,88% respecto el total, y en segundo lugar, que la magnitud de las correlaciones no ha coincidido en 174 subcuencas representando el 81,31% respecto el total (figura IV.16). Por tanto, y contrariamente a los resultados obtenidos a partir de las máximas correlaciones encontradas con el índice de sequía hidrológica SSI, aparte de que es posible afirmar que no existe predominancia correlacional entre los índices de sequía y la actividad vegetal NDVI, también es posible afirmar que las relaciones entre los índices de sequía son menores, tanto en cuanto a las escalas temporales que han presentado las correlaciones de mayor magnitud con el NDVI (el 41,12% frente al 79,44%), como a los coeficientes de correlación registrados (el 18,69% frente al 81,78%).

Centrando el análisis de la figura IV.16 en las subcuencas en las que no coincide la magnitud de correlación de los índices de sequía (174), se ha obtenido que el 38,79% presentan una magnitud de correlación más elevada entre los índices SPI – NDVI y SPEI – NDVI, siendo iguales entre ellas, el 21,50% de las subcuencas presentan magnitudes de correlación superiores entre los índices SPI – NDVI, el 19,63% presentan magnitudes de correlación superiores entre los índices SSI – NDVI, y el 1,40% de las subcuencas presentan magnitudes de correlación superiores entre los índices SPEI – NDVI. Estas diferencias entre los coeficientes de correlación obtenidos entre los índices han sido de 0,1 a 0,3 entre los intervalos de casi todo el rango correlacional. Además, cabe destacar que, contrariamente a los resultados obtenidos con el índice de sequía hidrológica SSI, añadiendo la actividad vegetal NDVI al análisis destaca el papel predominante del índice de sequía climática SPI.

En la cartografía de la figura IV.16, se distingue que las diferencias y similitudes entre las escalas temporales de los índices SPI y SPEI no responden a ningún patrón espacial concreto, aunque sí se detecta que la mayoría de las subcuencas localizadas en el noroeste peninsular coinciden en la respuesta temporal de la actividad vegetal a las condiciones climáticas registradas por los índices SPI y SPEI.

Asimismo, contrastando las diferencias espaciales de los coeficientes de correlación obtenidos entre los índices SPI – NDVI, SPEI – NDVI y SSI – NDVI, es en toda la España peninsular en donde se encuentran las variaciones (figura IV.16). Aunque destacando las correlaciones obtenidas entre los índices SSI y NDVI, en la cartografía se aprecia que es en la zona norte en donde predomina la respuesta de la actividad vegetal a las sequías hidrológicas. Las subcuencas que no tienen implantación puntual han registrado coincidencias entre las correlaciones obtenidas entre los índices SPI – NDVI, SPEI – NDVI y SSI – NDVI (40).

Finalmente, la tabla IV.17 indica las escalas temporales de los índices SPI y SPEI que han sido descartadas por no haber presentado las correlaciones más elevadas con el NDVI: la actividad vegetal no responde a estas escalas temporales de acumulación y por tanto tampoco a las condiciones climáticas registradas en estos períodos. Cabe señalar que no se ha descartado ninguna escala temporal a corto plazo. También se añaden las escalas temporales descartadas en el análisis de correlación con el índice SSI. Comparándolas, se observa que el NDVI responde a escalas temporales más diferenciadas.

Tabla IV.17. Escalas temporales de acumulación de la anomalía climática de los índices SPI y SPEI descartadas (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)

ETAAC_SPI-SSI	ETAAC_SPEI-SSI	ETAAC_SPI-NDVI	ETAAC_SPEI-NDVI
15	15		16
18	18	17	17
	19	19	
	21	21	21
25	25	27	
	26	28	28
27		29	29
29		30	30
31	31	32	32
32	32		36
33	33	37	37
34	34		38
35	35	39	39
37	37		44
38	38		
42	42		
43	43		
44			
45			
46	46		
47			

Para acabar, en relación a los distintos tipos de vegetación obtenidos a partir de la cartografía del CLC 1990-2000-2006-2012, mediante la representación de *boxplot* o diagramas de cajas, a continuación se presenta la distribución de las magnitudes de correlación obtenidas entre los índices SPI – NDVI, SPEI – NDVI y SSI – NDVI, y las variables categóricas (figuras IV.18 – IV.29).

La representación gráfica de los *boxplot* se realiza a través de diferentes medidas estadísticas. La línea horizontal central dentro de las cajas representa la mediana o segundo cuartil y la simetría o asimetría de los datos; si la mediana no está en el centro del rectángulo, la distribución no es simétrica. Indica el valor de la variable de posición central en un conjunto de datos ordenados, a partir del cual la mitad de los casos presentan valores inferiores a la mediana observada y la otra mitad de los casos presentan valores superiores. Por tanto, en el rango intercuartílico o caja, que engloba el primer, segundo y tercer cuartil, se sitúa entre el primer cuartil y la mediana el 25% de los valores más bajos de la distribución, y entre la mediana y el tercer cuartil el 25% de los valores más altos, representando el 50% de las observaciones centrales. En cuanto a la asimetría de la distribución, si la mediana se sitúa hacia valores más altos la distribución tiene sesgo negativo, con lo cual el 25% de las observaciones está entre la mediana y el tercer cuartil ocupando un menor tramo en la escala y las observaciones están más próximas entre sí (menor distribución y dispersión de los datos), mientras que si lo hace hacia valores más bajos la distribución tiene sesgo positivo y el 25% de las observaciones está entre el primer cuartil y la mediana. Asimismo, si la distancia del rango intercuartílico es más corta significa que el 50% de las observaciones centrales están más próximas entre sí, mientras que si es más larga hay una mayor distribución y dispersión de los datos. También puede darse el caso de que la mediana sea igual al primer o tercer cuartil; en este caso se concentran muchos datos en un mismo punto y esto podría ser debido a una distribución sesgada o a una distribución muy homogénea. Los “bigotes” indican los percentiles 10 y 90 (valores mínimos y máximos) y, del mismo modo, cuanto más largos mayor distribución y dispersión hay en las observaciones hacia los valores mínimos o máximos. Finalmente, los puntos exteriores indican los percentiles 5 y 95 (valores atípicos) que no parecen consistentes con el resto de las observaciones. Cabe indicar que, aunque la distancia entre las medidas sea diferente, la cantidad de elementos que representa cada una de ellas es aproximadamente la misma, indicando un rango más amplio si los datos están más dispersos o menos amplio si están más próximos.

Figura IV.18. Distribución de las cubiertas del CLC-1990 en relación a las correlaciones máximas entre los índices SPI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)

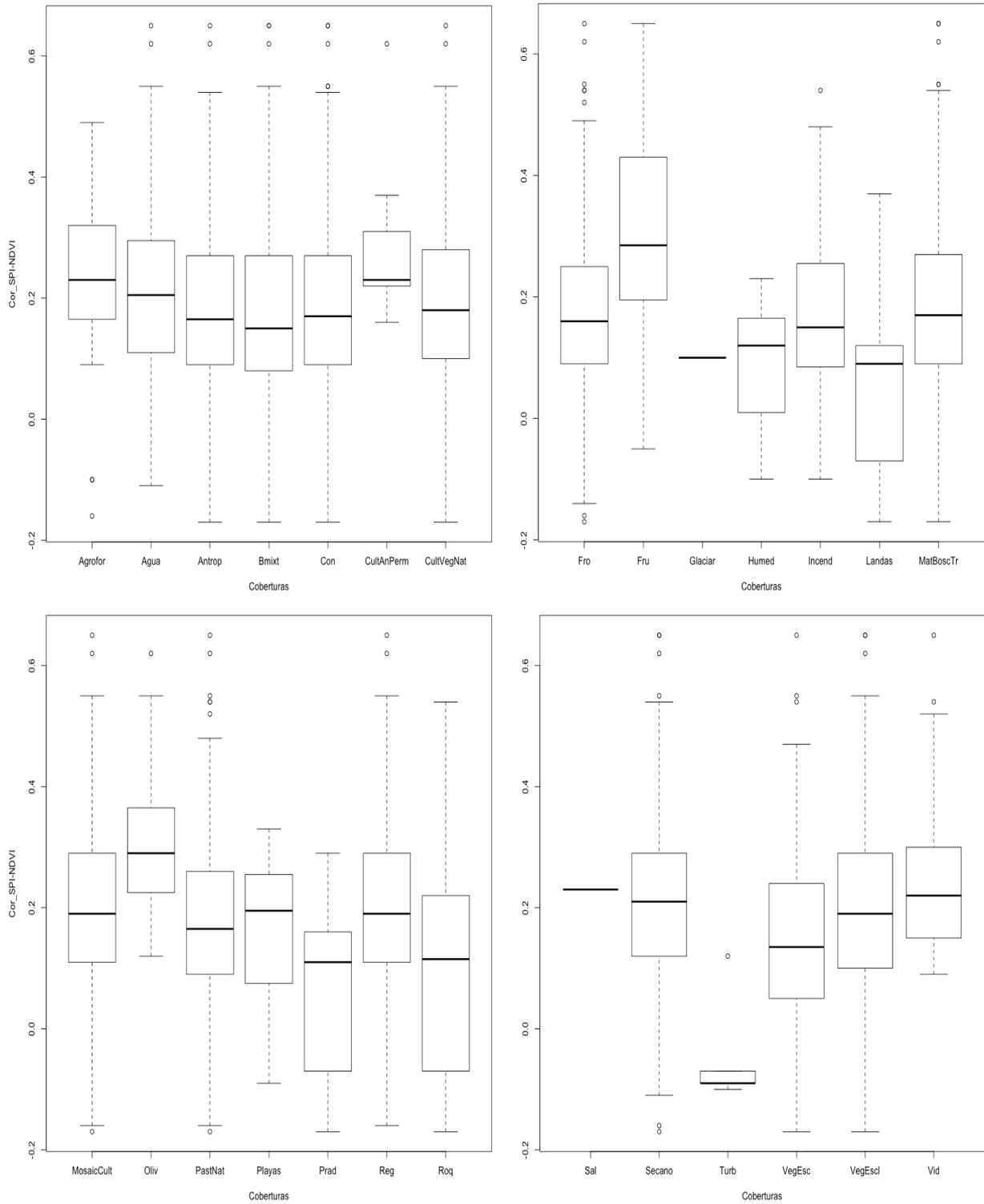


Figura IV.19. Distribución de las cubiertas del CLC-2000 en relación a las correlaciones máximas entre los índices SPI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)

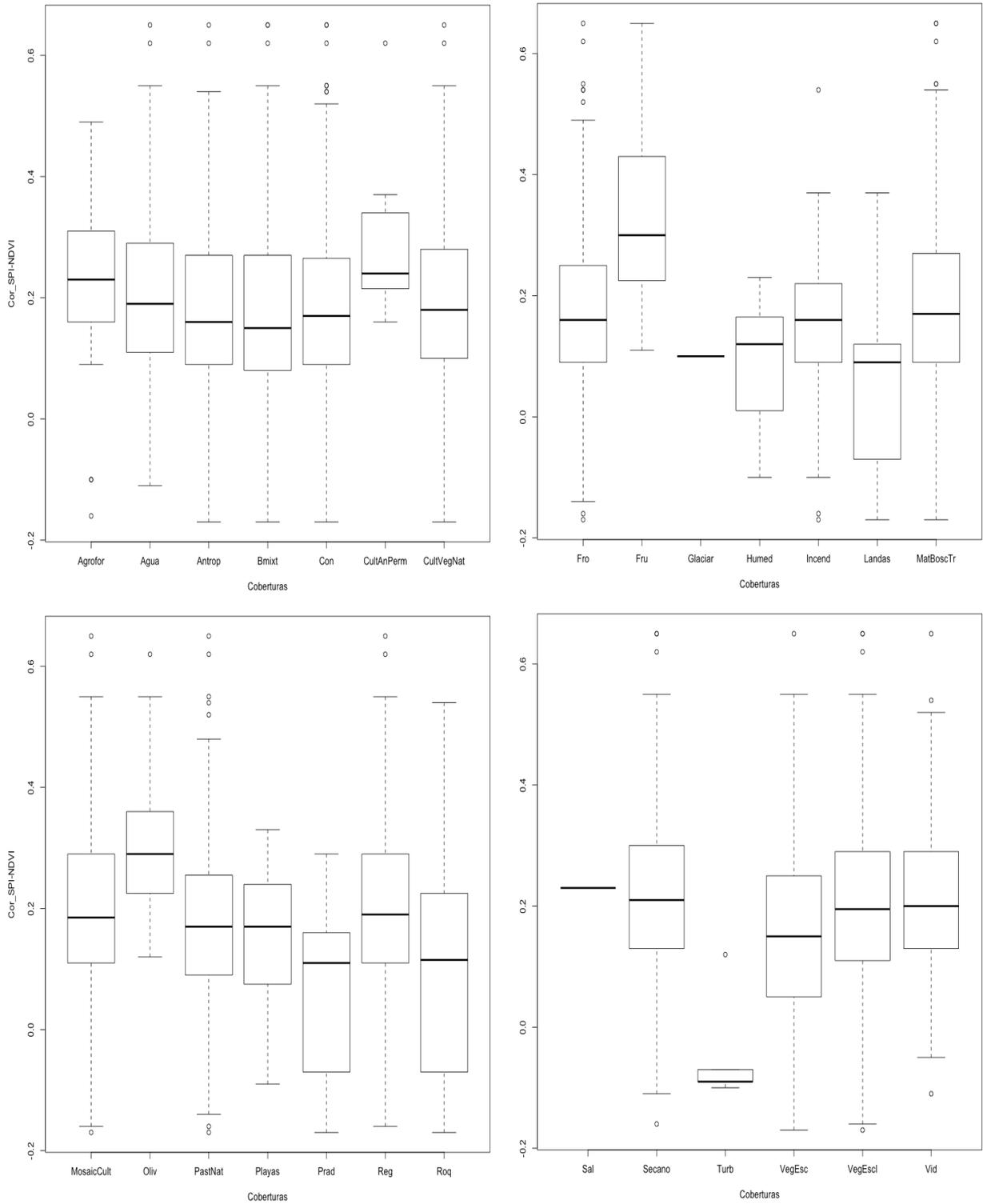


Figura IV.20. Distribución de las cubiertas del CLC-2006 en relación a las correlaciones máximas entre los índices SPI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)

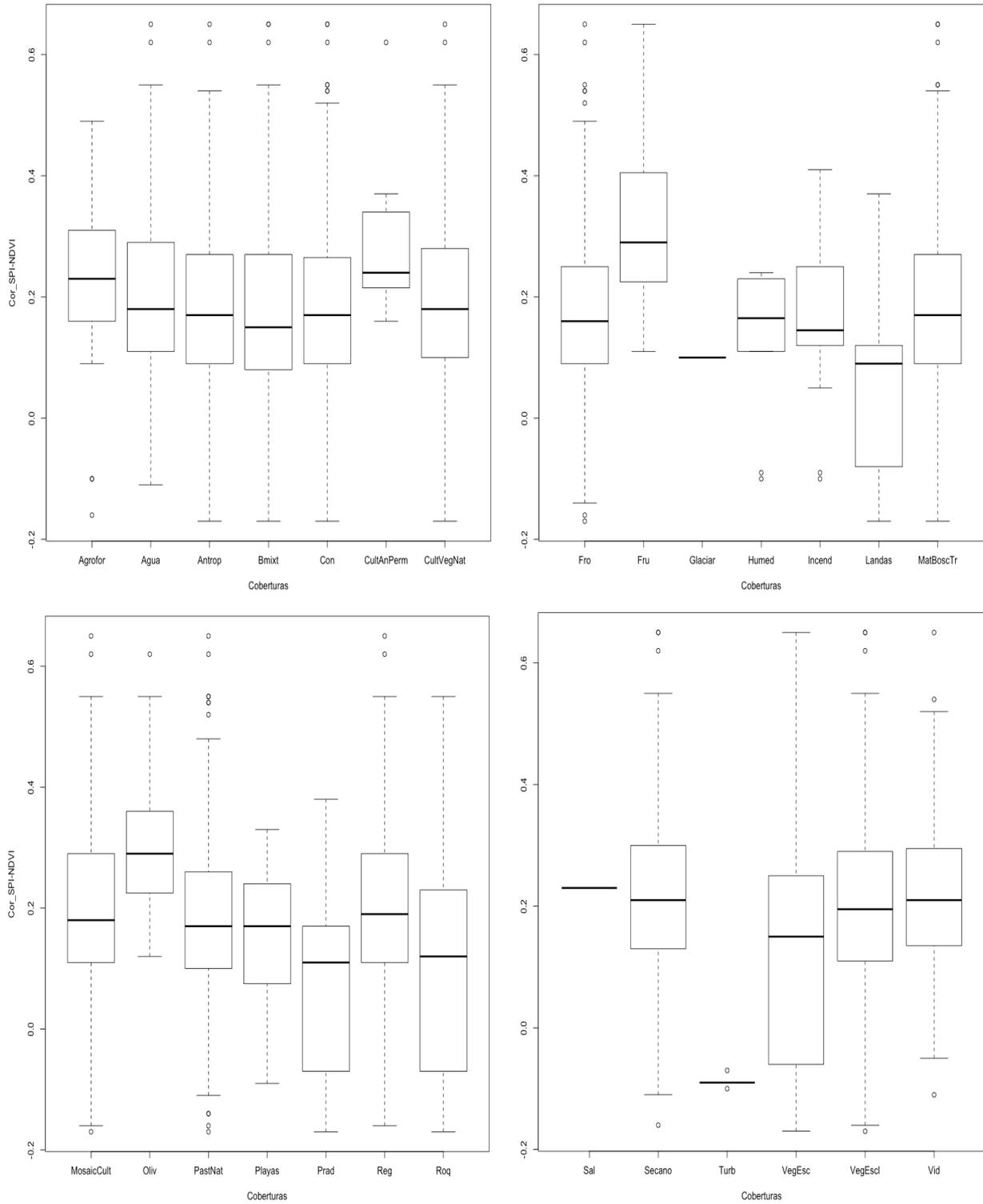


Figura IV.21. Distribución de las cubiertas del CLC-2012 en relación a las correlaciones máximas entre los índices SPI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)

