



Riesgo de inundación en España: análisis y soluciones para la generación de territorios resilientes



Excmo. Ayuntamiento de Orihuela



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Riesgo de inundación en España:
análisis y soluciones para la generación
de territorios resilientes

Editores:

M^a Inmaculada López Ortiz
Joaquín Melgarejo Moreno

© los autores, 2020
© de esta edición: Universitat d'Alacant

ISBN: 978-84-1302-091-4

Reservados todos los derechos. No se permite reproducir, almacenar en sistemas de recuperación de la información, ni transmitir alguna parte de esta publicación, cualquiera que sea el medio empleado -electrónico, mecánico, fotocopia, grabación, etcétera-, sin el permiso previo de los titulares de la propiedad intelectual.

ESTIMACIÓN ECONÓMICA DE DAÑOS POTENCIALES SOBRE INFRAESTRUCTURAS DE TRANSPORTE POR INUNDACIONES EN EL TRAMO TORO-ZAMORA

Lei Dai

China Harbour Engineering Company Ltd (Sucursal Bolivia), La Paz, Bolivia

dailei@chec.bj.cn

Manuel Romana García

ETSI de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, España

manuel.romana@upm.es

<https://orcid.org/0000-0003-1025-7419>

Andrés Díez Herrero

Área de Riesgos Geológicos, Instituto Geológico y Minero de España, España

andres.diez@igme.es

<https://orcid.org/0000-0003-1106-191X>

RESUMEN

Se ha realizado una estimación económica general de los daños potenciales de las inundaciones, para diferentes periodos de retorno, sobre las infraestructuras de transporte existentes en la zona inundable del tramo del río Duero entre las localidades de Toro y Zamora. Para el análisis de la peligrosidad se han empleado las cartografías de calados y velocidades esperables para diferentes periodos de retorno, procedentes del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. Para el análisis de la exposición se han empleado los mapas de infraestructuras de transporte, la clasificación de su tipología (ferrocarril convencional, ferrocarril de alta velocidad, autovía; carreteras nacional, autonómica, provincial, comarcal o vecinal; caminos, etc.) y costes unitarios. Para el análisis de la vulnerabilidad se han usado funciones de relación magnitud-daño estandarizadas a nivel internacional y otras relaciones para los costes indirectos. A partir del cruce de los tres factores del riesgo, empleando sistemas de información geográfica, se han obtenido pérdidas económicas directas potenciales en costes de reposición y reparación de 2,6 M€, 8,7 M€ y 16,5 M€ para los periodos de retorno de 10, 100 y 500 años, respectivamente; así como cartografías detalladas de los tramos con mayores pérdidas potenciales para priorizar las actuaciones de mitigación del riesgo.

1. INTRODUCCIÓN

La estimación económica de los daños potenciales debidos a inundaciones de diseño para diferentes periodos de retorno o probabilidad de ocurrencia, es un estudio básico en cualquier análisis económico de las inundaciones en un territorio. Supone un paso previo para los análisis coste-beneficio de las medidas de mitigación y la priorización de las políticas de gestión del riesgo.

Existen muy diferentes estrategias de estimación económica de daños potenciales, según se pretenda analizar los daños totales, sólo los daños directos o indirectos; incluir los costes financieros o no; y en función de la escala de trabajo y disponibilidad de información, desde ámbito global (p.e., Arnell and Gosling, 2014), continental, nacional o regional (p.e., Paprotny *et al.*, 2020), a estudios locales (p.e., Garrote *et al.*, 2016) o incluso de un único edificio (p.e., De Mora y Díez-Herrero, 2008).

Las diversas metodologías de estimación económica de daños por inundaciones (ver recopilación en Merz *et al.*, 2010), pueden agruparse en dos aproximaciones: i) análisis de la peligrosidad, exposición y vulnerabilidad, para posteriormente integrar los tres factores del riesgo (Garrote *et al.*, 2016); ii) aproximaciones estadísticas empleando, por ejemplo, redes bayesianas a partir de encuestas y cuestionarios de daños post-desastre (Paprotny *et al.*, 2020).

2. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra en la provincia de Zamora (comunidad autónoma de Castilla y León), ubicada en el centro-noroeste de la península Ibérica. Concretamente en el tramo de río Duero comprendido entre las ciudades de Toro y Zamora (capital de la provincia homónima), con una longitud aproximada de 37 km, medidos sobre el cauce del río Duero (Fig. 1).

En este tramo de estudio, la zona inundable delimitada por el territorio anegable por la avenida de 500 años de periodo de retorno, según el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI; MITECO, Gobierno de España) comprende no sólo el cauce y las márgenes del río Duero, sino buena parte de la llanura de inundación y las vegas bajas (terrazas inferiores). En estas zonas existen múltiples infraestructuras de transporte en las áreas inundables para los diferentes periodos de retorno, tanto de la red vial de transporte terrestre rodado (autovías, carreteras nacionales, autonómicas, provinciales, comarcales y vecinales, caminos...), ferrocarril (tren de ancho de vía convencional, tren de alta velocidad) e incluso infraestructuras de transporte aéreo (helipuerto).

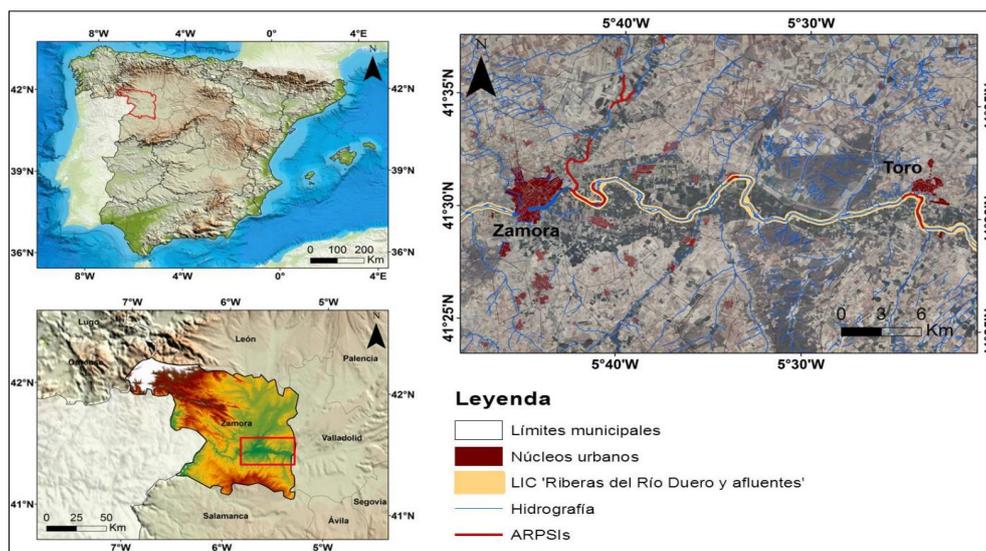


Figura 1. Situación geográfica de la zona de estudio. Fuente: proyecto DRAINAGE.

Dentro de este tramo del río Duero en la zona de estudio se encuentra el área con riesgo potencial significativo de inundación (ARPSI) denominada “Bajo Duero”, cuya extensión comprende cuatro subtramos: Toro, Fresno de la Ribera, confluencia con el Valderaduey y Zamora; que aún no cuentan con planes de gestión de riesgos de inundación (PGRI) elaborados (Confederación Hidrográfica del Duero, 2016).

3. METODOLOGÍA

La estimación de daños potenciales sobre las infraestructuras por inundación en el tramo Toro-Zamora se realizará por la clásica metodología de análisis de los componentes del riesgo (peligrosidad, exposición y vulnerabilidad) y su posterior integración (Fig. 2).

