



CONAMA10
CONGRESO NACIONAL
DEL MEDIO AMBIENTE

COMUNICACIÓN TÉCNICA

Modelización de patrones espaciales de precipitación y sequías en condiciones no estacionarias en la Cuenca del Río Segura

Autor: Sandra García Galiano¹

Institución: Universidad Politécnica de Cartagena

e-mail: sandra.garcia@upct.es

Otros Autores: Juan Diego Giraldo Osorio¹, Adolfo Mérida Abril², Mario Urrea Mallebrera², Claudia Tetay Botía¹

¹ Universidad Politécnica de Cartagena, Unid. Predep. de Ingeniería Civil, Grupo I+D Gestión de Recursos Hídricos, Paseo Alfonso XIII, 52, 30203, Cartagena, España.

² Confederación Hidrográfica del Segura (CHS). Plaza Fontes, 1. Murcia 30001. España

RESUMEN

En el presente trabajo, se aborda un estudio exhaustivo de patrones espaciales de precipitación anual y estacional, así como de longitudes máximas de rachas secas para la Cuenca del Río Segura (Sureste Español). El estudio permite identificar no estacionariedades en la precipitación y longitudes de rachas secas, mediante una modelización GAMLSS (Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape). Se observa una clara inflexión en el comportamiento de las series temporales de precipitación en algunas zonas de la cuenca, a finales de los años '70 y comienzo de los '80. Se demuestra una intensificación de eventos de sequía en cuencas de cabecera, mientras una disminución de los mismos en las zonas costeras y cuenca baja del Río Segura. Dadas las tendencias observadas en los parámetros de las pdf ajustadas, se concluye que GAMLSS es una herramienta apropiada para describir espacialmente las condiciones no estacionarias de las series hidrometeorológicas y de los eventos extremos como las sequías. La construcción de mapas de riesgo de sequía, bajo un clima cambiante, permitirá justificar las decisiones que se adopten en materia de planificación y gestión de recursos hídricos para distintos horizontes temporales

Palabras Clave: cambio climático, sequías, GAMLSS, Cuenca del Segura, no estacionariedad.

1. Introducción

El análisis de series temporales ha llegado a ser una herramienta fundamental en la hidrología y gestión de recursos hídricos. Una serie temporal se considera estacionaria si está libre de tendencias, traslados, o periodicidades (Salas, 1992). Mientras la presunción de estacionariedad implica que presenta una función de densidad de probabilidad (pdf) invariante con el tiempo, cuyas propiedades pueden ser estimadas desde un registro instrumental (Milly et al., 2008). Las pdfs son utilizadas para evaluar y gestionar riesgos de suministro hídrico, diseños de infraestructuras hidráulicas y cartografía de riesgos de inundación, entre otros.

La presunción de estacionariedad puede no ser válida en el caso de forzamientos debidos a cambio y variabilidad climática, y/o cambios inducidos por el hombre como modificaciones de usos del suelo o construcción de infraestructuras hidráulicas por ejemplo. En ese caso, se deberían utilizar modelos probabilísticos no estacionarios (Milly et al., 2008), capaces de reproducir la variación lineal o no lineal con el tiempo de los parámetros de las pdfs seleccionadas (Villarini et al., 2010). En este sentido, la herramienta de modelización GAMLSS (Generalized Additive Models for Location Scale and Shape) propuesta por Rigby and Stasinopoulos (2005), provee un marco para la modelización no estacionaria de series hidrometeorológicas. Dado que tendencias no lineales pueden describir mejor el comportamiento observado, en lugar de considerar una tendencia lineal de los parámetros respecto al tiempo. Será la herramienta aplicada en el presente artículo.

En el caso de cuencas del Sureste Español, como la Cuenca del Río Segura, se ha observado desde finales de los años '70, una disminución acusada en las aportaciones en cuencas de cabecera. Estas disminuciones se han atribuido a cambios en los usos del suelo, como reforestaciones que se han realizado de forma intensiva para frenar la erosión y la desertificación, así como a la variabilidad climática. Interesa conocer el impacto del cambio y variabilidad climática en la frecuencia y severidad de las rachas secas de precipitación, así como prever las tendencias plausibles a escala de cuenca hidrográfica y sus impactos en los recursos hídricos.

Distintos autores han estudiado la variabilidad de las precipitaciones en la Península Ibérica, incluso a escala estacional, intentando comprender y justificar las tendencias detectadas (Martín-Vide y Gómez, 1999; Paredes et al., 2006; Vicente-Serrano y Cuadrat-Prats, 2007). En algunos casos, han considerado la correlación de las tendencias en las precipitaciones o eventos de sequía identificados, con índices macroclimáticos como la North Atlantic Oscillation –NAO- (García-Herrera et al., 2007), incluso con los impactos en los recursos hídricos (Vicente Serrano y López Moreno, 2005; López Moreno, et al., 2007; Beguería et al., 2003; Lorenzo-Lacruz et al., 2010).

En el presente trabajo, se aborda como primer paso, el análisis de patrones espaciales de precipitación anual y estacional, así como de longitudes máximas de rachas secas para la Cuenca del Río Segura (Sureste Español), considerando condiciones no

estacionarias en el clima. El estudio se estructura en cinco partes diferenciadas. En la primera parte, se describe la cuenca de estudio y las bases de datos a utilizar. En orden a realizar una caracterización robusta de la variabilidad de la precipitación y eventos de sequía, es indispensable contar con series tan largas como sea posible. Por ello, se trabaja con mapas interpolados a escala diaria de precipitación para el período 1950-2009 (Haylock et al., 2008). Se comprueba en la segunda parte, la correcta representación del régimen pluviométrico de la Cuenca del Segura, mediante análisis del sesgo en el ciclo estacional considerando los registros pluviométricos provistos por el Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH), con datos diarios en el período 1992-2009. Luego, en la tercera parte, se presenta la herramienta GAMLSS a aplicar, para luego efectuar un análisis de las series de precipitación anual y estacional, para cada zona en que se ha subdividido la Cuenca, y para la cuenca completa. Se identifica la estación del año que controla el comportamiento de la precipitación anual, en cada zona de estudio. Ya en la última parte del trabajo, se evalúa la frecuencia e intensidad de las sequías a escala local (en sitios seleccionados), y a partir de ellos se identifican los patrones de sequía a escala regional. Finalmente, considerando las condiciones no estacionarias identificadas, se construyen mapas para distintos períodos de retorno, y horizontes temporales definidos.

