

Caracterización del comportamiento estadístico de los caudales máximos estacionales en la España peninsular. Propuesta metodológica para su cálculo

Statistical behaviour characterization of seasonal peak flows in peninsular Spain. A methodological approach for their calculation

Antonio Jiménez Álvarez^{1*} y Luis Mediero Orduña²

Palabras clave

seguridad hidrológica de presas;
capacidad de desagüe;
caudales de diseño;
avenidas estacionales;
máximos sobre un umbral;
series parciales;
resguardos estacionales;
periodo de retorno estacional;

Sumario

La adopción de nuevos estándares de seguridad hidrológica para las presas puede requerir la revisión y adaptación de los órganos de desagüe de las presas existentes, lo que conllevaría realizar un gran número de estudios que deberían realizarse en base a criterios y metodologías claros y homogéneos. El CEDEX viene trabajando en los últimos años para la Dirección General del Agua (DGA) con el objeto de llevar a cabo el contraste y desarrollo de metodologías que permitan proporcionar recomendaciones para el cálculo de las avenidas de proyecto y extrema empleadas en el cálculo de la seguridad hidrológica de las presas. En esta colección de tres artículos se presentan algunos de los principales resultados obtenidos en el mencionado trabajo. El presente artículo, correspondiente al tercero de la serie, aborda el tema del cálculo de las avenidas estacionales, cuestión fundamental a la hora de establecer la explotación de la presa, y que puede serlo también para estudiar la seguridad hidrológica de presas existentes. Sin embargo, el cálculo de estas avenidas es complejo y no está del todo claro hoy en día, y los procedimientos de cálculo habitualmente utilizados pueden presentar ciertos problemas. El cálculo en base al método estadístico de series parciales, o de máximos sobre un umbral, puede ser una alternativa válida que permite resolver esos problemas en aquellos casos en que la generación de las avenidas en las distintas estaciones se deba a un mismo tipo de evento. Se ha realizado un estudio con objeto de verificar si es adecuada en España la hipótesis de homogeneidad estadística de los datos de caudal de avenida correspondientes a distintas estaciones del año. Asimismo, se han identificado los periodos estacionales para los que es más apropiado realizar el estudio, cuestión de gran relevancia para garantizar que los resultados sean correctos, y se ha desarrollado un procedimiento sencillo para determinar el umbral de selección de los datos de tal manera que se garantice su independencia, una de las principales dificultades en la aplicación práctica de la técnica de las series parciales. Por otra parte, la aplicación práctica de las leyes de frecuencia estacionales requiere interpretar correctamente el concepto de periodo de retorno para el caso estacional. Se propone un criterio para determinar los periodos de retorno estacionales de forma coherente con el periodo de retorno anual y con una distribución adecuada de la probabilidad entre las distintas estaciones. Por último, se expone un procedimiento para el cálculo de los caudales estacionales, ilustrándolo mediante su aplicación a un caso de ejemplo.

Keywords

dam hydrologic security;
flow discharge capacity;
design peak flows;
seasonal floods;
peak over threshold;
partial duration series;
seasonal freeboard;
seasonal return period;

Abstract

New standards adoption on reservoir hydrologic security may involve review and accommodation of outflow structures for existing reservoirs which requires the development of a great number of studies that should be based on precise and homogeneous criteria and methodology. CEDEX has been working for DGA for the last few years with the aim of compare and develop a methodology in order to provide guidelines for project and extreme flow estimation for dam hydrologic security. The main results obtained are presented on a collection of three papers. This third paper is focused on the calculation of seasonal floods which are essential when determining the reservoir operation and which can be also fundamental in terms of analysing the hydrologic security of existing reservoirs. However, seasonal flood calculation is complex and nowadays it is not totally clear. Calculation procedures commonly used may present certain problems. Statistical partial series, or peak flow over threshold method, can be an alternative approach for their calculation that allow to solve problems encountered when the same type of event is responsible of floods in different seasons. A study has been developed to verify the hypothesis of statistical homogeneity of peak flows for different seasons in Spain. Appropriate seasonal periods have been identified which is highly relevant to guarantee correct results. A simple procedure has been defined to determine data selection threshold on a way that ensures its independency which is one of the main difficulties in practical application of partial series. Moreover, practical application of seasonal frequency laws requires a correct interpretation of the concept of seasonal return period. A standard is proposed in order to determine seasonal return periods coherently with the annual return period and with an adequate seasonal probability distribution. Finally a methodology is proposed to calculate seasonal peak flows. A study case illustrates the application of the proposed methodology.

1. INTRODUCCIÓN

La adopción de nuevos estándares de seguridad hidrológica para las presas, como respuesta a la creciente demanda de seguridad por parte de la sociedad, requerirá la revisión y adaptación de los órganos de desagüe del parque de presas existente, lo que puede suponer, en muchos casos, la realización de un gran número de estudios y actuaciones complejas y de coste muy elevado. Parece aconsejable que un proceso tan complejo y ambicioso esté basado en criterios y metodologías claros que permitan llevar a cabo el trabajo de forma homogénea en todo el país, lo que podría requerir la redacción de guías técnicas, sobre aquellos aspectos técnicos más complejos y controvertidos, que faciliten su aplicación.

De esta forma, el CEDEX viene trabajando en los últimos años para la Dirección General del Agua (DGA) en el marco de distintos convenios de colaboración y encomiendas de gestión, con el objeto de llevar a cabo el contraste y desarrollo de metodologías que permitan proporcionar recomendaciones para el cálculo de las avenidas de proyecto y extrema, y que puedan servir de base para garantizar una cierta homogeneidad en las metodologías empleadas en los diferentes estudios sobre seguridad hidrológica de presas.

Como resultado del trabajo, a finales del año 2009 se avanzaron a la DGA una serie de recomendaciones metodológicas para la realización de los estudios hidrológicos sobre las avenidas de proyecto y extrema de presas, en base a los análisis y estudios realizados (CEDEX, 2009), aunque posteriormente se ha seguido trabajando en el desarrollo de determinados aspectos puntuales.

Algunos de los principales resultados obtenidos, así como algunas de las recomendaciones derivadas de los mismos, se exponen en una colección de tres artículos. En el primero de ellos (Jiménez et al., 2014) se presentaron algunos de los trabajos desarrollados en relación al cálculo de las leyes de frecuencia de caudales máximos y su extrapolación a altos periodos de retorno.

En el segundo artículo de la serie (Jiménez y Mediero, 2014) se aborda el tema de la relación caudal-volumen y la definición de los hidrogramas de diseño en base a la misma, cuestión de gran importancia en el caso de presas con grandes volúmenes de embalse.

El presente artículo, tercero de la serie, aborda el tema del cálculo de las avenidas estacionales. Esta cuestión, fundamental a la hora de establecer la explotación de la presa y fijar posibles resguardos estacionales, puede ser también de importancia para estudiar la seguridad hidrológica de la presa, principalmente de presas existentes, cuando se quiere relacionar la probabilidad de ocurrencia de eventos de avenida en las distintas épocas del año con los niveles habituales en el embalse en esas mismas épocas.

* Corresponding author: antonio.jimenez@cedex.es

¹ Centros de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid, España.

² Personal de Investigación del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX durante el desarrollo de este trabajo. Actualmente en el Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética, Universidad Politécnica de Madrid, España.

2. EL CÁLCULO DE LAS AVENIDAS ESTACIONALES. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los aspectos singulares que diferencia la hidrología de crecidas aplicada a las presas de la de otro tipo de infraestructuras es la necesidad de determinar la probabilidad intraanual de ocurrencia de la avenida, es decir, cómo varía la probabilidad de que llegue una determinada avenida según la época del año. En definitiva, la estimación de las avenidas estacionales. En el caso de las presas, y al contrario que en otro tipo de infraestructura hidráulica, puede ser muy importante conocer la probabilidad de que las avenidas se produzcan en determinadas épocas del año. Durante la explotación de las presas existe un conflicto entre la gestión óptima de los recursos hídricos, que exige aprovechar al máximo los mismos, es decir, regular al máximo los caudales de tal forma que se puedan satisfacer la mayor cantidad posible de demandas (lo que lleva a embalsar la mayor cantidad de agua posible), y el mantenimiento de determinados resguardos (volumen de embalse no utilizado y disponible para laminar avenidas) que garanticen la seguridad de la propia presa así como la defensa frente a las avenidas de las poblaciones situadas aguas abajo. Este aspecto es especialmente importante en un país como España en el que existen numerosas zonas donde se combina la escasez de agua y, por tanto, la consiguiente necesidad de aprovecharla al máximo, con la frecuente aparición de grandes y repentinas avenidas, que permiten muy poco tiempo de reacción.

La determinación de las avenidas estacionales, que es importante para establecer las Normas de Explotación de la presa, puede serlo también para el análisis de su seguridad hidrológica. No obstante, es habitual cuando se analiza la seguridad hidrológica de las presas el trabajar únicamente con una avenida de diseño anual, considerando el embalse completamente lleno. Sin embargo, aunque en el proyecto de presas nuevas pueda ser adecuado no considerar la seguridad adicional derivada de los posibles resguardos, en el caso de la revisión de la seguridad hidrológica de presas ya existentes puede ser razonable considerar la variación del nivel del embalse en las distintas épocas de año como resultado de la explotación de la presa, lo que conlleva la necesidad de estimar las avenidas estacionales. Sin embargo, la metodología de cálculo de estas avenidas es compleja y no está del todo clara hoy en día. Asimismo, el estudio de las avenidas estacionales es un tema muy poco tratado en la literatura hidrológica.

Dentro de la práctica profesional se suelen aplicar distintos procedimientos para el cálculo de las avenidas estacionales. En algunos casos se utilizan métodos de cálculo basados en la aplicación de modelos hidrometeorológicos en los que se modifican las condiciones de cálculo para adaptarlas a las circunstancias propias de cada época del año. Por ejemplo, en los países escandinavos, en los que las lluvias no son muy intensas y hay grandes aportaciones por fusión de nieve, se suele considerar por separado las avenidas de primavera y de otoño, mediante modelos hidrometeorológicos que permiten tener en cuenta distintas combinaciones de lluvia, nieve, etc. (Bergström and Ohlsson, 1988; Minor, 1998; Saelthun, N.R., 1992; Loukola, E. y T. Maijala. 1998; Reiter, P.H., 1988).

En el caso concreto de Noruega es más habitual realizar el cálculo en base a procedimientos estadísticos a partir de los datos de aforos, existiendo recomendaciones que inciden en considerar por separado las avenidas de primavera (originadas principalmente por la fusión de la nieve y en menor medida por lluvias) y las avenidas de otoño (generadas fundamentalmente por lluvias) en aquellos casos en los que se perciba la existencia de dos poblaciones estadísticas claramente diferenciadas (Saelthun, 1988; Saelthun, 1992; Ljogodt, 1998; Pettersson, 1998). En los casos comentados, las avenidas de primavera y otoño están generadas por fenómenos físicos totalmente distintos y fuertemente ligados a una determinada estación por lo que, como se comentará más adelante, es apropiado abordar su estudio estadístico por separado.

En otros casos, las leyes de frecuencia de caudales máximos correspondientes a cada estación se estiman ajustando los parámetros de un determinado procedimiento de cálculo con las avenidas registradas en cada época. Este sería el caso de Francia (Duband et al., 1988; Duffaut et al., 1973; Minor, 1998), en donde se calcula en base al método Gradex asumiendo distintos valores del parámetro "a" de dicho método para cada estación.

En España es muy habitual calcular los cuantiles de caudal máximo para cada mes a partir de una serie de datos de caudales máximos mensuales. Sin embargo, este procedimiento puede presentar algunos problemas. Por una parte, puede conducir a leyes de frecuencia diferentes en meses del año con igual comportamiento hidrológico correspondientes a una misma estación climática, cuando realmente la probabilidad de llegada de avenidas debería ser la misma en todos ellos, así como a desprestigiar la utilización de datos sobre avenidas ocurridas en otros meses con un comportamiento similar o idéntico que permitirían una estimación de los cuantiles más fiable y consistente. Esto es debido a que, al seleccionar los datos de caudal por meses dentro de una misma estación climática, éstos se pueden estar agrupando de una manera artificial, cuando realmente corresponderían todos a una misma población estadística. Esta circunstancia podría conducir a trabajar con series de datos sesgadas, de tal manera que las diferencias que pudieran existir entre las de un mes y otro se deban al azar y no a las diferentes características estadísticas del fenómeno hidrológico subyacente. Es, por tanto, preferible realizar el cálculo por estaciones con comportamiento climático e hidrológico homogéneo, en lugar de realizarlo de forma mensual. Para ello es necesario identificar, de forma previa, el número y duración de las estaciones climáticas en las que es más conveniente llevar a cabo el estudio. Con objeto de facilitar esta tarea, sería de utilidad disponer de una identificación general de dichas estaciones para las distintas zonas de España.

Por otra parte, existen casos en los que la diferente probabilidad entre unas épocas del año y otras no es debida a que las avenidas estén generadas por fenómenos físicos diferentes, sino a la mayor frecuencia de aparición de las avenidas en una determinada época. Es decir, el fenómeno físico que genera las avenidas no cambia de una estación a otra, pero se presenta con una mayor frecuencia en determinados momentos del año. Desde un punto de vista estadístico existe una única población estadística de caudales máximos, variando únicamente la frecuencia de llegada de

los eventos entre las distintas estaciones. En estos casos el cálculo de las leyes de frecuencia estacionales de manera independiente entre sí puede no ser lo más adecuado, incluso aunque el cálculo se realice por estaciones climáticas con comportamiento homogéneo y no de forma mensual. En este caso, es necesario emplear metodologías de cálculo que tengan en cuenta la diferente frecuencia de presentación de las avenidas dentro del año y que, tomando en consideración que existe una única población estadística de caudales, aproveche la información sobre caudales de avenida registrada a lo largo de todo el año para reducir la incertidumbre en la estimación de los cuantiles.