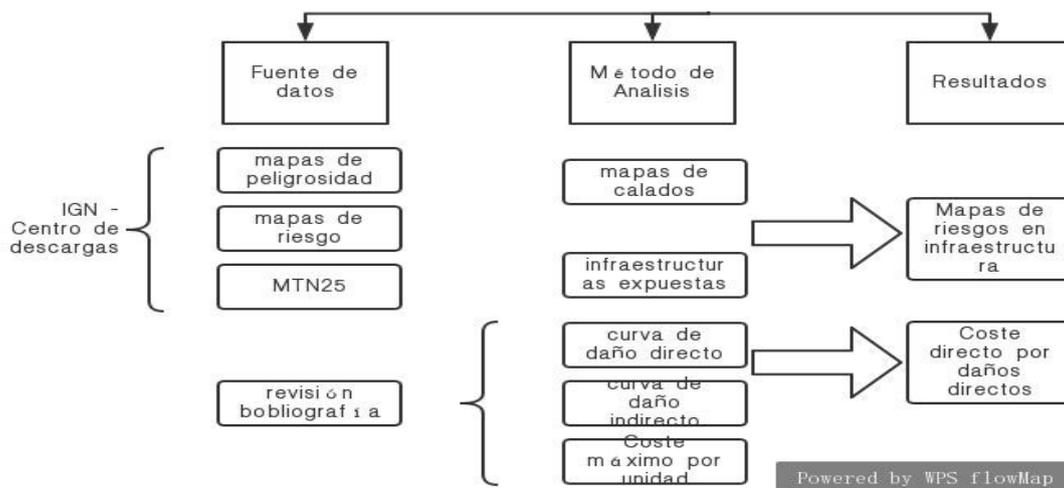


Figura 2. Esquema de metodológico general del estudio, desde las fuentes de datos a los resultados, pasando por los métodos de análisis.

Las fuentes de datos para el análisis de la peligrosidad fueron los mapas de zonas inundables y las coberturas de calados y velocidades para diferentes periodos de retorno (10, 100 y 500 años) del SNCZI; que están disponibles en el Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional (IGN). La exposición se analizó a partir de las coberturas oficiales de las infraestructuras de transporte disponibles igualmente en el Centro de Descargas del IGN (Mapas vectoriales y Bases cartográficas y topográficas); posteriormente categorizadas según la tipología de infraestructura de transporte (autovía, carretera nacional, ferrocarril convencional, ferrocarril AVE...) y sus características (anchura, disposición del firme sobre rasante, en trinchera, en talud único, etc.); y se recopiló información sobre los costes unitarios (lineales) de construcción, reparación o reposición, según las tipologías y disposiciones. Para analizar la vulnerabilidad se consultó diversa bibliografía técnica sobre funciones magnitud-daño (calado - % daño; calado+velocidad - % daño) para infraestructuras de transporte, casi toda ella del ámbito internacional; entre las que se seleccionó la función que mejor se ajustaba a las particularidades de la zona de estudio y la disponibilidad de información.

Toda la información cartográfica se almacenó, manipuló y analizó mediante un sistema de información geográfica utilizando el *software ArcGIS* (ESRI Geosystems), y sus herramientas y funcionalidades de análisis espacial.

3.1. Metodologías de análisis de la exposición: superficie de las carreteras

Una sección tipo de una carretera se puede dividir en tres partes: carriles, arcenes e intermedias. En los mapas de la zona de estudio extraídos del Centro de Descargas del IGN se categorizan las carreteras por el número de carriles de cada tramo. Pero en los mapas solo existen carreteras con solo un carril y carreteras con dos carriles. A partir de la consulta de las características geométricas del Manual de criterios del Ministerio de Fomento (2009) se ha determinado el empleo de estos valores para las anchuras con las que calcular la superficie expuesta a la inundación:

- Anchura de carreteras con un carril: arcén 1,00 m + carriles de 3,50 m + arcén 1,00 m = 5,5 m
- Anchura de carreteras con dos carriles: arcén 1,00 m + carril 3,50 m + zona intermedia 1,00 m + carril 3,50 m + arcén 1,00 m = 10,00 m

3.2. Metodologías de estimación del coste del daño en las carreteras y ferrocarriles

Según la revisión de la literatura técnica especializada (Huizinga *et al.*, 2017), los valores máximos de daños para las infraestructuras se han registrado según diferentes continentes. El número de valores de daño máximo disponibles es bastante bajo (aproximadamente 10 valores registrados individuales en todos los continentes) y varía considerablemente debido a los diferentes métodos para determinar el daño máximo.

