



**Universitat de les
Illes Balears**

**Análisis y caracterización de las sequias hidrológicas en cuencas
naturalizadas de la Península Ibérica.**

NOMBRE: Miquel Febrer Martínez

DNI AUTOR: 41537557 V

NOMBRE TUTOR: Jorge Lorenzo Lacruz

Memoria del Trabajo de Fin de Grado

Estudios de Grado de Geografía

Palabras clave: caudal, precipitación, sequia hidrológica, sequía meteorológica, SPI, SSI

de la

UNIVERSITAT DE LES ILLES BALEARS

Curso Académico 2014 - 2015

Caso de no autorizar el acceso público al TFG, marque la siguiente casilla:

Índice

1. Introducción.....	1
1.1. Estado de la cuestión	3
1.2. Justificación del trabajo	4
2. Objetivos del trabajo	5
2.1. Objetivos principales	5
2.2. Objetivos secundarios	5
3. Área de estudio	6
3.1. Río Narcea.....	6
3.2. Río Segre.....	6
3.3. Río Gallo	7
3.4. Río Alfambra.....	7
3.5. Río Genil.....	7
4. Base de datos y metodología	10
4.1. Base de datos climática.....	10
4.2. Base de datos hidrológica	11
4.3. Análisis de tendencias: Tau-b de Kendall.....	12
4.4. Análisis de impactos: Correlación de Pearson	12
4.4. Standardized Precipitation Index (SPI)	13
4.5. Standardized Streamflow Index (SSI).....	13
5. Análisis de las sequías.....	14
5.1. Distribución de las tendencias de caudal.....	14
5.2. Distribución de las tendencias de precipitación	16
5.3. Episodios de sequía meteorológica	18
6. Impactos hidrológicos	20
6.1. Cuencas de respuesta hidrológica rápida.....	21
6.2. Cuencas de respuesta hidrológica lenta o sostenida	21
7. Discusión.....	23
8. Conclusiones.....	25
Agradecimientos	26
Referencias	27

Figuras

Figura 1. Esquema de la propagación del déficit de precipitación a través de otros componentes del ciclo hidrológico. (Alan L. McNab y Thomas R. Karl; modificado de Changnon, 1987).....	2
Figura 2. Localización del área de estudio en el ámbito peninsular.	8
Figura 3. Resumen de las características de las cuencas estudiadas: relieve, usos del suelo y litología.	9
Figura 4. Distribución espacial de las estaciones meteorológicas en las cuencas de estudio (Arriba, de izquierda a derecha: Narcea, Segre y Gallo. Abajo, de izquierda a derecha: Alfambra y Genil).....	11
Figura 5. Expresión de la correlación bivalente de Tau-b de Kendall.	12
Figura 6. Distribución espacial de las tendencias significativas (<0,01) obtenidas de las series mensuales de caudal.	15
Figura 7. Distribución espacial de la tendencia significativa (<0,01) obtenida de la serie anual de caudal.	15
Figura 8. Distribución espacial de las tendencias significativas (<0,01) obtenidas de las series mensuales de precipitación.....	17
Figura 9. Distribución espacial de las tendencias significativas (<0,01) observadas en las series anuales de precipitación.....	17
Figura 10. Evolución temporal del SSI (azul) y SPI (negro) calculado a la escala de mayor correlación.	19
Figura 11. Correlaciones continuas entre el SSI y el SPI a las escalas de 1 a 48 meses en sus respectivas cuencas.	20

Tablas

Tabla 1. Resumen de las características de las cuencas estudiadas.	8
Tabla 2. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.....	10

Lista de acrónimos

AEMET - Agencia Estatal de Meteorología

CEDEX - Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

CSDI - Crop Specific Drought Index / Índice de Sequía Específico para de Cultivo

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change / Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático

MOPREDAS - Monthly Precipitation Database of Spain

NPI – Normalised Precipitation Index / Índice Normalizado de Precipitación

PDSI - Palmer Drought Severity Index / Índice de Severidad de la Sequía de Palmer

PHDI - Palmer Hydrological Drought Index / Índice de Sequía Hidrológica de Palmer

RDI - Reclamation Drought Index / Índice de Sequía – Demanda

SPI - Standardized Precipitation Index / Índice Estandarizado de Precipitación

SSI - Standardized Streamflow Index

UNDP - United Nations Development Programme / Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

WMO - World Meteorological Organization / Organización Meteorológica Mundial

Resumen

En este estudio se lleva a cabo la evaluación de las sequías hidrológicas y meteorológicas en cinco cuencas de la Península Ibérica (Narcea, Segre, Gallo, Alfambra y Genil) para la cuantificación de los impactos en sus caudales. Para ello, se analizan las tendencias de caudales y precipitación del período 1946-2005 y se calcula el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y el Standardized Streamflow Index (SSI). Se ha comprobado una tendencia generalizada a la disminución de caudales y precipitaciones para el período de estudio y como el SPI permite reflejar los déficits de precipitación a múltiples escalas temporales, puede compararse con el SSI para establecer, de forma cuantitativa y precisa, la respuesta hidrológica al déficit de precipitación, que varía en función de las características fisiográficas y climáticas de las cuencas, como la pendiente, la altitud, la litología, los usos del suelo o el tipo de precipitación.

1. Introducción

El agua es un elemento clave para garantizar la supervivencia y el desarrollo de la vida humana, animal y vegetal, así como de multitud de procesos económicos y medioambientales (Black, 2005). El consumo de recursos hídricos aumenta día a día y, sin embargo, no es la cantidad sino la calidad y accesibilidad del agua lo que genera el problema de la escasez (Naredo, 2006). Nos encontramos frente a un recurso limitado y cuya distribución espacial y temporal es muy variable y difícil de predecir.

El uso y disponibilidad del agua ha representado un problema desde tiempos inmemoriales en los países del ámbito mediterráneo. En España, el desarrollo económico de los últimos decenios del siglo XX incrementó el consumo de agua en agricultura e industria, así como el consumo público y privado, derivado en muchas ocasiones del crecimiento turístico (Bosque Maurel, 2008). Las exigencias y usos de la población sobre el territorio son las que transforman la posible escasez física, de origen climático, en escasez social y con afectación a las personas (Naredo, 2006).

La Península Ibérica está condicionada por un conjunto de factores geográficos y físicos que se manifiestan en una extraordinaria variabilidad climática. Entre ellos destacan la disposición general del relieve y los patrones de circulación atmosférica (Moreno et al., 2005).

Existe el consenso generalizado de que en las últimas décadas se han producido grandes cambios en el clima a nivel global y regional, generando un aumento de las temperaturas (aproximadamente 0,7°C) en los últimos 100 años (IPCC, 2007).

Según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) el cambio climático es “una variación estadísticamente significativa del estado global del clima o de su variabilidad durante un largo periodo de tiempo generalmente, décadas o más”. Debido a la incertidumbre de los posibles efectos de este cambio, se ha incrementado el interés por él y numerosos estudios han intentado prever los posibles efectos derivados de este cambio global en pleno desarrollo.

Diferentes modelos prevén un empeoramiento de las condiciones de abastecimiento de agua en el sur de Europa y, más concretamente, en el área mediterránea, un área especialmente vulnerable frente a la variabilidad climática y a los efectos de las sequías (Pachauri y Resigner, 2007; IPCC, 2013).

El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP) determinó que unos 220 millones de personas se encuentran afectadas por situaciones de sequía, y que las sequías inciden negativamente en más población que la combinación de ciclones, inundaciones y seísmos (WMO). La superficie terrestre afectada por sequías se extiende a una tercera parte del planeta (Ruiz y Febles, 2004), convirtiéndose en un problema de alcance global.

La sequía es el riesgo natural de análisis más complejo para el geógrafo, debido a la diversidad de causas y consecuencias territoriales y económicas que lleva asociado (Olcina Cantos, 2001). Debido a su compleja naturaleza, no existe consenso sobre una única definición de sequía

La Organización Meteorológica Mundial define la sequía como: “un período de condiciones meteorológicas anormalmente secas, suficientemente prolongado como para que la falta de precipitaciones cause un grave desequilibrio hidrológico” (OMM, 1990). La gran variedad de definiciones ofrecidas por numerosos entendidos ha generado la categorización de diferentes tipos de sequías. Subrahmanyam (1967) distingue seis tipos de sequía

(meteorológica, climática, atmosférica, agrícola, hidrológica y de gestión hídrica) de forma muy detallada. Sudene (1999) definió tres tipos de sequías (hidrológicas, agrícolas y efectivas). Sin embargo, Wilhite y Glantz (1985), definen cuatro tipos de sequía:

- La sequía meteorológica se define como la ausencia prolongada de precipitación en una región durante un período de tiempo prolongado.
- La sequía hidrológica es un periodo en el cual los recursos hídricos son insuficientes para satisfacer la demanda de agua de una región. Este tipo de sequía puede demorar-se respecto de las sequías meteorológicas y agrícolas.
- La sequía agrícola puede definir-se cómo la ausencia de humedad en el suelo, hecho que dificulta la supervivencia de las plantas y cultivos. Debido a la diversidad de plantas y sus respectivas necesidades, resulta difícil establecer un umbral de sequía agrícola para cada región geográfica.
- La sequía social o económica es la escasez de agua trasladada a las personas y sus actividades económicas. Su aparición se vincula a cualquier sector económico que se vea afectado por dichas circunstancias.

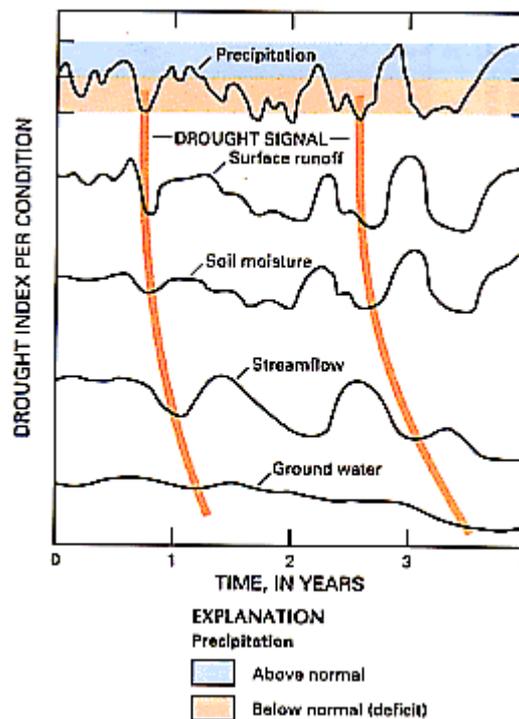


Figura 1. Esquema de la propagación del déficit de precipitación a través de otros componentes del ciclo hidrológico. (Alan L. McNab y Thomas R. Karl; modificado de Changnon, 1987).