La metodología de cálculo más apropiada para estudiar las avenidas estacionales en las circunstancias expuestas en el párrafo anterior es la técnica estadística de las series parciales o de los máximos sobre un umbral, denominada habitualmente en la literatura como POT (Peaks Over Threshold). Esta metodología se estableció inicialmente para mejorar el cálculo de los caudales de muy bajo periodo de retorno, en cuyo cálculo podía tener importancia la diferente probabilidad de ocurrencia de la avenida dentro del año, pero sus fundamentos la hacen idónea para el cálculo de las avenidas estacionales.

Tradicionalmente el análisis estadístico de los caudales de avenida se ha realizado mediante modelos de máximos anuales basados en seleccionar un único caudal de avenida dentro de cada año hidrológico correspondiente al máximo caudal producido durante ese año. Se dispondrá, por lo tanto, de una serie de datos cuya longitud será igual al número de años que se lleve aforando el río. Una alternativa a este modelo tradicional son los modelos de máximos sobre un umbral. Este tipo de modelo realiza una selección más flexible de los caudales de avenida, consistente en fijar un determinado caudal mínimo (denominado nivel base o umbral) y seleccionar todos los caudales correspondientes a puntas de hidrogramas que superen ese umbral. En consecuencia, no se selecciona un número fijo de eventos sino que dicho número depende de la cantidad de crecidas que se hayan producido cada año, pudiéndose seleccionar varios caudales dentro de un año y ninguno en otro.

Este procedimiento de cálculo requiere el manejo de dos funciones de distribución para construir el modelo estadístico, una que caracteriza la probabilidad de que los caudales punta de los hidrogramas de avenida que superan el umbral alcancen una magnitud determinada (funciones exponencial, Pareto generalizada, etc.), y otra que describe la probabilidad de que a lo largo de un año se produzca un determinado número de eventos cuyo caudal punta supere el umbral (normalmente una función de Poisson). En el Apéndice A se describe con mayor detalle esta técnica.

Diversos autores (Borgman, 1963; Todorovic and Zelenhasic, 1970; Todorovic and Rousselle, 1971; North, 1980; Nachtnebel and Konecny, 1987; Rasmussen and Rosbjerg, 1991; Cunnane, 1987; Cunnane, 1989) recomiendan realizar el cálculo de los caudales de avenida estacionales en base al método de máximos sobre un umbral, tomando un proceso de Poisson no homogéneo con valores diferentes del parámetro del que depende dicho proceso para cada periodo estacional en que se haya dividido el año, en aquellos casos en que la generación de las avenidas en las distintas estaciones se deba a un mismo tipo de evento que no puede tratarse de manera independiente

para cada estación. En este sentido, parece clara la conveniencia de llevar a cabo estudios a escala nacional que permitan determinar en qué zonas se dan las condiciones para realizar el estudio de las avenidas estacionales mediante modelos de series parciales no homogéneos, y en cuáles se debe realizar de forma independiente para cada estación.

Ouarda *et al.* [1993] señalan que los periodos estacionales a considerar en el estudio se deben determinar a partir del análisis de los datos hidrológicos y no en base a las estaciones climáticas convencionales (invierno, primavera, verano y otoño). Cuando hay un marcado comportamiento estacional tiene claras ventajas el considerar distintas estaciones en el estudio. Sin embargo, si el comportamiento estacional es menos marcado y homogéneo la consideración de distintas estaciones en el estudio es menos interesante (Waylen and Woo, 1982; Cruise and Arora, 1990; Rasmussen and Rosbjerg, 1991). De esta forma, las ventajas de llevar a cabo un estudio estacional podrían perderse si la división en periodos estacionales que se adopte es en cierta medida artificial. Como se ha señalado anteriormente, sería conveniente llevar a cabo un estudio que permitiera identificar con carácter general dichas estaciones para las distintas zonas de España.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que las leyes de frecuencia estacionales y la anual deben ser consistentes entre sí, de tal manera que la distribución anual sea el resultado de combinar las estacionales. En este sentido, la obtención de las leyes de frecuencia estacionales de manera independiente puede conducir a resultados que no sean capaces de reproducir la ley de frecuencia anual al combinarse entre sí. Este problema, sin embargo, queda resuelto al calcular las leyes de frecuencia estacionales mediante la técnica de las series parciales, por lo que sus resultados son más consistentes.

En consecuencia, según lo expuesto anteriormente, teóricamente se podrían dar tres situaciones diferentes en lo que se refiere a la distribución intraanual de la probabilidad de ocurrencia de los caudales de avenida:

- No hay diferencias en la probabilidad de ocurrencia de los caudales entre unas épocas del año y otras. Esta situación, que probablemente no se dé dentro del ámbito español, no requeriría el cálculo de avenidas estacionales, siendo suficiente con disponer de la ley de frecuencia anual.
- Se pueden distinguir dos o más estaciones en el año con distinta probabilidad de ocurrencia de los caudales debida a la existencia de fenómenos físicos de generación de las avenidas claramente diferentes en una época y en otra (sería el caso, por ejemplo, de las avenidas provocadas por lluvias en otoño y por deshielo en primavera). En este caso, se puede estudiar cada tipo de avenida y, por lo tanto, cada estación climática de forma independiente desde un punto de vista estadístico. Si, como consecuencia de los diferentes mecanismos generadores de las avenidas, la diferencia de probabilidad entre unas estaciones y otras es muy marcada, puede ser necesario en algunos casos recurrir a funciones de distribución mixtas para poder representar adecuadamente el comportamiento de los caudales anuales (sería el caso, por ejemplo, de algunas de las cuencas mediterráneas en

las que puede ser necesario recurrir a una función de distribución mixta tipo TCEV (Two Component Extreme Value), tal como se puso de manifiesto en el primer artículo de esta serie (Jiménez *et al.*, 2014).

- Se pueden distinguir dos o más estaciones en el año con distinta probabilidad de ocurrencia de los caudales debida, no a la existencia de fenómenos físicos generadores diferentes, sino a la mayor frecuencia de aparición de las avenidas en una determinada época que en otra. En este caso, no es adecuado estudiar cada periodo estacional de manera independiente. El estudio podría llevarse a cabo mediante la aplicación de los modelos de series parciales no homogéneos comentados anteriormente.

Por último, al igual que se puso de manifiesto para el caso de las funciones de distribución bivariadas en el segundo artículo de esta serie (Jiménez y Mediero, 2014), la aplicación de las leyes de frecuencia estacionales requiere interpretar correctamente el concepto de periodo de retorno. Cuando se diseñan los órganos de desagüe de una presa para un determinado periodo de retorno (T), lo que se está indicando es que la probabilidad de que se supere el nivel máximo admisible en el embalse a lo largo de un año es $1/T$. En el caso de que se realice el diseño en base únicamente al caudal punta, se utilizaría como caudal de diseño aquel cuya probabilidad de excedencia anual es $1/T$. Es decir, el periodo de retorno es un concepto anual y, por tanto, no puede aplicarse directamente a las leyes de frecuencia estacionales, ya que éstas recogen sólo la probabilidad de que se supere el caudal de diseño en una parte del año y no en su totalidad. En consecuencia, es necesario transformar este concepto en su equivalente estacional para tener en cuenta que las leyes de frecuencia estacionales se refieren a periodos temporales inferiores al año. Esta cuestión se abordará con detalle en el próximo apartado.

3. PROPUESTA DE INTERPRETACIÓN DEL CONCEPTO DE PERIODO DE RETORNO PARA SU APLICACIÓN A LAS AVENIDAS ESTACIONALES

Al igual que se indicó en el segundo artículo de esta serie para el caso de las distribuciones bivariadas de caudal punta y volumen (Jiménez y Mediero, 2014), es fundamental a la hora de utilizar los resultados del estudio sobre avenidas estacionales interpretar correctamente el concepto de periodo de retorno de diseño. En este sentido, es fundamental, como se ha dicho, tener en cuenta que el periodo de retorno es un concepto anual y, por tanto, no puede aplicarse directamente a las leyes de frecuencia estacionales, ya que éstas recogen sólo la probabilidad de que se supere el caudal de diseño en una parte del año y no en su totalidad.

Como se ha dicho anteriormente, cuando se diseñan los órganos de desagüe de una presa para un determinado periodo de retorno (T), lo que se está indicando es que la probabilidad de que se supere el nivel máximo admisible en el embalse a lo largo de un año es $1/T$, pero obviamente el riesgo de fallo de la presa no es uniforme a lo largo del año. Las funciones de distribución estacionales, al estar referidas a un periodo temporal inferior al año, recogen sólo

una parte de la probabilidad anual, de tal forma que la probabilidad anual se podría obtener como composición de las estacionales.

En consecuencia, el periodo de retorno anual no puede aplicarse a las leyes de frecuencia estacionales para obtener el caudal de diseño correspondiente a cada uno de los periodos estacionales. Por el contrario, a la hora de seleccionar los caudales de diseño para cada estación en la que se haya dividido el año es necesario distribuir previamente la probabilidad anual entre las distintas estaciones. Esta distribución no es única, sino que puede llevarse a cabo de múltiples formas diferentes, por lo que es necesario definir un criterio apropiado para realizarla.

Se puede analizar esta cuestión a través del siguiente ejemplo. Consideremos una zona en la que se pudieran distinguir dos periodos estacionales diferentes a lo largo del año (uno con duración r meses y otro con duración s meses, $r+s=12$), con funciones de distribución estacionales $G(x)$ y $H(x)$. La probabilidad de que se supere un caudal dado (q) será diferente en cada una de las dos épocas del año: $1-G(q)$ en la primera y $1-H(q)$ en la segunda, y la probabilidad de no excedencia anual, $F(q)$, se podrá expresar como producto de las probabilidades de no excedencia estacionales, suponiendo que la ocurrencia de una avenida en un periodo es independiente del otro.

$$F(q) = G(q) \cdot H(q) \quad [1]$$

Asimismo, se verificará:

$$T = \frac{1}{1 - G(q)H(q)} \quad [2]$$

Siendo T el periodo de retorno correspondiente al caudal q según la ley de frecuencia anual.

Tanto $G(q)$ como $H(q)$ serán lógicamente mayores que $F(q)$ y, por tanto, $1-G(q)$ y $1-H(q)$ serán menores que $1-F(q)$, al ser la probabilidad de excedencia del caudal q a lo largo de una determinada estación menor que a lo largo de todo el año. Este es el motivo por el que las leyes de frecuencia estacionales proporcionan siempre caudales menores que la anual para una misma probabilidad (figura 10).

Sin embargo, aunque las probabilidades de excedencia en cada uno de los periodos estacionales sean menores a la anual, no ocurre lo mismo con la probabilidad de excedencia por unidad de tiempo (figura 11). Si se considera, como parece lógico, que la distribución de probabilidad dentro de cada periodo estacional es uniforme, se podría definir una función de distribución mensual en cada periodo como:

$$g_m(q) = \sqrt[r]{G(q)} \quad [3]$$

$$h_m(q) = \sqrt[s]{H(q)}$$

En la que se ha asumido que la superación de un determinado caudal en un mes es independiente de otro. Asimismo, si se distribuye uniformemente la probabilidad anual entre todos los meses del año, se tendría:

$$f_m(q) = \sqrt[12]{F(q)} \quad [4]$$

Y su relación con las estacionales será:

$$f_m^{12}(q) = g_m^r(q) \cdot h_m^s(q) \quad [5]$$

Por lo que sólo pueden darse dos situaciones, o bien la probabilidad mensual es la misma en los dos periodos y, por tanto, igual a la media anual ($g_m(q) = h_m(q) = f_m(q)$), o bien la probabilidad mensual es menor a la media anual en uno de los periodos y mayor en el otro, no siendo uniforme la distribución de probabilidad a lo largo del año y, por tanto, estando uno de los periodos sometido a un riesgo mayor que el riesgo medio anual correspondiente al periodo de retorno T .

Si, por ejemplo, quisiéramos garantizar la no inundabilidad de una determinada zona aguas abajo de la presa para un determinado periodo de retorno fijando unos resguardos apropiados para cada estación, la determinación del caudal de diseño correspondiente a cada estación no debería realizarse entrando en cada una de las leyes de frecuencia estacionales con un periodo de retorno T igual al periodo de retorno anual, sino distribuyendo de manera apropiada la probabilidad anual entre las distintas estaciones. De hecho, en el caso de seleccionar los caudales estacionales como los de periodo de retorno T , la probabilidad anual resultante de componer las i probabilidades estacionales no se correspondería con la de ese periodo de retorno:

$$\prod_i \left(1 - \frac{1}{T}\right) < 1 - \frac{1}{T} \quad [6]$$

En concreto, la probabilidad anual correspondería a un periodo de retorno inferior a T , por lo que el diseño con los caudales estacionales de T años de periodo de retorno dejaría del lado de la inseguridad.

Como se ha dicho, lo correcto es tomar aquellos caudales estacionales correspondientes a una determinada probabilidad resultado de distribuir la probabilidad anual entre las distintas estaciones. Una forma de distribuir la probabilidad es la que se deriva de tomar en todos los periodos estacionales un caudal q igual al anual de periodo de retorno T , según se expresa en [1], aunque esta opción resulta poco útil de cara a reflejar en el diseño el mayor o menor riesgo de cada periodo estacional.

