

IMPLEMENTACIÓN DE NUEVAS TÉCNICAS PARA LA GESTIÓN DE LOS RIESGOS POR AVENIDAS E INUNDACIONES: NAVALUENGA (ESPAÑA)

Ballesteros, J. A.¹, Bodoque, J. M.², Díez-Herrero, A.¹, Sánchez, M.³ y Nieto, A.⁴

¹ Instituto Geológico y Minero de España

² Universidad de Castilla La Mancha

³ Universidad de los Andes

⁴ Grupo Cibernos

RESUMEN

La aprobación el 26 de noviembre de 2007 de la Directiva Europea de Inundaciones, tiene por finalidad el análisis y la gestión de los riesgos derivados de la ocurrencia de inundaciones. En este contexto, el presente trabajo se centra en el desarrollo de un modelo para la minimización de la relación coste-beneficio derivada de la consideración de una serie de medidas mitigadoras del riesgo. El área de estudio es el pueblo de Navaluenga, el cual se sitúa a 110 km al oeste de Madrid. Su elección vino dada por tratarse de un núcleo urbano que en el pasado ha sufrido numerosas inundaciones. La aproximación metodológica utilizada se basó en la implementación de un modelo hidrológico semidistribuido, en el que el modelo de cuenca se obtuvo automáticamente utilizando la extensión de ArcGIS HEC-GeoHMS. Asimismo, dicho modelo fue calibrado y validado mediante una rutina automática, en el que la función objetivo utilizada fue el porcentaje de error en el caudal punta. Los cuantiles de precipitación considerados fueron 5, 10, 50, 100 y 500 años. Seguidamente, se determinaron las áreas inundables mediante el modelo hidráulico 1D/2D MIKE FLOOD. Para ello, se generó una malla a partir de la cartografía urbana disponible (1:1000) y utilizando las herramientas de gestión de datos espaciales existentes en ArcGIS 9.2. Para la calibración del modelo hidráulico se utilizaron las señales de impacto en árboles, resultado de inundaciones pretéritas, y haciendo uso de técnicas dendrogeomorfológicas. Las mismas permiten estimar el calado de lámina de agua, así como la fecha en la que el evento de inundación tuvo lugar. Una vez calibrado el modelo se diseñaron medidas mitigadoras del riesgo de carácter estructural, las cuales fueron priorizadas mediante la realización de un análisis coste-beneficio.

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son una amenaza constante para la vida y los bienes. En los últimos 30 años, las inundaciones y avenidas han sido el desastre natural más catastrófico, afectando alrededor de 80 millones de personas por año en promedio. Los daños económicos resultantes se estiman en ocho mil millones de euros anuales (Dutta et al., 2006). Igualmente, en los últimos años se ha constatado un incremento de las poblaciones en riesgo como resultado del aumento de la presión sobre las áreas de influencia de la dinámica fluvial, por lo que se ha observado una tendencia positiva del número de afectados (CRED, 2003; Dutta and Herath, 2004). Así, la frecuencia de las avenidas significativas se ha doblado en las últimas tres décadas. Esta circunstancia parece estar estrechamente ligada a los efectos del cambio climático, que previsiblemente llevará asociado un incremento de la frecuencia y la magnitud de las inundaciones a escala global (Houghton et al., 2001). Asimismo, es necesario reseñar como la urbanización desaforada y políticas de planificación irracionales de los usos del suelo, también han aumentado tanto la exposición como la vulnerabilidad a las crecidas (Gruntfest y Ripps, 2000).