1.1. Estado de la cuestión

El área mediterránea, especialmente la Península Ibérica, es un área muy estudiada por climatólogos debido a su localización entre climas templados y climas subtropicales (Coll, 2014). Sin embargo, los estudios mayoritariamente están enfocados al análisis de tendencias de precipitaciones y temperaturas, y han dejado de lado los cambios en los caudales hidrológicos. Desde mediados del siglo XIX existe en España una preocupación oficial por la cuestión de las sequías (Olcina Cantos, 2001). Las sequías meteorológicas aparecen en abundancia en la literatura española a lo largo de los años: numerosos estudios han centrado su interés en la evolución, distribución y tendencias de las precipitaciones a escala regional en España (García Marín et al., 2012; Beguería, 2013; Garmendia et al., 2014), así como al conjunto de la Península Ibérica (Díaz, 2013; Barrera et al., 2004).

Debido a la gran variedad de definiciones y tipos de sequías, han aparecido un gran número de herramientas para proporcionar una evaluación objetiva y cuantitativa de la gravedad de las sequías (Vicente-Serrano et al., 2012b). Aunque algunos se usan indistintamente al tipo de sequía, se establecen índices especializados para sequías meteorológicas, hidrológicas o agrícolas; no así en sequías socioeconómicas cuya única referencia se establece mediante las pérdidas económicas derivadas (Valiente, 2001).

Entre los métodos de análisis de sequías encontramos el Índice Estandarizado de Precipitación o SPI (McKee et al., 1993), el Índice de Severidad de la Sequía de Palmer o PDSI (Palmer, 1965) o el Índice Normalizado de Precipitación o NPI (Garrido, 1999) utilizados para la determinación de sequías meteorológicas; el Índice Hidrológico de Sequía de Palmer o PHDI (Palmer, 1965) o el Índice de Sequía – Demanda o RDI (Weghorst, 1996) para sequías hidrológicas y, finalmente, para sequías agrícolas el Índice de Sequía Específico para de Cultivo o CSDI (Meyer et al., 1993). De entre todos ellos, el más utilizado y extendido es el SPI, que ha sido recientemente nombrado por la Organización Meteorológica Mundial como el índice de referencia para el análisis y monitorización de las sequías.

En relación a los métodos anteriores, aparecen un amplio abanico de estudios centrados en la caracterización de sequías mediante índices estandarizados en Europa como Hannaford et al., (2011), que analizan la coherencia espacial de la sequía a través de datos regionales de precipitación y caudal; Haslinger et al., (2014), que realizan un análisis detallado de la relación entre los índices de sequía meteorológica e hidrológica de cuencas de Austria y Kingston et al., (2015), quienes proporcionan nuevos conocimientos en la identificación de patrones de variación del clima en Europa asociado a diferentes índices de sequía. Del mismo modo, aparecen estudios similares enfocados a regiones de la Península Ibérica como los de Vicente-Serrano et al. (2005, 2011), Mestre et al. (2009) y Poquet et al. (2008).

Sin embargo, y a pesar del creciente interés por el tema de las sequías, son pocos los estudios que se centran en la relación causal entre las sequías meteorológicas y la consecuencia espacio-temporal en los recursos hídricos. Van Loon (2013) investigó los procesos de propagación de la sequía en los recursos hídricos mediante factores climáticos y físicos de cinco cuencas en Europa. Rodríguez (2013) y Lorenzo-Lacruz et al., (2013) estudiaron la variabilidad espacial y temporal de las sequías hidrológicas y su respuesta ante las sequías meteorológicas.

En todos los casos existe un vacío en lo referente al análisis de cuencas no reguladas o naturalizadas, en las cuáles se espera una manifestación más clara de los impactos del cambio global, al tratarse de cuencas no alteradas por la acción humana y dónde la acción climática es más evidente.

1.2. Justificación del trabajo

Las sequías son por detrás de las inundaciones, el segundo peligro natural, por orden de importancia socioeconómica y frecuencia de aparición en España (Olcina Cantos, 2008). Las sequías son una consecuencia inevitable de la variabilidad del clima (Wong et al., 2013) y un componente habitual del tiempo y el clima en España (Martín-Vide, 1994).

La escasez de trabajos acerca de las sequias hidrológicas frente a las sequias meteorológicas es un hecho constatado. Más allá de algunos pocos estudios, la relación existente entre la sequía meteorológica y las aportaciones o disponibilidad hídrica no ha sido muy tratado por los investigadores y, por tanto, la conexión entre ambas no se define con suficiente claridad. La falta de datos (IPCC, 2007), ha dificultado la formulación de estudios de este tipo.

Debido a la evolución de los sistemas de captación de datos y a la disponibilidad y accesibilidad de estos, aparecen nuevas oportunidades en cuanto al estudio cuantitativo de parámetros climáticos. En consecuencia, se nos presenta la oportunidad de entender la relación causal entre la sequía meteorológica y su impacto sobre la disponibilidad de recursos hídricos (o sequia hidrológica) mediante el estudio de modelos estadísticos. La consecución de dicha relación, permitirá el entendimiento de la evolución de los recursos hídricos y las consecuencias derivadas de episodios de sequía meteorológica.

2. Objetivos del trabajo

2.1. Objetivos principales

Se establecen dos objetivos principales a desarrollar en el presente trabajo:

- Analizar las tendencias espaciales y temporales de las sequías hidrológicas y meteorológicas en cinco cuencas naturalizadas de la Península Ibérica (a partir de datos mensuales de caudal de 1946 al 2005).
- Determinar la respuesta hidrológica a la precipitación, mediante la correlación entre índices de sequía hidrológica y climática.

2.2. Objetivos secundarios

Para la consecución de los objetivos principales planteados, se han establecido una serie de objetivos secundarios o específicos:

- Elaboración de una base de datos hidrológica y climática de cinco cuencas de la Península Ibérica con una amplitud temporal que garanticen la robustez de los resultados.
- Localización y determinación de las condiciones físicas de cada una de las cuencas sobre las que se desarrollará dicho estudio.
- Aplicación y cálculo del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) y del Índice de Caudal Estandarizado (SSI).
- Caracterización de sequías y episodios húmedos para determinar el comportamiento espacio-temporal de las cinco cuencas sobre las que se enmarca el estudio.
- Determinar el papel de otros factores como los usos del suelo o la litología en la disposición de recursos hídricos.

3. Área de estudio

El estudio se ha centrado en una serie de cuencas de características diversas y contrastadas para el posterior análisis comparativo.

Las cuencas investigadas se seleccionaron a partir de los siguientes criterios:

- Cuencas altamente naturalizadas, es decir, con unos niveles de regulación hidrológica y alteración antrópica limitados o inexistentes.
- Áreas representativas de las diferentes regiones montañosas de la Península Ibérica.
- Alta variabilidad climatológica entre las áreas para una mayor representatividad en el contexto de la Península Ibérica.
- Disponibilidad de datos hidrológicos (series mensuales de caudal) desde 1946 hasta 2005.

3.1. Río Narcea

La cuenca de drenaje del río Narcea se encuentra situada en el sector centro-occidental de la Cordillera Cantábrica, en la Comunidad Autónoma del Principado de Asturias. Desde la estación foronómica de Corias, la cuenca abarca 535 km² y el río al que da nombre es el principal tributario del río Nalón, con el que confluyen aguas abajo. La red hidrográfica está formada, además del propio Narcea, por algunos tributarios como el río Cotos, el río Cimuela o el río Muniellos. El caudal específico del Narcea en la estación de Corias es muy abundante 954 hm³/km².

En general toda el área ocupada por esta cuenca presenta un relieve montañoso, con una altitud media de 1.046 m y en el que se salva un desnivel considerable, con pendientes medias del 37,3%. Los usos forestales son los que caracterizan la mayor parte de la cuenca. La litología se conforma, principalmente, de pizarras y rocas calcáreas con presencias puntuales de areniscas y cuarcitas.

3.2. Río Segre

La cuenca del río Segre se localiza en el noroeste de la Península Ibérica y se extiende por las provincias de Huesca, Barcelona, Lleida, Gerona y el sur de Francia. La estación foronómica situada en la Seo de Urgel, en la cabecera del río, recoge las aguas de una cuenca de drenaje que abarca 1.224 km². El Segre es el principal tributario del río Ebro, al que vierte sus aguas a su paso por el embalse de Ribarroja. El caudal específico del Segre a la altura de la estación de la Seo de Urgel es de 679 hm³/km².

Situada en el Pirineo Oriental, la cuenca de drenaje analizada se encuentra en un área de alta montaña, donde la altitud llega a los 2901 m en su punto más elevado y una altitud media de 1696 m. Como zona de alta montaña, la cuenca se encuentra entre grandes pendientes que en su media son del 26,9%, y los usos forestales (bosques naturales y vegetación arbustiva y herbácea) son los que más predominan. La litología de la cuenca es

muy heterogénea y se encuentran diversos materiales, des de granitos o calcáreas a pizarras, cuarcitas, arcillas, conglomerados y areniscas.

3.3. Río Gallo

La cuenca del río Gallo estudiada se encuentra en la Cordillera Ibérica, en la Sierra del Tremedal, donde nace. El río discurre por las provincias de Teruel y Guadalajara para verter sus aguas al Tajo, siendo uno de sus principales afluentes en el tramo alto. La cuenca de drenaje del río Gallo, desde la estación foronómica de Ventosa, cuenta con 890 km² y su caudal específico es de 67,2 hm³/km².

A su paso por Ventosa, se alcanza la altitud mínima de la cuenca (1016 m), aunque su altitud media se sitúa en los 1320 metros sobre el nivel del mar. No es una cuenca de grandes pendientes y la media se encuentra en el 7,4%, dada la configuración en forma de parameras del relieve. Mayoritariamente encontramos usos agrícolas y forestales, entre los que destacan los espacios de labor de secano y vegetación esclerófila. Se caracteriza por ser un área de litología principalmente calcárea, dónde la disposición del relieve y la acción erosiva del agua configuran paisajes kársticos y favorecen la infiltración de la escorrentía.

3.4. Río Alfambra

El río Alfambra nace en la Sierra de la Moratilla, en la Cordillera Ibérica. Discurre por la provincia de Teruel hasta que confluye con el río Turia. La estación foronómica situada en Teruel recoge las aguas de su cuenca de 1413 km². El caudal específico de la cuenca es de apenas 25 hm³/km².

La cuenca, de alta montaña, tiene una altitud media de 1276 m y, aunque supera un gran desnivel, las pendientes son suaves de entorno al 7,3%. Los usos del suelo, al igual que las demás regiones próximas, son fundamentalmente forestales (bosques, landas, matorrales y vegetación esclerófila). Su composición geológica es variada, aunque siguen predominando las litologías calcáreas.

3.5. Río Genil

El río Genil nace en Sierra Nevada y riega el sector suroriental de Andalucía. Es el segundo río más largo de Andalucía y vierte sus aguas al Guadalquivir entre Sevilla y Córdoba. Cuenta con más de una veintena de tributarios, destacando el Cubillas, el Cacín o el Colomera. Hasta la estación foronómica de Loja, la cuenca del Genil abarca las provincias de Granada y Jaén, y un área de drenaje de 4067 km², con un caudal específico de 96,1 hm³/km².

