

Representación espacio-temporal de la intensidad de lluvia para generación de escenarios de crecida de elevado periodo de retorno

B. Hidrología y gestión del agua. Riegos. Energía hidroeléctrica

Rafael García Bartual⁽¹⁾, Felix Frances García⁽¹⁾

(1) Catedrático de Ingeniería Hidráulica

Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (IIAMA). Área de Hidráulica e Hidrología. Universidad Politécnica de Valencia. Cam. De Vera s/n 46022 Valencia.

[*rgarciab@hma.upv.es*](mailto:rgarciab@hma.upv.es)

1. Introducción

La forma más habitual de incorporar la lluvia en el análisis hidrológico es mediante chaparrones de proyecto, definidos para determinados periodos de retorno (T) preestablecidos. Este planteamiento tiene grandes ventajas. En concreto, el más conocido y empleado de los chaparrones de diseño, construido mediante bloques alternos de lluvia alrededor del máximo, constituye una síntesis de las estadísticas máximas de intensidades de lluvia dispuestas conforme a una hipótesis razonable de patrón temporal. Además, se deriva con facilidad directamente de las curvas I-D-F. La hipótesis de uniformidad espacial de la intensidad, reducida en su caso por un factor de reducción areal (ARF), permite extender sin problemas el planteamiento práctico a cuencas hidrográficas de cierta extensión. No obstante, cuando el tamaño de la cuenca analizada crece, la definición espacial del chaparrón adquiere más y más relevancia, en tanto que la citada hipótesis de uniformidad se hace menos realista, siendo entonces necesario introducir métodos que recojan y representen razonablemente la distribución de las intensidades de lluvia en el espacio y en el tiempo.

Se analizan y discuten aquí algunas estrategias prácticas para abordar la cuestión. Se incluye a modo ilustrativo una aplicación práctica basada en la generación sintética de *inputs* ó escenarios de lluvias torrenciales espacio-temporales mediante el empleo de un modelo estocástico de precipitación. Finalmente, se detalla una metodología para la asignación práctica de periodo de retorno a eventos de lluvia de alta definición espacio-temporal, tanto registros históricos como eventos sintéticos generados con un modelo estocástico.

2. Alternativas de modelación más destacables

- a) Chaparrón de proyecto multidimensional: Al igual que se propone un patrón temporal para el chaparrón de determinado periodo de retorno, postular también un patrón espacial que complete ó extienda esta definición de la tormenta o chaparrón de proyecto sobre toda la cuenca.
- b) Registros históricos: Usar los registros históricos de las redes automáticas terrestres, para reconstrucción lo más fiable posible de la evolución espacial y temporal de las intensidades de lluvia mediante empleo de técnicas de interpolación espacial. El empleo adicional del radar será en este caso de extraordinario valor para la adecuada estimación y representación en el continuo espacio-temporal del campo de intensidades de lluvia.
- c) Modelos estocásticos: Emplear modelos estocásticos para generación de escenarios de lluvia sintéticos espacio-temporales, con determinadas características.

3. Discusión sobre las ventajas e inconvenientes principales

- a) Chaparrón de proyecto multidimensional: Esta alternativa es seguramente la más clara en su planteamiento ingenieril, dado que es fiel a una hipótesis de trabajo extendida en la práctica hidrológica habitual: Se puede definir un chaparrón de proyecto representativo de determinado periodo de retorno, por ejemplo, T=100 años, y dicho chaparrón es único. Un ejemplo conocido sería adoptar un patrón espacial con isoyetas elípticas consistentes con las curvas históricas pésimas I-D-A (intensidad-duración-área).

Por otro lado, es la alternativa más práctica, pues es innegable que este enfoque simplifica extraordinariamente los estudios e informes hidrológicos, en tanto que cada periodo de retorno tiene asociado un único evento.

Desde el punto de vista de la ciencia hidrológica, quizás constituya la estrategia más criticable de las tres mencionadas. Existen varios motivos para ello. En primer lugar, y como se deduce bien de la observación de las imágenes de radar y registros SAIH, la distribución espacio-temporal de la intensidad en los sucesos históricos presenta estructuras y evoluciones bien distintos al patrón único postulado. Además, lluvias históricas de similar magnitud (similar T), presentan patrones espaciales, variabilidad y extensión muy diversas. Finalmente, y este punto es el más determinante, dichas variaciones sobre la cuenca sí condicionan fuertemente la respuesta hidrológica. No sólo en el caudal pico, también en la duración, número de picos y en general patrón temporal del hidrograma, cuestión especialmente importante en el ámbito de la operación de presas.

b) Registros históricos: La fiabilidad y resolución de las redes SAIH, junto con los datos de radar cada vez más completos, representativos, y con calibraciones más precisas, permiten sin duda contar con estimaciones cada vez más aproximadas del campo de intensidades de precipitación en el espacio-tiempo. En particular, el empleo de técnicas apropiadas de tratamiento matemático para interpolación espacial óptima nos conduce a representaciones satisfactorias del campo de intensidades de precipitación.

