

Metodología para la evaluación de daños a vehículos expuestos a inundaciones en zonas urbanas

Damage assessment methodology for vehicles exposed to flooding in urban areas

Martínez-Gomariz, E.^{a*}, Gómez, M.^b, Russo, B.^{c1,d}, Sánchez, P.^{c2} y Montes, J.A.^e

^aCentro Tecnológico del agua (CETAqua). Carretera d'Esplugues, 75, 08940, Cornellà del Llobregat, Barcelona, España. E-mail: eduardo.martinez@cetaqua.com

^bInstitut FLUMEN, Universitat Politècnica de Catalunya. Calle del Gran Capità, 6, 08034, Barcelona, España. E-mail: manuel.gomez@upc.edu

^cAQUATEC (SUEZ Advanced Solutions). Paseo de la Zona Franca, 46-48, 08038, Barcelona, España. E-mail: ^{c1}brusso@aquatec.es, ^{c2}psanchezh@aquatec.es

^dGrupo de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (GIHA), Escuela Politécnica de La Almunia (EUPLA), Universidad de Zaragoza. Calle Mayor s/n, 50100, La Almunia de Doña Godina, Zaragoza, España. E-mail: brusso@unizar.es

^eDepartament Ecologia Urbana, Àmbit de Badalona Pròspera i Sostenible, Ajuntament de Badalona, España. E-mail: jmontes@badalona.cat.

Recibido: 11/09/2017

Aceptado: 18/10/2017

Publicado: 31/10/2017

Citar como: Martínez-Gomariz, E., Gómez, M., Russo, B., Sánchez, P., Montes, J.A. 2017. Damage assessment methodology for vehicles exposed to flooding in urban areas. *Ingeniería del agua*, 21(4), 247-262. <https://doi.org/10.4995/la.2017.8772>

RESUMEN

Las inundaciones urbanas pueden provocar importantes daños a vehículos que, en general, no son considerados en la mayoría de estudios sobre evaluación de riesgo por inundaciones. En este artículo se propone una metodología para la estimación de los daños a vehículos expuestos a inundaciones urbanas. Se presenta inicialmente el estado de la cuestión en lo que se refiere a curvas de daños para vehículos, escogiéndose las desarrolladas por el *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE, 2009) por ser las más recientes, mejor justificadas y presentar mayor adaptabilidad al caso de estudio propuesto. La metodología propuesta se aplica al municipio español de Badalona, en el marco del proyecto europeo H2020 BINGO. Para llevar a cabo dicha metodología se definen y aplican conceptos como la distribución vehicular en toda el área estudiada. Finalmente, se evalúa el Daño Anual Esperado (DAE) relativo a coches a partir de los daños ocasionados por eventos sintéticos de 1, 10, 100 y 500 años de periodo de retorno.

Palabras clave | inundaciones urbanas; vehículos; curvas de daño; Daño Anual Esperado.

ABSTRACT

Urban floods may provoke important damages to vehicles, usually not taken into account within most studies related to urban flood risks damage assessments. Herein a methodology to estimate damages to vehicles exposed to urban floods is presented. After a state-of-the-art review, the most recent damage curves for vehicles developed by the U.S. Army Corps of Engineers (USACE, 2009) are presented as the best adaptive and the most comprehensively performed so far. The proposed methodology is applied to the Spanish municipality of Badalona, framed in the H2020 European Project BINGO. In order to conduct this methodology some aspects such as the vehicular distribution are analyzed within the study area. Finally, Expected Annual Damage (EAD) for flooded vehicles is calculated based on inundations related to design storms of different return periods (1, 10, 100 and 500 years).

Key words | Urban floods; vehicles; damage curves; Expected Annual Damage.

INTRODUCCIÓN

El tipo de afectaciones ante sucesos de inundación que habitualmente centran los estudios de daños en zonas urbanas son aquellas que se dan sobre propiedades (viviendas y comercios principalmente). Según el estado de la cuestión estudiado a partir de referencias de diferentes países de todo el mundo desde años pasados hasta la actualidad, la herramienta básica propuesta por los diferentes autores son las curvas de daños, denominadas en ocasiones por algunos autores como curvas de vulnerabilidad.

El primer autor que trató el tema de daños a propiedades fue Gilbert F. White (1945) en su tesis doctoral “Human Adjustment to Floods: A Geographical Approach to the Flood Problem in the United States” en el año 1945. Entre otros aspectos, definió con gran detalle los tipos de pérdidas que se daban cuando se producía una inundación, describiendo entre otros las pérdidas en viviendas y en comercios en zonas urbanas. Las pérdidas en zonas residenciales podían ser cimentaciones y estructura de la vivienda, garajes y otros edificios, así como coches y otras tipologías de vehículos, daños al terreno y otro tipo de daños como la pérdida de la renta de la vivienda. Aunque sin definir daños directos e indirectos propiamente, White ya incluía pérdidas que actualmente se recogen en ambos grupos.

