

6 ANÁLISIS DE LA PELIGROSIDAD. CASO PRÁCTICO: RIERA ROJA

6.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este apartado es la determinación del término de la peligrosidad, en la ecuación

$$N(\theta_i) \approx \text{Poisson} \left(\underbrace{\sum_j \lambda(u_0) \cdot P[X \in [u_j, u_{j+1}]]}_{\text{PELIGROSIDAD}} \cdot \underbrace{P[\theta_i | X \in [u_j, u_{j+1}]]}_{\text{VULNERABILIDAD}} \right). \quad [6.1]$$

Se trata de describir la frecuencia con la que ocurren sucesos de precipitación según sea su volumen de precipitación, caracterizando así el clima que afecta a la cuenca de la Riera Roja. Se utiliza, por un lado, la información pluviométrica del Observatorio Fabra, como punto de partida, y el programa BGPE para la estimación de las probabilidades de ocurrencia e incertidumbres asociadas.

6.2 SERIE PLUVIOMÉTRICA DEL OBSERVATORIO FABRA

Para realizar un estudio pluviométrico que permita describir y analizar las características de la precipitación en la cuenca de la Riera Roja, y obtener las frecuencias de ocurrencia de los diferentes rangos de volumen de precipitación (peligrosidad), es necesario disponer de una serie de registros de precipitación lo más extensa y fiable posible. Una serie de estas características no se encuentra disponible en la propia cuenca de la Riera Roja, como sería deseable, pues es la única manera de conocer las particularidades de los sucesos de precipitación, por ejemplo, de carácter convectivo. Por este hecho, se decide recurrir a la serie del Observatorio Fabra de Barcelona que, si bien no se puede considerar que represente con exactitud el fenómeno de la precipitación en la Riera Roja, es la serie de mayor extensión y calidad y que, por proximidad espacial, no supone una gran merma en la validez de este estudio. Además, esta serie será utilizada para definir otros estadísticos de la precipitación de cara al estudio de la vulnerabilidad, todo ello aprovechando los desarrollos llevados a cabo en tesinas anteriores (*Tugues, 2003*).

Son numeroso los estudios y artículos (*Vázquez, Redaño & Lorente, 1987*) que avalan la idoneidad de la serie del Observatorio Fabra para todo tipo de estudios,

con ciertas discrepancias debidas a diferencias de registros de los diferentes aparatos de medición del Observatorio. En cualquier caso, teniendo en cuenta que esta es la serie de mejor calidad, duración y reconocimiento que se dispone, se considera totalmente apropiada para el desarrollo de esta tesina, siempre teniendo presente que una serie de similares características en la propia cuenca de la Riera Roja hubiese sido la mejor opción.

El primer pluviógrafo del Observatorio Fabra entró en funcionamiento en 1927 y se mantuvo en funcionamiento ininterrumpido hasta 1992⁴. Por este motivo, la serie se considera excepcional, no solamente por su larga duración, sino también por el hecho de estar ininterrumpida y por el meticuloso mantenimiento del que ha sido objeto el pluviógrafo durante todo ese tiempo.

Los datos originales de la serie están en formato de bandas de papel, pero se digitalizó primero y luego se transformaron los datos a la forma habitual de un registro por vuelco de cazoletas. Es decir, en la actualidad, la serie se encuentra en formato digital y contiene los instantes de tiempo en que se produce un vuelco de la cazoleta, o lo que es lo mismo, una lluvia de 0.1 mm respecto al instante de vuelco anterior.

Para la lectura y extracción de los datos de la serie se ha usado una aplicación informática capaz de obtener automáticamente el registro de sucesos de lluvia a partir del archivo original de datos que contiene los instantes de vuelco de cazoletas de 0.1 mm de precipitación. Se trata de un programa escrito en lenguaje FORTRAN (*Tugues, 2003*) que, a partir de una serie de parámetros definitorios de suceso de lluvia introducidos por el usuario, devuelve la información del registro de sucesos de lluvia.

Estos parámetros son los que establecen un criterio de separación entre sucesos consecutivos, ya que la serie temporal descrita no es capaz de diferenciar si dos vuelcos consecutivos pertenecen al mismo suceso de lluvia o no. Así, de la misma manera que se acuerda que dos vuelcos distanciados entre sí una semana pertenecen a sucesos diferentes, también se conviene que dos vuelcos dentro de una lluvia de duración total de 3 horas, pueden estar separados por un espacio de 5 minutos sin que esto signifique que pertenecen a sucesos meteorológicos diferentes. Por tanto, el criterio de separación de sucesos es subjetivo, basado en establecer un límite temporal, y como tal, está sujeto a una gran controversia. Se pueden considerar 2 tipos de directrices generales:

- *Criterios de tipo meteorológico*, que separan situaciones meteorológicas diferentes (depresión, anticiclón, gota fría,...). Dada su dificultad de aplicación se descartaron del estudio.

⁴ La serie ha continuado de forma continua desde 1993, y además se han instalado nuevos aparatos de medida en toda la ciudad de Barcelona con el objetivo de aumentar el número de datos disponibles, con mayor precisión espacial, que permita un mejor conocimiento de las características de la precipitación en Barcelona. Para la realización de esta tesina, se disponía del registro continuo 1927-1992, por lo que no se han tenido en consideración estos últimos registros.

- *Criterios de tipo técnico*, que separan los sucesos de lluvia en base a algún parámetro que facilita la implementación de los resultados obtenidos a la aplicación práctica; en este caso, al diseño de redes de drenaje).

Se ha optado por un criterio técnico, permitiendo la máxima división de la serie en sucesos, para que los sucesos obtenidos puedan ser tratados de forma independiente unos de los otros. El parámetro que permite esta división es la separación temporal máxima entre vuelcos de cazoleta. Así pues, para separaciones altas, se consideran lluvias con intervalos sin precipitación más largos y por tanto lluvias en general más largas, y a la inversa.

En la descripción de la obtención del registro de lluvias anterior, no se hace mención a ningún tipo de condición a la hora de incluir determinados sucesos detectados en el registro final de lluvias. Si este fuese el caso, el registro incluiría como sucesos de lluvia fenómenos que no interesan de cara al análisis posterior, ya sea por su magnitud (sucesos demasiado pequeños para ser considerados) o naturaleza (errores en el sistema de medida). Por este motivo, antes de incorporar un suceso al registro, se imponen 3 tipos de condiciones:

- Restricción sobre la duración. El suceso tiene que tener una duración superior a un determinado tiempo en minutos para ser registrado.
- Restricción sobre la precipitación. Sólo se consideran en el registro final, los sucesos con un volumen de precipitación superior a la restricción impuesta, en mm.
- Restricciones sobre la intensidad. El criterio se basa en imponer un valor mínimo a la intensidad media máxima (IMM) en algún intervalo.

En base a los criterios de definición de suceso de lluvia anteriormente descritos, el programa de lectura de la serie devuelve 2 archivos de texto con la siguiente información:

1. Archivo con la información de los sucesos de lluvia registrados. Esta información de salida, si bien igualmente útil para el propósito de este trabajo, está enfocada al estudio y análisis de patrones de precipitación, por lo que se computan variables básicas de los sucesos de lluvia y otras variables utilizadas en ese tipo de trabajos. A continuación se citan estas variables, algunas de las cuales han sido necesarias en el desarrollo del presente trabajo:

- Instante de inicio del suceso. En realidad se trata de 5 variables diferenciadas: día, mes, año, hora y minuto.
- Duración (horas).
- Precipitación total (mm).
- Intensidades medias máximas (IMM).
- IMM correspondiente al intervalo de 5 minutos.

- Periodos de retorno asociados a las IMM's.
- Periodo de retorno máximo.
- Intervalo en que se da el periodo de retorno máximo.
- Parámetros descriptores del pluviograma acumulado. Para describir la "forma" de la lluvia, se necesita alguna descripción de la evolución de la precipitación a lo largo del tiempo. Entre las representaciones clásicas se encuentran el hietograma, el pluviograma y el pluviograma acumulado. De estas tres representaciones, se ha escogido el pluviograma acumulado, ya que al ser una medida integral de las otras dos es más robusta que aquellas, en el sentido que filtra las oscilaciones de alta frecuencia, es decir, las grandes variaciones sucesivas en pequeños espacios de tiempo. Para poder comparar los diferentes sucesos entre sí, se registra el pluviograma acumulado doblemente normalizado. El eje de coordenadas representa la precipitación acumulada respecto a la precipitación total y el eje de abscisas representa el tiempo transcurrido desde el inicio del suceso respecto a la duración total del mismo. Evidentemente, como la precipitación total y la duración son variables que también se han registrado, en cualquier momento se puede recuperar el pluviograma acumulado no normalizado. También conviene aclarar el hecho de que el pluviograma acumulado es una curva continua, por lo que se ha tenido que discretizar para registrar como variables los valores en un determinado número de puntos. La discretización se hace en el eje temporal, y el número de intervalos es un parámetro escogido por el usuario.