Puede decirse por lo tanto que esta alternativa es la más sólida desde el punto de vista científico, y por supuesto totalmente recomendable a efectos de las aplicaciones en ingeniería hidrológica.

La limitación práctica está vinculada fundamentalmente a la cuestión del periodo de retorno T. En efecto, por un lado se hace necesario contar con un procedimiento para asignar a cada evento histórico un valor justificado de T. Esta operación no es trivial, por lo que es analizada con mayor profundidad en este trabajo.

En segundo lugar, una mayoría de aplicaciones exigen poder contar con *inputs* de lluvia de elevados periodos de retorno (T=100, T=1000, ..), condición que con frecuencia no cumplen los registros históricos espacio-temporales de alta resolución disponibles.

c) Modelos estocásticos: La alternativa de la modelación estocástica es costosa y tampoco exenta de problemas, tanto teóricos como prácticos. En efecto, esta estrategia de modelación está sujeta a varios inconvenientes. En primer lugar, tal y como sucedía con los eventos históricos, y a diferencia de la estrategia del chaparrón de proyecto, los modelos estocásticos no permiten establecer un valor de T “a priori” para definir el *input* de lluvia. Por lo tanto, de una u otra forma deben apoyarse en procedimientos para asignación “a posteriori” del periodo de retorno, y como es natural, éste difícilmente va ser exactamente T=100.

Otro inconveniente es que cualquier aplicación con modelos estocásticos, ya sean modelos temporales (de punto geográfico) ó modelos espacio-temporales, va a requerir un coste computacional y en general un coste en tiempo y recursos humanos incomparablemente mayor que la estrategia a). No sólo por la complejidad intrínseca que pueda tener el modelo estocástico de precipitación, sino principalmente debido a la necesidad derivada de realizar las transformaciones lluvia-escorrentía en un amplio espectro de escenarios de lluvias o tormentas sintéticas, con el consiguiente incremento del horizonte de análisis posterior.

Desde el punto de vista hidrológico, obviamente la calidad ó representatividad de las tormentas sintéticas es claramente inferior a las reconstrucciones de episodios históricos. No obstante, presentan el interesante atractivo de proponer múltiples escenarios posibles, consistentes con ciertas propiedades estructurales internas características de los eventos lluviosos extremos, en un planteamiento acorde con la realidad hidrológica diversa y múltiple existente en la naturaleza. Son por lo tanto representaciones más realistas que las contempladas por la estrategia a). Por otro lado, la posibilidad de contar con tantos escenarios como se desee supone extraordinarias ventajas desde el punto de vista de la calidad en la estimación de cuantiles para elevados periodos de retorno. En términos estadísticos, la fiabilidad de las estimaciones se incrementa, y es factible abordar la cuestión con planteamientos más robustos y de mayor rigor estadístico que en los métodos de cálculo hidrológico clásico.

En el ejemplo que se acompaña, se presenta una aplicación práctica orientada a la estimación hidrológica de caudales máximos en diversos puntos de las comarcas de la Marina Alta y la Marina Baja, en la Comunidad Valenciana. El modelo empleado es el modelo estocástico propuesto por (Salsón y García-Bartual, 2003). Se trata de un modelo basado en la teoría de procesos estocásticos de punteo, y constituye una adaptación a las condiciones mediterráneas de una extensa y bien asentada familia de modelos de precipitación desde los años 80.

4. Uso práctico de inputs de lluvia estocásticos

Para la generación de tormentas sintéticas en el caso presentado 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. El modelo propuesto por (Salsón

y García-Bartual, 2003) fue concebido específicamente para la reproducción de los patrones espacio-temporales más característicos propios de las tormentas extremas de carácter convectivo en regiones mediterráneas, y de forma central, las intensidades de lluvia asociadas a la actividad de las celdas convectivas ó núcleos localizados donde se presentan las mayores intensidades de precipitación. El modelo procede en su origen de una línea de trabajos basados en la teoría de procesos de punteo, perfectamente asentada por diversos autores desde los años 80. [Waymire, E., Gupta, V.K., Rodriguez-Iturbe, I. (1984); Rodriguez-Iturbe, I., y P. S. Eagleson (1987); Sivapalan, M., Wood, E.F. (1987); Islam, S, R.L. Bras e I. Rodriguez-Iturbe (1988); Jacobs, L. B., I. Rodriguez-Iturbe y P. S. Eagleson (1988); Willems, P. (1999, 2001); García-Bartual, (2001); Guichard et al.,(2009)].