2. Cuenca del estudio y bases de datos

La Cuenca del Río Segura ubicada en el Sureste Peninsular (Figura 1), con una extensión de 18870 km², presenta el porcentaje más bajo de recursos hídricos renovables de entre todas las cuencas Españolas. Con un clima semiárido y altamente regulada, la principal demanda hídrica corresponde a la agricultura con una extensión de superficie bajo riego de 269000 ha. Azotada regularmente por intensas sequias, ha sido seleccionada recientemente como Cuenca Piloto Española en el marco del Grupo Europeo de Expertos de Escasez Hídrica y Sequías, dada la buena gestión demostrada ante eventos extremos.

Con el objeto de realizar análisis regionales de las precipitaciones, se ha considerado a la Cuenca del Río Segura subdividida en seis zonas (Figura 1) de acuerdo a criterios geográficos y físicos:

- Cabecera del Segura, incluyendo la cuenca alta del Río Segura y la Cuenca del Río Taibilla;
- Cuenca del Río Mundo, muy importante como generadora de recursos;
- Cuencas del Noreste, algunas de ellas endorreicas y presentando embalses de laminación;
- Vega media incluyendo las Cuencas del Río Moratalla, Río Quípar, Río Argos y Río Mula. Estas cuencas no son muy importantes desde el punto de vista de generación de recursos, presentan amplias zonas bajo riego;

- Cuenca del Río Guadalentín, y
- Cuenca baja y costera, agrupando una serie de ramblas costeras y el Campo de Cartagena (sector sureste) vital para la economía de la Región de Murcia dado su carácter eminentemente agrícola.

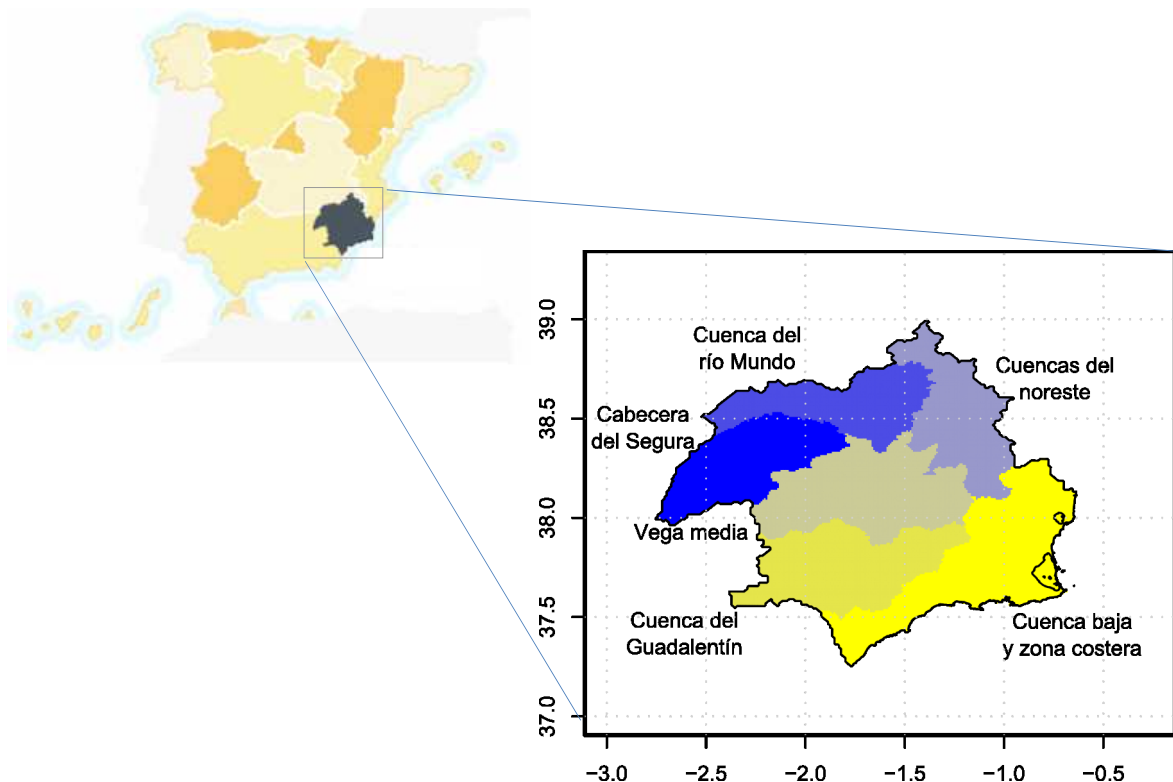


Figura1. Ubicación de la Cuenca del Río Segura en la Península Ibérica, y definición de zonas para estudios regionales.

Se dispone de series temporales de precipitaciones diarias correspondientes a 63 estaciones del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH), para el período 1992-2009 inclusive. Así como de mapas de precipitaciones diarias en el período 1950-2009, para toda Europa (Haylock et al., 2008). Esta última base de datos (de ahora en adelante denominada EUROPA), con una resolución de 25 km, ha sido generada con el objeto de validación de modelos climáticos regionales (en el presente trabajo se la denominará EUROPA).

Con el objeto de analizar la precisión de la base de datos EUROPA (Figura 2 (b)), se la ha contrastado con los correspondientes mapas interpolados a partir de datos SAIH, para el período temporal coincidente con registros.

A partir de la información SAIH, se ha construido el mapa de precipitación media anual aplicando kriging universal con semivariograma teórico circular (Figura 2 (a), resolución espacial 900 m). La metodología seguida ha sido similar a la presentada por Haylock et al. (2008), que consiste en: 1- asumir que la precipitación media anual representa la tendencia general de la precipitación al interior de la Cuenca del Río Segura; 2- estimar las anomalías diarias de precipitación en cada estación; 3- interpolar estas anomalías utilizando kriging universal, y finalmente, 4- estimar el mapa de precipitación diaria como la suma del mapa interpolado de anomalías y el mapa de tendencia general.

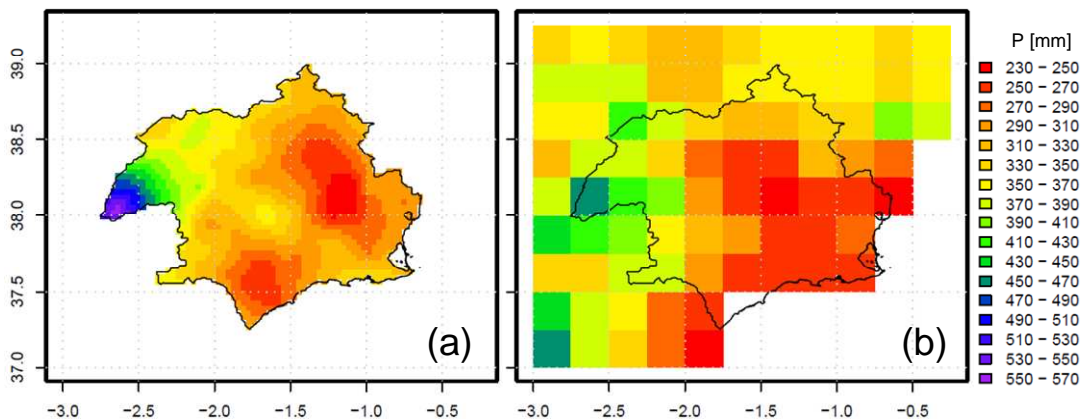


Figura 2. Precipitación media anual en la Cuenca del Río Segura para período 1992-2009: (a) Mapa interpolado a partir de las estaciones SAIH, y (b) mapa construido a partir de la base de datos EUROPA.

