

EVALUACIÓN REGIONAL DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA A LAS CONDICIONES DE SEQUÍA CLIMÁTICA A DISTINTAS ESCALAS TEMPORALES EN LA PENÍNSULA IBÉRICA

Jorge LORENZO-LACRUZ ¹; Sergio M. VICENTE-SERRANO ¹; José Carlos GONZÁLEZ-HIDALGO ²;
Juan I. LÓPEZ-MORENO ¹; Nicola CORTESI ²

¹ Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas

² Departamento de Geografía, Universidad de Zaragoza

RESUMEN

En este estudio se lleva a cabo una evaluación del impacto acumulado de las sequías climáticas, usando el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), sobre la respuesta de 187 cuencas hidrológicas distribuidas por toda la Península Ibérica. Se analiza, considerando los distintos tipos de regulación, el impacto de la gestión hidrológica en la modificación de la respuesta de los ríos a déficits pluviométricos de diferente longitud, la intensidad de los cambios que producen los distintos aprovechamientos de los embalses, y el papel de la litología de las cuencas para explicar las inercias temporales observadas.

Palabras clave: Sequía hidrológica, sequía climática, agregación temporal, SPI, gestión hidrológica.

ABSTRACT

In this study we tackled an assessment of the accumulated impacts of climatic droughts, using the Standardized Precipitation Index (SPI), on the response of 187 hydrological basins distributed across the Iberian Peninsula. We analyzed, considering different types of regulation, the impact of water management in the modification of the hydrological response to precipitation deficits on different time-scales, the intensity of the changes induced by the different reservoir types and the role of lithology to explain the observed temporal inertias.

Key words: Hydrological drought, climatic drought, temporal aggregation, SPI, water management.

1. INTRODUCCIÓN

Existen varias fuentes de incertidumbre en la estimación de los impactos vinculados a los procesos de cambio global (Raisanen, 2007), y estas dificultades están asociadas al establecimiento de relaciones directas entre la variabilidad climática y los recursos hídricos. Se ha observado que en cuencas dominadas por procesos de escorrentía subsuperficial y de recarga de acuíferos se generan tiempos de tránsito muy largos dentro de una cuenca, lo que produce que las cuencas respondan más lentamente en términos de generación de escorrentía superficial, y que la llegada del agua procedente de la precipitación a los cursos fluviales experimente largos retardos temporales (Soulsby et al., 2010). Otro factor son los procesos de acumulación y fusión nival, que dominan en las cuencas montañosas, y que producen otra serie de retardos entre la precipitación registrada en invierno y los caudales de primavera y verano, resultando críticos para la disponibilidad de recursos hídricos durante la estación seca (Adam et al., 2009).

No obstante, la evaluación de la disponibilidad de los recursos hídricos y del potencial estrés hídrico derivado de ella sólo puede ser realizada teniendo en cuenta las alteraciones antrópicas en el

ciclo hidrológico como consecuencia de la regulación hidrológica. El efecto combinado de la gestión de embalses y las extracciones para riego han generado un descenso de las descargas medias globales del 2.1% anual durante la segunda mitad del siglo XX (Biemans et al., 2011). Estas perturbaciones hacen que aislar la influencia del clima sea difícil, debido a que la respuesta hidrológica a la precipitación puede variar marcadamente en función del tiempo (Changnon y Easterling, 1989; Pandey y Ramasastry, 2001; Lorenzo-Lacruz et al., 2010), como resultado de las diferentes frecuencias de las variables hidrológicas y climáticas (Skøien et al., 2003).

Por otra parte, está comúnmente aceptado que la sequía es un fenómeno multi-escalar (McKee et al., 1995), es decir, que los efectos de los déficits de precipitación (sequía climática) se manifiestan en distintos sistemas (hidrología superficial y subterránea, agricultura, etc.) y a distintas escalas temporales. Este hecho es muy importante para la cuantificación y monitorización de las sequías, ya que la escala temporal a la que los déficits de precipitación se acumulan, separa los diferentes tipos de sequía, y permite la cuantificación de los retardos entre la sequía climática y las sequías hidrológicas, que pueden ser muy distintos entre diferentes cuencas fluviales (Vicente-Serrano et al., 2011).