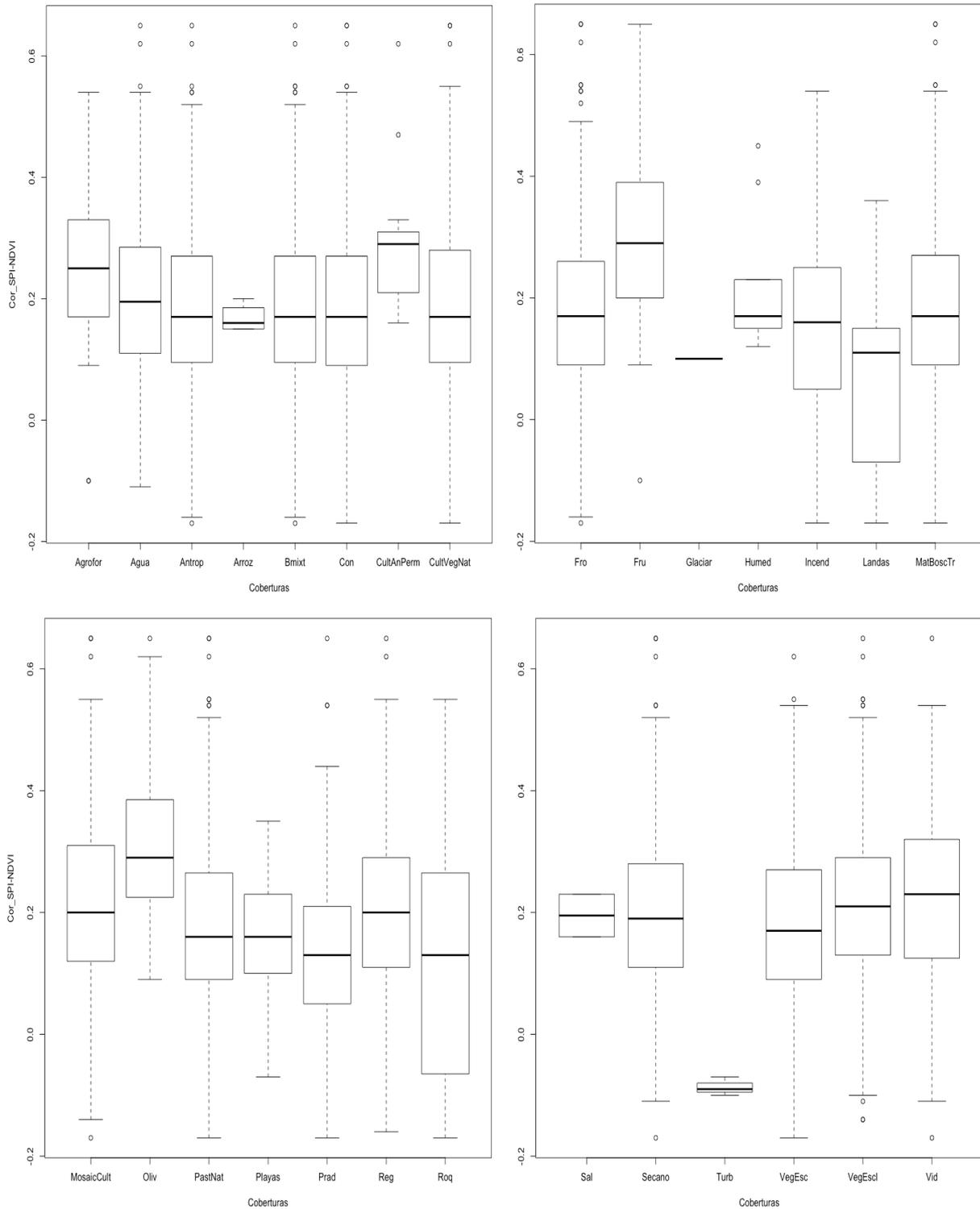


Figura IV.22. Distribución de las cubiertas del CLC-1990 en relación a las correlaciones máximas entre los índices SPEI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)

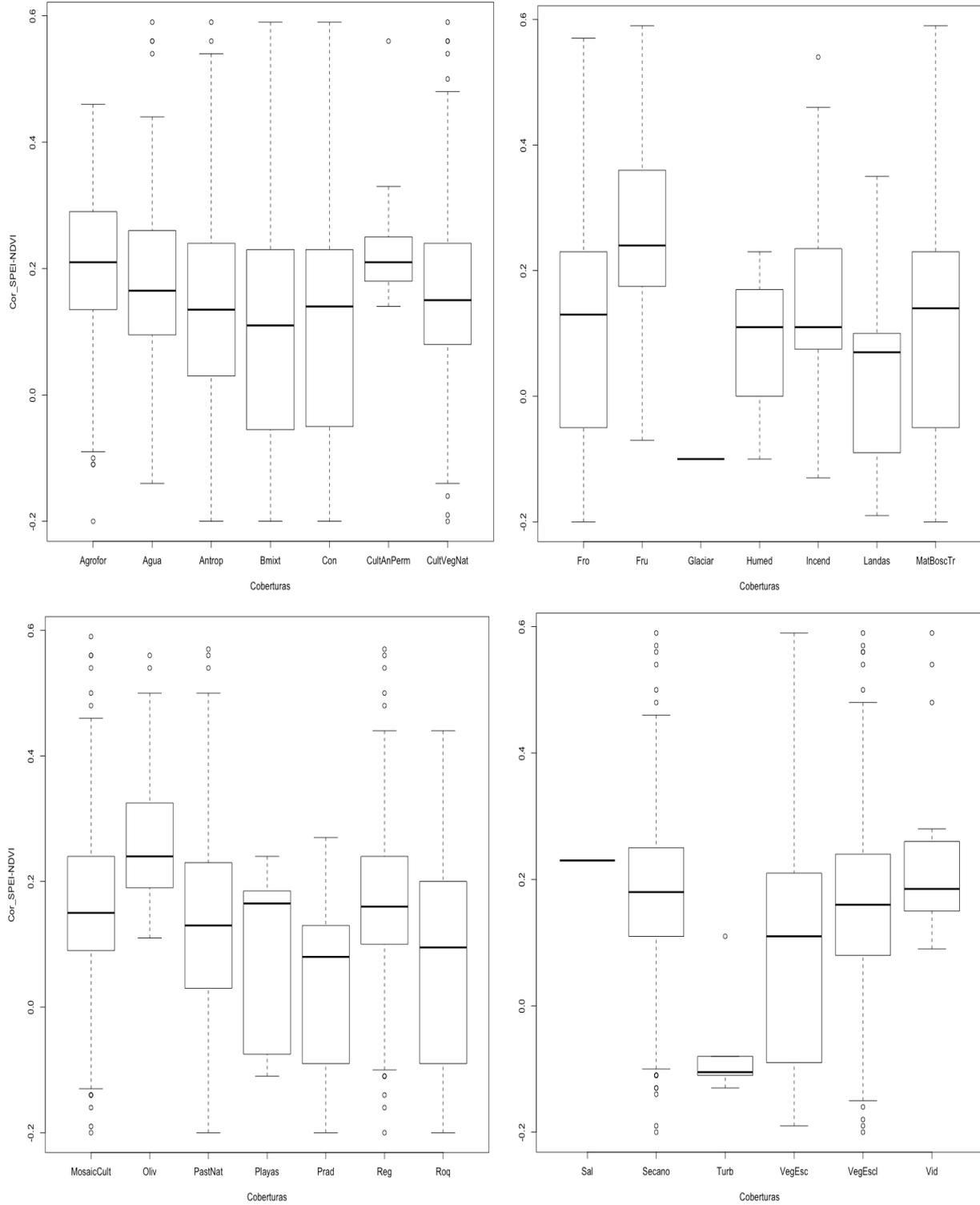


Figura IV.23. Distribución de las cubiertas del CLC-2000 en relación a las correlaciones máximas entre los índices SPEI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)

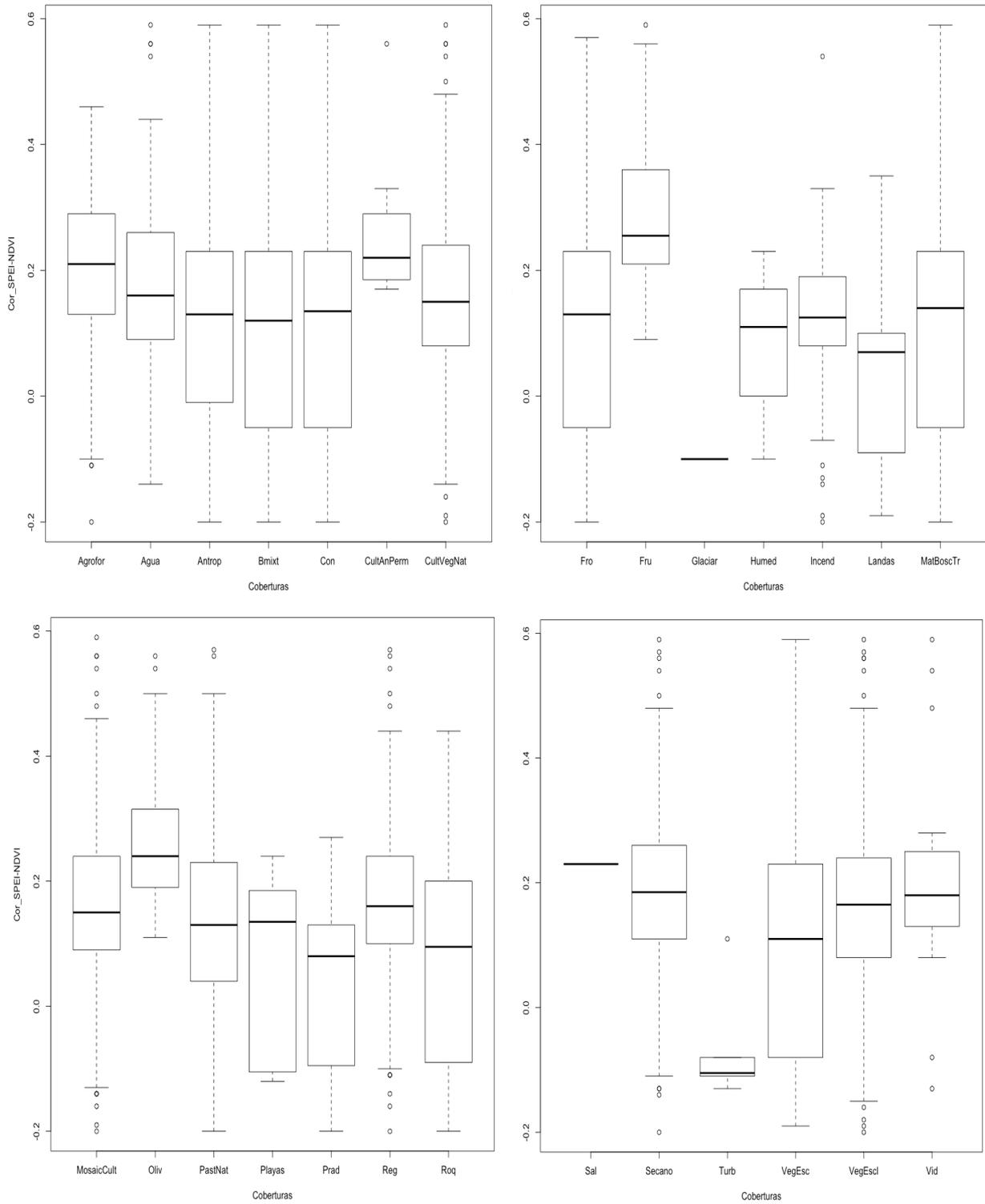


Figura IV.24. Distribución de las cubiertas del CLC-2006 en relación a las correlaciones máximas entre los índices SPEI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)

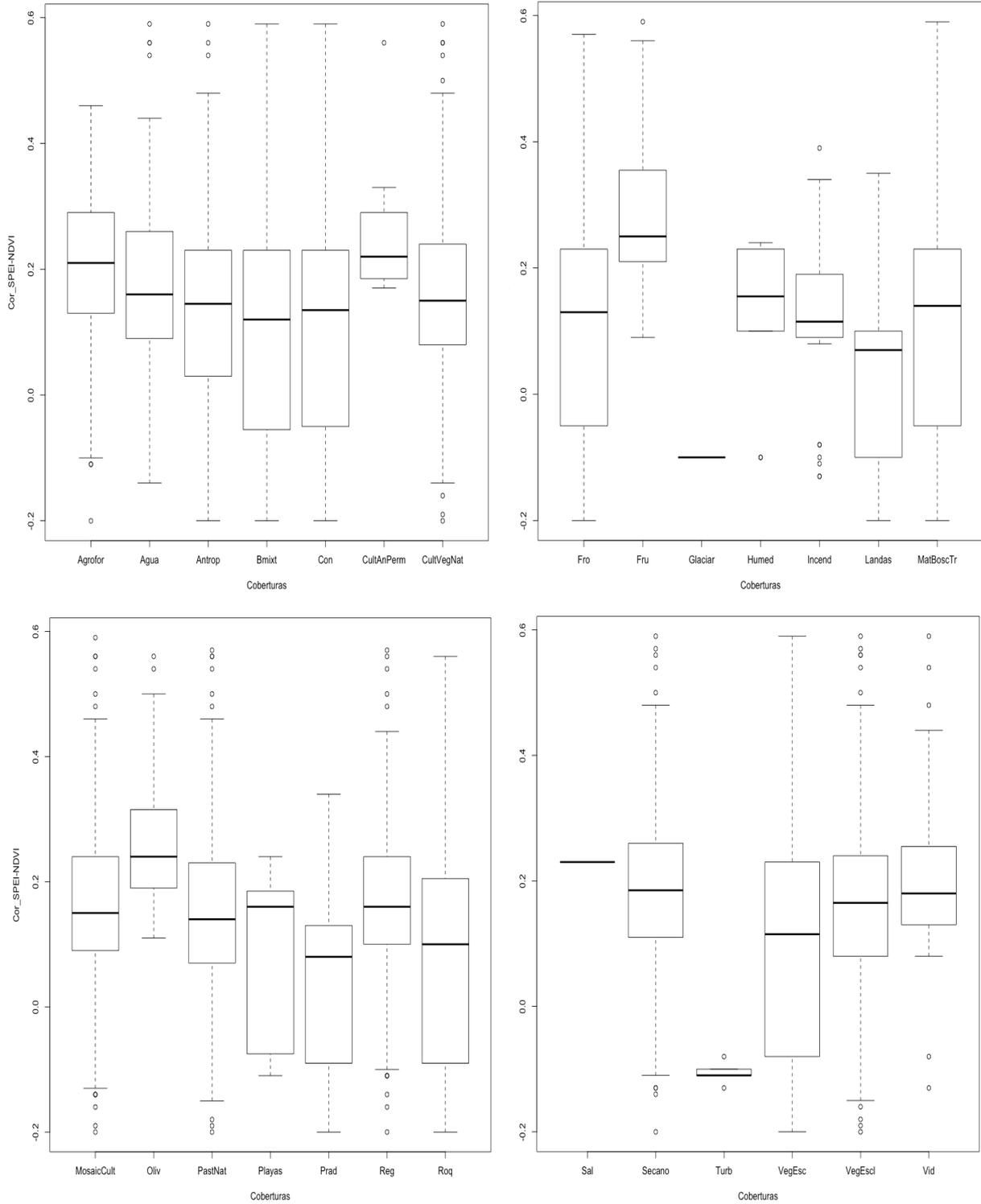


Figura IV.25. Distribución de las cubiertas del CLC-2012 en relación a las correlaciones máximas entre los índices SPEI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)