De todas estas variables, las que han sido utilizadas son: el instante de inicio del suceso, para poder definir sucesos de lluvia independientes (*Apartado 6.2.2*); precipitación total, para la descripción del clima, en este apartado; y duración del suceso y parámetros descriptores del pluviograma acumulado, en el análisis de Monte Carlo en el cálculo de la vulnerabilidad (*Apartado 7*).

2. Archivo con la información resumen del proceso de extracción de datos.

- Sucesos totales detectados, a partir del parámetro escogido de espacio de tiempo máximo entre instantes de vuelco para considerar sucesos de lluvia diferentes.
- Sucesos que no cumplen el criterio de duración mínima.
- Sucesos que no cumplen el criterio de precipitación mínima.
- Sucesos que no cumplen el criterio de intensidad mínima.
- Sucesos válidos detectados.

La información genérica que se recoge en este archivo resumen del proceso, ha sido utilizada para la toma de decisión en cuanto a la definición de suceso de lluvia, tal y como se describe en el apartado siguiente.

6.2.1 Definición de suceso de lluvia

El registro de lluvias que se obtenga en este apartado será el que servirá para el cálculo de la peligrosidad y la vulnerabilidad, describiendo las variables de la precipitación que, como se ha comentado, son las más determinantes en la respuesta de la red de drenaje. Por este motivo, la definición de suceso de lluvia es un punto clave para el desarrollo del trabajo. Una elección equivocada o que no se ajuste específicamente a los objetivos del estudio, puede hacer que los resultados y análisis pierdan validez.

En primera instancia, se planteó trabajar con el mismo registro utilizado en el trabajo para la determinación de patrones de precipitación (*Tugues, 2003*). En dicho trabajo, la definición de suceso de lluvia correspondía a: 90 min de tiempo máximo entre vuelcos de cazoleta, 10 min de duración mínima, 5 mm de precipitación mínima y sin límite en la IMM. El resultado, consistía en un total de 1689 sucesos de lluvia, donde más de 700 de ellos correspondían a eventos de menos de 10 mm de precipitación total. Esta situación, refleja que los criterios establecidos para un análisis de patrones de precipitación no tienen porque ser, necesariamente, los mismos utilizados para un análisis de riesgo y vulnerabilidad.

Disponer un máximo de 90 minutos entre vuelcos de cazoletas, hace que se registren eventos con colas (tanto por delante como por detrás) que se alargan mucho temporalmente y no aportan prácticamente nada al suceso. Estas colas son muy largas en el tiempo y con aportaciones de volumen casi despreciables frente al volumen total del evento. Se puede pensar, además, que en 90 minutos sin lluvia significativa, los problemas de la red de drenaje, si los ha habido, cambian radicalmente. En la *Figura 11* puede observarse, para los mismos sucesos de precipitación, aquellos definidos a partir de 90 minutos de tiempo máximo entre vuelcos presentan colas que poco o nada aportan al análisis, mientras que en aquellos definidos con tan sólo 30 minutos de tiempo máximo, las colas desaparecen manteniendo, como es lógico, la forma en el resto del hietograma.

Por otro lado, es evidente que los sucesos de menos de 10 mm no tienen ningún tipo de repercusión sobre la red de drenaje de Sant Boi. Si tuviesen una intensidad muy elevada, y por tanto interés, quedarían incluidos dentro de un suceso de mayor duración, y registrado como tal. Podría incluso subirse este umbral a 15 o 20 mm, pero teniendo en cuenta que no se van tener en consideración las colas de los eventos, 10 mm parece razonable. En cuanto a la duración mínima del evento, 10 minutos parece razonable, y no recomendable aumentar este valor, pues conocidas las características climáticas de la zona, se sabe que existen eventos de intensidades muy elevadas y duraciones muy cortas capaces de provocar el fallo de la red de drenaje.

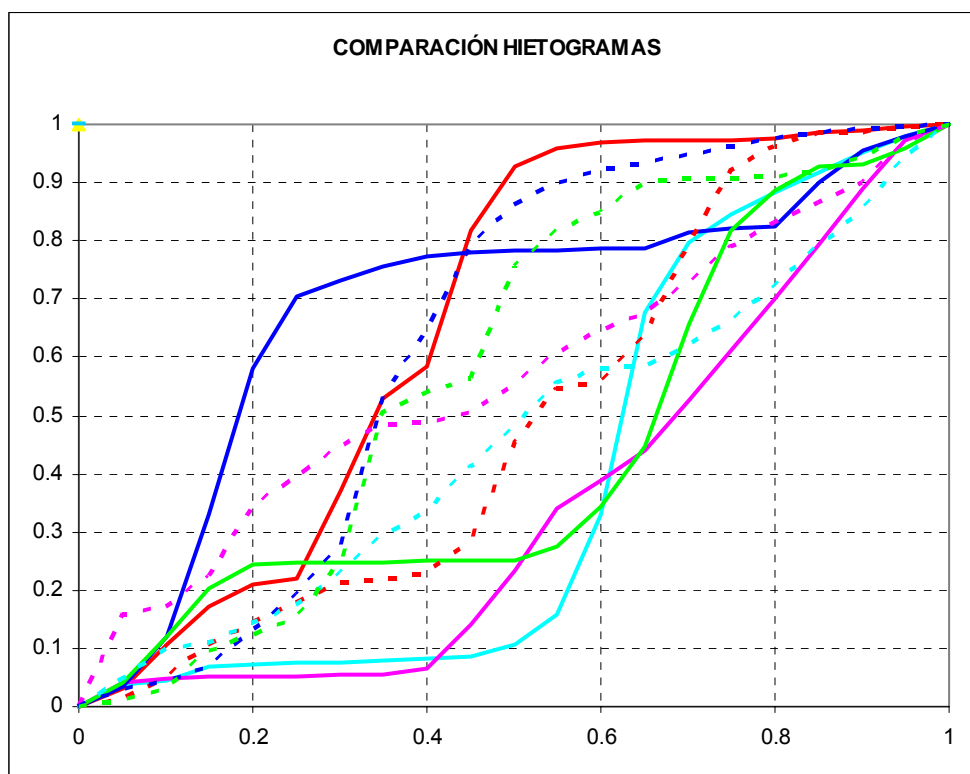


Figura 11. Comparación de hietogramas doblemente adimensionalizados para 5 sucesos de precipitación con diferentes definiciones de separación máxima entre vuelcos de cazoleta (continuo: 90 min; discontinuo: 30 min).

El objetivo es, entonces, definir como suceso de lluvia, aquella parte de un evento de precipitación que tenga influencia para el estudio de la respuesta de la red de drenaje de acuerdo a las reflexiones anteriores. Puesto que para este propósito, las lluvias de duraciones muy cortas o de poco volumen de precipitación o colas de muy baja intensidad no son interesantes, finalmente los sucesos se han definido de la siguiente manera:

- 30 minutos de tiempo máximo entre vuelcos de cazoleta.
- 10 minutos de duración mínima de la lluvia.
- 10 milímetros de precipitación mínima.
- Sin restricciones en la intensidad media máxima.

De todas maneras, no hay que pensar que por el hecho de estar analizando la parte de mayor intensidad del evento de lluvia o lo que podría llamarse *núcleo del evento*, se está alterando el análisis de riesgo. Otra cuestión sería con respecto a un análisis de patrones de precipitación, pero en este caso, lo que se está haciendo es una caracterizar la lluvia que afecta a la red de drenaje, extrayendo de una serie continua de datos, aquellos que han sido considerados suficientemente significativos, sin alterar en ningún caso su frecuencia de aparición, magnitud, etc. Igualmente, al poner un mínimo de 10 mm de precipitación total, se están quitando del análisis un número elevado de eventos,

que sin embargo no aportan nada, sin por ello estar distorsionando el registro de eventos significativos para el análisis de peligrosidad destinado a una evaluación del riesgo. Pensando en el posterior análisis de la peligrosidad donde se describe la magnitud (volumen) de precipitación mediante una GPD, el hecho de variar la definición de suceso de precipitación no debe preocupar, puesto que la distribución GPD mantiene su forma para cambios de umbral de definición de sucesos.