De entre todas las posibilidades existentes para distribuir la probabilidad anual entre los periodos estacionales, parece que una opción razonable sería distribuir la probabilidad de manera homogénea entre todos los meses del año, de tal manera que en ninguna época del año haya un mayor riesgo que en otra. Es decir, que las distribuciones mensuales de probabilidad sean iguales en todas las estaciones e iguales a la media anual de periodo de retorno T . Esto implicaría trabajar con un caudal de diseño variable a lo largo del año, teniendo tantos caudales de diseño como periodos estacionales se hayan definido.

En el caso del ejemplo anterior, se tendría un caudal q_1 en la primera época y uno q_2 en la segunda, que corresponderían a probabilidades de excedencia mensuales idénticas en cada una de las estaciones, e iguales a la probabilidad mensual media correspondiente al periodo de retorno T :

$$1 - g_m(q_1) = 1 - h_m(q_2) \Rightarrow g_m(q_1) = h_m(q_2) = f_m(q) \quad [7]$$

Por otra parte, la probabilidad de fallo anual deberá ser $1/T$, por lo que se deberá verificar:

$$T = \frac{1}{1-F(q)} = \frac{1}{1-G(q_1)H(q_2)} = \frac{1}{1-g_m^r(q_1)h_m^s(q_2)} = \frac{1}{1-g_m^{12}(q_1)} = \frac{1}{1-h_m^{12}(q_2)} \quad [8]$$

Donde se han empleado las ecuaciones [2] y [3]. La expresión [8] permite determinar los caudales de diseño q_1 y q_2 de cada periodo, y determinar a partir de ellos los resguardos apropiados para cada uno de los periodos del año. Uno de los caudales (q_1 ó q_2) será mayor que el anual correspondiente al periodo de retorno $T(q)$, y el otro menor, por lo que el diseño será más exigente que el correspondiente al caudal anual en uno de los periodos y menor en el otro.

Teniendo en cuenta [3] y [4], el valor de la función de distribución para los caudales de diseño en cada periodo será:

$$g_m(q_1) = f_m(q) = r\sqrt[r]{G(q_1)} = \sqrt[r]{F(q)} \Rightarrow G(q_1) = [F(q)]^{\frac{r}{12}} \quad [9]$$

$$h_m(q_2) = f_m(q) = s\sqrt[s]{H(q_2)} = \sqrt[s]{F(q)} \Rightarrow H(q_2) = [F(q)]^{\frac{s}{12}}$$

Lógicamente, la composición de las probabilidades estacionales da como resultado la anual:

$$G(q_1) \cdot H(q_2) = [F(q)]^{\frac{r}{12}} \cdot [F(q)]^{\frac{s}{12}} = [F(q)]^{\frac{r+s}{12}} = F(q) \quad [10]$$

Ya que $r+s=12$. Por consiguiente, los caudales de diseño estacionales corresponderán, respecto a su función de distribución estacional, a los siguientes periodos de retorno relacionados con el periodo de retorno anual T :

$$G(q_1) = [F(q)]^{\frac{r}{12}} \Rightarrow 1 - \frac{1}{T_G} = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^{\frac{r}{12}} \Rightarrow T_G = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^{\frac{r}{12}}} \quad [11]$$

$$H(q_2) = [F(q)]^{\frac{s}{12}} \Rightarrow 1 - \frac{1}{T_H} = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^{\frac{s}{12}} \Rightarrow T_H = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^{\frac{s}{12}}}$$

Siendo T_G y T_H los periodos de retorno estacionales de cada periodo. Las expresiones anteriores se pueden emplear para cualquier número de periodos estacionales dentro del año, simplemente sustituyendo r o s por el número de meses que corresponda a cada periodo estacional.

4. CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS CAUDALES MÁXIMOS ESTACIONALES EN LA ESPAÑA PENINSULAR

Tal como se ha expuesto anteriormente, los procedimientos utilizados habitualmente en la práctica profesional para el cálculo de las avenidas estacionales pueden presentar ciertos problemas. En primer lugar, no suele interpretarse adecuadamente la información probabilística

derivada de las funciones de distribución estacionales, relacionándola de manera inapropiada con el periodo de retorno anual, lo que puede conducir a emplear la información proporcionada por dichas leyes de frecuencia de una manera errónea e inconsistente con la ley de frecuencia anual. Por otra parte, el cálculo de las leyes de frecuencia estacionales de manera independiente para cada periodo estacional y la identificación en muchos casos de estos periodos con los distintos meses del año, puede conducir a obtener resultados sesgados, así como a que la composición de las leyes de frecuencia estacionales no reproduzca la ley de frecuencia anual.

En este contexto, el modelo estadístico de series de duración parcial o de máximos sobre un umbral puede ser una herramienta idónea para el estudio de las leyes de frecuencia estacionales, presentando las siguientes ventajas:

- Evita la obtención de leyes de frecuencia distintas entre meses del año con un comportamiento hidrológico similar en lo que se refiere a las avenidas.
- Permite utilizar todas las avenidas registradas en el año de forma conjunta disponiéndose, por tanto, de más información para el ajuste de las leyes de frecuencia estacionales, y evitando la obtención de resultados sesgados.
- Garantiza la coherencia entre las leyes de frecuencia estacionales y la anual.

Además, como se expone más adelante, mediante esta técnica las leyes de frecuencia estacionales pueden obtenerse directamente de la anual si ésta ya se conoce, por lo que las mejoras que se hayan introducido en el ajuste de ésta última para reducir la incertidumbre en la estimación de los cuantiles de alto periodo de retorno, redundarán también en una reducción de la incertidumbre de las leyes de frecuencia estacionales.

No obstante, el estudio de las avenidas estacionales mediante un modelo de series parciales sólo es apropiado en aquellos casos en que los mecanismos de generación de las avenidas a lo largo del año sean similares y, por consiguiente, pueda considerarse también similar la magnitud de las avenidas esperables, de tal forma que los datos no puedan tratarse de manera independiente para cada periodo estacional. En aquellos casos en que existan mecanismos de generación de las avenidas claramente diferenciados entre unas estaciones del año y otras, con caudales de magnitud diferente, las avenidas estacionales deberán obtenerse mediante el ajuste de leyes de frecuencia a los datos de cada estación de forma independiente. De esta forma, se han realizado estudios dentro de este trabajo con el objetivo de determinar si es adecuada la hipótesis de homogeneidad estadística de los datos de caudal de avenida correspondientes a distintas estaciones del año, asumiendo, por tanto, que corresponden a una misma población estadística.

Por otra parte, otro de los trabajos realizados se ha centrado en la obtención de los periodos de tiempo dentro del año con un comportamiento diferenciado respecto a la ocurrencia de las avenidas pero aproximadamente homogéneo dentro del propio periodo, es decir, la identificación de los periodos estacionales para los que es apropiado realizar el estudio. Esta cuestión, como se ha puesto

de manifiesto anteriormente, tiene importancia ya que los resultados podrían no ser correctos de realizarse el estudio para unos periodos estacionales que no se correspondan con estaciones climáticas claramente diferenciadas en lo que se refiere a la generación de las avenidas. Lógicamente, los periodos estacionales más apropiados pueden ser diferentes entre unas zonas geográficas y otras debido a sus diferencias climáticas. Para tener en cuenta esta circunstancia, el estudio se ha llevado a cabo para cada una de las regiones estadísticas identificadas en el primer artículo de esta serie (Jiménez *et al.*, 2014), ya que las diferencias entre las mismas son en gran parte resultado de las distintas condiciones climáticas en cada una de ellas. Como resultado se han obtenido los patrones de distribución estacional de las avenidas para cada una de dichas regiones.

Por último, como se indica en el Apéndice A, quizá la mayor dificultad que presenta la aplicación práctica de la técnica de series parciales es la determinación adecuada del umbral, de tal forma que garantice la independencia de los datos seleccionados para el ajuste del modelo. En la actualidad existen procedimientos estadísticos contrastados que permiten determinar ese umbral con garantías, pero en ocasiones su aplicación práctica puede ser compleja. De esta manera, otro de los estudios llevados a cabo como parte de este trabajo se ha encaminado a desarrollar un procedimiento sencillo para determinar el umbral, de tal forma que pueda servir de base para aplicar dicha técnica estadística.

Los tres trabajos indicados se han realizado para el ámbito geográfico de la España peninsular. Por otra parte, el trabajo se ha basado en las series de caudales medios diarios disponibles en las estaciones de aforos, ya que no se dispone, con carácter general, de las series de caudales instantáneos que serían necesarias para aplicar el procedimiento estadístico de las series parciales. No obstante, se

considera que las conclusiones en cuanto a la identificación de periodos estacionales, y la posible homogeneidad estadística de los caudales de avenida en cada uno de ellos, no diferirán sustancialmente por el hecho de trabajar con caudales medios diarios.

En primer lugar se expone el estudio encaminado a la determinación del umbral, ya que la selección del umbral y los caudales punta que lo exceden es una información necesaria para abordar los otros dos estudios. A continuación, se presenta el estudio sobre distribución estacional de la frecuencia de eventos de avenida y, por último, el análisis de la homogeneidad estadística de los caudales registrados en los distintos periodos estacionales.

4.1. Aplicación de los criterios de independencia de los datos. Desarrollo de un criterio para la selección del umbral

El primer paso en la aplicación del método de series parciales consiste en la selección de los datos de caudal punta de avenida que van a formar parte de la serie de datos con la que ajustar el modelo. Esto implica la determinación del valor del umbral que permite discriminar los hidrogramas que se consideran relevantes, y que formarán parte del estudio, de los que no lo son. Como se ha dicho, este es uno de los puntos más críticos en la aplicación de la técnica de las series de duración parcial, de tal forma que se seleccione el mayor número de picos de crecida posibles y a la vez se garantice la independencia de los datos que componen la muestra. Puesto que la independencia de los datos es una de las hipótesis básicas del modelo estadístico, y ésta depende del umbral seleccionado, la selección de dicho umbral no puede ser arbitraria y deberá realizarse aplicando criterios y técnicas que garanticen el objetivo buscado. En el Apéndice A se exponen de manera

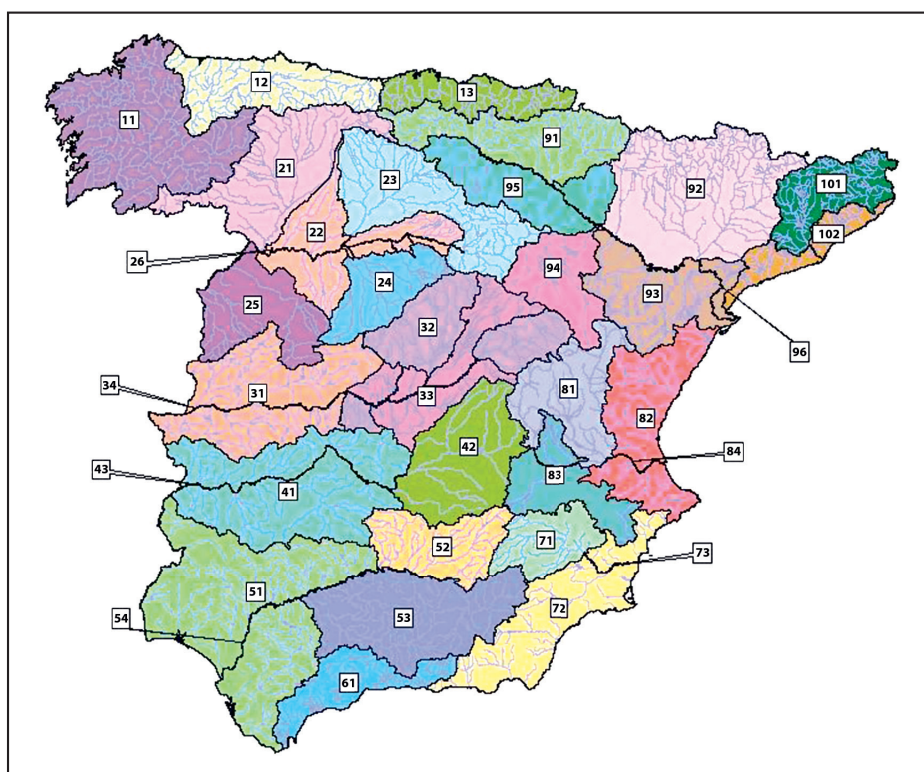


Figura 1. Regiones estadísticas consideradas.

resumida los criterios recogidos en la literatura técnica con esta finalidad.

Se han aplicado, a cada una de las estaciones seleccionadas en las distintas regiones estadísticas definidas en Jiménez *et al.* [2014] (figura 1), dos de los criterios de selección de umbral expuestos en el Apéndice A: test sobre el número medio de eventos por año y test de la excedencia media sobre el umbral. El test del índice de dispersión no se ha utilizado, ya que presenta ciertas dificultades en su aplicación práctica, siendo más apropiado para identificar la necesidad de recurrir a funciones binomiales o binomiales negativas, en lugar de la de Poisson, para describir el proceso de llegada de eventos. Como se ha dicho, los tests se han aplicado sobre el registro de caudales medios diarios.

En la figura 2 se representan algunos ejemplos de la aplicación de los dos tests estadísticos anteriores a las estaciones de aforos de la región 31 en la cuenca del Tajo. En cada figura se representa la relación entre el valor del umbral y el de la excedencia media de los caudales pico sobre el mismo, así como la relación entre el valor del umbral y el número medio de excedencias anuales.