2. BASE DE DATOS Y METODOLOGÍA

2.1. Base de datos hidrológica

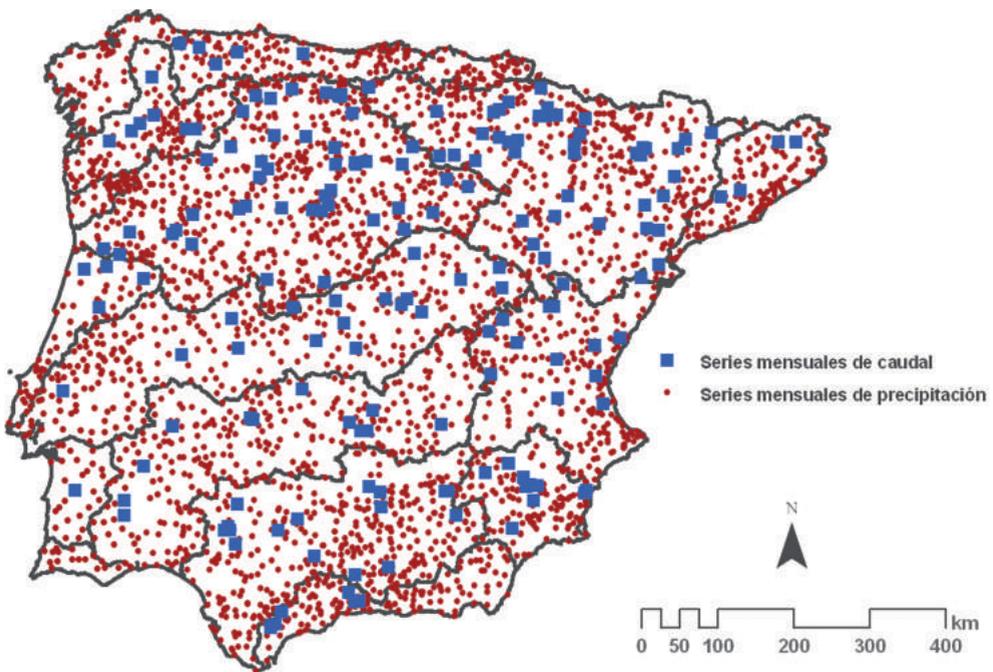


FIG. 1: Distribución espacial de las estaciones, foronómicas y meteorológicas, con series mensuales de caudal y precipitación, respectivamente.

Con el objetivo de crear una base de datos de aportaciones fluviales representativa de la totalidad de la Península Ibérica se adquirieron las series mensuales de caudal (en bruto) pertenecientes a 1460 estaciones de aforo recopiladas y distribuidas por las distintas agencias del agua españolas (Centro de Estudios Hidrográficos, Agència Catalana de l'Aigua, Agencia Andaluza del Agua y Augas de

Galicia) y la portuguesa (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos). El porcentaje de lagunas y la longitud de las series es muy variable, por lo que únicamente se incluyeron las series con secuencias de datos más largas para el periodo 1945-2005, con el fin de evitar la aparición de artefactos y anomalías durante el proceso de relleno de las series. De esta manera, se seleccionó un total de 187 series de aportaciones mensuales basándonos en la longitud y el porcentaje de datos perdidos: aquellas series con más de un 10% de datos ausentes sobre la longitud total de las series fueron excluidas. El procedimiento seguido para rellenarlas se basó en un modelo de regresión lineal, en el cuál las series independientes correspondían al mismo río o a un afluente del río cuya serie era objeto del relleno (variable dependiente). La correlación mínima entre las series incluidas en el modelo se fijó en $R=0.8$ durante un periodo común mínimo de 10 años (120 registros). Posteriormente se realizó un análisis de homogeneidad para corregir cambios bruscos en las series de caudal que no estuvieran relacionados con la construcción de embalses (dado que uno de los objetivos del trabajo es evaluar su impacto), y sí con alteraciones de las lecturas reales. El resultado de este proceso fue una base de datos compuesta por 187 series mensuales de aportaciones en estaciones de aforo de calidad contrastada y distribuidas uniformemente por toda la Península Ibérica (Figura 1).

2.2. Base de datos de precipitación

Se ha utilizado la base de datos de precipitación mensual MOPREDAS (MOnthly PREcipitation DAtabase of Spain; González-Hidalgo et al., 2011), compuesta por 2670 series de precipitación libres de inhomogeneidades y datos anómalos, y distribuidas uniformemente en toda España para el periodo 1945-2005. En el contexto de este trabajo, y para disponer de información pluviométrica en el conjunto de la Península Ibérica, a esta base de datos se le añadieron 386 series de precipitación correspondientes al territorio portugués, que fueron proporcionadas por el Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (<http://snirh.pt/>). El protocolo seguido para su control de calidad, homogeneización y relleno de lagunas fue el mismo que el utilizado por González-Hidalgo et al. (2011), con el fin de obtener la máxima coherencia y robustez posible al unir ambas bases de datos. Finalmente se obtuvo la base de datos MOPREDASP (Monthly Precipitation Database of Spain and Portugal), compuesta por 3056 series de precipitación mensual repartidas por toda la Península Ibérica (Figura 1).

2.3. El Índice de Caudal Estandarizado (SSI)

En este trabajo se ha utilizado un índice de sequía hidrológico, el *Standardized Streamflow Index* (SSI; Vicente-Serrano et al., 2011) que permite monitorizar y cuantificar las sequías fluviales. El Índice de Caudal Estandarizado (SSI) 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, lognormal, 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), seleccionando la mejor distribución en base a la mínima distancia ortogonal entre las muestras de L-momentos en una estación i y la relación de L-momentos para una distribución dada seleccionada de entre las 6 distribuciones consideradas.

2.4. El Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)

El SPI permite cuantificar la severidad de las sequías a diferentes escalas temporales, y ello resulta esencial para identificar la posible diferente respuesta de las sequías hidrológicas a las climáticas. En este trabajo se ha utilizado el algoritmo descrito por López-Moreno y Vicente-Serrano (2008) para calcular los SPI promedio de cada cuenca de drenaje (calculado sobre una rejilla de precipitación mensual previamente calculada de 10km de resolución para el periodo 1945-2005) a las escalas temporales de 1 a 48 meses.

