

Evaluación de modelos multivariados para la simulación estocástica de lluvias a escala diaria

Ángela Martínez Codina¹, Aidan Burton², Álvaro Sordo¹, Luis Garrote¹

1) Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética. Universidad Politécnica de Madrid.

2) Water Resource Systems Research Laboratory. School of Engineering and Geosciences, Cassie Building. Newcastle University.

angela.mcodina@alumnos.upm.es

Resumen

La obtención de leyes de frecuencia de caudales de avenida mediante simulación hidrometeorológica requiere de la extensión de las series observadas de lluvia mediante series sintéticas que conserven sus propiedades extremas. Para cuencas pequeñas, cuya lluvia media pueda asimilarse a la registrada en un único pluviómetro, existen varios modelos puntuales que pueden realizar eficazmente la tarea. En el caso de cuencas medianas y grandes, deben utilizarse modelos multivariados, cuya calibración es más difícil que en el caso univariado. El objetivo de este trabajo es la simulación estocástica de lluvias a escala a través del empleo de un modelo multivariado en el tiempo y en el espacio.

Para ello se ha empleado el programa Rainsim, que se basa en el modelo espacio-temporal de Neyman-Scott de pulsos rectangulares (e.g. Coperwait et al., 2002; Fowler et al., 2005; Burton et al., 2008). A partir de series históricas de lluvias se obtienen sus estadísticos, con los que se ajustan los parámetros del modelo para poder generar largas series de precipitaciones.

En el trabajo se ha empleado el modelo Rainsim en un caso univariado y otro multivariado con tres pluviómetros, y se han comparado los resultados. El caso univariado es el embalse de Alloz, situado en la cuenca del Ebro, que cuenta con un pluviómetro con una serie histórica de 43 años con paso diario.

En el caso multivariado se ha trabajado con el embalse de Fuensanta, situado en la cuenca del Segura, donde se escogieron tres pluviómetros (Gontar, Arguellite y Siles), que cuentan con series de datos de precipitación diaria de 31, 42 y 22 años.

En los trabajos realizados se han obtenido resultados muy satisfactorios para el modelo puntual de un pluviómetro estudiado en la cuenca de Alloz, el comparar el comportamiento extremal de los datos observados y los datos simulados. En cuanto al modelo multivariado, los datos simulados presentan un comportamiento no tan acertado como en el caso univariado.

1 Introducción

En la mayoría de los países de la Unión Europea, incluido España, en el cálculo de la seguridad hidrológica de presas se utilizan criterios probabilísticos basados en un periodo de retorno o probabilidad de superación anual. En concreto, el análisis de la seguridad hidrológica se limita al análisis de la lluvia en 24 horas a partir del análisis extremal de las series puntuales de lluvia registradas en pluviómetros, definiendo una “tormenta de proyecto” que, por aplicación del método hidrometeorológico, da lugar a la “avenida de proyecto” con la que se comprueba la seguridad hidrológica de la presa. De esta forma, se asocia el periodo de retorno de la tormenta pésima al periodo de retorno de la avenida.

Sin embargo, no hay un criterio riguroso de lo que se entiende por periodo de retorno de una avenida, ya que la misma avenida se puede caracterizar a través de su caudal punta, de su volumen, de su duración o mediante la combinación de las anteriores porque todos estos factores influyen en la seguridad de las presas.

Por tanto, en la práctica profesional, la seguridad hidrológica de las presas se evalúa mediante métodos esencialmente deterministas. El único concepto probabilístico que se introduce es el correspondiente a la probabilidad de ocurrencia de la precipitación acumulada en 24 horas en cada uno de los pluviómetros existentes en la cuenca. El resto de los procesos que intervienen en el cálculo (duración de la tormenta, la simultaneidad en las precipitaciones de los diferentes pluviómetros, los parámetros de caracterización de la generación de escorrentía en la cuenca y su transporte, el nivel inicial de agua en el embalse, la estrategia de maniobra de los órganos de desagüe, etc) son definidos por el criterio del proyectista e intervienen en el cálculo de manera determinista, a pesar de que existe un alto grado de incertidumbre sobre ellos, no pudiéndose definir un criterio de diseño homogéneo en todas las presas de categoría similar.

1.1 Objetivo

Por ello, se propone como primer punto de partida para llegar a la correcta evaluación de la seguridad hidrológica de las presas, superar los criterios deterministas sobre la ocurrencia y distribución espacio-temporal de la lluvia, y analizar los métodos probabilísticos de análisis de la lluvia en relación a su caracterización extremal de los campos espacio-temporal. Para conseguirlo, se parte de un enfoque novedoso, basado en la modelación estocástica multivariada que puede reproducir la variabilidad tanto temporal como espacial de las lluvias. Así, mediante estos métodos de generación de lluvias se pretende obtener una muestra representativa de tormentas a las que aplicar los modelos lluvia-escorrentía, para obtener series de hidrogramas de entrada a los embalses.

