3 MODELO PARA EL CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD DE INUNDACIÓN EN CUENCA URBANA

3.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Según los planteamientos expuestos anteriormente, lo deseable sería poder cuantificar el riesgo que se asume en el diseño de una red de drenaje, corrigiendo e incorporando algunos conceptos y prácticas de uso habitual en la ingeniería, con el propósito de acercarse más a la nueva política del agua, dentro del marco de las normativas europeas. Sin entrar en la evaluación de los costes, necesarios para un cálculo completo del riesgo, algunos de los conceptos que quieren plantearse en esta tesina son:

- Diseño en función de la frecuencia de inundación frente al diseño en función del periodo de retorno de la lluvia caída.
- Falta de correspondencia directa entre periodo de retorno de una lluvia y periodo de retorno de la respuesta de la red de drenaje.
- Definición y uso de lluvia de proyecto.
- Evaluación de la incertidumbre en el cálculo hidrológico e hidráulico.

Evidentemente, existen otras muchas más cuestiones que podrían, y deberían, ser tenidas en cuenta en la práctica del diseño hidráulico e hidrológico urbano, e incluidas dentro del esquema de cálculo de riesgos como: la correcta adecuación del sistema de captación (sumideros e imbornales); la determinación del tamaño de los colectores que recogen la escorrentía de los sistemas de drenaje anteriores (relacionado con una correcta capacidad de desagüe); los problemas de contaminación al verter conjuntamente las aguas pluviales y residuales en los sistemas unitarios (DSU – Descarga de Sistemas Unitarios); o el diseño a dos niveles o global, teniendo en cuenta la red de drenaje y el sistema de calles como canales de drenaje, entre otros.

La evaluación del riesgo está directamente relacionada con la ocurrencia en el tiempo de sucesos extraordinarios que ponen en peligro infraestructuras, población, sistemas económicos, etc., pudiendo provocar cuantiosas pérdidas. Se dice entonces, que estos elementos se encuentran bajo un cierto riesgo, asociado a las pérdidas (económicas) debidas a esos sucesos. Así pues, un análisis de riesgo debería intentar, en primer término cuantificar, o por lo menos describir, la probabilidad de ocurrencia que tienen los sucesos extraordinarios y, en consecuencia, la probabilidad de ocurrencia de los fallos de la red de drenaje, siendo éste el verdadero alcance de esta tesina.

Para ello se usan dos modelos probabilísticos, que son la principal herramienta en el análisis de riesgos, basados en las series temporales de los sucesos analizados:

1. Tiempo de ocurrencia de los sucesos descrito mediante un proceso de Poisson, siendo independiente el tiempo entre distintos sucesos.

2. Un modelo para describir la magnitud de estos sucesos, independientemente del tiempo de ocurrencia de los mismos.

Evidentemente, la capacidad de describir estos fenómenos depende de la calidad y cantidad de datos disponibles, pues la extrapolación para estimar sucesos de magnitudes elevadas es necesaria. Según los métodos de tratamiento estadístico que reciben los datos para la descripción de la magnitud de estos sucesos, se pueden clasificar en (*Embrecht, Klüppelberg & Mikosch, 1997*):

- *Event size distribution method*: trata de ajustar una distribución a todos los datos de la muestra.

- *Point Over Threshold method (POT* – excesos sobre un umbral*)*: trata de identificar la distribución de los excesos por encima de un determinado umbral.

- *Extreme value method*: se concentra en la estimación de la distribución de eventos extremos o, incluso, otros estadísticos.

- *Size-model-free method*: asume ciertas relaciones entre los diferentes rangos de la magnitud de los sucesos, sin asumir distribuciones concretas.

Cada uno de estos métodos tiene sus ventajas e inconvenientes, aunque de entre ellos destacan los métodos *POT*. Su principal característica es que para una *Distribución Generalizada de Pareto* (GPD), el comportamiento asintótico en los valores extremos puede ser válido en una gran variedad de situaciones y, aún así, permite la utilización de gran cantidad de datos. Además, para umbrales elevados, la hipótesis de independencia entre sucesos es plenamente asumible aunque, contrariamente, la elección de este umbral no dispone de métodos objetivos y fiables. En algunas circunstancias de muy buen ajuste de valores extremos, se podría justificar incluso el uso de distribuciones como *Gumbel*, *Frechet* o *Weibull*. En cualquier caso, es el método más usado en la descripción y análisis de riesgos.