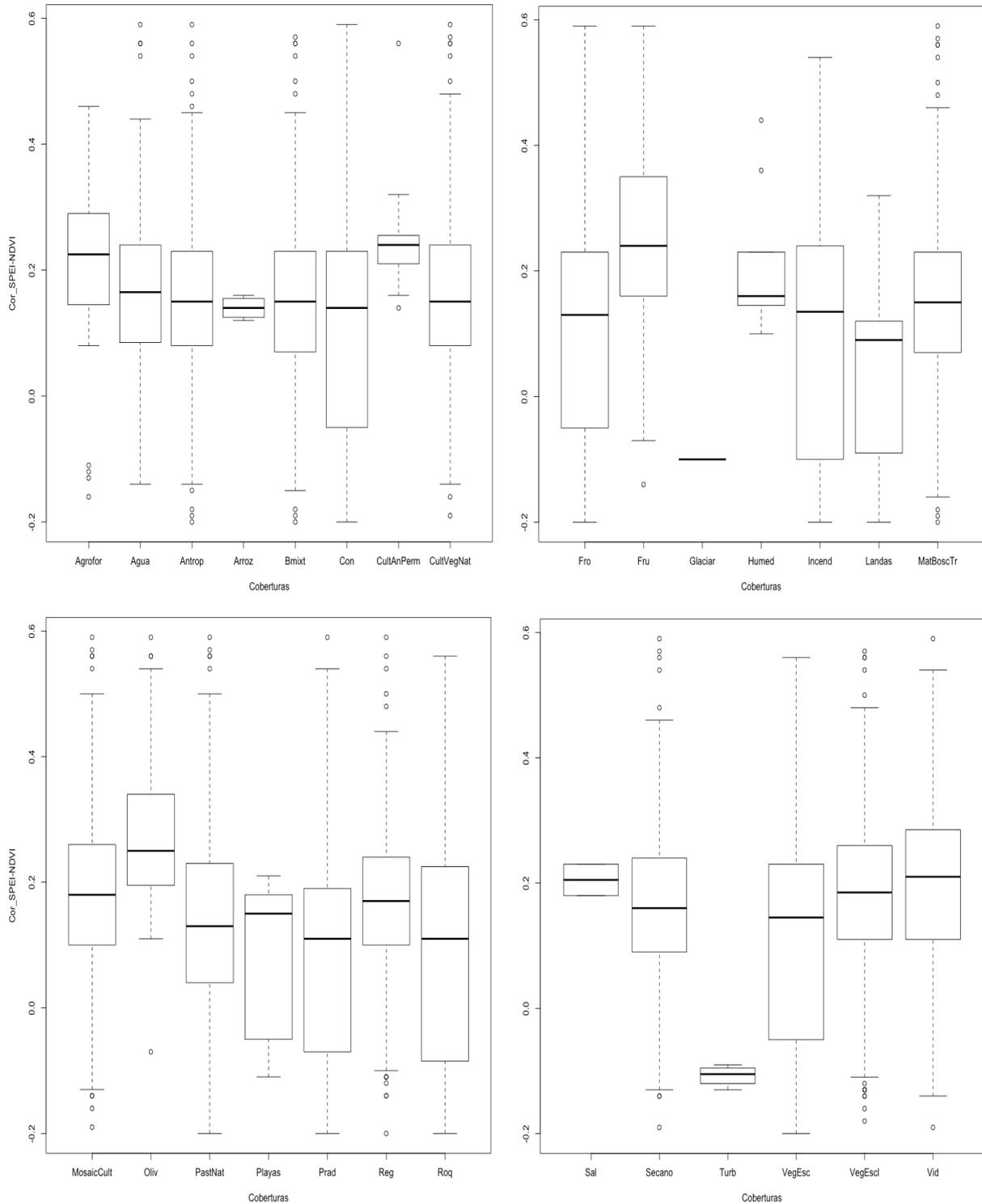


Figura IV.26. Distribución de las cubiertas del CLC-1990 en relación a las correlaciones entre los índices SSI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)

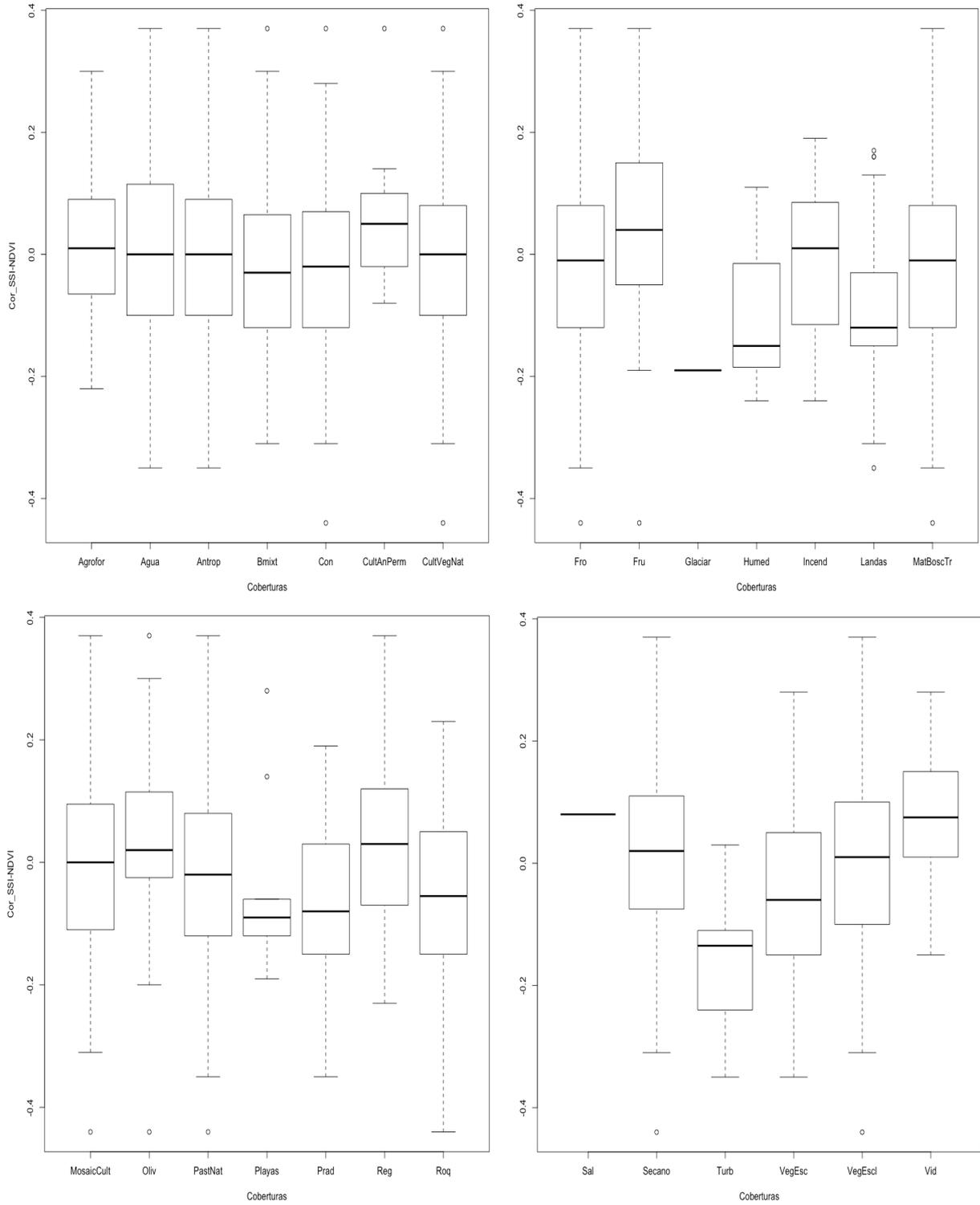


Figura IV.27. Distribución de las cubiertas del CLC-2000 en relación a las correlaciones entre los índices SSI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)

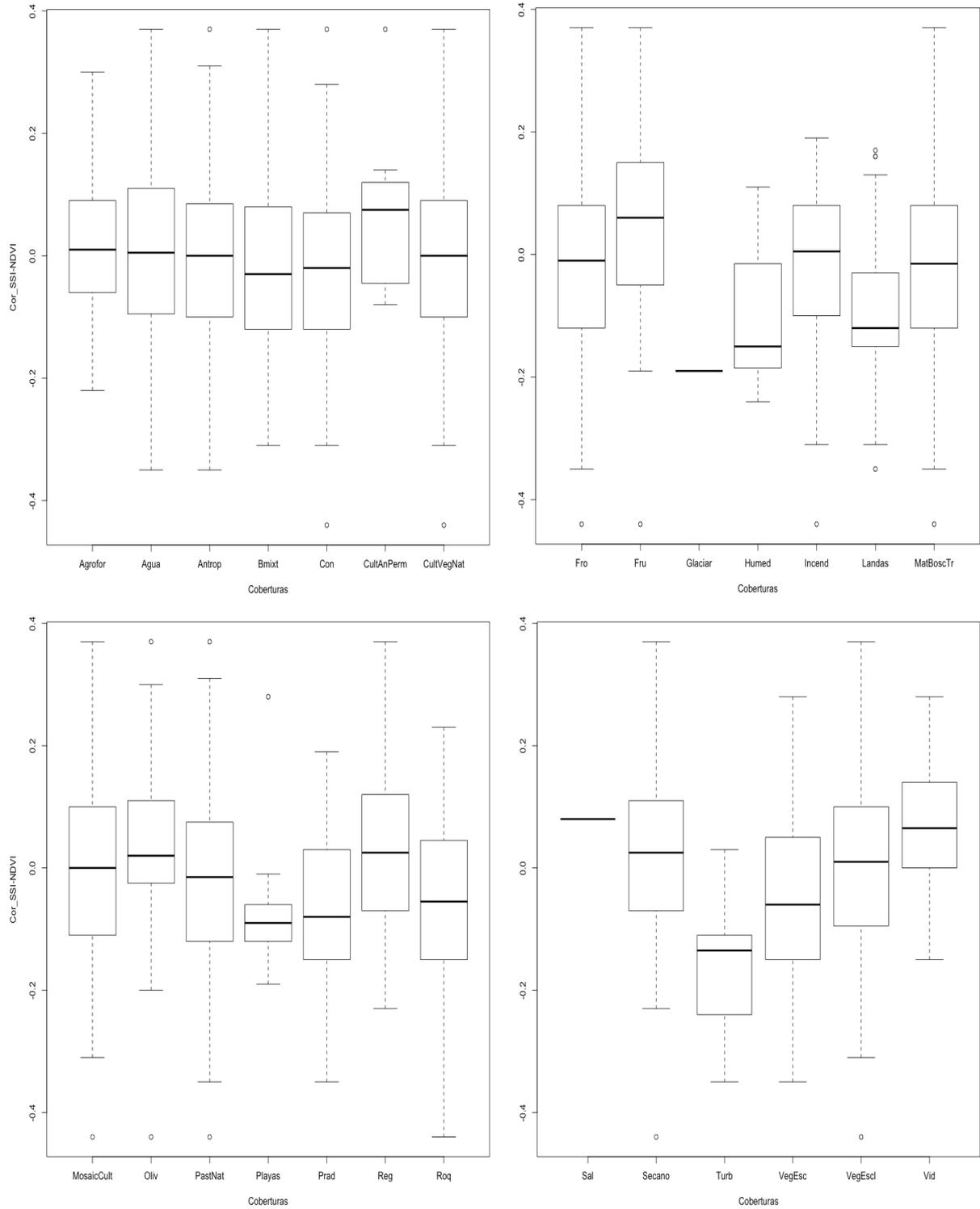


Figura IV.28. Distribución de las cubiertas del CLC-2006 en relación a las correlaciones entre los índices SSI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)

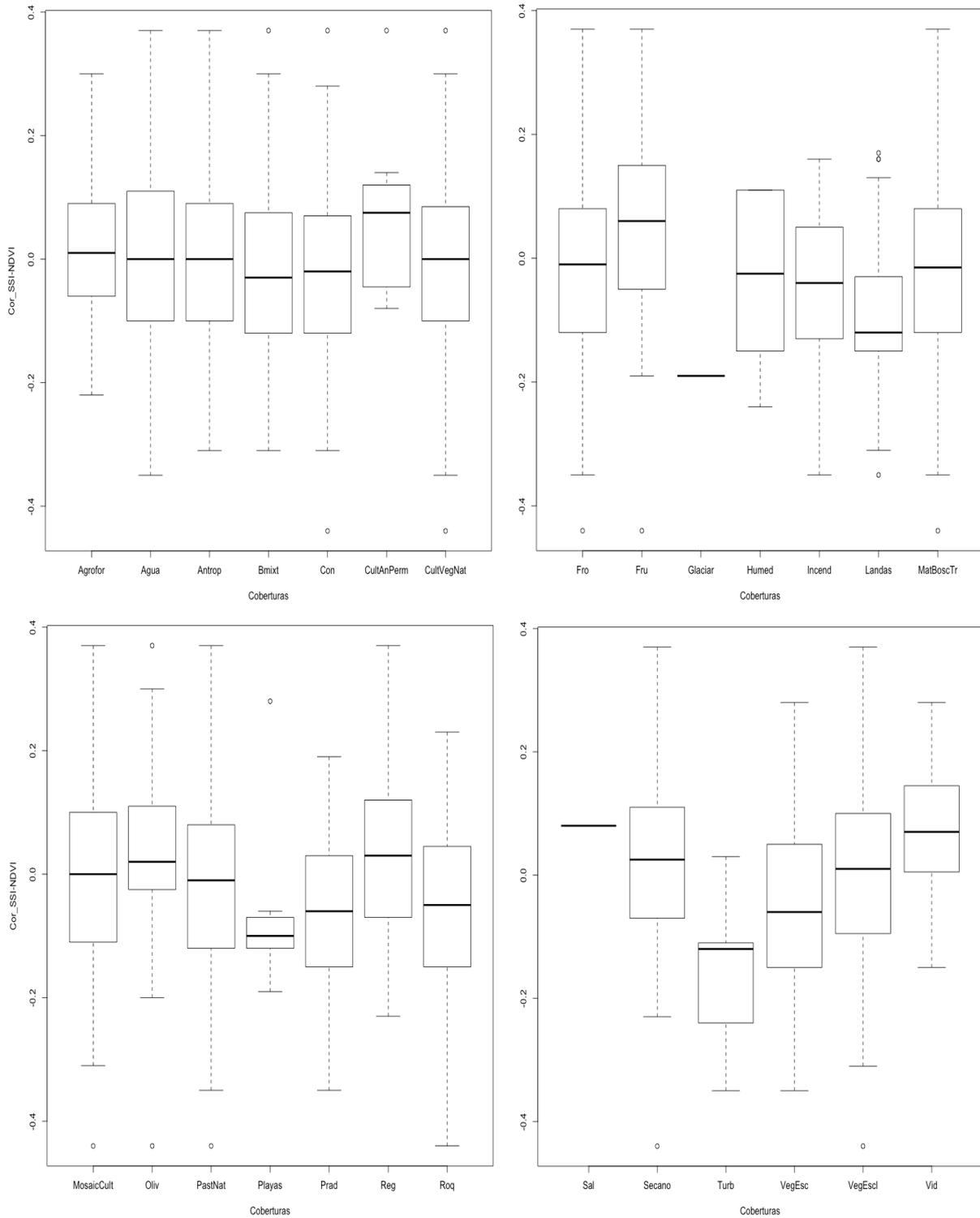
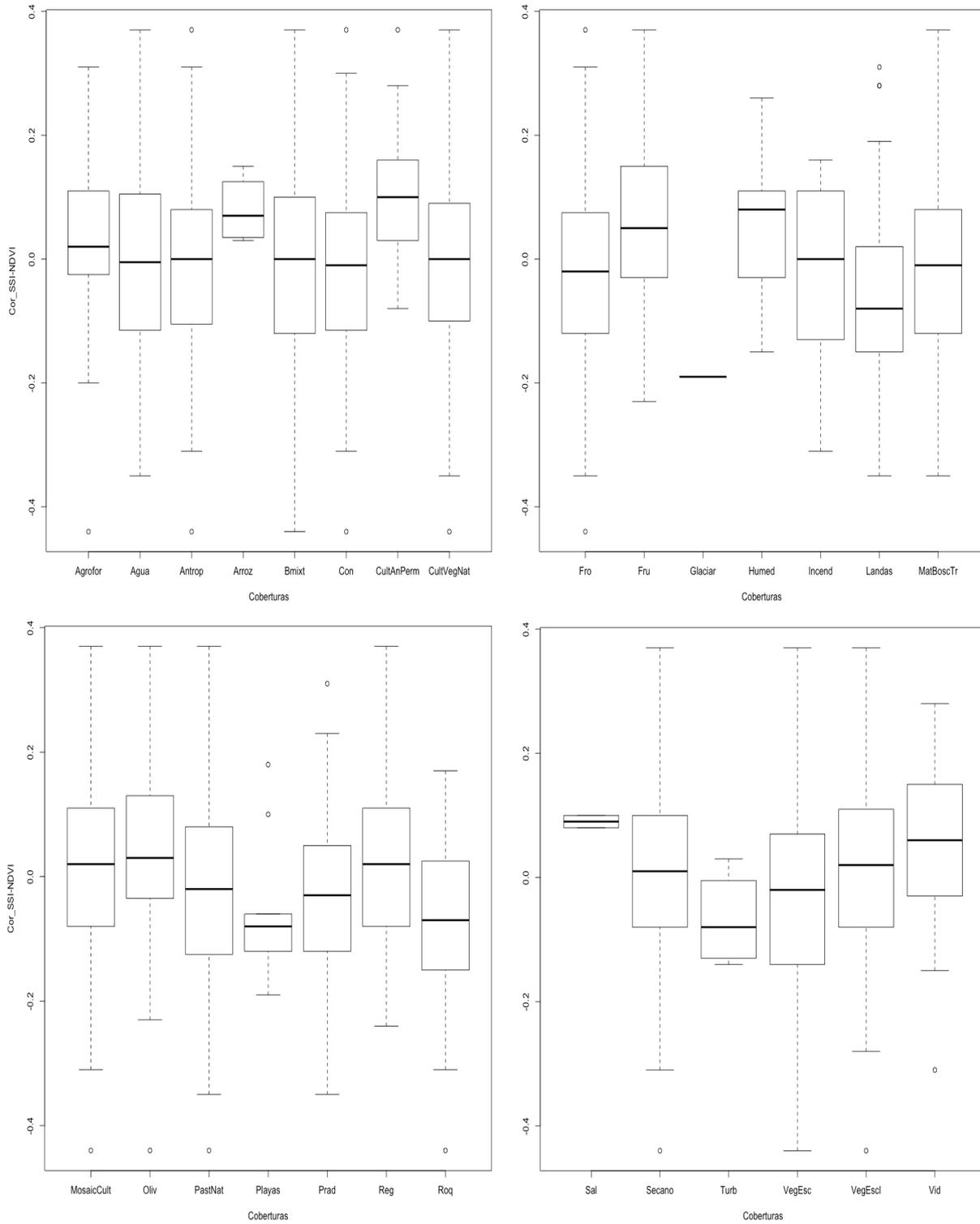