El valor promedio para Europa es de 24 euros/m² (nivel de precios correspondiente al año 2007) a partir de los datos de cinco países con una larga trayectoria establecida en la evaluación de daños: Reino Unido, Alemania, Países Bajos, Bélgica y Francia. El costo máximo de daños en los ferrocarriles es de 1179 euros/m (Huizinga *et al.*, 2017). El procedimiento aplicado para actualizar el valor máximo de daño para las carreteras en Europa ha sido:

1. Convertir el valor máximo de daño al nivel de precios de 2010, aplicando el aumento promedio del IPC de los cinco países (Banco Mundial, 2014).
2. Calcular el PIB / cápita (2010) en UDS2015, calculando el PIB promedio / cápita 2010 para los cinco países diferentes - sitio web del Banco Mundial (2015).

3.3. Metodologías de estimación de la vulnerabilidad: funciones magnitud-daño

Existe una amplia variedad de modelos de daños causados por inundaciones en uso en el ámbito internacional, que difieren sustancialmente en sus enfoques y estimaciones económicas. En casi todos los modelos más utilizados, la profundidad de la inundación se trata como el factor determinante del daño esperado, a veces complementado por otros parámetros como la velocidad, la duración de la inundación, la contaminación del agua, la precaución y el tiempo de aviso (Messner *et al.*, 2007; Merz *et al.*, 2010; Green *et al.*, 2011).

Las funciones de daño según la profundidad representan relaciones entre la profundidad de la inundación y el daño resultante. Para una profundidad de inundación dada, la función otorga pérdidas esperadas a una propiedad específica o tipo de uso del suelo, ya sea como un porcentaje de un valor de activo predefinido (función relativa) o directamente en términos financieros (función absoluta).

Algunos modelos de parámetros múltiples desarrollados recientemente son conceptuales o desarrollados (y validados) para áreas específicas, por ejemplo, para Japón o para Alemania. Entre estas funciones se ha empleado el modelo de parámetros múltiples de *German FLEMO* (Kreibich *et al.*, 2010), que se ha seleccionado entre el resto porque es el modelo más reconocido y prestigioso internacionalmente. Además, está basado en la situación infraestructural y la realidad socioeconómica de Alemania, que es la más parecida a España.

3.4. Metodología de análisis de la vulnerabilidad por daños directos

Para analizar los daños directos se han usado las curvas del *JRC Technical Report* (Jan Huizinga *et al.*, 2017; Fig. 3). El objetivo principal del Centro de Investigación Conjunta de la Dirección General (DG JRC; *Joint Research Center*) es proporcionar apoyo científico al proceso de políticas europeas. En particular, las áreas de políticas de clima y energía están parcialmente cubiertas por la Dirección C de Energía, Transporte y Clima. Con respecto a la política climática, el CCI ha coordinado los proyectos PESETA (Proyección de los impactos económicos del cambio climático en sectores de la Unión Europea basados en análisis de abajo hacia arriba) con el objetivo de realizar una evaluación multisectorial coherente de los impactos del cambio climático en Europa a lo largo del siglo XXI.