3. Análisis del sesgo: ciclo estacional

Los análisis estadísticos que se pretenden realizar no se pueden abordar desde los datos SAIH, dado su corto periodo temporal de registro. Por ello, se considera como primer paso el demostrar la representatividad de la base de datos EUROPE (con datos entre 1950-2009), en la zona de estudio, mediante un análisis del sesgo en el ciclo estacional.

Para cada zona se estimó el ciclo estacional de las precipitaciones en el periodo 1992-2009, tanto desde los datos SAIH como desde la base de datos EUROPE. Los resultados del análisis se presentan en la Figura 3, para ambas fuentes de datos. Se observa un ciclo estacional bimodal, con dos picos correspondientes a las estaciones de primavera y otoño. Si bien las precipitaciones en invierno son importantes. Desde Figura 3, se observa que los datos EUROPE siempre se ubican dentro de la banda de confianza (representada en gris sólido) estimada para los datos SAIH, excepto en los meses de verano donde la escasa dispersión de los datos SAIH estrecha la banda de confianza.

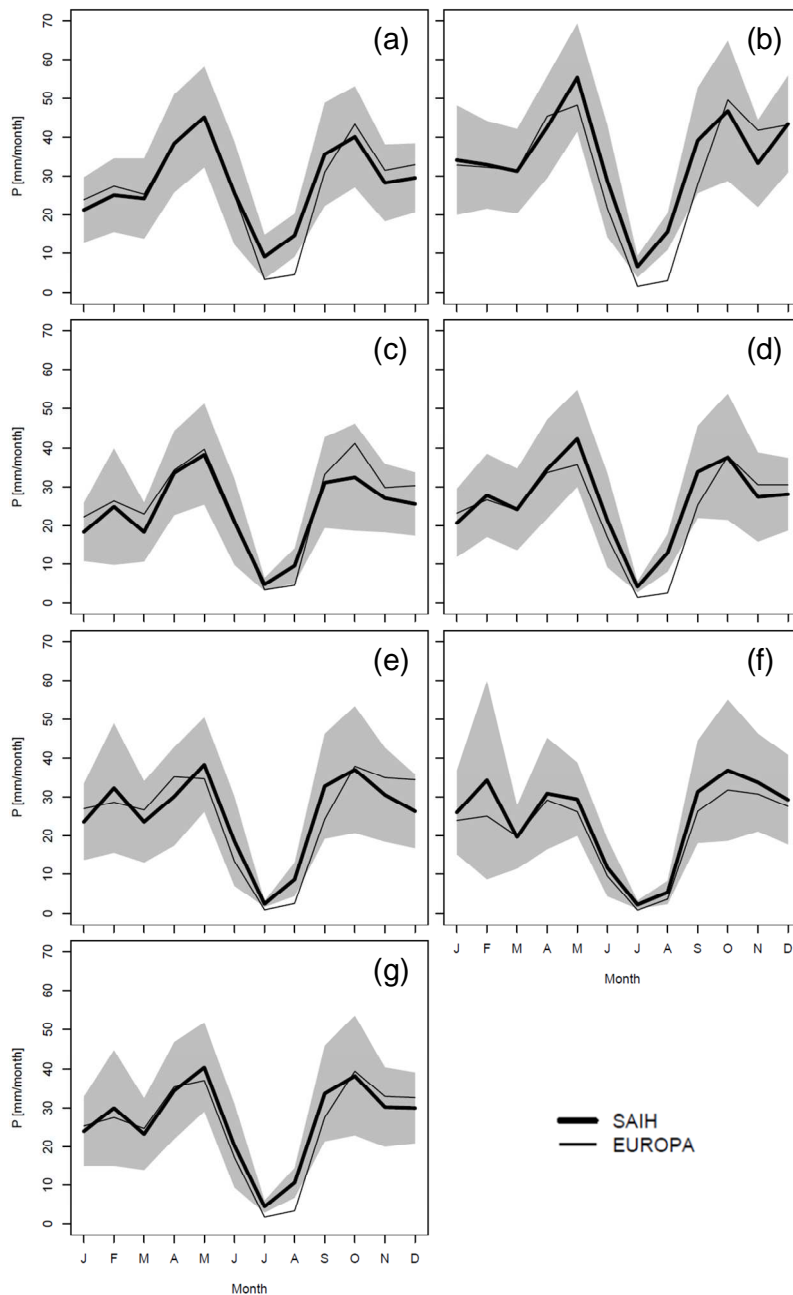


Figura 3. Ciclo estacional de precipitación en el periodo 1992-2009, desde datos SAIH y base de datos EUROPA: (a) Cabecera del Río Segura, (b) Cuenca del Río Mundo, (c) Cuencas del Noreste, (d) Cuencas de la Vega Media, (e) Cuenca del Río Guadalentín, (f) Cuenca baja y zona costera, y (g) Cuenca del Río Segura completa. El área gris representa el intervalo de confianza del 95% calculado desde datos SAIH.

4. Análisis de precipitaciones anuales y estacionales

Se ha efectuado un análisis de las series de precipitación estacionales para cada zona en que se ha subdividido la Cuenca, aplicando la herramienta GAMLSS (Generalized

Additive Models in Location, Scale and Shape), para el período temporal 1950-2009 a la base de datos EUROPE. La herramienta GAMLSS consiste en modelos de regresión semiparamétricos, que permiten relacionar los parámetros de una probability density function (pdf) como función de una variable explicativa a través de técnicas de suavizado no paramétricas (Stasinopoulos and Rigby, 2007). En el presente trabajo cuatro pdf de dos parámetros se han considerado, en el marco de la aplicación de GAMLSS: Gumbel (GU), Gamma (GA), Lognormal (LN) y Weibull (WEI).

En cada Figura con el objeto de facilitar la comprensión de los resultados, se representan los cuantiles entre el 5 % y 95% (líneas discontinuas), el comportamiento de la mediana ajustada (línea continua correspondiente al cuantil 50 %), y las distribuciones paramétricas ajustadas (pdf) de dos parámetros. Se observa que la gran mayoría de los puntos se encuentran entre los cuantiles 5 % y 95 %, y los modelos seleccionados por tanto son capaces de capturar la variabilidad exhibida por los datos.