Si ahora se plantea el problema de manera que el modelo de la magnitud de los sucesos sea de tipo excesos sobre un umbral (*POT*), descrito mediante una *Distribución Generalizada de Pareto*, se puede escribir en los términos que se presentan a continuación.

Sea $N(u_0)$ el número de sucesos de volumen de precipitación X mayores o iguales a u_0 por unidad de tiempo y considérese que la ocurrencia de los sucesos sigue un proceso de Poisson:

$$N(u_0) \approx Poisson(\lambda_0), \qquad [3.1]$$

donde el parámetro λ_0 representa el número medio de sucesos de precipitación por unidad de tiempo (de forma habitual: años).

Entiéndase como un problema de excesos sobre un umbral, donde los eventos siguen un proceso de Poisson en el tiempo, como muestra la siguiente figura:

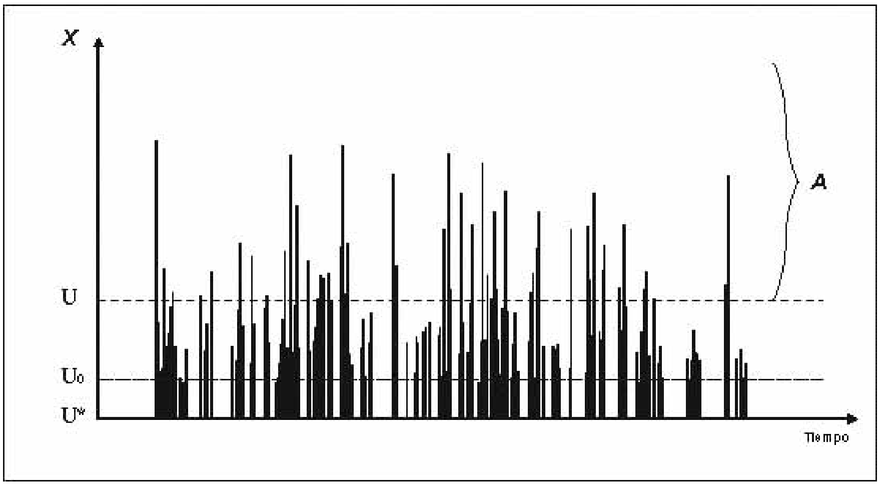

Figura 2. Esquema de excesos sobre un umbral, para la descripción de la distribución de la magnitud de los sucesos de precipitación mediante la GPD.

donde

- u: suceso por encima del umbral u, tal que $u > u_0$.
- u_0: umbral inferior de referencia en un esquema tipo POT, para la descripción de la GPD.
- u^*: umbral absoluto de la definición de suceso de precipitación.
- A: intervalo de X, tal que $u < X <$ *límite superior*.

El periodo de retorno se expresa como

$$\frac{1}{\tau_0} = \lambda_0 = \text{periodo de retorno} \qquad [3.2]$$

y puesto que el parámetro de Poisson que describe la probabilidad de ocurrencia de los sucesos de precipitación X, depende del umbral (u_o) escogido,

$$\lambda_0 = \lambda(u_0). \qquad [3.3]$$

Esta probabilidad de ocurrencia, siguiendo un proceso de Poisson, se expresa según la ecuación:

$$P[N(u_0)=n]=\frac{(\lambda(u_0)t)^n\cdot e^{-\lambda(u_0)t}}{n!} \quad , \quad n=0,1,2,... \qquad [3.4]$$

Si se define $Y = X - u_0$ con $Y > 0$ para los sucesos X por encima del umbral u_0, se puede establecer que para un umbral suficientemente alto (*Teorema de Pickands*), estos sucesos siguen una *Distribución Generalizada de Pareto* (GPD) (ver *Egozcue & Ramis, 2001*), por lo que:

$$Y \approx GPD(\xi,\beta), \qquad [3.5]$$

$$F_Y(y)=P[Y\leq y|X>u_0]=1-\left(1+\frac{\xi}{\beta}\cdot y\right)^{-\frac{1}{\xi}} \quad , \ \beta>0 \ . \qquad [3.6]$$

Siguiendo el mismo planteamiento, la probabilidad de ocurrencia por unidad de tiempo de sucesos de precipitación *X,* por encima del umbral u_0, y de magnitud mayor a u sigue también un proceso de Poisson, según la siguiente expresión:

$$N(u)\approx Poisson(\lambda(u_0)\cdot P[Y\in A]) \quad , \quad u\geq u_0 \, , \qquad [3.7]$$

por lo que el parámetro de Poisson que describe las ocurrencias de eventos por encima del umbral u_0 y de magnitud mayor o igual a u es:

$$\lambda(u)=\lambda(u_0)\cdot P[Y\in A], \qquad [3.8]$$

donde A representa los valores iguales o superiores a u, pudiendo ser un intervalo finito o infinito según el *dominio de atracción* (DA) de la GPD (finito para el DA de *Weibull* e infinito para los DA de *Gumbel* y *Frechet*).

