

Diseño hidrológico de alto período de retorno mediante generación sintética de eventos de crecida.

Félix Francés, Rafael García Bartual, Gianbattista Bussi, José Luis Salinas y Estefanía Fernández

Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (IIAMA). Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n 46022 Valencia.

ffrances@hma.upv.es

1 Introducción

El concepto de “Avenida de Proyecto” se basa a su vez en una “Tormenta de Diseño” con una asignación de probabilidad a partir del total de precipitación acumulada. Como se analiza en otra comunicación de este congreso, el principal problema del concepto de “Tormenta de Diseño” es la pobre representación de la estructura espacio-temporal de las tormentas reales, que da lugar a una incertidumbre adicional en la estimación de cuantiles de crecidas, inasumible el caso de cuantiles de alto período de retorno. Adicionalmente, hay que decir que en Estadística no tiene sentido la asignación de una probabilidad de no excedencia a un proceso multivariado, como lo es un hietograma o un hidrograma. Por tanto, en realidad no es correcto hablar de probabilidad de excedencia de la Avenida de Proyecto y similares.

Dentro del Plan de Gestión del Riesgo de Inundación de las comarcas de la Marina Alta y de la Marina Baja (en la provincia de Alicante), nuestra propuesta metodológica para resolver los problemas anteriores debe considerarse como innovadora y se basa en los siguientes puntos fundamentales:

- i. Una cuidadosa estimación de la frecuencia de las precipitaciones diarias máximas anuales, mediante un análisis regional que cubrió las dos comarcas alicantinas.
- ii. Dada la escasa existencia de tormentas históricas registradas con suficiente grado de precisión temporal, se recurrió a la construcción de un modelo estocástico de tormentas y a la generación sintética de un número elevado de eventos.
- iii. Se implementó un modelo hidrológico distribuido, con una calibración y validación a escala de evento excelentes. Para poder tener en cuenta la influencia del estado de humedad inicial del suelo en los eventos sintéticos, se implementó este modelo también a escala diaria.
- iv. Para la asignación de la probabilidad de ocurrencia de la variable de interés (en este trabajo, el nivel máximo de crecida en un embalse), se utilizó un modelo estadístico multivariado.

2 Análisis regional de la precipitación diaria máxima anual

Para conseguir la máxima fiabilidad en el análisis de la frecuencia de las precipitaciones diarias máxima anuales se ha recurrido a un análisis regional. Se ha comprobado que el conjunto de estaciones de las dos comarcas presentan un comportamiento homogéneo en el coeficiente de variación, por lo que se han podido tratarse como una única región. El total de “años equivalentes” de la serie regional es de 1054 que contrasta fuertemente frente a una longitud máxima de 48 años en caso de realizar exclusivamente análisis locales. El software utilizado para la estimación de los parámetros de los distintos modelos estadísticos ha sido AFINS (de libre distribución).

Para la selección del mejor ajuste regional, a la vista de los buenos resultados obtenidos por un lado, por el método de la variable índice para las funciones GEV, SQRT-ET y TCEV y por el otro, para el ajuste resultante de aplicar el método de regionalización propio de la TCEV (con regionalización mediante el ajuste local de una función Gumbel) se llevó a cabo un estudio comparativo de los mismos.

Se seleccionó la estación pluviométrica de Pego Convento (AEMET) por ser la de mayor longitud de registro situada dentro de la comarca de la Marina Alta (44 años completos) y se han obtenido los cuantiles locales de precipitación máxima diaria para diversos periodos de retorno a partir de cada uno de los ajustes regionales obtenidos, como se muestra en la Figura 1.