Finalmente, el registro de sucesos de lluvia obtenido de definir la lluvia con los parámetros anteriores consta de 865 eventos. En la siguiente tabla pueden observarse los resultados obtenidos en base a diferentes definiciones de suceso de lluvia y, resaltado, la opción escogida.

PARÁMETROS DE DEFINICIÓN DE SUCESO DE LLUVIA									
Tiempo máximo entre vuelcos (min)	90	90	90	50	120	180	180	30	30
Duración mínima de lluvia para registrarla (min)	10	10	10	10	10	10	10	10	0
Precipitación mínima para registrarla (mm)	5	10	20	5	8	5	10	10	10
Intensidad media máxima en un 5 minutos (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RESULTADOS									
Sucesos totales detectados	5906	5906	5906	7039	5438	4840	4840	8250	8250
Sucesos de duración insuficiente	1633	1633	1633	2214	1428	1215	1215	2894	0
Sucesos de precipitación insuficiente	4205	4958	5515	5320	4246	3192	3861	7381	7381
Sucesos de intensidad insuficiente	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sucesos válidos detectados	1689	946	391	1701	1189	1637	987	865	869
Duración media de sucesos válidos (h)	3.3	4.3	5.7	2.6	4.5	4.7	5.9	2.8	2.8

Tabla 2. Resumen de los registros de precipitaciones en función de diferentes criterios de definición de suceso de lluvia a partir de la serie del Observatorio Fabra.

Del análisis de los diferentes registros obtenidos, también pueden extraerse algunas conclusiones:

- Para tiempo máximo de 30 min entre vuelcos de cazoleta (definición en este trabajo), la condición de precipitación mínima de 10 mm es siempre más restrictiva que la de 10 minutos de duración mínima.
- Al disminuir el tiempo máximo entre vuelcos aumenta, como es lógico, el número de eventos registrados, pero dadas las condiciones de precipitación y duración mínimas, el número de sucesos válidos disminuye.

- La duración de los eventos registrados está directamente relacionada con la definición que se proponga ellos. Tal y como se esperaba, al querer representar los *núcleos de los eventos* o partes más significativas en cuanto a intensidad y volumen, la duración media de los sucesos registrados disminuye, situándose para la definición finalmente establecida en 2.8 horas.

6.2.2 Independencia de los sucesos

Dado que la ocurrencia de sucesos de lluvia se va a asociar a un proceso de Poisson, debe cumplirse la hipótesis de independencia temporal entre eventos consecutivos.

Determinar la independencia de sucesos no es una cuestión trivial. En el caso de que los sucesos analizados no puedan considerarse independientes, el modelo de peligrosidad que se realiza en el siguiente apartado pierde, en gran parte, su validez. En general, se produciría una sobre valoración de la probabilidad de ocurrencia, que puede ser importante para determinar periodos de retorno elevados (del orden de 50, 100, 200 años). Al acortar el tiempo máximo entre vuelcos de cazoletas en la definición de evento de lluvia (30 min) se tiende a registrar varios sucesos en un mismo día que, de ningún modo, pueden ser considerados independientes, ya que proceden de la misma situación meteorológica.

Puesto que esta circunstancia debe evitarse para mantener el vigor del análisis, se decide que solamente se tenga en cuenta el máximo evento registrado en una ventana móvil de 7 días. De esta manera, para asegurar la independencia entre sucesos, se fuerza a que 2 eventos consecutivos estén separados por un espacio temporal de 3 días; es decir, siempre que dos o más sucesos estén excesivamente próximos en el tiempo (3 días), únicamente se registra aquel de mayor volumen de precipitación. Se selecciona el máximo como representativo de todos los pequeños sucesos a lo largo de un intervalo de tiempo en el que sólo se tiene en cuenta una situación meteorológica.

De esta manera, si se partía de un registro de 865 sucesos de lluvia, después de eliminar aquellos que no pueden suponerse independientes, el número final de eventos registrados para el análisis de peligrosidad es de 665 en 66 años. Si bien se ha reducido el número de eventos del registro, la disminución no ha sido drástica, ni pone en peligro el análisis que a continuación se realizará; más bien al contrario, se han establecido las correcciones necesarias para cumplir las hipótesis que se manejan en el estudio.

Número de sucesos registrados	Número de sucesos válidos	Número de sucesos independientes	Número de años del registro
8250	865	665	66

Tabla 3. Resumen del número de eventos registrados para el análisis de peligrosidad y vulnerabilidad.

Otras consideraciones, además de la independencia de los sucesos, deben plantearse al trabajar con un modelo Poisson-GPD, como la hipótesis de estacionalidad en la ocurrencia de los mismos. Efectivamente, existe una componente de periodicidad anual de la precipitación, contradictoria con esta hipótesis; sin embargo, para el análisis de eventos de magnitud elevada, que son aquellos que provocan afecciones a la red de drenaje, este hecho puede ser despreciado (*Pawlowsky-Glahn, Tolosana-Delgado & Egozcue, 2005*).

6.2.3 Registro definitivo de sucesos de lluvia

Finalmente, el registro de sucesos de lluvia extraído de la serie pluviométrica del Observatorio Fabra, una vez eliminadas las dependencias temporales, consta de 665 eventos. Esta es una cifra muy elevada y que refleja la gran utilidad de disponer de series tan largas y de calidad contrastada como la del Observatorio Fabra, que es de 66 años (mayor en la actualidad).

En cualquier caso, hay que remarcar la dificultad de ver representado en series de “tan solo” 66 años de registro continuo, eventos de magnitud extraordinaria. Está claro que cuanto más larga sea la serie, mejores y con menor incertidumbre serán los ajustes estadísticos que se realicen, pero lejos se está aún de poder realizar análisis de tipo frecuencial, siendo necesario recurrir a trabajos de tipo estadístico.

El registro cuenta con un máximo de 195.4 mm, aunque más de la mitad del registro corresponde a sucesos de menos de 19 mm. De hecho, únicamente hay 33 eventos por encima de 56.5 mm, que es el volumen de la lluvia de diseño de periodo de retorno 10 años de CLABSA para la ciudad de Barcelona, mediante bloques alternados.

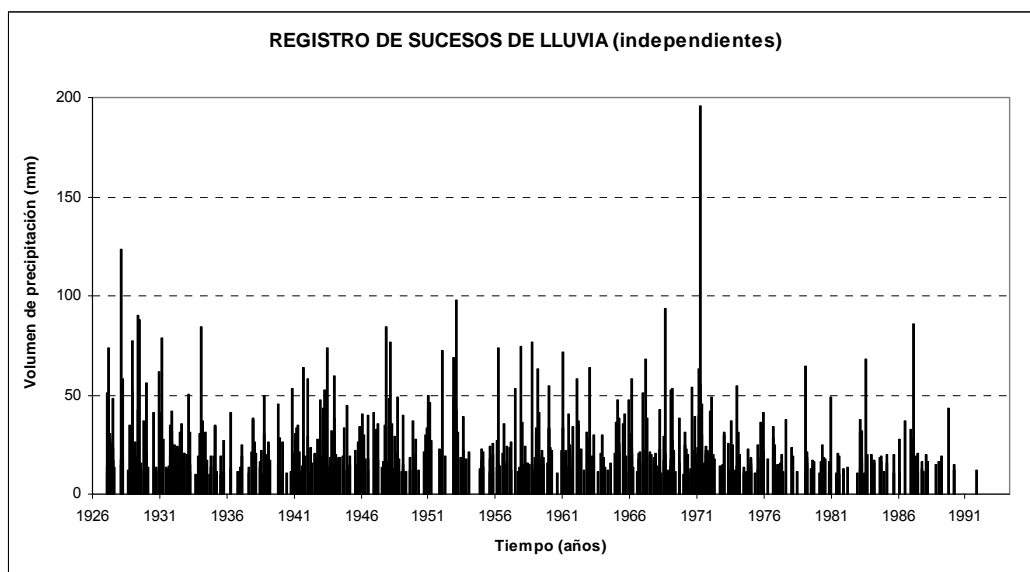


Figura 12. Registro de sucesos de lluvia (independientes), a partir de la serie del Observatorio Fabra.