2.5. Análisis estadístico

Para obtener una medida del impacto de las sequías climáticas sobre los caudales de los ríos, se calculó la correlación entre los índices climáticos (SPI) e hidrológicos (SSI). Ello permitió obtener 187 curvas de correlación (correlaciones continuas de 1 a 48 meses) sobre las que basar la realización de un Análisis de Componentes Principales. A partir del mismo se extrajeron los patrones generales en la respuesta de las sequías hidrológicas a diferentes escalas temporales de las sequías climáticas en la Península. En la Figura 2 se presenta un esquema explicativo del análisis realizado, donde se muestra un ejemplo de una curva de correlaciones continuas entre el SSI y el SPI (calculado a las escalas de 1 a 48 meses). La curva sintetiza la relación (correlaciones de Pearson) entre los caudales estandarizados (SSI) y las anomalías de precipitación acumuladas (SPI) a escalas entre 1 y 48 meses. Como ejemplos ilustrativos se muestra la evolución del SSI y el SPI a la escala de 3 meses para el periodo de estudio en el río Sabor (Cuenca del Duero), que coincide con la escala temporal de mayor correlación de la curva ($R = 0.71$). También se muestra la evolución del SSI y el SPI a la escala de 48 meses, que coincide con la escala con menor correlación ($R = 0.16$).

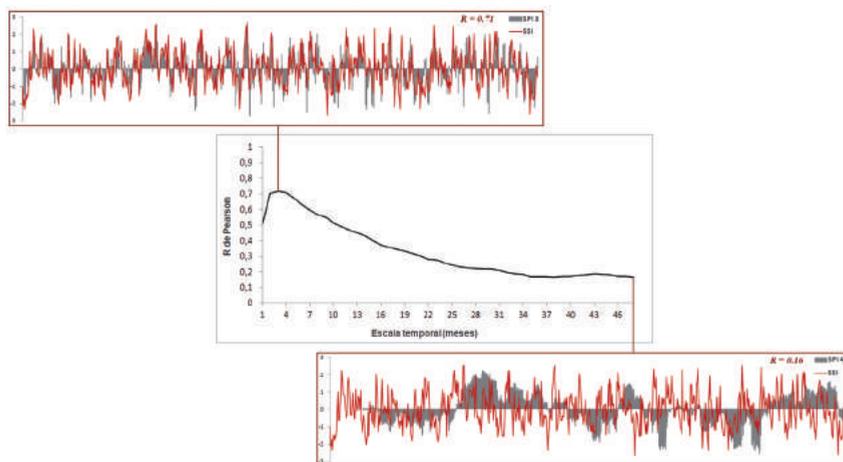


FIG. 2: Arriba. Evolución temporal del SSI y del SPI calculado a la escala de 3 meses de la cuenca del río Sabor. Centro. curva de correlaciones continuas entre el SSI y el SPI a las escalas de 1 a 48 meses. Abajo. Evolución temporal del SSI y del SPI calculado a la escala de 48 meses de la cuenca del río Sabor.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Patrones generales de la respuesta hidrológica ante condiciones de sequía climática

La Figura 3 presenta los resultados obtenidos al realizar un Análisis de Componentes Principales (ACP) sobre las curvas de correlación calculadas entre el SSI y el SPI (a escalas de 1 a 48 meses) en cada una de las 187 estaciones de aforo. El análisis no tiene en cuenta el grado de regulación de cada una de las cuencas. El mapa muestra la distribución de las cuencas y su clasificación de acuerdo a la pertenencia a uno u otro componente principal, de acuerdo a la *regla de carga factorial máxima*. Junto al mapa, la gráfica muestra las curvas con los valores de correlación entre el SSI y el SPI a escalas temporales de 1 a 48 meses, que sintetizan la respuesta en las condiciones de sequía hidrológica ante sequías climáticas de diferente escala temporal. Los dos componentes extraídos explican el 91.12% de la varianza total, tras aplicarse una rotación Varimax. El primer componente Principal resume el 65.17% de la varianza y está caracterizado por la respuesta hidrológica a las sequías climáticas a escalas temporales cortas. Las correlaciones obtenidas son positivas para todas las escalas temporales, siendo especialmente altas considerando el SPI a escalas temporales entre 1 y 4 meses, aunque la mayor

correlación se registra a la escala de 2 meses ($R=0.37$). A partir de esa escala temporal las correlaciones descienden acusadamente y dejan de ser significativas a partir de la escala de 6 meses. Este tipo de respuesta revela que los valores de SSI dependen en mayor medida de la precipitación acumulada durante los dos meses anteriores. Especialmente, este patrón se distribuye a lo largo de la cuenca del Miño, las cuencas Cantábricas, los afluentes de la margen izquierda del río Duero, gran parte de la cuenca del Ebro, el curso bajo del río Tajo y sectores fluviales concretos y de pequeño tamaño en la cuenca del Guadiana, Guadalquivir y Segura. El segundo componente Principal explica el 26% de la varianza total. Las correlaciones son positivas en todos los casos. Sin embargo, aunque la respuesta del segundo componente es baja a escalas temporales cortas, ésta aumenta considerablemente a partir de la escala temporal de 6 meses. La máxima correlación se registra a la escala temporal de 12 meses ($R=0.55$), si bien la correlación es también significativa a escalas temporales más largas. En este caso los valores de SSI están especialmente relacionados con la cantidad de precipitación registrada durante los doce meses previos, aunque el papel de la precipitación de los años anteriores no resulta despreciable. Este tipo de respuesta caracteriza la mayor parte de las cuencas del Júcar, Guadiana, Guadalquivir y Segura, así como sub-cuencas concretas del Tajo medio, Duero y Ebro.