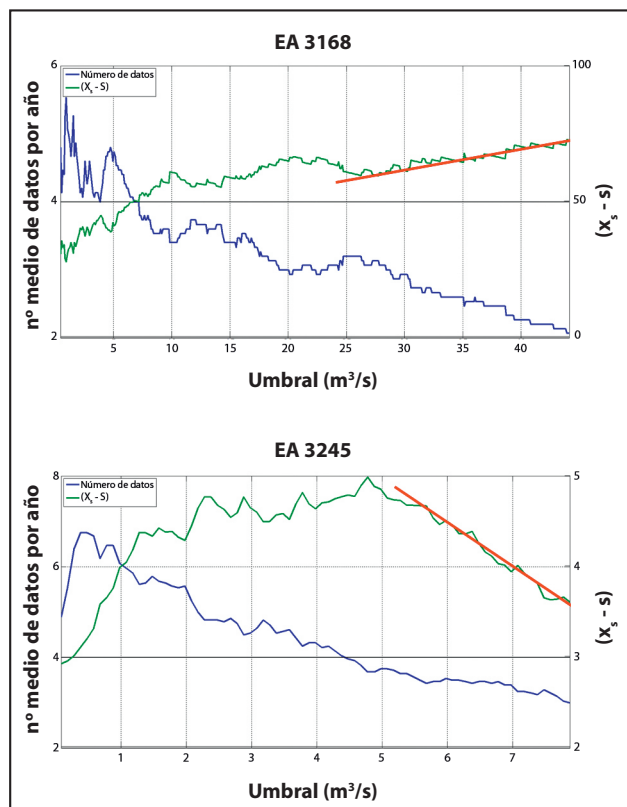


Figura 2. Gráficas resultantes de la aplicación de los tests estadísticos para la selección del umbral en dos estaciones de la región 31 (cuenca del Tajo). Se ha marcado con una línea roja el tramo de la curva umbral-excedencia media con un comportamiento aproximadamente lineal.

Se ha identificado el tramo de la primera curva que presenta un comportamiento aproximadamente lineal y que se encuentra dentro del rango de valores del umbral situados a la derecha del aquél para el cual se produce el máximo valor de excedencias medias anuales. Se observa cómo dicho tramo coincide con un valor de excedencias medias del orden de 3 en todos los casos. En el caso del ejemplo mostrado en la figura 3, correspondiente a la región 22 situada en la cuenca del Duero, debido a la menor frecuencia

de aparición de eventos de avenida en esa zona, dicho tramo de la curva umbral-excedencia media coincide con un valor del número medio de eventos menor, del orden de 2. Resultados similares se han obtenido en el resto de regiones. Por consiguiente, la aplicación de los tests indicaría la conveniencia de seleccionar el umbral de tal forma que conduzca a un número medio de eventos por año del orden de 2 ó 3, coincidente con el criterio proporcionado por Lang *et al.* [1999].

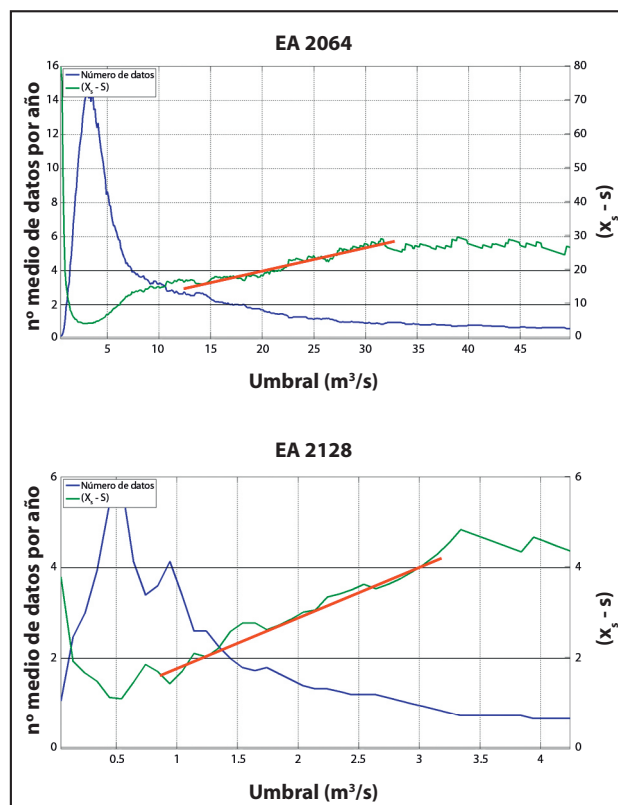


Figura 3. Gráficas resultantes de la aplicación de los tests estadísticos para la selección del umbral en dos estaciones de la región 22 (cuenca del Duero). Se ha marcado con una línea roja el tramo de la curva umbral-excedencia media con un comportamiento aproximadamente lineal.

Teniendo en cuenta este resultado, la identificación del umbral en cada estación de aforos se ha realizado finalmente asumiendo un número medio de tres eventos por año, excepto en las regiones con una menor incidencia de avenidas, donde se ha tomado un número medio de dos eventos por año.

Los resultados obtenidos se han analizado con la finalidad de sintetizarlos en un criterio de selección de umbral fácil de aplicar y que conduzca a resultados similares a los obtenidos, sin la necesidad de recurrir a realizar tanteos o a aplicar complejos tests estadísticos. Para ello, se ha empleado el criterio del factor de frecuencia (Rosbjerg and Madsen, 1992) que emplea dicho concepto para determinar el umbral a partir de la serie de caudales medios diarios:

$$S = E(Q) + K \sqrt{Var(Q)} \tag{12}$$

Siendo S el valor del umbral, $E(Q)$ la media de la serie de caudales medios diarios, $Var(Q)$ la varianza de dicha serie y K el factor de frecuencia, para el cual Rosbjerg y Madsen [1992] proponen un valor de 3.

En este trabajo se propone emplear este procedimiento para determinar el umbral pero, en lugar de tomar un valor del factor de frecuencia constante e igual a 3, se ha determinado un valor para cada región estadística ajustando el resultado de la expresión [12] a los umbrales determinados anteriormente. Para cada estación de aforos se ha calculado un factor de frecuencia, obteniéndose posteriormente un valor medio para la región. Los valores de factor de frecuencia obtenidos oscilan entre 1.49 y 3.61 dependiendo de la región (tabla 1), con un valor medio de 2.33, próximo al valor indicado por Rosbjerg y Madsen [1992]. Como se ha dicho anteriormente, estos factores de frecuencia se han obtenido para su aplicación sobre la serie de caudales medios diarios, pudiendo no ser válidos sus resultados en caso de aplicarse sobre un registro continuo de caudales instantáneos.

Tabla 1. Factores de frecuencia (K) para selección del umbral en las distintas regiones estadísticas consideradas

Región	K	Región	K
11	2.770	53	1.910
12	3.240	61	1.870
13	3.610	71	1.770
21	2.670	72	-
22	1.740	81	1.790
23	2.370	82	-
24	1.990	83	-
25	2.990	91	3.560
31	2.470	92	2.680
32	2.130	93	1.950
33	2.740	94	2.190
41	1.890	95	2.340
42	-	101	1.980
51	2.200	102	1.490
52	1.940		

En el caso de las regiones 42 y 83, debido a sus características hidrológicas, no existen, salvo en casos puntuales, hidrogramas de avenida claramente definidos, por lo que no ha podido llevarse a cabo el estudio para la determinación del umbral. Por otra parte, tampoco se ha realizado el estudio en las regiones 72 y 82, pues en estas regiones, como se expondrá en el próximo apartado, no es apropiada, en general, la aplicación de la técnica de las series parciales para determinar las avenidas estacionales.

Por último, mediante el procedimiento descrito, se han determinado los umbrales a emplear en las distintas estaciones de aforos de cada región estadística y, en base a los mismos, se han seleccionado las series de máximos sobre un umbral con las que se ha llevado a cabo el resto del trabajo (figura 7).

4.2. Análisis de los patrones de distribución estacional de las avenidas

Una de las cuestiones clave en la obtención de las avenidas estacionales es determinar los periodos de tiempo dentro del año con un comportamiento diferenciado respecto a la ocurrencia de las avenidas pero aproximadamente homogéneo dentro del propio periodo. Como se comentó

anteriormente, las ventajas de llevar a cabo un estudio estacional podrían perderse si la división en periodos estacionales que se adopte es en cierta medida artificial. De esta forma, una de los estudios abordados en el trabajo ha consistido en identificar con carácter general dichas estaciones para las distintas zonas de España, con objeto de que pueda servir como una primera referencia a la hora de determinar los periodos estacionales más adecuados para cada estudio de avenidas estacionales concreto. El estudio se ha llevado a cabo partiendo de las regiones estadísticas identificadas en el primer artículo de esta serie (Jiménez *et al.*, 2014), determinando los patrones de distribución estacional de las avenidas para cada una de ellas.

El estudio se ha realizado mediante dos procedimientos diferentes que se complementan. Por una parte, se ha determinado el número medio de eventos de crecida para cada uno de los meses del año en cada una de las estaciones de aforos incluidas en las distintas regiones consideradas, así como los valores medios para todas las estaciones de la región. Esto permite diferenciar aquellos meses del año con una mayor incidencia de las avenidas frente a los que las sufren en menor medida. Para objetivar la decisión de agrupar los distintos meses en periodos con una incidencia similar de las avenidas se ha desarrollado un procedimiento estadístico sobre los datos del número medio de eventos mensuales. Este procedimiento permite además determinar si la variabilidad del número medio de eventos de avenida entre unos meses y otros del año se debe a la existencia de unas características estadísticas diferentes, propias de ese periodo, o si se deben a causas puramente aleatorias. El fundamento del test estadístico propuesto es el siguiente. El número medio mensual de eventos es una variable aleatoria que sigue una distribución de Poisson, expresión [17].

Para dicha distribución se ha determinado el valor de la variable aleatoria que corresponde a un valor de la probabilidad acumulada del 5% y del 95%, respectivamente. Los meses del año que se salgan de dichos intervalos, por arriba o por abajo, tendrán una probabilidad muy baja (menos del 5%) de presentar un comportamiento homogéneo respecto a la media anual, por lo que será razonable considerar que corresponden a épocas del año con un comportamiento estadístico diferenciado respecto a la ocurrencia de avenidas.

Por otra parte, se ha aplicado el test propuesto por Ouarda *et al.* [1993], consistente en representar en un gráfico de forma continua el número acumulado de eventos de avenida, $n(t)$, o de excedencias del umbral, para cada año de la serie completa. Cada estación a considerar quedará entonces representada por una parte homogénea del gráfico en la que la pendiente de la curva, es decir, la derivada del número acumulado de eventos respecto al tiempo, $dn(t)/dt$, sea aproximadamente constante. En este trabajo, en lugar de representar el gráfico para cada año de la serie, se ha representado un gráfico medio para el conjunto de todos los años y de todas las estaciones de aforos de la región. Para hacer comparables los gráficos de distintas estaciones, se han expresado de forma adimensional, dividiendo por el número total de eventos, de tal forma que el número de eventos acumulado expresado en el gráfico es 1. Finalmente, se ha obtenido un gráfico medio para cada región. El test de Ouarda *et al.* [1993] presenta la ventaja

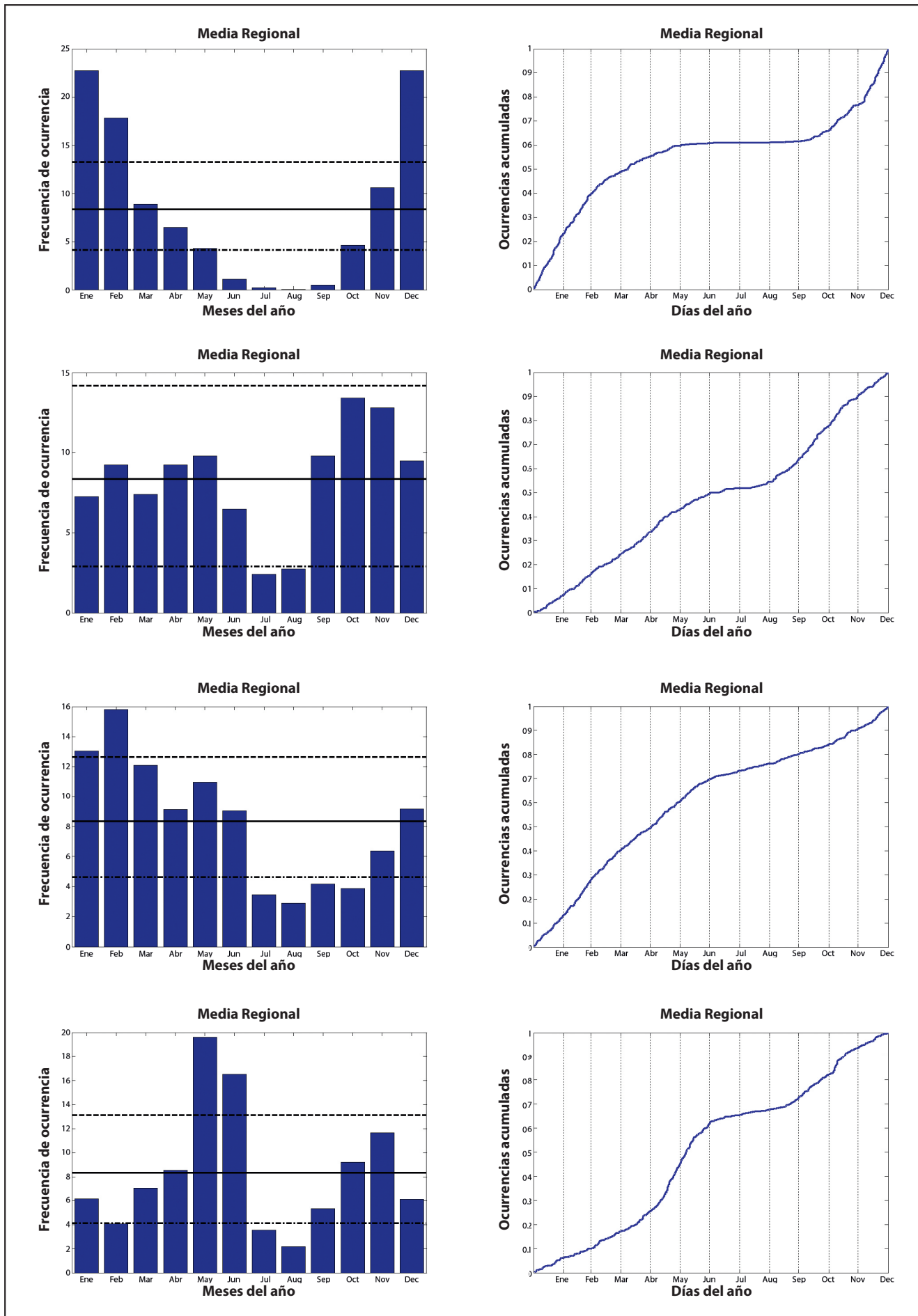


Figura 4. Gráficas obtenidas en el análisis de los patrones de distribución intraanual de las avenidas en distintas regiones estadísticas. Izquierda: número medio de eventos mensual (las líneas horizontales indican el número medio de eventos anual y los percentiles del 5% y 95%). Derecha: Test de Ouarda *et al.* [1993] medio en la región.