6.3 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA BGPE

BGPE (*Bayesian Generalized Pareto Estimation*) es un programa desarrollado por Juan José Egozcue y Raimon Tolosana-Delgado en el año 2002 con el propósito de servir como herramienta en los problemas de evaluación de riesgos y que tiene en cuenta la necesidad de cuantificar la incertidumbre en la predicción de ocurrencia de eventos extremos. El tratamiento de la incertidumbre en BGPE es típicamente Bayesiano, por lo que los parámetros son tratados como variables aleatorias, por lo que es posible estimar probabilidades de ocurrencia, periodos de retorno, etc., así como computar sus intervalos de confianza.

En este caso particular, se quiere conocer la probabilidad de ocurrencia de eventos de precipitación de un volumen determinado. El enfoque que se da en BGPE, para poder calcular estas probabilidades y evaluar su incertidumbre se basa en dos modelos probabilísticos: (1) un proceso de Poisson para los tiempos de ocurrencia de los sucesos y (2) un modelo para describir la magnitud de esos sucesos (de la misma manera que se ha expuesto el problema en el *Apartado 3* de la tesina).

1. Definidos los sucesos de precipitación según el *Apartado 6.2*, el umbral absoluto (u^*) que define los sucesos de precipitación venía dado por 10 mm de precipitación. Para un proceso de Poisson de parámetro $\lambda(u^*)$, se estima que el tiempo medio entre eventos de precipitación (sea cual sea su magnitud) se expresa por el periodo de retorno,

$$\tau(u^*) = 1/\lambda(u^*). \quad [6.2]$$

2. El volumen de precipitación de los sucesos se supone que: (a) es una variable aleatoria independiente; (b) por encima de un umbral de referencia (u_0) sigue una Distribución Generalizada de Pareto (GPD); (c) es independiente del tiempo de ocurrencia del suceso de precipitación. Así pues, para eventos de volumen de precipitación mayores que este umbral ($X > u_0$), la función de probabilidad se expresa como:

$$Y = X - u_0; \quad F_Y(y) = P[Y \leq y | X > u_0] = 1 - \left(1 + \frac{\xi}{\beta} \cdot y\right)^{-\frac{1}{\xi}}, \quad y > 0, \quad [6.3]$$

donde $0 \leq y < +\infty$ si $\xi > 0$ y $0 < y \leq -\beta/\xi$ si $\xi < 0$. Los parámetros de la distribución son $\beta > 0$ (escala) y ξ (forma). Si el parámetro de forma, ξ , tiende a cero, la distribución GPD corresponde a la distribución exponencial.

Una de las principales características de la GPD (*Teorema de Pickands*) (*Embrechts et al., 1997*) es que para cualquier variable X , cuya distribución es suave en la cola superior (finita o infinita), la distribución de excesos por encima de un umbral suficientemente alto, se distribuye aproximadamente por una GPD (DA – *Weibull* si finita), por lo que la GPD es una distribución idónea para representar los fenómenos aquí estudiados.

Asimismo, se puede decir que los sucesos de precipitación de volumen mayor que u_j y que están por encima del umbral de referencia u_0 , es decir $u_j > u_0$ constituyen un proceso de Poisson de parámetro $\lambda(u_j)$, que se puede escribir como:

$$\lambda(u_j) = \lambda(u_0) [1 - F_Y(u_j - u_0)]. \quad [6.4]$$

Según el problema de peligrosidad descrito en [6.1], donde se ha dividido en rangos de volumen de precipitación (u_j, u_{j+1}) , se puede calcular cada uno de los términos el sumando como:

$$\underbrace{\lambda(u_0) \cdot P[X \in [u_j, u_{j+1}]]}_{\text{PELIGROSIDAD}} = \lambda(u_j, u_{j+1}) = \frac{1}{\tau(u_j, u_{j+1})} = \frac{1}{\tau(u_j)} - \frac{1}{\tau(u_{j+1})}. \quad [6.5]$$

Cada uno de estos términos se puede computar según los desarrollos anteriores, una vez fijados los siguientes parámetros:

- El umbral de referencia de la magnitud de los eventos u_0 .
- Los dos parámetros de la GPD (ξ, β) .
- El parámetro de Poisson $\lambda(u_0)$, que en adelante se denotará según la siguiente expresión:

$$z(u_0) = -\log_{10} \lambda(u_0) = \log_{10} \tau(u_0). \quad [6.6]$$

De estos 4 parámetros que definen el modelo, el umbral de referencia u_0 se estima de manera un tanto subjetiva, tal y como se explica en el *Apartado 6.4.2*. Por su parte, los otros tres parámetros se estiman de forma conjunta usando métodos Bayesianos y, por lo tanto, el resultado de la estimación de la distribución de probabilidad conjunta de estos tres parámetros tiene más información que solamente tres valores, incorporando la incertidumbre. BGPE está especialmente desarrollado para el control de las incertidumbres de tipo estocástico y las de tipo estadístico, por medio de la estimación Bayesiana de los parámetros ξ, β y $z(u_0)$. Aún así, la incertidumbre propia del modelo Poisson-GPD en cuanto a la realidad física que representa, y la incertidumbre de los datos de precipitación (registro del Observatorio Fabra) afecta a la validez del resultado que finalmente se obtenga.

La estimación de ξ, β y $z(u_0)$ mediante estimación Bayesiana significa suponer que estos parámetros son variables aleatorias y que se pueden describir mediante su distribución de probabilidad conjunta, teniendo así en cuenta la incertidumbre de cada uno de ellos. Conseguir esta distribución, condicionado a la información disponible, es el principal objetivo de la estimación Bayesiana, y para ello, se usa información de dos tipos:

1. Información a priori referente a fenómeno estudiado. Se basa en los conocimientos físicos, la experiencia, información comparable, simulaciones, etc.
2. Datos muestrales que informan del verdadero comportamiento del fenómeno, representando el conocimiento objetivo.

A continuación se resumen los procedimientos de cálculo mediante técnicas de estimación Bayesiana, que pueden encontrarse totalmente desarrollados en el manual del programa:

En BGPE se supone que la función de densidad conjunta a priori de los tres parámetros puede factorizarse como

$$f_{\xi\beta z}(\xi, \beta, z) = f_{\xi\beta}(\xi, \beta) \cdot f_z(z), \quad [6.7]$$

suponiendo que el conocimiento a priori con respecto al parámetro de Poisson es independiente de la magnitud de los sucesos.

La densidad marginal a priori para el parámetro de Poisson (expresado como z) se asume uniforme para un gran rango de valores z . Por su parte, la densidad marginal de los parámetros de forma y escala de la GPD se estima a priori respondiendo a ciertas cuestiones sobre el fenómeno para definir un dominio plausible.

Por otro lado, la información muestral se utiliza para obtener la verosimilitud de los datos, definida como la densidad de probabilidad conjunta, en la función

$$L(\xi, \beta, z | \text{Datos}) = P[N(u_0) = n | z, t] \times \prod_i f_Y(y_i | \xi, \beta), \quad [6.8]$$

donde los datos consisten en los valores de los excesos sobre u_0 y el tiempo de observación t (del registro del Observatorio Fabra).

Seguidamente, usando el *teorema de Bayes*, la información a priori y la información muestral se combinan para obtener la densidad conjunta a posteriori de los parámetros,

$$\begin{aligned} f_{\xi\beta z}(\xi, \beta, z | Y_i = y_i, i = 1, \dots, n; t) &= \\ &= C \times f_{\xi\beta}(\xi, \beta) \prod_i f_Y(y_i | \xi, \beta) \times P[N(u_0) = n | z, t] f_z(z), \end{aligned} \quad [6.9]$$

donde C es una constante de normalización. La ecuación [6.9] es la base para obtener algunos de los parámetros deseados inicialmente como periodos de retorno, o probabilidades de no excedencia.

Además, el carácter aleatorio de los parámetros implica que las probabilidades de ocurrencia también son aleatorias, lo que permite unir la incertidumbre estadística

de la estimación realizada, con la incertidumbre estocástica del modelo (*predicción Bayesiana*). Así pues, pueden *predecirse* tanto las probabilidades de ocurrencia como la distribución de excesos de la GPD usando el *teorema de la probabilidad total* tal y como se muestra a continuación:

$$P[N(u_1, u_2) = n|t] = \int_{\xi=-\infty}^{+\infty} \int_{\beta=0}^{+\infty} \int_{z=-\infty}^{+\infty} P[N(u_1, u_2) = n|\xi, \beta, z, t] \times f_{\xi\beta z}(\xi, \beta, z|Y_i = y_i, i = 1, \dots, n; t) d\xi d\beta dz, \quad [6.10]$$

$$F_Y(y) = \int_{\xi=-\infty}^{+\infty} \int_{\beta=0}^{+\infty} F_Y(y|\xi, \beta) f_{\xi\beta}(\xi, \beta|Y_i = y_i, i = 1, \dots, n; t) d\xi d\beta. \quad [6.11]$$

La resolución de estas integrales se lleva a cabo mediante técnicas simulación de Monte Carlo, pudiendo describirse la incertidumbre usando cuantiles o percentiles.