Este trabajo inicia la futura línea de investigación de metodologías de caracterización extremal de la solicitación hidrológica de una presa mediante la simulación probabilística, que combinará modelos estocásticos de lluvia, modelos hidrológicos de respuesta de cuenca físicamente basados y optimizadores de la gestión del embalse.

1.2 Estado del Arte

Los Modelos multivariados pueden simular la lluvia y su frecuencia en un número determinado de pluviómetros. Algunos de estos modelos son las cadenas de Markov (Wilks, 1998; Mehrotra and Sharma, 2007; Srikanthan and Pegram, 2009) y los modelos de autorregresión (Bárdossy and Plate, 1992; Stehlik and Bárdossy, 2002), que aunque tengan un elevado número de parámetros no pueden simular las características espaciales de la lluvia que no hayan sido observadas en los registros históricos. Además, estas metodologías generan series de tiempo de paso diario y en un número finito de localizaciones. Por otra parte, los Modelos Lineales Generalizados (GLMs) (Chandler and Wheeler, 2002; Segond et al. 2006) no representan del todo la heterogeneidad espacial y subestiman la autocorrelación.

Sin embargo, los modelos hidrológicos requieren campos continuos de lluvia espaciales, y pasos de tiempo inferiores al diario. Extensiones espaciales de los modelos clásicos de Barlet-Lewis y Neyman-Scott (Cowpertwait, 1995; Onof et al., 2000), permiten simular procesos continuos temporales y espaciales, con distintos pasos horarios y para una distribución mallada como la que provee el radar o para distintos puntos, a partir de los datos obtenidos con diferentes pluviómetros.

El modelo temporal espacial Neyman-Scott (Spatial Temporal Neyman Scott Rectangular Pulses (STNSRP)) (Burton et al., 2008) fue formulado analíticamente por Coperwait (1995), extendiendo el modelo puntual de NSRP (Rodríguez-Iturbe et al., 1987).

2 Metodología

2.1 RainSim

En esta investigación se ha empleado el software Rainsim V3, que emplea el modelo Neyman-Scott Rectangular Pulses (NSRP) para el caso univariado, y el modelo Spatial Temporal Neyman Scott Rectangular Pulses (STNSRP) para el caso multivariado.

RainSim V3 opera en tres modos: análisis, calibración y simulación. El análisis obtiene los estadísticos de la lluvia para distintas disgregaciones de tiempo desde las series de tiempo observadas o simuladas, en un conjunto de localizaciones. La calibración utiliza una optimización numérica para identificar el conjunto de parámetros que hace corresponder la simulación con un conjunto seleccionado de estadísticos de la lluvia. Finalmente, la simulación genera series de tiempo de lluvia sintética en base a un conjunto de parámetros.

Los estadísticos que emplea el programa RainSim son: (1) la media de la lluvia acumulada en horas [mm], (2) la varianza del periodo de lluvia acumulada en horas [mm²], (3) la covarianza del periodo acumulado en horas de dos series [mm²], (4) correlación del periodo acumulado en horas de dos series de tiempo [-]¹, (5) la probabilidad de que el periodo acumulado en horas sea estrictamente inferior a un umbral determinado [-], (6) la probabilidad de una transición seco-seco del periodo acumulado en horas, (7) la probabilidad una transición mojado-mojado del periodo acumulado en horas [-] y (8) el coeficiente de asimetría del periodo acumulado en horas [-].

El número de estadísticos a emplear en el modelo no deben de ser inferiores al número de parámetros a utilizar, pero no tiene que haber muchos estadísticos porque el modelo dejaría de ser flexible y no se podría adaptar a todas las exigencias introducidas.

Para elegir los estadísticos hay que tener en cuenta que la series puedan ser de paso horario o diario. Para el caso de estadísticos diarios, deben incluirse la media, la varianza de 24 horas y la probabilidad de días de lluvia por debajo de un determinado umbral. Además, para el caso de paso diario, normalmente también se incluyen el coeficiente de asimetría de 24 horas y lag-1 autocorrelación y no se debe de incluir la varianza horaria, ya que el paso de los estadísticos debe ser múltiplo de 24 horas. En el caso de las series históricas horarias, se debe de incluir además de los estadísticos de la varianza y de la probabilidad de días secos, el coeficiente de asimetría.

Dependiendo del caso que se pretenda analizar, los estadísticos serán distintos. En el estudio de caudales, se pueden incluir estadísticos horarios y en el estudio de aguas subterráneas, los estadísticos de varianza semanal y mensual.

En cuanto al estadístico que se refiere a la probabilidad de que la lluvia de un día sea estrictamente inferior a un valor determinado, este umbral puede ser 0.2 ó 1 mm, pero el valor de 1 mm se utiliza para el análisis del cambio climático.

En el caso que se está analizando, se pretende estudiar el análisis extremal por lo que se deben de incluir los estadísticos de la varianza y el coeficiente de asimetría.

