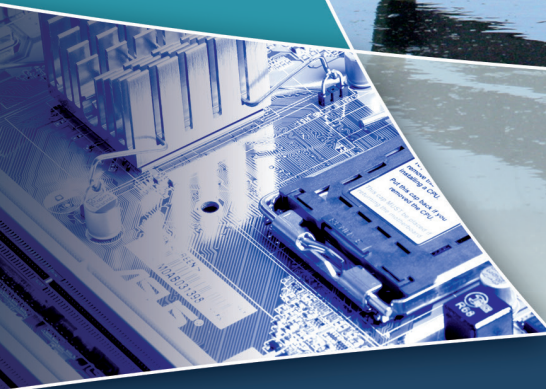


Metodología completa y cuantitativa de análisis del riesgo de inundación en zonas urbanas

**I. Escuder Bueno, J. T. Castillo Rodríguez,
A. Morales Torres, L. Altarejos García.**



I. Escuder Bueno
J.T. Castillo Rodríguez
A. Morales Torres
L. Altarejos García

Metodología completa y cuantitativa de análisis del riesgo de inundación en zonas urbanas

EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Los contenidos de esta publicación han sido revisados por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la UPV

Colección Académica

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita: Escuder-Bueno, Ignacio [et al] (2013) *Metodología completa y cuantitativa de análisis del riesgo de inundación en zonas urbanas*. Valencia: Universitat Politècnica

Primera edición, 2013

© Ignacio Escuder-Bueno
Jesica Tamara Castillo-Rodríguez
Adrián Morales-Torres
Luis Altarejos-García

© de la presente edición: Editorial Universitat Politècnica de València
Distribución: Telf. 963 877 012/ <http://www.lalibreria.upv.es> / Ref.: 980-3-1-1

Imprime: Byprint Percom, sl

Impreso en papel Coral Book



ISBN: 978-84-9048-121-9

Impreso bajo demanda

Queda prohibida la reproducción, la distribución, la comercialización, la transformación y, en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de la totalidad o de cualquier parte de esta obra sin autorización expresa y por escrito de los autores.

Impreso en España

Índice de contenidos

| | |
|---|-----|
| Índice de contenidos..... | 3 |
| Preámbulo..... | 5 |
| Nomenclatura general..... | 7 |
| Acrónimos..... | 9 |
| Figuras..... | 11 |
| Tablas..... | 13 |
| Capítulo 1. Riesgo de inundación..... | 17 |
| 1.1. Definición general y componentes..... | 17 |
| 1.2. Tipologías de inundación..... | 19 |
| Capítulo 2. Medidas de reducción del riesgo de inundación..... | 21 |
| 2.1. El papel de las medidas de reducción del riesgo de inundación..... | 21 |
| 2.2. Medidas estructurales..... | 22 |
| 2.3. Medidas no estructurales..... | 32 |
| Capítulo 3. Herramientas para la estimación del riesgo de inundación..... | 45 |
| 3.1. Herramientas parciales y cualitativas..... | 45 |
| 3.2. Herramientas parciales y cuantitativas..... | 46 |
| 3.3. Herramientas completas y cualitativas..... | 48 |
| 3.4. Herramientas completas y cuantitativas..... | 49 |
| Capítulo 4. Metodología <i>SUFRI-iPRESARA</i> de análisis del riesgo de inundación..... | 51 |
| 4.1. Generalidades..... | 51 |
| 4.2. Metodología de análisis del riesgo de inundación por precipitación «in situ»..... | 61 |
| 4.3. Metodología de análisis del riesgo de inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces..... | 80 |
| 4.4. Incorporación de medidas de reducción del riesgo..... | 100 |
| Capítulo 5. Caso práctico..... | 105 |
| 5.1. Introducción..... | 105 |
| 5.2. Inundación por precipitación «in situ»..... | 106 |
| 5.3. Inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces..... | 120 |
| 5.4. Análisis conjunto: Inundación por precipitación «in situ» y escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces..... | 140 |

| | |
|--|-----|
| Capítulo 6. Conclusiones..... | 147 |
| Referencias | 149 |
| Apéndices | 155 |
| Apéndice 1. Diagrama de obtención de datos de entrada a los modelos de riesgo. Inundación por precipitación «in situ» | 157 |
| Apéndice 2. Diagrama de obtención de datos de entrada a los modelos de riesgo. Inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces. | 163 |
| Apéndice 3. Criterios de vulnerabilidad | 171 |
| Apéndice 4. Estimación de tasas de mortalidad en inundación por precipitación «in situ» | 175 |
| Apéndice 5. Costes de referencia y curvas calado-daños | 179 |
| Apéndice 6. Esquemas básicos para modelos de riesgo | 185 |
| Apéndice 7. Criterios de tolerabilidad | 189 |
| Apéndice 8. Modelos de riesgo del caso práctico..... | 193 |
| Apéndice 9. Manual del software iPresas UrbanSimp | 195 |

