

# ENFOQUE MULTIVARIADO PARA EL ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE CRECIDAS EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS CON ESCASEZ DE DATOS HIDROLÓGICOS

Sergio Salazar<sup>1</sup>, Jose Luis Salinas<sup>2</sup>, Rafael Garcia-Bartual<sup>3</sup> y Félix Francés<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia, Carrera 45 # 26-85, 111321 Bogotá D.C., Colombia.

<sup>2</sup>Vienna University of Technology, Karlsplatz 13, 1040 Vienna, Austria.

<sup>3</sup>Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España.

E-mail: ansalzarga@unal.edu.co, salinas@hydro.tuwien.ac.at, rgarciab@hma.upv.es, ffrances@hma.upv.es

## Introducción

En las ciencias hidrológicas, el análisis de frecuencia de crecidas está relacionado con la necesidad de obtener cuantiles para diferentes períodos de retorno con múltiples aplicaciones como el diseño de obras de infraestructura hidráulica o la gestión del riesgo por inundaciones. La estimación dependerá de la disponibilidad de información para la utilización de enfoques estadísticos o probabilísticos, determinísticos o una mezcla de los anteriores.

En los casos de inexistente o pocos datos hidrológicos (e.g. series temporales con pocos años de registros o pocas estaciones dentro de la cuenca hidrográfica), los enfoques se basan, en general, en la utilización de modelos lluvia-escorrentía a escala de evento asumiendo la hipótesis de igualdad en los períodos de retorno entre la lluvia y los caudales generados por ésta. Tal enfoque tiene múltiples limitaciones tales como la escogencia del hietograma de diseño o la influencia de las condiciones de humedad antecedente del suelo.

Para resolver tales limitaciones, en este trabajo se presenta un enfoque basado en la consideración de los principales procesos que pueden estar influenciando la respuesta hidrológica e integrando el conocimiento de éstos mediante un enfoque estadístico multivariado aplicado en un caso de estudio.

## Caso de estudio

En las cuencas hidrográficas del litoral mediterráneo español, son típicos los sistemas fluviales efímeros conocidos como “barrancos” o “ramblas”, en los cuales las inundaciones predominantes son del tipo relámpago, principalmente por sus características físicas y por la tipología de las tormentas que en esa región ocurren. Dentro del régimen pluviométrico mediterráneo, las tormentas convectivas, de alta intensidad y muy localizadas son las de mayor influencia en el comportamiento hidrológico. En general, estos sistemas tienen un área de drenaje pequeña (<1000km<sup>2</sup>), tienen fuertes pendientes y amplios valles aluviales, cauces cortos y trezados, lechos rocosos y secciones transversales estrechas en cabecera y amplias en la desembocadura; la vegetación es poco densa, los suelos poco profundos con sustratos permeables, encontrándose en ocasiones formaciones kársticas. En este trabajo se ha considerado como caso de estudio representativos de estos sistemas la Rambla del Poyo, la cual hace parte de la demarcación de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ), está localizada en la provincia de Valencia, España, y drena en dirección Noroeste-Sureste hasta L'Albufera (Figura 1)

Como se aprecia en la Figura 1, la parte baja de la cuenca está muy cerca del costado occidental de la ciudad de Valencia. En su llanura de inundación se encuentra parte del cinturón metropolitano de esta ciudad capital y están situadas las comarcas conocidas como L'Horta Sud, territorio que ha sido aprovechado históricamente para la agricultura y en la cual se han presentado varias inundaciones (cf. Salazar, 2013).

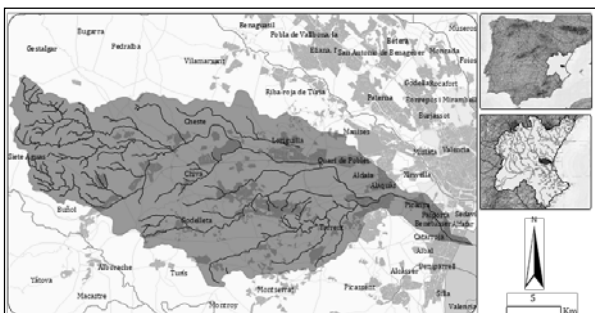


Figura 1.- Localización de la cuenca de la Rambla del Poyo.