En este caso, el periodo de retorno asociado a estos eventos, se puede expresar de forma análoga a [3.2] como el inverso del parámetro de Poisson

$$\tau(u)=\frac{\tau(u_0)}{P[Y\in A]}=\frac{\tau(u_0)}{1-F_Y(u)}. \qquad [3.9]$$

Las expresiones anteriores sirven para describir la probabilidad de ocurrencia y magnitud de los sucesos de precipitación. Sin embargo, lo que realmente interesa conocer para evaluar el riesgo (en una red de drenaje) es la probabilidad de ocurrencia de ciertos niveles de inundación o, de forma más simplificada, la probabilidad de ocurrencia de vertidos de caudal en superficie por incapacidad de la red de drenaje. Mediante esta última simplificación se asume una relación entre la cantidad de agua vertida por la red de drenaje cuanto entra en fallo, y el nivel de afección que este fallo provoca en superficie. Evidentemente, sería deseable conocer o realizar el análisis en función este último concepto: el nivel de afección a la población, asociando unos costes a la inundación provocada en superficie.

En cualquier caso, supóngase que se discretizan las respuestas del sistema de drenaje para un suceso cualquiera de precipitación por encima de u_0, según el nivel de daño (caudal vertido, nivel de inundación,...) en un número i de posibles desenlaces (θ_i). Entre estos desenlaces existe uno que se refiere al correcto funcionamiento de la red de drenaje. Lo que se quiere obtener es la probabilidad de ocurrencia de los desenlaces θ_i. Estos desenlaces dependen, lógicamente, de la magnitud del suceso de precipitación X.

Si se divide la magnitud de los sucesos de precipitación X en rangos (y entiéndase por magnitud de un suceso de precipitación su volumen), se puede considerar que la probabilidad de ocurrencia de sucesos de precipitación X pertenecientes al intervalo (u_j, u_{j+1}), junto con la probabilidad de ocurrencia de desenlaces tipo θ_i por unidad de tiempo (probabilidad conjunta) también sigue una distribución de Poisson según

$$\begin{aligned} &N\left(X \in [u_j, u_{j+1}], \theta_i\right) \approx Poisson\left(\lambda(u_0)\cdot P[X \in [u_j, u_{j+1}]; \theta_i]\right), \\ &i = 1, 2, \ldots, u_j > u_0 \end{aligned} \qquad [3.10]$$

Puesto que lo que realmente se quiere conocer es la probabilidad de ocurrencia de desenlaces tipo θ_i por unidad de tiempo, de acuerdo a la ecuación anterior, se puede expresar de la siguiente manera:

$$N(\theta_i) \approx Poisson\left(\lambda(u_0)\cdot \sum_j P\left[X \in \left[u_j, u_{j+1}\right], \theta_i\right]\right),\ i = 1, 2, \ldots, u_j > u_0. \qquad [3.11]$$

El término del sumatorio de [3.11], puede rescribirse desarrollando la probabilidad conjunta en función de la probabilidad condionada como

$$P\left[X \in \left[u_j, u_{j+1}\right], \theta_i\right] = P\left[X \in \left[u_j, u_{j+1}\right]\right]\cdot P\left[\theta_i \middle| X \in \left[u_j, u_{j+1}\right]\right], \qquad [3.12]$$

donde

$$P[X \in [u_j, u_{j+1}]] = F_Y\left(u_{j+1} - u_0\right) - F_Y\left(u_j - u_0\right). \qquad [3.13]$$

Introduciendo los desarrollos anteriores en [3.11], se llega a la forma siguiente:

$$N(\theta_i) \approx Poisson\left(\lambda(u_0)\cdot \sum_j P\left[X \in \left[u_j, u_{j+1}\right]\right]\cdot P\left[\theta_i \middle| X \in \left[u_j, u_{j+1}\right]\right]\right), \qquad [3.14]$$

en la que el parámetro de Poisson $\lambda(u_0)$, que describe la frecuencia de ocurrencia de los desenlaces X (por encima del umbral u_0). Entrando este parámetro en el sumatorio se obtiene la expresión última siguiente:

$$N(\theta_i) \approx Poisson\left(\sum_j \underbrace{\lambda(u_0)\cdot P\left[X \in \left[u_j, u_{j+1}\right]\right]}_{PELIGROSIDAD}\cdot \underbrace{P\left[\theta_i \middle| X \in \left[u_j, u_{j+1}\right]\right]}_{VULNERABILIDAD}\right). \quad [3.15]$$

Finalmente, se puede calcular la probabilidad de ocurrencia de un tipo de desenlace (o su periodo de retorno) calculando: (1) la *peligrosidad* (o clima) y (2) la *vulnerabilidad*.

