



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

journal homepage: www.sgp.org.pe ISSN 0079-1091

DESARROLLO DE CARTOGRAFÍAS PROBABILÍSTICAS DE INUNDACIÓN A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS DE MONTE-CARLO PARA LA MEJORA DE LOS CUANTILES DE AVENIDA Y LA ESTIMACIÓN DE SUS INTERVALOS DE CONFIANZA.

Evelyn Peña Chávez

Resumen

Todas las evaluaciones de inundaciones y riesgos sufren un cierto grado de incertidumbre debido a múltiples factores, como el análisis de frecuencia de inundaciones, la calibración del modelo hidrodinámico o los modelos de daños por inundaciones (funciones de magnitud-daño).

La incertidumbre vinculada al análisis de frecuencia de crecidas es uno de los factores más importantes. La incertidumbre del análisis de la frecuencia de crecidas se ha abordado desde diferentes puntos de vista, como la aplicación de modelos estadísticos complejos, los procesos de regionalización de los caudales máximos o la inclusión de datos no sistemáticos. A continuación, se presenta un enfoque archivable para definir la incertidumbre relacionada con el análisis de frecuencia de inundaciones mediante el método de Montecarlo.

Utilizando la ciudad de Zamora (España) como lugar de estudio, la incertidumbre está delimitada por intervalos de confianza de un cuantil de flujo máximo de un periodo de retorno de 500 años. Los mapas probabilísticos se derivan de resultados hidrodinámicos y los análisis adicionales incluyen mapas de peligro por pérdida humana y daños a las viviendas y vehículos. Aunque el efecto de esta incertidumbre está condicionado por la forma del terreno, los resultados obtenidos pueden permitir a los responsables lograr más planificación coherente del uso de la tierra. Todos esos resultados de la ciudad de Zamora señalan la probable subestimación de peligro de inundación

(las áreas de mayor peligro aumentan alrededor del 20%) y riesgo cuando el análisis de incertidumbre no se considera, lo que limita la eficiencia de las tareas de gestión del riesgo de inundaciones.

PALABRAS CLAVE: Peligro de inundación; Análisis de Monte Carlo; Análisis de frecuencia de flujo; Mapas probabilísticos; Ciudad de Zamora

Abstract

In general, flood and risk assessments suffer a certain degree of uncertainty due to multiple factors, such as flood frequency analysis, hydrodynamic model calibration or flood damage models (magnitude-damage functions).

The uncertainty linked to the flood frequency analysis is one of the most important factors. The uncertainty of the analysis of the frequency of floods has been approached from different points of view, such as the application of complex statistical models, the regionalization processes of the maximum flows or the inclusion of non-systematic data. Here we present an archivable approach to defining the uncertainty related to flood frequency analysis using the Monte Carlo method.

Using the city of Zamora as the study site, the uncertainty is delimited by confidence intervals of a peak flow quantile of a 500-year return period. Probabilistic maps are derived from hydrodynamic results, and further analysis include flood hazard maps for human loss of stability and vehicle damage. Although the effect of this uncertainty is

conditioned by the shape of the terrain, the results obtained may allow managers to achieve more consistent land-use planning. All those Zamora city results point out the probable underestimation of flood hazard (the higher hazard areas increase around 20%) and risk when the uncertainty analysis is not considered, thus limiting the efficiency of flood risk management tasks.

Keywords: flood hazard; Monte Carlo analysis; flow frequency analysis; probabilistic maps; Zamora city

Área de estudio

El área de estudio comprende el tramo del río Duero en la ciudad de Zamora (España), que se encuentra a 7 km de largo con un ancho medio de 225 m y una pendiente del lecho del río de $0,0006 -1$; se caracteriza por un canal de arena arcillosa relativamente profundo con algunas barras arenosas completamente vegetadas y sinuosidad moderada. Cada una de las riberas muestra una forma diferente (Figura 1), por lo que la margen izquierda muestra una llanura aluvial plana mientras que la margen derecha muestra una fuerte pendiente, donde el casco urbano de Zamora ciudad se encuentra principalmente, aunque algunos barrios se encuentran en la margen izquierda, que es más propenso a las inundaciones, como muestra el registro histórico.