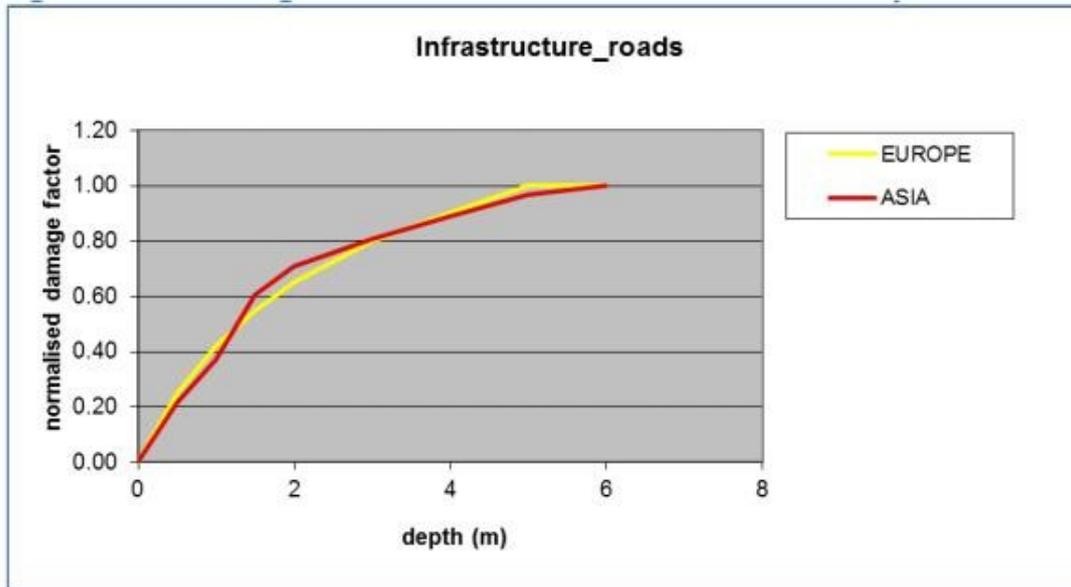


Figura 3. Funciones de calados-daños directos para infraestructuras en Europa y Asia. Fuente: *JRC Technical Report* (Jan Huizinga *et al.*, 2017).

3.5. Metodología de análisis de la vulnerabilidad por daños indirectos

Para estimar el daño indirecto y jerarquizar las redes de transporte, se ha usado la curva de *Rhine Atlas* (DM1). El método del Atlas del Rin (Buiteveld, 2016) originalmente utiliza el conjunto de datos de cobertura terrestre de CORINE y distingue seis categorías de daños. Para tres tipos de uso del suelo (residencial, industrial e infraestructura) se distingue una categoría de daños inmóviles (bienes raíces) y móviles (por ejemplo, artículos para el hogar). Las curvas de daño según la profundidad (Fig. 4) y las cifras para el valor total de los elementos en riesgo se han obtenido utilizando datos de la base de datos alemana HOWAS y de expertos de diferentes sectores y países. Los valores de los elementos en riesgo se basan en valores de mercado (a diferencia de los valores de reemplazo). Los daños a los vehículos, los daños indirectos y los costos de los servicios de emergencia no se consideran en este método.

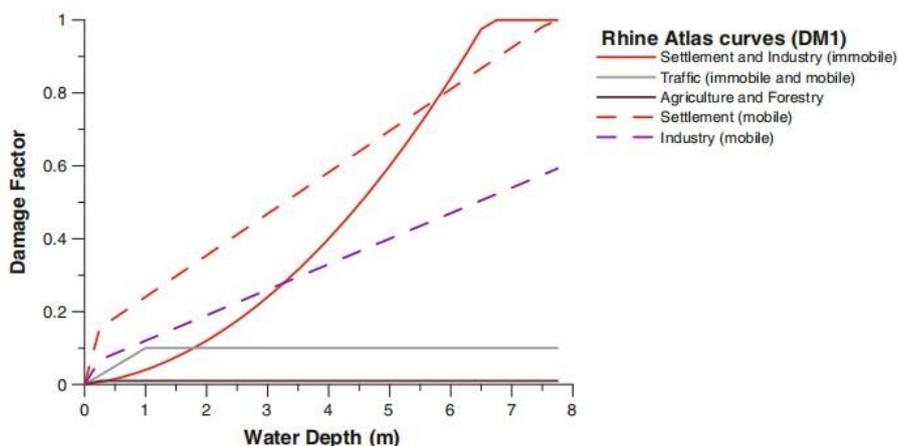


Figura 4. Curvas *Rhine Atlas* para la vulnerabilidad de diferentes elementos, entre ellos el tráfico (móvil e inmóvil).

En la curva referida a '*Traffic (immobile and mobile)*' (Fig. 4) puede observarse que el daño al transporte llega a un máximo a la profundidad de 1 metro. Es decir, en zona con profundidad más de 1 metro, hay cortes en las redes de transporte. Con esa función se ha realizado un mapa del corte de transporte y se han jerarquizado las rutas en la zona de estudio.