Entre 1992 y 2004 Europa sufrió más de 100 inundaciones significativas, que derivaron en pérdidas de vidas humanas y bienes, incluyendo las catastróficas crecidas de los ríos Danubio y Elba durante el verano de 2002. Igualmente, en 2005 se produjeron inundaciones en otras partes de Europa, aspecto este que favoreció la necesidad de una acción concertada en el conjunto de la unión, con el objeto de paliar los efectos devastadores derivados de la ocurrencia de inundaciones. Así, desde 1995 y como resultado de la actuación de este proceso se han producido 800 muertes, en torno a medio millón de personas se vieron obligadas a abandonar sus hogares y se han producido pérdidas económicas de al menos veinticinco mil millones de euros. Ya en España, las inundaciones suponen el peligro natural de mayor importancia, produciendo pérdidas de decenas de millones de euros todos los años. Para el período 1986-2016 se han estimado unas pérdidas potenciales de entre 500 y 1.100 vidas humanas y unas pérdidas económicas, difíciles de cuantificar, pero que en cualquier caso supondrán miles de millones de euros para una hipótesis de riesgo medio (Díez-Herrero et al., 2008). Estas afecciones se darían a escala nacional, pues prácticamente todo el territorio español se encuentra sometido a riesgo de inundaciones, aunque en distinto grado y diferentes modalidades (Camarasa, 2002).

El objetivo principal de este trabajo es construir un modelo para el análisis de ciclo de vida de proyectos de medidas estructurales de mitigación contra inundaciones. Su finalidad es optimizar la inversión y definir estrategias eficientes de prevención y reducción del riesgo. Como objetivos adicionales cabe reseñar:

1. Desarrollar un modelo integral para el análisis de los costos en que se incurre durante el ciclo de vida de un proyecto de infraestructura.
2. Proponer un marco conceptual y analítico que permita tomar decisiones efectivas (óptimas) con respecto a la inversión en la construcción y mantenimiento de infraestructura.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El municipio de Navaluenga está situado en el valle del Tiétar, al sur de la provincia de Ávila y a las orillas del río Alberche entre la Sierra del Valle y la (macizo oriental de Gredos) y la Sierra de la Paramera (40° 24' 30" N; 4° 42' 17" O; 761msnm - Figura 1). Cuenta con una población aproximada de 2.460 habitantes, sin embargo, durante los fines de semana esta cifra se sitúa entre 5.000 y 10.000 llegando a alcanzar los 20.000 habitantes durante la época estival.

El río Alberche nace en el sector oriental de la Sierra de Gredos (Sistema Central, Ávila) a unos 1800 msnm. Hasta el municipio de Navaluenga, el río tiene una longitud de unos 70km en régimen natural y una cuenca drenante de 717 km² que recibe las aguas de las gargantas Por otro lado, el Alberche atraviesa el casco urbano parcialmente canalizado y generando una serie de piscinas debido a la construcción de pequeños diques transversales, que son utilizados por la población como zonas de esparcimiento durante la época estival. Hasta este punto, varios torrentes y gargantas provenientes tanto de la Sierra del Valle como de la sierra de la Paramera drenan su aguas al río Alberche. Como resultado, la peligrosidad por inundación está asociada a dicha actividad torrencial, así como a la rápida respuesta hidrológica de la cuenca alta.

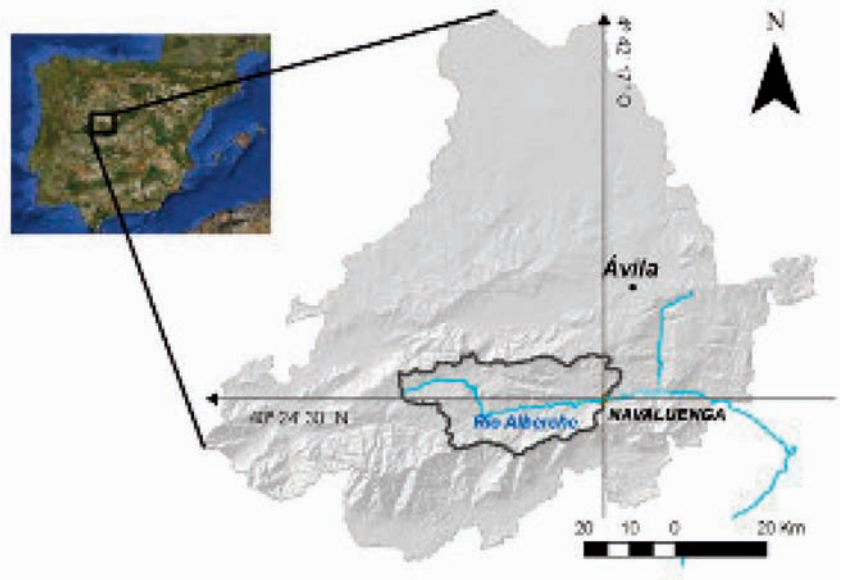


Figura 1. Esquema de localización del municipio de Navaluenga.