respecto al desarrollado anteriormente de permitir el análisis con una resolución temporal inferior a la mensual, lo que puede ser importante en determinadas regiones. Sin embargo, tiene la desventaja de que no proporciona un procedimiento cuantitativo claro para definir las distintas épocas o estaciones del año, basándose la selección de dichos periodos en una apreciación visual. De esta manera, como se ha indicado anteriormente, ambos procedimientos se complementan.

En la figura 4 se presentan los gráficos obtenidos para cuatro regiones estadísticas que ilustran algunos de los patrones típicos. En las figuras de la izquierda se representa el número medio de eventos mensual (las líneas horizontales indican el número medio de eventos anual y el valor correspondiente al 5% y al 95% de probabilidad), y en las de la derecha el gráfico correspondiente al test de Ouarda *et al.* [1993] medio para cada región.

Los gráficos de la región 31, en la cuenca del Tajo, corresponden al patrón de distribución típico de la mayoría de las cuencas atlánticas, con una gran concentración de avenidas en los meses de invierno, muy escasa incidencia en los de verano, y una situación intermedia y muy similar en los de primavera y otoño, aunque hay diferencias entre unas zonas y otras en cuanto al comienzo y final de cada periodo, y a la importancia relativa de los distintos periodos entre sí. Los gráficos de la región 81 en la cuenca del Júcar representan el comportamiento de algunas de las cuencas mediterráneas más alejadas de la costa y no afectadas por fenómenos de carácter convectivo (cabecera del Júcar, cabecera del Segura y algunas de las cuencas del Ebro). Se observa la principal concentración de avenidas en los meses del final del invierno y parte de la primavera, y poca incidencia (aunque no despreciable) en verano y parte del otoño. La región 72 en el Segura es representativa de las cuencas mediterráneas costeras afectadas por tormentas muy intensas de carácter convectivo. Las avenidas se concentran en los meses de otoño (principalmente octubre y noviembre), con una frecuencia menor y bastante homogénea durante el resto del año, salvo en los meses de julio y agosto en los que la incidencia es reducida, aunque no despreciable. Por último, los gráficos de la región 92 en el Ebro ilustran la situación típica de las cuencas con una influencia importante del deshielo en primavera, principalmente de las cuencas pirenaicas. Las avenidas se concentran al final de la primavera (principalmente en los meses de mayo y junio), y con una distribución bastante repartida en el resto del año. En el caso de la región 92, hay también una incidencia importante en los meses de otoño (octubre y noviembre), debido a las tormentas mediterráneas típicas de esa época que afectan a esa región, aunque en menor medida que en otras zonas.

Por supuesto, como se ha dicho anteriormente, los patrones tipo expuestos no se producen de forma completamente idéntica en las distintas zonas, existiendo diferencias en cuanto al comienzo y final de los distintos periodos estacionales, y a su importancia relativa.

Como resultado del estudio se han obtenido unos periodos estacionales de referencia en cada una de las regiones estadísticas, que pueden ser útiles como primera aproximación en un trabajo concreto. No obstante, aunque el patrón medio de distribución intraanual de las avenidas

en cada región es muy similar al de cada una de las estaciones de aforo por separado, existen en algunos casos diferencias en estaciones concretas, por lo que es conveniente realizar un análisis de esta distribución para las estaciones de aforos disponibles en la zona de estudio, por si el comportamiento local de dicha zona pudiera diferir del medio de la región.

4.3. Estudio de la homogeneidad estadística de los caudales de avenida a lo largo del año

Como se ha expuesto anteriormente, el cálculo de las avenidas estacionales mediante modelos de series de duración parcial no homogéneos implica asumir como hipótesis que la distribución que describe la probabilidad de que el caudal de un evento de avenida supere o no un valor determinado es la misma a lo largo de todo el año, variando únicamente de unas épocas a otras la frecuencia de aparición de los eventos. Con el objetivo de determinar en qué zonas se dan las condiciones para realizar el estudio de las avenidas estacionales mediante dicho modelo, y en cuáles se debe realizar el cálculo de forma independiente para cada periodo estacional, se ha llevado a cabo el estudio que se expone en este apartado.

Para ello, se ha analizado la homogeneidad estadística de la distribución que describe la probabilidad de que los caudales punta de los eventos de crecida tengan una determinada magnitud. Si dicha distribución no fuese homogénea, no sería adecuada la aplicación de la técnica de series parciales para determinar las avenidas estacionales, debiéndose analizar las series de máximos de cada periodo estacional por separado. El análisis de la homogeneidad se ha realizado para cada región estadística identificada en Jiménez *et al.* [2014].

Se ha desarrollado un test estadístico basado en la determinación del intervalo de confianza (para un nivel de significancia del 10%) asociado a la media muestral de los máximos existentes en cada mes. Si la desviación de la media muestral mensual respecto a la media anual es superior al intervalo de confianza calculado, se podrá considerar de forma razonable que no existe homogeneidad respecto a la distribución estadística de la magnitud del caudal máximo, por lo que no se verificará la hipótesis asumida por el modelo de series de duración parcial.

Para cualquier población la media muestral es asintóticamente normal con media μ y desviación típica σ/\sqrt{n} , donde n es el número de datos de la muestra y σ se puede estimar mediante la desviación típica muestral (\hat{s}). De esta forma, los intervalos de confianza asociados a la estimación de la media a partir de la muestra, para un nivel de significancia α , vendrán dados por:

$$\bar{x} - z_{\alpha/2} \frac{\hat{s}}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + z_{\alpha/2} \frac{\hat{s}}{\sqrt{n}} \quad [13]$$

Siendo \bar{x} la estimación de la media a partir de la muestra y $z_{\alpha/2}$ la variable normal estándar para una probabilidad acumulada $\alpha/2$.

El test se ha aplicado a todas las estaciones de aforos existentes en cada región. Con objeto de facilitar la comparación entre los resultados de distintas estaciones de aforos, cuya magnitud de caudales puede ser muy diferente, se

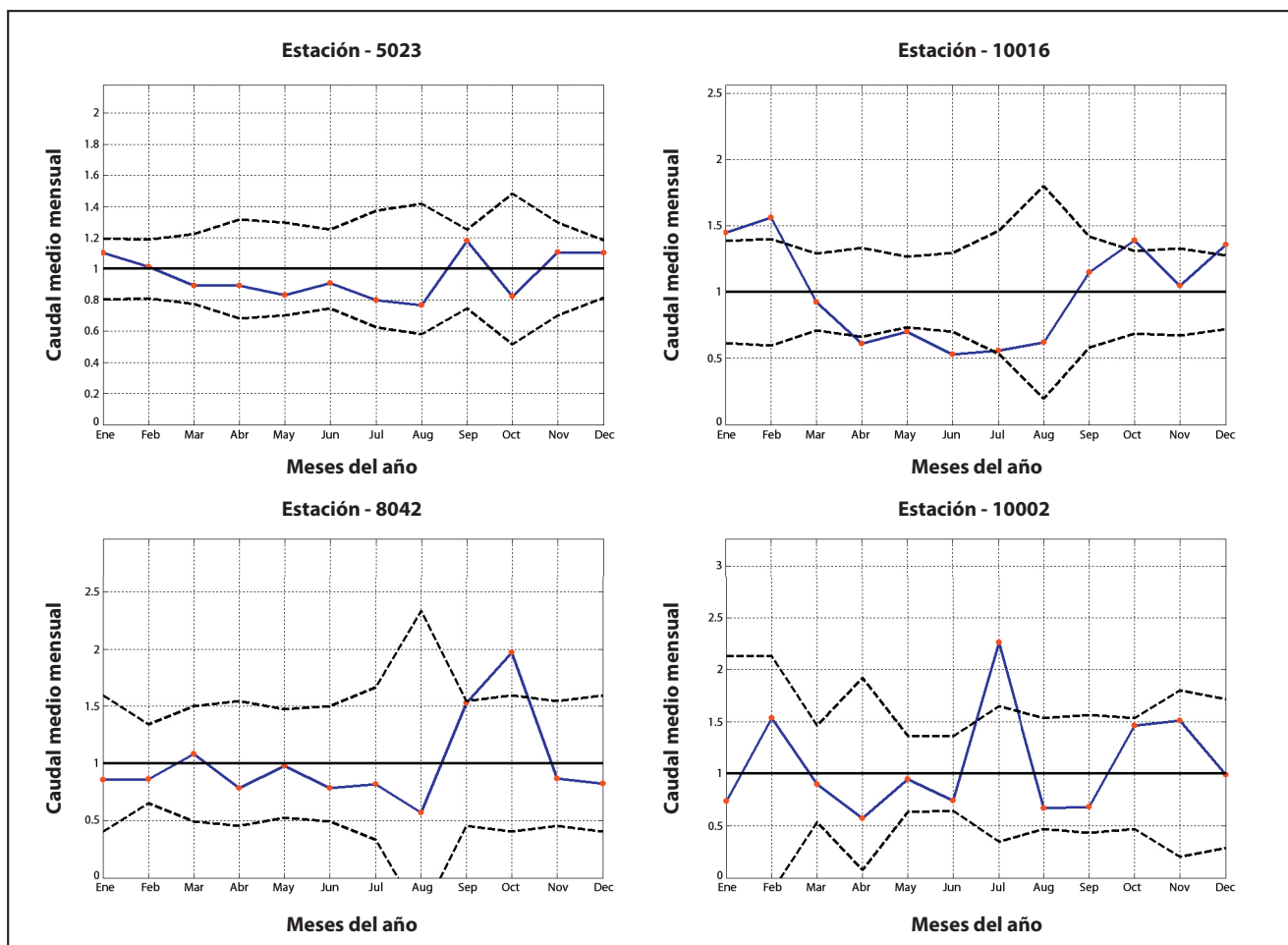


Figura 5. Gráficos con los resultados del test de homogeneidad aplicado a la distribución de probabilidad de la magnitud de los caudales punta superiores al umbral.

han expresado de forma adimensional los datos dividiéndolos por la media de todos los eventos registrados en la estación.

En la figura 5 se muestran los resultados obtenidos para algunas estaciones de aforos representativas. En cada gráfico se ha representado el valor medio adimensional de todos los caudales registrados en cada uno de los meses del año (mediante un punto rojo), en negro y trazo continuo el valor medio en el año de todos los caudales adimensionales (igual a uno), y en negro y trazo discontinuo los límites de los intervalos de confianza. La anchura de los intervalos es variable según los meses del año puesto que también lo es el número de eventos registrados en cada mes (tamaño n de la muestra).

Como conclusión, la hipótesis de homogeneidad se verifica de manera bastante satisfactoria en la mayoría de las estaciones analizadas (figura 5 – EA 5023), aunque en ocasiones se producen algunas desviaciones puntuales de pequeña magnitud en meses concretos, generalmente en primavera u otoño. No obstante, en algunas estaciones se producen desviaciones de mayor magnitud en los meses de abril y mayo, correspondientes a zonas de montaña con fuerte presencia de nieve (figura 5 – EA 10016). Asimismo, es destacable la desviación marcada que se produce en torno al mes de octubre en estaciones de las regiones costeras del levante y sureste peninsular (figura 5 – EA 8042), que podría estar relacionada con la presencia de eventos de tormenta de carácter convectivo en esa época del año, que dan

lugar a crecidas con caudales muy superiores a los generados durante el resto del año.

Por otra parte, se producen también, en muchas ocasiones, desviaciones relevantes en los meses de verano (figura 5 – EA 10002), aunque en este caso es debido al escaso número de eventos registrados, por lo que las expresiones teóricas empleadas para los intervalos de confianza podrían no ser válidas, ya que el comportamiento de la distribución se aproxima al de una normal de manera asintótica, no siendo válida dicha hipótesis para muestras de pequeño tamaño. En algunos casos concretos ni siquiera se han podido calcular los intervalos de confianza en esos meses del año al no haberse registrado ningún evento.