Mediante la aplicación del modelo, se generan 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.

4.1 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 las figuras 1, 2 y 3 se muestra algunos ejemplos, extraídos de episodios históricos ocurridos en noviembre de 1999 y septiembre de 2009. Las funciones de tendencia mostradas se definen en función de los parámetros del modelo, que por lo tanto pueden ser estimados por el método de los momentos.

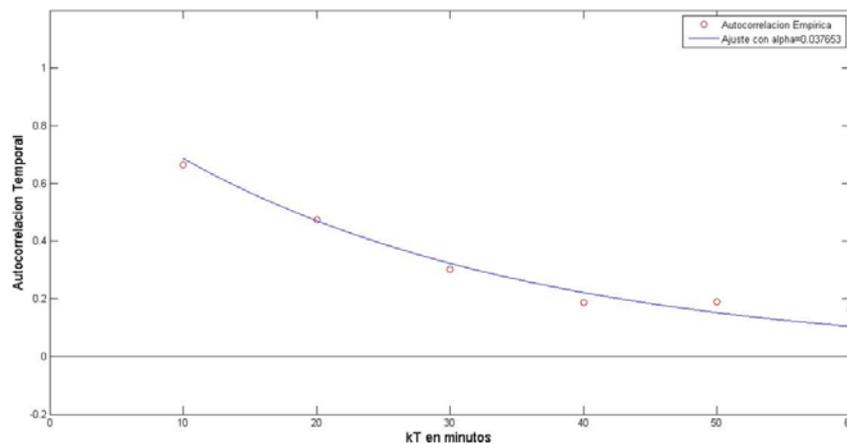


Figura 1: Autocorrelación temporal empírica – evento SAIH 11-12 nov 1999. Estación: Isbert

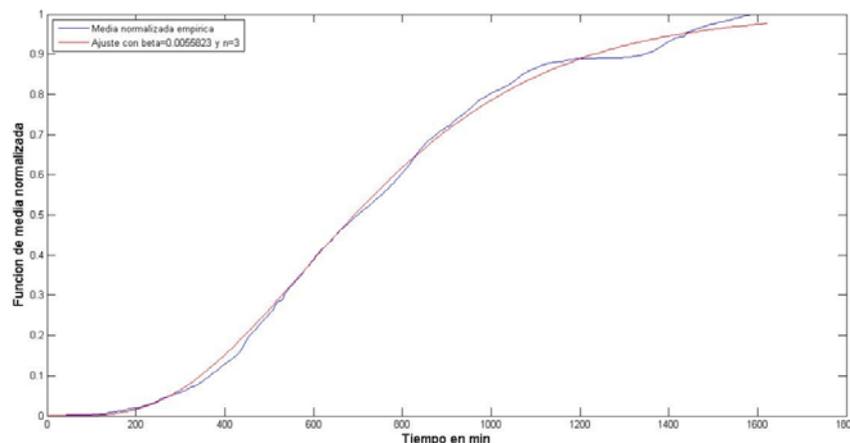


Figura 2 : Función de media normalizada empírica: 11-12 noviembre 1999

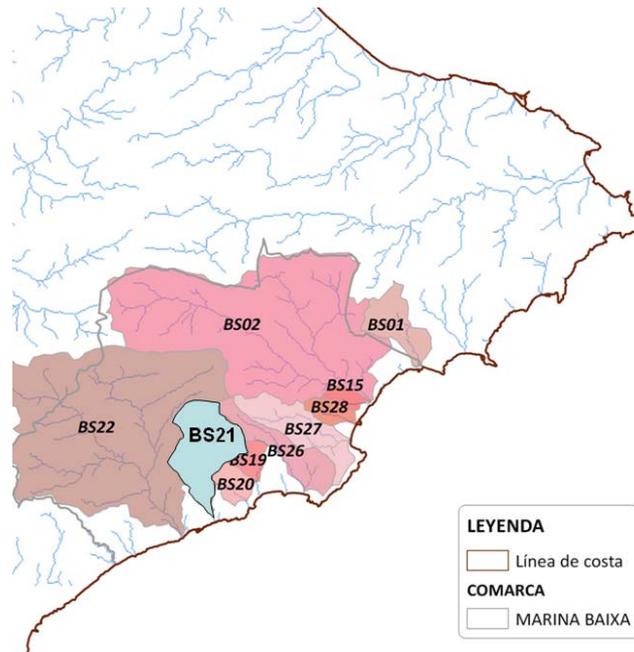


Figura 5 : Cuenca BS21 (Río Torres) en la Comarca de la Marina Baja

En las figuras 6 y 7 se representa a efectos ilustrativos la tormenta sintética #106, con la distribución espacial de los totales acumulados sobre las comarcas de la Marina Alta y la Marina Baja en la Comunidad Valenciana, y el hietograma promedio areal sobre la subcuenca BS21 (Río Torres, figura 5).