Figura IV.29. Distribución de las cubiertas del CLC-2012 en relación a las correlaciones entre los índices SSI – NDVI (214 subcuencas de cabecera – España peninsular)



Teniendo en cuenta la distribución y dispersión de los datos en el rango intercuartílico, los frutales es el tipo de cubierta vegetal que se concentra entre las magnitudes de correlación SPI y NDVI más elevadas para los años 1990, 2000 y 2006 (figuras IV.18 – IV.20). Aunque para el año 2012, la cubierta que se presenta entre las magnitudes de correlación más elevadas es el olivar, seguidamente de los frutales (figura IV.21).

Teniendo en cuenta las cinco medidas estadísticas que representan los *boxplot*, considerando los cuatro años observados (figuras IV.18 – IV.21), la distribución de las magnitudes de correlación más elevadas se concentra en las siguientes cubiertas, aunque con excepciones: sistema agroforestal, masas de agua, antropizado, bosque mixto, coníferas, cultivos con vegetación natural, frondosas, superficies quemadas (para los años 1990 y 2012), matorral boscoso de transición, mosaico de cultivos, olivares, pastizales naturales, praderas (para el año 2012), cultivos de regadío, roquedo, cultivos de secano, vegetación escasa, vegetación esclerófila y viñedos.

Teniendo en cuenta la distribución y dispersión de los datos en el rango intercuartílico, y comparando las distribuciones obtenidas a través de las correlaciones máximas entre los índices SPI – NDVI y SPEI – NDVI, existen coincidencias: los frutales es el tipo de cubierta vegetal que se concentra entre las magnitudes de correlación SPEI y NDVI más elevadas para los años 1990, 2000 y 2006 (figuras IV.22 – IV.24), y para el año 2012, la cubierta que se presenta entre las magnitudes de correlación más elevadas es el olivar, seguidamente de los frutales (figura IV.25).

Asimismo, teniendo en cuenta las cinco medidas estadísticas que representan los *boxplot*, considerando los cuatro años observados (figuras IV.22 – IV.25), la distribución de las magnitudes de correlación más elevadas se concentra en las mismas cubiertas que las registradas a través de la relación con los índices SPI – NDVI: sistema agroforestal, masas de agua, antropizado, bosque mixto, coníferas, cultivos con vegetación natural, frondosas, superficies quemadas (para los años 1990 y 2012), matorral boscoso de transición, mosaico de cultivos, olivares, pastizales naturales, praderas (para el año 2012), cultivos de regadío, roquedo, cultivos de secano, vegetación escasa, vegetación esclerófila y viñedos.

Las diferencias entre ambas distribuciones (índices SPI – NDVI y cubiertas del CLC, e índices SPEI – NDVI y cubiertas del CLC), se basan en que, aunque las magnitudes de correlación son bastante similares entre ambas distribuciones, y teniendo en cuenta de que los coeficientes de correlación entre los índices SPEI y NDVI eran más débiles, se detecta una mayor distribución y dispersión en la mayoría de las observaciones registradas a través de la relación con los índices SPEI – NDVI.

Teniendo en cuenta la distribución y dispersión de los datos en el rango intercuartílico, los resultados obtenidos se distribuyen de manera más o menos homogénea entre las diferentes cubiertas, aunque son las turberas las que se concentran entre las magnitudes de correlación SSI y NDVI más elevadas para los años 1990, 2000 y 2006, con correlaciones negativas (figuras IV.26 – IV.28). Para el año 2012 se observa que las cubiertas predominantes son los cultivos anuales permanentes, los frutales y los viñedos (figura IV.29). Además, gran parte de las series se distribuyen en torno a 0, predominando las correlaciones negativas para la mayoría de las distribuciones y concentrándose principalmente en coeficientes inferiores a -0,2 y 0,2.

Se registra que las distribuciones de los coeficientes de correlación y las variables categóricas son inferiores en los resultados obtenidos a través del índice de sequía hidrológica (figuras IV.26 – IV.29). Y, a excepción de algunas de las series e independientemente de la amplitud del rango, considerando cada intervalo de correlación SSI, SPI o SPEI con el NDVI, la mayoría de ellas guarda relación en las distintas distribuciones, sobre todo entre las obtenidas a través de la relación con los índices SSI – NDVI y SPI – NDVI.

Finalmente, comparando las distintas distribuciones (índices SPI – NDVI y cubiertas del CLC, índices SPEI – NDVI y cubiertas del CLC, e índices SSI – NDVI y cubiertas del CLC), cabe destacar que existe una menor dispersión y mayor correlación en la distribución de las siguientes cubiertas, registradas a través de la relación con los índices SSI – NDVI: frutales, landas y matorrales, playas, praderas, roquedo, vegetación escasa, salinas, bosque mixto, coníferas, frondosas, matorral boscoso de transición y superficies quemadas.

V. CONCLUSIONES

Recordando los objetivos planteados y las hipótesis formuladas en el presente trabajo, se puede afirmar que se ha conseguido desarrollar los análisis en base a ellos y dar respuesta a las hipótesis relacionadas.

El objetivo general marcado en este trabajo fue analizar la relación existente entre índices de sequía climáticos e hidrológicos en las subcuencas de cabecera de la España peninsular mediante índices de sequía climática SPI y SPEI e índice de sequía hidrológica SSI, según los distintos tipos de vegetación y valores de actividad vegetal NDVI. A partir de éste, se derivaron dos objetivos específicos con la formulación de una hipótesis para cada uno de ellos.

El primer objetivo específico planteado fue determinar las escalas temporales de respuesta más características de las sequías hidrológicas a las sequías climáticas, mediante el análisis de correlación entre los índices SPI – SSI y SPEI – SSI a diferentes escalas temporales, con la presunción de que la interacción entre las sequías climáticas e hidrológicas varía en función de la escala temporal de la sequía climática con importantes variaciones espaciales, previendo correlaciones de mayor magnitud entre los índices SPEI – SSI. Y el segundo objetivo específico planteado fue, relacionado con el objetivo específico anterior, analizar en qué medida la relación entre los índices de sequía climática e hidrológica varía según los distintos tipos de vegetación y valores de actividad vegetal NDVI, con la presunción de que la vegetación interfiere en las relaciones entre las sequías climáticas e hidrológicas, presentando las correlaciones encontradas diferencias en función del tipo de vegetación y de la actividad vegetal.

En cuanto al primero de los objetivos, para poderlo desarrollar se seleccionaron las escalas temporales que presentaron una correlación de mayor magnitud con el índice de sequía hidrológica SSI, siendo diferentes para cada subcuenca de cabecera, no pudiendo sustentar la utilización de una única escala temporal para el análisis de las sequías, y presentando importantes variaciones espaciales en la respuesta espacio-temporal de las sequías hidrológicas a las sequías climáticas.

Se observó que utilizando los dos índices de sequía climática SPI y SPEI se registraron prácticamente los mismos resultados en cuanto a la respuesta temporal de las sequías hidrológicas a las sequías climáticas. Considerando el índice SPI, mediante magnitudes de correlación fuertes y positivas en el 78,97% de las subcuencas de cabecera ($r = 0,5 - 0,79$), se obtuvo que la respuesta de las sequías hidrológicas es a escalas temporales de acumulación de la anomalía de precipitación cortas en el 63,09% de las subcuencas (SPI 2, SPI 3 y SPI 4). Y considerando el índice SPEI, mediante magnitudes de correlación fuertes y positivas en el 79,44% de las subcuencas de cabecera ($r = 0,5 - 0,79$), se obtuvo que la respuesta de las sequías hidrológicas es a escalas temporales de acumulación de la anomalía del BHC cortas en el 64,02% de las subcuencas (SPI 2, SPI 3 y SPI 4). Así pues, en ambos casos se ha determinado que la respuesta predominante de las sequías hidrológicas a las sequías climáticas es de corta duración —déficit hídrico menor y menos prolongado de manera continuada en el tiempo— y se estima mayor frecuencia temporal de sequía en el período 1962 – 2013.

Relacionado con la respuesta espacio-temporal, la sequía hidrológica responde a escalas temporales entre 1 y 4 meses en la zona norte de España y en la mayoría de las subcuencas de cabecera del Sistema Central, mientras que la respuesta a escalas temporales entre 5 y 48 meses se localiza básicamente en la parte central y sur del Sistema Ibérico, en la mayoría de las subcuencas de la Meseta Sur y en la Cordillera Subbética. Asimismo, se registra la respuesta predominante a escalas temporales entre 2 y 4 meses en las

subcuencas localizadas en costas levantinas, en la Cordillera Penibética, en la Depresión del Guadalquivir, en Sierra Morena y en el Valle del Tajo.

También se ha obtenido que las correlaciones de mayor magnitud se han registrado tanto a escalas temporales cortas, medias y largas, siendo posible distinguir sobre el territorio que la mayoría de las subcuencas de cabecera analizadas presentan una mayor respuesta a las sequías climáticas independientemente de la escala temporal que ha presentado las correlaciones de mayor magnitud con el índice SSI, destacando las subcuencas más occidentales y septentrionales, las del interior de Cataluña, las del Sistema Ibérico, las del Sistema Central, las de la Meseta Sur y las de la Cordillera Penibética.

Además, se ha encontrado que existe relación entre los dos índices de sequía climática en la respuesta temporal de las sequías hidrológicas a las climáticas, determinando que la respuesta de las sequías hidrológicas del 79,44% de las subcuencas es a las mismas escalas temporales de los índices SPI y SPEI, así como que las magnitudes de correlación coinciden para el 81,78% de las subcuencas.

Finalmente, cabe destacar que para el 18,22% de las subcuencas se han obtenido magnitudes de correlación diferentes entre ambos índices de sequía climática con el índice de sequía hidrológica, resultando en correlaciones de mayor magnitud entre los índices SPEI – SSI y pudiendo determinar que las sequías hidrológicas responden en un 13,55% a las sequías climáticas registradas por el índice SPEI, observando esta respuesta principalmente en subcuencas localizadas en el Sistema Central y en el Sistema Ibérico. Así pues, debido a que ambos índices de sequía climática responden principalmente a la variabilidad de la precipitación y tal vez como consecuencia de que las tendencias temporales de las temperaturas no sean aparentes (Vicente et al., 2010), con un comportamiento similar, la sequía hidrológica ha mostrado una mayor respuesta a la sequía climática registrada por el índice SPEI como resultado de la acumulación de los déficits de evapotranspiración.

En cuanto al segundo de los objetivos, para poderlo desarrollar se utilizaron las escalas temporales de respuesta más características de las sequías hidrológicas a las sequías climáticas, y mediante el análisis de correlación entre los índices SPI – NDVI y SPEI – NDVI se comprobó que estas escalas temporales no fueron las que presentaron las correlaciones máximas con el NDVI, encontrándose unos coeficientes de correlación muy por debajo que los obtenidos entre los índices SPI – SSI y SPEI – SSI. Además, al registrarse también las correlaciones entre los índices SSI – NDVI, se detectó que estos resultados fueron más elevados que los obtenidos a través de las correlaciones entre los índices SPI – NDVI y SPEI – NDVI, siendo posible afirmar que, manteniendo la misma respuesta temporal que había presentado la sequía hidrológica a las sequías climáticas, la respuesta de la actividad vegetal a las sequías climáticas es muy inferior, predominando su respuesta a las sequías hidrológicas. Así pues, se seleccionaron las escalas temporales que presentaron una correlación de mayor magnitud con el índice NDVI, siendo diferentes para cada subcuenca de cabecera, no pudiendo sustentar la utilización de una única escala temporal para el análisis de las sequías, y presentando importantes variaciones espaciales en la respuesta espacio-temporal de la actividad vegetal a las sequías climáticas. Por tanto, se ha observado que la vegetación interfiere en las relaciones existentes entre las sequías climáticas e hidrológicas, presentando las correlaciones encontradas diferencias en función de la actividad vegetal, y que la respuesta temporal de la actividad vegetal a las sequías climáticas frente a la respuesta temporal que habían presentado las sequías hidrológicas es muy diferente.

Se observó que utilizando los dos índices de sequía climática SPI y SPEI se registraron resultados similares en cuanto a la respuesta temporal de la actividad vegetal a las sequías climáticas. Considerando el índice SPI, mediante magnitudes de correlación débiles y positivas en el 78,97% de las subcuencas de cabecera ($r = 0 - 0,49$), se obtuvo que la respuesta de la actividad vegetal es a escalas temporales de acumula-

ción de la anomalía de precipitación medias y largas en el 41,12% de las subcuencas (SPI 9, SPI 10, SPI 14, SPI 15, SPI 43 y SPI 48)^(*), y que los resultados ofrecen una mayor distribución correlacional entre las diferentes escalas temporales del SPI al NDVI a partir de las escalas temporales medias. Y considerando el índice SPEI, mediante magnitudes de correlación débiles y positivas en el 71,97% de las subcuencas de cabecera ($r = 0 - 0,49$), se obtuvo que la respuesta de la actividad vegetal es a escalas temporales de acumulación de la anomalía del BHC medias en el 42,06% de las subcuencas (SPEI 6, SPEI 9, SPEI 10, SPEI 14 y SPEI 15)^(**), y que los resultados ofrecen una mayor distribución correlacional entre las diferentes escalas temporales del SPEI al NDVI sobre todo en las escalas temporales medias. Así pues, en ambos casos se ha determinado que la respuesta predominante de la actividad vegetal a las sequías climáticas es de mayor duración — déficit hídrico mayor y más prolongado de manera continuada en el tiempo— y se estima menor frecuencia temporal de sequía en el período 1981 – 2013.

Relacionado con la respuesta espacio-temporal, la actividad vegetal responde a escalas temporales más diferenciadas, destacando la respuesta a las escalas temporales anteriores^{(*)(**)} en subcuencas localizadas en la zona central y noroeste de España, en el Sistema Central, en el Sistema Ibérico, en la Meseta Sur y en la Cordillera Penibética, además de en los Pirineos aragoneses en la respuesta al índice SPEI, y en unas pocas repartidas entre la Depresión del Guadalquivir (a excepción de la respuesta al SPEI), en Sierra Morena y en el Valle del Tajo. Se registra la respuesta de la actividad vegetal a escalas temporales cortas en algunas subcuencas localizadas en la Cordillera Cantábrica, en el Pirineo catalán y en la parte noreste de la Cordillera Penibética, además de en el Sistema Central en la respuesta al SPEI. Asimismo, se registra la mayor respuesta de la actividad vegetal a escalas temporales medias y largas en el 3,74% de las subcuencas situadas en costas levantinas, en el Sistema Ibérico, en la Meseta Sur y en la Cordillera Subbética para el índice SPI, y en el 2,80% de las subcuencas para el índice SPEI en los mismos sectores peninsulares.