3. METODOLOGÍA

La estimación del riesgo por inundaciones es un procedimiento complejo en el que intervienen métodos de análisis hidrológico, junto con técnicas de computación hidráulica y valoración económica de los bienes expuestos (Figura 2).

3.1. Modelo hidrológico

La simulación de la respuesta hidrológica resultado de la ocurrencia de las tormentas de diseño de 2, 50, 100 y 500 años de periodo de retorno, se llevó a cabo a partir de las series de lluvias registradas en 18 estaciones localizadas tanto en el interior de la cuenca como en su entorno próximo. Los valores de precipitación asociados a los periodos de retorno considerados, se establecieron ajustando a las series de precipitaciones máximas una función de distribución tipo SQRT-ET MAX. Los parámetros que permiten caracterizar la misma se estimaron mediante el método de máxima verosimilitud (Rico et al., 2001). Por otro lado, las precipitaciones así obtenidas se desagregaron en el tiempo haciendo uso del método de los bloques alternantes (Chow et al., 1988).

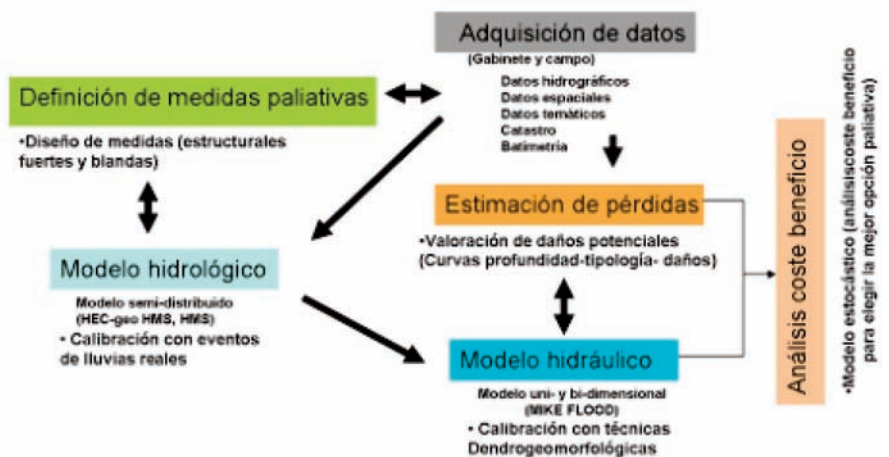


Figura 2. Diagrama de flujo que describe el procedimiento utilizado en el estudio.

El modelo de cuenca se obtuvo haciendo uso de la aplicación informática HEC-GeoHMS (USACE, 2009) y en base a un modelo digital de ele-

vaciones (MDE) con resolución espacial de 90 m. La densidad de la red de drenaje vino dada por la consideración de un 1% del área drenante total (en unidades de superficie) como umbral que determina la formación de un canal bien definido. El modelo de cuenca quedó definido por un total de 17 subcuencas. Esta desagregación se basó en la distribución espacial de aquellos factores fisiográficos que en mayor medida determinan la respuesta hidrológica (litología, cobertura vegetal, condición hidrológica del suelo). La simulación del proceso de transformación de la lluvia en escorrentía se realizó utilizando la aplicación informática HEC-HMS (USACE, 2009). Para tal fin, se empleó el método del número de curva (Knebl et al., 2005) al objeto de estimar las abstracciones iniciales. La transformación de la lluvia neta en escorrentía se realizó aplicando el método del hidrograma unitario adimensional del SCS (Wang et al., 2008). La caracterización de la traslación y laminación de la onda de crecida en el canal se realizó mediante el método de Muskingum (Choudhury et al., 2002), mientras que su equivalente en los embalses se simuló mediante el método de Puls modificado (Frances, 1985). En lo que al caudal de base se refiere, su influencia se obvió en tanto en cuanto el volumen resultante no es significativo para determinar los hidrogramas de las crecidas de periodo de retorno considerado.