En el caso de la Rambla del Poyo, se han señalado varios factores como determinantes de las avenidas: i) las tormentas convectivas (cf. Salsón y García-Bartual, 2003) y su variabilidad espacio-temporal; ii) las características espaciales de la cuenca (e.g. geomorfología, usos y coberturas del suelo, suelos, geología) las cuales varían ampliamente al interno del área de drenaje; iii) las condiciones de humedad antecedentes del suelo (“CHAS” en adelante), debido a que éstas controlan la capacidad de infiltración local, y puede ser uno de los factores más importantes influenciando la estimación de la frecuencia de las crecientes (cf. De Michele y Salvadori, 2002).

## Metodología

Debido a los cortos registros de alta resolución espacio-temporal, de precipitación y caudal, que en general se encuentran en este tipo de estudios, es necesario expandir la información causal, respecto de una amplia variedad de tormentas extremas, sus posibles estados precedentes de humedad del suelo, así como las características de la cuenca. Sobre esta base, la integración de la modelación de tormentas con la modelación hidrológica distribuida juega un papel central debido a que permite la integración de estos factores, teniendo en cuenta su variación espacial y temporal.

La Figura 2 muestra, de manera esquemática, la secuencia de pasos a seguir dentro de la metodología de trabajo propuesta. En primer lugar, es necesario recabar la información que se requiere para cada uno de los métodos involucrados en la estimación para delimitar las condiciones de contorno y las hipótesis de partida en los modelos. Igualmente, tal información de entrada sirve, donde aplica, para la validación de los resultados de las estimaciones, las cuales son representadas mediante el elemento V en la Figura 2.

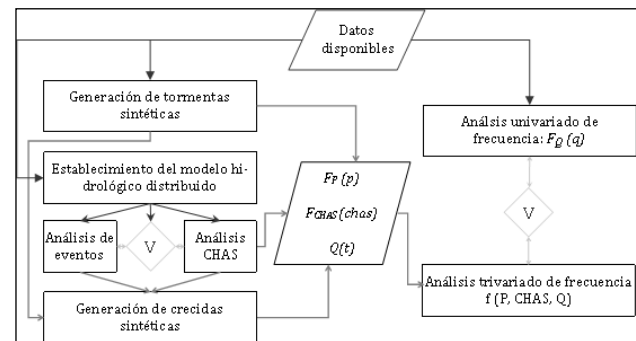


Figura 2.- Esquema del enfoque metodológico propuesto.

En la implementación del enfoque metodológico se realizan tareas tales como: i) generación de tormentas sintéticas y estimación de su función de distribución de probabilidad; ii) establecimiento del modelo hidrológico, a escala diaria y de evento, desde donde se obtienen, tanto las CHAS y su función de distribución de probabilidad, como también el modelo evaluado para simular eventos extremos en la cuenca; iii) generación de avenidas sintéticas, sobre la base de los resultados de las fases anteriores; iv) análisis trivariado de frecuencia teniendo en cuenta: los caudales máximos obtenidos en la generación de avenidas sintéticas y las funciones de distribución de probabilidad, de las tormentas, y de las CHAS.

## Resultados y discusión

Se utilizaron un conjunto de 100 tormentas sintéticas, generadas con el modelo RAINGEN (Salsón y García Bartual, 2003). Estas 100 tormentas han sido seleccionadas, de un conjunto de 217 tormentas

generadas a una discretización temporal de 1 minuto, atendiendo a un pormenorizado análisis de aspectos como: los hietogramas areales y puntuales, la curva intensidad-duración, las intensidades máximas alcanzadas, así como los acumulados. Este proceso de filtrado ha permitido encontrar un óptimo, de discretización temporal y de número de tormentas, que disminuye el costo computacional, sin ir en detrimento del requerimiento de tener una amplia representatividad de la variabilidad espacio-temporal de la intensidad de las tormentas, lo cual debe estar acorde, tanto con los patrones observados en los eventos en la región, así como también, a los patrones conceptuales analizados en la literatura (cf. Salsón y García Bartual, 2003).