Hay que añadir que en el modelo STNSRP, la media de la lluvia de la serie simulada se hace coincidir con el estadístico de la serie observada, para que así se represente el proceso de cantidades de lluvia no homogéneas. Además, la probabilidad de día seco y la correlación deben de aparecer siempre.

Además, los estadísticos se pueden ajustar aplicando pesos, en función de la importancia que se le asigne a los mismos. Normalmente, para el caso multivariado se aplica los mismos pesos en todos los pluviómetros para un estadístico determinado.

En cuanto los parámetros que hacen que la simulación se adapte a los estadísticos de las series son: (1) lambda, que representa la llegada del origen de la tormenta [1/h], (2) beta, que es el inverso del tiempo medio entre orígenes de celdas de lluvia[1/h], (3) eta, que es el inverso de la duración de la celda de lluvia [1/h], (4) nu, que es el número medio de celdas de lluvia por tormentas [-], (5) xi, que es el inverso de la intensidad media de las celda de lluvia [h/mm], (6) gamma, que es el inverso de los radios de las celdas de lluvia y (7) rho, que es la densidad espacial de los centros de lluvia [1/km²].

Para calibrar el modelo se puede variar el valor inicial de dichos parámetros, además de establecer bandas inferiores y superiores que no puedan superarse. Hay que tener en cuenta también, que el número de parámetros se puede reducir.

Una vez se obtienen las series simuladas con el programa RainSim, se debe verificar que las series simuladas tienen el mismo comportamiento extremal que las series observadas, utilizando la función de distribución Tipo I o de Gumbel, y la fórmula no paramétrica de Gringorten.

¹ [-] Representa el que los estadísticos o los parámetros son adimensionales.

2.2 Caso de estudio

2.2.1 Cuenca de Alloz

La cuenca de Alloz (135 Km²) está situada al Norte de España, en la provincia de Navarra, y pertenece a la cuenca del Ebro. Sus límites naturales son: por el N los montes Cantábricos y los Pirineos, por el SE el Sistema Ibérico y por el E la cadena Costero-Catalana. Está drenada por el río Ebro que, con una longitud total de 910 km., discurre en sentido NO-SE, desde las montañas Cantábricas hasta el Mediterráneo, donde desemboca formando un magnífico delta.

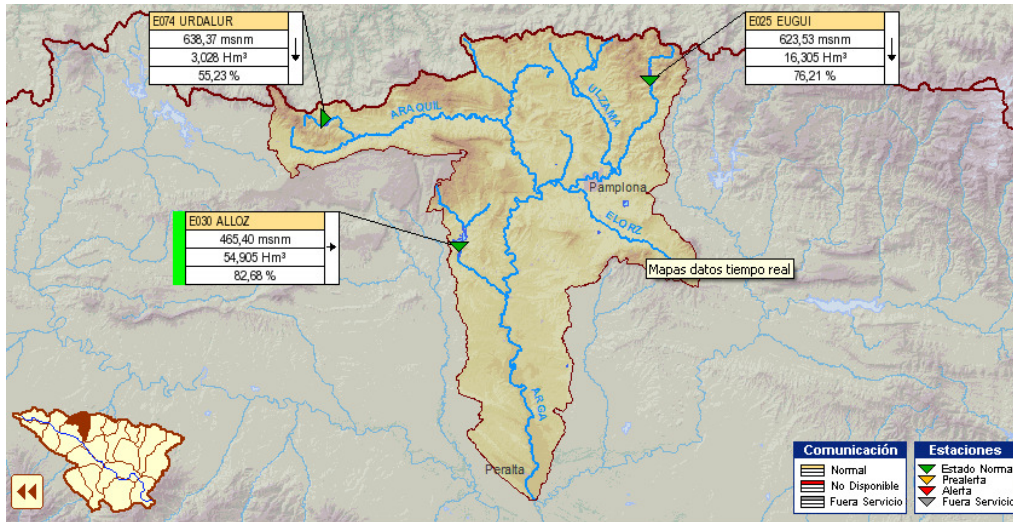


Figura 1 Cuenca de Alloz en la cuenca del Ebro.

En la cuenca de Alloz se va a estudiar el caso univariado, en la que se cuenta con datos históricos de precipitaciones en el pluviómetro de Alloz de 43 años paso diario (1965-2007).

Del este registro de datos históricos, se obtendrán los valores máximos anuales de precipitación diaria y se compararán con los máximos de las lluvias simuladas. Para ello se simularán 1000 años de lluvias, iniciando la simulación en enero de 2001.

El número de parámetros utilizados en este caso son cinco (λ , β , η , v , ξ), ya que el caso univariado sigue el modelo NSRP. En este caso, se comprobó que el modelo funcionaba correctamente sin necesidad de establecer bandas superiores ni inferiores a los parámetros.

Como el número de parámetros era cinco, los estadísticos no debían de ser inferiores a este número, pero tampoco muy superiores porque si no el modelo dejaría de ser flexible. En este caso, se optó por utilizar cinco estadísticos.

