

Resumen

En la última década, un tema que se ha colocado a la vanguardia en la Hidrología es la necesidad de no continuar asumiendo la hipótesis de estacionaridad en el estudio de las componentes del Ciclo Hidrológico. Esto ante las evidencias en la intensificación de las actividades humanas, los forzamientos de la variabilidad climática natural y el cambio climático. De hecho en la comunidad científica existe un consenso en cuanto a que la hipótesis de estacionaridad en el Ciclo Hidrológico se encuentra comprometida. Así, ante el colapso de esta hipótesis que ha sido la piedra angular en el análisis de frecuencia de crecidas, diversos investigadores se han pronunciado en el sentido de la apremiante necesidad de proponer ideas y métodos alternativos adecuados para enfrentar la tarea del diseño hidrológico en un contexto de cambios de origen climático y antropogénico. Es por ello ante el cambio de paradigma de no continuar asumiendo un mundo estacionario que este trabajo tiene como objetivo el tratar de contribuir al estudio del análisis de frecuencia de crecidas bajo condiciones de no estacionaridad. Para ello, hemos hecho intervenir los efectos de variabilidad climática y de cambios inducidos por el hombre a través de los embalses. Nuestro interés de aplicación se enfoca particularmente en los regímenes de crecidas en ríos de la España peninsular.

El estudio comienza con una revisión bibliográfica de dos temas: la influencia de los fenómenos de macroescala en las variables hidrológicas y el estado actual del análisis de frecuencia de crecidas. Posteriormente, se presenta la descripción de la zona de estudio y un análisis exploratorio de la información, donde se identifican los tipos de regímenes de crecidas dominantes en las estaciones de aforo de estudio y se introduce un índice de embalse propuesto para identificar el impacto de los embalses en aquellos sitios bajo régimen alterado. El análisis mostró el importante peso que ejercen las precipitaciones invernales en los regímenes de crecidas en un importante porcentaje de las estaciones de aforo, permitiéndonos vislumbrar el potencial de los patrones de variabilidad de baja frecuencia (los cuales están asociados a estas precipitaciones) como covariables en la modelación estadística de las crecidas.

En la segunda parte de esta tesis, se comprueba la hipótesis de estacionaridad en los regímenes de crecidas a diferentes escalas de tiempo a través de diversos test estadísticos. Se observó que las series temporales de crecidas presentan importantes desviaciones del supuesto de estacionaridad. Así mismo, en este análisis se identificó el importante papel que los patrones de variabilidad de baja frecuencia y los embalses juegan en explicar los cambios observados en los momentos estadísticos de las series de crecidas (media y varianza).

En la tercera parte, se estudia la teleconexión entre el régimen de crecidas y los patrones de variabilidad de baja frecuencia desde dos enfoques: análisis de correlación y análisis wavelet. Los resultados obtenidos mostraron que la variabilidad interanual de los regímenes de crecidas en la España peninsular está fuertemente influenciada por los patrones de baja frecuencia de la AO, la NAO y la MO, mientras que una menor influencia es la que se identificó con la WeMO la cual se identificó fundamentalmente con estaciones de aforo en la cabecera de la confederación del Ebro y la región Norte. En el ámbito de las frecuencias se pudo corroborar también que las variaciones climáticas

modulan de manera significativa la evolución de las fluctuaciones en los regímenes de crecidas, siendo en periodos interanuales en los cuales se distingue que las series covarían en la misma frecuencia en el tiempo. Lo anterior demostró que la intensidad de las fluctuaciones en los regímenes de crecidas puede explicarse por los cambios en los patrones de variabilidad. En cuanto a la extensión espacial en la influencia de los patrones de baja frecuencia, fue evidente que la sensibilidad en la respuesta de los ríos presentó una alta variabilidad en el espacio, lo cual es reflejo de la compleja orográfica y las características morfológicas de cada cuenca. Se observó también que el efecto perturbador de los embalses dificulta el poder establecer una relación entre el clima y las crecidas, como se pudo observar en aquellos sitios que experimentan un alto grado de regulación. En general la mayor influencia de los patrones de baja frecuencia en los regímenes de crecidas se identificó en las regiones Central y Norte, disminuyendo está hacia la región Mediterránea. En lo que respecta a la evaluación de la influencia del fenómeno ENSO en los regímenes de crecidas en la España peninsular, nuestros resultados no permiten establecer una influencia significativa, no obstante, se puede identificar que la influencia estaría vinculada a la intensidad de los eventos.

La modelación del régimen de crecidas bajo condiciones de no estacionaridad fue abordada a partir de las series temporales de caudales máximos medios diarios anuales y de caudales máximos medios diarios por encima de un umbral en 20 casos de estudio. Los modelos implementados fueron básicamente de dos tipos: modelos con incorporación de tendencias temporales y modelos con incorporación de covariables externas (en nuestro caso los índices de las variables macroclimáticas y el índice de embalse). La implementación de los modelos con incorporación de tendencias temporales en la modelación de las crecidas anuales, exhibieron la clara presencia de no estacionaridad en los regímenes de crecidas en la España peninsular. Por otro lado, en la modelación de los eventos de crecida por encima de un umbral se observó que la tasa de ocurrencia de los eventos constituye un proceso no homogéneo de Poisson, mostrando que la tasa de ocurrencia presenta una fuerte dependencia del tiempo. Las aproximaciones de modelos no estacionarios con la incorporación de forzamientos externos como covariables explicativas, revelaron la factibilidad de los índices de las variables macroclimáticas y el índice de embalse en la adecuada caracterización de las no estacionaridades en la modelación de los regímenes de las crecidas anuales, así como de la tasa de ocurrencia de las crecidas por encima de un umbral. Además resultó evidente la mejora en la descripción más adecuada de la variabilidad interanual del régimen de crecidas incorporando covariables externas, respecto de los resultados con la incorporación de tendencias temporales. Un punto a destacar es el empleo de los cubic splines que nos permitieron modelar las no linealidades en la dependencia de los parámetros respecto de las covariables, sin embargo, es importante notar que al incorporar dependencia suavizada los modelos tendieron a sobreparametrizarse, además de ser más sensibles a los cambios.

Los resultados del análisis de frecuencias con los modelos bajo condiciones no estacionarias, mostraron que las crecidas máximas anuales para una probabilidad de excedencia de 0.01 (correspondiente al cuantil para el periodo de retorno de 100 años bajo condiciones estacionarias), las variaciones que se obtienen son dramáticas, presentándose amplios periodos en que los valores del cuantil de crecida son superiores a los estimados bajo condiciones estacionarias. Estos resultados en la práctica hidrológica tienen efectos

de gran calado, ya que ponen en evidencia que las simplificaciones que hemos estado asumiendo en el estudio de la frecuencia de crecidas nos pueden llevar a asumir un riesgo mayor del establecido en el diseño de obras hidráulicas. Lo cual sin duda nos lleva a plantear la necesidad de emplear más arduamente modelos alternativos al análisis de frecuencias clásico, que nos permitan asumir la dinámica de la naturaleza. Finalmente, es importante mencionar que el asumir la modelación no estacionaria supondrá una redefinición de los conceptos de periodo de retorno y riesgo, que en modelación estacionaria tienen sentido, pero que en modelación no estacionaria, donde la probabilidad cambia año a año, pierden sentido.

Palabras clave: análisis de frecuencia de crecidas / España peninsular / estacionaridad / patrones de variabilidad climática de baja frecuencia / índice de embalse / GAMLSS.