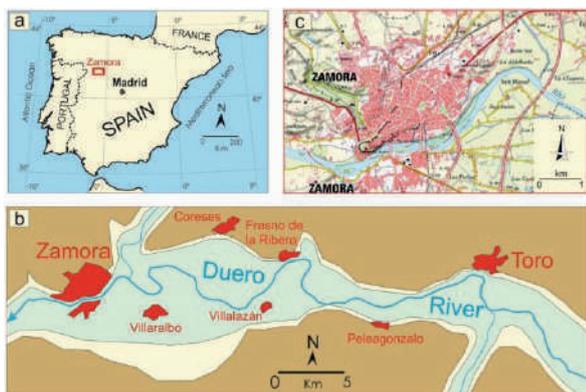


Figura 1. Mapa del área de estudio (ciudad de Zamora) que describe su ubicación (a), la forma principal del valle del río Duero y llanura aluvial (b), y la distribución del área urbana de la ciudad (c). La fuente de datos para (c) es el visor geográfico de Iberprix del Instituto Geográfico Nacional de España.

La ciudad de Zamora, declarada Conjunto Histórico Artístico en 1973, cuenta con numerosos sitios del patrimonio cultural, y aunque estos se encuentran principalmente en la margen derecha

del Río Duero, algunos se ubican en su margen izquierda. La naturaleza urbana del área de estudio significa que no es una población numerosa (la ciudad de Zamora tiene 61.500 habitantes), que puede sufrir el efecto de las inundaciones. Además, la presencia de muchos bienes culturales aumenta la importancia de pérdidas potenciales por inundaciones, por su valor no evaluable, considerando la imposibilidad de restauración o recuperación de los posibles daños ocasionados por desastres naturales.

Resultados

Con el desarrollo de las cartografías probabilísticas, reducimos la incertidumbre de los resultados, ya que no se sabe cómo funciona la variable caudal punta de manera completa, porque contamos con una información parcial de una serie de años (14 años en Zamora y 44 años en Toro), pero nadie nos asegura que en épocas pasadas, por ejemplo hace 400 años, no hubiese un caudal alto que no tenemos registrado, tampoco un caudal menor, por lo que no sabemos el comportamiento de la variable en su conjunto. En vista de que tenemos una información parcial sobre la misma, cuando se realiza un análisis de frecuencia de avenida y se obtiene los valores de los cuantiles para distintos periodos de retorno, esos valores están obtenidos en base a esa información parcial con la que se cuenta, sin embargo lo que se realiza en este trabajo, es que a partir de la caracterización del funcionamiento de la serie corta de Zamora con el ajuste realizado con el programa AFINS, seguidamente generamos muchos posibles escenarios (series de datos) de caudales punta posibles en función de los parámetros de ajuste de la función de distribución utilizada (GEV). De esta manera se trata de considerar como podría o hasta qué punto podría variar lo que se conoce sobre la variable caudal, generando series en las que a lo mejor hay valores muy altos y otros que no son tan altos; con lo que se abre el abanico de posibilidades de valor de caudal que hay registrados. Al considerar distintos posibles escenarios, que podrían presentar posibles evoluciones de la variable caudal, generamos un abanico de posibilidades; en el sentido de que al relacionar el caudal y los periodos de retorno, en los distintos escenarios generarán distintas curvas, y estas curvas en los periodos de retorno pequeños están muy pegados (baja incertidumbre en la estimación del cuantil), a diferencia de los periodos de retornos grandes, existe más diferencia (mayor

incertidumbre en la estimación del cuantil). Podría darse el caso que la curva real (representación gráfica de la función de distribución ajustada) no se adapte a la forma de un escenario, que se ha obtenido con la información que se dispone, pudiendo ser más curvado hacia arriba o hacia abajo. Pero la generación de múltiples escenarios si debe permitirnos caracterizar entre dos extremos

puede fluctuar la curvatura de dicha función. A partir de aquí, la obtención de los valores medios e intervalos de confianza nos permite cartografiar (previa modelización hidráulica) las zonas afectadas por la inundación asociada a un periodo de retorno y la probabilidad con que podrían realmente verse afectadas (Figura 2).