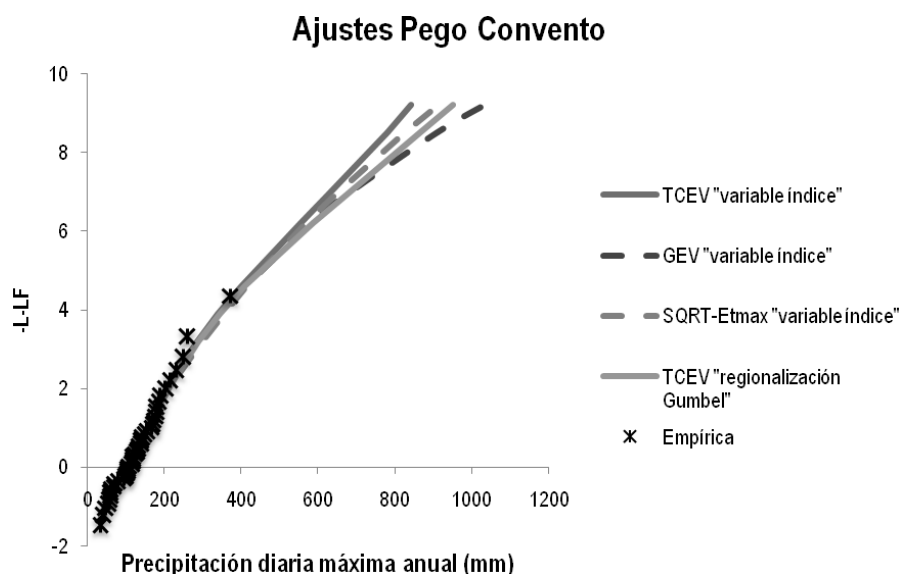


Figura 1. Ajustes locales obtenidos en la estación pluviométrica Pegu Convento (AEMET) para diversos modelos regionales.

De los resultados se deduce que los cuatro ajustes analizados son excelentes y con todos se obtienen prácticamente los mismos cuantiles. Sin embargo, el número de valores extraordinarios que consigue separar el método de regionalización TCEV es mayor que con la variable índice (5 frente a 2). Lo que añadido al sentido físico de la existencia de dos poblaciones diferenciadas (lluvias ordinarias y extraordinarias) hace que finalmente se seleccione la función TCEV (Rossi et al., 1984) con regionalización Gumbel, que en general, es el más adecuado para regiones del Mediterráneo Occidental (Francés, 1998).

3 Generación de tormentas sintéticas

3.1 Modelo estocástico de generación

Para la generación de tormentas sintéticas se emplea un modelo estocástico espacio-temporal. Esto es factible hoy en día gracias a la información disponible procedente tanto de las redes automáticas de información hidrológica (SAIH) como de la red de radares meteorológicos, la cuales permiten una adecuada estimación de parámetros y una correcta caracterización de las propiedades estructurales internas del campo de intensidad de precipitación $\zeta(x, y, t)$ durante el evento lluvioso. En esta investigación se emplea el modelo estocástico propuesto por (Salsón y García-Bartual, 2003), construido específicamente para la reproducción de los patrones espacio-temporales más característicos propios de las tormentas extremas de carácter convectivo en regiones mediterráneas. Con ello, se proponen una diversidad de escenarios de lluvia posibles, todos ellos sujetos a una asignación de probabilidad. El periodo de retorno T es estimado a posteriori mediante un análisis estadístico descriptivo de cada uno de los eventos sintéticos seleccionados, y debidamente contrastado con el marco probabilístico definido en el análisis regional previo de los máximos anuales de P_D . En total fueron generados 368 escenarios de lluvia sobre las comarcas geográficas objeto del estudio.

3.2 Estimación de parámetros

Los parámetros del modelo se estiman de forma que se reproduzcan ciertas características estadísticas de los registros históricos, como son las funciones de correlación espacial y temporal empíricas, ó la función de evolución temporal del evento normalizada. En la Figura 2 se muestra un ejemplo.