También se ha obtenido que las correlaciones entre 0 y 0,49 se han registrado tanto a escalas temporales cortas, medias y largas, siendo posible distinguir sobre el territorio que la mayoría de las subcuencas de cabecera analizadas presentan una menor respuesta a las sequías climáticas independientemente de la escala temporal que ha presentado las correlaciones de mayor magnitud con el NDVI, destacando la mayor respuesta a las sequías climáticas en subcuencas de la zona este y sureste de la España peninsular. Además, se han encontrado correlaciones débiles y negativas registradas en subcuencas de cabecera de la zona norte peninsular a escalas temporales cortas y más largas (17,29% con el índice SPI y 25,23% con el índice SPEI).

Considerando el índice SSI, se han registrado magnitudes de correlación débiles y positivas en el 48,60% de las subcuencas de cabecera ($r = 0 - 0,39$), y correlaciones débiles e negativas en el 51,40% de las subcuencas ($r = -0 - -0,49$), destacando la respuesta de la actividad vegetal a los índices climáticos frente al hidrológico.

Además, se ha encontrado que no existe relación entre los dos índices de sequía climática en la respuesta temporal de la actividad vegetal a las sequías climáticas, determinando que la respuesta de la actividad vegetal del 58,88% de las subcuencas no es a las mismas escalas temporales de los índices SPI y SPEI, así como que las magnitudes de correlación tampoco coinciden para el 81,31% de las subcuencas. Finalmente, cabe destacar que para este 81,31% en el que las magnitudes de correlación no coinciden entre los resultados obtenidos de las correlaciones entre los índices SPI – NDVI, SPEI – NDVI y SSI – NDVI, se ha determinado que la actividad vegetal responde en un 38,79% a las sequías climáticas registradas por los índices SPI y SPEI indistintamente, en un 21,50% a las sequías climáticas registradas por el índice SPI, en un 19,63% a las sequías hidrológicas registradas por el índice SSI y, finalmente, en un 1,40% a las sequías climáticas registradas por el índice SPEI, presentando variaciones espaciales en toda la España peninsular sobre todo en la respuesta predominante de la actividad vegetal a las sequías climáticas registradas por el

índice SPI, aunque concretando que ha sido en la zona norte en donde se ha encontrado la mayor respuesta de la actividad vegetal a las sequías hidrológicas.

En cuanto a los tipos de vegetación, mediante las coberturas del suelo del CLC para los años 1990, 2000, 2006 y 2012, se ha observado que la vegetación interfiere en las relaciones existentes. Para ello se analizó la distribución de las magnitudes de correlación obtenidas entre los índices SPI – NDVI, SPEI – NDVI y SSI – NDVI, y las variables categóricas, y se determinó que la mayor respuesta a las sequías climáticas, predominantemente al índice SPI, la registran los frutales y los olivares, y que la mayor respuesta a las sequías hidrológicas la registran las turberas, los cultivos anuales permanentes, los frutales y los viñedos, destacando la mayor respuesta de las siguientes cubiertas a la sequías hidrológicas frente a las climáticas: frutales, landas y matorrales, playas, praderas, vegetación escasa, salinas, bosque mixto, coníferas, frondosas, matorral boscoso de transición y superficies quemadas.

Para finalizar, a partir del trabajo realizado, a continuación se consideran algunas líneas posibles a desarrollar en el futuro:

- Se podría considerar la posibilidad de calcular la significancia de las correlaciones obtenidas (p-valor), ya que no siempre las correlaciones fuertes son significativas y no siempre las débiles son no significativas. Tomando como ejemplo una correlación de 0,9 con un p-valor de 0,1 ($> 0,05$), en este caso existiría una correlación muy fuerte entre las variables, pero al tener una significancia de 0,1 (correlación no significativa), automáticamente se asumiría que r es 0 y que no existe correlación. Del mismo modo, si se obtiene una correlación de 0,4 con un p-valor de 0,01 ($< 0,05$), en este caso existiría una correlación débil entre las variables, pero su significancia sería muy elevada (correlación significativa), manteniendo $r = 0,4$. También cabe indicar que no tendría sentido calcular la significancia de dos variables en las que no existe correlación alguna.
- En el análisis de correlación entre los índices SPI – NDVI, SPEI – NDVI y SSI – NDVI se ha demostrado la débil correlación existente entre ellos. Por tanto, se propone la posibilidad de comparar el comportamiento entre los tres índices de sequía con la Anomalía del NDVI (NDVIA), con el Índice de Estrés Hídrico (MSI), con el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) y con el Índice de Sequía de Diferencia Normalizada (NDDI). Se plantea la hipótesis de que los coeficientes de correlación más elevados se obtendrían con el NDVIA y con el NDDI según la información bibliográfica consultada y desarrollada en el marco teórico-conceptual.
- La posible inclusión de nuevas variables que enriquezcan el análisis, como por ejemplo la litología y la topografía, pues existe la hipótesis de que las litologías permeables favorecen la respuesta de las sequías hidrológicas a las climáticas a escalas temporales más largas (Lorenzo et al., 2013b). Asimismo, las respuestas a escalas temporales cortas se asocian con la generación de escorrentía de precipitación intensa, que se favorece en áreas de drenaje relativamente pequeñas con pendientes pronunciadas y sustratos de roca de baja permeabilidad (Vicente y López, 2005, dentro de Lorenzo et al., 2013b; López et al., 2013, dentro de Lorenzo et al., 2013b).
- La importancia de considerar parámetros como la estacionalidad, debido a las diferencias climáticas, hídricas y de vegetación que existen entre las diferentes estaciones del año. Por ejemplo, Vicente et al. (2019) encontraron que las correlaciones entre las series SPEI y sNDVI tienden a ser mayores durante la estación cálida entre los meses de mayo y agosto a escalas temporales de 6 a 24 meses, mientras que la respuesta del sNDVI a la sequía es menor entre septiembre y abril, aunque con algunas excepciones. Del mismo modo, en líneas generales, la respuesta de la vegetación a las condiciones de sequía registradas fue inferior durante el invierno debido a que la evapotranspiración generalmente es menor en esta época del

año, mientras que en primavera la vegetación se vuelve más sensible a las sequías como consecuencia del aumento de las temperaturas —las tierras agrícolas no irrigadas presentaron un pico de correlación significativa entre abril y junio, disminuyendo hacia finales de año, mientras que las tierras irrigadas no mostraron una respuesta tan elevada a la sequía durante la estación cálida— (Vicente et al., 2019). Además, también se podría valorar la utilización de otros parámetros, como por ejemplo las estrategias morfológicas, fisiológicas y fenológicas de la vegetación, pues Vicente et al. (2019) indicaron en su estudio que sistemas radiculares más profundos permiten obtener agua situada en los niveles inferiores del subsuelo, así como que también existe la adaptación de la vegetación al clima característico de regiones en donde se registran sequías frecuentes para hacer frente al estrés hídrico (Chaves et al., 2003; Vicente, 2006; Gazol et al., 2017 y 2018).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y WEBGRAFÍA

- Agencia Estatal de Meteorología (s.f.). *Interpretación del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)* [en línea]. Ministerio para la Transición Ecológica. Gobierno de España. Fecha de consulta: enero de 2019. Disponible en: http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/vigilancia_sequia/ayuda
- Agencia Estatal de Meteorología, Meteoglosario Visual (Diccionario ilustrado de meteorología) (2018). *Oscilación del Mediterráneo Occidental (WeMO)* [en línea]. Ministerio para la Transición Ecológica. Gobierno de España. Fecha de consulta: agosto de 2019. Disponible en: https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/341_oscilacion-del-mediterraneo-occidental-wemo
- Álvarez, S. (2015). *La Oscilación del Atlántico Norte: Fenómeno decisivo en la evaluación de recursos hídricos* [blog]. Escuela de Organización Industrial. Máster en Ingeniería y Gestión del Agua. Fecha de consulta: agosto de 2019. Disponible en: <https://www.eoi.es/blogs/magua/la-oscilacion-del-atlantico-norte-fenomeno-decisivo-en-la-evaluacion-de-recursos-hidricos/>
- ArcGIS for Desktop. ArcMAP (2016a). *Conceptos del conjunto de herramientas de hidrología: Comprender los sistemas de drenaje, explorar los modelos digitales de elevación (DEM), derivar características de escorrentía, crear un DEM sin depresión, cómo funciona rellenar, cómo funciona acumulación de flujo, cómo funciona dirección de flujo, cómo funciona sumidero, cómo funciona cuenca hidrográfica, aplicaciones de muestra de análisis hidrológico* [en línea]. ESRI. Fecha de consulta: diciembre de 2018. Disponible en: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-drainage-systems.htm>
- ArcGIS for Desktop. ArcMAP (2016b). *Vista general del conjunto de herramientas de hidrología: Cuenca, relleno, acumulación de flujo, dirección del flujo, sumidero, alinear punto de fluidez, cuenca hidrográfica* [en línea]. ESRI. Fecha de consulta: diciembre de 2018. Disponible en: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-hydrology-tools.htm>
- Arriaga, P. (2015). *La medida de la precipitación* [blog]. Conecting Waterpeople. iAgua. Fecha de consulta: enero de 2019. Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/pedro-arriaga/medida-precipitacion>
- Arroyo, I.; Bravo, L.C.; Llinás, H.; Muñoz, F.L. (2014). "Distribuciones Poisson y Gamma: Una discreta y continua relación", pp. 102 y 103 [en línea]. *Prospect*, Vol. 12 (1), pp. 99 – 107. Fecha de consulta: enero de 2019. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v12n1/v12n1a12.pdf>
- Barker, L.J.; Hannaford, J.; Chiveron, A.; Svensson, C. (2016). "From meteorological to hydrological drought using standardised indicators" [en línea]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, pp. 2483 – 2505. Fecha de consulta: agosto de 2019. doi: 10.5194/hess-20-2483-2016
- Beguiría, S.; Latorre, B.; Reig, F.; Vicente, S.M. (s.f.). *SPEI: The Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index, global drought monitor, global SPEI database* [en línea]. Instituto Pirenaico de Ecología. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Ministerio de Economía y Competitividad. Gobierno de España. Fecha de consulta: enero de 2019. Disponible en: <http://spei.csic.es>

- Beguería, S.; Vicente, S.M. (2017). *Package 'SPEI': Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index* [cran.R packages]. Fecha de consulta: enero de 2019. Disponible en: <https://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/SPEI.pdf>
- Burrough, P.A.; McDonnell, R.A. (1998). "Principles of Geographical Information Systems" [en línea]. *Semantic Scholar*. Fecha de consulta: diciembre de 2018. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/d8e0/b6b225b36cac23608b41a51e13ddb2746cbd.pdf>
- Castro, A.; Montecinos, A. (2012). "Análisis de la predictibilidad de la precipitación invernal de 2011 en Chile centro-sur, basado en pronósticos del modelo WRF", p. 10 [en línea]. *Departamento de Geofísica DGEO. Universidad de Concepción. II Encuentro de Modelación Atmosférica*, 17 – 19 de octubre, 2012, Valparaíso (Chile). Fecha de consulta: diciembre de 2018. Disponible en: ftp://atmosfera.cl/pub/rgarreau/AFEX/I2/ppt_congreso_AC.pdf
- Centro de Estudios Hidrográficos, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (2013). *Informe técnico: Asistencia técnica, investigación y desarrollo tecnológico en materias de competencia de la dirección general del agua (2007 – 2011). Elaboración y mantenimiento de un sistema de indicadores hidrológicos y estudios para la identificación y caracterización de sequías. Caracterización hidrológica de sequías* [en línea]. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España. Fecha de consulta: agosto de 2019. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/agua/enlaces-de-interes/caracterizacion-hidrologica-de-sequias_tcm30-436649.pdf
- Centro Nacional de Información Geográfica, Instituto Geográfico Nacional (1990). *Ficheros de descarga CLC1990. Formato GDB (File geodatabase de ESRI)*, en información geográfica temática, CORINE Land Cover [pdf dentro gdb] [en línea]. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. Fecha de consulta: enero de 2019. Disponible en: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- Centro Nacional de Información Geográfica, Instituto Geográfico Nacional (2000). *Ficheros de descarga CLC2000. Formato GDB (File geodatabase de ESRI)*, en información geográfica temática, CORINE Land Cover [pdf dentro gdb] [en línea]. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. Fecha de consulta: enero de 2019. Disponible en: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- Centro Nacional de Información Geográfica, Instituto Geográfico Nacional (2015). *Ficheros de descarga CLC2012. Formato GDB (File geodatabase de ESRI)*, en información geográfica temática, CORINE Land Cover [pdf dentro gdb] [en línea]. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. Fecha de consulta: enero de 2019. Disponible en: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- Chuvieco, E. (2015). *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. 3ª edición. Ed.: Ariel Ciencia (Barcelona). 608 pp.
- Epidat (2014). *Epidat 4: Ayuda de distribuciones de probabilidad (octubre 2014). Distribuciones de probabilidad*, pp. 3, 20 y 21 [en línea]. Dirección Xeral de Saúde Pública. Xunta de Galicia. Fecha de consulta: diciembre de 2018. Disponible en: https://www.sergas.es/Saude-publica/Documents/1899/Ayuda_Epidat_4_Distribuciones_de_probabilidad_Octubre2014.pdf
- Espinosa, G. (2015). *Modelo de falla en una empresa proveedora de servicios de internet*, p. 26 (tesis de grado) [en línea]. Instituto Politécnico Nacional. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, México D.F. (México). Fecha de consulta: enero de 2019. Disponible en: <http://148.204.210.201/tesis/1442328816219TesisGerardoEs.pdf>

- Estadística. Análisis estadístico. Estadística descriptiva e inferencia estadística. Contrastes de hipótesis. Regresión, modelos Anova. Nociones de análisis multivariante. Programas en uso* (s.f.), p. 14 [apuntes académicos]. Fecha de consulta: diciembre de 2018. Disponible en: Análisis de la Información Geográfica, SIG, Modelos paramétricos y no paramétricos (R). Moodle Universidad de Zaragoza.
- Felicísimo, Á.M. (1994). “Modelos Digitales del Terreno: Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales”, pp. 5 y 12 [en línea]. *ResearchGate*. Fecha de consulta: diciembre de 2018. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/232423519_Modelos_Digitales_del_Terreno_Introduccion_y_Aplicaciones_en_las_Ciencias_Ambientales
- Flórez, R.; Fernández, J.M. (2008). *Las redes neuronales artificiales: Fundamentos teóricos y aplicaciones prácticas. Serie metodología y análisis de datos en ciencias sociales*, p. 43 [en línea]. Departamento de Dirección y Economía de la Empresa. Universidad de León. Ed.: Netbiblo, S.L. (La Coruña). Fecha de consulta: diciembre de 2018. Disponible en: https://books.google.es/books?id=X0uLwi1Ap4QC&pg=PA43&lpg=PA43&dq=procedimiento+de+remuestreo+jackknife+y+proceso+de+validaci%C3%B3n+cruzada&source=bl&ots=gNLDfnkqZi&sig=dIFwizJGve2gxEn0rACprtqUCo&hl=es&sa=X&ved=2ahUKewiGt768IOPfAhUVsHEKHb_2AwgQ6AEwA3oECAAQAQ#v=onepage&q=procedimiento%20de%20remuestreo%20jackknife%20y%20proceso%20de%20validaci%C3%B3n%20cruzada&f=false
- Gil, I. (2011). “La función de distribución de Weibull en los ensayos de fiabilidad”, pp. 2 y 3 [en línea]. *Scribd*. Fecha de consulta: junio de 2019. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/52058609/Distribucion-de-Weibull>
- González, J.C.; Vicente, S.M.; Peña, D.; Salinas, C.; Tomás, M.; Beguería, S. (2018). “High-resolution spatio-temporal analyses of drought episodes in the western Mediterranean basin” [en línea]. *Acta Geophysica*, 66, pp. 381 – 392. Fecha de consulta: agosto de 2019. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11600-018-0138-x>
- Gouveia, C.M.; Trigo, R.M.; Beguería, S.; Vicente S.M. (2016). “Drought impacts on vegetation activity in the Mediterranean region: An assessment using remote sensing data and multi-scale drought indicators” [en línea]. *Elsevier. ScienceDirect. Global and Planetary Change*, 151, pp. 15 – 27. Fecha de consulta: agosto de 2019. doi: 10.1016/j.gloplacha.2016.06.011
- Guerrero, C. (s.f.). “Tipificación, estandarización, valores Z. Transformación de variables”, p. 1 [en línea]. *Scribd*. Fecha de consulta: enero de 2019. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/104228732/Tipificacion-estandarizacion-valores-Z>
- Haslinger, K.; Koffler, D.; Schöner, W.; Laaha, G. (2014). “Exploring the link between meteorological drought and streamflow: Effects of climate-catchment interaction” [en línea]. *AguaPublications. Water Resources Research*, 50, pp. 2468 – 2487. Fecha de consulta: agosto de 2019. doi: 10.1002/2013WR015051
- iAgua Data (2018). *Embalses* [en línea]. iAgua. Fecha de consulta: diciembre de 2018. Disponible en: <https://www.iagua.es/data/infraestructuras/embalses>