Preámbulo

La edición del presente libro “*Metodología completa y cuantitativa de análisis del riesgo de inundación en zonas urbanas*” forma parte de los trabajos desarrollados por los autores en el marco de dos proyectos de investigación: el Proyecto SUFRI “*Sustainable strategies of Urban Flood Risk Management to cope with the residual risk*”, EUI 2008-03933 (2nd CRUE ERA-Net Funding Initiative, 2009-2011) y el Proyecto iPRESARA, titulado “Incorporación de los componentes de riesgo antrópico a los sistemas de gestión integral de seguridad de presas y embalses”, BIA 2010-17852 (Plan Nacional de I+D 2008-2011, Ministerio de Ciencia e Innovación).

Los autores forman parte de un grupo investigador integrado en el Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente (DIHMA) y la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Valencia (ETSICCP) de la Universitat Politècnica de València (UPV).

El riesgo de inundación ha sido objeto de estudio desde hace décadas. No obstante, la complejidad del análisis a escala local requiere del desarrollo de metodologías específicas para el análisis del riesgo de inundación en zonas urbanas. Por ello, este documento describe la metodología propuesta para el análisis del riesgo de inundación, incorporando tanto inundaciones de origen pluvial (precipitación *in situ*) como de origen fluvial (escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces).

Además, la publicación de este libro se encuentra ligada a las siguientes asignaturas impartidas en la UPV con el fin de servir de apoyo y referencia a los alumnos para reforzar conceptos y abordar la resolución de problemas:

- *Infraestructuras hidráulicas*, impartida en el Grado de Ingeniería Civil,
- *Obras y aprovechamientos hidráulicos*, impartida en el Grado de Ingeniería de Obras Públicas, y,
- *Análisis de riesgos de inundación incluyendo la evaluación de la seguridad de presas*, impartida en el Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.

El libro se estructura en seis capítulos:

- El primero, *Riesgo de inundación*, recoge conceptos básicos y definiciones relacionadas con las componentes del riesgo, así como las diferentes tipologías de inundación en función de su origen.
- El segundo resume las diferentes *medidas estructurales y no estructurales* existentes para la reducción del riesgo de inundación.

- El tercer capítulo, *Herramientas para la estimación del riesgo*, describe una clasificación de las herramientas existentes para la estimación del riesgo de inundación en función de las componentes del riesgo analizadas.
- El cuarto capítulo, *Metodología de análisis del riesgo de inundación*, presenta la metodología desarrollada en la UPV en el marco del proyecto europeo SUFRI para el análisis del riesgo de inundación pluvial y fluvial en zonas urbanas, basada en el uso de modelos de riesgo y curvas del tipo F-N y F-D. Además, incorpora los avances derivados del proyecto iPRE-SARA (Plan Nacional 2008-2011) en lo referente al desarrollo y mejora de los modelos de cálculo para el análisis del riesgo de inundación. Este capítulo desarrolla en detalle el análisis de inundación por precipitación «in situ» y por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces.
- El quinto capítulo incorpora un caso práctico de aplicación de la metodología descrita.
- Finalmente, el último capítulo recoge las conclusiones generales referentes a la metodología propuesta y su aplicación.

Además, se incluyen nueve apéndices con herramientas de apoyo a la metodología (tablas, diagramas, esquemas, etc.) y descripciones de aspectos específicos.

*Los autores
Valencia, septiembre de 2013*

Nomenclatura general

| | |
|----------|---|
| A_F | Área total afectada por la inundación (km ²). |
| A_{fi} | Área de afección (km ²), dada una categoría CU de uso del suelo. De modo que $A_F = \sum A_{fi}$. |
| A_T | Área total de la población de estudio (km ²). |
| C | Categoría de la población para la definición de tasas de mortalidad de referencia en inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces. |
| C_p | Categoría de la población para la definición de tasas de mortalidad a aplicar en inundación por precipitación «in situ». |
| CD | Coste directo (euros). |
| CI | Coste indirecto (euros). |
| CR_i | Coste de referencia. Valor en euros/m ² establecido para cada categoría CU de uso del suelo. |
| CT | Coste total, suma de costes directos e indirectos (euros). |
| CU | Categoría según usos del suelo. |
| d | Densidad de población (habitantes/km ²). |
| d_c | Densidad de población de cálculo, establecida para la estimación de la población en riesgo en núcleos de estudio con tipologías de edificación de elevado número de plantas (habitantes/km ²). |
| DV | Parámetro para la definición de niveles de severidad en inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces, función de las características del flujo (m ² /s). |
| f | Probabilidad anual de excedencia (años ⁻¹). |
| f_c | Factor para el cálculo de costes indirectos (porcentaje de los costes directos). |
| F | Probabilidad anual de excedencia acumulada (años ⁻¹). |
| FMF | Factor Modo Fallo (horas). Variable de cálculo para la estimación del tiempo de aviso en inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces (con existencia de presa). |
| FPE | Factor de existencia de Plan de Emergencia (horas). Variable de cálculo para la estimación del tiempo de aviso en inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces (con existencia de presa). |
| FR | Tasa de mortalidad en inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces. |
| FR_p | Tasa de mortalidad en inundación por precipitación «in situ». |
| h | Altura de edificio (m). |
| h_m | Altura promedio de los edificios existentes en la población de estudio (m). |
| n_p | Número de plantas promedio. Obtenido como la media ponderada del número de plantas de los edificios de la población de estudio. |
| N | Pérdida potencial de vidas humanas. |
| PAE | Probabilidad anual de excedencia (años ⁻¹). |
| PD | Porcentaje de daños (%). |
| PR | Población en riesgo (en número de personas). |