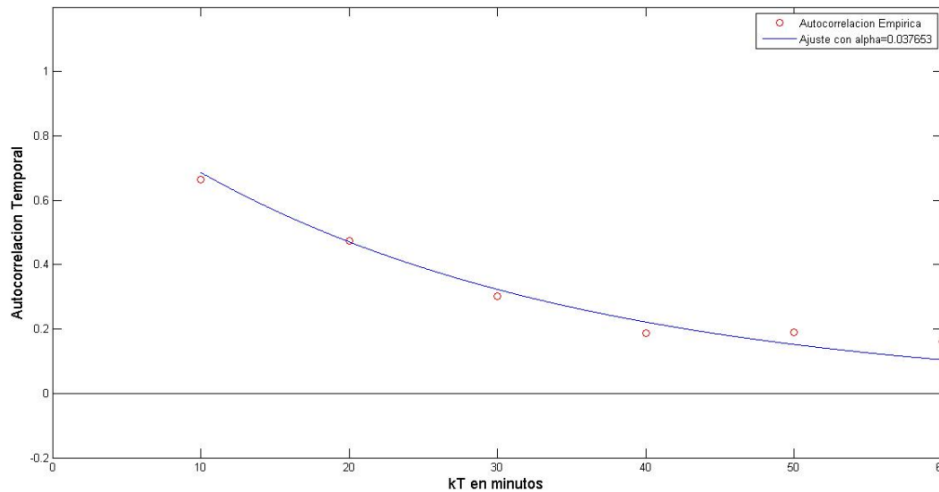


Figura 2. Autocorrelación temporal empírica – evento SAIH 11-12 nov 1999. Estación: Isbert.

3.3 Asignación de periodo de retorno

Como se señaló anteriormente, en estadística no tiene sentido la asignación de probabilidad de no excedencia a un proceso multivariado. De modo que la asignación de periodo de retorno a una tormenta multidimensional definida en el espacio-tiempo tropieza de entrada con un problema puramente conceptual. Un evento de lluvia registrado por el SAIH da lugar a cientos ó miles de valores de intensidad de precipitación en intervalos 5-minutales, y repartidos sobre una extensión espacial importante. No es una variable aleatoria única, sino más bien un proceso multidimensional. Para un evento de lluvia sintético, el problema es exactamente el mismo.

La estrategia seguida aquí para la asignación de un periodo de retorno T se basa en la reducción de la tormenta, ya sea histórica ó sintética, a un único valor representativo de lluvia acumulada que denominamos “precipitación diaria equivalente puntual”, $P_{D\ eq}$ (mm). Este valor puede entonces introducirse en la función de distribución de extremos derivada del análisis estadístico regional, y proporcionar la probabilidad de no-excedencia asociada.

La formulación propuesta se resume en las siguientes dos expresiones:

$$P_{D\ eq} = \frac{24 \cdot I_x}{ARF} \quad T = \frac{1}{1 - F(P_{D\ eq})}$$

Previo a la aplicación de la fórmula, deben resolverse dos cuestiones relacionadas con la climatología de la región y las características de la cuenca. En primer lugar, el factor de reducción areal ARF.

En segundo lugar, el intervalo de tiempo “x” en horas que verifica $I_x \approx \frac{P_D}{24}$, donde I_x es la intensidad promedio máxima anual para un intervalo de duración “x”, y P_D es la máxima anual de precipitación diaria.

A falta de estudios específicos en la zona, pueden tomarse los valores propuestos por J.R.Temez:

$$ARF = 1 - \frac{\log A}{15}; \quad x = 28 \text{ h}, \text{ siendo } A \text{ el área de la cuenca en km}^2.$$

En el caso de la investigación planteada se llevaron a cabo análisis pormenorizados, tanto de registros históricos de tormentas extraordinarias, como de información de lluvia de alta resolución procedente de la red SAIH (pluviómetros de Alcalalí, Font d’en Carros, Gallinera e Isbert). Para la comarca de la Marina Alta, los resultados de la investigación condujeron a la siguiente propuesta:

$$ARF = \frac{1}{1 + \lambda_1 \cdot A^{\lambda_2}} \quad ; \quad \lambda_1 = 0.00783; \lambda_2 = 0.65676 \quad ; \quad x = 29^h 10^{min}$$