- Instituto de Tecnologías Educativas (s.f.). *Lección 5: Patrones de variabilidad climática. Índices de circulación: 2. Oscilación del Atlántico Norte (NAO)* [en línea]. Ministerio de Educación. Gobierno de España. Fecha de consulta: agosto de 2019. Disponible en: https://fjferreer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion05/2_oscilacin_del_atlntico_norte_nao.html
- Kumar, S.; Xwiers, F.; Dirmeyer, P.A.; Lawrence, D.M.; Shrestha, R.; Werner, A.T. (2016). "Terrestrial contribution to the heterogeneity in hydrological changes under global warming" [en línea]. *AguPublications. Water Resources Research*, 52, pp. 3127 – 3142. Fecha de consulta: agosto de 2019. doi: 10.1002/2016WR018607
- Learn ArcGIS (2018). *Predecir inundaciones con un hidrograma unitario: Delinear la cuenca hidrográfica* [en línea]. ESRI. Fecha de consulta: diciembre de 2018. Disponible en: <https://learn.arcgis.com/es/projects/predict-floods-with-unit-hydrographs/lessons/delineate-the-watershed.htm>
- Llopis, J. (2012a). *La estadística: Una orquesta hecha instrumento. Tema 3: Intervalos de confianza* [blog]. Fecha de consulta: diciembre de 2018. Disponible en: <https://estadisticaorquestainstrumento.wordpress.com/2012/11/30/tema-3-intervalos-de-confianza/>
- Llopis, J. (2012b). *La estadística: Una orquesta hecha instrumento. Tema 5: Correlación* [blog]. Fecha de consulta: diciembre de 2018. Disponible en: <https://estadisticaorquestainstrumento.wordpress.com/2012/11/30/tema-4-correlacion/>
- Lorenzo, J.; Morán, E.; Vicente, S.M.; López, J.I. (2013a). "Streamflow droughts in the Iberian Peninsula between 1945 and 2005: Spatial and temporal patterns" [en línea]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, pp. 119 – 134. Fecha de consulta: agosto de 2019. doi: 10.5194/hess-17-119-2013
- Lorenzo, J.; Vicente, S.M.; González, J.C.; López, J.I.; Cortesi, N. (2013b). "Hydrological drought response to meteorological drought in the Iberian Peninsula" [en línea]. *Climate Research*, 58, pp. 117 – 131. Fecha de consulta: agosto de 2019. doi: 10.3354/cr01177
- Marcos, Ó. (2001). "Sequía: Definiciones, tipologías y métodos de cuantificación" [en línea]. *Investigaciones Geográficas. Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante*, 26, pp. 59 – 80. Fecha de consulta: agosto de 2019. doi: 10.14198/INGEO2001.26.06
- Martínez, J.; Sánchez, N.; Herrero, C.M. (2013). "Recent trends in rivers with near-natural flow regime: The case of the river headwaters in Spain" [en línea]. *Physical Geography Journal*, 37 (5), pp. 685 – 700. Fecha de consulta: agosto de 2019. doi: 10.1177/0309133313496834
- Masés, M.G. (2016). "La paleoclimatología como herramienta de la biogeografía", p. 54 [en línea]. *Ciencia y Mar 2014. Universidad del Mar, Oaxaca (México)*, Vol. XXII (54), pp. 53 – 57. Fecha de consulta: enero de 2019. Disponible en: <http://www.umar.mx/revistas/54/540201.pdf>
- Miguélez, E. (2016). *Métodos de remuestreo: Jackknife y Bootstrap* [slideplayer]. Fecha de consulta: diciembre de 2018. Disponible en: <https://slideplayer.es/slide/10529392/>
- Modelos probabilísticos* (s.f.), p. 6 y 10 [apuntes académicos]. Pontificia Universidad Católica de Chile. Fecha de consulta: agosto de 2019. Disponible en: http://www7.uc.cl/sw_educ/hidrologia/Capitulo_7/modulo7/cap2.pdf

- Moreno, M.C. (2014). *Climatología. Tema 4: La humedad y la nubosidad* [apuntes académicos]. Fecha de consulta: diciembre de 2018. Disponible en: Climatología. Campus Virtual Universitat de Barcelona.
- Moreno, M.C. (2017). *Riesgos Naturales. Tema 3.2.3: El análisis de los riesgos naturales. Los riesgos climáticos y meteorológicos: Las sequías* [apuntes académicos]. Fecha de consulta: agosto de 2019. Disponible en: Riesgos Naturales. Campus Virtual Universitat de Barcelona.
- NUMXL (s.f.). *Encuesta de medidas de comportamiento de pronóstico* [en línea]. Fecha de consulta: diciembre de 2018. Disponible en: <https://support.numxl.com/hc/es/articles/115002386943-Encuesta-de-Medidas-de-comportamiento-de-pron%C3%B3stico>
- Oliveras, I. (2014). *80-20: La distribución de Pareto* [blog]. Fecha de consulta: junio de 2019. Disponible en: https://www.huffingtonpost.es/ignacio-oliveras/8020-y-la-distribucion-de_b_4676121.html
- Organización Meteorológica Mundial y Asociación Mundial para el Agua (2016). *Manual de indicadores e índices de sequía* (M. Svoboda y B.A. Fuchs). Programa de gestión integrada de sequías, Serie 2 de herramientas y directrices para la gestión integrada de sequías, núm. 1173, Ginebra (Suiza) [en línea]. Fecha de consulta: agosto de 2019. Disponible en: http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO-GWP_Manual-de-indicadores_2016
- Ortega, J. (s.f.). *Capítulo 2: Valores extremos*, p. 11 [apuntes académicos]. Departamento de Probabilidad y Estadística. Centro de Investigación en Matemáticas (CIMAT), Guanajuato (México). Fecha de consulta: junio de 2019. Disponible en: <https://www.cimat.mx/~jortega/MaterialDidactico/Extremos10/Cap2-2010.pdf>
- Peña, M.; Gámiz, S.R.; Castro, Y.; Esteban M.J. (2016). "Análisis comparativo de Índices de Sequía en Andalucía para el período 1901 – 2012" [en línea]. *Cuadernos de Investigación Geográfica. Universidad de La Rioja*, 42 (1), pp. 67 – 88. Fecha de consulta: junio de 2019. doi: 10.18172/cig.2946
- Pérez, F. (2019). *Análisis de la información geográfica: Teledetección*, pp. 180 y 181 [apuntes académicos]. Fecha de consulta: agosto de 2019. Disponible en: Análisis de la Información Geográfica, Teledetección, Tratamiento Digital Avanzado de Imágenes de Teledetección. Moodle Universidad de Zaragoza.
- Pérez, J.; Merino, M. (2013). *Definición de punto de rocío* [blog]. Fecha de consulta: diciembre de 2018. Disponible en: <https://definicion.de/punto-de-rocio/>
- Rodrigues, M. (2017a). *Análisis espacial avanzado: Modelos paramétricos y no paramétricos (R). Análisis de correlación*, p. 7 [apuntes académicos]. Fecha de consulta: diciembre de 2018. Disponible en: Análisis de la Información Geográfica, SIG, Modelos paramétricos y no paramétricos (R). Moodle Universidad de Zaragoza.
- Rodrigues, M. (2017b). *Análisis espacial básico: Búsquedas e interrogaciones, criterios espaciales y temáticos, generalización; funciones básicas de reclasificación, superposición, vecindad y distancia, y conectividad*, p. 17 [apuntes académicos]. Fecha de consulta: enero de 2019. Disponible en: Análisis de la Información Geográfica, SIG, Análisis espacial básico – Ráster. Moodle Universidad de Zaragoza.
- Sánchez, F.J. (2006). *Evapotranspiración: Concepto de evapotranspiración. Utilidad. Unidades*, p. 2 [en línea]. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. Fecha de consulta: diciembre de 2018. Disponible en: <http://hidrologia.usal.es/temas/Evapotransp.pdf>

- Santana, L.M. (2008). *Evapotranspiración Penman-Monteith. Análisis Año 2008*, p. 10 [en línea]. AgroCabil-do. Cabildo Tenerife. Fecha de consulta: diciembre de 2018. Disponible en: <http://www.agrocabil-do.org/publica/analisisclimatico/evapotrans2008.pdf>
- Saz, M.Á. (2017). *Análisis espacial avanzado: Métodos de interpolación*, pp. 2, 9, 14 y 15 [apuntes académicos]. Fecha de consulta: febrero de 2018. Disponible en: Análisis de la Información Geográfica, SIG, Interpolaciones. Moodle Universidad de Zaragoza.
- Van Loon, A.F. (2015). "Hydrological drought explained" [en línea]. *WIREs Water Journal*, 2, pp. 359 – 392. Fecha de consulta: agosto de 2019. doi: 10.1002/wat2.1085
- Van Loon, A.F.; Laaha, G. (2014). "Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics" [en línea]. *Elsevier. ScienceDirect. Journal of Hydrology*, 526, pp. 3 – 14. Fecha de consulta: agosto de 2019. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.10.059
- Vasquez, K.L. (2016). "Distribución de Pearson Tipo III" [en línea]. *Scribd*. Fecha de consulta: junio de 2019. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/329650882/Distribucion-de-Pearson-Tipo-III>
- Vicente, S.M.; Azorín, C.; Peña, M.; Tomas, M.; Domínguez, F.; Martín, N.; Beguería, S.; El Kenawy, A.; Noguera, I.; García, M. (2019). "A high-resolution spatial assessment of the impacts of drought variability on vegetation activity in Spain from 1981 to 2015" [en línea]. *Digital.CSIC. Natural Earth System Sciences*, 19, pp. 1189 – 1213. Fecha de consulta: febrero de 2019. doi: 10.5194/nhess-19-1189-2019
- Vicente, S.M.; Beguería, S.; López, J.I. (2010). "A multiscalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index" [en línea]. *ResearchGate. Journal of Climate*, 23, pp. 1696 – 1718. Fecha de consulta: agosto de 2019. doi: 10.1175/2009JCLI2909.1
- Vicente, S.M.; Beguería, S.; Lorenzo, J.; Camarero, J.J.; López, J.I.; Azorín, C.; Revuelto, J.; Morán, E.; Sánchez, A. (2012a). "Análisis comparativo de diferentes índices de sequía para aplicaciones ecológicas, agrícolas e hidrológicas" [en línea]. *Digital.CSIC. Cambio climático. Extremos e impactos. 8º Congreso Internacional de la Asociación Española de Climatología*, 25 – 28 de septiembre, 2012, Salamanca (España). Fecha de consulta: agosto de 2019. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/62168>
- Vicente, S.M.; López, J.I.; Beguería, S.; Lorenzo, J.; Azorín, C.; Morán, E. (2012b). "Accurate computation of a Streamflow Drought Index" [en línea]. *Digital.CSIC. Journal of Hydrologic Engineering*, 17 (2), pp. 318 – 332. Fecha de consulta: enero de 2019. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000433
- Vicente, S.M.; Tomas, M.; Beguería, S.; Reig, F.; Latorre, B.; Peña, M.; Luna, M.Y.; Morata, A.; González, J.C. (2017). "A high resolution dataset of drought indices for Spain" [en línea]. *Digital.CSIC*, 2 (22). Fecha de consulta: diciembre de 2018. doi: 10.3390/data2030022
- Wikipedia (2019). *L-moment* [en línea]. Fecha de consulta: agosto de 2019. Disponible en: <https://en.wikipedia.org/wiki/L-moment>
- XLSTAT (2017). *Prueba homogeneidad series temporales excel* [en línea]. Fecha de consulta: diciembre de 2018. Disponible en: <https://help.xlstat.com/customer/es/portal/articles/2062307-prueba-homogeneidad-series-temporales-excel>

MATERIALES CARTOGRÁFICOS

- Centro Nacional de Información Geográfica, Instituto Geográfico Nacional (1990). *CORINE Land Cover 1990 (España)*, en información geográfica temática, CORINE Land Cover [base cartográfica en formato gdb] [en línea]. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. Fecha de adquisición: enero de 2019. Disponible en: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- Centro Nacional de Información Geográfica, Instituto Geográfico Nacional (2000). *CORINE Land Cover 2000 (España)*, en información geográfica temática, CORINE Land Cover [base cartográfica en formato gdb] [en línea]. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. Fecha de adquisición: enero de 2019. Disponible en: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- Centro Nacional de Información Geográfica, Instituto Geográfico Nacional (2009). *CORINE Land Cover 2006 (España)*, en información geográfica temática, CORINE Land Cover [base cartográfica en formato gdb] [en línea]. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. Fecha de adquisición: enero de 2019. Disponible en: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- Centro Nacional de Información Geográfica, Instituto Geográfico Nacional (2015). *CORINE Land Cover 2012 (España)*, en información geográfica temática, CORINE Land Cover [base cartográfica en formato gdb] [en línea]. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. Fecha de adquisición: enero de 2019. Disponible en: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- Centro Nacional de Información Geográfica, Instituto Geográfico Nacional (2009). *Modelo Digital del Terreno – MDT200*, en modelos digitales de elevaciones, MDT200 [base cartográfica en formato ecw] [en línea]. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. Fecha de adquisición: enero de 2019. Disponible en: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- Esri Servicios Online (2012). *Provincias – ETRS89 UTM 30N* [base cartográfica en formato shp] [en línea]. Fecha de adquisición: diciembre de 2018. Disponible en: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=83d81d9336c745fd839465beab885ab7>
- Instituto Pirenaico de Ecología en Zaragoza (s.f.). *Estaciones de aforo de la España peninsular: coordenadas y caudales 1962 – 2013 a escala mensual* [datos en formato csv]. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Gobierno de España. Fecha de adquisición: diciembre de 2018.
- Instituto Pirenaico de Ecología en Zaragoza (s.f.). *Red de embalses de la España peninsular* [base cartográfica en formato shp]. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Gobierno de España. Fecha de adquisición: diciembre de 2018.
- Instituto Pirenaico de Ecología en Zaragoza (s.f.). *Subcuencas de la España peninsular* [base cartográfica en formato shp]. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Gobierno de España. Fecha de adquisición: diciembre de 2018.
- Instituto Pirenaico de Ecología en Zaragoza (s.f.). *Subcuencas de la España peninsular: Índice de Sequía Hidrológica SSI 1962 – 2013 a escala mensual* [datos en formato csv]. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Gobierno de España. Fecha de adquisición: enero de 2019.

- Instituto Pirenaico de Ecología en Zaragoza (s.f.). *Subcuencas de la España peninsular: NDVI 1981 – 2015 a escala mensual* [datos en formato csv]. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Gobierno de España. Fecha de adquisición: enero de 2019.
- Instituto Pirenaico de Ecología en Zaragoza (s.f.). *Subcuencas de la España peninsular: variables climáticas 1961 – 2016 a escala mensual (evapotranspiración de referencia, precipitación, temperaturas máxima y mínima)* [datos en formato csv]. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Gobierno de España. Fecha de adquisición: diciembre de 2018.
- Servicio de descargas del Ministerio para la Transición Ecológica (2015). *Demarcaciones hidrográficas (planes hidrológicos 2016 – 2021, ámbito terrestre)* [base cartográfica en formato shp] [en línea]. Gobierno de España. Fecha de adquisición: diciembre de 2018. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/en/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/ddhh-oocc.aspx>.
- Servicio de descargas del Sistema Integrado de Información del Agua (s.f.). *Núcleos de Población*, en datos por tema [base cartográfica en formato shp] [en línea]. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España. Fecha de adquisición: agosto de 2019. Disponible en: <https://servicio.mapama.gob.es/sia/visualizacion/descargas/mapas.jsp>.
- Servicio de descargas del Sistema Integrado de Información del Agua (s.f.). *Red oficial de estaciones de aforo en embalses*, (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas), en datos por tema [base cartográfica en formato shp] [en línea]. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España. Fecha de adquisición: diciembre de 2018. Disponible en: <https://servicio.mapama.gob.es/sia/visualizacion/descargas/mapas.jsp>.
- Servicio de descargas del Sistema Integrado de Información del Agua (s.f.). *Ríos*, en datos por tema [base cartográfica en formato shp] [en línea]. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España. Fecha de adquisición: diciembre de 2018. Disponible en: <https://servicio.mapama.gob.es/sia/visualizacion/descargas/mapas.jsp>.