Para el caso de una red de drenaje, la *peligrosidad* se refiere a las probabilidades de ocurrencia de sucesos de lluvia según el volumen de lluvia. Tal y como queda expresada en [3.15], la peligrosidad ya se había presentado en [3.7], donde los sucesos de precipitación mayores a u_0 ocurren siguiendo un proceso de Poisson de parámetro $\lambda(u_0)$, y su magnitud queda descrita por una *GPD* (ξ,β). Su cálculo requiere del análisis de una serie de datos pluviométricos para la estimación de los parámetros que la definen.

Por su parte, la *vulnerabilidad* se refiere a las probabilidades de ocurrencia de un cierto tipo de desenlace (inundación o afección) condicionado a la ocurrencia de un evento de precipitación del volumen considerado (dividido en rangos en [3.15]). En el cálculo de la vulnerabilidad aparecen muchos más parámetros y variables que sirven para definir, entre otros: la lluvia para un volumen dado de precipitación, las condiciones del suelo, las geometrías de la red o sistema de drenaje, las características del flujo, etc.

En el desarrollo anterior se espera que solamente se produzcan afecciones si la precipitación caída es superior a u_0, ya que los sucesos de precipitación de volumen inferior a este umbral no se pueden calcular siguiendo este proceso. Este hecho está condicionado a la definición del umbral de la distribución GPD. Si el umbral escogido es suficientemente bajo, ocurrirá tal y como se espera, aunque si sucediese que para eventos de precipitación inferiores al umbral u_0 existen desenlaces causantes de cierto grado de afección, entonces se tendría que calcular la probabilidad de ocurrencia de estos desenlaces condicionada al rango de precipitaciones $x(u^*,u_0)$ [1].

3.2 CÁLCULO DEL RIESGO Y ELECCIÓN DEL DISEÑO ÓPTIMO

Aunque no se desarrolla para el caso práctico planteado en esta tesina, el objetivo final deseable sería la evaluación del riesgo asociado a cada uno de los diseños posibles de la red de drenaje. Para ello hay que relacionar cada diseño con su coste de construcción y un coste debido a las daños causados por el malfuncionamiento de la red a lo largo de la vida útil de la misma. De acuerdo a

[1] Esta circunstancia se comenta en el desarrollo de la tesina en el caso práctico aplicado a la cuenca de la Riera Roja en Sant Boi de Llobregat. La resolución y cálculo de esta probabilidad se explica y formula en el *Apartado 8*.

[3.15], el número de desenlaces (malfuncionamientos) tipo θ_i queda descrito por un proceso de Poisson de parámetro $\lambda(\theta_i)$

$$\lambda(\theta_i) = \sum_j \lambda(u_0) \cdot P\left[X \in \left[u_j, u_{j+1}\right]\right] \cdot P\left[\theta_i \middle| X \in \left[u_j, u_{j+1}\right]\right] \qquad [3.16]$$

y por tanto, se puede estimar el número medio de ocurrencias de esa afección a lo largo de la vida útil (*L* años) como $\lambda(\theta_i)\cdot L$.

Si por último, se calcula el coste de cada uno de los tipos de desenlaces ($C(\theta_i)$), se puede expresar el riesgo asumido en cada unos de los distintos diseños (D_k)de la red a lo largo de su vida útil como

$$Riesgo_{\text{vida útil (L)}}(D_k) = C(construcción) + \sum_i \lambda(\theta_i) \cdot L \cdot C(\theta_i) \qquad [3.17]$$

y la minimización de esta función de riesgos para el diseño (D_k), dará como resultado el diseño óptimo para la red de drenaje estudiada.