La cuenca del Genil representa una excepción dentro de este trabajo, ya que tanto sus afluentes como el propio río Genil, son regulados. En la cuenca de estudio del río Genil, se encuentran cinco embalses: Bermejales (Cacín), Canales (Genil), Quentar (Aguas Blancas), Cubillas (Cubillas) y Colomera (Colomera). La distancia a la que se encuentran estos embalses respecto a la estación foronómica es relativamente grande y todos ellos regulan el caudal en la cabecera de sus respectivos cursos de agua.

Aunque la cuenca tiene que superar un desnivel de más de 3000 metros, la pendiente media no supera el 14%. Se caracteriza por ser un área de gran diversidad de usos del suelo,

donde destacan los usos forestales en las zonas más elevadas y los usos agrícolas, que se extienden en las áreas de menor altitud. En cuanto a la litología, predominan las calizas y areniscas, con afloramientos aislados de granitos y pizarras.

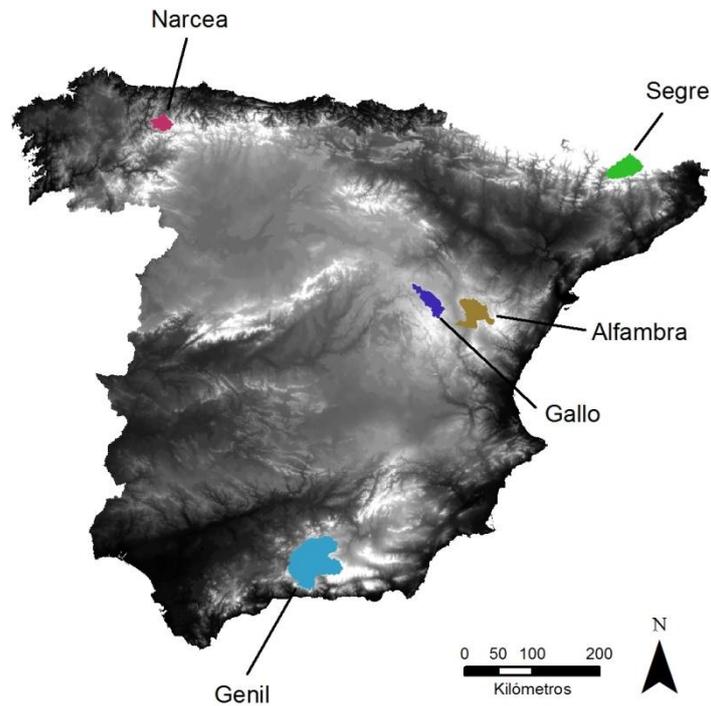


Figura 2. Localización del área de estudio en el ámbito peninsular.

	Narcea	Segre	Gallo	Alfambra	Genil
Nº de la estación faronómica	1183	9023	3030	8027	5045
Área de la cuenca (km ²)	535	1224	890	1413	4067
Caudal específico (hm ³ /km ²)	954,58	679,1	67,22	25,46	96,11
Precipitación media anual de la cuenca (mm)	1325	672	547	453	525
Altura estación faronómica	352	674	1016	885	443
Pendiente media (%)	37,3	26,9	7,4	7,3	13,8
Altitud media (m)	1046	1696	1320	1276	1015
Altitud mínima (m)	346	1016	1016	885	437
Altitud máxima (m)	1989	2901	1906	2016	3443
Masa forestal (%)	33	35	27	9	12
Embalses en la cuenca	No	No	No	No	Si
Embalses aguas abajo	Si	Si	Si	Si	Si

Tabla 1. Resumen de las características de las cuencas estudiadas.

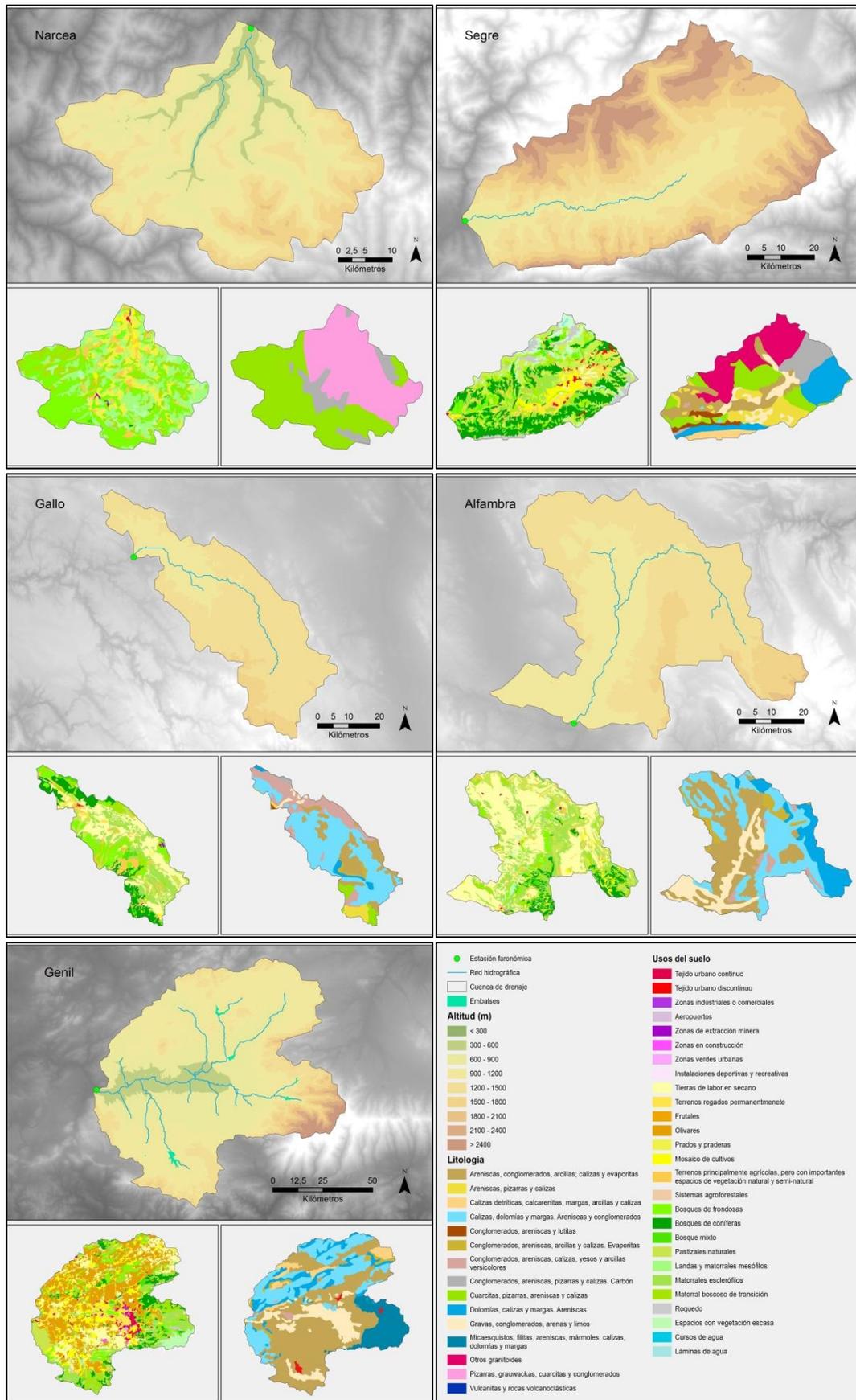


Figura 3. Resumen de las características de las cuencas estudiadas: relieve, usos del suelo y litología.

4. Base de datos y metodología

En este apartado se describe el conjunto de datos utilizado y los métodos empleados para su estudio y análisis. Se incluye la base de datos de precipitación y de caudal, las técnicas utilizadas para el tratamiento de datos y la descripción de los índices de sequía utilizados.

4.1. Base de datos climática

La Organización Meteorológica Mundial (OMM, World Meteorological Organization, WMO) establece, de forma general, un periodo mínimo de 30 años como la longitud recomendable que han de tener los registros meteorológicos para que su media y demás índices estadísticos tengan significación climática (Martín-Vide, 2003).

Los datos de precipitación utilizados proceden de la base de datos de MOPREDAS (MOnthly PREcipitation DAtabase of Spain) creada por un equipo internacional liderado por la Universidad de Zaragoza, y que constituye la base de datos de precipitación homogeneizada más completa de la Península Ibérica creada hasta el momento (González-Hidalgo et al., 2010). Se trata de una base de datos elaborada a partir de información disponible de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y que proporciona 2670 series homogéneas repartidas por el territorio peninsular desde 1946 hasta 2005. Debido a la gran cantidad de datos, todas las series han superado un control de calidad exhaustivo con el fin de detectar datos erróneos o sospechosos que pudieran alterar la fiabilidad de dicha base de datos.

MOPREDAS constituye una base de datos de calidad que facilita el tratamiento de datos estadísticos, un instrumento para el análisis de la variabilidad climática en la Península Ibérica, y establece, aún más si cabe, la Península Ibérica como lugar de estudio sobre el cambio climático.

Para el trabajo se han seleccionado las estaciones meteorológicas con series disponibles ubicadas en el interior de cada una de las cuencas hidrológicas analizadas. A partir de los datos de precipitación mensual, desde 1946 hasta 2005, se ha calculado una serie regional de precipitación para cada cuenca hidrológica, obtenida a partir del promedio de precipitación ponderado de las series (utilizando polígonos de Thyessen).

Cuenca	Nº Estación Meteorológica
Narcea	1255 E, 1259, 1260 A
Segre	9582, 9619
Alfambra	8359, 8360, 8362, 8364
Gallo	3009 E, 3011 E, 3011 I, 3013, 3018 E
Genil	5131, 5406, 5501, 5502, 5504, 5506, 5510, 5511 E, 5515, 5517, 5518, 5520, 5529, 5530 E, 5531, 5536 I, 5540, 5541, 5544, 5545 E, 5548, 5549, 5553, 5562 E, 5562 O, 5568 U, 5569 E, 5572, 5574, 5577, 5578, 5579, 5580, 6378

Tabla 2. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.