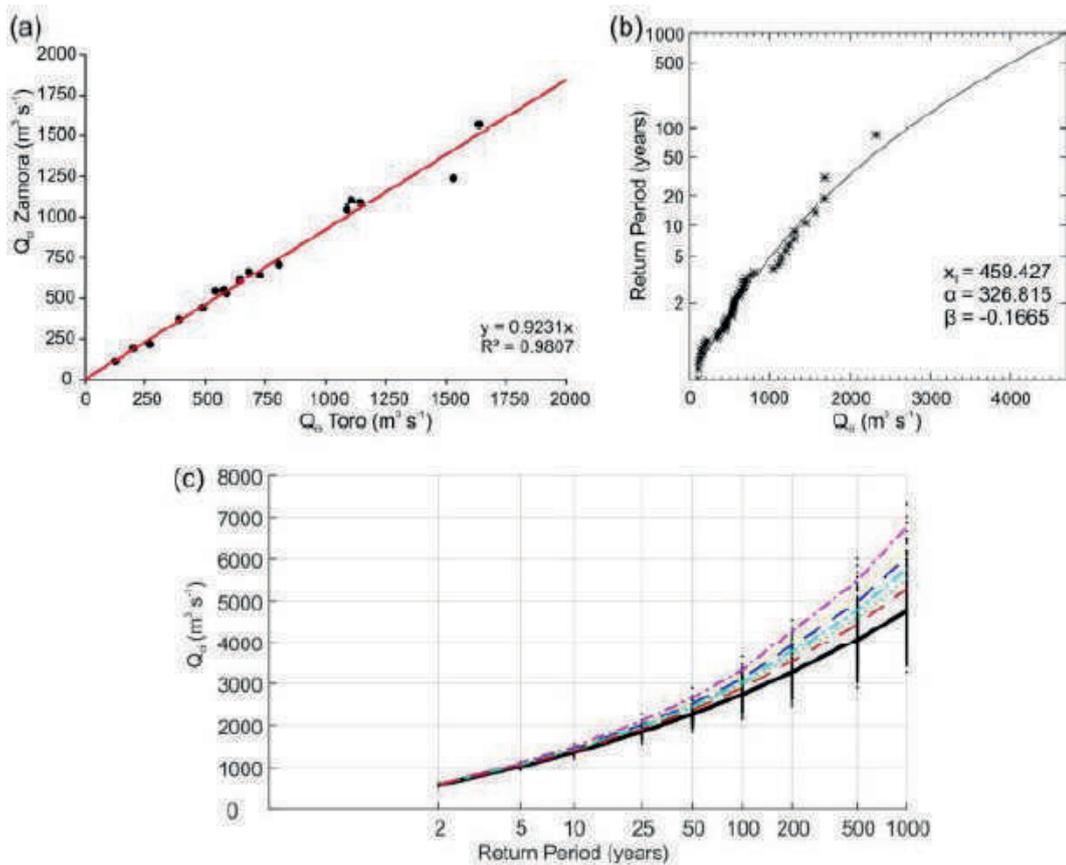


Figura 2. Resultados del análisis estadístico del valor de flujo pico máximo anual: (a) ajuste de regresión lineal entre la ciudad de Zamora y estaciones de Toro; (b) análisis de frecuencia de flujo para el registro de flujo pico anual máximo extendido; (c) cuantil e intervalo de confianza del análisis de Monte Carlo. La línea negra sólida define los cuantiles de Monte Carlo, el rojo punteado muestra el intervalo de confianza del 50%, el verde punteado muestra el intervalo de confianza 67%, la línea turquesa de puntos y guiones representa el intervalo 80%, la línea discontinua azul oscura muestra el intervalo 90%, la línea amarilla punteada representa el intervalo 95% y la línea fucsia con puntos y guiones muestra el intervalo de confianza 99% para un periodo de 500 años de flujo máximo.