ANEXOS**ANEXO 1: GLOSARIO**

Balance hídrico climático (BHC): *“definido según expresión matemática que ajusta las entradas y salidas de masas de agua en el espacio y en el tiempo”* (Arriaga, 2015).

Correlación de Pearson: función de distribución de probabilidad continua que opera considerando los valores brutos de las variables para calcular el grado de asociación lineal entre dos variables (Rodrigues, 2017a, p. 7). La validez del test de hipótesis sobre la correlación entre las variables requiere que la variable independiente (X) tenga una distribución normal o simétrica de los datos (*Estadística. Análisis estadístico. Estadística descriptiva e inferencia estadística. Contrastes de hipótesis. Regresión, modelos Anova. Nociones de análisis multivariante. Programas en uso, s.f., p. 14*).

Correlación significativa: significancia de correlación entre dos variables, teniendo en cuenta de que el intervalo de confianza es del 95% según una distribución normal de los datos, lo cual significa que el 95% de la varianza se encuentra en ± 2 desviaciones estándar en torno a la media (Llopis, 2012ab).

Desviación estándar: *“medida de dispersión que indica cuánto tienden a alejarse los valores concretos de la media en una distribución de datos”* (Juan Ramón de la Riva, comunicación académica, octubre de 2017).

Distancia Ortogonal Mínima (MD): aproximación que muestra el grado de ajuste de la validez del modelo de la distribución de probabilidad (Vicente et al., 2012b).

Distribución Chi-cuadrado: función de distribución de probabilidad continua compuesta por la variable aleatoria normal independiente de media 0 y varianza 1, y un parámetro k que representa los grados de libertad de la variable aleatoria (Vasquez, 2016).

Distribución de Pareto: función de distribución de probabilidad continua que *“describe la probabilidad de ocurrencia de sucesos similares, y es la distribución de probabilidad típica de variables estadísticas aleatorias que parten de cero, que no tienen un límite superior definido y cuya probabilidad de ocurrencia es baja”* (Oliveras, 2014).

Distribución de Pearson tipo III: distribución Gamma o distribución Chi-cuadrado.

Distribución del Valor Extremo: función de distribución de probabilidad continua que se basa en el estudio de las posibles distribuciones límite para máximos normalizados de sumas de productos de variables aleatorias independientes igualmente distribuidas (Ortega, s.f., p. 11).

Distribución de Weibull: función de distribución de probabilidad continua que representa la probabilidad de fallo de que los componentes de un conjunto sobrevivan después de un tiempo dado en función del tiempo transcurrido (Gil, 2011, pp. 2 y 3).

Distribución Gamma: función de distribución de probabilidad continua adecuada para modelizar el comportamiento de variables aleatorias con asimetría positiva (variables que presentan una mayor densidad de sucesos a la izquierda de la media que a la derecha), y/o los experimentos en donde está involucrado el tiempo (Arroyo et al., 2014, pp. 102 y 103).

Distribución Log-logística: función de distribución de probabilidad continua *“cuyo logaritmo de la variable aleatoria tiene una distribución logística”* (García, 2013, dentro de Espinosa, 2015, p. 26), entendiendo por distribución logística como la función de distribución de probabilidad continua utilizada en el estudio del crecimiento temporal de las variables (Epidat, 2014, p. 21).

Distribución Log-normal: función de distribución de probabilidad continua cuyo logaritmo de la variable aleatoria tiene una distribución normal (Epidat, 2014, p. 20).

Ecuación FAO-56 Penman-Monteith (PM): *“se recomienda actualmente como el método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia [...] En 1948, Penman combinó el balance energético con la transferencia de masa y obtuvo una ecuación para calcular la evaporación de una superficie abierta de agua a partir de datos climáticos estándar de insolación solar (horas de sol), temperatura, humedad atmosférica y velocidad del viento”* (Santana, 2008, p. 10).

Error Medio Absoluto (MAE): cuantifica con el mismo peso errores negativos y positivos, tratándose de una medida del valor medio de los errores del pronóstico (Castro y Montecinos, 2012, p. 10). Además, al no ser de naturaleza cuadrática, no está tan influenciado por valores atípicos (NUMXL, s.f.).

Estandarizar una variable: se obtiene mediante la diferencia entre el valor y su media, y dividido entre la desviación estándar, facilitando la comparación entre variables con distintas unidades y/o distribuciones, y el reconocimiento de valores atípicos (Guerrero, s.f., p. 1).

Evapotranspiración de referencia (ETO): *“evapotranspiración que se produciría en un campo de gramíneas de 12 cm de altura, sin falta de agua y con determinadas características aerodinámicas y de albedo”* (Sánchez, 2006, p. 2).

Evapotranspiración potencial (ETP): *“evaporación que se produciría si la humedad del suelo y la cubierta vegetal estuvieran en condiciones óptimas”* (Thornthwaite, 1948, dentro de Sánchez, 2006, p. 2).

Función de distribución de probabilidad: especifica todos los valores posibles de una variable aleatoria junto con la probabilidad de que cada uno ocurra, entendiendo por variable aleatoria como aquella variable que puede tomar diferentes valores con probabilidades determinadas (Epidat, 2014, p. 3).

Humedad relativa: cociente en porcentaje de la masa de vapor de agua contenida en un volumen de aire y la masa de vapor de agua que saturaría dicho volumen. Para cada temperatura habrá un límite de cantidad de vapor de agua, pasado el límite el aire estará saturado y si aumenta se condensará. El momento a partir del cual se produce la saturación es cuando la humedad relativa alcanza el 100% y se dará como resultado el punto de rocío (Moreno, 2014).

Indicador: variables o parámetros utilizados para describir las condiciones de las sequías, como por ejemplo la precipitación, la temperatura, la humedad del suelo, los caudales fluviales, los niveles de las aguas superficiales y subterráneas, y el manto de nieve (OMM, 2016, p. 9).

Índice: suelen ser representaciones numéricas informatizadas de la gravedad de las sequías, determinadas mediante datos climáticos o hidrometeorológicos, entre los que se incluyen los indicadores enumerados; desde el punto de vista técnico, los índices también son indicadores. Tienen por objeto analizar el estado cualitativo de las sequías en el entorno en un período de tiempo determinado (OMM, 2016, p. 9).

Índice de Concordancia D: es una medida relativa del grado de ajuste de la validez del modelo, escalándose con la magnitud de las variables, reteniendo la información de la media y no amplificando los valores atípicos. El valor 1 corresponde con una perfecta relación entre los valores estimados y los observados (Vicente et al., 2017, p. 5).

Interpolación: proceso perteneciente a la estadística espacial, es el *“procedimiento que permite calcular el valor de una variable en una posición del espacio, conociendo los valores de esta variable en otras posiciones”* (Burrough y McDonnell, 1998). Partiendo de los valores medidos en una muestra de puntos situados en un área de estudio y conociendo XY(Z), los métodos de interpolación tratan de predecir o estimar los valores de la misma variable allí donde no hay datos, de manera que se convierten datos puntuales en superficies continuas (Saz, 2017, p. 2).

Mejor Ajuste Mensual (BMF): aproximación que muestra el grado de ajuste de la validez del modelo de la distribución de probabilidad (Vicente et al., 2012b).

Método de interpolación geoestadístico Kriging: método de interpolación que necesita de la resolución de un conjunto de sistemas de ecuaciones matriciales. Integra los valores de distancia XY y elementos de ponderación obtenidos a partir del análisis estadístico-espacial del conjunto muestral. El valor se estima a partir de los datos observados en los puntos vecinos (Saz, 2017, pp. 14 y 15).

Método de L-momentos: modelo probabilístico para resumir la forma y estimar los parámetros de las distribuciones de probabilidad de forma análoga a los momentos convencionales, que constituye una herramienta matemática para manejar variables aleatorias y asociar probabilidades a los distintos valores a partir de los registros observados (Wikipedia, 2019; *Modelos probabilísticos*, s.f.).

Método de Momentos Ponderados de Probabilidad (PWMs): modelo probabilístico para estimar los parámetros de diversas distribuciones de probabilidad, preferible cuando el tamaño de la muestra es limitado, que constituye una herramienta matemática para manejar variables aleatorias y asociar probabilidades a los distintos valores a partir de los registros observados (*Modelos probabilísticos*, s.f., p. 6 y 10).

Método de remuestreo Jackknife: método de remuestreo para disminuir el sesgo en la estimación de series cronológicas (Miguélez, 2016), que se basa en la eliminación secuencial de un caso de la muestra N (N-1) y utiliza el dato eliminado para contrastar el modelo de interpolación y el conjunto muestral N-1 para la estimación de toda la red (Flórez y Fernández, 2008, p. 43).

Método del vecino más próximo: teniendo en cuenta el principio de autocorrelación espacial de los datos (los puntos más próximos presentan valores más parecidos entre sí que con los que se encuentran más alejados), el método del vecino más próximo trata de estimar el valor de un punto a partir de los puntos más próximos con valor conocido, y trabajando sobre un conjunto de puntos muestrales cercanos al punto en el que se quiere estimar el valor, reteniendo mucho mejor las características espaciales más concretas (Saz, 2017, pp. 9 y 14).

Modelo Digital de Elevaciones (MDE): estos modelos “describen la altimetría de una zona mediante un conjunto de datos acotados [...] Son una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno”, siendo la unidad básica de información en un MDE el valor de altitud Z al que acompañan los valores correspondientes de XY; el valor propio de un punto de localización para la construcción de los MDE será estimado por interpolación a partir de los datos de su entorno (Felicísimo, 1994, pp. 5 y 12).

Organización Meteorológica Mundial (OMM): organismo especializado de la ONU; portavoz autorizado sobre el estado y el comportamiento de la atmósfera, su interacción con la tierra y los océanos, el tiempo y el clima que genera y la consiguiente distribución de los recursos hídricos (OMM, 2016, p. 2).

Oscilación del Atlántico Norte (NAO): fluctuación de la circulación atmosférica entre las regiones de altas presiones subtropicales de las Azores y las bajas polares de la cuenca del Atlántico Norte; su influencia se extiende desde Norteamérica Central hasta Europa, llegando a alcanzar el norte de Asia, determinando la variabilidad del clima invernal en la región del Atlántico Norte (ITE, s.f.; Álvarez, 2015) y, como consecuencia de las teleconexiones, su influencia se extiende a toda la Tierra (Álvarez, 2015). Este fenómeno se puede manifestar en fase positiva —el anticiclón de las Azores presenta un centro de presión más alto de lo habitual y la depresión polar un centro de presión más bajo, resultando en una mayor cantidad de tormentas de invierno y de mayor intensidad que cruzan el Atlántico Norte—, o negativa —se reducen o suavizan ambos gradientes de presión y por lo tanto se producen menos tormentas en invierno y más débiles que cruzan el Atlántico Norte— (Álvarez, 2015).

Oscilación del Mediterráneo Occidental (WeMO): *“patrón de teleconexión a escala regional que refleja los cambios de presión entre el suroeste de España y el norte de Italia [...] Se aplica principalmente al estudio de la variabilidad de la precipitación sobre la fachada oriental de la península Ibérica, ya que existe una correlación mayor que con la Oscilación del Atlántico Norte (NAO)”* (AEMET, 2018).

Parámetro Kernel: consiste en asignar mayor peso a los datos más próximos al centro de la vecindad aplicada y menor a medida que nos alejamos de éste, obteniendo un aspecto más suavizado que con otro tipo de ponderación (Rodrigues, 2017b, p. 17).

Programa europeo Copernicus: *“programa de la Unión Europea y la Agencia Espacial Europea (ESA) para la vigilancia mundial del medio ambiente y seguridad, así como de la gestión de emergencias a través del Sistema Europeo de Información sobre Incendios Forestales (EFFIS)”* (Juan Ramón de la Riva, comunicación académica, octubre de 2017).

Proxys climáticos: indicadores indirectos de las condiciones climáticas del pasado y los procesos de cambio de las mismas utilizados en paleoclimatología, entendida esta última como la ciencia que se encarga del estudio del clima del pasado cuando no se disponía de registro instrumental (Masés, 2016, p. 54).

Teledetección (remote sensing): ciencia y técnica aplicada de obtener información espacial de la superficie de nuestro planeta a distancia (imágenes dinámicas y globales), a través del análisis de los datos adquiridos con instrumentos que no están en contacto con la superficie y utilizando la energía electromagnética como medio para registrar las características de la cubierta observada (Chuvienco, 2015).

Temperatura del punto de rocío: *“refiere al momento a partir del cual se condensa el vapor de agua que hay en la atmósfera y se genera, de acuerdo a la temperatura, escarcha, neblina o rocío [...] Cuando la humedad relativa alcanza el 100%, se produce la saturación del aire y alcanza el punto de rocío”* (Pérez y Merino, 2013).

Test de Homogeneidad Normal Estandarizado (SNHT): *“se aplica generalmente a una serie de ratios que comparan las observaciones con un promedio. Las ratios son entonces estandarizadas”* (XLSTAT, 2017).

Topología: *“la herramienta de topología en el contexto de los SIG, permite usar y definir las relaciones cualitativas inherentes a las características geométricas coincidentes entre las distintas entidades, asegurando la calidad de los datos y una representación más real de los objetos sobre el territorio”* (Ricardo Badía, comunicación académica, febrero de 2018).

ANEXO 2: OTRAS HERRAMIENTAS Y FUNCIONES SOFTWARES ARCGIS 10.5 Y RSTUDIO**Tabla A.2.1.** Herramientas y funciones – Softwares ArcGIS 10.5 y RStudio

ArcMAP	
Dissolve	
Query Builder	selección por atributos
Select	
Clip	
Create Feature Class	From XY Table
Join	
Editor	
Merge	
Export Data	
Spatial Join	
Table to Excel	
Excel to Table	
Topology	regla <i>Area Boundary Must Be Covered By Boundary Of</i> herramienta <i>Align Edge Tool</i>
Add Field	
Field Calculator	
Calculate Geometry	
Summarize	
Join Field	
Intersect	
Save as Layer File	
Extract by Mask	
Feature to Point	
Switch Selection	
Union	

RStudio	
cor ()	
cbind ()	
boxplot ()	(formula = Y ~ X, data = NomObjetoR, main = 'Titulo', xlab = 'NomX', ylab = 'NomY')