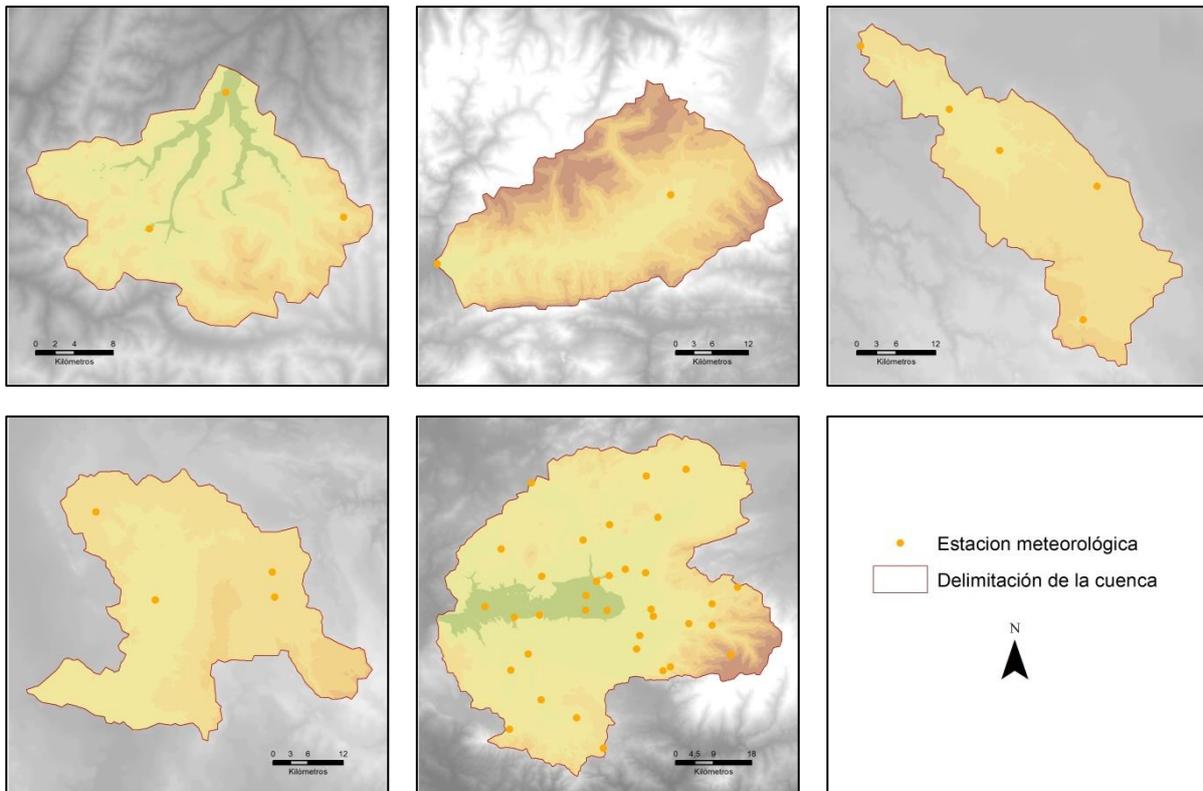


Figura 4. Distribución espacial de las estaciones meteorológicas en las cuencas de estudio (Arriba, de izquierda a derecha: Narcea, Segre y Gallo. Abajo, de izquierda a derecha: Alfambra y Genil).

4.2. Base de datos hidrológica

En la mayoría de cuencas de montaña no se dispone de información hidrológica precisa para trabajar con modelos hidrológicos. Esta escasez de series de caudal genera la necesidad de aplicar métodos sencillos que aporten resultados de confianza (Rojo, 2009).

Para la consecución de los objetivos planteados, se han obtenido series mensuales de caudal de las distintas estaciones de aforo disponibles en el servidor Hercules del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). El conjunto de datos para los cauces analizados (Narcea, Segre, Gallo, Alfambra y Genil), presenta un porcentaje de lagunas inferior al 5% y una longitud de las series de 60 años (1946-2005). Las series necesitan de un control de calidad y de la homogeneización de las mismas, con el fin de obtener unos datos fiables y evitar los consecuentes errores.

La metodología utilizada para el relleno de las lagunas de las series se ha basado en una regresión lineal simple:

$$y = ax + b$$

a = pendiente de la recta.

b = intersección con el eje.

El modelo de regresión utilizado para el relleno de las series objeto de estudio se ha servido de series correspondientes al mismo río o afluentes cercanos, con un régimen hidrológico similar y una correlación mínima entre las series superior a $R=0,75$.

Posteriormente a la reconstrucción, se comprobó de forma visual que las series no contenían inhomogeneidades y que no había rupturas en las medias mensuales de las series a lo largo del tiempo, ocasionadas por errores de medida o alteraciones de los caudales por la acción humana. No se detectaron inhomogeneidades en las series, algo esperable debido a que se trata (en su mayoría) de cuencas sin regular, y se ha comprobado que más del 90% de las inhomogeneidades en series de caudal están provocadas por la construcción de embalses durante el siglo XX (Lorenzo-Lacruz et al. 2012a).

Como resultado de este proceso se obtuvieron 5 series de caudal a escala mensual, de calidad contrastada y para un período de 60 años (1946-2005).

4.3. Análisis de tendencias: Tau-b de Kendall

En este trabajo se ha utilizado la Tau-b de Kendall para detectar tendencias significativas en la evolución series de caudal, correlacionando las series “tiempo” con las series “caudal” (Lorenzo-Lacruz et al., 2013). Se trata de una medida no paramétrica (dado que los datos de caudal no están estandarizados) de asociación para variables ordinales que tiene en consideración los empates. El signo de los coeficientes indica la dirección de la relación, mientras que su valor señala la fuerza de la correlación. El valor 0 implica total independencia entre las variables, mientras el valor absoluto 1 implica total correlación.

$$\tau_b = \frac{P - Q}{\sqrt{(P+Q+Xt) \cdot (P+Q+Yt)}}$$

Figura 5. Expresión de la correlación bivariante de Tau-b de Kendall.

Fuente: ESI

4.4. Análisis de impactos: Correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson, al igual que Tau-b de Kendall, es una medida de asociación lineal entre dos variables, es decir, del grado de parecido o variación conjunta que existe entre éstas. En este caso se trata de una medida paramétrica, que se utilizará para medir la correlación entre los índices estandarizados de sequía climática e hidrológica. Los valores de este coeficiente varían des de -1 (correlación total negativa) a 1 (correlación total positiva). Los valores cercanos a cero, implican escasa o nula correlación entre las variables.

4.4. Standardized Precipitation Index (SPI)

El Standardized Precipitation Index (SPI) se ha convertido progresivamente en el índice de sequía meteorológica de referencia mundial (Mestre et al., 2009). Propuesto por McKee et al. (1993), se ha popularizado desde entonces, y se define como un valor numérico que representa el número de desviaciones estándar en que un evento seco se sitúa por debajo o por encima de la media, una vez que la distribución original ha sido transformada a una distribución normal. De este modo se establece una escala de valores concentrado en tramos asociados al carácter de la precipitación, donde valores de SPI superiores a 2 señalan periodos extremadamente húmedos y valores inferiores a -2, indican periodos de sequía extrema (Mestre et al., 2009).

La principal ventaja del SPI respecto a otros índices de sequía es que permite el análisis de las sequías a distintas escalas temporales (Edwards y McKee, 1997), distinguiendo entre diferentes tipos de sequías (figura 1), a lo que se une su sencillez de cálculo e interpretación (Mestre et al., 2009; Vicente-Serrano et al., 2012b). El análisis a múltiples escalas temporales permite reflejar la manera en que los déficits de precipitación se manifiestan en la disponibilidad de los recursos hídricos y monitorizar sus impactos. Sin embargo, este índice utiliza únicamente datos de precipitación para su cálculo, sin incluir la evapotranspiración (Coll Benages, 2013). Este hecho, sin dejar de ser importante, no tendrá una importancia capital en nuestro estudio, dada la gran altitud a la que se encuentran las cuencas y a la ausencia de embalses que favorezcan la evaporación en lámina libre.

4.5. Standardized Streamflow Index (SSI)

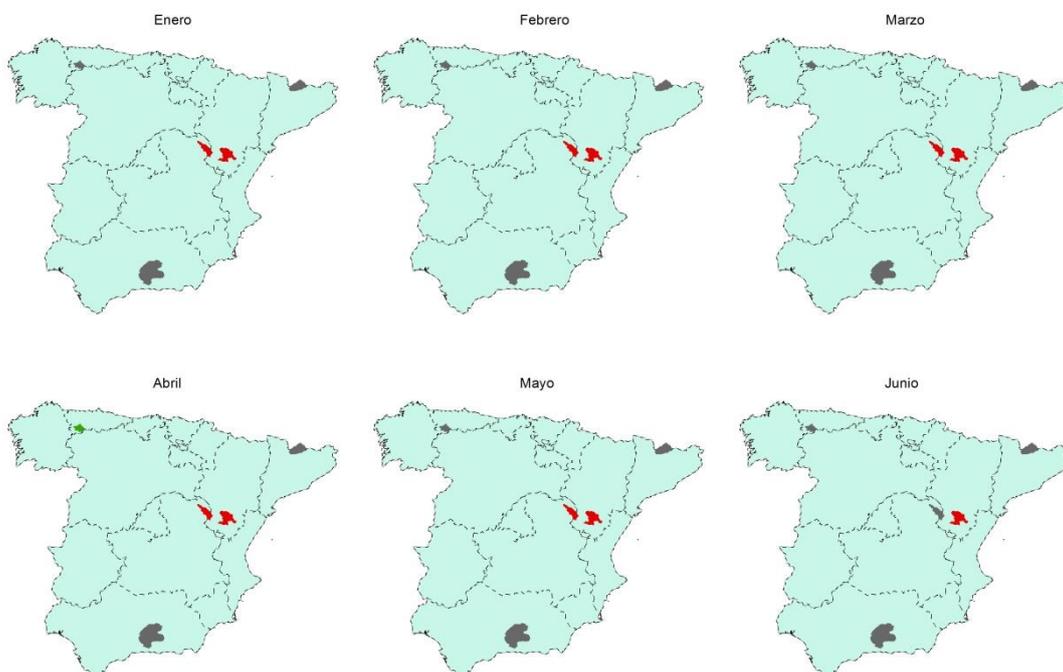
El Standardized Streamflow Index (SSI) es un índice de sequía hidrológica formulado por Vicente-Serrano et al., (2012a) que permite la comparación temporal y espacial entre los datos de caudal independientemente del régimen estacional de los ríos y de las magnitudes del caudal. Está basado en el ajuste de cada serie mensual de caudal a 6 distribuciones de probabilidad distintas (General de Valores Extremos, Pearson III, log-logística, log-normal, General de Pareto y Weibull). Para cada serie mensual se escoge la distribución que mejor ajusta los caudales utilizando la aproximación cuantitativa propuesta por Kroll y Vogel (2002).

5. Análisis de las sequías

5.1. Distribución de las tendencias de caudal

En este apartado del trabajo se presenta la distribución espacial de las tendencias de caudal analizadas en las cinco cuencas utilizando la información de las respectivas estaciones foronómicas. El análisis muestra una medida de la evolución del caudal mensual y anual para el periodo de 1946-2005, a partir de los datos para cada mes en años consecutivos (figura 6 y 7). Se observa un patrón general de disminución de caudales representado por tendencias negativas significativas (0,01) y tendencias negativas no significativas en la mayoría de los meses y las diferentes cuencas. Las cuencas del interior de la Península Ibérica (Gallo y Alfambra) reflejan las mayores tendencias negativas significativas en gran parte del año, a excepción de los meses de verano (junio, julio y agosto) y principios de otoño (septiembre). En las cuencas del Segre y Genil, no se divisan tendencias significantes, aunque si negativas en los meses de primavera y verano en el Segre y en la mayor parte del año en el Genil. Sin embargo, en la vertiente Atlántica de la cuenca del Narcea, aparecen tendencias positivas en gran parte del año (a excepción de Agosto) y tendencias positivas significativas en Abril.