| | |
|----------------|--|
| $PR_{out, in}$ | Población expuesta a la inundación (en el exterior - outdoors - o en el interior de viviendas - indoors -). Población a aplicar a las tasas de mortalidad en inundación por precipitación «in situ». |
| PT | Población total de la población de estudio (en número de personas). |
| Q | Caudal (m^3/s). |
| Q_1 | Caudal de alerta, definido como el caudal que alcanza la capacidad del cauce a su paso por la población de estudio (m^3/s). |
| Q_2 | Caudal de inicio de afección, definido como el caudal en el que la inundación alcanza las primeras edificaciones (m^3/s). |
| Q_{br} | Caudal obtenido de los hidrogramas en caso de rotura de presa (m^3/s). |
| Q_f | Caudal máximo de afección en la población de estudio (m^3/s). |
| Q_{max} | Caudal máximo de un determinado hidrograma o caudal pico (m^3/s). |
| Q_{nbr} | Caudal obtenido de los hidrogramas resultantes de la laminación de avenidas (m^3/s). |
| Q_{pf} | Caudal de escorrentía en inundación por precipitación «in situ» (m^3/s). |
| RFR | Tasa de mortalidad de referencia, en función de la categoría C de la población para el cálculo de tasas en inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces. |
| RFR_p | Tasa de mortalidad de referencia, en función de la categoría C_p de la población para el cálculo de tasas en inundación por precipitación «in situ». |
| S | Nivel de severidad de la inundación (inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces) en función del parámetro DV. |
| S_p | Nivel de severidad de la inundación (inundación por precipitación «in situ») en función del calado y la velocidad del flujo. |
| t_{Q1} | Tiempo en el que se produce el caudal de alerta, Q_1 , en la zona de estudio (horas). |
| t_{Q2} | Tiempo en el que se produce el caudal de afección, Q_2 , en la zona de estudio (horas). |
| T | Periodo de retorno (años). |
| TBR | Tiempo de formación de la brecha (horas). Variable de cálculo para la estimación del tiempo de aviso en inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces (con existencia de presa). |
| TC | Categoría de tiempo establecida para la estimación de la población en riesgo. |
| TD | Diferencia de tiempo entre los caudales Q_1 y Q_2 (horas). |
| T_{wv} | Tiempo de llegada de la onda de avenida (horas). |
| TW | Tiempo de aviso (horas). |
| v | Velocidad (m/s). |
| w_{df} | Ancho máximo de la inundación en el núcleo de estudio, medido transversalmente al cauce. |
| y | Calado de inundación (m). |

Acrónimos

| | |
|-----------|---|
| ANCOLD | Australian National Committee on Large Dams |
| ARC | Atlanta Regional Commission (Estados Unidos de América) |
| COPUT | Conselleria d'Obres Públiques, Urbanisme i Transport (Comunitat Valenciana, España) |
| DEFRA | Department for Environment, Food and Rural Affairs (Reino Unido) |
| DHS | United States Department of Homeland Security |
| EE.UU. | Estados Unidos de América |
| FEAT | Flood Emergency Action Team |
| FEMA | Federal Emergency Agency (Estados Unidos de América) |
| FHRC | Flood Hazard Research Centre (Reino Unido) |
| HEC | Hydrologic Engineering Center (Estados Unidos de América) |
| ICE | Institution of Civil Engineers (Reino Unido) |
| IIAMA | Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (España) |
| INUNCAT | Plà de Protecció Civil per al risc d'inundacions a Catalunya (España) |
| MNS | Medidas no estructurales |
| MS | Medidas estructurales |
| RN | Régimen natural |
| PAE | Probabilidad Anual de Excedencia (también AEP, <i>Annual Exceedance Probability</i>) |
| PATRICOVA | Plan de Acción Territorial de carácter sectorial de prevención del Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana (España) |
| PEP | Plan de Emergencia de Presa |
| SIG | Sistemas de Información Geográfica |
| SuDS | Sustainable Drainage Systems |
| UK | United Kingdom |
| UN | United Nations |
| UPV | Universitat Politècnica de València |
| USACE | United States Army Corps of Engineers |
| USBR | United States Bureau of Reclamation |