A lo largo del proceso descrito para el cálculo del riesgo y que ha de servir para decidir en cuanto al nivel de seguridad que se exige en las redes de drenaje, hay que tener en cuenta que tanto el cálculo de la peligrosidad como de la vulnerabilidad están sujetos a un número elevado de incertidumbres. Existen cantidad de variables implicadas en el proceso de cálculo que, por su naturaleza, no pueden ser conocidas con precisión y exactitud; es decir, hay incertidumbre en su estimación. Esto ocurre al hablar tanto de los datos registrados en los sucesos de lluvia, como de las variables necesarias para definir un modelo de predicción de funcionamiento y respuesta de la red de drenaje estudiada, y de los estadísticos usados para caracterizar todos estos *inputs*. Es por ello, que la decisión final en cuanto a la elección de un diseño u otro, según los resultados obtenidos en el cálculo de la peligrosidad y de la vulnerabilidad (y de la evaluación de los costes), debería tener también en cuenta la incertidumbre existente o, por lo menos, disponer de esa información.

3.3 ANÁLISIS DE MONTE CARLO

Tal y como se ha presentado anteriormente, sería deseable que los cálculos realizados en un análisis de riesgo tuviesen asociado unos niveles de confianza, en función de las incertidumbres del proceso. Esto requiere técnicas de estimación Bayesiana, que aunque están poco presentes en la práctica habitual por sus dificultades computacionales y de interpretación, están especialmente indicadas para controlar la incertidumbre. Estos métodos permiten el uso de información imprecisa a priori, y pueden ser vistos como una generalización de otros métodos como la estimación mediante la máxima verosimilitud.

Muchos métodos de Monte Carlo están cerca de ser métodos Bayesianos, si bien están lejos de ser un estándar en el cálculo de la peligrosidad y vulnerabilidad. En cualquier caso, algunas técnicas de simulación de Monte Carlo permiten caracterizar la incertidumbre y estimar así variables y respuestas a ciertos problemas teniendo en cuenta este factor tan importante.

A lo largo de los siguientes apartados de esta tesina, se presentan y utilizan técnicas para la estimación y caracterización de la incertidumbre, y cálculos asociados al análisis del nivel de seguridad en una red de drenaje:

- Cálculo de la peligrosidad mediante técnicas Bayesianas, utilizando el programa BGPE aplicado a la cuenca de la Riera Roja en Sant Boi de Llobregat, en el *Apartado 6*.
- Cálculo de la vulnerabilidad mediante simulación de Monte Carlo aplicado a la cuenca de la Riera Roja en Sant Boi de Llobregat, en el *Apartado 7*.
- El *Apartado 8* recoge los resultados de los 2 apartados anteriores para calcular la probabilidad de ocurrencia de ciertos desenlaces (caudales vertidos en superficie) en la Riera Roja y caracterizar su incertidumbre, lo que supone un primer paso en el cálculo del riesgo asumido en el diseño de esta red de drenaje (a falta de evaluar los costes).

El método de Monte Carlo es, en esencia, un método de integración (*Robert C.P. & Casella, G., 2004*). Supóngase que se quiere evaluar la integral

$$\mathrm{E}_f\left[h(X)\right] = \int_X h(x)\cdot f(x)\cdot dx \,. \qquad [3.18]$$

Usando una muestra simulada ($X_1,\ldots, X_m$) generada a partir de la función de densidad *f(x)*, se puede estimar [3.18] como el promedio de los valores que la función toma sobre la muestra,

$$\overline{h}_m = \frac{1}{m}\cdot\sum_{j=1}^{m} h(x_j)\,. \qquad [3.19]$$

Para la estimación de probabilidades, como en el caso de la vulnerabilidad, donde se desea conocer la probabilidad de la respuesta del sistema dada una acción externa, se puede considerar que: *h(x)* son las respuestas del sistema; que la variable aleatoria *X* representa todos los parámetros aleatorios (inciertos) del sistema; y que por tanto, la probabilidad se reduce a simular los parámetros aleatorios del sistema y calcular la respuesta (determinista) evaluando la función *h(x)*. Para llevar a cabo este cálculo es necesario obtener muestras aleatorias (simuladas) de las variables según sea su función de distribución, caracterizando así su incertidumbre.