La figura 7 muestra el estudio de las tendencias anuales de caudal. El análisis refleja al igual que las tendencias mensuales, la disminución anual de los caudales en el centro peninsular (tendencias negativas significativas) y las cuencas del Segre y Genil (tendencias negativas no significativas). No obstante, encontramos tendencias positivas significativas en la cuenca del Narcea, corroborando el aumento de caudal observado en el análisis mensual en esa cuenca.



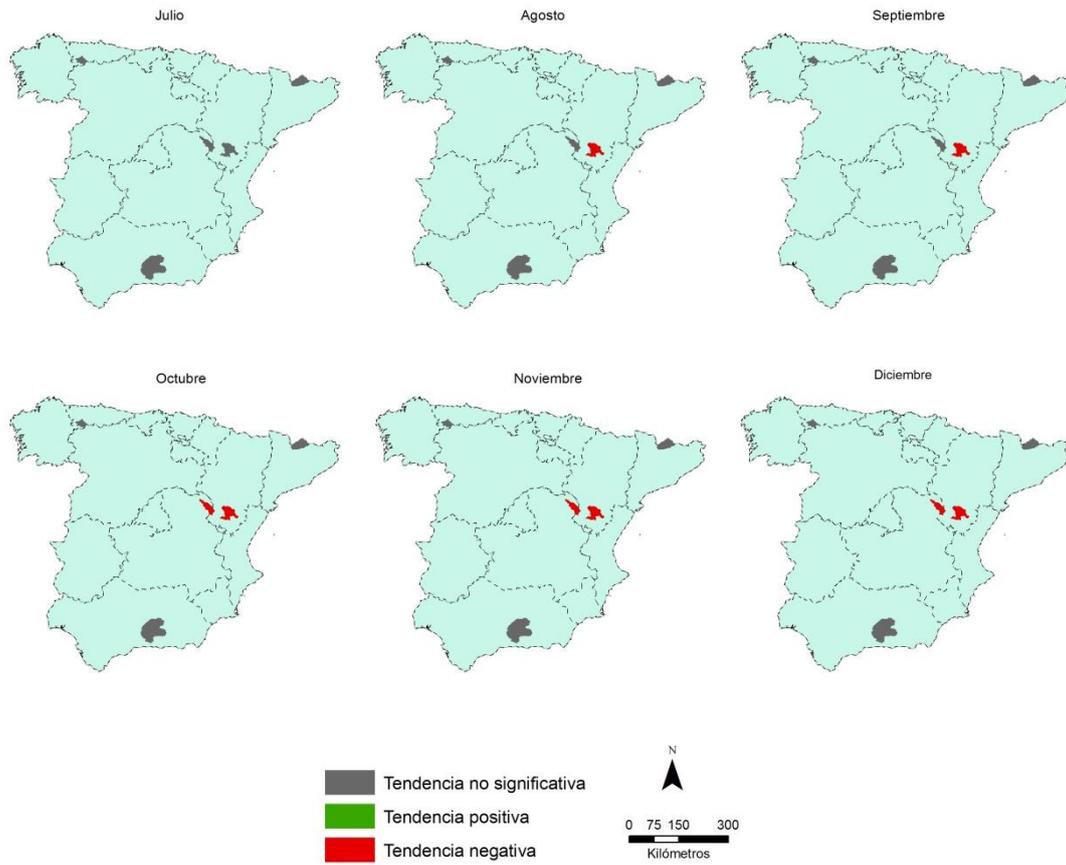


Figura 6. Distribución espacial de las tendencias significativas ($<0,01$) obtenidas de las series mensuales de caudal.

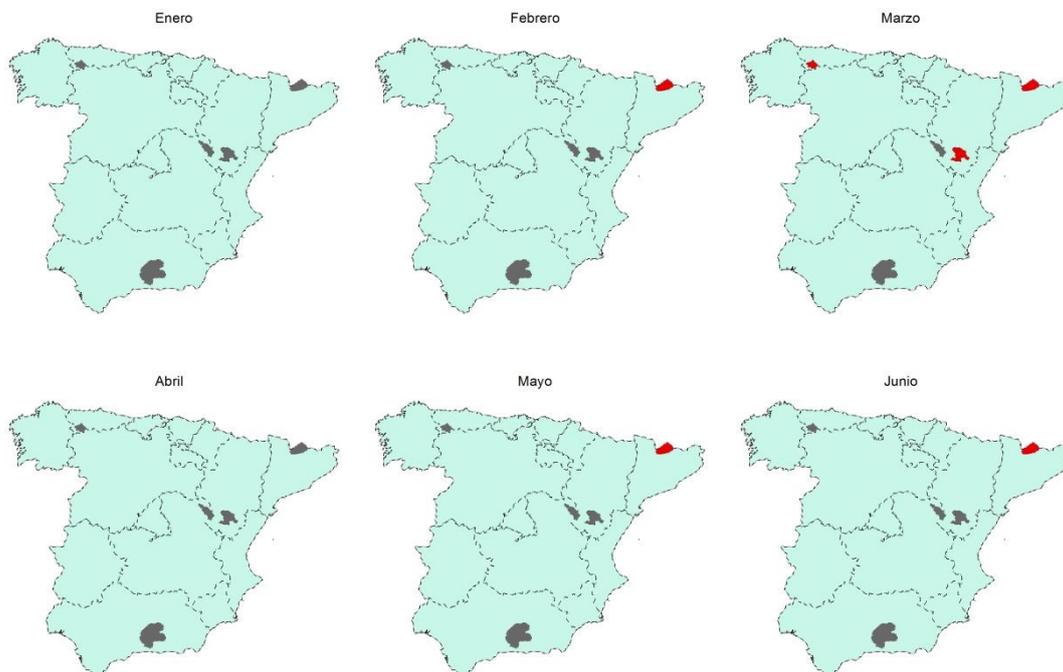


Figura 7. Distribución espacial de la tendencia significativa ($<0,01$) obtenida de la serie anual de caudal.

5.2. Distribución de las tendencias de precipitación

A continuación se presenta la distribución espacial de las tendencias de la precipitación en las cinco cuencas hidrológicas analizadas. El análisis muestra la evolución de las precipitaciones a escala mensual y anual para el periodo de 1946-2005. Las tendencias de precipitación representadas en la Figura 8 son, por lo general, negativas (ya sean significantes o no) y se observan en los meses de Enero, Febrero, Marzo y Diciembre. Sin embargo, en el resto del año encontramos excepciones a escala regional, sobretudo en Abril, Septiembre y Octubre cuyas tendencias son positivas, aunque no significativas. En la cuenca del Segre observamos un patrón de disminución significativa de la precipitación en los meses de Febrero, Marzo, Mayo y Junio. Por lo que al resto se refiere, estas tendencias negativas significativas solo se han registrado en la cuenca del Narcea y el Alfambra en el mes de Marzo. Los análisis en la cuenca del Gallo y del Genil no han revelado resultados significativos.

Si analizamos las tendencias anuales de la Figura 9, encontramos resultados significativos. Éstos aparecen en las cuencas del Segre y Genil, donde se observan tendencias negativas significativas. En las áreas del Narcea, Gallo y Alfambra los resultados no pueden tildarse de significativos, aunque su tendencia es negativa, en cualquier caso.



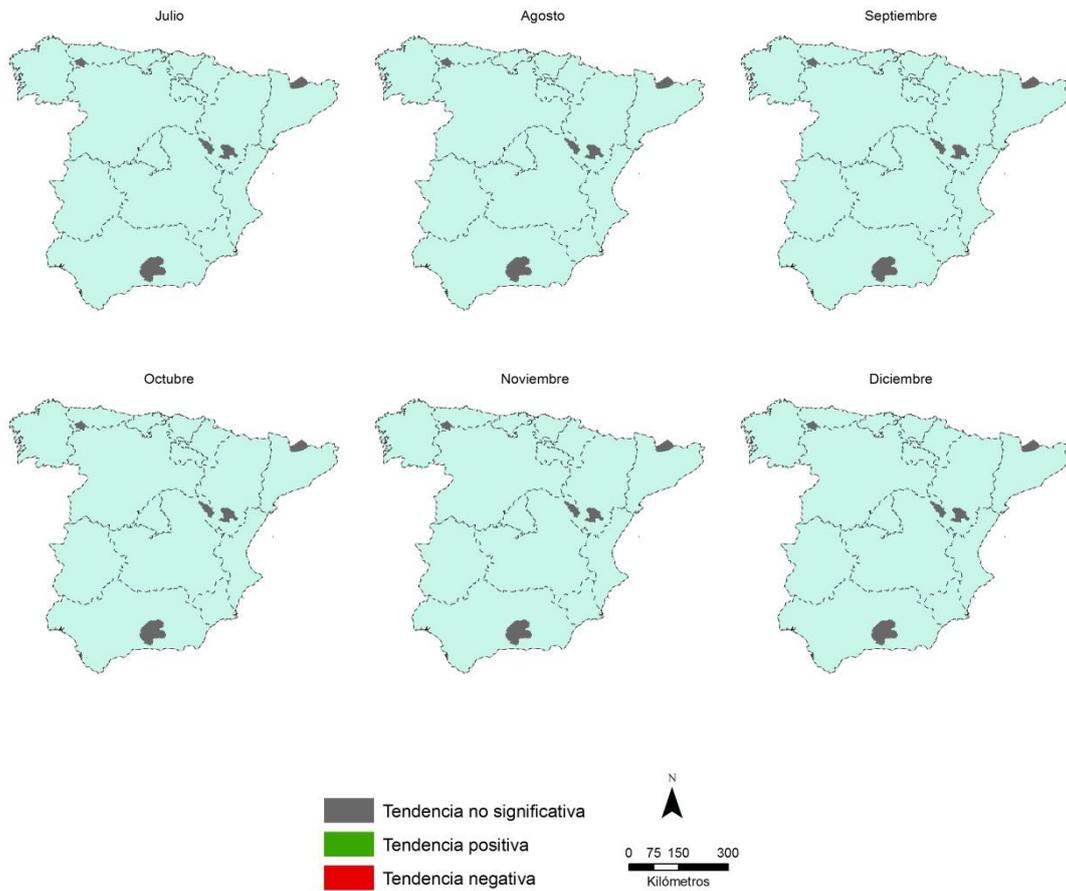


Figura 8. Distribución espacial de las tendencias significativas ($<0,01$) obtenidas de las series mensuales de precipitación.



Figura 9. Distribución espacial de las tendencias significativas ($<0,01$) observadas en las series anuales de precipitación.

5.3. Episodios de sequía meteorológica

La Figura 10 muestra la evolución temporal de la serie de SPI y SSI a la escala de máxima correlación (Figura 11) para las cuencas del Narcea, Segre, Gallo, Alfambra y Genil en el período de 1945-2005. Se reconocen períodos secos importantes en las décadas de 1980, 1990 y en los inicios del siglo XXI, alcanzando valores inferiores a -2 (sequía extrema) en todas las áreas de estudio. Sin embargo, hay una gran variabilidad espacial y temporal en cuanto a la manifestación de estos episodios. Algunos de estos episodios de sequía coinciden con los eventos más importantes de este tipo, acontecidos en Europa durante el siglo XX (Vicente-Serrano, 2006).