3.2. Modelo hidráulico

Para la estimación de las distintas superficies inundadas en el término municipal de Navalunga, se ha utilizado un modelo de flujo bidimensional (MIKE FLOOD) desarrollado por el Instituto Hidráulico Danés. Este modelo trabaja con un esquema numérico de diferencias finitas. Para el cálculo bidimensional este modelo usa la técnica "Alternating Direction Implicit", que le permite resolver las ecuaciones de la conservación de masa y de momentos (DHI, 2008). Para nuestro caso de estudio, este modelo ha sido aplicado para reproducir un tramo del río Alberche de 2 km de longitud. La geometría del canal (batimetría) se ha introducido en formato de secciones transversales y como una malla de precisión (2x2) en el casco urbano. Los datos de la batimetría adquiridos con GPS diferencial fueron incluidos en la topografía en formato CAD a escala 1:1000 del municipio, dónde se incluye información de las distintas infraestructuras al objeto de obtener el TIN (Figura 3).

Como condiciones hidráulicas de contorno se introdujeron:

1. Caudal: los correspondientes a los cuantiles de precipitación para la cuenca del río Alberche y Chorrerón (afluente del anterior y que cruza el casco urbano de norte a sur) obtenidos a partir de la modelización hidrológica realizada y para los distintos escenarios.
2. Altura Inicial aguas abajo: Se utilizó la pendiente de energía equivalente, siendo 748m la altura inicial aguas abajo.

Por último, el coeficiente de rugosidad se obtuvo previa cartografía de los distintos sectores de ocupación del suelo existentes tanto en la zona del canal como en las áreas inundables. Esta información fue incluida de forma discreta en las secciones transversales y continua en la zona modelada bidimensionalmente, siendo los valores los establecidos por Aldridge y Garrett (1973).

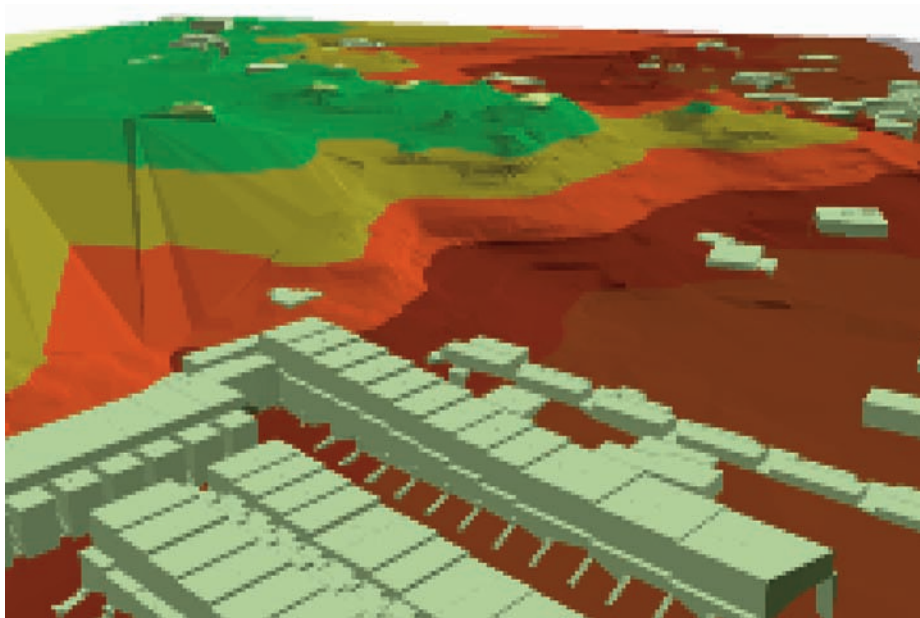


Figura 3. Vista oblicua del modelo del terreno TIN incluidas algunas infraestructuras.