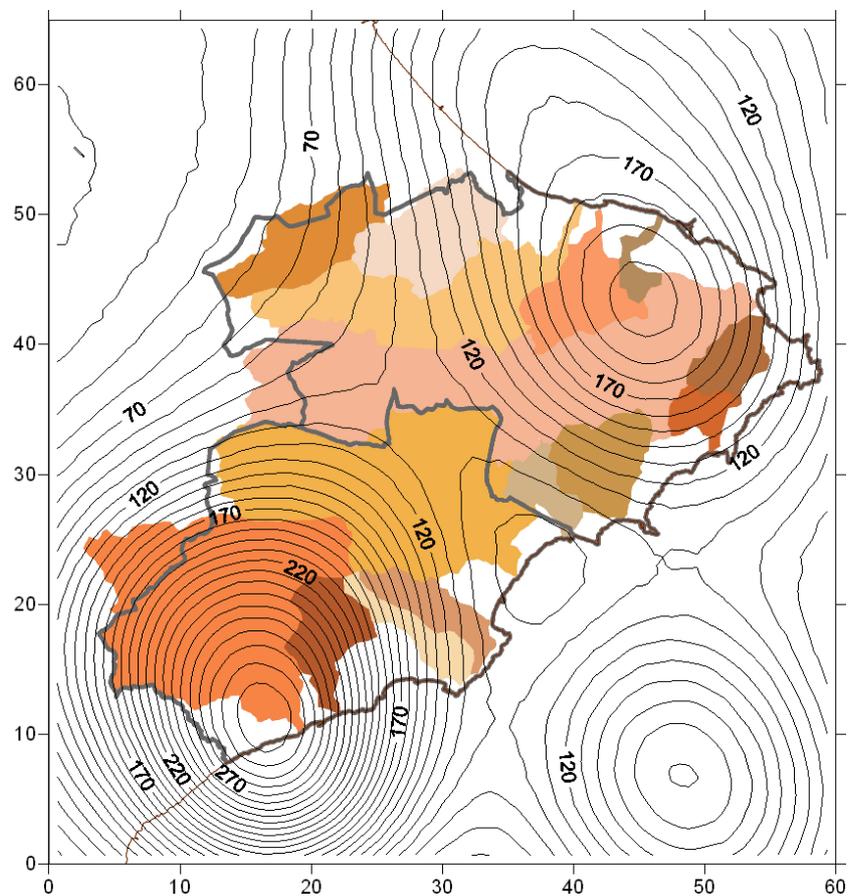


Figura 6 : Distribución espacial de totales de lluvia – Evento sintético # 106.