El tipo de respuesta a escalas temporales cortas que caracteriza el comportamiento del primer componente Principal coincide con los resultados de Slazai et al. (2000), que encontraron la máxima correlación entre el SPI y los caudales de varias cuencas de pequeño tamaño en Hungría considerando la escala de 2 meses. En la Península Ibérica, Vicente-Serrano y López Moreno (2005) observaron un patrón similar al analizar la respuesta de la cuenca del río Aragón en los Pirineos centrales. Este tipo de respuesta rápida se asocia con cuencas de intensa generación de escorrentía, favorecida por pendientes pronunciadas, un área de drenaje relativamente pequeña y sustratos rocosos de escasa permeabilidad (López-Moreno et al., 2012). Por su parte, el patrón revelado por el segundo componente Principal introduce un tipo de respuesta totalmente distinto. La acumulación de los impactos de los déficits de precipitación sobre la generación de caudales se produce durante largos periodos de tiempo. Este hecho estaría relacionado con las características de las sequías hidrológicas (de extrema duración) en gran parte de estas zonas (Lorenzo-Lacruz et al., 2012); lo que hace intuir que otros factores distintos de los fisiográficos, entre los que destacarían la regulación y las prácticas de gestión hídrica, están influyendo en ese tipo de respuesta y en la agregación temporal de los impactos de la sequía climática en la generación de caudales.

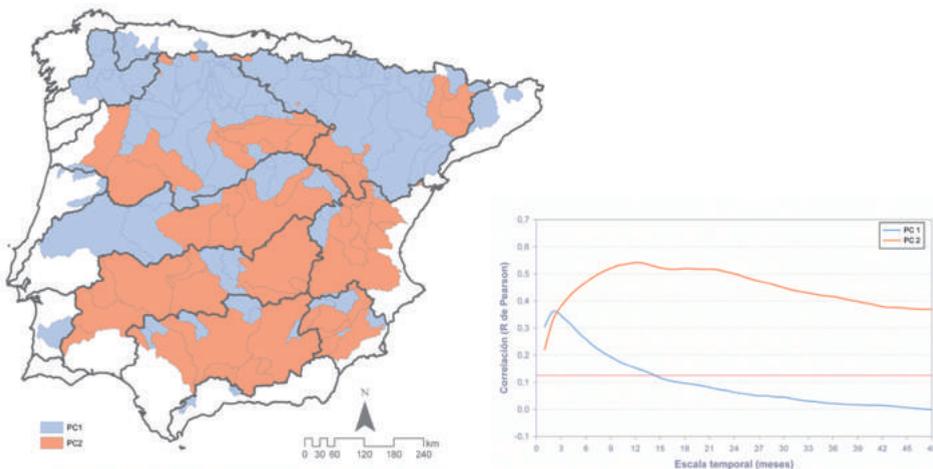


FIG. 3: Izquierda. Clasificación de las cuencas hidrográficas de acuerdo a la regla de carga factorial máxima según su pertenencia al primer o al segundo componente principal. DERECHA. Puntuaciones factoriales (transformadas en las unidades originales, R de Pearson) de los dos componentes seleccionados. La línea roja denota el umbral de significación estadística ($\alpha=0.01$).

3.2. La respuesta de los ríos no regulados a la sequía climática y la importancia de la litología de las diferentes cuencas

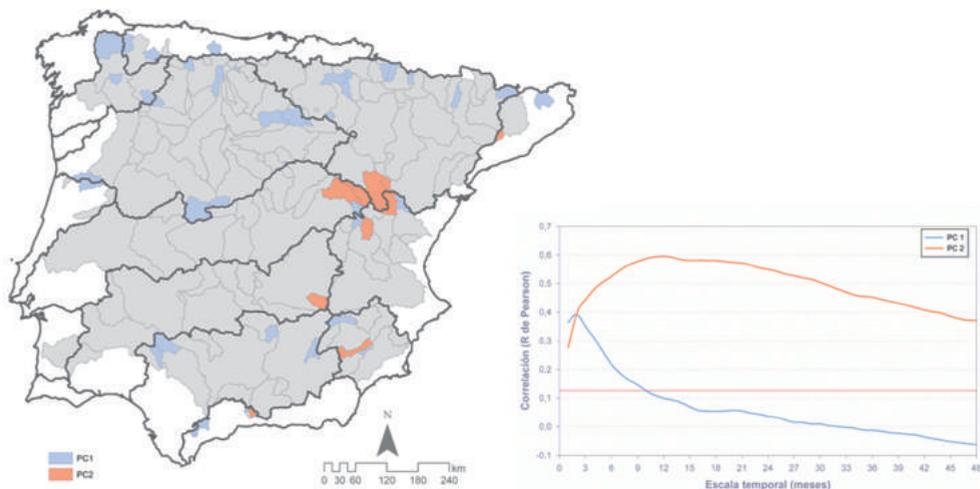


FIG. 4: Izquierda. Clasificación de las cuencas hidrográficas no reguladas de acuerdo a la regla de carga factorial máxima según su pertenencia al primer o al segundo componente principal. Derecha. Puntuaciones factoriales (transformadas en las unidades originales, R de Pearson) de los dos componentes seleccionados. La línea roja denota el umbral de significación estadística ($\alpha=0.01$).