Debido a que cada tormenta sintética, definida por intensidades con una alta resolución espacio-temporal, no es directamente reducible a un único valor cuantificando su magnitud, se debió establecer un método que permita asignar el período de retorno a cada tormenta. La característica de la tormenta que se asumió representativa para dicha estimación es la precipitación máxima diaria, lo cual permite una asignación probabilística, acorde con las observaciones disponibles para el caso de estudio, y desde un contexto de análisis regional de frecuencia. En primer lugar, la estimación de la magnitud se realizó siguiendo el concepto de precipitación diaria equivalente puntual (Pd eq. Puntual). Una vez definida la característica de la tormenta, sujeta al análisis de frecuencia, el siguiente paso fue el establecimiento de su función de distribución, que en este caso se utilizó la sugerida por los resultados del estudio "Máximas lluvias diarias en la España Peninsular" (cf. Ferrer y Ardiles, 1994). Los parámetros de la función fueron actualizados con la información disponible en la región (datos diarios de 1950-2003) obteniéndose la probabilidad de no-excedencia de la Pd. Eq. Puntual y el período de retorno para cada una de las tormentas sintéticas.

Se ha utilizado un enfoque de modelación distribuida basándose en la herramienta TETIS (ver Francés et al., 2007). A partir de la implementación del modelo, y de su evaluación con la información de series históricas, se pudieron determinar los procesos hidrológicos predominantes a escala de evento y continua, siendo las evaluaciones satisfactorias de acuerdo con los estándares de evaluación presentados por Moriasi et al. (2007).

Los resultados de la modelación continua permitieron evaluar las CHAS a los eventos históricos de crecidas. A partir de éstos, se han determinado dos estados promedio de CHAS, con su respectiva asignación de probabilidad: i) estado seco: CHAS iguales al 10% del contenido de humedad del suelo con una probabilidad de presentación de 0.4; ii) estado húmedo: CHAS iguales al 70% del contenido de humedad del suelo con una probabilidad de presentación de 0.6. Dichos valores del contenido de humedad del suelo, previo a cada evento, fueron utilizados como valor de entrada en la modelación a escala de evento junto con las tormentas sintéticas. Finalmente, se obtuvieron 100 hietogramas sintéticos por estado de humedad (200 en total).

La metodología de análisis de frecuencia, para los caudales máximos obtenidos en la fase anterior, consiste en la estimación del período de retorno de la avenida teniendo en cuenta las distribuciones de probabilidad de las tormentas sintéticas y de las CHAS. Los resultados encontrados fueron comparados con la función de distribución empírica obtenida desde los datos de la única estación de aforos disponible (ver Figura 3).

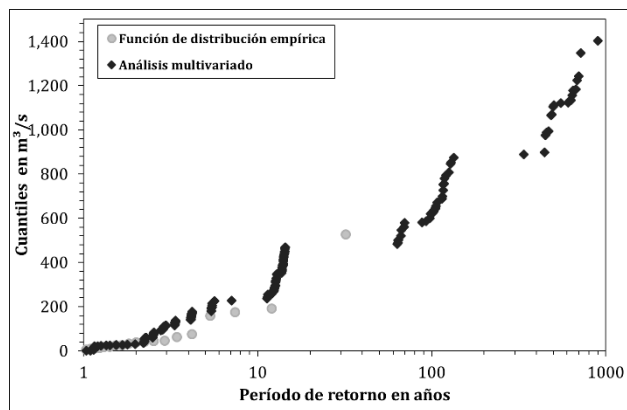


Figura 3.- Resultados de la aplicación del enfoque multivariado.