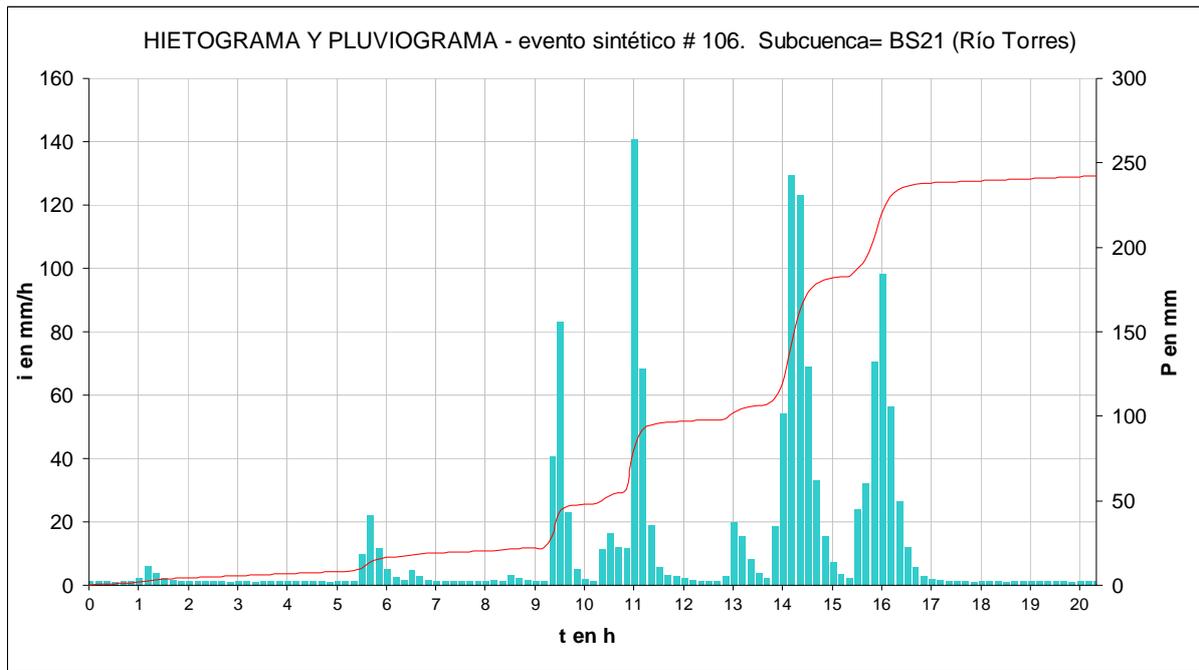


Figura 7: Hietograma y pluviograma promedio areal sobre la cuenca BS21 (Río Torres). Evento sintético # 106.

4.3 Asignación de periodo de retorno

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:

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

Donde ARF es el factor de reducción areal para la cuenca considerada, y $F()$ la distribución de máximas anuales de precipitación diaria en un punto geográfico representativo.

Previa 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:

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

formulaciones para el factor de reducción areal (Guichard et al., 2004), ó estudios específicos en la comarca ó zona de estudio realizados a partir de los mapas de isoyetas correspondientes a las tormentas históricas más relevantes acaecidas en la región.

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, $\Delta t = 10$ min ó $\Delta t = 30$ min). 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 km x 1 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.

5 Conclusiones

La modelación estocástica es una alternativa viable aunque costosa, para soslayar los inconvenientes señalados del chaparrón de diseño único para cada periodo de retorno. Es muy importante que los eventos sintéticos generados representen escenarios posibles de lluvia espacio-temporal definida con elevada resolución espacial y temporal, pero sobre todo, que perfectamente encuadrados en un marco probabilístico riguroso y representativo, derivado de un análisis estadístico de máximas anuales de precipitación diaria.

El empleo de estas técnicas se justifica especialmente en aquellos casos donde sea importante conocer no sólo los caudales máximos esperables, sino también los volúmenes y patrones temporales de los hidrogramas de crecida.

6 Referencias

García-Bartual, R. (2001): Identification of rain-cells from SAIH network measurements (Valencia): An analytical approach. Proceedings of the 3rd EGS Plinius Conference. Baja Sardinia. Italia. Oct 2001.

Ghichard Romero, D., Dominguez, R., Frances, F., y R. García-Bartual (2009): Análisis de la densidad de estaciones en zonas de lluvias convectivas. Caso del Mediterráneo español. Ingeniería Hidráulica en México. Vol. XXIV, núm. 3. pp. 35-49. Julio-Septiembre 2009.

Guchard, D., Dominguez, R. y R. García-Bartual (2004): Factores de reducción areal: Revisión histórica. Aplicación en cuencas de la zona mediterránea de España. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. S. Pedro (Brasil). Octubre 2004.

Islam, S., Bras, R.L. y I. Rodriguez-Iturbe (1988): Multidimensional modelling of cumulative rainfall, parameter estimation and model adequacy through a continuum of scales. Water Resources Research, 24(7), 985-992.

Jacobs, L.B., Rodriguez-Iturbe, I. y P.S. Eagleson (1988): Evaluation of a homogeneous point process description of Arizona thunderstorm rainfall. Water Resources Research, 24(79): 1174-1186.

Rodriguez-Iturbe, I. y P.S. Eagleson (1987): Mathematical models of rainstorm events in space and time. Water Resources Research, 23(1), 181-190.

Salsón, S. y García-Bartual (2003): A space-time rainfall generator for highly convective Mediterranean rainstorms. Natural Hazards and Earth System Sciences - European Geosciences Union. Vol. 3: 103-114.

Sivapalan, M. y E.F. Wood (1987): A multidimensional model of non stationary space-time rainfall at the catchment scale. Water Resources Research, 23(7), 1289-1299.

Waymire, E., Gupta, V.K. y I. Rodriguez-Iturbe (1984): A spectral theory of rainfall intensity at the meso- β scale. *Water Resources Research*, 20(10), 1453-1465.

Willems, P. (2001): A spatial rainfall generator for small spatial scales. *Journal of Hydrology*, 252: 126-144.