Es evidente que esta metodología no resuelve de manera definitiva la incertidumbre en la estimación del caudal punta (asociados a diferentes periodos de retorno) provocada por el conocimiento parcial del comportamiento de la variable. Y que cierta incertidumbre permanece, en parte asociada a que los caudales generados mediante el método Monte-Carlo se basan en unos parámetros de ajuste de la función de distribución GEV que se basan en la información parcial disponible sobre el comportamiento de los caudales punta en la

estación de aforos de Zamora. Sin embargo, hay que tener en cuenta que esos parámetros de ajuste (iniciales) de la función de distribución GEV obtenidos mediante el software AFINS, no limitan en modo alguno el nuevo ajuste de una función de distribución GEV realizada para cada una de las 500 series de caudales generadas en el análisis de Monte-Carlo. Ajuste este último a partir del cual se estiman los cuantiles de caudal punta asociados a los distintos periodos de retorno considerados; y en función de los cuales posteriormente se extrae

su valor central y sus intervalos de confianza en su estimación. Aunque no se puede negar que el primer ajuste realizado con AFINS tiene cierta influencia en el resultado final, pues si controla el proceso de transformación entre las series aleatorias de valores de probabilidad (según una distribución uniforme) y las series de caudal generadas durante el análisis de Monte-Carlo.

Asumiendo las incertidumbres asociadas al comentario anterior, parece evidente que la utilización de una cartografía probabilística de inundaciones ofrece ciertas ventajas respecto a la cartografía tradicional, al acotar el factor peligrosidad (ligado a la afección de un elemento expuesto por la inundación, y dependiente de las características del flujo como el calado y la velocidad) en función de un valor de probabilidad. (Figura 3 y 4).

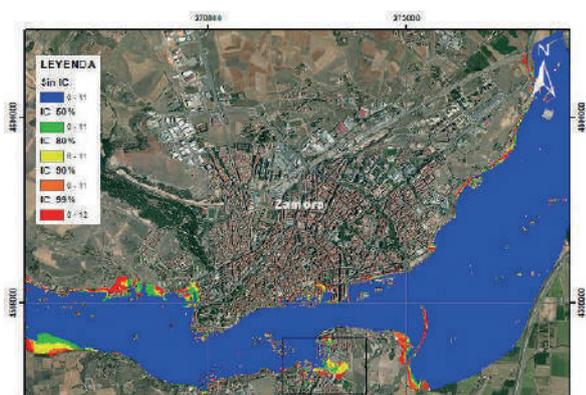


Figura 3. Cartografía probabilístico de Inundación con los diferentes intervalos de confianza del 50%, 80%, 90% y 99%.

Así, frente a una representación fija en la que la peligrosidad por inundaciones queda definida de manera binaria (la inundación afecta o no a un bien expuesto), y con una magnitud o severidad fija (valor de calado o velocidad de flujo); la utilización de una cartografía probabilística nos ofrece un valor de probabilidad de que el elemento se vea afectado o no por la inundación, así como un rango de valores de severidad o magnitud de la avenida (por ejemplo, un rango de valores de calado de inundación) que serán más o menos posibles. Además, esta representación de la peligrosidad por inundaciones debería permitirnos su proyección hacia la estimación del riesgo, de tal forma que pueda asociarse también una estimación de daños a un valor de probabilidad. Aspecto que sin duda debería ser de gran utilidad para los gestores del riesgo, así como posteriores análisis en los que

por ejemplo se plantee la implantación de medidas de mitigación del riesgo en base a análisis coste-beneficio de dichas medidas de mitigación.