4. RESULTADOS

Como resultados de la integración con el SIG de las cartografías y bases de datos georreferenciadas de los tres factores (peligrosidad, exposición y vulnerabilidad), utilizando los valores y funciones de la metodología, se han obtenido diversas cartografías de daños estimados para las diferentes infraestructuras de transporte, según tres periodos de retorno (10, 100 y 500 años); y, además, tablas de valores de daños económicos potenciales integrando los valores unitarios.

4.1. Estimación de daños potenciales en carreteras

En caso de una inundación de periodo de retorno de 10 años, los daños provocados al sistema de carreteras de la zona investigada serían leves y las carreteras afectadas se encontrarían principalmente en el sector cercano a la ciudad Zamora. La mayoría de las carreteras sufrirían una magnitud de daño entre 0,4-0,5 sobre 1,0; y el coste total sería 1,6 millones de euros.

En caso de una inundación de periodo de retorno de 100 años, la situación es más grave que la anterior, como es lógico. En los sectores este y sur del río en la ciudad Zamora habría varios tramos largos de las carreteras afectados, con magnitud de daños entre 0,75 y 0,85. En el sector del valle cerca de la ciudad de Toro también existirían carreteras afectadas, pero con un daño más leve, entre 0,5-0,6. El coste total sería de unos 6,0 millones de euros.

En caso de una inundación de periodo de retorno de 500 años, la situación de las carreteras sería mucho más grave. Cerca de la ciudad Zamora, las carreteras estarían totalmente destruidas, y no existiría salida por el sur, este y oeste de la ciudad por estar la zona totalmente inundada (Fig. 5). En el sector cercano a Toro la situación sería algo mejor con solo una pequeña parte de las carreteras destruidas, aunque la mayoría estaría afectada por la inundación.



Figura 5. Mapa de Magnitud de Daño (tanto por uno) de las carreteras en el entorno de la ciudad de Zamora para la inundación de 500 años de periodo de retorno (T500).

4.2. Estimación de daños potenciales en ferrocarriles

En el caso del periodo de retorno de 10 años existirían 2.149,6 m de ferrocarriles afectados, con un coste total de 959.035,60 €. En general los ferrocarriles estarían poco afectados, y con daños leves (0,3 sobre 1,0), con la excepción de un tramo en el valle cerca de la ciudad de Toro, más afectado y con daños importantes.

En el caso del periodo de retorno de 100 años existirían 6.014,6 m de ferrocarriles afectados, con un coste total de 2.708.663 €. Los daños son más importantes, a parte de la zona valle, en el noreste de Zamora, donde también hay tramos afectados, pero sin daños graves.

Con el periodo de retorno 500 años existirían 14.505,9 m de ferrocarriles afectados, con un coste total de 6.475.997,19 €. Casi la mitad de las líneas del ferrocarril en esta zona estarían afectadas y los daños serían graves en la zona valle y en el noreste de la ciudad Zamora (Fig. 6).

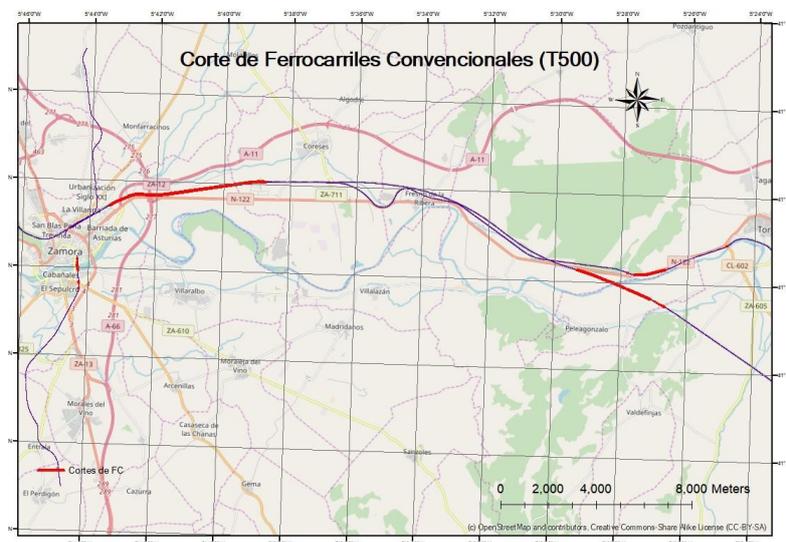


Figura 6. Mapa de cortes de ferrocarriles convencionales en el sector próximo a la ciudad de Zamora para la inundación de 500 años de periodo de retorno (T500).