El período seco de los ochenta se inicia en las cuencas del centro peninsular (Gallo y Alfambra) y posteriormente se extiende a la cuenca del Genil, mientras que las cuencas del Segre y del Narcea no se ven afectadas por los efectos de la sequía en primera instancia. Sin embargo, desde 1985 y hasta 1993, las cuencas del Segre y el Narcea empiezan a mostrar síntomas de déficit de precipitación.

A principios de los noventa, las cuencas del Gallo, Alfambra y Genil empiezan a percibir los efectos de una nueva sequía. Este episodio seco de larga duración y extraordinaria intensidad alcanza amplias zonas del centro y sur del país (Peral C. et al., 2000) y no afecta al norte peninsular ni a Cataluña (Mestre et al., 2009), como se aprecia en la figura 10.

Se distingue un último período seco iniciado con el nuevo siglo y cuyas repercusiones se muestran sobretudo en la cuenca del Segre y en menor medida en el resto de cuencas. El período de 2004 a 2005, se caracterizó por ser un año de escasa precipitación en el conjunto de la Península Ibérica, debido a un marcado déficit de precipitación en los meses de otoño a invierno (AEMET, 2005).

Desde la década de los ochenta, especialmente en las cuencas del centro y sur peninsular, se intuye un nuevo ciclo en el que los períodos secos se manifiestan con mayor reiteración e intensidad que los períodos húmedos. Se observa uno nuevo comportamiento en el que los períodos húmedos intercalados entre períodos secos duran menos, dando paso a la predominancia de periodos secos en los últimos años, hecho que ha sido reflejado en el análisis de tendencias.

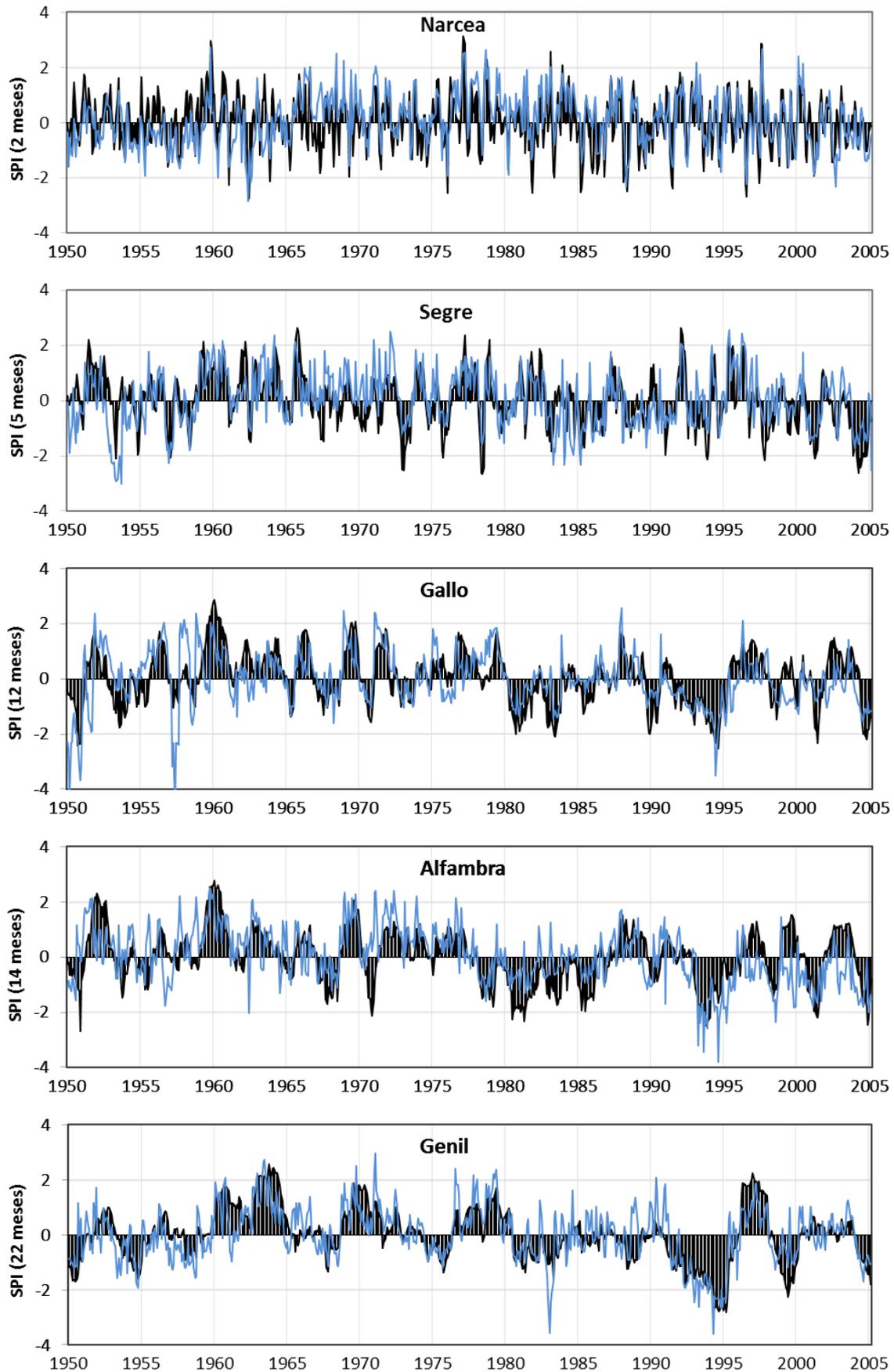


Figura 10. Evolución temporal del SSI (azul) y SPI (negro) calculado a la escala de mayor correlación.

6. Impactos hidrológicos

La Figura 11 muestra los coeficientes de correlación de Pearson entre el Standardized Streamflow Index (SSI) y el Standardized Precipitation Index (SPI) calculado a escalas de 1 a 48 meses para cada cuenca analizada. Esta medida indica la escala de propagación de los déficits de precipitación y su manifestación en los caudales de los ríos de forma cuantitativa y precisa. Es decir, muestra el retardo temporal con el que los efectos de la sequía meteorológica afectan a los caudales de los ríos.

Se observa como a escala de 48 meses, el río Genil representa del conjunto, la máxima correlación ($R=0,6$) y el río Narcea, la menor correlación ($R=0,14$) entre ambos índices. Se interpreta que las cuencas de baja correlación para el período de 48 meses están sujetas a una mayor variabilidad de cambios hidrológicos a pequeñas escalas de tiempo. Por el contrario, las cuencas de gran correlación a esta escala, se consideran de respuesta hidrológica lenta o sostenida y necesitan de un gran período de tiempo para que los registros hidrológicos cambien en consecuencia a las variaciones de la precipitación.

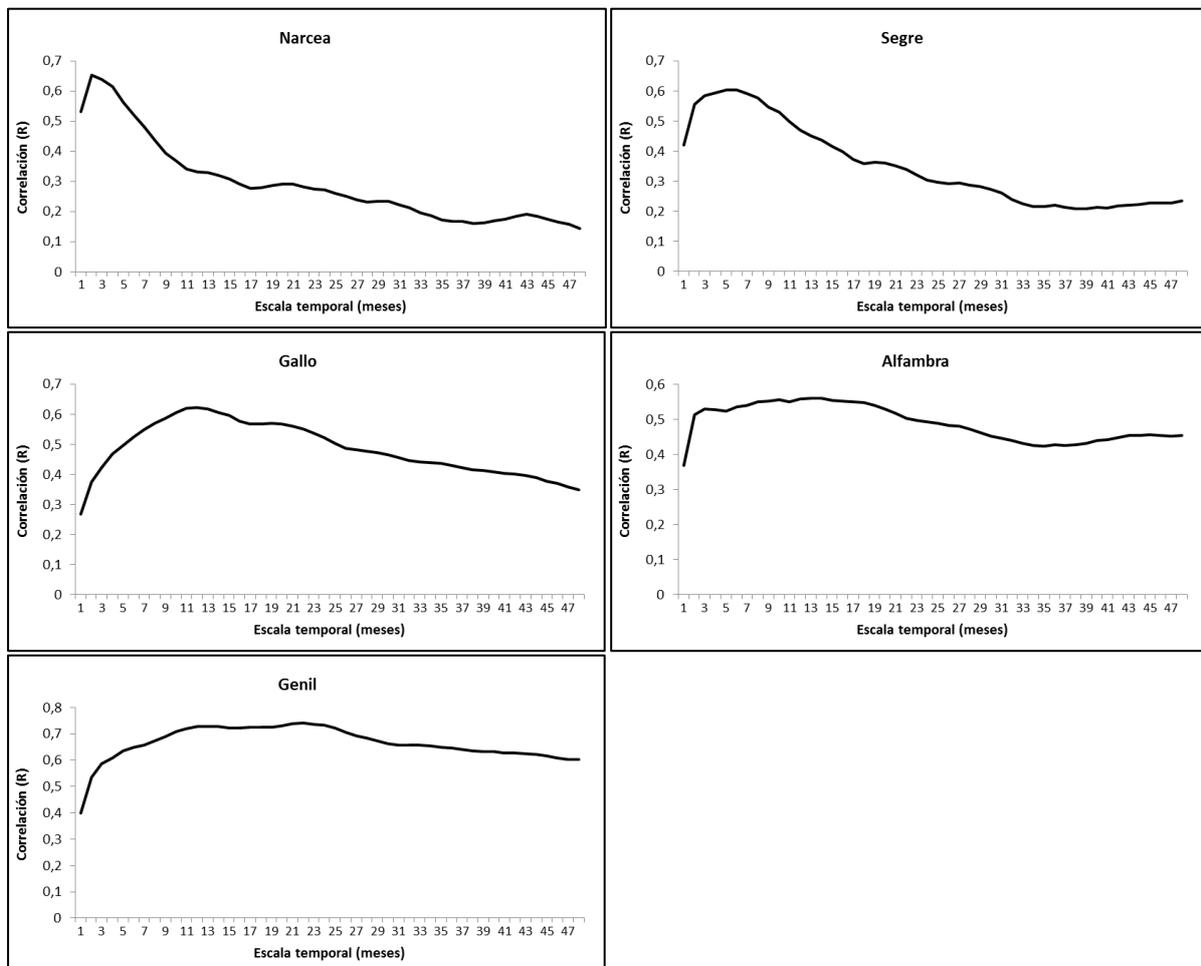


Figura 11. Correlaciones continuas entre el SSI y el SPI a las escalas de 1 a 48 meses en sus respectivas cuencas.

La naturaleza fisiográfica de las cuencas hidrológicas analizadas y la enorme variabilidad climática a escala peninsular, producen resultados muy diversos, y permiten distinguir diferentes patrones de comportamiento hidrológico ante los déficits de precipitación.

Podemos diferenciar dos tipos de respuesta: rápida (Narcea y Segre) y lenta o sostenida (Gallo, Alfambra y Genil).

6.1. Cuencas de respuesta hidrológica rápida

Las cuencas de respuesta rápida son aquellas cuyos valores de R revelan dependencia de las precipitaciones acontecidas durante escalas temporales cortas (figura 11).