6.4 CÁLCULO DE LA PELIGROSIDAD MEDIANTE EL PROGRAMA BGPE

6.4.1 Aplicación de escala logarítmica

El parámetro de forma ξ define el comportamiento de la cola superior de la distribución GPD, según el comportamiento de los valores extremos. Se pueden definir 3 dominios de atracción (DA) para la distribución GPD según el parámetro de forma:

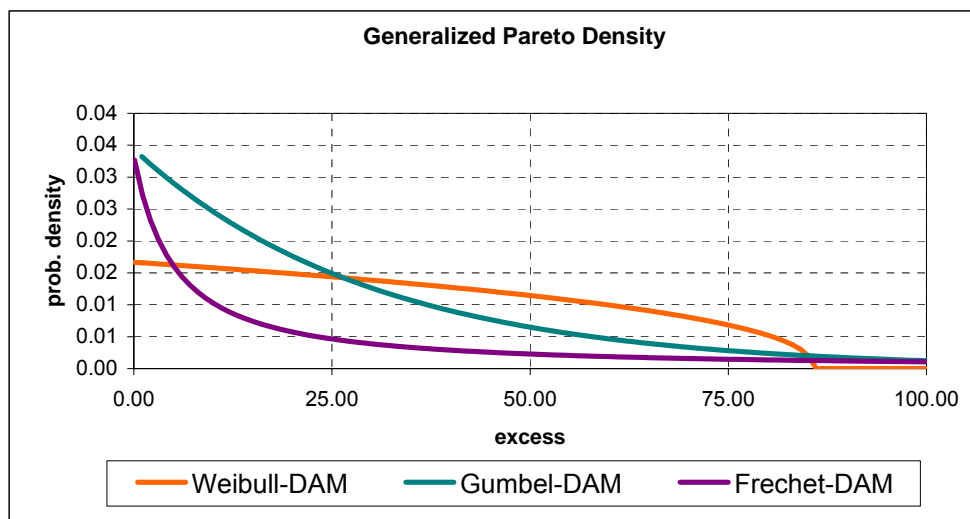


Figura 13. Funciones de densidad de probabilidad de la GPD. Weibull-DAM ($\xi = -0.7, \beta = 60$); Gumbel-DAM ($\xi = 0.0, \beta = 30$); Frechet-DAM ($\xi = 5, \beta = 30$).

- DA – Frechet ($\xi > 0$), donde la cola superior es muy pesada.
- DA – Gumbel ($\xi = 0$), correspondiente a una distribución exponencial.
- DA – Weibull ($\xi < 0$), donde la cola tiene límite superior.

Al trabajar en el DA-Weibull, la estimación Bayesiana que se realiza en BGPE también afecta a algunos parámetros propios de este dominio de atracción como el límite superior, que está definido por

$$\text{límite superior} = u_0 - \frac{\beta}{\xi}, \quad \xi < 0. \quad [6.12]$$

La precipitación es un fenómeno que, físicamente, se considera limitado superiormente, por lo que el ajuste de la GPD debería reflejar este hecho, apuntando claramente a un dominio de atracción de Weibull, donde la cola superior es finita ($\xi < 0$). Por otro lado, las diferencias relativas en cuanto a la magnitud de la precipitación parecen más apropiadas para describir el problema, pues no resulta razonable comparar cambios de, por ejemplo, 25 mm de precipitación, si se pasa de 5 mm a 30 mm o si se pasa de 200 mm a 225 mm. Es por esto que, aplicar una transformación de tipo logarítmica soluciona la diferente percepción que se tiene del problema al usar escalas relativas o absolutas.

Algunos artículos (*Egozcue et al, 2006*) y (*Pawlowsky-Glahn, Tolosana-Delgado & Egozcue, 2005*) avalan la elección de la escala logarítmica para el estudio de la *peligrosidad* relacionado con el volumen de eventos de precipitación, mostrando un ajuste en el DA de Weibull, frente al uso de escalas naturales (absolutas) que acaban ajustándose en el DA de Frechet. En definitiva, en adelante se trabajará la escala logarítmica del volumen de precipitación, utilizando la siguiente notación: *volumen en escala logarítmica (volumen en escala natural [mm])*; por ejemplo, 1.10 (12.59 mm).

RANGOS DE PRECIPITACIÓN [mm] - cada 0.5 en escala logarítmica					
Escala logarítmica	Escala natural	Escala logarítmica	Escala natural	Escala logarítmica	Escala natural
1.00	10.00	1.60	39.81	2.20	158.49
1.05	11.22	1.65	44.67	2.25	177.83
1.10	12.59	1.70	50.12	2.30	199.53
1.15	14.13	1.75	56.23	2.35	223.87
1.20	15.85	1.80	63.10	2.40	251.19
1.25	17.78	1.85	70.79	2.45	281.84
1.30	19.95	1.90	79.43	2.50	316.23
1.35	22.39	1.95	89.13	2.55	354.81
1.40	25.12	2.00	100.00	2.60	398.11
1.45	28.18	2.05	112.20	2.65	446.68
1.50	31.62	2.10	125.89	2.70	501.19
1.55	35.48	2.15	141.25	2.75	562.34

Tabla 4. Transformación de la variable volumen de precipitación en escala logarítmica.

6.4.2 Estimación del umbral inferior

Mediante el uso de BGPE no se puede estimar automáticamente el umbral inferior de referencia (u_0) de la GPD y hay que fijarlo por tanteo, ayudándose de una serie de pruebas, gráficos y procedimientos. En una secuencia lógica, el proceso de selección sigue los siguientes pasos:

- Asignar un valor inicial, intuitivo del umbral u_0 .
- Estudiar el análisis de excesos (excesos sobre un umbral) proporcionado por BGPE, para tratar de ajustar un valor del umbral lo más adecuado posible.
- Una vez fijado el umbral u_0 , comparar la densidad de probabilidad a posteriori y los resultados de los test de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov y multinomial χ^2 , para validar la elección realizada. Para ello es necesario establecer las hipótesis a priori.

El objetivo principal en la estimación de u_0 es encontrar un punto de equilibrio entre la bondad del ajuste de los excesos en la GPD (mejor a medida que se aumenta el umbral) y un número razonable de eventos registrados por encima de dicho umbral (que obviamente decrece al aumentar u_0).

El análisis de los excesos permite realizar una elección visual del umbral u_0 , de acuerdo a la siguiente propiedad de la GPD: *el número esperado de excesos, expresado como función de u_0 es una función lineal para un rango muy amplio de valores del parámetro de forma ξ* (concretamente en el DA – Weibull):

$$E[Y - u | Y > u] = \frac{\beta - \xi u}{1 - \xi}, \quad \xi < 1, \quad 0 \leq u. \quad [6.13]$$

La *Figura 14* muestra los valores esperados para los diferentes umbrales. Se han dibujado dos líneas continuas que intentan encajar entre las probabilidades del 25% y 75% de los excesos esperados, siguiendo la media (color negro) y mediana (color naranja) estimadas. La línea se puede trazar hacia atrás hasta cortar aproximadamente en un punto cerca del umbral 1.5, indicando dónde podría establecerse el umbral (u_0).

El umbral inferior de referencia (u_0) se ha establecido definitivamente en 1.511 (32.4 mm) para la definición de la GPD.

Esta línea tiene una pendiente negativa, indicando que el dominio de atracción de la GPD que mejor es adapta a los datos es el DA-Weibull, tal y como se esperaba. También puede observarse en la misma figura como existe un número elevado de eventos registrados por encima del umbral escogido, por lo que esta elección no provoca una reducción importante de datos para el posterior ajuste de la GPD.