Dado el carácter histórico bimodal de las precipitaciones, con máximos en primavera y otoño, se observa que por regla general los períodos que más aportan a la precipitación anual corresponden a estas estaciones (con una mayor componente primaveral). Si bien, en algunas zonas (zonas de cabecera), las precipitaciones invernales cobran especial relevancia.

Analizando las precipitaciones estacionales, se observa de forma general un decrecimiento en las precipitaciones invernales a partir de la década de los '80, exceptuando a las Cuencas del Noreste, Vega Media y Cuenca Baja (incluyendo zonas costeras). Las precipitaciones primaverales denotan una leve tendencia alcista en todo el período, para prácticamente todas las zonas. En el caso de las precipitaciones otoñales, las tendencias son alcistas hasta la década de los '80 y prácticamente sin cambios significativos desde entonces o levemente decrecientes en algunos casos (Cuenca del Río Mundo).

En el caso de la precipitación anual, la tendencia detectada no es significativa a partir de la década de los '80. Sólo destacar la tendencia claramente decreciente en la Cuenca del Río Mundo, y en menor medida en la Cuenca Cabecera del Río Segura y Cuenca del Guadalentín. Las tendencias decrecientes en cualquier caso, se suelen justificar las disminuciones de las precipitaciones invernales y en menor proporción otoñales.

4.1. Cuencas de cabecera

Los resultados del análisis de las series de precipitaciones estacionales y anuales, para zona Cabecera del Río Segura y del Río Mundo, arrojan resultados similares. La Figura 4 representa los resultados para la Cuenca del Río Mundo, se observa que el período que más aporta a la precipitación anual corresponde a primavera, seguida por el otoño. No obstante, en la década de los '60 la proporción de la precipitación invernal fue relevante. De forma general, se observan suaves tendencias crecientes en las precipitaciones de primavera para todo el período, y descendentes en las precipitaciones invernales, y

prácticamente no significativas en otoño desde la década de los '80, que controlan el comportamiento de la serie de precipitación anual. La tendencia de la serie anual de precipitaciones muestra un comportamiento creciente hasta la década de los '80 y sin cambios significativos desde entonces.

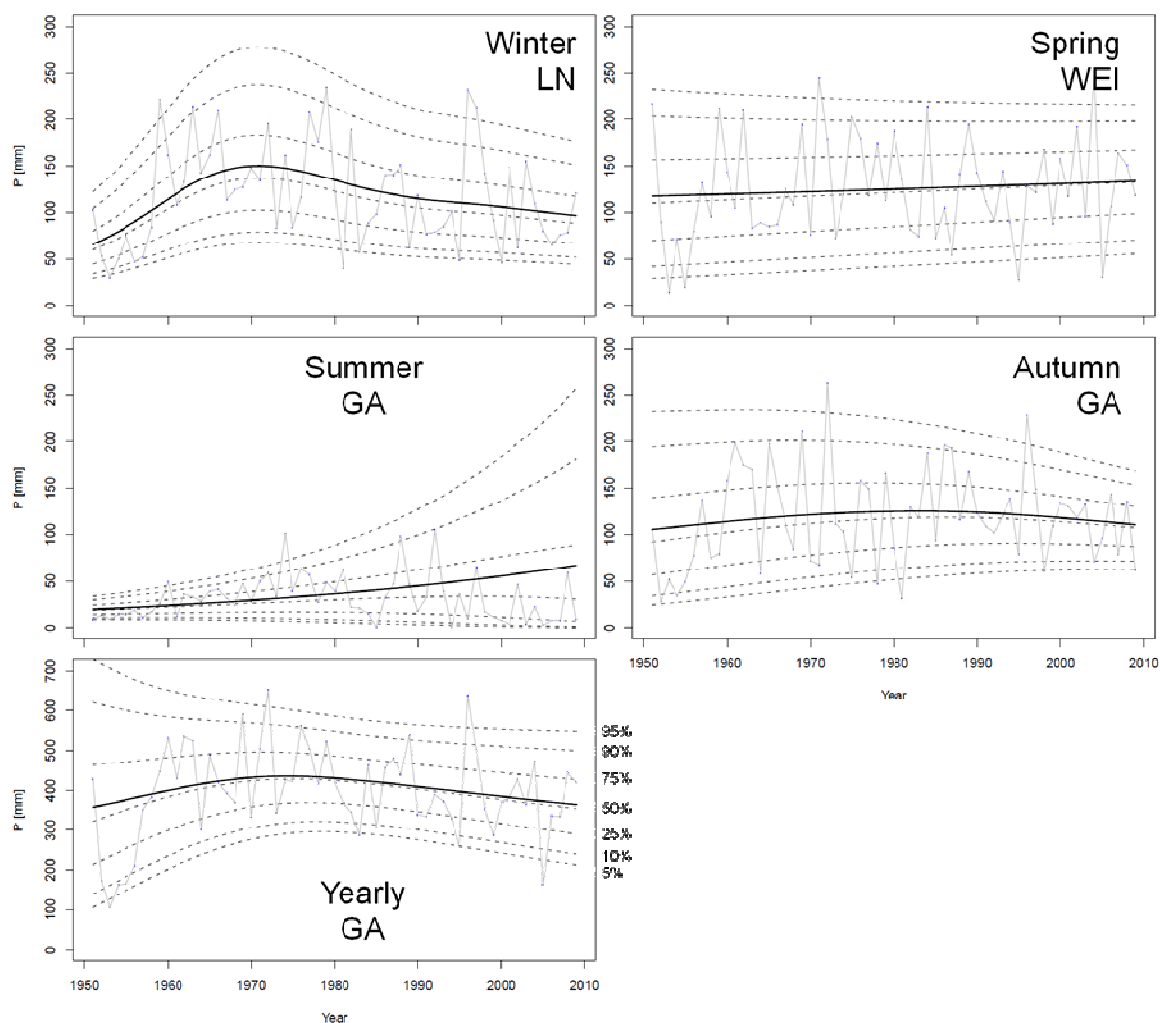


Figura 4. Análisis GAMLSS de precipitaciones estacionales y anuales en la zona Cabecera del Río Mundo. Las líneas punteadas representan los cuantiles entre el 5-95%, y la línea continua es el comportamiento de la media ajustada

4.2. Cuenca baja y zona costera

En el caso de la zona correspondiente a la cuenca baja y costera, el aporte más importante a la precipitación proviene de la estación otoñal, que presenta una gran variabilidad (Figura 5). Mientras, las precipitaciones invernales y primaverales presentan un comportamiento similar. La tendencia de la precipitación anual es levemente creciente para todo el período temporal analizado (1950-2009), no obstante en el periodo 1950-1979 la tasa de crecimiento fue diez veces mayor que en el periodo 1980-2009.