La Figura 4 muestra los resultados del ACP realizado sobre las curvas con los valores de correlación calculadas entre el SSI y el SPI a las escalas temporales de 1 a 48 meses en las 58 estaciones de aforo que no presentan una regulación previa mediante presas. El primer componente agrupa el 67.47% de la varianza total y se caracteriza por una fuerte respuesta hidrológica ante condiciones de sequía climática a escalas temporales cortas. Las correlaciones son positivas entre las escalas temporales de 1 a 30 meses, y la máxima ($R=0.4$) se vuelve a alcanzar a la escala temporal de 2 meses. La correlación desciende bruscamente a partir de la escala temporal de 2 meses y deja de ser significativa a partir de la escala temporal de 10 meses. Las cuencas representadas por este patrón son cuencas montañosas septentrionales de pequeño tamaño drenando desde la cordillera Cantábrica y los Montes de León, los Pirineos y los Sistemas Central e Ibérico. También aparecen algunos ejemplos en el sur, como algunos afluentes de la margen derecha del Guadalquivir y las cuencas Mediterráneas Andaluzas. El segundo componente principal explica el 19.29% de la varianza total. De nuevo se observa una curva con unos valores de correlación entre el SPI y el SSI bajos considerando escalas temporales cortas, que se incrementan a partir de la escala temporal de 6 meses para alcanzar el máximo ($R=0.59$) a la escala temporal de 12 meses. En este caso se vuelve a poner de manifiesto la dependencia de los valores de SSI a las precipitaciones de los 2 años previos. Este patrón representa el comportamiento en varias cuencas situadas en el sur de la cordillera Ibérica (cabeceras de los ríos Tajo, Jalón, Gallo, Júcar y Alfambra) y las cabeceras del Guadiana y del Quípar (cuenca del Segura).

El primer componente, representativo de cuencas en las cabeceras de los ríos, muestra una correlación entre el SSI y el SPI a escalas temporales cortas. Este comportamiento puede estar ligado a elevados coeficientes de escorrentía en zonas con un predominio de litologías poco permeables. En el caso del segundo componente, vuelve a observarse un patrón de respuesta hidrológica ante condiciones de sequía climática a escalas temporales largas. Sin embargo en este caso, al tratarse de cuencas sin regular, se desmiente que la fuerte inercia temporal que caracteriza la respuesta hidrológica de estas cuencas se deba a la gestión hidrológica. Como ya se apuntaba en Lorenzo-

Lacruz et al. (2010), el papel de las litologías permeables es relevante en algunas de estas zonas, lo que permite el establecimiento de procesos de recarga de acuíferos. Las litologías calizas se consideran por lo general una de las formaciones más favorables para la localización de acuíferos: la porosidad desarrollada por fracturas y alteración de la roca le proporciona unas características muy favorables para la infiltración, almacenamiento y circulación de agua (Aragónés y Sahuquillo, 1976). Por ello, la presencia de litologías calizas en parte de las cabeceras de cuencas no reguladas explicaría procesos de recarga y descarga de acuíferos en dichas cuencas, que pueden ser responsables de la agregación temporal de la respuesta hidrológica a condiciones de sequía climática. Las cuencas representadas por el primer componente, salvo alguna excepción, presentan porcentajes de superficie caliza muy bajos, con una media inferior al 10%. Este hecho reafirma la idea de que las cuencas con respuestas rápidas están asociadas a litologías poco permeables. Por su parte, las cuencas representadas por el segundo componente presentan importantes porcentajes de cubrimiento calizo, con un valor medio por encima del 30%. En cuencas no reguladas como éstas, los procesos de recarga y descarga de acuíferos generan, como veremos en las siguientes secciones, impactos similares a los que producen los embalses de gran capacidad, actuando en cierto modo como reservorios naturales.

3.3. Modificaciones introducidas por la gestión hidrológica en la respuesta de los ríos ibéricos a las sequías climáticas

La Figura 5 muestra las curvas de correlación, dos por componente, obtenidas del análisis de las 71 cuencas que fueron reguladas durante el periodo de estudio (1945-2005). En cada caso se obtuvieron dos curvas de correlación distintas entre el SSI y el SPI a escalas temporales de 1 a 48 meses; la primera, que expresa las correlaciones desde 1945 hasta el año en que se reguló cada una de las cuencas y, la segunda con las correlaciones desde el año en que se produjo la regulación hasta 2005.