En consecuencia, aunque no puede extraerse una conclusión definitiva, los modelos de series parciales no homogéneas pueden ser una opción adecuada para el estudio de las avenidas estacionales en muchas situaciones, opción que conllevaría las distintas ventajas expuestas en apartados anteriores. No obstante, existen en algunos casos comportamientos estacionales marcadamente heterogéneos para los cuales no sería adecuada dicha técnica. Se trataría principalmente de cuencas de montaña con importante presencia de nieve, y de zonas costeras del levante y sureste peninsular con influencia de tormentas de carácter convectivo. De esta forma, debe llevarse a cabo un estudio específico para cada zona concreta antes de decantarse por la utilización de esta técnica.

5. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA EL CÁLCULO DE LAS AVENIDAS ESTACIONALES. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Los resultados de los estudios presentados en los apartados anteriores permiten concluir que los modelos estadísticos de series parciales no homogéneas pueden ser una opción adecuada para el estudio de las avenidas estacionales en muchas situaciones. La utilización de este tipo de técnica tendría como ventaja el garantizar la coherencia entre las funciones de distribución estacionales y la anual, así como el evitar utilizar series de datos sesgadas en aquellos casos en los que el fenómeno físico que genera las avenidas no cambia sustancialmente de una estación a otra (pero se presenta con una mayor frecuencia en determinados momentos del año) y, por tanto, no puede tratarse de manera independiente para cada estación. Además, mediante esta técnica las leyes de frecuencia estacionales pueden obtenerse directamente de la anual, por lo que las mejoras que se hayan introducido en el ajuste de ésta última redundarán también en una reducción de la incertidumbre de las leyes de frecuencia estacionales.

En este apartado se propone un procedimiento para el cálculo de las avenidas estacionales en base a esta técnica, ilustrándolo mediante su aplicación a la estación de aforos 3182, situada en el río Alagón, en la región 31 de la cuenca del Tajo (figura 6), con una cuenca vertiente de 426 km².

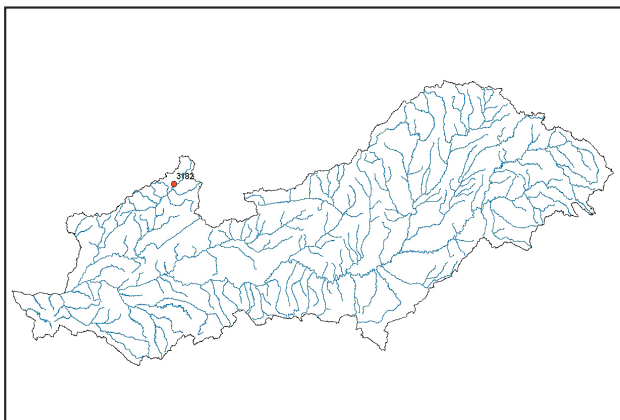


Figura 6. Situación de la estación de aforos 3182 en la cuenca del Tajo.

El primer paso consistiría en seleccionar el conjunto de caudales pico que superan un determinado valor umbral. Como se ha expuesto anteriormente, este umbral debe seleccionarse de manera que se garantice la independencia del conjunto de datos seleccionados, lo cual constituye una hipótesis básica del modelo estadístico. Con objeto de facilitar la selección del umbral, en el apartado 4.1 se ha desarrollado un procedimiento sencillo basado en aplicar la expresión [12] a partir de los valores del factor de frecuencia expuestos en la tabla 1. Dado que habitualmente no se dispone de un registro continuo de caudales instantáneos de suficiente extensión, se propone trabajar con la serie de caudales medios diarios, asumiendo que las conclusiones a los efectos de este estudio no diferirán sustancialmente respecto a las que se obtendrían de trabajar con caudales instantáneos. No obstante, en caso de disponer del registro de

caudales instantáneos, la realización del estudio debe basarse en él, aunque en este caso podría no ser adecuada la aplicación de la expresión [12].

La estación de aforos 3182 dispone de registro desde el año hidrológico 1969-70. La media y la desviación típica de la serie de caudales medios diarios es, respectivamente, de 3.05 y 9.0645. El valor del factor de frecuencia propuesto para la región 31 en la tabla 1 es de 2.47. Aplicando la expresión [12] se llega a un valor del umbral de 25 m³/s. A partir de este umbral se puede llevar a cabo la selección de caudales pico que formarán la muestra (figura 7), obteniéndose un número de excedencias medio por año de 4.04.

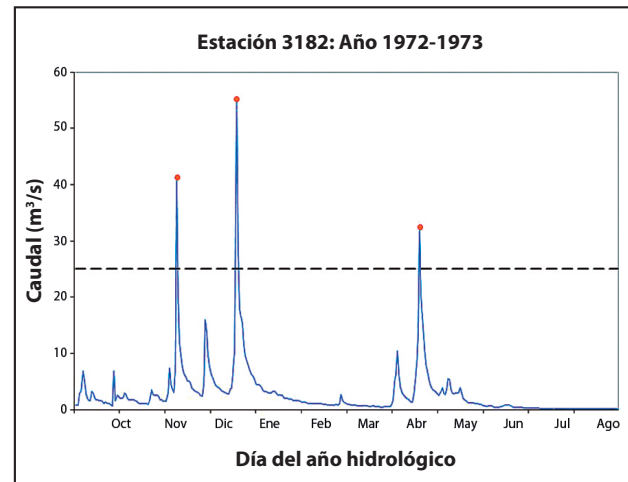


Figura 7. Selección de caudales pico mediante la técnica de máximos sobre un umbral a lo largo de un año hidrológico en la estación 3182 de la cuenca del Tajo.

Dado que el cálculo de las avenidas estacionales mediante modelos de series de duración parcial no homogéneas implica asumir como hipótesis que la distribución que describe la probabilidad de que el caudal de un evento de avenida supere o no un valor determinado es la misma a lo largo de todo el año, es necesario verificar que se cumple dicha hipótesis antes de abordar el estudio. En el caso de que se concluya que esa hipótesis no es apropiada para el caso concreto que se esté considerando no será adecuado realizar el cálculo mediante la técnica de las series parciales, siendo preferible abordarlo de forma independiente para cada periodo estacional. En el apartado 4.3 se ha propuesto un test estadístico para analizar la homogeneidad de la distribución que describe la magnitud de los caudales de avenida, basado en la determinación del intervalo de confianza asociado a la media muestral de los máximos existentes en cada mes. En el caso de que las medias mensuales se encuentren dentro del intervalo de confianza, respecto a la media anual, correspondiente a un determinado nivel de significancia (por ejemplo el 10%) se podrá asumir la homogeneidad de los máximos mensuales. En la figura 8 se muestra el gráfico resultante de aplicar este procedimiento a la estación de aforos 3182. Se observa cómo los valores mensuales permanecen dentro de los intervalos de confianza, por lo que se puede asumir como razonable la hipótesis de homogeneidad. En el caso del mes de agosto no es posible aplicar el test al no haberse registrado ningún evento.

En consecuencia, se puede considerar adecuada en este caso la técnica de las series parciales.

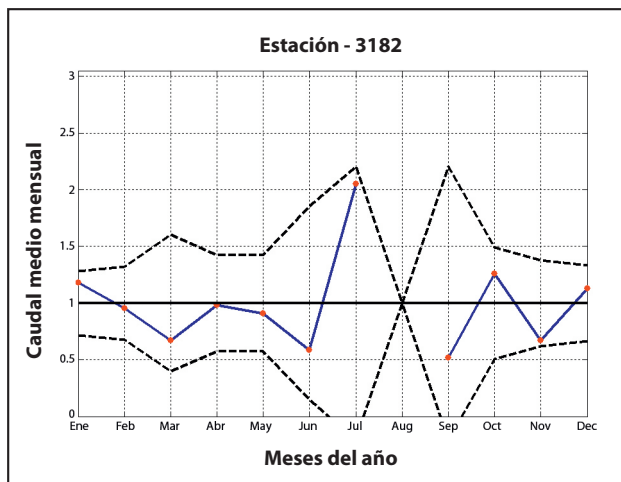


Figura 8. Resultado de aplicar el test de homogeneidad de la distribución de caudales punta superiores al umbral a la estación 3182.

Una de las cuestiones clave a analizar antes de llevar a cabo el cálculo de las leyes de frecuencia estacionales, es determinar los periodos de tiempo dentro del año con un comportamiento diferenciado respecto a la ocurrencia de las avenidas. Con esta finalidad, en el apartado 4.2 se propuso la aplicación de un test estadístico sobre los datos del número medio de eventos mensuales. De manera complementaria se propuso aplicar el test de Ouarda *et al.* [1993]. En la figura 9 se muestra el resultado de aplicar estos tests a la estación 3182. En base a estos resultados se han identificado los periodos estacionales indicados en la tabla 2, junto con su duración y el número medio de eventos correspondiente a cada periodo. Lógicamente, la suma del número medio de excedencias de cada periodo estacional debe ser igual al número medio de excedencias anual, 4.04. Los periodos identificados son muy similares a los obtenidos como promedio para la región 31 (figura 4) y parecidos, aunque con algunas diferencias, a las estaciones climáticas convencionales.

Tabla 2. Periodos estacionales identificados para la estación de aforos 3182

Periodo	Meses	Duración (meses)	Nº medio de excedencias
1	2ª mitad de diciembre, enero y febrero	2.5	2.14
2	Marzo, abril y mayo	3	0.95
3	Junio, julio, agosto, septiembre y 1ª mitad de octubre	4.5	0.14
4	2ª mitad de octubre, noviembre y 1ª mitad de diciembre	2	0.81

Puesto que la aplicación de la técnica de las series parciales al cálculo de las avenidas estacionales asume que la distribución de la magnitud de los caudales es la misma a lo largo de todo el año, variando únicamente de unas épocas a otras la frecuencia de aparición de los eventos, las leyes de frecuencia estacionales pueden obtenerse fácilmente a partir de la ley de frecuencia anual, si se conoce ésta, mediante su desagregación. Esto tiene además la ventaja, como se ha expuesto anteriormente, de que las mejoras que se hayan introducido en el ajuste de la ley de frecuencia anual para reducir la incertidumbre en la estimación de los cuantiles de alto periodo de retorno (regionalización, información histórica) redundarán también en una reducción de la incertidumbre de las leyes de frecuencia estacionales.

En el caso de que la función de distribución anual sea una Gumbel, expresión [20], las funciones de distribución estacionales serán también una Gumbel con parámetro de localización:

$$\xi = x_0 + \alpha \cdot \ln\left(\frac{\lambda_e^i}{\lambda_a}\right) \quad [14]$$

Y parámetro de escala igual al anual. Siendo x_0 y α los parámetros de localización y escala, respectivamente, de la función de distribución anual, λ_a el número medio de eventos por año y λ_e^i el número medio de eventos en el periodo estacional i .

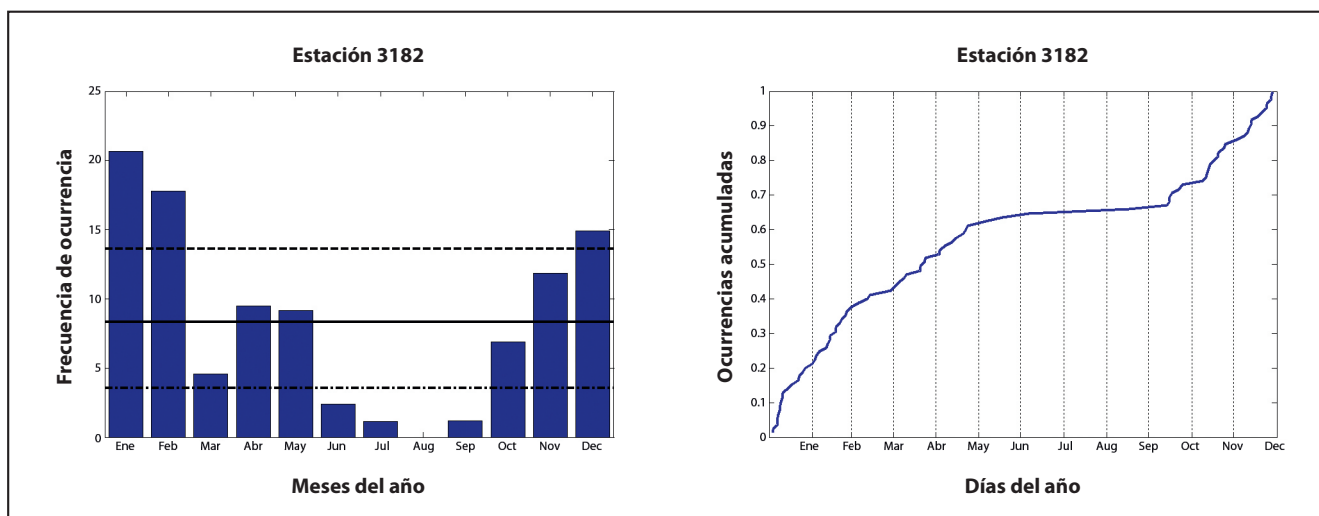


Figura 9. Gráficas obtenidas en el análisis de los patrones de distribución intraanual de las avenidas en la estación de aforos 3182. Izquierda: número medio de eventos mensual (las líneas horizontales indican el número medio de eventos anual y los percentiles del 5% y 95%). Derecha: Test de Ouarda *et al.* [1993].