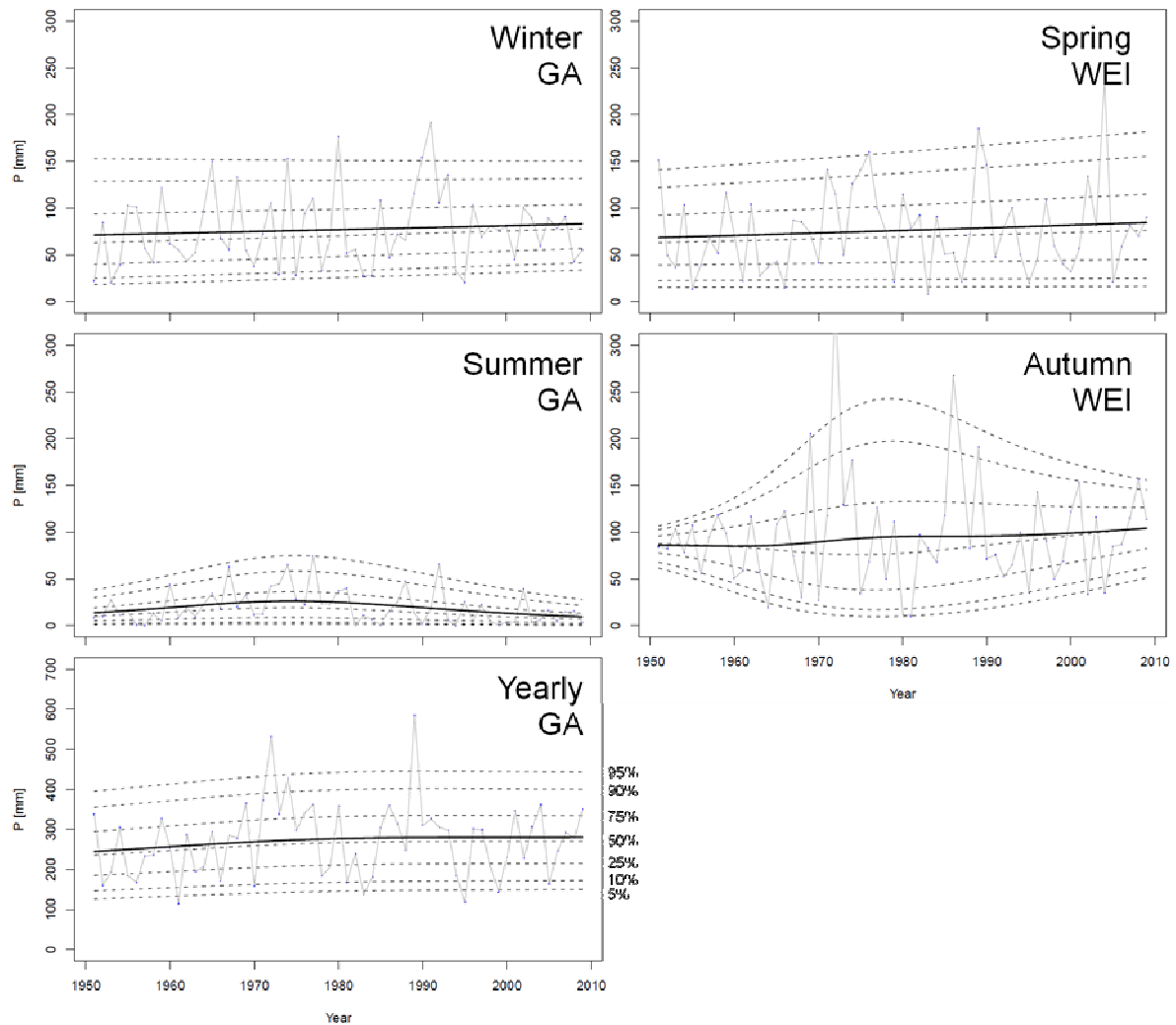


Figura 5. Igual que en Figura 4, pero para la zona Cuenca baja y Costera.

5. Análisis de Longitud de las Rachas Secas

5.1. Aplicación de GAMLSS a las series de AMDSL

Se considera racha seca al número consecutivo de días con precipitaciones por debajo de un umbral definido. El análisis de rachas secas de precipitación se ha basado en la información provista por la base de datos EUROPA, dada la amplitud temporal de sus registros (entre 1950-2009). Los análisis se han llevado a cabo en sitios seleccionados (81) en la Cuenca y zonas de recubrimiento, considerando todos los datos provistos por EUROPA y su resolución espacial (25 km).

Considerando dos umbrales de precipitación (1 mm/día y 10 mm/día), se han identificado las series temporales de longitudes de rachas secas (denominadas *Dry Spell Length* -

DSL-) para todos los sitios seleccionados. Luego se han construido las series temporales de longitudes de rachas secas máximas anuales (denominadas *Annual Maximum Dry Spell Length* -AMDSL-), considerando en cada año la serie más larga. Las rachas secas se localizan temporalmente utilizando su fecha de inicio, así por ejemplo una racha que comienza el 30 de diciembre del año i y presenta una duración de 5 días (hasta el 3 de enero del año $i+1$), se considera como una racha del año i .

En cada sitio se ha efectuado el análisis de la serie temporal de AMDSL con GAMLSS. Un ejemplo del análisis para la serie de AMDSL en la Cabecera del Río Segura (sitio 45) se presenta en Figura 6 considerando el umbral de 10 mm/día (distribución LN). En la parte superior de la Figura 6, se presenta la evolución temporal de la pdf mejor ajustada, considerando los cuantiles 5 % al 95 %. Mientras en su parte inferior, las curvas de evolución temporal de los estadísticos media y desviación estándar de la distribución ajustada. Una clara inflexión en las series temporales se observa a finales de la década de los '70. La severidad de las rachas secas se incrementa de forma clara, a partir del mínimo correspondiente a los años húmedos de mediados hasta final de la década de los '70.

El análisis realizado en este sitio (45) en particular, representa la tendencia general observada en las series de máximas longitudes de sequía en amplias extensiones de la Cuenca del Segura (particularmente en las cuencas de cabecera). Desde la Figura 6, se observa que la década de los 50's fue extremadamente seca. De hecho, distintos autores reportaron la severidad de este evento de sequía en distintas zonas. Estrela et al. (2000) analizó este suceso en la provincia de Alicante (episodio entre 1952-1955), mientras López Bustos (1958) hizo lo propio en la provincia de Ciudad Real (evento entre el verano de 1952 y comienzos de 1955). Luego, se observan décadas más húmedas hasta finales de los años 70's. A partir de esos años, las tendencias crecientes de las rachas secas hasta la actualidad son claras, con indicios de alcanzar los niveles de los años '50 si se extrapolan las series. Desde Figura 6, la siguiente racha más larga en severidad considerando umbral de 10 mm/día, fue la registrada en el año 2004.