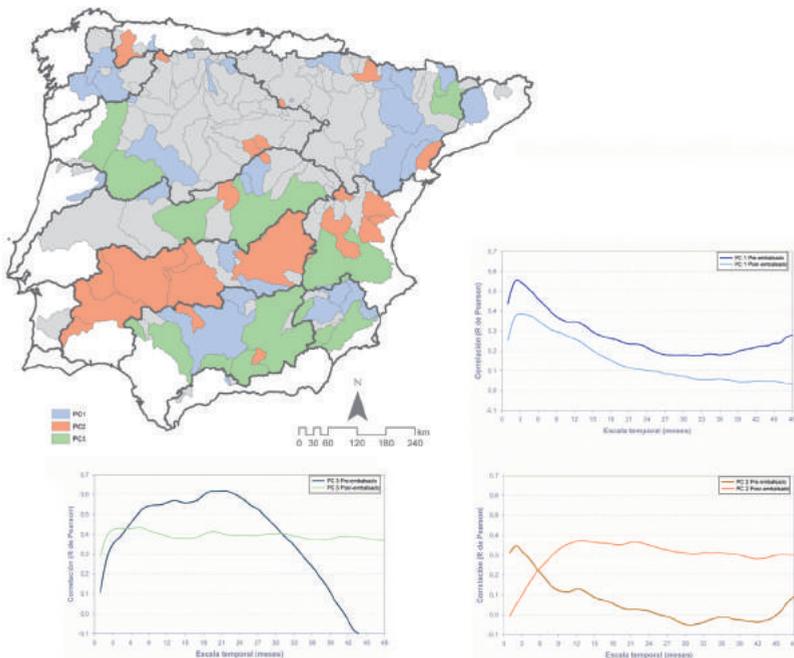


FIG. 5: Mapa. Clasificación de las cuencas hidrológicas reguladas entre 1945 y 2005 de acuerdo a la regla de carga factorial máxima según su pertenencia al primer, segundo o tercer componente principal. Gráficas. Puntuaciones factoriales (transformadas en las unidades originales, R de Pearson) de los tres componentes seleccionados antes y después del embalsado de las cuencas que representan.

El primer componente resume el 32.9% de la varianza, y muestra una modificación del patrón de respuesta a escalas temporales cortas observado hasta ahora. Antes de la regulación estas cuencas muestran una respuesta alta ($R > 0.5$) al SPI considerando escalas temporales de 2 y 3 meses. Tras el represamiento aguas arriba, si bien la curva de correlación mantiene el mismo patrón, estas cuencas experimentan un descenso de su sensibilidad a la sequía climática: en este caso, aunque la máxima correlación ($R = 0.38$) también se registra a una escala temporal de 2 meses, sólo se registran correlaciones mayores de $R > 0.3$ entre las escalas de 2 y 9 meses. Este primer componente representa a la cuenca del Miño, numerosos afluentes pirenaicos y el tramo bajo del Ebro, el sistema del Tormes en la cuenca del Duero, el sector septentrional de la cuenca del Segura y el tramo medio del Guadalquivir. Las curvas de correlación del segundo componente (31.1% de la varianza) muestran una inversión total en la configuración entre los dos periodos analizados. Antes de la regulación muestran una mayor sensibilidad ($R = 0.34$) a la escala temporal de 2 meses, mientras que las correlaciones descienden bruscamente a escalas temporales mayores como sucede en los sistemas englobados en el primer componente; tras el represamiento, los caudales pasaron a responder a escalas temporales mucho más largas, con correlaciones superiores a $R > 0.3$ entre los 8 y 38 meses, adquiriendo la configuración del segundo gran patrón general observado, caracterizado por largas inercias temporales en la respuesta hidrológica ante las condiciones de sequía climática. Este segundo componente resume las modificaciones en la respuesta de las sequías hidrológicas a distintas escalas temporales del SPI, ligadas a la gestión hidrológica de la práctica totalidad de la cuenca del Guadiana, el sector norte de la cuenca del Júcar, el río Ebro aguas abajo del sistema Ribarroja-Mequinenza-Flix, y cuencas aisladas que drenan desde las cordilleras más septentrionales de la Península, incluyendo el sistema del río Aragón en la cuenca del Ebro. El tercer componente identificado explica el 19.6% de la varianza y está ligado a cuencas que antes de ser reguladas mostraban una correlación alta con el SPI a escalas temporales medias y largas ($R > 0.5$ entre los 7 y los 28 meses), y que tras la regulación aguas arriba experimentaron una reducción de la magnitud de las correlaciones a la vez que una homogeneización de la inercia temporal, con correlaciones en torno a $R = 0.4$ a lo largo de todas las escalas temporales analizadas.

El primer patrón de cambio en la respuesta se caracteriza por un descenso de la sensibilidad de los caudales ante la variabilidad pluviométrica, aunque no representa una alteración en la inercia temporal, que sigue marcada por una mayor respuesta a escalas temporales cortas. El segundo componente principal presentaba un cambio drástico en las respuestas, cambiando de escalas temporales cortas hasta otras mucho más largas. Los resultados obtenidos para este segundo componente incluyen la cuenca del río Aragón, coincidiendo con los resultados obtenidos por Vicente-Serrano y López-Moreno (2005), que mostraron que las descargas del río respondían a escalas temporales cortas, mientras que las salidas del embalse de Yesa lo hacían a escalas temporales más largas, lo que demostraría claramente que la regulación modifica los tiempos de respuesta de los caudales y tiende a amortiguar el efecto de las sequías climáticas, alargando las escalas temporales del SPI que influyen sobre los caudales. El tercer componente identificado se caracteriza por paliar los picos de respuesta hidrológica ante condiciones de sequía climática que se dan durante escalas temporales medias para distribuir la sensibilidad a lo largo de todas las escalas temporales, con el objetivo de mantener unas tasas de almacenamiento regulares. Los diferentes patrones de cambio en la respuesta de los caudales a las sequías climáticas observados en esta sección plantean la hipótesis sobre como el tipo de uso o aprovechamiento que se hace del agua de un determinado embalse puede influir de manera importante en la respuesta de los caudales aguas abajo.