Figuras

| | |
|--|-----|
| Figura 1. Componentes del riesgo. | 18 |
| Figura 2. Estanque de detención. Fuente: PMEnginyeria, 2011. | 25 |
| Figura 3. Hidrogramas para la situación con y sin medidas de retención. | 26 |
| Figura 4. Barrera Maeslant en el puerto de Rotterdam (Países Bajos). Fuente: DeltaWorks.org. | 27 |
| Figura 5. Antiguo cauce del río Turia en la ciudad de Valencia. Fuente: PMEnginyeria, 2010. | 29 |
| Figura 6. Barreras de protección en viviendas. | 37 |
| Figura 7. Sacos de arena en el río Missouri (South Sioux City, Junio 2011). Fuente: Associated Press. | 39 |
| Figura 8. Mapa de eventos de inundación en Europa en el periodo 1998-2009. Fuente: European Environment Agency (EEA). | 46 |
| Figura 9. Representación de zonas inundables a partir de modelos hidráulicos. Fuente: INUNCAT, 2009 [1]. | 47 |
| Figura 10. Riesgo de inundación por término municipal en Cataluña (Muy Alto, Alto, Medio, Moderado, Bajo). Fuente: INUNCAT, 2009 [1]. | 48 |
| Figura 11. Ejemplo de curva F-N. | 50 |
| Figura 12. Esquema riesgo de inundación existente – reducción del riesgo. | 51 |
| Figura 13. Equivalencia entre diagrama de influencia (izda.) y árbol de eventos (dcha.). | 56 |
| Figura 14. Efecto de medidas estructurales y no estructurales en una curva F-N. | 57 |
| Figura 15. Efecto de medidas estructurales y no estructurales en una curva F-D. | 57 |
| Figura 16. Efecto de medidas estructurales con respecto a la situación sin ningún tipo de medida. Riesgo social. Fuente: Proyecto SUFRI [53]. | 58 |
| Figura 17. Efecto de medidas no estructurales con respecto a la situación con medidas estructurales. Riesgo social. Fuente: Proyecto SUFRI [53]. | 58 |
| Figura 18. Fases del proceso de confección y uso de modelos de riesgo para el análisis del riesgo de inundación en zonas urbanas. Fuente: Proyecto SUFRI [53]. | 60 |
| Figura 19. Categorías de tiempo y usos del suelo. | 66 |
| Figura 20. Niveles de severidad en función del calado y la velocidad de la inundación por precipitación «in situ». Fuente: Proyecto SUFRI [53]. | 72 |
| Figura 21. Variables intervinientes en la obtención la pérdida potencial estimada de vidas por inundación por precipitación «in situ». Fuente: Proyecto SUFRI [53]. | 76 |
| Figura 22. Variables intervinientes en la obtención de la pérdida potencial de vidas. | 93 |
| Figura 23. Variables intervinientes en la obtención de datos de entrada para la estimación de consecuencias económicas potenciales. Fuente: Proyecto SUFRI [53]. | 96 |
| Figura 24. Reducción de daños según tiempo de aviso. Adaptado de Parker et al., 2005 [41]. | 103 |
| Figura 25. Esquema situación población de estudio - presa. | 105 |
| Figura 26. Vista aérea del núcleo urbano y situación de la zona industrial. | 106 |
| Figura 27. Modelo de riesgo 1. Inundación por precipitación «in situ». Caso base. | 108 |

| | |
|---|-----|
| Figura 28. Curvas F-N. Inundación por precipitación «in situ» | 119 |
| Figura 29. Curvas F-D. Inundación por precipitación «in situ» | 119 |
| Figura 30. Modelo de riesgo 2. Régimen natural..... | 122 |
| Figura 31. Modelo de riesgo 3. Caso Presa. | 128 |
| Figura 32. Curvas F-N. Inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces. | 139 |
| Figura 33. Curvas F-D. Inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces. | 140 |
| Figura 34. Modelo de riesgo 4. Esquema conjunto..... | 141 |
| Figura 35. Curvas F-N. Inundación por precipitación «in situ» y por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces. | 142 |
| Figura 36. Curvas F-D. Inundación por precipitación «in situ» y por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces. | 142 |
| Figura 37. Ejemplo de representación de límites de tolerabilidad | 144 |

Tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Nivel de detalle en función del ámbito de estudio..... | 62 |
| Tabla 2. Niveles de información para la caracterización de la inundación..... | 69 |
| Tabla 3. Densidad de población de cálculo..... | 70 |
| Tabla 4. Niveles de severidad para inundaciones por precipitación «in situ»..... | 72 |
| Tabla 5. Categorías de formación-aviso para el establecimiento de tasas de mortalidad..... | 73 |
| Tabla 6. Tasas de mortalidad para inundación por precipitación «in situ»..... | 74 |
| Tabla 7. Índices de corrección de tasas de mortalidad por vulnerabilidad poblacional..... | 74 |
| Tabla 8. Ejemplo del listado de incorporación de consecuencias al modelo por categoría de tiempo y evento de inundación. Pérdida potencial estimada de vidas..... | 75 |
| Tabla 9. Resumen de la información necesaria para el análisis de inundación por precipitación «in situ»..... | 79 |
| Tabla 10. Variables de relevancia para la caracterización de la inundación..... | 84 |
| Tabla 11. Ejemplo de distribución de datos para el cálculo de población en riesgo..... | 87 |
| Tabla 12. Clasificación para el establecimiento de tasas de mortalidad en inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces. Fuente: Proyecto SUFRI [53]. | 88 |
| Tabla 13. Tasas de mortalidad en inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces (categorías C1 a C5). Fuente: Proyecto SUFRI [53]. | 89 |
| Tabla 14. Tasas de mortalidad en inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces (categorías C6 a C10). Fuente: Proyecto SUFRI [53]. | 90 |
| Tabla 15. Ejemplo del listado de datos de entrada de pérdida potencial estimada de vidas..... | 92 |
| Tabla 16. Información necesaria para el análisis de inundación por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces..... | 99 |
| Tabla 17. Categorías de usos del suelo..... | 107 |
| Tabla 18. Categorías de tiempo..... | 107 |
| Tabla 19. Población en riesgo..... | 107 |
| Tabla 20. Áreas definidas en el núcleo urbano..... | 107 |
| Tabla 21. Valores de precipitación máxima diaria para cada periodo de retorno..... | 108 |
| Tabla 22. Nodos del modelo de riesgo 1. Inundación por precipitación «in situ». Caso base..... | 109 |
| Tabla 23. Variables del Método Racional..... | 110 |
| Tabla 24. Caudales de escorrentía para cada periodo de retorno y área..... | 110 |
| Tabla 25. Caudales de escorrentía para el cálculo del caso base..... | 110 |
| Tabla 26. Características de la inundación. Caso base..... | 111 |
| Tabla 27. Tasas de mortalidad. Inundación por precipitación «in situ». Caso base..... | 111 |
| Tabla 28. Severidad de la inundación. Caso base..... | 112 |
| Tabla 29. Población expuesta. Caso base..... | 112 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 30. Número de víctimas potenciales, N. Caso base. | 113 |
| Tabla 31. Porcentaje de daños. Caso base. | 113 |
| Tabla 32. Costes totales por precipitación «in situ». Caso base. | 114 |
| Tabla 33. Tasas de mortalidad. Inundación por precipitación «in situ». Caso PFR-WS. | 115 |
| Tabla 34. Número de víctimas potenciales. Caso PFR-WS. | 116 |
| Tabla 35. Costes totales. Caso PFR-WS. | 116 |
| Tabla 36. Caudales de escorrentía para el caso NDS. | 117 |
| Tabla 37. Severidad de la inundación. Caso NDS. | 117 |
| Tabla 38. Número de víctimas potenciales, N. Caso NDS. | 117 |
| Tabla 39. Porcentaje de daños. Caso NDS. | 118 |
| Tabla 40. Costes totales por precipitación «in situ». Caso NDS. | 118 |
| Tabla 41. Caudales máximos de los hidrogramas del régimen natural. | 121 |
| Tabla 42. Nodos del modelo de riesgo 2. | 122 |
| Tabla 43. Tasas de mortalidad de referencia para la categoría C1. Caso base. | 123 |
| Tabla 44. Población en riesgo. Caso base. | 123 |
| Tabla 45. Tiempos de aviso. Caso base. | 124 |
| Tabla 46. Número potencial de víctimas, N. Caso base. | 125 |
| Tabla 47. Pérdidas económicas potenciales. Caso base. | 126 |
| Tabla 48. Caudales pico de los hidrogramas de salida (laminación). Caso Presa. | 128 |
| Tabla 49. Caudales pico de los hidrogramas de salida (en rotura). Caso Presa. | 128 |
| Tabla 50. Nodos del modelo de riesgo 3. Caso Presa. | 129 |
| Tabla 51. Tasas de mortalidad de referencia para la categoría C3. Caso Presa. | 131 |
| Tabla 52. Población en riesgo. No rotura. Caso Presa. | 131 |
| Tabla 53. Población en riesgo. Rotura. Caso Presa. | 131 |
| Tabla 54. Tiempos de aviso. No rotura. Caso Presa. | 132 |
| Tabla 55. Tiempos de aviso. Rotura. Caso Presa. | 132 |
| Tabla 56. Número potencial de víctimas, N. No rotura. Caso Presa. | 133 |
| Tabla 57. Número potencial de víctimas, N. Rotura. Caso Presa. | 133 |
| Tabla 58. Pérdidas económicas potenciales. No rotura. Caso Presa. | 134 |
| Tabla 59. Pérdidas económicas potenciales. Rotura. Caso Presa. | 134 |
| Tabla 60. Tasas de mortalidad de referencia para la categoría C4. Caso PEP. | 135 |
| Tabla 61. Tiempos de aviso. No rotura. Caso PEP. | 135 |
| Tabla 62. Tiempos de aviso. Rotura. Caso PEP. | 135 |
| Tabla 63. Número potencial de víctimas, N. No rotura. Caso PEP. | 136 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 64. Número potencial de víctimas, N. Rotura. Caso PEP..... | 136 |
| Tabla 65. Tasas de mortalidad de referencia para la categoría C10. Caso PFR..... | 137 |
| Tabla 66. Número potencial de víctimas, N. No rotura. Caso PFR..... | 138 |
| Tabla 67. Número potencial de víctimas, N. Rotura. Caso PFR..... | 138 |
| Tabla 68. Resumen de resultados de las curvas F-N y F-D. Análisis conjunto..... | 141 |