El modelo hidráulico fue calibrado modificando los valores de rugosidad. Se trataba de encontrar la combinación de valores de rugosidad que minimizaban la desviación entre las alturas observadas en marcas de paleoestado registradas en la masa arbórea (p.e. descortezados, ver Figura 4) con las alturas modeladas para el caudal que generó dichas marcas. Se reconocieron 48 marcas, que fueron muestreadas y analizadas de acuerdo con los criterios y técnicas establecidos y descritos en Ballesteros et al. 2009.

3.3. Definición de medidas

El conjunto de medidas propuestas para la mitigación del riesgo por inundaciones consistió en una serie de estructuras y/o medidas a implementar sobre la corriente principal (río Alberche), así como en los afluentes que en ella confluyen. Parte de ellas están contempladas en el Plan Hidrológico de Cuenca (CHT, 1988) y consisten en la construcción de los embalses: Venta del Obispo; Navarrevisca y Morisco. Complementariamente, se diseñaron medidas adicionales consistentes en diques de corrección hidrológica forestal.

3.4. Estimación de pérdidas

Para la estimación de pérdidas esperadas en las zonas inundadas, se ha tenido en cuenta las funciones de profundidad-daño elaboradas por el cuerpo de ingenieros de EE.UU (Stuart et al., 1992). Se trata de relaciones en términos de porcentaje entre la profundidad de la lámina de agua (términos positivos y negativos) y la cantidad de daños que pueden atribuirse al efecto de la inundación (contacto con el agua). Están basadas en la premisa de que la altura del agua es la variable hidráulica más determinante para la estimación de los daños esperados (Merz et al., 2004). Para obtener la tipología de infraestructuras en la zona de estudio, se usó la cartografía CATASTRAL urbana de Navalugena.



Figura 4. Marca de descortezado sobre *Alnus glutinosa* causado por el impacto de flotante.

3.5. Análisis de la relación costo-beneficio

Determinados fenómenos torrenciales están relacionados de alguna manera con el estado de las cuencas hidrográficas (Mintegui y Robredo, 2008). Por lo tanto, parece razonable la utilización del método de daños evitados (a la población) como instrumento de análisis económico (análisis coste-beneficio-ACB) para evaluar la conveniencia de las distintas obras o soluciones adoptadas a nivel de cuenca. En la medida en que los beneficios actualizados excedan los costos actualizados el proyecto o solución estudiada es viable. El proyecto con menor costo será por tanto el preferido. A este respecto, la expresión matemática que debe optimizarse es:

Siendo el primer sumando ($K_{i,0}$) los valores asociados al coste de cada actuación actualizados y el segundo sumando las pérdidas esperables para el periodo de retorno T_0 . Para un periodo temporal de 500 años, la función será:

$$K_{i,0} + \frac{1}{T_0} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} (P_{i,0} + x) \cdot \text{dnorm}(x, 0, S_{i,0}) dx$$

donde $K_{i,j}$ representa el coste de la solución adoptada i para el periodo de retorno T_j ; y $P_{i,j}$ las pérdidas esperadas en Navalugena. $S_{i,j}$ representa la desviación derivada de cada modelo para la solución i para el periodo de retorno j

$$\sum_{i,j}^{18,4} K_{i,j} + \frac{1}{T_j} \int_{-\infty}^{+\infty} (P_{i,j} + x) \cdot \text{dnorm}(x, 0, S_{i,j}) dx$$

3. RESULTADOS

En la figura 5 se muestran las áreas inundadas resultado de los cuantiles de precipitación considerados.