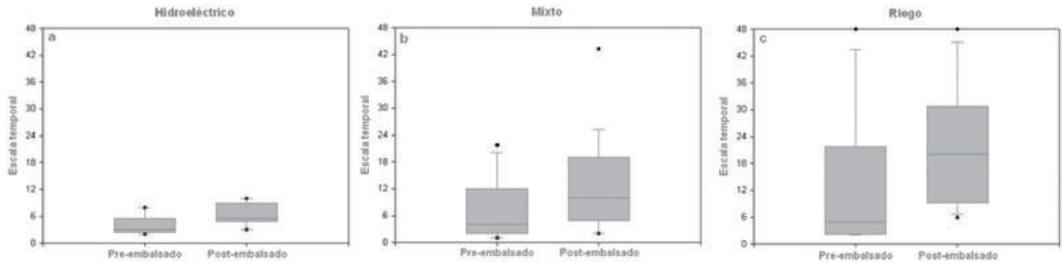


FIG. 6: Escala temporal del SPI a la que se obtiene la máxima correlación entre el SSI y el SPI en las distintas cuencas reguladas entre 1945 y 2005, clasificadas según el aprovechamiento del embalse que regula sus caudales aguas arriba en embalses de uso hidroeléctrico (a), embalses de uso mixto (b) y embalses para riego(c). La línea negra representa la mediana y los puntos los percentiles 5 y 95.

La Figura 6 muestra un diagrama de cajas donde se indica la escala temporal del SPI a la que se ha observado la máxima correlación con el SSI, antes y después de la regulación, en las 71 cuencas hidrológicas reguladas entre 1945 y 2005, y que han sido clasificadas según el aprovechamiento que se hace del embalse que las regula. En el caso de los embalses de uso hidroeléctrico (Figura 7a) la regulación no altera en gran manera la respuesta hidrológica a las sequías climáticas. Antes del represamiento, estas cuencas muestran una correlación mayor considerando escalas temporales cortas y no superiores a los 6-7 meses. Tras la entrada en funcionamiento de las presas se produce un leve aumento de la escala temporal a la que se produce la máxima correlación. Este tipo de aprovechamiento de los embalses resulta representativo de aquellas cuencas representadas por el primer componente principal (el 70% de las cuencas de uso exclusivo hidroeléctrico están representadas por el primer componente), en el que se comprobaba un pequeño descenso en los valores de correlación a las diferentes escalas temporales del SPI, sin que se modificara notablemente la escala temporal a la que se produce la respuesta más alta. A pesar de que el aprovechamiento hidroeléctrico de los ríos ha sido históricamente considerado como un uso no-consuntivo del agua, se ha demostrado que las pérdidas generadas por evapotranspiración, también en este tipo de embalses, no son despreciables (Mekonnen y Hoekstra, 2012). Estas pérdidas relacionadas con la evapotranspiración podrían explicar la pérdida de influencia de la precipitación para explicar el comportamiento de los caudales, algo que se deduce de la reducción de las correlaciones obtenidas entre el SSI y el SPI en el primer patrón de modificación de la respuesta hidrológica destacado. Sin embargo, cuando el aprovechamiento de tipo hidroeléctrico se combina con otros como el abastecimiento urbano o el riego en embalses de uso mixto (Figura 7b), las correlaciones más altas entre los caudales y el SPI pasan de producirse a escalas temporales del SPI de entre 2 y 12 meses a escalas temporales de entre 5 y 20 meses. En este tipo de embalses se produce un almacenamiento de agua más sostenido en el tiempo que en los embalses de aprovechamiento hidroeléctrico para hacer frente a la demanda de diferentes usos. Este hecho hace que los caudales respondan a escalas temporales del SPI más largas debido a la mayor capacidad de embalsado aguas arriba. Por su parte, en el caso de los embalses de uso exclusivo para riego, se ha comprobado que introducen un mayor retardo temporal en la respuesta de los caudales al SPI. Antes de su represamiento, los caudales mostraban una máxima correlación a escalas temporales del SPI cortas y medias (la mediana corresponde a la escala temporal de 4 meses), mientras que tras ser regulados, la mediana de las máximas correlaciones corresponde a una escala de 9 meses. La regulación de carácter multi-anual ligada a sistemas con una alta capacidad de embalsado y al aprovechamiento para riego es la responsable de amplios retardos temporales entre la época en la que se producen déficits de precipitación y cuando éstos se hacen patentes en los caudales aguas abajo de los embalses. El efecto atenuador que producen los embalses en la respuesta hidrológica ante las condiciones de sequía

climática durante escalas temporales cortas, genera, sin embargo, el retardo y sostenimiento de dicha respuesta durante escalas temporales largas. Este hecho estaría relacionado con la gran cantidad de precipitación necesaria para restablecer las tasas de almacenamiento operativas de los embalses tras un episodio de sequía prolongado.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado el impacto de las sequías climáticas y la regulación hidrológica en las 187 cuencas de drenaje incluidas en el estudio, mediante la puesta en relación del SSI y el SPI calculado a escalas temporales de 1 a 48 meses. Los análisis han revelado dos grandes patrones de respuesta de las sequías hidrológicas a los déficits de precipitación acumulados a diferentes escalas temporales: un patrón de respuesta breve pero intensa durante escalas temporales cortas, con la máxima correlación a la escala temporal de 2 meses, y que representa, principalmente, a las cuencas septentrionales de la Península; y otro patrón de respuesta muy diferente, caracterizado por una baja respuesta a escalas temporales cortas, que resulta superior a escalas temporales medias y largas, y que representa a la mayor parte de las cuencas de la mitad meridional de la Península.