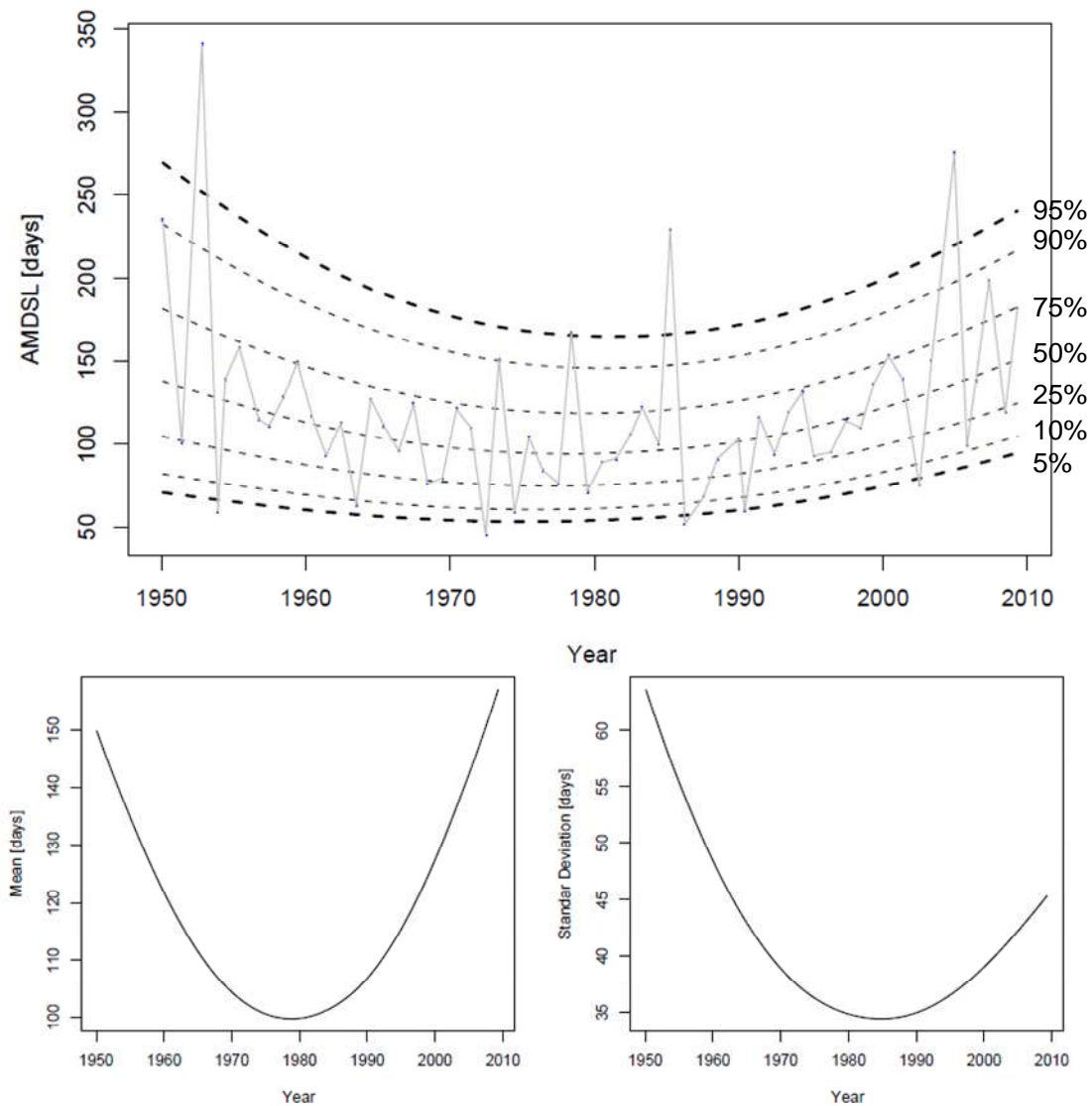


Figura 6. Mejor ajuste GAMLSS para la serie de AMDSL, umbral de precipitación 10 mm/d, en la cabecera del Río Segura (sitio 45). Se presenta en la parte superior la evolución de la pdf ajustada (distribución LN), y en la parte inferior las curvas de evolución temporal para los estadísticos media y desviación estándar.

5.2. Mapas de AMDSL asociados a períodos de retorno

Ajustadas las pdf a cada serie de AMDSL, es posible construir mapas de máximas longitudes de rachas secas asociadas con un determinado periodo de retorno Tr , para algún año particular seleccionado u horizonte temporal. El periodo de retorno Tr corresponde al inverso de la probabilidad de excedencia $P[X>x]$ en la forma $P[X>x]=1/Tr$. Estas distribuciones espaciales constituyen mapas de riesgo que permiten identificar los cambios temporales en la probabilidad de ocurrencia de las AMDSL desde un punto de

vista regional, o dicho de otro modo identificar los patrones espaciales de sequía no estacionarios.

El procedimiento seguido en la construcción de los mapas de longitudes máximas de rachas secas, asociados a distintos períodos de retorno, es el siguiente: 1- se selecciona el año y la probabilidad de excedencia de interés; 2- desde la pdf ajustada para cada sitio se estima el valor de la longitud de racha seca asociada al año y probabilidad seleccionada, y 3- finalmente, estos valores se interpolan (utilizando kriging universal en este caso), para la resolución espacial base. A modo de ejemplo, se presenta en Figura 7 los mapas construidos de esta forma, para rachas secas umbral 10 mm/día, y período de retorno 10 años.

Desde el análisis de los mapas de isolíneas de AMDSL (Figura 7), se observa que existe una gran variabilidad espacial y temporal. Si se considera por ejemplo, el umbral de precipitación 10 mm/día y el mismo período de retorno ($Tr= 10$ años), y se contrastan los mapas correspondientes a los horizontes temporales 1990, 2000, y 2009, se observa una reducción de la longitud de las rachas secas en las zonas costeras y Vega Baja de la Cuenca (incluyendo el Campo de Cartagena). Pero por el contrario, una intensificación en el resto de la cuenca, particularmente en zonas de cabecera. Los mapas de 1950 y 1960 presentan estimaciones de AMDSL largas, debido a su relación con el periodo seco observado entre 1952-1955 reportado en la literatura. Luego, los mapas de 1970, 1980 y 1990 representan rachas secas más cortas dentro del periodo de análisis. Los mapas de 1970 y 1980, presentan claramente un gradiente Norte-Sur que se intensifica al aumentar el período de retorno (not shown). Finalmente, los mapas para el año 2000 y 2009 revelan una tendencia creciente de las AMDSL (mayor longitud y severidad de eventos de sequía), con una intensificación en cuencas de cabecera. En general, se observa un traslado hacia el norte de las isolíneas de máximas longitudes de rachas secas, presentándose sequías cada vez más largas.