El óptimo en la relación costo-beneficio para los escenarios planteados puede observarse en la figura 5. Como puede observarse, para los dos escenarios considerados existen tres familias de soluciones factibles posibles. La primera y que además minimiza la relación costo-beneficio sería no actuar. La segunda y tercera tienen que ver con la construcción del embalse de Navarrevisca para cualquier altura de presa, así como con la construcción de diques de corrección de torrentes en combinación con la presa de Navarrevisca. Tal y como se ha explicado en epígrafes previos este estudio se ha basado en el análisis de relación coste-beneficio, de manera que el costo del proyecto viene dado por las inversiones que deben realizarse para las distintas alternativas. Por otro lado, los beneficios son resultado de la reducción en los daños por la mitigación de los riesgos por inundaciones. Teniendo en cuenta este criterio, la solución más óptima de todas las tenidas en cuenta sería la de no desarrollar ninguna obra de las consideradas. Sin embargo, el beneficio adquirido con valores de uso como la producción eléctrica y el almacenaje de agua podrían reducir el coste total derivado de la construcción de las presas. Complementariamente, valores de no uso como el cambio de ecosistemas y la incidencia en procesos erosivos en la cuenca y, por lo tanto, la pérdida de suelo fértil deberían incrementar el coste final de la presa.

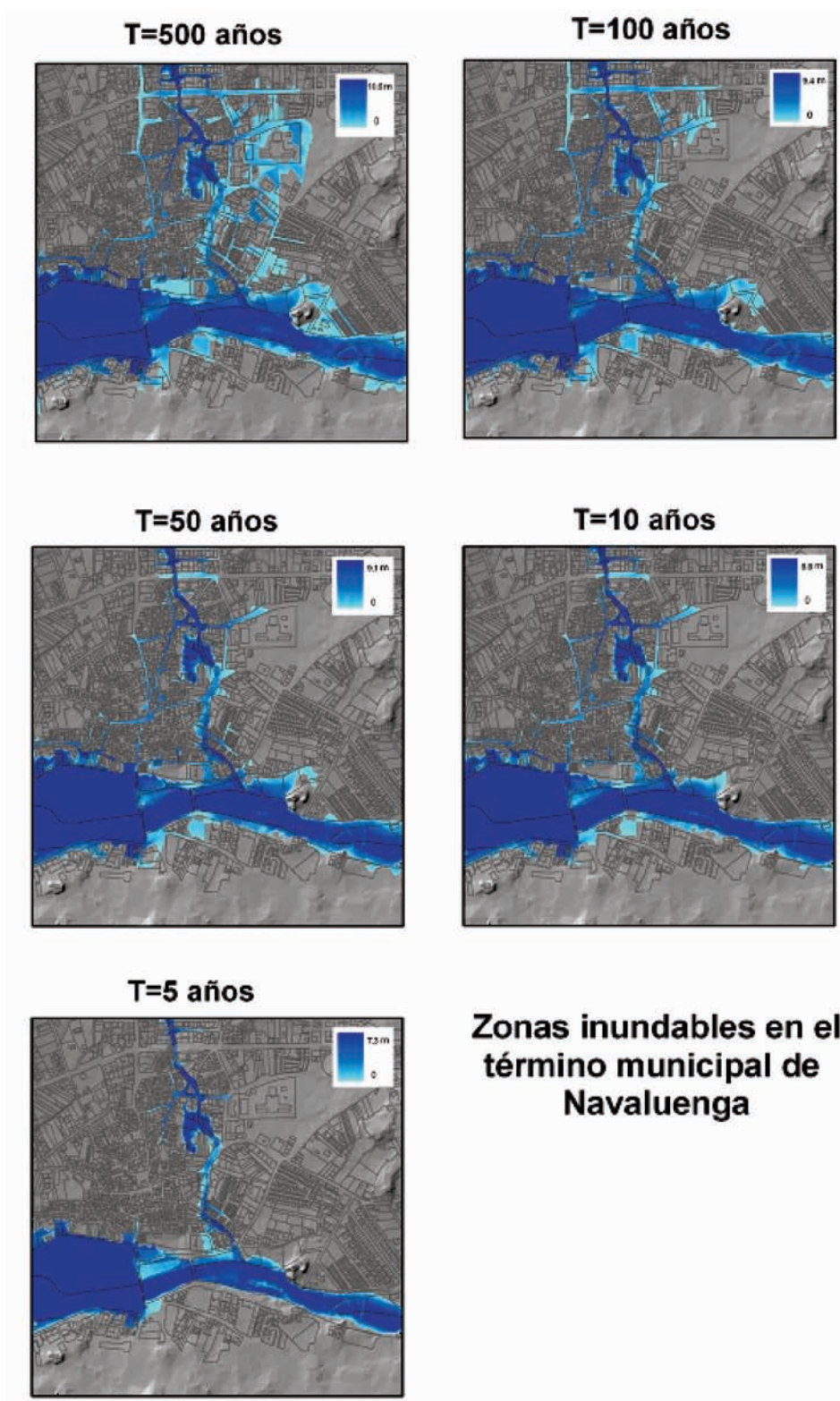


Figura 5. Áreas inundables correspondientes a los periodos de retorno considerados.

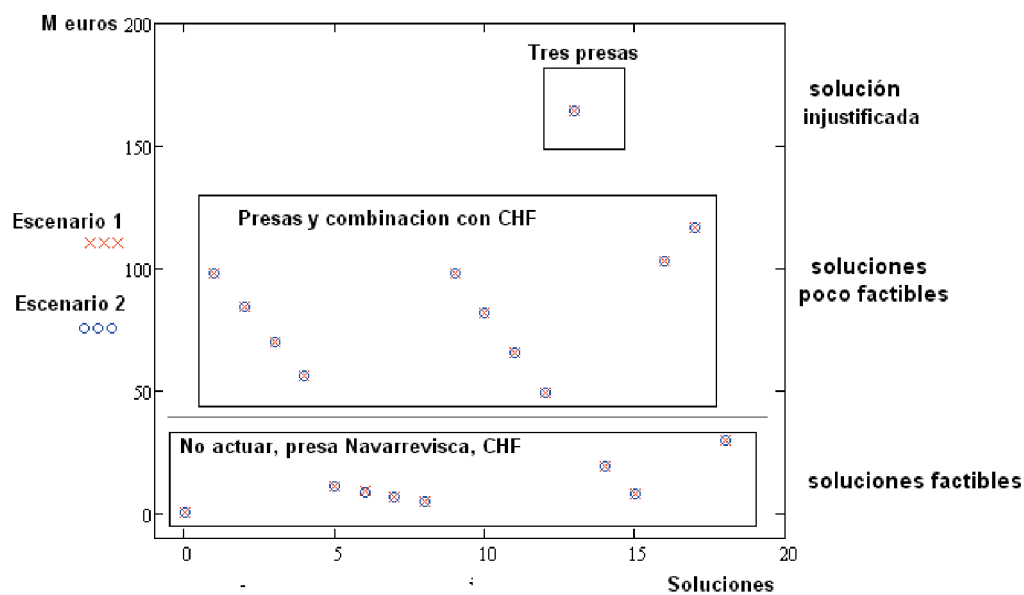


Figura 6. Evaluación de las distintas soluciones previstas desde el punto de vista de la mitigación de riesgos por inundaciones en el término municipal de Navalunga.