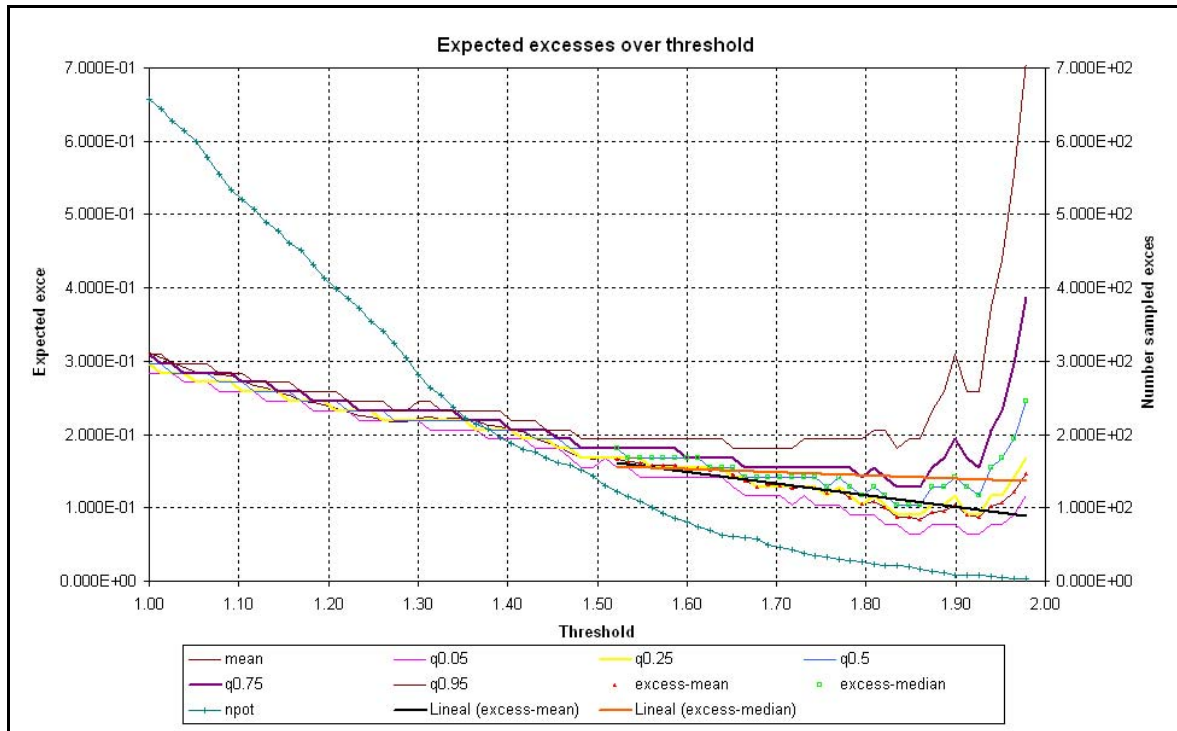


Figura 14. Análisis de excesos por encima de un umbral.

La Figura 15 y la Figura 16 de los test de bondad de ajuste marcan las zonas donde la caracterización a priori de la distribución es compatible con los datos del registro (los mapas de bondad de ajuste dependen únicamente de los datos del registro y no la información a priori). Si el área donde el ajuste es aceptable no coincide con el área establecida por la información a priori, o bien esta última tiene que ser revisada o el umbral inferior (u_0) reajustado.

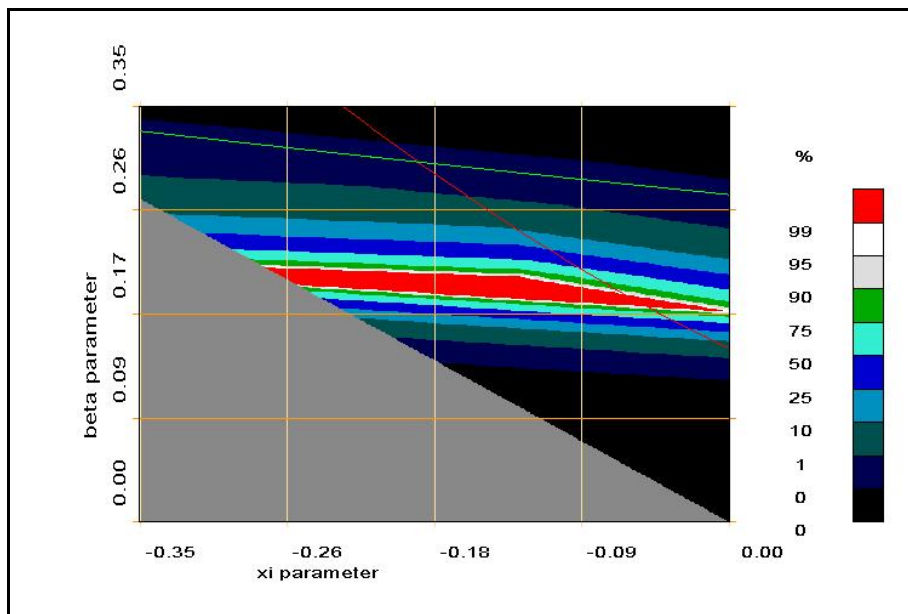


Figura 15. Test de bondad de ajuste Kolmogorov – Smirnof.

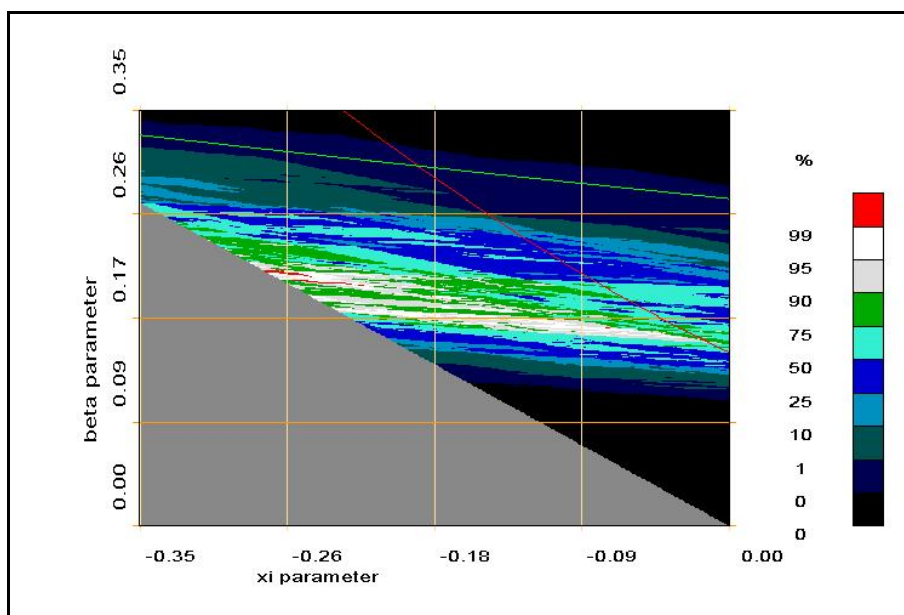


Figura 16. Test de bondad de ajuste multinomial χ^2 .

Hay que remarcar que la validación del umbral u_0 mediante el análisis excesos y los test de bondad de ajuste no hacen desaparecer la incertidumbre de la modelización, sino que sirve para afirmar que no hay motivos para rechazar el modelo de acuerdo a los datos disponibles. En este aspecto, a menor número de datos disponibles (mayor umbral u_0), más difícil será rechazar el modelo, por lo que es conveniente elegir el umbral más bajo para el cual la distribución GPD es aceptable, aumentando el número de excesos registrados.

Se considera que el umbral finalmente elegido ($u_0=1.511$) es suficientemente bajo, de forma coherente con las explicaciones previas pero además, se espera que, en vistas al cálculo final de las probabilidades de ocurrencia de los distintas respuestas de la red de drenaje, no existan fallos de la red para precipitaciones por debajo de este umbral de volumen de precipitación. En el *Apartado 8* (vulnerabilidad) se descubre que hay un número pequeño de casos en que para precipitaciones por debajo de 1.511 (32.4 mm) sí hay vertidos de caudal en superficie.

6.4.3 Información a priori

Tal y como se ha comentado anteriormente, la información a priori exige establecer una distribución conjunta de los parámetros de la GPD, que esté de acuerdo con el conocimiento del fenómeno de precipitación para la cuenca de la Riera Roja. A continuación se especifica cuál ha sido la información a priori empleada, siguiendo los métodos desarrollados por *Egozcue y Ramis (2001)* y *Egozcue y Tolosana-Delgado (2002)*.

En cuanto al parámetro de Poisson, se asume que la función de densidad es uniforme para un rango muy amplio de valores, renunciando a incluir información

a priori. Se considera que los datos del obtenidos de la serie del Observatorio Fabra son suficientes para su estimación, y que su verosimilitud es mucho más significativa que cualquier posible información subjetiva (existen 130 registros por encima del umbral $u = 1.511$).