4.3. Estimación total de los daños potenciales sobre infraestructuras de transporte

A modo de sumatorio de todas las estimaciones de daños para ambos tipos principales de infraestructuras de transporte y para los distintos periodos de retorno, las pérdidas económicas potenciales estimadas son las que se reflejan en la Tabla 1.

Periodo Retorno (años)	Carreteras (M €)	Ferrocarriles (M €)	Total (M €)
T10	1,6	1,0	2,6
T100	6,0	2,7	8,7
T500	10,0	6,5	16,5

Tabla 1. Valores de daños potenciales estimados (redondeados en M€) para las infraestructuras de transporte del tramo Toro-Zamora y diferentes periodos de retorno considerados.

5. DISCUSIÓN

La realización de este estudio ha tenido una serie de dificultades y limitaciones por las fuentes de datos y métodos utilizados, que podrían resumirse en:

- Los mapas de calados elaborados por la DGA (SNCZI) y descargados de la web del IGN están divididos en varias coberturas, que para el caso del tramo Toro-Zamora fueron realizadas por tres diferentes empresas consultoras con distintos criterios y categorizados en diferente número de clases (10 ó 11), lo que ha hecho preciso labores de homogenización para solventarlo en las uniones y ajustes de valores de los intervalos, con los consiguientes errores e incertidumbres.
- Los efectos de la profundidad de agua pueden variar en diferentes tipos de carreteras, pero las funciones daño-profundidad que se aplican en este estudio son para las carreteras en general, por falta de información más específica.
- Los módulos de daño y coste que se aplican en esta investigación son valores del nivel promedio de Europa. Faltan por desarrollarse módulos locales, útiles para cada país o región, y que mejorarían notablemente las estimaciones.
- Se planeó originalmente realizar la jerarquización de las rutas alternativas en caso de inundaciones. Pero se necesitaba crear una nueva capa de rutas con las propiedades (velocidad máxima de cada ruta, etc.) que no están disponibles en los mapas del IGN, ya que existen muchos tramos de rutas sin registro ni etiquetas.

Por lo anteriormente expuesto, no se ha podido abarcar y analizar los costes indirectos específicos derivados de la rotura de las infraestructuras de transporte y la interrupción de los flujos comerciales y servicios (como el lucro cesante); ni tampoco los derivados de la adopción de itinerarios alternativos durante la inundación, más largos y costosos. Tampoco se han tenido en consideración los costes financieros derivados del diseño y ejecución de las obras de reparación o reposición de las infraestructuras dañadas. Estas estimaciones mejorarían y completarían el análisis económico, haciéndolo más realista, pero excedían el alcance de este estudio por falta de información económica de base sobre las infraestructuras de transporte y la situación financiera de las instituciones y entidades encargadas de su gestión y mantenimiento.

6. CONCLUSIONES

Según el análisis de estimación de daños por inundaciones en infraestructuras de transporte del tramo del valle del Duero entre Toro y Zamora, en la zona alrededor de la ciudad Zamora, en la primera curva de meandro del río Duero aguas arriba se encuentran las carreteras más afectadas por las inundaciones. Especialmente los tramos de la 'A-66', 'N-122' y 'ZA-12'. Y también en la zona de Toro existen varias carreteras afectadas, que son la 'ZA-P-2102', 'ZA-166' y 'ZA-633'.

En caso de una inundación con periodo de retorno de 10 años, el coste total sobre la infraestructura sería 2,6 millones de euros; dentro de ellos, 1,6 millones € serían por el daño en las carreteras y el resto en los ferrocarriles. En caso de una inundación con periodo de 100 años el coste total de la infraestructura sería 8,7 millones de euros; dentro de ellos, 6,0 millones € serían por el daño en las carreteras y el resto en los ferrocarriles. En caso de una inundación con el periodo de 500 años el coste total sobre las infraestructuras sería 16,5 millones de euros; dentro de ellos, 10,0 millones € son por el daño en las carreteras y el resto en los ferrocarriles.