Algunos organismos destinados a la protección y evaluación de riesgos medioambientales, como la *U.S. Environmental Protection Agency* (USEPA) defienden que, con unos datos adecuados y unas suposiciones aceptables, la técnica de análisis mediante simulación de Monte Carlo, puede ser una herramienta estadística viable para el análisis de la variabilidad y la incertidumbre en el proceso de evaluación del riesgo. No obstante, dado que resulta ser una técnica costosa por el tiempo de cálculo y los análisis previos, es necesario cuestionarse hasta qué punto es útil su utilización. Pueden ponerse algunos ejemplos en los que sería dudosa la necesidad de utilizar las técnicas de Monte Carlo (*EPA/630/R-97-001*): (a) si los cálculos previos muestran resultados de riesgo por debajo de los niveles asumibles y las técnicas utilizadas son sobradamente conocidas, sobreestimando generalmente la valoración del riesgo con coeficientes de seguridad; (b) cuando los costes de reparación o construcción de la infraestructura objeto de análisis son bajos; (c) cuando un análisis de sensibilidad del problema muestra que la incertidumbre de los *inputs* no tiene repercusión en los resultados finales. Por otro lado, cuando los resultados previos en un estudio mediante técnicas muy conservadoras son desfavorables o superiores a los niveles considerados aceptables; o cuando las consecuencias de una evaluación simplista son inaceptables, un análisis mediante técnicas de Monte Carlo es un buen planteamiento.

En el caso que concierne al desarrollo de esta tesina (evaluación de la peligrosidad y vulnerabilidad como parte del cálculo del riesgo asociado al diseño de redes de drenaje), queda claramente justificada la necesidad de conocer, con la mayor precisión posible, la incertidumbre que acompaña a los cálculos realizados para la toma de decisión del nivel de seguridad en el diseño de los sistemas de drenaje. A un nivel global de planificación del territorio, los costes derivados de la elección del nivel de seguridad de nuestras redes de drenaje, son determinantes a la hora de tomar ciertas medidas y realizar unas u otras actuaciones; por este motivo, conseguir una buena caracterización del riesgo, teniendo en cuenta la incertidumbre de todos sus parámetros es tan necesaria.

Un análisis mediante técnicas de simulación de Monte Carlo puede involucrar un número elevado de variables e hipótesis, haciendo que el esquema global de resolución sea complicado. Es normal el empleo de modelos más o menos complejos durante el análisis de Monte Carlo, dado que esta es una metodología indicada para incluir en ellos la incertidumbre de los parámetros. Asimismo, deben tomarse en cuenta algunas consideraciones sobre estos modelos:

- La conveniencia de las suposiciones que se asumen intrínsecamente en el modelo frente a los objetivos del análisis.
- La compatibilidad de los modos de entrada y salida de datos del modelo a la hora de trabajar conjuntamente con otros modelos usados en el análisis.
- Las bases teóricas del modelo.
- El nivel de las escalas espacial y temporal.
- La sensibilidad del modelo frente a la variabilidad e incertidumbre de los datos de entrada.
- La fiabilidad del modelo y su código, así como el grado de aceptación del modelo en la comunidad científica.
- La familiaridad, rapidez y precisión del modelo.
- Los requerimientos de computación, tanto en tiempo como en infraestructura.

Desde el punto de vista computacional, un análisis de Monte Carlo puede incluir una mezcla de parámetros fijos y deterministas y algunas distribuciones para los parámetros de entrada. En cualquier caso, las bases para fijar esos parámetros tienen que revisarse continuamente para evitar la percepción de que esos parámetros son constantes no sujetas a cambios o variaciones, y la elección de las distribuciones de los parámetros de entrada debe siempre basarse en toda la información disponible (cuantitativa y cualitativa). A la hora de elegir la forma de la distribución hay que tener en cuenta si:

- Existe correlación entre las variables.
- Hay algún mecanismo de base para la elección de la familia de la distribución.
- Ciertos tipos de distribución son apropiados para representar físicamente las propiedades de determinados parámetros.
- La variable es continua o discreta.
- Son conocidos los límites (superior e inferior) de la variable.
- La distribución es simétrica o asimétrica.

3.4 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MONTE CARLO EN EL ESTUDIO DE VULNERABILIDAD DE UNA RED DE DRENAJE

En el contexto de la elección del nivel de seguridad y del cálculo del riesgo asociado al diseño de una red de drenaje, existen multitud de datos sujetos a una mayor o menor incertidumbre, la cual puede ser determinante de cara a la toma de decisiones. La probabilidad de ocurrencia de las diferentes respuestas de una red de drenaje (y por tanto de afecciones, daños y costes asociados) se expresaba según [3.15] en términos de peligrosidad y vulnerabilidad.

La vulnerabilidad se definía como la probabilidad de ocurrencia de un tipo de fallo del sistema de drenaje (θ_i) condicionado a la ocurrencia de un tipo de suceso de precipitación (*X)*, caracterizado por el volumen de lluvia (dividido en rangos),

$$P\left[\theta_i \middle| X \in \left[u_j, u_{j+1}\right]\right] \text{ , } u_j > u_0 \text{ ,} \qquad [3.20]$$

y su cálculo se puede abordar mediante simulación de Monte Carlo.