Capítulo 1. Riesgo de inundación

1.1. Definición general y componentes

Previamente a la descripción de los procesos que conforman el análisis del riesgo de inundación, es necesario presentar la definición de los dos términos fundamentales intervinientes: *inundación* y *riesgo*.

La *Directiva 2007/60/EC* de la Comisión Europea [18]¹ define *inundación* como el “cubrimiento temporal por agua de una tierra que normalmente no se encuentra cubierta, incluyendo las inundaciones producidas por ríos, torrentes, corrientes de agua efímeras mediterráneas e inundaciones marítimas en zonas costeras”.

Las inundaciones son el desastre natural más destructivo en consecuencias económicas y número de víctimas. Desde el año 2000 al 2006, los desastres relacionados con la acción del agua produjeron más de 290,000 víctimas, afectaron a más de 1,500 millones de personas y costaron más de 422,000 millones de dólares [48]. En general, estas consecuencias son especialmente importantes en áreas urbanas, donde habita la mayor parte de la población y en las que pueden darse mayores consecuencias económicas.

En términos generales, se define *riesgo* como la combinación de una probabilidad de presentación de un determinado evento (también denominado *amenaza*), y las potenciales consecuencias adversas que tendría este evento para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural o las actividades económicas [18] (estas consecuencias también suelen denominarse *vulnerabilidad*).

Por un lado, la *amenaza* representa un evento físico, fenómeno o actividad humana potencialmente dañina, ya que puede causar pérdida de vidas, heridos, daños a la propiedad, trastornos sociales y económicos, o degradación medioambiental. La amenaza se asocia generalmente al riesgo individual, que puede entenderse como la probabilidad de que la persona más expuesta fallezca por causa de dicha amenaza [25]. El análisis de la amenaza incluye la identificación, caracterización y análisis de la misma, para determinar su origen, probabilidad de ocurrencia y características.

Por otro lado, la *vulnerabilidad* puede definirse como las condiciones, determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos y medioambientales, que caracterizan la susceptibilidad de una comunidad al impacto de una amenaza. Por ello, el análisis de vulnerabilidad se centra en la descripción de las potenciales consecuencias producidas por la amenaza considerada.

¹ [] indica la referencia bibliográfica, incluida en el apartado REFERENCIAS.

No obstante, el concepto de vulnerabilidad puede incorporar no sólo las consecuencias potenciales sino también parte de la respuesta del sistema frente a la materialización de la amenaza (por ejemplo, el colapso estructural de una obra de defensa frente a una avenida).

Por lo tanto, el riesgo puede definirse por la combinación de dos componentes, *amenaza* y *vulnerabilidad*, pero también en términos de *probabilidad* y *consecuencias* (Figura 1), donde los términos de las expresiones $Riesgo = Amenaza \times Vulnerabilidad$ y $Riesgo = Probabilidad \times Consecuencias$ no presentan una relación biunívoca.



Figura 1. Componentes del riesgo.