Debido a que el registro disponible tenía paso diario, los estadísticos que se tenían que elegir, como se explicó en el apartado anterior, eran la media, la varianza y la probabilidad de días secos. Además, como es usual en el caso de datos diarios, se optó por los estadísticos de la autocorrelación y el coeficiente de asimetría. El paso de estos estadísticos tenía que ser múltiplo de 24 horas, por lo que se eligió el paso diario. En cuanto a la probabilidad de días secos, se escogió el umbral de 0.2 mm, ya que no se trataba de un estudio de cambio climático. De esta manera, los estadísticos que se eligieron fueron la media de 24 horas, la varianza e 24 horas, la autocorrelación de 24 horas, la probabilidad de días secos de 24 horas con un umbral de 0.2 mm y el coeficiente de asimetría para 24 horas.

2.2.2 Cuenca de Fuensanta

La cuenca elegida para el estudio es la cuenca de Fuensanta (700 km²) y pertenece a la cabecera alta de la cuenca del Segura (18.870 km²), por la que discurre el río Segura (325 km) que le da nombre.

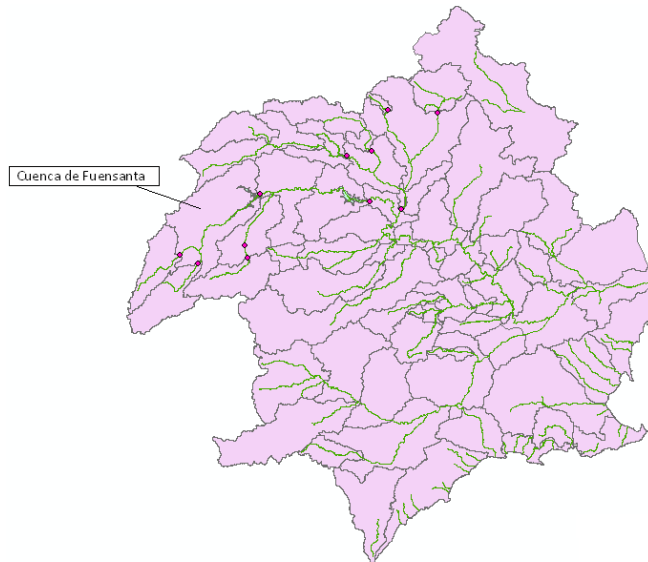


Figura 2 Cuenca de Fuensanta en la Cuenca del Segura.

En la Cuenca de Fuensanta se va a estudiar el caso multivariado. Se disponen de tres pluviómetros llamados Gontar, Arguellite y Siles, con series históricas de lluvias con paso de tiempo diario 31 años (1961-1990), 42 años (1961-2002) y 22 años (1963-1984) respectivamente.

El modelo RainSim V3 emplea en el caso multivariado el modelo STNSRP, por lo que el número de parámetros a utilizar son seis (λ , β , ρ , γ , η , ξ ,) y un campo ($\psi(x)$) en el que se representa la variabilidad espacial en la intensidad de la lluvia. En este caso, se utilizaron bandas superiores e inferiores de parámetros buscando la mejor adaptación de la simulación a los estadísticos de las series.

En cuanto a los estadísticos, como se trataba de series observadas diarias, se eligieron, al igual que en el caso univariado, la media, la varianza, la autocorrelación, la probabilidad de días secos y el coeficiente de asimetría. En este caso, también se debe de emplear la crosscorrelación, por tratarse del caso multivariado. Los pasos escogidos en los estadísticos fueron de 24 y 48 horas, por ser los datos observados diarios, y el umbral de la probabilidad de días secos de 0.2 mm, porque se consideró que en la cuenca escogida la precipitación no era elevada. De esta forma, los estadísticos que se emplearon fueron la media de 24 horas, la varianza de 24 y 48 horas, la autocorrelación y crosscorrelación de 24 horas, la probabilidad de días secos con un umbral de 0.2 mm y el coeficiente de asimetría para 24 y 48 horas.

Escogidos los estadísticos y los parámetros según, para ver cómo se comportaba el modelo STNSRP en la representación de las precipitaciones extremas, se obtuvieron la lluvia diaria máxima anual de los tres pluviómetros. Para ello se simularon 1000 años de precipitaciones diarias en los tres pluviómetros, iniciándose la simulación en enero de 2003.

En las gráficas de distribución de Gumbel, se representaron los máximos anuales de las precipitaciones diarias de las series observadas y las simuladas. Además, en la series de máximos de 1000 años de las series simuladas, se obtuvieron 20 subseries de 50 elementos cada una. A continuación, estas subseries se ordenaron y de ellas se calcularon sus máximos y mínimos y se representaron también en la gráfica de distribución extremal.

3 Resultados

3.1 Cuenca de Alloz

Elegidos los parámetros y los estadísticos adecuados, se pasa a mostrar las gráficas que se obtuvieron para los mismos (figuras 3 y 4).