Este tipo de análisis deberían tenerse en cuenta en los planes de protección civil de ámbito local de los municipios afectados, en los planes de gestión del riesgo de inundación para las ARPSI implicadas y en los estudios coste-beneficio de las medidas de mitigación del riesgo que de ellos deriven.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer su colaboración a la Dirección General del Agua (Francisco Javier Sánchez, Mónica Aparicio y Juan Francisco Arrazola) por la cesión de las cartografías de peligrosidad de inundaciones (calados y velocidades) del SNCZI y por las recomendaciones para la fusión de las coberturas en diferentes tramos colindantes.

La presente comunicación es un resumen revisado del trabajo fin de máster del primer autor, codirigido por los otros autores, titulado “Vulnerabilidad de las infraestructuras de transporte frente al peligro de inundaciones. Aplicación a las márgenes del río Duero entre Zamora y Toro”, presentado en el Máster Universitario en Gestión de Desastres (UPM-UCM), durante el curso académico 2017-2018, y defendido en julio de 2019. Por ello también se agradece la labor de intermediación al Dr. Ing. Francisco Javier Elorza (ETSIME, UPM), como profesor del citado máster.

Este estudio forma parte de la tarea de evaluación socio-económica de los daños por inundaciones (GT1.T4), del proyecto de investigación del Plan Nacional de I+D+i DRAINAGE (CGL2017-83546-C3-R MINEICO/AEI/FEDER, UE).

REFERENCIAS

- Arnell, N. W. and Gosling, S. N. (2014). The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climatic Change*. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1084-5>
- Buiteveld, H. (2016). *Tool and Assessment Method for Determining Flood Risk Evolution or Reduction* - Technical Report, Report No. 237, ICBR-expertgroep HIRI, Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn (ICBR), Koblenz.
- Confederación Hidrográfica del Duero (2016). *Plan de Gestión de Riesgos de Inundación (2016). Anejo 1. Caracterización de las ARPSIs*. Valladolid.
- De Mora Jiménez, E. y Díez Herrero, A. (2008). Análisis del riesgo de inundación en localizaciones puntuales: el edificio Sabatini (Toledo). En: I. Galindo Jiménez, L. Laín Huerta y M. Llorente Isidro (Eds.), *El estudio y la gestión de los riesgos geológicos*, 9-52. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie: Medio Ambiente. Riesgos Geológicos, nº 12, Capítulo 3. IGME y Consorcio de Compensación de Seguros (MEH), Madrid.
- Garrote, J., Alvarenga, F. M. y Díez-Herrero, A. (2016). Quantification of flash flood economic risk using ultra-detailed stage–damage functions and 2-D hydraulic models. *Journal of Hydrology*, 541, 611–625.
- Green, C., Viavattene, C. and Thompson, P. (2011). *Guidance for assessing flood losses* - CONHAZ Report. No. D6.1. Middlesex University.
- Huizinga, J., De Moel, H. and Szewczyk, W. (2017). *Global flood depth-damage functions. Methodology and the database with guidelines*. JRC Technical Reports, EUR 28552 EN, Joint Research Center, European Union.
- Kreibich, H., Seifert, I., Merz, B. and Thielen, A. H. (2010) Development of FLEMOcs - A new model for the estimation of flood losses in the commercial sector. *Hydrological Science Journal*, 55(8), 1302-1314.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R. and Thielen, A. (2010). Assessment of economic flood damage. Review article. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 1697-1724. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1697-2010>
- Messner, F., Penning-Rowsell, E., Green, C., Meyer, V., Tunstall, S., and Van der Veen, A. (2007). *Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods*. FLOODSite Consortium. Report T09-06-01.
- Ministerio de Fomento (2009). *Inventario de Características Geométricas y de Equipamiento. Manual de Criterios*. Peticionario: Ministerio de Fomento, diciembre 2009.
- Paprotny, D., Kreibich, H., Morales-Nápoles, O., Castellarin, A., Carisi, F. and Schröter, K. (2020).

Exposure and vulnerability estimation for modelling flood losses to commercial assets in Europe. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140011>