En general, en el análisis del riesgo de inundación, la probabilidad de la amenaza presenta unidades de *tiempo*⁻¹. Esto se debe a la consideración de eventos extremos de precipitación o avenida asociados a un determinado periodo de retorno (siendo $f=1/T$ donde f es la frecuencia y T es el periodo de retorno) y al hecho de que las probabilidades asociadas a la respuesta del sistema presentan carácter adimensional (pues representan valores de probabilidad condicional de ocurrencia de uno o varios eventos).

Cuando las consecuencias están expresadas en número de víctimas, el riesgo resultante se denomina *riesgo social*, definido como la relación entre la frecuencia y la pérdida potencial de vidas humanas en una población por la presentación de unas amenazas específicas. En caso de expresar las consecuencias en unidades monetarias, el riesgo resultante se denomina *riesgo económico*.

La transposición al ordenamiento jurídico español de la *Directiva 2007/60/CE* se tradujo en el año 2010 en la aprobación del *Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación*, en el que se define *riesgo de inundación* como “la combinación de la probabilidad de que se produzca una inundación y de sus posibles consecuencias negativas para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural, la actividad económica y las infraestructuras” [54].

Por tanto, el análisis del *riesgo de inundación* consiste en determinar la naturaleza y magnitud del riesgo existente mediante el análisis de las amenazas potenciales de inundación y de las condiciones de vulnerabilidad que pueden derivarse, causando daños personales, a la propiedad y al medio ambiente.

Analizar el riesgo de inundación existente para la vida humana y la propiedad es un paso necesario para plantear medidas de reducción del mismo.

1.2. Tipologías de inundación

Las inundaciones, especialmente en áreas urbanas, son causadas por una compleja interacción de diferentes fuentes, que, en general, producen la pérdida de misión de las medidas de protección existentes, produciendo un determinado nivel de consecuencias.

Tal y como establece el *Plan Estatal de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones* [55], deben considerarse todas aquellas inundaciones que representen un riesgo para la población y sus bienes, produzcan daños en infraestructuras básicas o interrumpen servicios esenciales para la comunidad. A su vez, la *Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones* [56] clasifica las inundaciones en tres categorías:

a) Inundaciones por precipitación «in situ»

Inundaciones resultantes de eventos de precipitación de alta intensidad en el área urbana. Este tipo de inundación puede ser más peligrosa en aquellas situaciones en las que el sistema de drenaje de la ciudad sea ineficaz o esté mal dimensionado.

b) Inundaciones por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces, provocada o potenciada por: precipitaciones, deshielo o fusión de nieve, obstrucción de cauces naturales o artificiales, invasión de cauces, aterramientos o dificultad de avenamiento y acción de las mareas

Inundaciones resultantes del desbordamiento de ríos y cauces (inundaciones de origen fluvial) que suelen estar asociadas a fenómenos de precipitación en cuencas situadas aguas arriba, independientemente de la precipitación ocurrida en el área urbana. Además, otros procesos naturales como el deshielo pueden derivar en importantes inundaciones fluviales.

c) Inundaciones por rotura o la operación incorrecta de obras de infraestructura hidráulica

El fallo de una infraestructura hidráulica puede ocasionar importantes inundaciones y puede incrementar las consecuencias por inundación producidas por otras fuentes. Por ejemplo, el fallo de una presa produciría un elevado aumento del caudal de descarga en el río, ocasionando elevadas consecuencias aguas abajo. Por ello, las obras de defensa frente a inundaciones presentan normalmente un doble papel: por un lado, aumentan la protección frente a inundaciones, disminuyendo la probabilidad de ocurrencia de la inundación; sin embargo, incrementan

las consecuencias potenciales debidas a un fallo de la infraestructura, aunque asociadas a una probabilidad de ocurrencia muy baja.

Además de las tres categorías anteriores, puede incluirse una cuarta tipología de inundación: la **inundación marítima**. El mar puede inundar zonas urbanas situadas en la costa como resultado de la acción del oleaje, huracanes, ciclones o tifones. En el caso de zonas urbanas situadas bajo el nivel del mar, si las infraestructuras de protección no son capaces de contener la acción del oleaje, las consecuencias de una posible inundación marítima podrían ser de gran importancia. Cabe destacar el hecho de que el mar ejerce, a su vez, de condición de contorno concomitante a la inundación fluvial, no permitiendo desaguar al mar y elevando el nivel del río.

Además de las tipologías de inundación citadas anteriormente, existen fenómenos como el **cambio climático** que pueden aumentar el riesgo de inundación.

También existen otras amenazas importantes como son el terrorismo, el sabotaje o el vandalismo que pueden llevar a la pérdida de misión o destrucción de obras de defensa contra inundaciones tales como diques y presas [24].