Una vez se escogen los estadísticos y los parámetros adecuados a los datos observados en la Cuenca de Alloz, se procede a su análisis. Los parámetros obtenidos se representan en la figura 3 y los estadísticos en la figura 4.

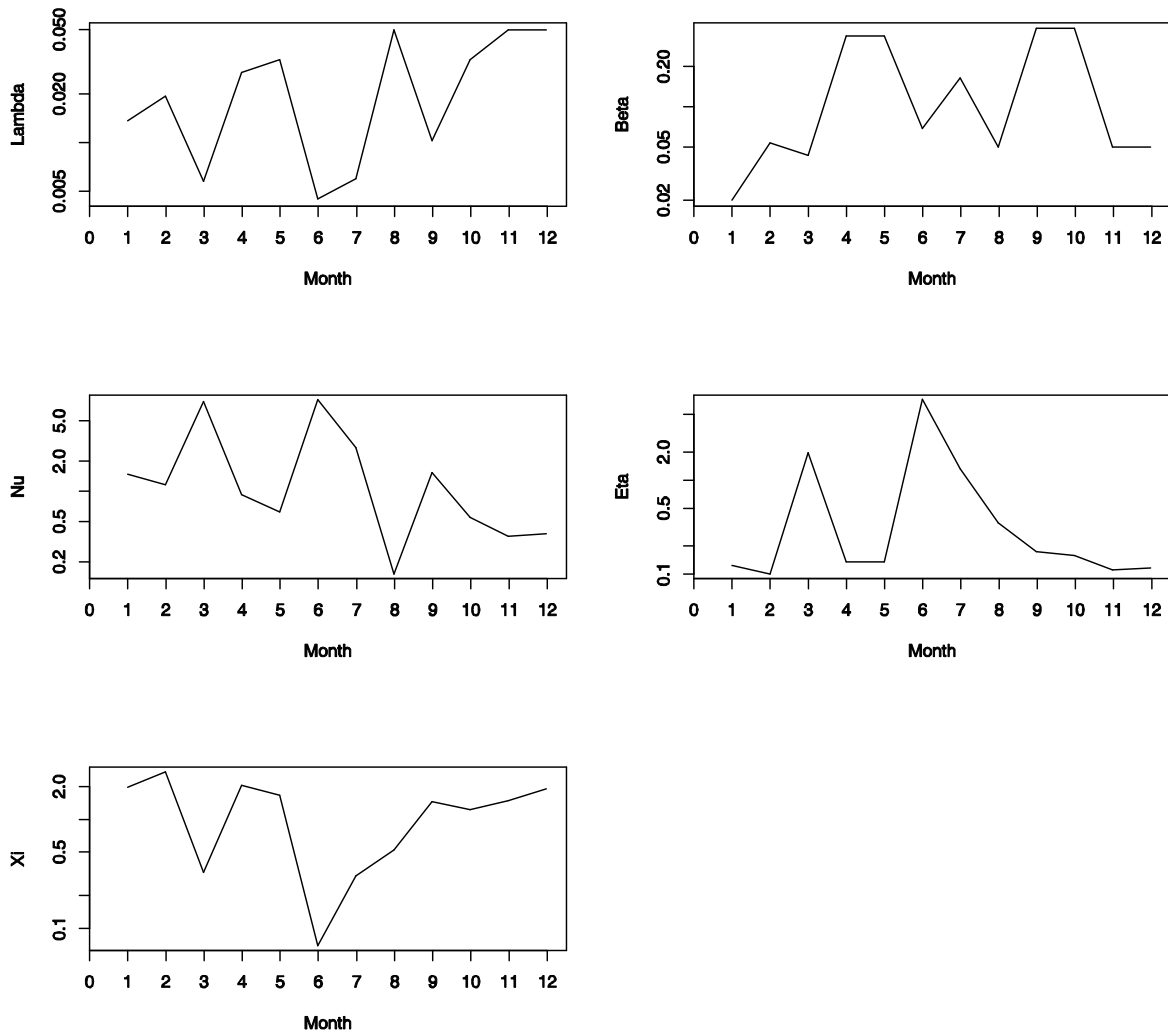
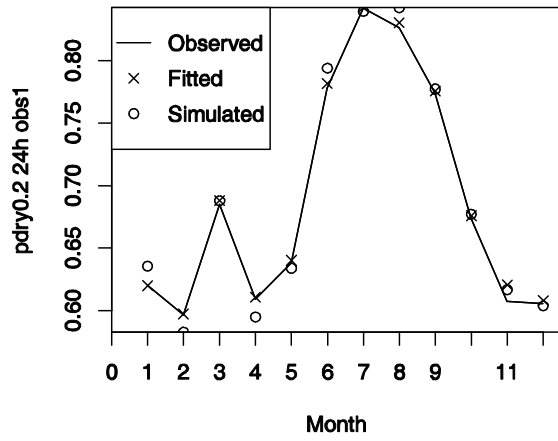
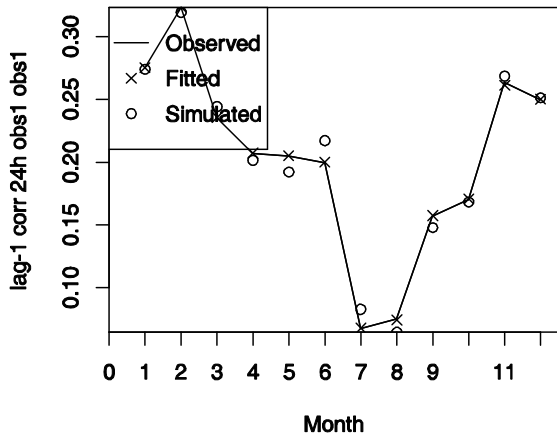
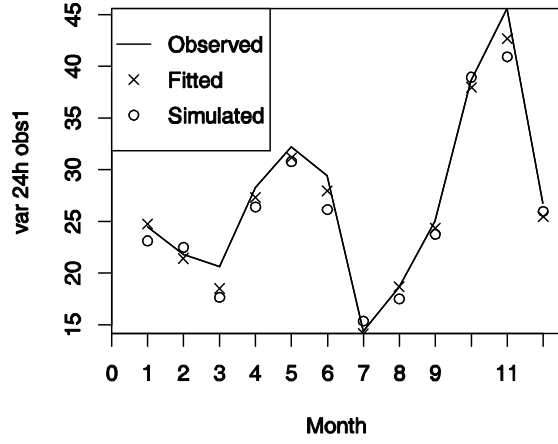
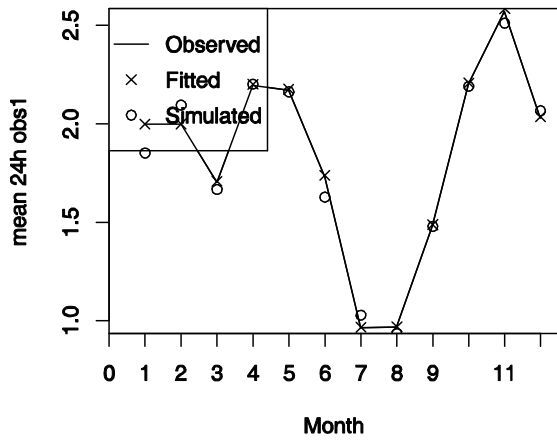