A continuación se expone el criterio seguido para definir el valor de I_x . Primeramente se calcula el hietograma promedio areal sobre la subcuenca, con un intervalo de agregación temporal prefijado (por ejemplo, $\Delta t = 10 \text{ min}$

ó $\Delta t = 30$ min). En la Figura 3 se muestra como ejemplo la tormenta sintética # 106, sobre la subcuenca vertiente del río Girona hasta el embalse de Isbert ($A=55.10 \text{ km}^2$).

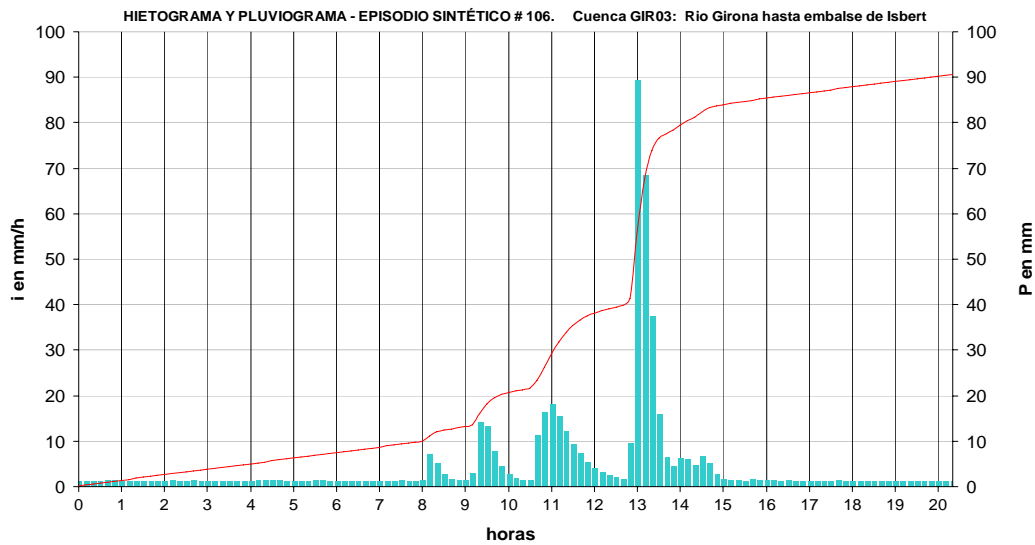


Figura 3. Hietograma promedio areal (evento sintético # 106), subcuenca GIR03.

En el caso de una tormenta histórica, será necesario aplicar algún procedimiento adecuado de interpolación espacial (interpolación óptima, kriging, ponderación inversa a la distancia al cuadrado). Para el caso de un evento sintético de alta resolución espacial como el del ejemplo (resolución espacial $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ en el caso de esta aplicación), no se hace necesaria la interpolación espacial previa, y bastará con el cálculo de la media aritmética de las intensidades. A continuación se extrae el intervalo de duración “x” más lluvioso, y la correspondiente intensidad promedio I_x (mm/h), obteniéndose finalmente el valor P_{Deq} con la fórmula indicada.

Con ello, la totalidad de los eventos sintéticos generados con el modelo estocástico representan escenarios posibles de lluvia espacio-temporal definida con elevada resolución espacial y temporal. Y lo más importante, quedan perfectamente encuadrados en un marco probabilístico riguroso y representativo, derivado del análisis estadístico regional de máximas anuales de precipitación diaria.