Generalmente, la información a priori se usa para marcar los límites admisibles del dominio de los parámetros β y ξ de la GPD. En este caso la información se extrae del conocimiento de la precipitación en el área Mediterránea y específicamente de la cuenca de la Riera Roja en Sant Boi de Llobregat.

Esta información, ordenada según su grado de influencia, es la siguiente:

1. El volumen de precipitación de un suceso de lluvia es un fenómeno de magnitud acotada.
2. Una precipitación de 2.85 (700 mm) es prácticamente imposible. Así pues, se estima que eventos de precipitación superior a 1.511 (32.4 mm) alcanzan 700 mm con probabilidad 10^{-4} (prácticamente imposible).
3. Dado un evento de precipitación de más de 1.511 (32.4 mm) la probabilidad de superar los 1.8 (63 mm) es menor a 0.35.
4. Una precipitación de 2.55 (350 mm) es posible, aunque quizás no ha sido nunca observada.
5. Las frecuencias de eventos decrecen con la precipitación; el decrecimiento es, por lo menos, lineal.
6. Un evento típico de precipitación por encima de 1.511 (32.4 mm) es 1.64 (44 mm), y ocurre aproximadamente con probabilidad 0.5 (evento característico).

La suposición más importante es la realizada en el primer punto. En esencia, implica que sólo se considera la distribución GPD en el dominio de atracción (DA) de Weibull ($\xi < 0$), reflejando el hecho de que la precipitación tiene un límite físico en cuanto al volumen caído. La *Figura 17* muestra la densidad de probabilidad conjunta a priori para ξ y β . La suposición anterior se ve reflejada en el límite superior de ξ .

La segunda suposición (eventos prácticamente imposibles) se basa en nuevamente en criterios físicos. En la *Figura 17* queda representado por la línea roja que corta la esquina superior derecha del dominio representado, excluyendo aquellas GPD's que no satisfacen la condición impuesta. Dado el grado de desconocimiento en cuanto al límite superior de la precipitación (que podría relacionarse con algunos análisis de *precipitación máxima probable*), se ha optado por sobreestimar este valor. En cualquier caso, la densidad a posteriori revela un valor bastante menor a los 700 mm impuestos a priori.

La tercera suposición es una condición más débil, y por lo que se opta por definir una probabilidad suficientemente holgada como para no crear un conflicto con la realidad física que se intenta describir a priori. Produce un efecto similar a la condición anterior, limitando el dominio a la zona no excluida por esta condición.

En la *Figura 17* aparece representado por una línea de color verde, que excluye valores muy elevados de β .

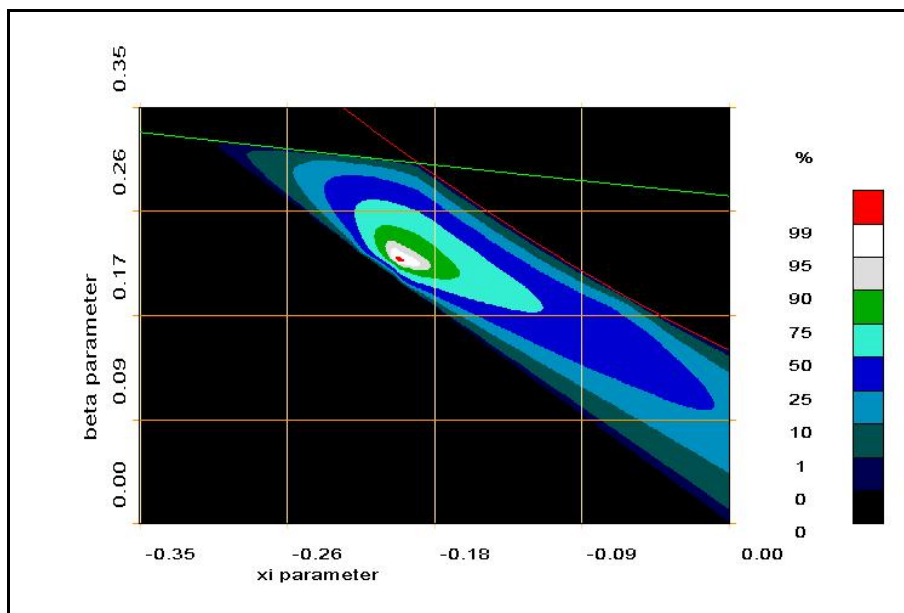


Figura 17. Densidad de probabilidad conjunta a priori de los parámetros de la GPD.

La cuarta suposición es bastante subjetiva aunque, en general, la experiencia en cuanto a las características del clima en el área Mediterránea, hacen presuponer que no hay ninguna razón física para no creer que una lluvia de 350 mm no es alcanzable. Esta condición excluye del dominio el triángulo inferior izquierdo con vértice en $(\beta = 0, \xi = 0)$.

La quinta suposición significa la no aceptación de distribuciones GPD tales que $\xi > -0.5$, que corresponderían a una GPD triangular. Sin embargo, la *Figura 17* no muestra el valor de $\xi = -0.5$ porque las condiciones tercera y cuarta ya implican este hecho.

Con toda la información proporcionada a priori, se ha conseguido encajar la función de densidad conjunta de los parámetros de la GPD dentro del dominio que ha quedado definido por esas suposiciones. Finalmente, la condición sexta define groseramente un evento característico, y es usada para situar la moda de la distribución a priori. En cualquier caso, su influencia es escasa.

En todo este proceso, la información a priori con respecto a los parámetros ξ y β , puede ser definida uniformemente o suavizada mediante un parámetro, para un ajuste sencillo y preliminar o para una definición más exacta de los límites de aceptación admisible.

6.4.4 Obtención de resultados

Como no es posible establecer directamente el valor del umbral inferior (u_0), el proceso se convierte en un problema de tanteo e iteración hasta conseguir un ajuste en todos los aspectos analizados: información a priori, test de bondad de ajuste y distribución a posteriori.

Si bien la caracterización a priori debe realizarse independientemente de los datos de precipitación registrados, las diferencias entre los límites admisibles impuestos por nuestras hipótesis a priori y los límites calculados a posteriori (Figura 18) puede hacer que algunas suposiciones sean replanteadas durante el proceso de obtención de resultados. Evidentemente, el problema puede estar en unas malas o equivocadas hipótesis sobre el fenómeno o en unos datos registrados erróneos o inapropiados (que no es el caso). Otro motivo para reajustar las condiciones a priori se explica cuando los dominios, aún encajando espacialmente, tienen tamaños muy distintos, y el objetivo es reducir ese dominio para mejorar la precisión de la computación, sin modificar realmente las hipótesis a priori.

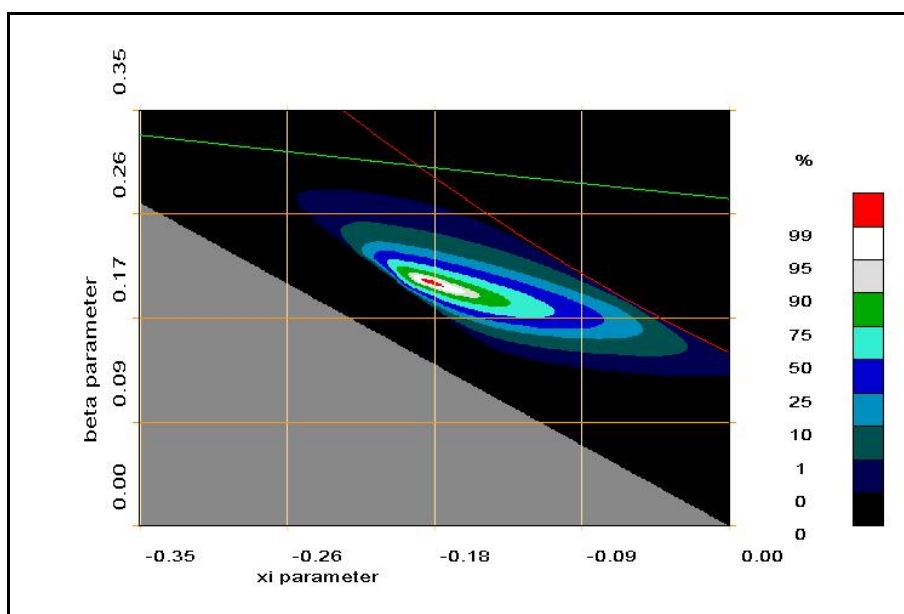


Figura 18. Densidad de probabilidad conjunta a posteriori de los parámetros de la GPD.