Debe destacarse que si bien, las sequías tienden a ser más largas en la mayor parte del territorio, se debe destacar que este comportamiento no es el observado en las zonas costeras. Se considera necesario y pertinente, realizar un estudio del impacto del cambio climático y en la frecuencia y severidad de precipitaciones extremas, en estas zonas.

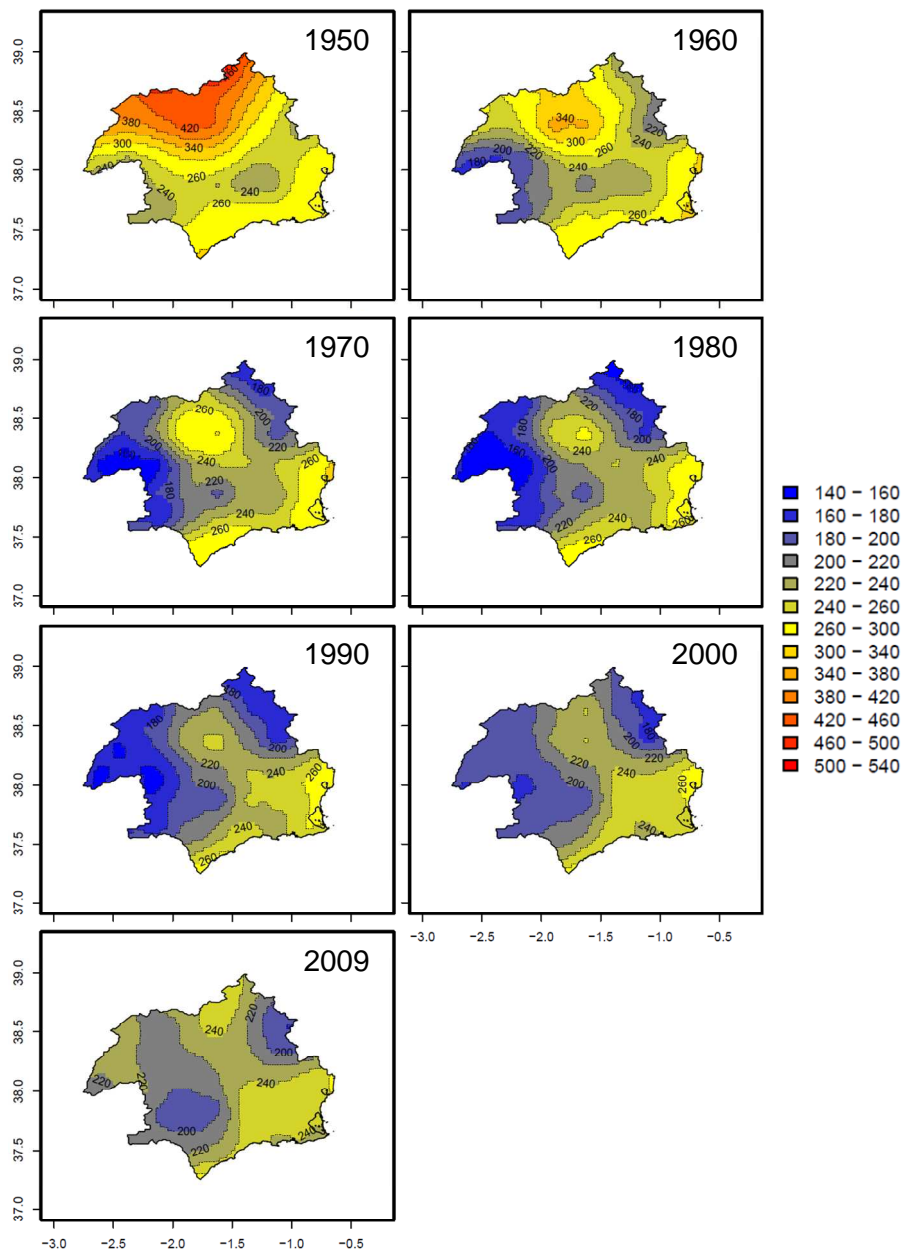


Figura 7. Distribuciones espaciales de AMDSL asociadas a $Tr = 10$ años y umbral de precipitación 10 mm/día.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este estudio describe la variabilidad y discontinuidades detectadas en los patrones espaciales de precipitaciones y eventos de sequía en la Cuenca del Segura, mediante una modelización no estacionaria. En esta Cuenca, una de las más secas de Europa, donde la actividad agrícola es fundamental para su desarrollo socio-económico, el estudio de la distribución espacial y recurrencia de sequías, cobra especial relevancia.

Para la Cuenca del Río Segura en su conjunto, se concluye que la tendencia decreciente detectada a finales de los años '70 en las precipitaciones anuales están controladas fundamentalmente por el comportamiento de las series pluviométricas registradas en invierno. Las precipitaciones invernales han demostrado una evolución decreciente desde finales de la década de los '70, principalmente la zona de cabecera de la cuenca (Cuenca de cabecera del Río Segura, Cuenca del Río Mundo y Cuenca del Guadalentín). El suave incremento observado, como media en la cuenca, para el resto de precipitaciones estacionales (primavera, verano y otoño), solo ha permitido suavizar la tendencia bajista de la precipitación anual media areal para toda la Cuenca.

No obstante las suaves tendencias decrecientes de las precipitaciones anuales, se ha observado una intensificación del ciclo hidrológico a través del aumento en longitud y severidad de las rachas secas de precipitación, fundamentalmente en cuencas de cabecera. Se concluye por tanto que, en concordancia con la opinión de Katz and Brown (1992), los eventos extremos son más sensibles a cambios en la variabilidad más que a cambios en los valores medios.

El análisis GAMLSS arroja resultados desesperanzadores en cuanto a la evolución de los eventos de sequía en la mayor parte de la Cuenca del Río Segura, y en especial en las cuencas de cabecera proveedoras de recursos. De hecho, la tendencia detectada parece indicar que se progresa hacia las condiciones observadas en los años '50. Desde los mapas de AMDSL asociadas a distintos períodos de retorno, construidos a partir del análisis GAMLSS, se puede apreciar el patrón espacial de las longitudes máximas de rachas secas bajo condiciones no estacionarias. Considerando comparativamente los horizontes temporales 1990, 2000 y 2009, y umbral de precipitación 10 mm/día por ejemplo, se observa un claro desplazamiento de las isóneas de los valores de AMDSL hacia el norte. Alcanzándose sequías más severas (más largas) en las zonas de cabecera de la cuenca (cuenca alta del Río Segura y cuenca del Río Mundo), y sin embargo disminución de AMDSL en zonas costeras.