4 La modelación hidrológica con TETIS

4.1 Implementación del modelo de evento

El modelo hidrológico conceptual de parámetros físicos y distribuido en el espacio TETIS (Francés et al., 2002, Francés et al, 2007) ha sido calibrado y validado en las estaciones de aforo disponibles a escala de evento ($\Delta t = 10$ minutos), utilizando como datos de input la precipitación de los pluviómetros SAIH (datos desde 1989 hasta hoy). La calibración y validación del modelo ha sido satisfactoria, obteniendo índices de Nash-Sutcliffe superiores a 0.8 tanto en calibración (Figura 4) como en casi todas las validaciones espacio-temporales.

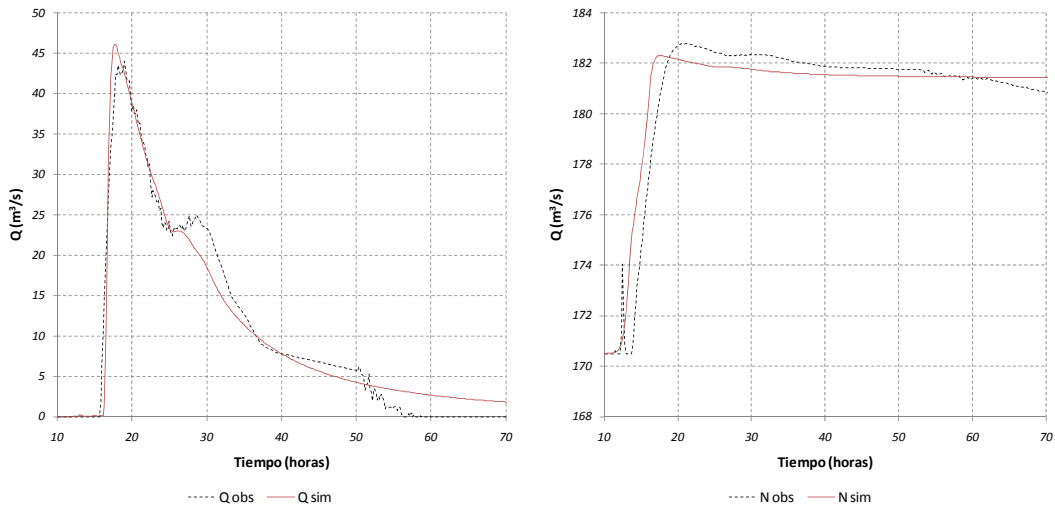


Figura 4. Hidrograma simulado y observado del evento de Abril 2003 en la estación SAIH “Isbert” (caudal de salida) y variación de la cota de embalse simulada y observada.

4.2 Análisis del estado de humedad inicial

Dado que el objetivo de la modelación hidrológica es la simulación de tormentas sintéticas independientes, no queda definido el estado de humedad inicial. Por esta razón, el modelo TETIS ha sido calibrado y validado también a escala de simulación histórica ($\Delta t = 1$ día). En el caso de las cuencas de la Marina Alta, se utilizó para la calibración y validación del modelo diario la estación de aforos de Gallinera, por disponer de mejores datos a escala diaria que el embalse de Isbert.

Una vez ajustado el modelo diario, se han reproducido las variaciones del estado de humedad del suelo desde 1943 hasta hoy, utilizando como input la precipitación diaria registrada por AEMET en las estaciones presentes en la cuenca de la Rambla Gallinera. La Figura 5 recoge los resultados de estados de humedad inicial en el suelo para los eventos generados con un valor superior al umbral establecido de 30 mm/día. A partir de la serie de estados de humedad del suelo en la cuenca, a través de un análisis de frecuencia, se han determinado tres estados de humedad inicial (es decir anterior a un evento de precipitación) representativos del comportamiento hidrológico de la cuenca (10%, 40% y 80% de humedad del suelo) y se les ha asignado una probabilidad de ocurrencia.