La cuenca del Narcea, presenta valores elevados de correlación desde los 2 meses hasta los 5 meses y la máxima correlación corresponde la escala de 2 meses ($R=0,65$). Se trata de una cuenca de respuesta hidrológica muy rápida ante las condiciones de sequía climática a escalas cortas. Se caracteriza por ser una cuenca de pequeñas dimensiones, donde el clima oceánico de la vertiente cantábrica ofrece precipitaciones abundantes y regulares durante gran parte del año. Aunque la masa forestal favorece la absorción e infiltración, las elevadas pendientes de la cuenca y su litología medianamente impermeable producen gran concentración de la escorrentía generando una rápida respuesta hidrológica a la variabilidad de la precipitación.

La cuenca del Segre se caracteriza por una respuesta hidrológica rápida a las condiciones de déficit de precipitación, y su correlación máxima se da a los 5 meses de déficits acumulados de precipitación. Al igual que la cuenca del Narcea, se trata de una zona de pendientes pronunciados que manifiesta una alta generación de escorrentía. Sin embargo encontramos diferencias notorias entre ambas respecto a la extensión, al régimen de precipitaciones y a la altitud, responsable de altas precipitaciones en forma de nieve. Estas particularidades, sumadas a la fusión progresiva de la nieve en los meses de primavera, generan una respuesta hidrológica rápida en la cabecera del Segre, aunque más sostenida que en el caso del Narcea.

En ambos casos se trata de cuencas localizadas en el tercio norte peninsular, cuyo clima dista mucho de ser árido. Las precipitaciones suelen ser relativamente abundantes durante gran parte del año. Las altas pendientes favorecen la concentración de la escorrentía, que junto a las abundantes precipitaciones provocan que la respuesta de los caudales a las precipitaciones sea rápida. Las áreas desprovistas de vegetación o suelos desnudos propias de las cumbres cantábricas y Pirenaicas, también son un factor que favorece este tipo de respuesta hidrológica rápida.

6.2. Cuencas de respuesta hidrológica lenta o sostenida

La respuesta hidrológica lenta se produce en aquellas cuencas cuya conexión entre el déficit de precipitación y los valores hidrológicos es más intensa durante escalas temporales largas.

La cuenca del río Gallo muestra los mayores valores de correlación entre los 11 y 13 meses ($R=0,62$) y valores descendentes en el resto (figura 11). El encaje entre montañas produce el debilitamiento de las tormentas y se presentan valores de precipitación no muy elevados (<600 mm/año), concentrados en primavera y otoño. La cuenca presenta unas pendientes suaves (en torno al 7% de media) que impiden una rápida concentración de la escorrentía.

Este hecho, unido a la litología eminentemente calcárea de la zona, genera una respuesta hidrológica más lenta y sostenida, por los procesos de infiltración y recarga de acuíferos.

Cerca del Gallo, encontramos la cuenca del Alfambra. Se trata de un área muy cercana a la anterior, si bien su comportamiento es un tanto distinto. La cuenca del Alfambra revela valores de alta correlación entre los 6 y los 18 meses y un valor máximo a los 14 meses ($R=0,56$). La cuenca presenta una extensión media superior al resto de cuencas (a excepción del Genil). Las pendientes se presentan de forma similar que en la cuenca del Gallo y la naturaleza geológica es similar. Las precipitaciones medias son algo inferiores y no superan los 500 mm/año. Las principales diferencias las encontramos en el porcentaje ocupado por áreas boscosas, cuyos valores son muy superiores en la cuenca del Gallo. Este factor puede ser identificado como clave en cuanto a la respuesta hidrológica a la precipitación, en dos cuencas de características fisiográficas y climáticas similares. El impacto de los déficits de precipitación sobre la generación de caudales se produce desde escalas temporales medias hasta escalas más largas en la cabecera del Alfambra.

El análisis en la cuenca del Genil revela un gran desfase temporal del impacto hidrológico que producen los déficits de precipitación. La cuenca desde Loja, presenta una gran correlación entre el SPI y el SSI entre los 9 y los 25 meses, con un pico a los 22 meses ($R=0,73$). La cuenca se localiza al sur de la Península Ibérica y presenta una extensión mayor que las anteriores. La precipitación de la cuenca sigue un patrón topográfico muy marcado, con valores altos en el Sistema Bético y valores más bajos en el llano, que dejan la media anual de la precipitación en poco más de 500mm/año. Además, las precipitaciones se concentran en invierno y pueden llegar en forma de nieve en las zonas más elevadas. La abundancia de litologías calcáreas favorece los procesos de infiltración, y en consecuencia el retardo y sostenimiento de la respuesta hidrológica antes condiciones de sequía prolongadas. Sin embargo, en el caso del Genil hay que destacar el efecto de los embalses, que tratan de amortiguar y retrasar de forma deliberada los efectos que la ausencia de precipitaciones produce en los caudales, lo que genera una curva de correlación que se mantiene por encima de 0.6 entre las escalas de 3 a 48 meses.

Se observan unos patrones comunes que caracterizan este tipo de cuencas y que denotan una lenta respuesta hidrológica ante condiciones de sequía meteorológica. En todos los casos, las bajas pendientes medias dificultan la generación de escorrentía y favorecen, junto a la presencia de litologías permeables, la infiltración de la precipitación. Este hecho implica a su vez la generación de escorrentía subterránea y la recarga de acuíferos, responsables de generar y mantener el caudal en algunas cuencas durante periodos de sequía meteorológica prolongada.

7. Discusión

Con este trabajo se ha pretendido expandir el conocimiento sobre la relación entre las sequías meteorológicas y las sequías hidrológicas en la Península Ibérica y dar respuesta a las preguntas relativas a la génesis de las sequías hidrológicas, fenómeno que no ha sido suficientemente tratado en la literatura científica, especialmente en áreas de montaña.

Algunos de los objetivos planteados en este trabajo, como el análisis de tendencias de las sequías hidrológicas y meteorológicas, la respuesta hidrológica a la precipitación y el cálculo de índices estandarizados de sequía ya fueron cuestión de estudio en otros trabajos (Lorenzo-Lacruz et al., 2013; Rodríguez, 2013; Van Loon, 2013). Sin embargo, la mayoría de los estudios se centraban en cuencas con un alto nivel de regulación hidrológica e intervención antrópica (Vicente-Serrano, 2004; Vicente-Serrano et al., 2005; López-Moreno et al., 2014) y ninguno se había centrado únicamente en cuencas naturalizadas. La investigación se ha servido de una base de datos hidrológica y climática de calidad y específica para cada una de las cinco cuencas analizadas (Narcea, Segre, Gallo, Alfambra y Genil). El análisis de cinco cuencas naturalizadas (o con bajo nivel de regulación hidrológica), de localización y características variadas, ha conducido a que la investigación sea representativa en cuanto al tipo de cuencas y la variabilidad climática de la Península Ibérica. El análisis estadístico se ha basado en la base de datos MOPREDAS (climática) y los respectivos datos de caudal, que superaron un proceso mediante el cual se eliminaron las inhomogeneidades y los posibles datos anómalos garantizando la calidad de las series utilizadas. La disponibilidad temporal de datos permitió llevar a cabo el estudio para el período comprendido entre 1946 y 2005, garantizando una amplia cobertura temporal y obteniendo grandes valores de significancia y representatividad en la investigación. Han sido usados dos índices de sequía estandarizados, el SPI (Standardized Precipitation Index) y el SSI (Standardized Streamflow Index). El primero, utilizado para monitorizar las sequías meteorológicas y el segundo para las sequías hidrológicas. Además, ambos índices han sido correlacionados para deducir el desfase temporal entre el déficit de precipitación y su propagación a los recursos hídricos de las cuencas.

Se han analizado las tendencias espaciales y temporales de las sequías hidrológicas y meteorológicas en cada una de las cuencas. Las disposiciones generales sobre caudal y precipitaciones arrojan tendencias negativas en su evolución a lo largo del período estudiado en las cuencas del Segre, Gallo, Alfambra y Genil, en sintonía con resultados aparecidos en otros estudios (Vicente Serrano et al., 2004; Lorenzo-Lacruz, 2012a; Coll Benages, 2013; Rodríguez, 2013; Van Loon, 2013; López-Moreno et al., 2014). Sin embargo, aparecen tendencias positivas en cuanto a caudal en la cuenca del Narcea sin que en ella, haya disminuido el área forestal o se hayan producido otros cambios significativos que pudieran explicar el aumento de los caudales. Las tendencias negativas más elevadas en cuanto a caudal se localizan en las cuencas del interior de la Península Ibérica, Gallo y Alfambra en casi todo el año (exceptuando Julio). En cuanto a precipitaciones, la cuenca del Segre es la que más se ve afectada (correlación negativa), sobretudo en los meses de la primera mitad del año. Según los datos obtenidos, hay una tendencia a la disminución de precipitaciones y caudal en las distintas cuencas estudiadas (a excepción de la cuenca del Narcea). Aunque la evolución de las precipitaciones es más incierta, el análisis demuestra una disminución anual de los valores, con un descenso más acusado en invierno.

El empleo de índices estandarizados de sequía ha permitido delimitar los episodios de sequía en las distintas cuencas. Se han detectado períodos secos importantes en 1980 y 1990 (Vicente-Serrano, 2006) que alcanzan valores de extrema sequía. Desde 1980 se distingue, sobretodo en el centro y sur peninsular, una nueva etapa en que los períodos secos son cada vez más frecuentes. Igualmente, los periodos húmedos pierden extensión temporal, dando paso a la predominancia de nuevos episodios secos más largos y de mayor magnitud. En cuanto a la distribución espacial de estos períodos, es difícil demostrar un patrón general en cuanto a la evolución de las sequías a escala peninsular, ya que los periodos secos generales, no afectan a la totalidad de las cuencas estudiadas; si bien, encontramos algunos parecidos entre las cuencas del Narcea y Segre, por un lado, y las cuencas del Gallo y Alfambra por otro.

Se ha determinado la respuesta hidrológica a la precipitación mediante la correlación entre los índices SPI y SSI. A partir de la correlación de ambos índices se han determinado dos patrones de respuesta hidrológica ante las condiciones de sequía climática: respuesta hidrológica rápida y respuesta hidrológica lenta. Las cuencas del Narcea y Segre corresponden al primer tipo, con alta correlación a escalas temporales de entre 2 y 8 meses; mientras que las cuencas del Gallo, Alfambra y Genil se relacionan con el segundo tipo de respuesta hidrológica, manifestando un retardo temporal en la respuesta hidrológica a la sequía meteorológica de entre 6 y 25 meses. Se han identificado algunos factores que pueden determinar las diferencias al tipo de respuesta como la pendiente, la altitud, la permeabilidad del terreno, los usos del suelo y las precipitaciones. La categorización, en uno u otro tipo, determina la escala temporal en la que se ve afectada por las sequias y el período de recuperación posterior.