Justamente el cálculo de la vulnerabilidad engloba un número muy elevado de parámetros, dependiendo del grado de sofisticación del modelo o modelos usados para su determinación. Por este motivo, un análisis mediante el método de Monte Carlo puede ser clave para caracterizar cualitativamente la incertidumbre y variabilidad al estimar la vulnerabilidad asociada a un estudio hidráulico e hidrológico. Evidentemente, un análisis de tipo cuantitativo, y no cualitativo, de la incertidumbre sería deseable, aunque mucho más costoso y difícil de desarrollar.

A continuación se desarrolla conceptualmente cómo debería efectuarse la estimación de dicha vulnerabilidad mediante la técnica de Monte Carlo, esquematizado en la *Figura 3*:

- Hay que partir de la condición de que se conoce el volumen de precipitación para desarrollar el cálculo o estimación de la respuesta de la red de drenaje, pues es la condición impuesta en el cálculo de la probabilidad.

- La elección del modelo (o modelos) para el cálculo de la respuesta de la red es un punto decisivo para efectuar un estudio con garantías. Tiene que ser capaz de reproducir los efectos hidrológicos e hidráulicos ofreciendo unos resultados útiles para la posterior evaluación del riesgo en el diseño de la red de drenaje. En este sentido, los modelos más simples, que pueden reducir el esfuerzo necesario para desarrollar el análisis, difícilmente serán útiles de cara a la futura evaluación del riesgo a nivel global.

- Dependiendo del modelo habrá un número determinado de *inputs*, parámetros y variables a tener en consideración. Entre ellos, los datos referentes al suceso de lluvia, a las características del suelo y geomorfológicas del lugar de estudio, a la geometría de la red de drenaje, a los parámetros del modelo, etc.

- Un análisis de sensibilidad, además del propio conocimiento en materia de hidráulica e hidrología en medio urbano, serán decisivos para determinar qué *inputs* y parámetros requieren de un tratamiento tipo estocástico y son considerados variables aleatorias, y cuáles pueden ser considerados fijos o deterministas.

- Es necesario estudiar las relaciones entre las diferentes variables, detectando posibles correlaciones (por ejemplo: el volumen, la duración y la forma de una lluvia están relacionados entre sí).

- Estimar y ajustar una distribución de probabilidad para los *inputs* y variables que lo requieran, teniendo en cuenta las posibles correlaciones detectadas previamente.

- Finalmente, desarrollar una herramienta para la simulación de la respuesta de la red un número *N* de veces, que también debe ser elegido atendiendo al nivel de precisión esperado en el cálculo.

Sin necesidad de desarrollar un análisis de sensibilidad para una red de drenaje específica, se sabe que las características de los sucesos de precipitación son determinantes en la respuesta de la red; mucho más aún si se dispone de información precisa para la caracterización del medio urbano donde se ubica la red de drenaje estudiada, ya que parámetros como la impermeabilidad del suelo u otros relacionados con los usos del suelo, también tienen gran influencia en la respuesta de la red. Es decir, mediante un buen trabajo de campo para la descripción del medio donde se sitúa la red de drenaje, se consigue reducir la incertidumbre de muchos de los parámetros y caracterizar mejor su variabilidad espacial, pudiendo ser evitable un análisis estocástico de estas variables.