El análisis individualizado llevado a cabo con las cuencas no reguladas, desveló nuevamente los 2 patrones observados con anterioridad, si bien en este caso, las grandes inercias temporales observadas en algunas de ellas se relacionaron con el alto porcentaje de litología caliza presente en las mismas, y no con la regulación de tipo hiper-anual característico de muchas de las cuencas que mostraron largas inercias temporales.

Finalmente, las cuencas reguladas durante el periodo de estudio mostraron tres patrones distintos de modificación en la respuesta del SSI a diferentes escalas temporales del SPI: un primer patrón que representa un descenso de la respuesta de los caudales a las sequías pluviométricas que no altera significativamente las inercias temporales en la respuesta (altas correlaciones a escalas temporales del SPI cortas) y que se relaciona a embalses cuyo aprovechamiento principal es la generación de energía hidroeléctrica; un segundo patrón de cambio muy notable en la respuesta de los caudales, que pasan de producirse a escalas temporales cortas a otras más largas y que se relaciona con aquellos embalses cuyo uso principal es el abastecimiento de los núcleos urbanos y del regadío; y un tercer patrón de descenso de la respuesta de los caudales a la variabilidad pluviométrica localizada a escalas temporales medias, para homogeneizarla lo largo de todas las escalas temporales analizadas, y que corresponde, principalmente, con embalses de uso mixto.

Agradecimientos

Este trabajo ha contado con la financiación de una beca FPI concedida por el Gobierno de Aragón y de los proyectos de investigación, CGL2011-27574-CO2-02, CGL2011-24185 y CGL2011-27536 financiados por la Comisión Española de Ciencia y Tecnología y FEDER, ACQWA (FP7-ENV-2007-1-212250) financiado por el VII Programa Marco de la Comisión Europea, “Efecto de los Escenarios de Cambio Climático Sobre La Hidrología superficial y la Gestión de Embalses del Pirineo Aragonés”, financiado por “la Obra Social La Caixa” y el Gobierno de Aragón y la Influencia del Cambio Climático en el turismo de nieve, CTTTP01/10, financiado por la Comisión de trabajo de los Pirineos.

REFERENCIAS

- Adam, J.C., Hamlet, A.F., Lettenmaier, D.P. (2009): Implications of global climate change for snowmelt hydrology in the 21st century, *Hydrological Processes* 23, 962-972.
- Aragonés, J.M. y Sahuquillo, A., (1976): Relación hidrogeológica entre embalses construidos en calizas y acuíferos en la cuenca del Júcar, *Revista de Obras Públicas* 123, (3131): 185-194.

- Biemans, H., Haddeland, I., Kabat, P., Ludwig, F., Hutjes, W.A., Heinke, J., von Bloh, W., Gerten, D., (2011): Impact of reservoirs on river discharge and irrigation water supply during the 20th century, *Water Resources Research*, W03509, doi:10.1029/2009WR008929.
- Changnon, S.A., Easterling, W.E., (1989): Measuring drought impacts: the Illinois case. *Water Resources Bulletin* 25, 27–42.
- 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.
- Kroll, C.N., Vogel, R.M., (2002): Probability distribution of low streamflow series in the United States, *Journal of Hydrologic Engineering* 7, 137–146.
- López-Moreno, J.I. y Vicente-Serrano, S.M., (2008): Positive and negative phases of the wintertime North Atlantic Oscillation and drought occurrence over Europe: a multi-temporal-scale approach. *Journal of Climate* 21, 1220–1243.
- López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Zabalza, J., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorín-Molina, C., Morán-Tejeda, E., (2012): Hydrological response to the climate variability at different time scales: a study in the Ebro basin, *Journal of Hydrology*, en revision.
- 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, 13–26.
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Morán-Tejeda, E., Zabalza, J., (2012): Recent trends in Iberian streamflows (1945–2005), *Journal of Hydrology* 414–415, 463–475.
- McKee, T.B.N., Doesken, J., Kleist, J., (1995): Drought monitoring with multiple time scales. In: *Ninth Conference on Applied Climatology*. American Meteorological Society, Dallas, TX, pp. 233–236.
- Mekonnen, M. M. y Hoekstra, A. Y., (2012): The blue water footprint of electricity from hydropower, *Hydrology and Earth System Sciences* 16, 179–187.
- Pandey, R.P., Ramasastri, K.S., (2001): Relationship between the common climatic parameters and average drought frequency. *Hydrological Processes* 15, 1019– 1032.
- Raisanen, J., (2007): How reliable are climate models?, *Tellus Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 59, 2–29.
- Skøien, J.O., Blösch, G., Western, A.W., (2003): Characteristic space scales and timescales in hydrology. *Water Resources Research* 39, 1304. doi:10.1029/2002WR001736.
- Soulsby, C., Tetzlaff, D., Hrachowitz, M. (2010): Are transit times useful process-based tools for flow prediction and classification in ungauged basins in montane regions?, *Hydrological Processes* 24, 1685–1696.
- Szalai, S., Szinell, C.S., Zoboki, J., (2000): Drought monitoring in Hungary. In: *Early Warning Systems for Drought Preparedness and Drought Management*, World Meteorological Organization, Lisbon, pp. 182–199.
- Vicente-Serrano, S.M. y 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* 9, 523–533.
- Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorín-Molina, C., Morán-Tejeda, E., (2011): Accurate computation of a streamflow drought index, *Journal of Hydrologic Engineering* 17, 318–332.