En la Figura 3 es apreciable que la curva de frecuencia estimada asciende de manera parecida a la observada, rodeándola en el extremo observado. Dichos saltos en las curvas (observada y estimada) pueden estar reflejando la presencia de umbrales en el que se combinan diferentes mecanismos de generación de escorrentía como se ha observado en otros casos de estudio en la misma región en los que las características consideradas en el presente trabajo juegan un rol fundamental (cf. Calvo-Cases et al., 2003). Lo anterior muestra que tales factores no pueden ser despreciados en un análisis de frecuencia, siendo necesarias aproximaciones como las que se presentan en este trabajo.

Una vez comprobadas las hipótesis en la integración de las piezas de información para el análisis de frecuencia de crecidas es posible estimar los cuantiles de interés en puntos de la cuenca hidrográfica donde no existe información de aforos. En el caso de estudio, el área inundable no cuenta con estaciones de aforo, pero fue posible derivar los cuantiles de interés los cuales sirvieron como datos de entrada en la elaboración de mapas de peligrosidad o amenaza por inundación, así como del análisis de la efectividad de la implementación de medidas para la reducción del riesgo por inundaciones (cf. Salazar, 2013).

## Conclusiones

La metodología presentada involucra un enfoque que integra diferentes piezas de conocimiento desde la modelación estocástica de tormentas y desde la modelación hidrológica distribuida para el análisis de frecuencia de crecidas. La modelación estocástica de tormentas utilizó la información disponible de tormentas históricas para reflejar el comportamiento de éstas en el proceso de generación. En la modelación distribuida se implementó una estrategia que involucra dos escalas de trabajo: a escala de evento, el análisis contribuye a identificar los procesos hidrológicos dominantes en las crecidas generadas en la cuenca dentro de un período de referencia; por otro lado, a escala diaria, el análisis contribuye a identificar las CHAS preponderantes observadas en la cuenca, también dentro de un período de referencia.

Los resultados muestran que el enfoque puede ser utilizado en aplicaciones prácticas donde existe poca información hidrológica, además de su potencial uso como línea base para la proyección de escenarios y la toma de decisiones.

## Referencias bibliográficas

- Calvo-Cases, A., Boix-Fayos, C., Imeson, A. C. (2003). "Runoff generation, sediment movement and soil water behaviour on calcareous (limestone) slopes of some Mediterranean environments in southeast Spain". *Geomorphology*. 50(1), 269-291.
- De Michele, C., Salvadori, G. (2002). "On the derived flood frequency distribution: analytical formulation and the influence of antecedent soil moisture condition". *Journal of Hydrology*. 262, 245-258.
- Ferrer, F., Ardiles, L. (1994). "Análisis estadístico de las series anuales de máximas lluvias diarias en España". *Ingeniería Civil*. 95, 87-100.
- Francés, F., Vélez, J.I., Vélez, J.J. (2007). "Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models". *Journal of Hydrology*. 332, 226-240.
- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., Veith, T. (2007). "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations". *Transactions of the ASABE*. 50, 885-900.
- Salazar, S. (2013). "Metodología para el análisis y la reducción del riesgo de inundaciones: aplicación en la Rambla del Poyo (Valencia) usando medidas de retención de agua en el territorio". Tesis Doctoral. *Editorial Universitat Politècnica de València*. 362 pp.
- Salazar, S., Francés, F., Komma, J., Blume, T., Francke, T., Bronstert, A., Blöschl, G., 2012. "A comparative analysis of the effectiveness of flood management measures based on the concept of "retaining water in the landscape" in different European hydro-climatic regions". *Nat.Hazards Earth Syst.Sci.* 12, 3287-3306.
- Salsón, S., García-Bartual, R. (2003). "A space-time rainfall generator for highly convective Mediterranean rainstorms". *Nat.Hazards Earth Syst.Sci.* 3, 103-114.