4. BIBLIOGRAFÍA

- Aldridge, B.N. y J.M. Garrett (1973): "Roughness coefficients for stream channels in Arizona". U.S. Geological Survey. Open-File Report, 87 pp.
- Ballesteros, J.A. Stoffel, M. Bodoque, J. M; Bollschweiler, M. Hitz, O. y A. Díez- Herrero (2010): "Wood anatomy of Pinus pinaster Ait. following wounding y flash floods". *Tree-Ring Research*, vol. 66, nº. 2, 93-103.
- Camarasa, A.M. (2002): "Crecidas e inundaciones". En: Ayala-Carcedo, F.J., y J. Olcina Cantos (Coords.): Riesgos Naturales. Editorial Ariel, Ariel Ciencia, Barcelona. Cap. 46, 859-877.
- Choudhury, P. Shrivastava, R.K. y S.M. Narulkar (2002): "Flood routing in river Networks using equivalent Muskingum inflow". *J. Hydrol. Eng.*, vol. 7, nº. 6, 413-419.
- Chow, V.T. Maidment, D.R. y L.W. Mays (1988): "Applied Hydrology", McGraw-Hill.
- CHT (1988): "Plan Hidrológico. Documentación Básica. Confederación Hidrográfica del Tajo, 2 tomos, 499 págs, Madrid.
- CRED. (2003): "International disaster database". Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, Brussels, Belgium.
- DHI. (2008): "MIKE 21 Flow Model. Hydrodynamic Module". Scientific Documentation. DHI, 60 pp.
- Díez-Herrero, A. (2008): "Prevención de inundaciones". En Chicharro, E., Alonso, C., (Dtors), Manual de Gestión Medioambiental 2008, Biblioteca Empresarial Cinco Días. Arnaiz Consultores y acuaTajo (Ministerio de Medio Ambiente), Gestión del agua, Cap. 01, 18-24.
- Dutta, D. y Herath, S. (2004): "Trend of floods in Asia and a proposal for flood risk management with integrated river basin approach". In Proceedings of the Second International Conference of Asia-Pacific Hydrology and Water Resources Association, Singapore, July, vol. 1, 128-137.
- Dutta, D. Herath, S. y K. Musiak (2006): "An application of a flood risk analysis system for impact analysis of a flood control plan in a river basin". *Hydro. Process.*, vol. 20, 1365-1384.
- Frances, P.W. (1985): "Hydrologic routing with a microcomputer". *Adv. Eng. Softw.*, vol. 7, nº. 1, 8-12
- Gruntfest E, y A. Ripps (2000): "Flash floods: warning and mitigation efforts and prospects". In Floods, vol. 1, Parker DJ (ed.). Routledge: 377-390.
- Houghton, J.T. Ding, Y. Griggs, D.J. Noguera, M. van der Linden, P.J. Dai, X. Maskell, K. y C.A. Johnson (eds). (2001): "Climate Change 2001": The Scientific Basis. Cambridge University Press: Cambridge.
- Knebl, M.R. Yang, Z.L. Hutchison, K. y D.R. Maidment (2005): Regional scale flood using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Environ. Manage.*, vol. 75, 325-336
- Merz, B. Kreibich, H. Thielen, A. y Schmidtke, R. (2004): "Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings". *Nat. Hazard Earth Sys.*, vol., 4, 153-163.
- Mintegui, J.A. y J.C. (2008): "Estrategias para el control de los fenómenos torrenciales y la ordenación sustentable de las Aguas, suelos y bosques de las Cuencas de Montaña". PHI-VII/Documento Técnico N° 13. Montevideo, 162 pp.
- Rico M, Benito G, y A. Barnolas (2001): "Combined palaeoflood and rainfall-runoff assessment of mountain floods (Spanish Pyrenees)". *J. Hydrol.*, vol., 245, 59-72.
- Stuart A., Davis, L. and Leigh Skagges, I. (1992): "Catalog of residential depth-damage function used by Army Corps of Engineer in flood damage estimation". U.S. Army Corps of Engineers, Headquarters Washington, 151 p.

U.S. Army Corp of Engineers (USACE) (2009): "HEC-GeoHMS Geospatial hydrologic modelling extension user's manual". Version 4.2, U.S. Davis, California.

U.S. Army Corp of Engineers (USACE) 2009. Hydrologic modelling system HEC-HMS, user's manual. Version 3.4, U.S. Davis, California.

Wang, Y.C. Chen, S.T. Yu, P.S. y Yang, T.C. (2008): "Storm-event rainfall-runoff modelling approach for ungauged sites in Taiwan". Hydro. Process., vol. 22, 4322-4330