Las modas estimadas a posteriori para la distribución GPD han sido:

- $\xi = -0.178$
- $\beta = 0.206$
- Límite superior (DA-Weibull) = 2.67 (467.7 mm). Aunque la moda es un estimador interesante, este valor corresponde a cuantiles muy bajos, y que la probabilidad de que este valor se vea superado es 0.82.

Este límite superior es posible contrastarlo con algunos estudios que tratan de establecer la precipitación máxima probable (PMP). También a partir de la serie pluviométrica del Observatorio Fabra se establece (Casas, 1995) la siguiente relación para la PMP:

$$PMP(t) = 60.5 \cdot \ln(t) - 67.7, \quad [6.14]$$

donde t es la duración en minutos y la PMP en mm. Así pues, para una duración de 72 horas (esta es la duración máxima que considerará posible en el cálculo de la vulnerabilidad en el *Apartado 7*) la PMP es de 438.7 mm, siendo este valor muy parecido al obtenido. Esta comparación que se ha hecho para la moda estimada del límite superior no tiene en cuenta la incertidumbre asociada a esta variable, y que también se ha sido calculada con BGPE.

Finalmente, la simulación mediante técnicas de Monte Carlo, se ha aumentado hasta un número de 10000 simulaciones con el objetivo de obtener una mayor precisión de los resultados.

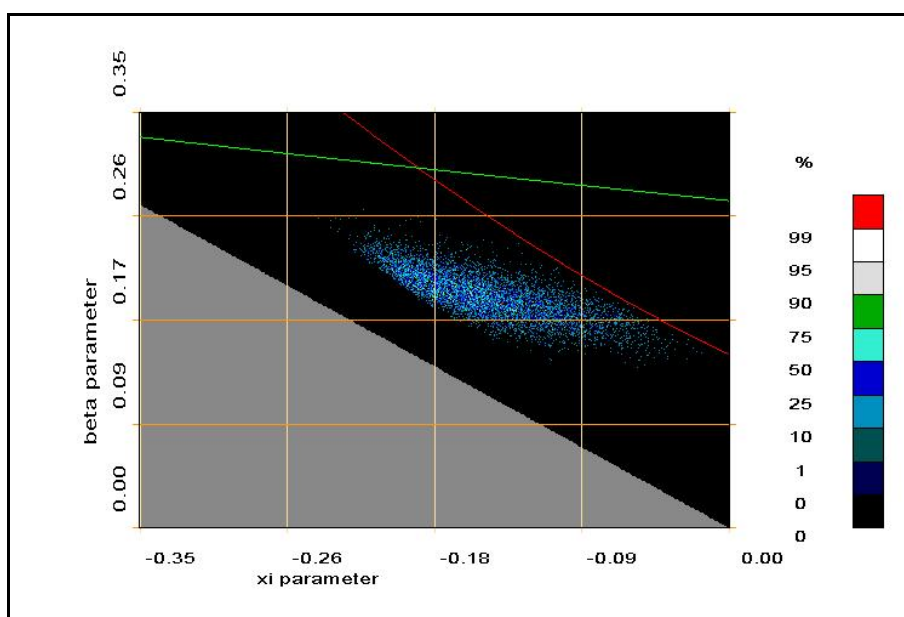


Figura 19. Simulación de la densidad de probabilidad conjunta a posteriori.

6.5 RESULTADOS

La estimación de los periodos de retorno para los distintos volúmenes de precipitación está sujeta a una gran incertidumbre, tal y como se muestra en la *Figura 20*. Este hecho queda reflejado especialmente para periodos de retorno elevados, donde la información es más escasa, dada la poca longitud temporal de la serie pluviométrica utilizada (aún siendo una de las más largas).

El hecho de que a partir de precipitaciones mayores a 2.5 (316.2 mm) el percentil 90 del periodo de retorno tome valores tan elevados refleja la condición de que la precipitación es un fenómeno de magnitud finita, de acuerdo al ajuste en el dominio de atracción de Weibull de la GPD.

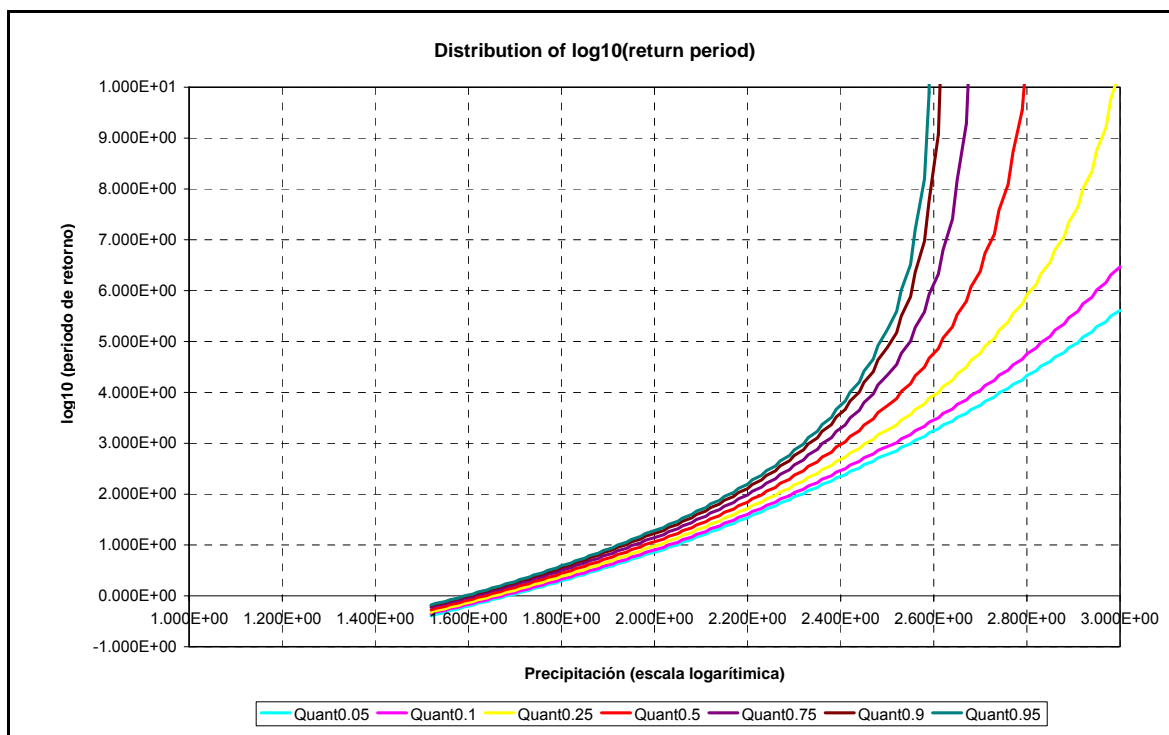


Figura 20. Probabilidades del periodo de retorno asociado a cada valor de precipitación obtenido del análisis BGPE.

Es interesante comentar que el resultado obtenido para una precipitación de 1.75 (56.5 mm) es de [1.46;2.71] años de periodo de retorno para el intervalo de confianza del 90%, con una mediana de 2 años de periodo de retorno. Este volumen de precipitación es el mismo que tiene la lluvia de periodo de retorno de 10 años utilizada en Barcelona para el dimensionamiento de la red de drenaje. No obstante, en esta diferencia de periodos de retorno, hay que tener en cuenta la duración y forma de esta precipitación; es decir, la lluvia de proyecto de bloques alternados se obtiene a partir de las intensidades medias máximas calculadas a partir de las curvas IDF para ese periodo de retorno, mientras que el resultado obtenido en este apartado, corresponde a lluvias (en general) de ese volumen de precipitación, sin tener en cuenta otras variables que, efectivamente, tienen dependencia unas de las otras.

Los factores de duración y forma de la precipitación en el cálculo de las respuestas de la red de drenaje se tendrán en cuenta en el cálculo de la vulnerabilidad, en el siguiente apartado.

Una forma de poder contrastar los resultados obtenidos es a partir de la duración media de los sucesos registrados para este análisis: 2.8 horas (Tabla 2). En base a la serie pluviométrica del Prat de Llobregat (Elias, 1979), se deduce que para

una duración de 2 h, un periodo de retorno de 5 años corresponde a 50.1 mm, y para una duración de 6 h, a 67.5 mm. Para un periodo de retorno de 2 años, volúmenes son 35.7 mm y 48.8 mm respectivamente. Con esta información se puede confiar en la bondad de los resultados obtenidos a partir de la serie pluviométrica del Observatorio Fabra mediante análisis con BGPE, pues no difieren excesivamente de los deducidos de la serie del Observatorio del Prat de Llobregat.