En el caso de que la función de distribución anual sea una GEV, expresión [22], las funciones de distribución estacionales serán también una GEV con parámetros de localización y escala:

$$\xi = x_0 + \frac{\alpha \left(1 - \left(\frac{\lambda_e^i}{\lambda_a} \right)^{-k} \right)}{k} \quad [15]$$

$$\beta = \alpha \left(\frac{\lambda_e^i}{\lambda_a} \right)^{-k} \quad [16]$$

Y parámetro de forma igual al anual. Siendo x_0 , α y k los parámetros de localización, escala y forma, respectivamente, de la función de distribución anual, λ_a el número medio de eventos por año y λ_e^i el número medio de eventos en el periodo estacional i .

En el caso de la estación de aforos 3182, la función de distribución anual, previamente calculada, es una GEV (figura 10) con los parámetros indicados en la tabla 3. Teniendo en cuenta esta información y los números medios de excedencias anuales y estacionales (tabla 2), se pueden calcular los parámetros de las funciones de distribución estacionales mediante las expresiones [15] y [16] (tabla 3). En la figura 10 se representan las leyes de frecuencia estacionales, quedando éstas por debajo de la anual y proporcionando, por tanto, caudales inferiores para un mismo periodo de retorno. Asimismo, se observa cómo la ley de frecuencia del periodo 3 (meses de verano) proporciona caudales negativos para los periodos de retorno más bajos. Esto es lógico, ya que el rango de variación de la variable aleatoria en el caso de una función GEV es de $-\infty$ a ∞ , y en el caso del periodo estacional 3 la probabilidad de ocurrencia de eventos de avenida es muy baja. A efectos prácticos los caudales negativos deben interpretarse como cero.

Tabla 3. Parámetros de las funciones de distribución anual y estacionales para la estación de aforos 3182

Periodo	Parámetro de localización	Parámetro de escala	Parámetro de forma
Anual	63.43	58.09	-0.13
1	27.94	53.58	-0.13
2	-13.34	48.32	-0.13
3	-94.78	37.95	-0.13
4	-21.11	47.33	-0.13

Sin embargo, si se representan las leyes de frecuencia mensuales de cada periodo estacional junto con la media mensual anual (figura 11), según lo expresado en [3] y [4], se observa cómo la situación cambia siendo la probabilidad de ocurrencia de los caudales por unidad de tiempo mayor a la anual durante el periodo 1, claramente menor durante el periodo 3, y similar al promedio anual durante los periodos 2 y 4, lo que expresa claramente la diferente distribución del riesgo durante el año.

La selección de caudales de diseño estacionales a partir de estas leyes de frecuencia debe hacerse de tal forma que la combinación de las probabilidades

estacionales dé como resultado la anual de periodo de retorno T , y que el reparto de la probabilidad anual entre los distintos periodos estacionales obedezca a criterios lógicos. En el apartado 3 se ha propuesto un criterio para llevar a cabo este reparto, consistente en distribuir la probabilidad de manera homogénea entre todos los meses del año, de tal manera que en ninguna época del año haya un mayor riesgo que en otra, lo que supone trabajar con un caudal de diseño variable a lo largo del año. Esto implica que los periodos de retorno a aplicar a las leyes de frecuencia estacionales vendrían dados por la expresión [11], en función de la duración de cada uno de los periodos estacionales y del periodo de retorno anual T .

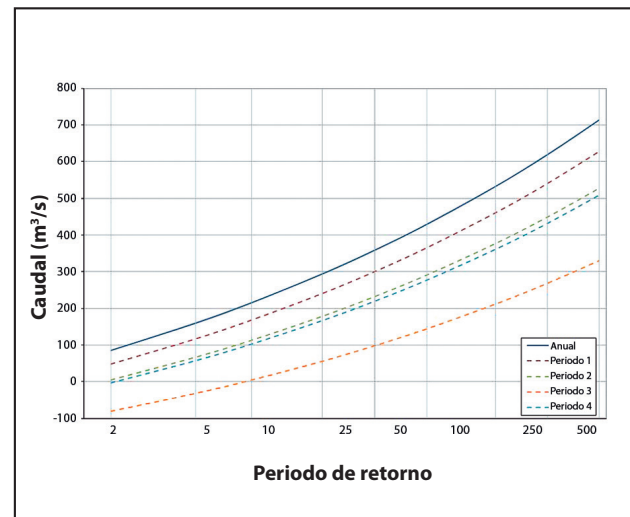


Figura 10. Leyes de frecuencia anual y estacionales en la estación de aforos 3182.

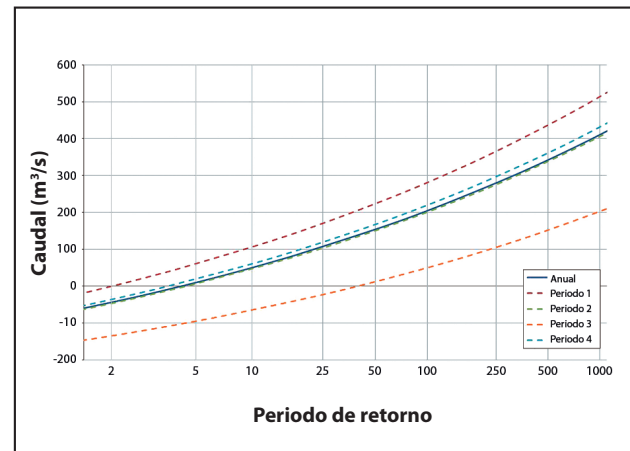


Figura 11. Leyes de frecuencia mensuales, anual y estacionales, en la estación de aforos 3182.

En el caso de la estación 3182 y para, por ejemplo, un periodo de retorno anual de 500 años, se obtendrían los periodos de retorno y caudales estacionales de la tabla 4, cuya selección cumpliría las condiciones expresadas anteriormente. Se observa cómo el caudal correspondiente a los meses de invierno (periodo 1), en los que hay una mayor incidencia de avenidas, es mayor que el anual; mucho menor en los meses de verano (periodo 3) en los que no hay prácticamente incidencias de avenidas, y similares al anual en los otros dos periodos.

Tabla 4. Caudales y periodos de retorno estacionales en la estación de aforos 3182, para un periodo de retorno anual de 500 años

Periodo	Periodo de retorno (años)	Caudal (m ³ /s)
Anual	500	619
1	2398	749
2	1998	613
3	1332	357
4	2997	646

6. CONCLUSIONES

Uno de los aspectos singulares de la hidrología de crecidas aplicada a las presas es la necesidad de determinar la probabilidad intraanual de ocurrencia de las avenidas, tanto para fijar los resguardos que es necesario mantener en el embalse, para garantizar la seguridad de la propia presa o la defensa frente a las avenidas de las poblaciones situadas aguas abajo, como para el análisis de la seguridad hidrológica, principalmente en el caso de presas ya existentes.

Sin embargo, la metodología de cálculo de estas avenidas es compleja y no está del todo clara hoy en día, pudiendo presentar ciertos problemas los procedimientos utilizados habitualmente en la práctica profesional, como la obtención de resultados sesgados, o que la composición de las leyes de frecuencia estacionales no reproduzca la ley de frecuencia anual.

El modelo estadístico de series de duración parcial o de máximos sobre un umbral, no homogéneo, puede ser una herramienta idónea para el estudio de las leyes de frecuencia estacionales, resolviendo gran parte de los problemas que presentan las técnicas habitualmente empleadas. Además, mediante esta técnica las leyes de frecuencia estacionales pueden obtenerse directamente de la anual, por lo que las mejoras que se hayan introducido en el ajuste de ésta última redundarán también en una reducción de la incertidumbre de las leyes de frecuencia estacionales. No obstante, este tipo de modelos sólo es apropiado en aquellos casos en que los mecanismos de generación de las avenidas a lo largo del año sean similares y, por consiguiente, pueda considerarse también similar la magnitud de las avenidas esperables, de tal forma que los datos no puedan tratarse de manera independiente para cada estación. En otro caso, será más adecuado obtener las avenidas estacionales para cada periodo estacional de forma independiente.

Se han realizado estudios dentro de este trabajo con el objetivo de determinar si es adecuada la hipótesis de homogeneidad estadística de los datos de caudal de avenida correspondientes a distintas estaciones del año, asumiendo, por tanto, que corresponden a una misma población estadística. Para ello, se ha desarrollado un test estadístico basado en la determinación del intervalo de confianza (para un nivel de significancia del 10%) asociado a la media muestral de los máximos existentes en cada mes, aplicándolo a las estaciones de aforos de cada una de las regiones estadísticas identificadas en el primer artículo de esta serie (Jiménez *et al.*, 2014). Como conclusión, la hipótesis de homogeneidad se verifica de manera bastante satisfactoria en la mayoría de las estaciones analizadas, aunque en ocasiones se producen algunas desviaciones puntuales en meses concretos, principalmente en cuencas de montaña

con importante presencia de nieve, y en zonas costeras del levante y sureste peninsular con influencia de tormentas de carácter convectivo, por lo que los modelos de series parciales no homogéneos pueden ser una opción adecuada para el estudio de las avenidas estacionales en muchas situaciones.

Otro de los trabajos realizados se ha centrado en la identificación de los periodos estacionales, con un comportamiento diferenciado respecto a la ocurrencia de avenidas, en los que se debe basar el estudio, cuestión de gran relevancia para obtener resultados correctos. Al igual que antes, el trabajo se ha llevado a cabo para cada una de las regiones estadísticas identificadas en el primer artículo de esta serie. Se han aplicado dos procedimientos diferentes que se complementan. Por un lado, se ha desarrollado un procedimiento estadístico sobre los datos del número medio de eventos mensuales, y por otra parte, se ha aplicado el test propuesto por Ouarda *et al.* [1993]. Como resultado, se han obtenido unos periodos estacionales de referencia en cada una de las regiones estadísticas, que pueden ser útiles como primera aproximación en un trabajo concreto, a partir de los cuales se pueden identificar determinados patrones típicos en la geografía nacional (cuencas atlánticas, cuencas mediterráneas, zonas costeras del levante y sureste peninsular, cuencas con una influencia importante del deshielo en primavera, etc.).

También se ha desarrollado en este trabajo un procedimiento sencillo para determinar el umbral de selección de los datos dentro de la técnica de las series parciales, de tal forma que se garantice su independencia, puesto que la determinación de dicho umbral es quizá la mayor dificultad práctica en la aplicación de dicha técnica. Para ello, se ha empleado el criterio del factor de frecuencia (Rosbjerg and Madsen, 1992) que emplea dicho concepto para determinar el umbral a partir de la serie de caudales medios diarios, determinando el valor de dicho factor para cada región estadística. Los valores de factor de frecuencia obtenidos oscilan entre 1.49 y 3.61 dependiendo de la región.

Por otra parte, otro de los problemas que se presenta en la práctica profesional habitual, es que no suele interpretarse adecuadamente la información probabilística derivada de las funciones de distribución estacionales, relacionándola de manera inapropiada con el periodo de retorno anual, lo que puede conducir a emplear la información proporcionada por dichas leyes de frecuencia de una manera errónea e inconsistente con la ley de frecuencia anual. En este sentido, es fundamental tener en cuenta que el periodo de retorno es un concepto anual y, por tanto, no puede aplicarse directamente a las leyes de frecuencia estacionales, ya que éstas recogen sólo la probabilidad de que se supere el caudal de diseño en una parte del año y no en su totalidad.

A la hora de seleccionar los caudales de diseño para cada periodo estacional en que se haya dividido el año es necesario distribuir previamente la probabilidad anual entre las distintas estaciones. Esta distribución no es única, sino que puede llevarse a cabo de múltiples formas diferentes, por lo que es necesario definir un criterio apropiado para realizarla. En este trabajo se propone distribuir la probabilidad de manera homogénea entre todos los meses del año, de tal manera que en ninguna época del año haya un mayor riesgo que en otra. Esto implica trabajar con un

caudal de diseño variable a lo largo del año, teniendo tantos caudales de diseño como periodos estacionales se hayan definido. En base a este criterio, se han desarrollado expresiones matemáticas para obtener los periodos de retorno estacionales a partir de su duración y del periodo de retorno anual.

Por último, se propone un procedimiento para el cálculo de las avenidas estacionales en base a la técnica de las series parciales, ilustrándolo mediante su aplicación a la estación de aforos 3182, situada en el río Alagón, en la cuenca del Tajo. Las leyes de frecuencia estacionales se obtienen fácilmente a partir de la desagregación de la ley de frecuencia anual, en función de la frecuencia media de aparición de los eventos de avenida en cada uno de los periodos.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco del Convenio “Asistencia técnica, investigación y desarrollo tecnológico en materia de gestión del dominio público hidráulico y explotación de obras”, firmado entre la Dirección General del Agua y el CEDEX, y del Acuerdo de encomienda de gestión por el Ministerio de Medio Ambiente al CEDEX para la realización de “Asistencia técnica, investigación y desarrollo tecnológico en materias competencia de la Dirección General del Agua (2007-2011)”.

Celia García Montañés, Directora de Programa, y Lara Incio Caballero, Personal de Investigación, del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, han colaborado en la realización del ejemplo de aplicación expuesto en este artículo.

Apéndice A. El modelo estadístico de series parciales o máximos sobre un umbral

El análisis estadístico de los caudales máximos puede llevarse a cabo básicamente mediante dos técnicas. Aplicando modelos estadísticos de máximos anuales, basados en seleccionar un único caudal de avenida dentro de cada año hidrológico (el máximo caudal producido durante ese año), o mediante modelos de series de duración parcial, también llamados modelos de máximos sobre un umbral. Este último tipo de modelo selecciona dentro de cada año hidrológico todos los caudales correspondientes a puntas de hidrogramas que superan un determinado umbral.