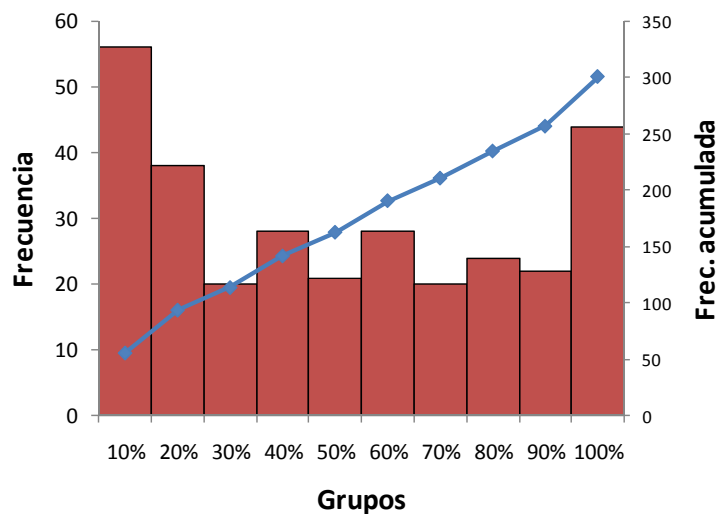


Figura 5. Histograma y distribución acumulada de la humedad antecedente en el suelo obtenidos por simulación continua en la Rambla Gallinera.

4.3 Simulación de los eventos sintéticos

Finalmente en lo que respecta a la modelización hidrológica, el modelo TETIS se ha empleado para simular la transformación lluvia – escorrentía de los 368 eventos sintéticos disponibles, utilizando como estado inicial de humedad cada uno de los tres estados determinados anteriormente, obteniendo así 1104 hidrogramas por cada uno de los más de 150 puntos de simulación hidrológica (entradas de los modelos hidráulicos, puntos problemáticos, infraestructuras hidráulicas, embalses, etc.).

5 Asignación de probabilidad

Dado que la generación de tormentas sintéticas no asigna fecha a cada una de ellas, es necesario un tratamiento estadístico final para la obtención adecuada de probabilidad de no excedencia a cualquiera de las variables de interés: caudal pico de entrada a la zona de inundación o a una presa, caudal pico de salida de la zona de inundación, nivel máximo alcanzado en la zona de inundación o en la presa, ... Para ello es necesario el considerar un modelo estadístico trivariado entre la precipitación diaria máxima anual, el estado de humedad inicial de la cuenca y la variable de interés, del que se conoce las funciones de distribución marginales de las dos primeras variables y sus correlaciones.

A partir de conceptos elementales de probabilidad, es posible la estimación de la probabilidad empírica de la distribución marginal de la variable de interés a partir de los valores generados sintéticamente. La ecuación final es la siguiente:

$$F_X(a) \approx \sum_{j=1}^3 \left\{ P_j \sum_{i=0}^{\infty} \frac{n_{ij}(a)}{N_{ij}} [F(R_{i+1}) - F(R_i)] \right\}$$

donde P_j corresponde a la probabilidad de que los almacenamientos en el modelo se encuentren en un estado de humedad j ; $n_i(a)$ = número de observaciones menores o iguales que a , dentro del intervalo i , que cubre el rango $[R_i, R_{i+1}]$ y N_i = número total de observaciones dentro del intervalo i . La Figura 6 representa los resultados obtenidos en uno de los 150 puntos de simulación, en este caso, en un posible escenario futuro de una presa en las cercanías de la actual presa de Isbert en el río Girona.