Capítulo 2. Medidas de reducción del riesgo de inundación

A continuación se describe brevemente el papel de las medidas de reducción del riesgo de inundación, así como las principales medidas estructurales y no estructurales existentes, incluyendo su influencia en términos de riesgo.

2.1. El papel de las medidas de reducción del riesgo de inundación

Existen numerosas medidas de reducción del riesgo de inundación. En general, pueden dividirse en dos grupos: *medidas estructurales* y *medidas no estructurales*.

El *Real Decreto 903/2010* [54] define *medida estructural* como “toda medida consistente en la realización de obras de infraestructura que actúan sobre los mecanismos de generación, acción y propagación de las avenidas alterando sus características hidrológicas o hidráulicas, así como del oleaje, de las mareas o de la erosión en las zonas costeras”.

Por lo tanto, las medidas *estructurales* engloban todas aquellas construcciones que reducen o evitan el posible impacto de la inundación, incluyendo un amplio rango de obras de ingeniería civil, como, por ejemplo, la construcción de infraestructuras de protección y resistencia a la acción del agua, tales como diques o presas.

Por otra parte, el *Real Decreto 903/2010* [54] define *medida no estructural* como “aquella que sin actuar sobre la avenida en sí, o sobre la acción del mar, modifica la susceptibilidad de la zona inundable frente a los daños por inundación”.

Por ello, las medidas *no estructurales* incluyen políticas de actuación y coordinación, gestión de emergencias, desarrollo del conocimiento, reglas de operación, así como mecanismos de participación pública, concienciación e información a la población, de modo que pueden reducirse los impactos derivados de la inundación y, por tanto, el riesgo existente [48].

Tanto las medidas estructurales como no estructurales son de especial relevancia en la reducción del riesgo. Sin embargo, la aplicación de medidas estructurales puede evitar las consecuencias de inundación sólo hasta un determinado evento, denominado evento de diseño. Dado que puede producirse un evento superior al de diseño (asociado a un determinado valor de probabilidad), existe siempre un nivel de riesgo residual. Por otra parte, aunque las medidas no estructurales permiten la reducción de dicho riesgo residual, éste no puede ser, en general, completamente eliminado. Por tanto, el *riesgo residual* se compone de las consecuencias que no pueden ser evitadas mediante medidas estructurales y/o no estructurales.

Por ello, aspectos como *funcionalidad* y *fiabilidad* desempeñan un papel importante en el análisis tanto de medidas estructurales como no estructurales.

Atendiendo a su *funcionalidad*, las medidas estructurales se diseñan para eventos asociados a una cierta probabilidad anual de excedencia. En caso de producirse un evento superior al de diseño, la estructura no es capaz de proporcionar la protección necesaria frente a la inundación, perdiendo su funcionalidad.

En lo referente a *fiabilidad*, las infraestructuras de protección o retención, como presas y diques, evitan consecuencias hasta el punto en el que éstas resultan fiables. Su rotura o fallo puede incrementar las consecuencias de la inundación, aunque, generalmente, vinculadas a una probabilidad de ocurrencia muy reducida.

Las medidas no estructurales están enfocadas a la reducción del riesgo de inundación mediante la disminución de la vulnerabilidad. En general, las medidas no estructurales comprenden acciones que pueden desarrollarse antes, durante o después de la inundación. A tal efecto, pueden emplearse, entre otras, medidas como un apropiado planeamiento urbanístico, sistemas de predicción meteorológica, modelos de precaracterización de avenidas, sistemas de aviso y procedimientos de evacuación.

Por tanto, deben analizarse la eficacia y eficiencia de dichas medidas para conocer si su funcionamiento y aplicación son correctos para alcanzar la máxima reducción posible, dado que su fallo o ineficacia puede ocasionar importantes consecuencias.

2.2. Medidas estructurales

Las medidas estructurales para la reducción del riesgo de inundación comprenden todas aquellas medidas o infraestructuras diseñadas con el fin de proteger áreas frente a inundaciones.

Cabe considerar que las medidas estructurales deben diseñarse teniendo en cuenta la dinámica natural de los cauces y desde el entendimiento de su naturaleza cambiante. Consecuentemente, las estructuras deben diseñarse de manera compatible con el régimen natural de los cauces fluviales [14].

En este capítulo se describen las principales características de las medidas estructurales de reducción del riesgo de inundación, prestando especial atención a las ventajas, limitaciones y potenciales consecuencias de su fallo.

En general, pueden dividirse en tres grupos:

- *Estructuras de retención*: Su misión consiste en retener el agua para evitar inundaciones asociadas a avenidas que pueden producir importantes daños. Las estructuras más comunes son las pequeñas y grandes presas situadas aguas arriba de zonas urbanas, cuya misión principal es la protección frente a avenidas de origen fluvial.

Para seguir leyendo haga click aquí