El análisis estadístico mediante series parciales presenta indudables ventajas respecto al modelo tradicional de máximos anuales. Por una parte, se aprovecha mejor la información disponible empleándose en el análisis todos los eventos de crecida ocurridos, aunque haya varios dentro de un mismo año. Por otra parte, no obliga a emplear datos de caudal correspondientes a años muy secos en los cuales puede que no se haya producido ningún evento de crecida. Esta circunstancia es especialmente importante cuando se estudian ríos de zonas áridas o semiáridas. Tiene, sin embargo, como inconvenientes su mayor complejidad analítica, la necesidad de disponer del registro completo de caudales instantáneos a lo largo del año y no sólo del máximo anual y, el más importante, la dificultad para garantizar la independencia de los datos seleccionados. Esta cuestión de la independencia estadística de los datos es crucial pues se encuentra entre las hipótesis básicas del modelo. En los

modelos de series parciales, al seleccionar más de un caudal dentro de un año, podría darse la circunstancia de que se seleccionen caudales muy próximos en el tiempo, por lo que pueden existir dudas sobre su independencia. Es necesario, por tanto, aplicar algún tipo de criterio para realizar la selección de forma que se garantice lo máximo posible la independencia de los datos.

Criterios de selección de los datos

A lo largo del tiempo se han ido desarrollando distintos criterios, cada vez más sofisticados, con ese objetivo (Lang *et al.*, 1999). Estos criterios pueden clasificarse en dos tipos:

- Criterios de independencia. Se seleccionan inicialmente todos los caudales punta que superan el umbral y posteriormente se determina si dos caudales próximos en el tiempo son independientes o no en función de las características físicas de sus hidrogramas, desechando el menor de los dos caudales si resultan ser dependientes. En este grupo figura el criterio del Water Resources Council de los EE.UU. (USWRC, 1981) y el criterio de Cunnane [1979]. Actualmente están en desuso.
- Criterios de selección de umbral. Se centran en determinar el valor del umbral que garantiza que los caudales punta que lo superan son independientes entre sí. Proponen la selección del umbral en base a criterios estadísticos, consistentes en una serie de comprobaciones o tests que verifican si los datos cumplen las hipótesis del modelo empleado. Algunos de los criterios propuestos son:
 - Tests sobre el número medio de eventos por año: Este test propone obtener la gráfica que relaciona el valor del umbral con el número medio de eventos por año. Esta gráfica parte de un valor de uno, para umbrales por debajo del caudal mínimo de la serie, asciende hasta un máximo, y luego desciende hasta un valor de cero para umbrales por encima del caudal máximo de la serie. Se propone tomar un valor del umbral a la derecha del máximo y alejado del mismo. En base a este tipo de estudios, algunos autores (Taesombut and Yevjevich, 1978; Konecny and Nachtnebel, 1985) fijan un número medio de eventos por año para una determinada región geográfica. Lang *et al.* [1999] recomiendan seleccionar un umbral que proporcione un número medio de eventos por año de 2 ó 3, o ligeramente superior. En otros casos, se propone identificar el caudal umbral con el de un determinado periodo de retorno (Dalrymple, 1960; Waylen and Woo, 1983; Irvine and Waylen, 1986).
 - Test de la excedencia media sobre el umbral (Davison and Smith, 1990; Naden and Bayliss, 1993): recomienda tomar el umbral en la zona donde la relación entre el umbral y la excedencia media sobre el umbral es lineal. Este criterio es equivalente a imponer que sea máxima la estabilidad de los parámetros del modelo.

- Test del índice de dispersión (Ashkar and Rousselle, 1987): propone un test para verificar si la llegada de eventos para el umbral seleccionado sigue un proceso de Poisson.
- Test del factor de frecuencia (Rosbjerg and Madsen, 1992): emplea el concepto de factor de frecuencia para determinar el umbral a partir de la serie de caudales máximos anuales.

Descripción del modelo estadístico

Para poder describir la probabilidad de ocurrencia los máximos sobre un umbral es necesario considerar dos procesos diferenciados:

- la ocurrencia de eventos con caudal punta superior al umbral, es decir, el proceso de llegada de eventos
- la descripción de la magnitud de los eventos que han superado el umbral.

La primera parte del modelo suele identificarse con un proceso de Poisson (aunque en ocasiones se emplea una función binomial o una binomial negativa) que describe el número de ocurrencias de un determinado tipo de suceso en un determinado periodo de tiempo, en este caso el periodo de tiempo se suele tomar igual a un año.

$$P(r) = \frac{\lambda^r}{r!} e^{-\lambda} \quad [17]$$

Donde r es el valor de la variable aleatoria y λ un parámetro cuyo valor coincide con el valor medio de ocurrencias en el periodo temporal considerado, es decir, la media de la variable r .

La segunda parte del modelo consiste en una determinada función de distribución que describe la probabilidad de que el caudal de un evento tenga una determinada magnitud, sabiendo que ya ha superado el umbral. Para esta segunda parte del modelo se suelen utilizar las funciones de distribución exponencial [18] o de Pareto generalizada [19]:

$$F(x) = 1 - e^{-\frac{x-x_0}{\alpha}} \quad [18]$$

$$F(x) = 1 - \left[1 - K \left(\frac{x-x_0}{\alpha} \right) \right]^{1/k} \quad [19]$$

Que dependen de los parámetros x_0 y α , y x_0 , α y k , respectivamente.

Lógicamente, existe una relación directa entre las funciones de distribución empleadas en el modelo de series parciales y la función de distribución que describe las probabilidades de los caudales máximos anuales. Una vez ajustado el modelo de series parciales se puede obtener el de máximos anuales y sus correspondientes cuantiles.

En el caso de asumir un proceso de Poisson y emplear una función exponencial para describir la magnitud de los caudales, la distribución anual es una función Gumbel.

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-\xi}{\alpha}}} \quad [20]$$

Siendo el parámetro ξ :

$$\xi = x_0 + \alpha \ln(\lambda) \quad [21]$$

Si la función que se emplea para describir la magnitud de los caudales es una función de Pareto generalizada, la distribución anual es una función de valores extremos generalizada (GEV):

$$F(x) = e^{-\left(1 - k \frac{x-\xi}{\beta} \right)^{1/k}} \quad [22]$$

Donde ξ y β son:

$$\xi = x_0 + \frac{\alpha(1-\lambda^{-k})}{k} \quad [23]$$

$$\beta = \alpha \lambda^{-k} \quad [24]$$

Aplicación a las avenidas estacionales

En aquellos casos en los que hay diferencias marcadas en la distribución de la probabilidad de los caudales de avenida entre unas estaciones y otras, puede ser apropiado utilizar los modelos de series parciales en base a un proceso de Poisson no homogéneo. Esta circunstancia se puede determinar aplicando el test propuesto por Ouarda *et al.* [1993], consistente en representar la variación del número medio de excedencias del umbral a lo largo del año. Cada periodo estacional corresponderá a una parte homogénea del gráfico para la cual la pendiente sea aproximadamente constante.

La función de distribución estacional será la combinación de un proceso de Poisson de parámetro λ_i (igual al número medio de excedencias de la estación) y una función que describa la magnitud de los caudales que superan el umbral (exponencial, Pareto generalizada, ...), que será la misma para las distintas estaciones climáticas. El número medio de excedencias anual (λ_a) será la suma del número medio de excedencias de cada estación.

$$\lambda_a = \sum_i \lambda_i \quad [25]$$

REFERENCIAS

- Ashkar, F. and Rousselle, J. (1987) Partial duration series modeling under the assumption of a poissonian flood count. *Journal of Hydrology*, 90. pp. 135-144.
- Bergström and Ohlsson. (1988) Towards new guidelines on spillway design in Sweden. 16° Congreso Internacional de Grandes Presas. ICOLD. Vol. IV. San Francisco.
- Borgman, L.E. (1963) Risk criteria. *Journal of Waterways Harbors Division*. ASCE. 80. pp. 1-35.
- CEDEX, 2009. Asistencia técnica, investigación y desarrollo tecnológico en materia de gestión de dominio público hidráulico y explotación de obras. Cálculo de la avenida de proyecto y extrema para el diseño de presas. Informe para la Dirección General del Agua del Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.
- Cruise, J.F. and Arora, K. (1990) A hydroclimatic application strategy for the Poisson partial duration model. *Water Resources Research*. 26 (3). pp. 341-442.

- Cunnane, C. (1979) A note on the Poisson assumption in partial duration series models. *Water Resources Research*, 15(2). pp. 489-494.
- Cunnane, C. (1987) Review of statistical models for flood frequency estimation. V.P. Singh (Ed.). *Hydrologic Frequency Modelling*. pp. 49-95.
- Cunnane, C. (1989) Statistical distribution for flood frequency analysis. World Meteorological Organization. Report n° 781. Operational Hydrology Report n° 33.
- Dalrymple, T. (1960) Flood frequency analysis. US Geological Survey water supply paper n° 1534A.
- Davison, A.C. and Smith, R.L. (1990) Models for exceedances over high thresholds. *Journal of Research Statistics Society*. B52 (3). pp. 393-442.
- Duband, D. *et al.* (1988) Evaluation des crues extremes et de la crue de projet par la methode du gradex. 16° Congreso Internacional de Grandes Presas. ICOLD. Vol. IV. San Francisco.
- Duffaut, J. *et al.* (1973) Determinacion des crues de projet. 11° Congreso Internacional de Grandes Presas. ICOLD. Madrid.
- Irvine, K.N. and Waylen, P.R. (1986) Partial series analysis of high flows in Canadian rivers. *Canadian Water Resources Journal*. 11(20). pp. 83-91.
- Jiménez, A. y Mediero, L. (2014) Tratamiento conjunto del caudal y el volumen para la estimación de hidrogramas de diseño de presas. En este número de *Ingeniería Civil*.
- Jiménez, A., Mediero, L. y García, C. (2014) Análisis y selección de modelos estadísticos para el ajuste de la ley de frecuencia de caudales máximos anuales en España. En este número de *Ingeniería Civil*.
- Konecny, F. and Nachtnebel, H.P. (1985) Extreme value process and the evaluation of risk in flood analysis. *Applied Mathematical Modelling*, 9. pp. 11-15.
- Lang, M., Ouarda, T.B.M.J. and Bobée, B. (1999) Towards operational guidelines for over-threshold modeling. *Journal of Hydrology*, 225. pp. 103-117.
- Ljogodt, T. (1998) The new Norwegian regulations and guidelines on dams: dam safety in an uncertain habitat. *Dam Safety*. Balkema. Róterdam.
- Loukola, E. and Maijala, T. (1998) New dam safety guidelines in Finland. Simposio Internacional de Seguridad de Presas. Barcelona.
- Minor, H. (1998) Report of the European R&D working group Flood. *Internacional Symposium on new trends and guidelines on dam safety*. ICOLD. Vol. 1.
- Nachtnebel, H.P. and Konecny, F. (1987) Risk analysis and time-dependent flood models. *Journal of Hydrology*, 91. pp. 295-318.
- Naden, P.S. and Bayliss, A.C. (1993) Flood estimation: peak-over-threshold techniques. Conference of River and Coastal Engineers. University of Loughborough, UK. 5-7 July. pp. 9.1.1.-9.1.18.
- North, M. (1980) Time-dependent stochastic model of floods. *Journal of Hydraulic Division*. ASCE. 106. pp. 649-665.
- Ouarda, T.B.M.J., F. Ashkar, N. El-Jabi (1993) Peaks over threshold model for seasonal flood variations. In: Kuo, C.Y. (Ed.). *Engineering Hydrology (Proceedings of the Symposium of San Francisco, California, 25-30 July)*. ASCE Publication. pp. 341-346.
- Pettersson, L.E. (1998) Flood estimations for dam safety in Norway. *Dam Safety*. Balkema. Róterdam.
- Rasmussen, P.F., Rosbjerg, D. (1991) Prediction uncertainty in seasonal partial duration series. *Water Resources Research*. 27 (11). pp. 2875-2883.
- Reiter, P.H. (1988) Experience in design flood analysis of dams in Finland. 16° Congreso Internacional de Grandes Presas. ICOLD. San Francisco. Vol. IV. pp. 951-969.
- Rosbjerg, D. and Madsen, H. (1992) On the choice of threshold level in partial duration series. XVII Nordic Hydrological Conference, Alta, Norway. Report n° 30. pp. 604-615.
- Saelthun, N.R. (1988) Norwegian procedures for flood estimation, 16° Congreso Internacional de Grandes Presas. ICOLD. San Francisco. Vol. IV. pp. 437-448.
- Saelthun, N.R. (1992) Cálculo de la avenida de diseño en Escandinavia. Selección de la avenida de proyecto- métodos actuales. ICOLD.
- Taesombut, V. and Yevjevich, V. (1978) Use of partial duration series for estimating the distribution of maximum annual flood peak. *Hydrology Paper n° 97*. Colorado State University. Fort Collins.
- Todorovic, P. and Zelenhasic, E. (1970) A stochastic model for flood analysis. *Water Resources Research*, 6(6). pp. 1641-1648.
- Todorovic, P. and Rousselle, J. (1971) Some Problems of Flood Analysis. *Water Resources Research*, 7(5). pp. 1144-1150.
- USWRC (1981) Guidelines for determining flood flow frequency. Bulletin n° 17. U.S. Water Resources Council.
- Waylen, P.R. and Woo, M.K. (1982) Prediction of annual floods generated by mixed processes. *Water Resources Research*. 18(4). pp. 1283-1286.
- Waylen, P.R. and Woo, M.K. (1983) Stochastic analysis of high flows in some central British Columbia rivers. *Canadian Journal of Civil Engineers*. 10(2). pp. 639-648.