Un incremento significativo en severidad de sequías en otras zonas de la Península Ibérica, ha sido reportado por distintos autores. A modo de ejemplo, los estudios realizados en la Cuenca del Ebro (Vicente Serrano y Cuadrat-Platz, 2007); y en los Pirineos (Vicente Serrano et al., 2007).

La intensificación de los eventos de sequía, evidentemente impacta en las distintas componentes del ciclo hidrológico, repercutiendo negativamente en las series hidrológicas. Desde los años '80 se observan disminuciones en las aportaciones en las cuencas de cabecera del Río Segura, tanto en las aportaciones a los Embalses de Fuensanta y Talave, como en la serie de aporte al Embalse del Taibilla. Sin embargo, esta disminución no se justifica claramente en la correlación con las precipitaciones anuales. La propagación de los eventos de sequía a través del ciclo hidrológico en cuencas de cabecera, no tiene porque ser lineal, incluso puede magnificarse. En todo caso, las rachas secas de precipitación se propagan a través del sistema hidrológico

causando sequía en los distintos componentes del ciclo hidrológico (zona no saturada, escorrentía superficial y escorrentía subterránea), como bien destacan Peters et al. (2006). La disminución de la precipitación, genera bajo contenido de humedad del suelo, y por tanto menos recarga a los acuíferos y a su vez menos flujo base, entre otros impactos. Estos hechos, sumados a cambios de usos del suelo (reforestación) que causan un aumento de las demandas hídricas, generan impactos no lineales en las aportaciones.

En base a los resultados que arroja el presente estudio, se esperan disminuciones más acusadas en las precipitaciones con el consiguiente impacto en las reservas hídricas en cuencas de cabecera del Río Segura. El mantenimiento de aportes externos como el Traslase Tajo-Segura, e incluso el aumento en la generación de recursos (como los provenientes de desalación), y mejor gestión de los mismos adoptando técnicas más eficientes del uso del agua en el sector más demandante como es la agricultura (técnicas de recuperación de sobrantes de riegos, riego deficitario, entre otros), se perfilan como opciones vitales en cuencas deficitarias del Sureste Peninsular.

7. Agradecimientos

El presente trabajo se ha desarrollado en el marco del Convenio entre la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) y la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS, Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino), denominado “Desarrollo de Indicadores de escasez hídrica y sequías: Apoyo al Mandato *Water Scarcity and Droughts*”, y del Proyecto de I+D CGL2008-02530/BTE, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (España). Se agradece la financiación y soporte recibido.

8. Referencias

- Beguiría, S., López-Moreno, J.I., Lorente, A., Seeger, M., García-Ruiz, J.M., 2003. Assessing the effect of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees. *Ambio*, 32 (4): 283-286.
- Estrela, M. J., Peñarrocha, D. and Millán, M., 2000. Multi-annual drought episodes in the Mediterranean (Valencia region) from 1950-1996. A spatio-temporal analysis. *Int. J. Climatol.*, 20, 1599-1618.
- García-Herrera, R., Paredes, D., Trigo, R.M., Franco Trigo, I., Hernández, E., Barriopedro, D., Mendes, M.A., 2007. The outstanding 2004/05 drought in the Iberian Peninsula: Associated Atmospheric Circulation. *J. Hydrometeorol.*, 8: 483-498.
- Haylock, M. R., Hofstra, N., Klein Tank, A. M. G., Klok, E. J., Jones, P. D. and New, M., 2008. A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950-2006. *J. Geophys. Res.*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD010201.
- Katz, R.W., Brown, B.G., 1992. Extreme events in a changing climate. Variability is more important than averages. *Climatic Change*, 21: 289-302.
- Milly, P.C.D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R.M., Kundzewicz, Z.W., Lettenmaier, D.P., Stouffer, R.J., 2008. Stationarity is dead: Whiter water management? *Science*, 319: 573-574.

- Martín-Vide, J., Gómez, L., 1999. Regionalization of Peninsular Spain based on the length of dry spells. *Int. J. Climatol.*, 19: 537-555.
- López Bustos, C., 1958. Contribución al estudio del régimen de precipitaciones de Ciudad Real y su Provincia. Cuaderno de Estudios Manchegos, Publicaciones del Instituto de Estudios Manchegos, No 9, ISSN 0526-2623.
- López-Moreno, J.I., Beguería, S., Vicente-Serrano, S.M., García Ruíz, J.M., 2007. Influence of the North Atlantic Oscillation on water resources in central Iberia: Precipitation, streamflow anomalies, and reservoir management strategies. *Water Resources Research*, 43, doi: 10.1029/2007WR005864.
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Beguería, S., García-Ruiz, J.M., 2010. The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain), *J. Hydrol.*, 386: 13-26.
- Paredes, D., Trigo, R.M., García-Herrera, R., Franco Trigo, I., 2006. Understanding Precipitation Changes in Iberia in Early Spring: Weather Typing and Storm-Tracking Approaches. *J. Hydrometeorol.*, 7, 101-113.
- Peters, E., Bier, G., van Lanen, H. A. J., y Toros, P. J. J. F., 2006. Propagation and spatial distribution of drought in a groundwater catchment. *J. Hydrol.*, 321: 257-275.
- Rigby, R.A., Stasinopoulos DM., 2005. Generalized additive models for location, scale and shape. *Appl. Stat.*, 54:507-54.
- Salas, J.D., 1992. Analysis and modeling of hydrologic time series. In: *Handbook of Hydrology*, ed. by Maidment, D.R., New York, Mc Graw Hill, 19.1-19.72.
- Stasinopoulos, D.M., A., R., and Rigby, R.A. (2007), Generalized Additive Models for Location Scale and Shape (GAMLSS) in R, *Journal of Statistical Software*, 23, 1-46.
- 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*, 9: 523-533.
- Vicente-Serrano, S.M., Cuadrats-Prats, 2007. Trends in drought intensity and variability in the middle Ebro valley (NE of the Iberian península) during the second half of the twentieth century. *Theor. Appl. Climatol.*, 88: 247-258.
- Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Beguería, S., 2007. La precipitación en el Pirineo Español: Diversidad espacial en las tendencias y escenarios futuros. *Pirineos*, 162: 43-69.
- Villarini, G., Smith, J. A. and Napolitano, F., 2010. Nonstationary modelling of a long record of rainfall and temperature over Rome. *Advances in Water Resources*, doi:10.1016/j.advwatres.2010.03.013.