Fuente: elaboración propia

ANEXO 3: SCRIPTS SOFTWARE RSTUDIO

```
#MASTER EN TIG PARA LA OT: SIG Y TDT
#PRACTICAS IPE / PROYECTO DE INVESTIGACION TFM
#SCRIPT PUNTO 2 METODOLOGIA
#DATOS A CARGAR:
    #Latitudes de las estaciones de aforo de cabecera
    #Tiempos de las series > series mensuales, periodo 1962 - 2013
    #Variables climaticas de las subcuencas de cabecera > ETO, P, TMAX, Tmin
#DIMENSIONES DE LOS DATOS DE ENTRADA:
    #214 subcuencas de cabecera
    #624 meses
    #España peninsular
#SPI > datos necesarios > tiempos, serie temporal de P
#SPEI > datos necesarios > tiempos, serie temporal de P, serie temporal de ETO
    #Las latitudes y las temperaturas serian necesarias en caso de no tener la serie temporal
    de ETO
    #Se explicara el calculo del indice SPEI de las dos maneras:
        #SPEI con serie temporal de P y ETO
        #SPEI con serie temporal de P, TMAX, Tmin y lat > TMAX, Tmin y lat = calculo de la
        ETP con funcion hargreaves()
    ##si ETO ~ ETP >> BHC = P - ETO o BHC = P - ETP##

#####
#####

#PASO 1.INSTALAR Y CARGAR TODAS LAS LIBRERIAS NECESARIAS:
install.packages('lmomco') #Dependencias
library(lmomco)
install.packages('parallel') #Dependencias
library(parallel)
install.packages('ggplot2') #Dependencias
library(ggplot2)
install.packages('SPEI')
library(SPEI)
#Sirve para calcular los dos indices > SPI y SPEI
#PAQUETE SPEI-RSTUDIO > https://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/index.html
#MANUAL DE REFERENCIA SPEI-RSTUDIO > https://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/SPEI.pdf
#SPEI por Begueria, S.; Latorre, B.; Reig, F.; Vicente, S.M. (IPE-CSIC) > http://spei.csic.es

#####
#####

#PASO 2.ESTABLECER EL DIRECTORIO DEL ESPACIO DE TRABAJO:
setwd('D:/Caty_IPE_TFM/Clima/CabeceraTFM')

#####
#####

#ANTES DE CONTINUAR - CLASES DE OBJETOS EN R:
#VECTOR > secuencia de valores numericos o de caracteres
#MATRIZ > objeto bidimensional; todos los elementos deben ser del mismo formato
#DATAFRAME > objeto bidimensional; los elementos pueden ser de distinto formato
#ARRAY > objeto que puede ser bidimensional o tridimensional, indicando las dimensiones de dicho
objeto

#####
#####
```

```

#PASO 3.LEER E INCORPORAR LOS DATOS:
##3.1.LEER E INCORPORAR LAS LATITUDES DE LAS ESTACIONES DE AFORO DE CABECERA:
latTFM<-read.csv('latestafocabecTFM.csv',header=TRUE,sep=';',dec=',') #Crear objeto latitudes
latTFM #Comprobar objeto
class(latTFM) #Comprobar formato del objeto > clase de objeto DataFrame
#####
##3.2.LEER E INCORPORAR LOS TIEMPOS DE LAS SERIES (SERIES MENSUALES DE 1962 A 2013):
tiempos<-read.csv('etocabecTFM.csv',header=TRUE,sep=';',dec=',')[,1] #Crear objeto tiempos
  #Los tiempos se pueden encontrar en los ficheros de las variables climaticas (cualquier
  #fichero seria valido)
  #[,1] > para indicar que SOLO tenga en cuenta la primera columna ya que es la columna de
  #los tiempos
tiempos #Comprobar objeto
class(tiempos) #Clase de objeto Factor
  #Al tener solo en cuenta una columna, la de los tiempos, R no genera un DataFrame, sino
  #una serie de vectores
tiempos<-as.data.frame(tiempos) #Cambiar el formato del objeto a DataFrame
class(tiempos) #Clase de objeto DataFrame
colnames(tiempos)<-c('TIEMPOS') #Asignar nuevo nombre a la columna del objeto
tiempos #Comprobar objeto
#####
##3.3.LEER E INCORPORAR LAS VARIABLES CLIMATICAS DE LAS SUBCUENCAS DE CABECERA:
etoTFM<-read.csv('etocabecTFM.csv',check.names=FALSE,sep=';',dec=',')[,-1] #Crear objeto ETO
preTFM<-read.csv('precabecTFM.csv',check.names=FALSE,sep=';',dec=',')[,-1] #Crear objeto P
tmaxTFM<-read.csv('tmaxcabecTFM.csv',check.names=FALSE,sep=';',dec=',')[,-1] #Crear objeto TMAX
tminTFM<-read.csv('tmincabecTFM.csv',check.names=FALSE,sep=';',dec=',')[,-1] #Crear objeto Tmin
  #No comprobar la cabecera de los ficheros con 'check.names=FALSE' porque R no soporta ca-
  #beceras numericas (las cabeceras son de tipo X0005, y aunque no son numericas totalmente,
  #se ha indicado por si acaso)
  #[,-1] > para indicar que NO tenga en cuenta la primera columna ya que es la columna de
  #los tiempos y se han cargado en el paso 3.2
class(etoTFM) #Clase de objeto DataFrame
class(preTFM) #Clase de objeto DataFrame
class(tmaxTFM) #Clase de objeto DataFrame
class(tminTFM) #Clase de objeto DataFrame

#####
#####

#PASO 4.CALCULAR EL INDICE DE SEQUIA CLIMATICA SPI:
spi<-
array(data=NA,dim=c(624,214,48),dimnames=list(TIEMPOS=tiempos$TIEMPOS,SUBCU=colnames(etoTFM),
ACUMUL=c(seq(1,48,1)))) #Crear objeto indice SPI vacio
spi #Comprobar objeto
#array > generar un objeto tridimensional vacio con unas características determinadas
#data=NA > para crear un array vacio de valores, siempre indicar 'NA' (=valores NoData)
#dim=c(624,214,48) > indicar las dimensiones del array:
  #624 > filas que tendra el array > tiempos
  #214 > columnas que tendra el array > subcuencas de cabecera
  #48 > valoresZ que tendra el array > escala temporal de acumulacion de la anomalia clima-
  #tica (ETAAC) = 48 meses
#dimnames=list() > indicar los nombres del array; de estructura igual que 'dim':
  #TIEMPOS=tiempos$TIEMPOS > que asigne a las filas 'TIEMPOS' del array los mismos nombres
  #de la columna 'TIEMPOS' del DataFrame 'tiempos'
  #SUBCU=colnames(etoTFM) > que asigne a las columnas 'SUBCU' del array los mismos nombres
  #de las columnas del DataFrame 'etoTFM'
  #Los nombres de las columnas se pueden encontrar en los DataFrame de las variables
  #climaticas (cualquier DataFrame seria valido)

```

```

#ACUMUL=c(seq(1,48,1)) > que asigne a los valoresZ 'ACUMUL' del array la ETAAC de 1 a 48
meses, de 1 en 1 > como maximo a la ETAAC de los 48 meses anteriores incluido el mes ob-
servado
#Hasta aqui > se ha generado el array 'spi' vacio con las características anteriores
#Ahora > rellenar el array 'spi' con los valores de los coeficientes de la función de distribu-
ción ajustada a los datos de P
#El índice SPI estandarizara cada valor de P,
    #acumulando la anomalía climática en el tiempo de 1 a 48 meses,
    #y ajustando los valores a una función de distribución Gamma por defecto
for(SUBCU in 1:ncol(preTFM)){
  for(ACUMUL in seq(1,48,1)){
    print(SUBCU)
    spi[,SUBCU,ACUMUL]<-spi(preTFM[,SUBCU],scale=ACUMUL)$fitted}
  }
#Función de iteración anidada en otra función de iteración y poder rellenar el array 'spi'
#for(SUBCU in 1:ncol(preTFM)) > para las columnas 'SUBCU' del array recorre sucesivamente las
columnas del DataFrame 'preTFM'
    #ncol(preTFM) > devuelve el número de columnas del DataFrame 'preTFM'
#for(ACUMUL in seq(1,48,1)) > para los valoresZ 'ACUMUL' del array recorre sucesivamente la ETAAC
de 1 a 48 meses, de 1 en 1
#print(SUBCU) > muestra en pantalla el proceso para comprobar que no se generen errores
#spi[,SUBCU,ACUMUL]<-spi(preTFM[,SUBCU],scale=ACUMUL)$fitted > rellenar el array 'spi' con la
función spi():
    #spi[,SUBCU,ACUMUL] > objeto en R
    #spi(preTFM[,SUBCU],scale=ACUMUL)$fitted > función spi() > para el array estandariza:
        #preTFM[,SUBCU] > los valores de P para las columnas 'SUBCU'
        #scale=ACUMUL > a la ETAAC de 1 a 48 meses y de 1 en 1
        #fitted > y ajústalo todo a la función de distribución Gamma
spi #Comprobar objeto
#Pero los valores de P extremos a la baja son imposibles de estandarizar ajustándolos a una fun-
ción de distribución, así que:
spi[is.infinite(spi)]<- -3
    #A cualquier valor que sea infinito en el array 'spi', pon el valor -3 (-3 porque los ín-
dices de sequía van de -3 a 3)
#Guardar el array 'spi' en formato RData:
save(spi,file='D:/Caty_IPE_TFM/Indices/SPIcabeceras/SPIcabeceras.RData')

#####
#####

#PASO 5.CALCULAR EL INDICE DE SEQUIA CLIMATICA SPEI:
spei<-
array(data=NA,dim=c(624,214,48),dimnames=list(TIEMPOS=tiempos$TIEMPOS,SUBCU=colnames(etoTFM),
ACUMUL=c(seq(1,48,1)))) #Crear objeto índice SPEI vacío
spei #Comprobar objeto
#Ver paso 4 para explicación
#Hasta aquí > se ha generado el array 'spei' vacío con las características anteriores
#Ahora > rellenar el array 'spei' con los valores de los coeficientes de la función de distribu-
ción ajustada a los datos del BHC (= P - ET)
#El índice SPEI estandarizara cada valor del BHC,
    #acumulando la anomalía climática en el tiempo de 1 a 48 meses,
    #y ajustando los valores a una función de distribución Log-logística por defecto
for(SUBCU in 1:ncol(preTFM)){
  for(ACUMUL in seq(1,48,1)){
    print(SUBCU)
    spei[,SUBCU,ACUMUL]<-spei(preTFM[,SUBCU]-etoTFM[,SUBCU],scale=ACUMUL)$fitted}
  }
#Función de iteración anidada en otra función de iteración y poder rellenar el array 'spei'
#Ver paso 4 para explicación

```

#Al tener la serie temporal de ETO, se ha utilizado para el calculo de la funcion spei(); pero la otra manera seria:

```
#for(SUBCU in 1:ncol(preTFM)){
  #for(ACUMUL in seq(1,48,1)){
    #print(SUBCU)
    #spei[,SUBCU,ACUMUL]<-spei(preTFM[,SUBCU]-
    hargreaves(tmax=tmaxTFM[,SUBCU],tmin=tminTFM[,SUBCU],lat=latTFM[SUBCU,2]),scale=ACUMUL
    )$fitted}
  #}
  #Diferencia          en          >          spei[,SUBCU,ACUMUL]<-spei(preTFM[,SUBCU]-
  hargreaves(tmax=tmaxTFM[,SUBCU],tmin=tminTFM[,SUBCU],lat=latTFM[SUBCU,2]),scale=ACU
  MUL)$fitted
  #Funcion hargreaves() > funcion integrada en el paquete SPEI-RStudio que
  sirve para calcular la ETP
spei #Comprobar objeto
#Pero los valores de P extremos a la baja son imposibles de estandarizar ajustandolos a una fun
cion de distribucion, asi que:
spei[is.infinite(spei)]<- -3
  #A cualquier valor que sea infinito en el array 'spei', pon el valor -3 (-3 porque los in
  dices de sequia van de -3 a 3)
#Guardar el array 'spei' en formato RData:
save(spei,file='D:/Caty_IPE_TFM/Indices/SPEIcabeceras/SPEIcabeceras.RData')
```

```
##### FIN DEL SCRIPT #####
#####
```

```
#MASTER EN TIG PARA LA OT: SIG Y TDT
#PRACTICAS IPE / PROYECTO DE INVESTIGACION TFM
#SCRIPT PUNTO 2 METODOLOGIA
```

```
#####
#####
```

```
spi1<-spi[,1] #Guardar en el objeto 'spi1' la acumulacion de la anomalia de precipitacion a 1
mes del indice SPI. Del mismo modo hasta la acumulacion de la anomalia a 48 meses
spi2[is.na(spi2)]<-0 #Substituir valores NoData (NA) por 0, sino no se calcularan las correlacio
nes a partir de la escala temporal de acumulacion a 2 meses. Para todos los objetos
write.csv
(spi1,'/Users/catyrocafernandez/Desktop/IPE_CSIC_BecaJAE/CarpetaCompartidaIPE/Indices/
SPIcabeceras/SPIcabeceras_ETAAC/spi1.csv') #Guardar el objeto en formato valores separados por
comas. Para todos los objetos
#Para el indice SPEI se haria del mismo modo, aunque acumulando la anomalia del BHC en el tiempo
```

```
##### FIN DEL SCRIPT #####
#####
```

```
#MASTER EN TIG PARA LA OT: SIG Y TDT
#PRACTICAS IPE / PROYECTO DE INVESTIGACION TFM
#SCRIPT PUNTO 3 METODOLOGIA

#####
#####

#PASO 1.LEER E INCORPORAR LOS DATOS:
##1.1.LEER E INCORPORAR EL INDICE SSI DE LAS SUBCUENCAS DE LA ESPAÑA PENINSULAR (SERIE MENSUAL DE
1962 A 2013):
    ###(fichero en formato valores separados por comas proporcionado por el IPE)###
ssi<-read.csv('D:/Caty_IPE_TFM/Indices/macroSSI_Esp.csv',check.names=FALSE,sep=';',dec=',')
#Crear objeto indice SSI
    #No comprobar la cabecera de los ficheros con 'check.names=FALSE' porque R no soporta ca-
    beceras numericas (las cabeceras son de tipo X0005, y aunque no son numericas totalmente,
    se ha indicado por si acaso)
ssi #Comprobar objeto
class(ssi) #Comprobar formato del objeto > clase de objeto DataFrame
#####
##1.2.LEER E INCORPORAR LOS CAUDALES DE LAS CABECERAS (SERIE MENSUAL DE 1962 A 2013):
caudalesTFM<-
read.csv('D:/Caty_IPE_TFM/Hidro/CabeceraTFM/caudalescabecTFM.csv',check.names=FALSE,sep=';',
dec=',') #Crear objeto caudales
caudalesTFM #Comprobar objeto
class(caudalesTFM) #Clase de objeto DataFrame
#Previamente se ha depurado el fichero inicial de caudales, tambien proporcionado por el IPE > se
seleccionaron los datos de caudal de las estaciones de aforo de cabecera de la España peninsular

#####
#####

#PASO 2.SOBREESCRIBIR OBJETO INDICE SSI INICIAL CON LAS CABECERAS, MANTENIENDO LOS DATOS SSI:
ssi<-ssi[,colnames(ssi)%in%colnames(caudalesTFM)] #Sobreescribir objeto indice SSI
    #Para el DataFrame 'ssi':
        #identifica los nombres de las columnas del DataFrame 'ssi' coincidentes con los
        nombres de las columnas del DataFrame 'caudalesTFM',
        #y sobreescribe el DataFrame 'ssi' inicial con las columnas coincidentes
ssi #Comprobar objeto
class(ssi) #clase de objeto DataFrame

#####
#####

#PASO 3.QUE RSTUDIO NO TENGA EN CUENTA LA PRIMERA COLUMNA DEL OBJETO COMO VARIABLE POR SER LA
COLUMNA DE LOS TIEMPOS:
tiempos<-ssi[,1] #Crear objeto tiempos
    #[,1] > para indicar que SOLO tenga en cuenta la primera columna ya que es la columna de
    los tiempos
tiempos #Comprobar objeto
class(tiempos) #Clase de objeto Factor
    #Al tener solo en cuenta una columna, la de los tiempos, R no genera un DataFrame, sino
    una serie de vectores
tiempos<-as.data.frame(tiempos) #Cambiar el formato del objeto a DataFrame
class(tiempos) #Clase de objeto DataFrame
colnames(tiempos)<-c('TIEMPOS') #Asignar nuevo nombre a la columna del objeto
tiempos #Comprobar objeto
ssi<-ssi[,-1] #Sobreescribir objeto indice SSI
    #[-1]> para indicar que NO tenga en cuenta la primera columna ya que es la columna de los
    tiempos
class(ssi) #Clase de objeto DataFrame
```

```

ssi1<-array(data=NA,dim=c(624,214),dimnames=list(TIEMPOS=tiempos$TIEMPOS,SUBCU=colnames(ssi)))
#Crear objeto indice SSI vacio
ssi1 #Comprobar objeto
#array > generar un objeto bidimensional vacio con unas características determinadas
#data=NA > para crear un array vacio de valores, siempre indicar 'NA' (=valores NoData)
#dim=c(624,214) > indicar las dimensiones del array:
#624 > filas que tendra el array > tiempos
#214 > columnas que tendra el array > subcuencas de cabecera
#dimnames=list() > indicar los nombres del array; de estructura igual que 'dim':
#TIEMPOS=tiempos$TIEMPOS > que asigne a las filas 'TIEMPOS' del array los mismos nombres
de la columna 'TIEMPOS' del DataFrame 'tiempos'
#SUBCU=colnames(ssi) > que asigne a las columnas 'SUBCU' del array los mismos nombres de
las columnas del DataFrame 'ssi'
#Hasta aquí > se ha generado el array 'ssi1' vacio con las características anteriores
#Ahora > rellenar el array 'ssi1' con los valores del indice SSI
for(SUBCU in 1:ncol(ssi)){
  ssi1[,SUBCU]<-ssi[,SUBCU]
}
#Funcion de iteracion y poder rellenar el array 'ssi1'
#for(SUBCU in 1:ncol(ssi)) > para las columnas 'SUBCU' del array recorre sucesivamente las colum-
nas del DataFrame 'ssi'
#ncol(ssi) > devuelve el numero de columnas del DataFrame 'ssi'
#ssi1[,SUBCU]<-ssi[,SUBCU] > rellenar el array 'ssi1' con los valores de las columnas 'SUBCU' del
DataFrame 'ssi'
ssi1 #Comprobar objeto
ssi1<-as.data.frame(ssi1) #Cambiar el formato del objeto a DataFrame
class(ssi1) #Clase de objeto DataFrame

#####
#####

#PASO 4.GUARDAR OBJETO INDICE SSI CON LAS SUBCUENCAS DE CABECERA:
save
(ssi1,file='/Users/catyrocafernandez/Desktop/IPE_CSIC_BecaJAE/CarpetacompartidaIPE/Indices/
SSIcabeceras/SSIcabeceras.RData') #En formato RData
write.csv
(ssi1,'/Users/catyrocafernandez/Desktop/IPE_CSIC_BecaJAE/CarpetacompartidaIPE/Indices/
SSIcabeceras/SSIcabeceras.csv') #En formato CSV

##### FIN DEL SCRIPT #####
#####

```