Figura 3 Parámetros en la Cuenca de Alloz

Las transiciones de los parámetros sirven para ver cómo se comporta el modelo. En este caso, las curvas no tienen una transición suave. Sin embargo, el modelo se adecua correctamente a los datos observados.

Plot title



Plot title

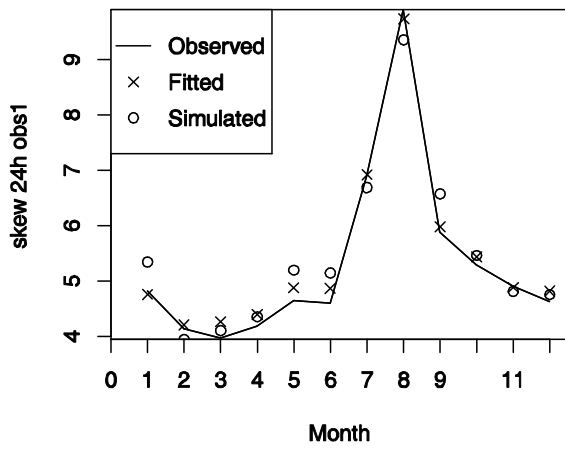


Figura 4 Estadísticos en la Cuenca de Allos

Tanto los estadísticos como los parámetros se evalúan para cada mes del año. Los puntos observados, que se representan con una cruz, al estar sobre las líneas demuestran que el modelo adecua a los datos observados. Además, como los puntos simulados (círculos) están cercanos a los puntos observados la simulación se realiza satisfactoriamente. La relación entre los puntos observados y los simulados es una combinación de las variables del modelo, de la variabilidad de la muestra, etc.

Para ver cómo se comporta el modelo NSRP, se comparó el comportamiento extremal tanto de la serie observada como de la simulada (1000 años).