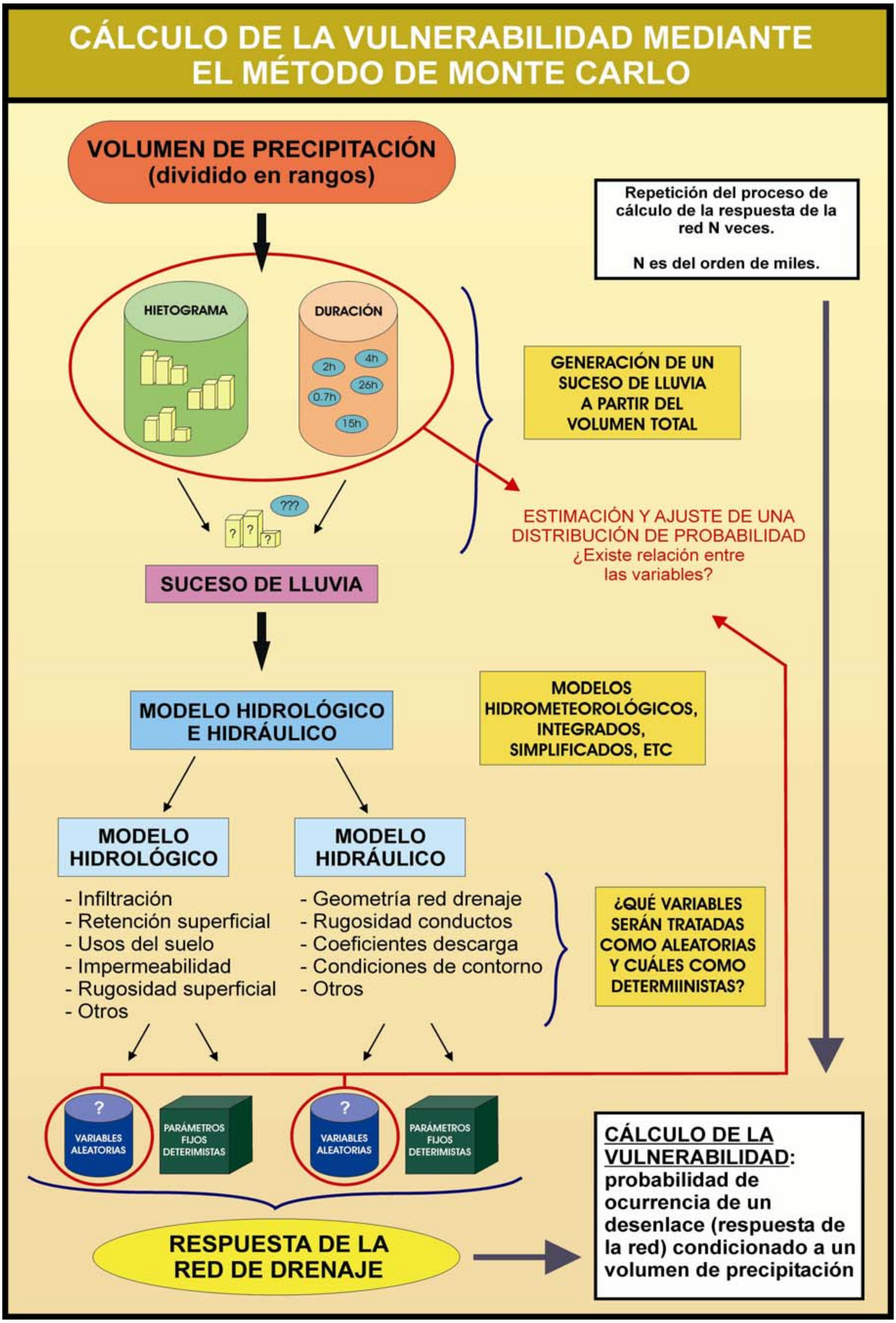

Figura 3. Esquema del cálculo de la vulnerabilidad mediante simulación de Monte Carlo.

Teniendo en cuenta estos factores, es clave la caracterización de los sucesos de lluvia y, por eso, no sería conveniente la utilización de lluvias clásicas de proyecto que están muy lejos de representar la realidad meteorológica de un territorio. El estudio y análisis de esos sucesos de precipitación puede realizarse mediante series pluviométricas (cuando estén disponibles) en base a las variables duración y forma de precipitación, acercándose más a un análisis tipo patrones de lluvia.

Tal y como se ha presentado el problema de vulnerabilidad, se han seguido los pasos de generación del suceso de lluvia, cálculo de la escorrentía, entrada en la red y propagación por la red, siendo todos ellos modelizables y calculables con diferentes herramientas más o menos complejas, donde cada una de ellas requiere de numerosos parámetros de entrada. Como alternativa podría utilizarse un modelo de cálculo de respuesta de la red mucho más simple, aunque esto ocasionaría algunos inconvenientes. Por un lado, habría que valorar la incertidumbre asociada a los nuevos parámetros de ese modelo (que seguramente sería mucho mayor, ya que serían parámetros que engloban un número mayor de conceptos de forma conjunta) y por otro, habría que tener presente que la propia elección de un modelo donde la representación de la realidad es mucho más subjetiva, ya incorpora grandes incertidumbres en cuanto al resultado obtenido. Es decir, ya que se realiza un análisis que tiene en cuenta factores de incertidumbre, tiene más sentido utilizar un modelo con garantías, que ya de por sí no ofrezca dudas razonables en cuanto a los resultados que se vayan a obtener.

Este esquema para el cálculo de la vulnerabilidad mediante la metodología de Monte Carlo se aplica para el caso concreto de la cuenca de la Riera Roja en Sant Boi de Llobregat en el *Apartado 7* de esta tesina.