La investigación realizada ha conseguido responder la mayoría de hipótesis u objetivos que se plantearon al inicio. Sin embargo, algunos interrogantes siguen sin aclararse. Por ejemplo, los factores fisiográficos determinantes en la generación de escorrentía o modificadores de la respuesta hidrológica a las condiciones de sequía no han podido cuantificarse de forma clara y podrían ser objeto de estudios posteriores. Por otro lado, aparecen algunas dudas relacionadas como el aumento de la tendencia de caudal en el Narcea mientras los valores de precipitación tienden a descender. Estos interrogantes sugieren la necesidad de desarrollar nuevos estudios encaminados a la clarificación de estas cuestiones y profundizar en el conocimiento de las génesis de las sequías hidrológicas.

8. Conclusiones

Ante el escenario de cambio climático global en el que nos encontramos, el agua se presenta como un recurso de alta variabilidad espacio-temporal, caracterizado por las incertidumbres ligadas a su futura disponibilidad, que puede generar carestías y graves conflictos. Para una correcta gestión, es importante conocer el comportamiento del agua en el sistema global y, más concretamente, su comportamiento en la superficie terrestre. Este trabajo se apoya en la necesidad de estudiar: (a) la sequía hidrológica y la sequía meteorológica y entender sus inter-relaciones, como el retardo en que se manifiesta la sequía hidrológica tras las condiciones de déficit de precipitación y (b) el análisis de tendencias de ambos tipos de sequías. El comportamiento de cada cuenca es muy distinto debido a la alta variabilidad espacial del fenómeno, lo que genera la difícil caracterización de patrones generales. Las tendencias permiten vislumbrar panoramas futuros a los cuales presumiblemente tendremos que enfrentarnos. El correcto conocimiento de este comportamiento, permite predecir la disponibilidad del recurso y hacer frente a demandas potenciales mediante la gestión de los recursos hídricos. Ante estas necesidades, aparecen índices de sequía para monitorizar el fenómeno y para establecer objetivamente y de forma simple, el nivel de severidad y la extensión espacial y temporal de los episodios secos. Siguiendo el desarrollo de los modelos estadísticos y predictivos, de cara al futuro, se puede plantear la necesidad de aplicación de índices de sequía que tomen en consideración múltiples variables (precipitación, temperatura, evapotranspiración, caudal) y que aprovechen las ventajas que ofrecen las nuevas tecnologías.



Agradecimientos

Me gustaría dar mi agradecimiento a varias personas que han contribuido en la culminación de este trabajo. En primer lugar, mi agradecimiento a todos los docentes de este y los anteriores cursos del Grado de Geografía de la Universidad de las Islas Baleares, por su labor y por el conocimiento que me han aportado. Agradezco el interés y la ayuda de mis compañeros, especialmente a aquellos con los que he compartido horas de aprendizaje y alguna que otra risa. A mis familiares por el apoyo incondicional. Por último, a mi tutor Jorge Lorenzo Lacruz por su apoyo, sus consejos y su asistencia, sin la cual este trabajo no hubiera sido posible.

Referencias

- Barceló, A. M., & Moreno, J. V. (2014). El seguimiento de la sequía en estaciones y grandes cuencas usando el índice SPI. *Tiempo y Clima*, 5(23).
- Black, M. (2005). *El secuestro del agua: la mala gestión de los recursos hídricos* (Vol. 31). Intermón Oxfam Editorial.
- Bosque Maurel, J. (2008). El agua como recurso escaso y sus problemas en la España actual. *Estudios Geográficos*, 69(265), 453-493.
- Cantos, J. O. (2001). Tipología de sequías en España. *Ería*, (56), 201-227
- Coll Benages, J. R. (2013). Drought variability and change across the Iberian Peninsula.
- Cortesi, N., Gonzalez., Hidalgo, J. C., Trigo, R. M., & Ramos, A. M. (2014). Weather types and spatial variability of precipitation in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 34(8), 2661-2677.
- Cueva, A. J. P. (1988). Notas sobre el concepto, los métodos de estudio y la génesis de las sequías. *Cuadernos de geografía*, (44), 139-144.
- Donaire, J. J. S. (2006). Indicadores pluviométricos de sequía para España (1865-2004). *Observatorio medioambiental*, (9), 187-213.
- Fernández, C. G. (2011). El cambio climático: Los aspectos científicos y económicos mas relevantes. *Nómadas. Revista Crítica de Ciencias Sociales y Jurídicas*, 32(4), 5-32.
- García-Barrón, L., Camarillo, J. M., Morales, J., & Sousa, A. (2015). Temporal analysis (1940–2010) of rainfall aggressiveness in the Iberian Peninsula basins. *Journal of Hydrology*, 525, 747-759.
- González-Hidalgo, J. C., Brunetti, M., & de Luis, M. (2011). A new tool for monthly precipitation analysis in Spain: MOPREDAS database (monthly precipitation trends December 1945–November 2005). *International Journal of Climatology*, 31(5), 715-731.
- Gouveia, C. M., Ramos, P., Russo, A., & Trigo, R. M. (2015). Drought trends in the Iberian Peninsula over the last 112 years.
- Hannaford, J., Buys, G., Stahl, K., & Tallaksen, L. M. (2013). The influence of decadal-scale variability on trends in long European streamflow records. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(7), 2717-2733.
- Loon, A. V. (2013). *On the propagation of drought: how climate and catchment characteristics influence hydrological drought development and recovery*. [Sl: sn].
- López-Moreno, J. I., Morán-Tejeda, E., Vicente Serrano, S. M., Lorenzo-Lacruz, J., & García-Ruiz, J. M. (2011). Impact of climate evolution and land use changes on water yield in the Ebro basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(1), 311-322.
- López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Angulo-Martínez, M., Beguería, S., & Kenawy, A. (2010). Trends in daily precipitation on the northeastern Iberian Peninsula, 1955–2006. *International journal of Climatology*, 30(7), 1026-1041.
- López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Zabalza, J., Revuelto, J., Gilaberte, M., Azorín-Molina, C., ... & Tague, C. (2014). Respuesta hidrológica del Pirineo central al cambio ambiental proyectado para el siglo XXI. *Pirineos*, 169, e004.

- Lorenzo-Lacruz, J., Morán-Tejeda, E., Vicente Serrano, S. M., & López-Moreno, J. I. (2012a). Streamflow droughts in the Iberian Peninsula between 1945 and 2005: spatial and temporal patterns. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9, 8063-8103.
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente Serrano, S. M., González-Hidalgo, J. C., López-Moreno, J. I., & Cortesi, N. (2012b). Evaluación regional de la respuesta hidrológica a las condiciones de sequía climática a distintas escalas temporales en la Península Ibérica.
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., González-Hidalgo, J. C., & Morán-Tejeda, E. (2011). The response of Iberian rivers to the North Atlantic Oscillation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(8), 2581-2597.
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S. M., González-Hidalgo, J. C., López-Moreno, J. I., & Cortesi, N. (2013). Hydrological drought response to meteorological drought in the Iberian Peninsula. *Clim Res*, 58(2), 117-131.
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Morán-Tejeda, E., & Zabalza, J. (2012c). Recent trends in Iberian streamflows (1945–2005). *Journal of Hydrology*, 414, 463-475.
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Beguería, S., García-Ruiz, J. M., & Cuadrat, J. M. (2010). The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). *Journal of Hydrology*, 386(1), 13-26.
- Moreno, J. M., De la Rosa, D., & Zazo, C. (2005). Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático.
- Mundial, U. I. (2004). La reducción de riesgos de desastres Un desafío para el desarrollo.
- Naredo, J. M. (2006). La encrucijada de la gestión del agua en España. *El agua en el siglo XXI: gestión y planificación*. Zaragoza. Institución Fernando El Católico.
- Olcina Cantos, J. (2008). El Mediterráneo, región-riesgo: una visión desde España.
- Pérez Cueva, A.J. (1983): La sequía de 1978-1982. ¿Excepcionalidad o inadaptación?, *Agricultura y Sociedad*, 27, 225-245.
- Rodríguez, N. L. (2013). *El estudio de la sequía hidrológica en el Mediterráneo español: propuesta de aplicación del índice estandarizado de sequía pluviométrica a las aportaciones hídricas* (Doctoral dissertation, Universidad de Sevilla).
- Rojo Núñez, I., Robredo Sánchez, J. C., & Mintegui Aguirre, J. A. (2009, June). Simplificación de un método para la estimación de caudales continuos en pequeñas cuencas de montaña.
- Ruiz, T., & Febles, G. (2004). La desertificación y la sequía en el mundo. *AIA*, 8(2), 3.
- Trigo, R. M., Pozo, Vázquez, D., Osborn, T. J., Castro, Díez, Y., Gámiz, Fortis, S., & Esteban, Parra, M. J. (2004). North Atlantic Oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 24(8), 925-944.
- Tuset, J., Vericat, D., & Batalla, R. J. (2015). Evolución morfo-sedimentaria del tramo medio del río Segre. *Cuadernos de investigación geográfica*, (41), 23-62.

- Valiente, Ó. M. (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación investigaciones geográficas (Esp), julio-diciembre, número 026 Universidad de Alicante Alicante, España. *Investigaciones Geográficas*, (26), 59-80.
- Van Lanen, H. A., Van Loon, A. F., Van Huijgevoort, M. H., Wanders, N., Alderlieste, M. A., Stahl, K., & Tallaksen, L. M. (2013, April). Past and future hydrological drought in water-scarce European regions. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 15, p. 9717).
- Van Loon, A. F., & Laaha, G. (2015). Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. *Journal of Hydrology*, 526, 3-14.
- Vicente Serrano, S. M., González-Hidalgo, J. C., Luis, M. D., & Raventós, J. (2004). Drought patterns in the Mediterranean area: the Valencia region (eastern Spain). *Climate Research*, 26(1), 5-15.
- Vicente-Serrano, S. M. (2006). Spatial and temporal analysis of droughts in the Iberian Peninsula (1910–2000). *Hydrological Sciences Journal*, 51(1), 83-97.
- Vicente-Serrano, S. M., & López-Moreno, J. I. (2005). Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the Standardized Precipitation Index in a mountainous Mediterranean basin. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9(5), 523-533.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J. J., López-Moreno, J. I., Azorín-Molina, C., ... & Sánchez-Lorenzo, A. (2012a). Análisis comparativo de diferentes índices de sequía para aplicaciones ecológicas, agrícolas e hidrológicas.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J. J., López-Moreno, J. I., Azorin-Molina, C., ... & Sanchez-Lorenzo, A. (2012b). Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. *Earth Interactions*, 16(10), 1-27.
- Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., & Beguería, S. (2014). Hidrología ambiental: el papel de la gestión humana del territorio en el ciclo hidrológico continental y en los recursos hídricos. *Geoecología, cambio ambiental y paisaje: homenaje al profesor José María García Ruiz*, 145-172.
- Vide, F. J. M. (1994). Diez características de la pluviometría española decisivas en el control de la demanda y el uso del agua. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (18), 9-16.
- Wong, G., Van Lanen, H. A. J., & Torfs, P. J. J. F. (2013). Probabilistic analysis of hydrological drought characteristics using meteorological drought. *Hydrological Sciences Journal*, 58(2), 253-270.