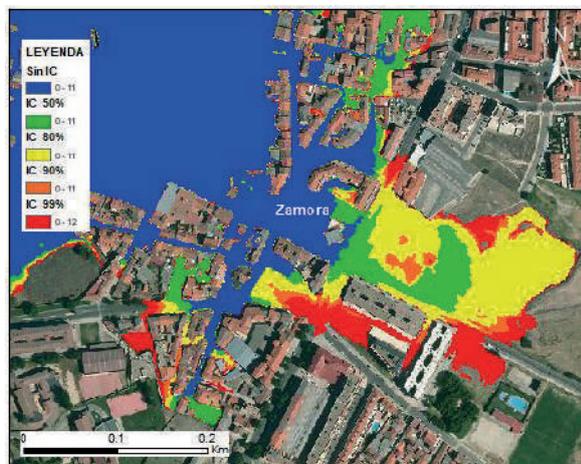


Figura 4. Representación probabilística de zona

CONCLUSIONES

Conocer el comportamiento de la variable caudal punta (volúmenes del agua circulante) a partir de la información foronómica disponibles en la zona de estudio. Para maximizar esa información se procedió a la extensión de la serie de Zamora, a la determinación de los parámetros de ajuste de la función de distribución GEV, y a la simulación de escenarios mediante la aplicación del método de Monte-Carlo; todo ello con el objetivo de mejorar el análisis de riesgo por inundaciones.

El análisis estadístico de caudales máximos instantáneos (Q_{ci}) entre las estaciones de aforo de Toro y Zamora, determino el valor del coeficiente de determinación R^2 muy bueno, ya que es un valor cercano a la unidad, valor que permitió la estimación de los valores de Q_{ci} en la estación de aforos de Zamora en función del valor de Q_{ci} en Toro, lo que permitió extender la longitud de la serie de Zamora.

Para el análisis de frecuencia de avenidas, se realizó el ajuste de una función de distribución GEV, que permitió establecer la relación de datos entre el caudal máximo instantáneo (Q_{ci}) y los diferentes periodos de retorno, mediante la aplicación del programa AFINS, proporcionando de esta manera el conocimiento general del comportamiento de la variable caudal punta, así como la estimación de los parámetros de ajuste de la función de distribución. Estos parámetros controlan la forma que adopta la función y por tanto ejercen un control sobre los siguientes pasos

de análisis (Monte-Carlo).

La metodología del análisis probabilístico con el método Monte-Carlo, empleando el Script en el programa MATLAB, permitió generar múltiples escenarios a partir de series de 500 valores de probabilidad (distribución uniforme) para realizar 500 simulaciones (escenarios). Estos datos de probabilidad se transformaron a caudales (valores de caudal punta) a partir de la ecuación matemática de la función de distribución GEV.

De los resultados obtenidos, se determinó que los valores del caudal punta para los periodos de retorno menores poseen baja incertidumbre en la estimación del cuantil a diferencia de los periodos de retorno mayores que presentan mayor incertidumbre en la estimación del cuantil. Así, al generar múltiples escenarios (posibles comportamientos parciales de la variable caudal punta) se mejoró la caracterización del comportamiento de la variable caudal punta.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alfonso, L.; Mukolwe, M.M.; Di Baldassarre, G. Probabilistic Flood Maps to support decision-making: Mapping the Value of Information. *Water Resour. Res.* 2016, 52, 1026–1043.
- Apel, H.; Thielen, A.H.; Merz, B.; Blöschl, G. Flood risk assessment and associated uncertainty. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2004, 4, 295–308.
- Aronica, G.T.; Franza, F.; Bates, P.D.; Neal, J.C. Probabilistic evaluation of flood hazard in urban areas using Monte Carlo simulation. *Hydrol. Process.* 2012, 26, 3962–3972.
- Di Baldassarre, G. Flood trends and population dynamics. In *Geophysical Research Abstracts, Proceedings of the EGU 2012 Conference, Vienna, Austria, 22–27 April 2012; European Geosciences Union: Vienna, Austria, 2012; p. EGU2012-1152.*
- Domeneghetti, A.; Vorogushyn, S.; Castellarin, A.; Merz, B.; Brath, A. Probabilistic flood hazard mapping: Effects of uncertain boundary conditions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2013, 17, 3127–3140.
- Hall, J.; Solomatine, D. A framework for uncertainty analysis in flood risk management decisions. *J. River Basin Manag.* 2008, 6, 85–98