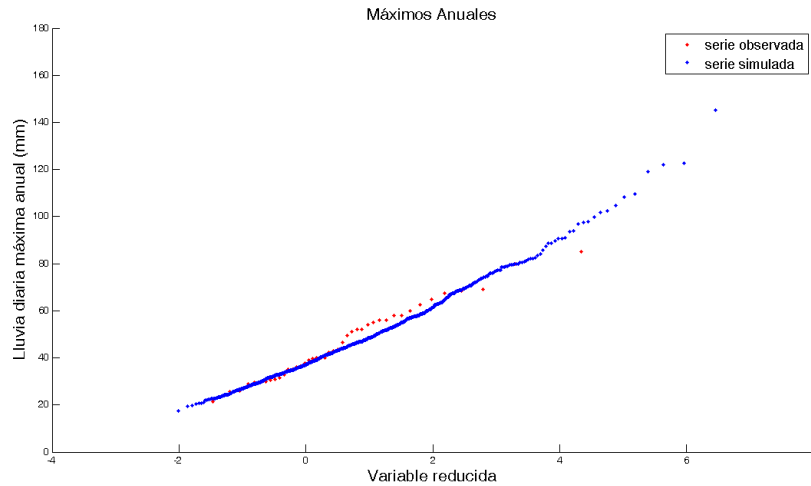


figura 5 *Análisis extrema de la Cuenca de Alloz.*

Como se puede apreciar el modelo se comporta correctamente en la representación de los extremos ya que los máximos anuales de la serie simulada siguen a los de los de la serie histórica.

3.2 Cuenca de Fuensanta

Las gráficas de las distribuciones extremales se presentan a continuación. Pluviómetro de Gontar:

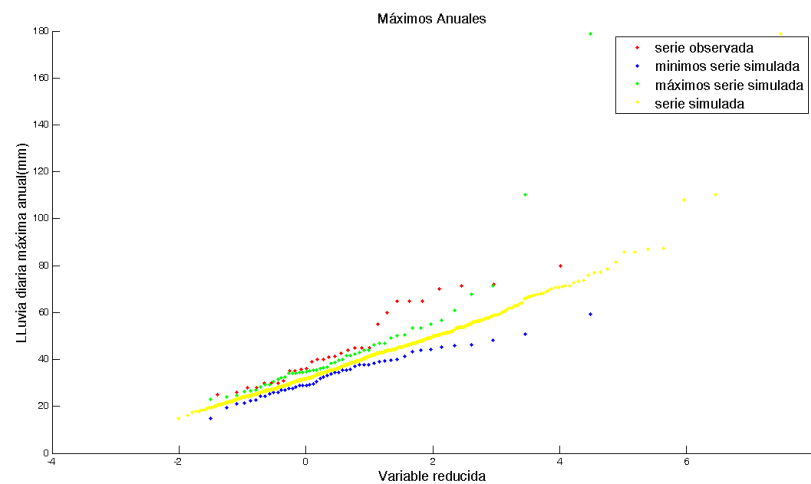


figura 6 *Distribución extrema en el pluviómetro de Gontar.*

En el caso del pluviómetro de Gontar la serie de datos observados los máximos anuales de la serie observada se aproximan a los mayores valores de los máximos anuales de las series simuladas.

Pluviómetro de Arguellite:

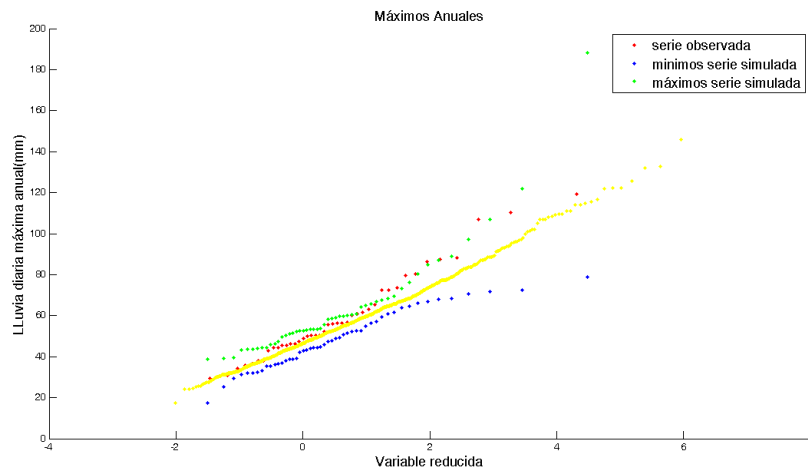


figura 7 Distribución extremal en el pluviómetro de Arguellite.

El pluviómetro de Arguellite muestra una correcta adaptación de las propiedades extremales de la lluvia diaria de la serie observada y las simuladas, ya que máximos anuales de los datos observados se encuentra dentro del rango de valores de las subseries simuladas.

Pluviómetro de Siles:

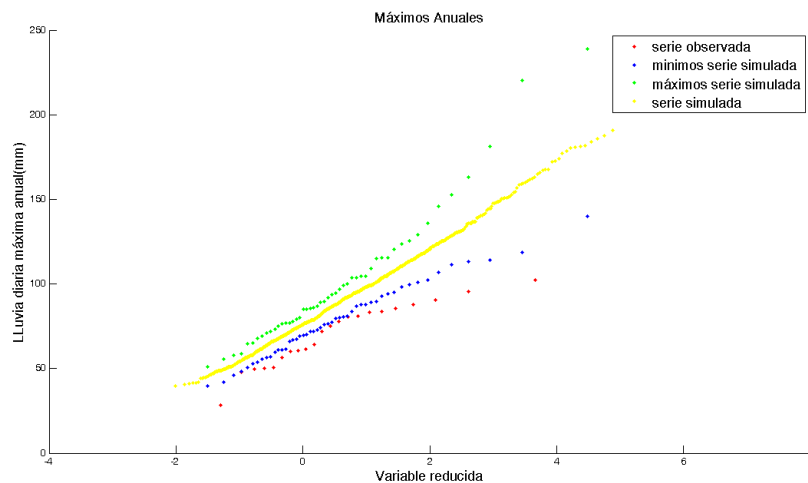


figura 8 Distribución extremal en el pluviómetro de Siles.