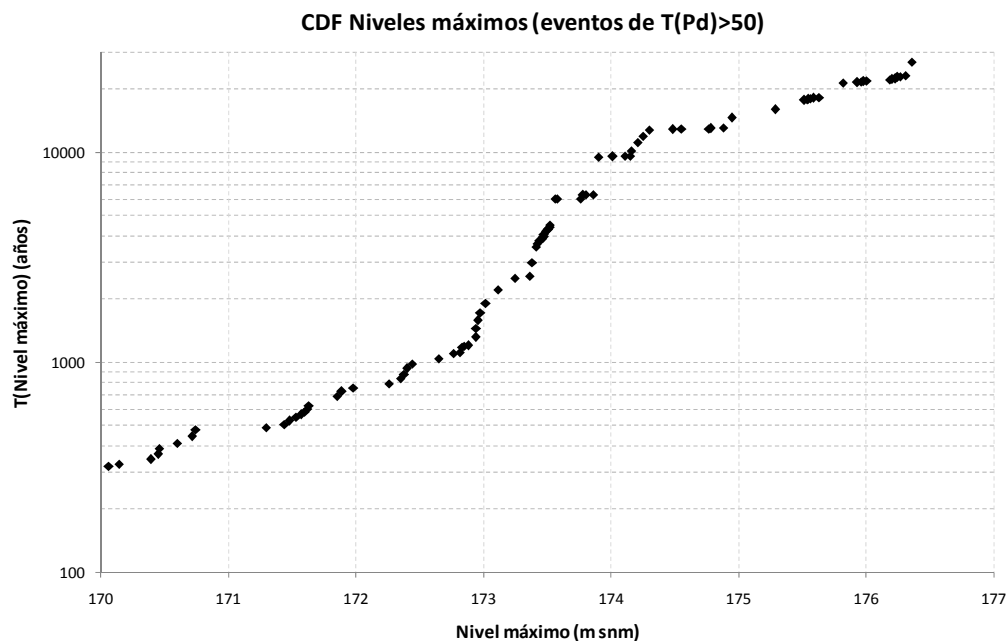


Figura 6. Probabilidad de no excedencia del nivel máximo anual en una presa ficticia en la cuenca alta del río Girona.

6 Conclusiones

Uno de los objetivos más habituales de los estudios hidrológicos es la realización del análisis de la frecuencia de las avenidas en un punto de un río. Este análisis es utilizado en el diseño de obras hidráulicas (aliviaderos de presas, túneles de desvío, encauzamientos, etc.), sistemas de drenaje transversal de infraestructuras lineales (puentes y alcantarillas), zonificación de riesgos de inundación, etc. El análisis de la frecuencia de las avenidas consiste básicamente en obtener la relación entre los caudales de avenida (o cuantiles) y su probabilidad de no excedencia (o período de retorno), aunque en la mayor parte de los casos basta con obtener los caudales correspondientes a uno pocos períodos de retorno.

En muchas de las situaciones descritas, las implicaciones socioeconómicas son enormes, por lo que es exigible la mayor precisión posible: un error por defecto da lugar a un aumento del riesgo realmente asumido, mientras que si el error es por exceso, lo que se está provocando es un incremento innecesario del coste del proyecto.

La metodología tradicional basada en el concepto de Avenida de Proyecto tiene suficientes errores conceptuales como para que se tienda a su abandono, en la medida que sea deseable una máxima precisión en los cálculos. En el presente artículo hemos demostrado que es posible desarrollar metodologías que resuelvan dichos errores conceptuales.

7 Referencias

- Francés, F. (1998). Using the TCEV distribution function with systematic and non-systematic data in a regional flood frequency analysis. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, v 12 (4), 267-283.
- Francés, F., I. Vélez, J. Vélez and M. Puricelli (2002). Distributed Modeling of Large Basins for a Real Time Flood Forecasting System in Spain. In: *Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference*, Las Vegas, USA.
- Francés, F. I. Vélez and J. Vélez (2007). Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 332, 226-240.
- Rossi, F., Fiorentino, M., and Versace, P. (1984). Two-Component Extreme Value Distribution for Flood Frequency Analysis. *Water Resour. Res.*, 20 (7), 847-856.
- Salsón, S. y R. García-Bartual (2003). A space-time rainfall generator for highly convective Mediterranean rainstorms. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 3, 103-114.