En el caso de Siles, en cambio, la serie observada sigue un comportamiento similar a los menores valores de los máximos anuales de las series simuladas.

4 Conclusiones

Los resultados obtenidos al comparar el comportamiento extremal de los datos observados y los datos simulados para el caso univariado (cuenca de Alloz) son muy satisfactorios. En cuanto al modelo multivariado, los datos simulados presentan un comportamiento no tan acertado como en el caso univariado. Sin embargo, el pluviómetro de Arguellite, las propiedades extremales de la lluvia diaria de la serie observada se adaptan a las de las subseries simuladas. se muestra una correcta adaptación de las propiedades extremales de la lluvia diaria de las series observadas y simuladas en el que los máximos anuales de los datos simulados se adaptan a los máximos anuales de los datos observados. En cuanto al pluviómetro de Gontar, los máximos anuales de la serie observada se aproximan a los mayores valores de los máximos anuales de las series simuladas y en caso de Siles, en cambio, la serie observada sigue un comportamiento similar a los menores valores de los máximos anuales de las series simuladas.

5 Referencias

- A. Burton, H.J. Fowler, C.G. Kilsby, and P.E. O'Connell (2010): A stochastic model for the spatial-temporal simulation of non-homogeneous rainfall occurrence and amounts. *Water Resources Research*, 2010.
- A. Burton, H.J. Fowler, S. Blenkinsop and C.G. Kilsby (2010): Downscaling transient climate change using a Neyman-Scott Rectangular Pulses stochastic rainfall model. *Journal of Hydrology*, 2010.
- A. Burton (2008) Rainsim V3.1.1 User Documentation.. September 2008.
- A. Burton, C.G. Kilsby, H.J. Fowler, P.S.P. Cowpertwait, P.E. O'Connell (2007): Rainsim: A spatial-temporal stochastic rainfall modeling system. *Environmental Modelling and Software*, August 2007.
- M.A. Campo Bescós (2008): Evaluación de modelos estocásticos para la agregación-desagregación de precipitaciones y su aplicación en la Comunidad Foral de Navarra. Director: J.J. López Rodríguez. E.T.S. de Ingenieros Agrónomos, Universidad Pública de Navarra, Julio 2008.
- P.S.P. Cowpertwait, P.E. O'Connell (1997): A regionalised Neyman-Scott Model of Rainfall with Convective and Stratiform Cells. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1997.
- P.S.P. Cowpertwait, C.G. Kilsby, P.E. O'Connell (2001): A space-time Neyman-Scott model of rainfall: Empirical analysis of extremes. *Water Resources Research*, June 2001.
- D. Eisingera and K. Wiegand (2008): SERGE: A spatially explicit generator of local rainfall in southern Africa. *South African Journal of Science* January/February 2008.
- U. Haberlandt, A.-D. Ebner von Eschenbach, and I. Buchwald (2008): A space-time hybrid hourly rainfall model for derived flood frequency analysis.. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2008.
- C.G. Kilsby , P.D. Jones, A. Burton, A.C. Ford, H.J. Fowler, C. Harpham, P. James, A. Smith, R.L. Wilby (2007): A daily weather generator for use in climate change studies. *Environmental Modelling and Software*, February 2007.
- D. Koutsoyiannis, C. Onof (2001) Rainfall disaggregation using adjusting procedures on a Poisson cluster model. *Journal of Hydrology*, 2001.
- C. Onof, R.E. Chandler, A. kakou, P.Northrop, H.S. Wheeler, V. Isham (2000) Rainfall modeling using Poisson-cluster processes: a review of developments.. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2000.
- M.J. Puma, I. Rodriguez-Iturbe, M.A. Celia, A.J. Guswa (2007): Implications of rainfall temporal resolution for soil-moisture and transpiration modeling. *Transp Porous Med*, February 2007.
- A. Rahman, P.E.Weimann, T.M.T. Hoang, E.M. Laurenson (2002) Monte Carlo simulation of flood frequency curves from rainfall. *Journal of Hydrology*, 2002.
- B. Sivakumar, A. Sharma (2008): A cascade approach to continuous rainfall data generation at point locations.. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2008.
- A. Sordo (2010): Metodología de análisis del efecto laminador de los embalses bajo un enfoque probabilístico. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.