También afirmó que el calado y la velocidad del agua determinan el grado de severidad del daño a la cimentación y a la estructura de la vivienda. Encuestas llevadas a cabo determinaban ya que los daños a la estructura eran mucho menores que los debidos al contenido de las viviendas (muebles y efectos personales). Para viviendas de baja calidad tales pérdidas rondaban el 50% de las pérdidas y en viviendas de alta calidad éstas rondaban el 70% del total. El calado de agua es la condición más limitante para dichas pérdidas. Cuanto mayor es la velocidad, afirmaba White (1945), mayor es la peligrosidad ante el golpeo de objetos a las ventanas, pudiendo así romperlas y dejar salir otros elementos como pueden ser puertas, por ejemplo, que terminaban siendo objetos arrastrados por el agua. Respecto a los daños a comercios, afirmó que los tres elementos más afectados son decoraciones, mobiliario y stocks de mercancías.

La toma de decisiones (medidas de resiliencia) en la gestión del riesgo de inundaciones en general y en particular en zona urbana, requiere del análisis coste-beneficio, ya que las medidas a tomar en las mejoras del sistema de drenaje irán de la mano del nivel de riesgo que un evento de lluvia pueda producir. Para ello, entre otros análisis intangibles, se llevan a cabo habitualmente estimaciones de los daños directos (valoración monetaria) que se puedan producir para diferentes escenarios de lluvias-inundaciones. Los daños directos a propiedades varían de acuerdo al tipo de propiedad, su valor, y el coste de restitución al estado inicial (Grigg *et al.*, 1975).

Por otro lado, en las ciudades, no solo los edificios están expuestos a las inundaciones, sino que se encuentra una gran diversidad de vehículos, siendo los coches los que más predominan. Durante episodios extremos de precipitación estos pueden sufrir pérdida de estabilidad a causa de tres fenómenos: flotación, deslizamiento o vuelco (Shand, *et al.*, 2010), pudiendo colisionar contra el mobiliario urbano incrementando los daños directos tangibles y provocar lesiones o incluso muertes sobre peatones (daños intangibles). Por lo tanto, los vehículos pueden considerarse, una vez perdida su estabilidad, como grandes objetos arrastrados por la corriente que puede generar problemas económicos graves y comprometer la seguridad de las personas. La inestabilidad de vehículos se ha estudiado por diferentes autores y una completa revisión del estado de la cuestión se puede encontrar en el trabajo de Martínez-Gomariz *et al.* (2016).

Los daños causados por las inundaciones, y que pueden tener lugar a diferentes escalas (nacionales, regionales o individuales), pueden clasificarse de diferentes formas. Por un lado, como directos o indirectos, según si existe o no contacto físico con el agua. También se pueden clasificar como tangibles, cuando se pueden expresar en términos monetarios, o intangibles, cuando están relacionados con las personas (muertos, heridos o afectados). También pueden producirse daños ecológicos o ambientales, rara vez expresados en términos monetarios.

Por consiguiente, las inundaciones pueden generar daños directos tangibles a los propios vehículos y a otros elementos urbanos en caso de pérdida de estabilidad y colisión. Es un claro ejemplo la gran inundación producida en Boscastle (Reino Unido) el 16 de agosto de 2004, ocasionada por una lluvia extrema de 200 mm en 5 horas de duración, que supuso millones de libras en reparaciones de daños y un arrastre de más de un centenar de vehículos. Dicho arrastre de vehículos ocasionó el bloqueo de un puente que llegó a colapsar agravando notablemente los daños producidos.

Y también se pueden producir daños indirectos, como la pérdida de producción debido a las alteraciones del tráfico. En general, estos costes no se tienen en cuenta (Hammond. *et al.*, 2015), a pesar de que, aún y no siendo arrastrados, pueden producirse daños que deberían tenerse en cuenta. Algunas asociaciones estadounidenses como la Asociación Nacional de Subastas de Automóviles (NAAA en sus siglas en inglés) han realizado estudios para detectar cuando un vehículo puesto a la venta había sufrido una inundación.

En este artículo, se describe una metodología para la evaluación de los daños directos económicos a vehículos expuestos a inundaciones. En primer lugar, se lleva a cabo una revisión del estado de la cuestión, sobre los diferentes desarrollos de curvas de daños para vehículo que se presentan en la bibliografía. Una vez estudiadas las diferentes propuestas de curvas de daños y escogidas la más apropiadas, se propone una metodología detallada para la evaluación económica de daños a vehículos aplicada al municipio de Badalona como caso de estudio. Finalmente, se presentan las conclusiones junto con una propuesta para llevar a cabo futuros desarrollos de esta metodología que permitan mejorarla.

REVISIÓN DEL ESTADO DE LA CUESTIÓN: CURVAS DE DAÑOS PARA VEHÍCULOS

El grado de daño potencial a una estructura o uso de suelo puede medirse a través de curvas de daño en función del calado, y pueden representar el porcentaje de daños, así como, daños absolutos expresados en unidades monetarias por cada unidad de superficie. Por lo que, si se dispone de datos de tipología de edificios y las curvas de daño asociadas, mediante el empleo de herramientas GIS se puede llevar a cabo la evaluación de daños por inundación en una determinada área urbana. Por otro lado, la diversidad y el elevado número de vehículos en área urbana, obliga a no prescindir de ellos en los estudios pertinentes que tienen como objetivo la evaluación del riesgo económico o social en dicha área.

Las curvas de daño asociadas a vehículos siguen el mismo criterio que las curvas para edificios, donde se asocia un calado a un valor de pérdidas, a pesar de tener menos presencia en la literatura. En este apartado se profundiza en las diferentes curvas de daños para vehículos, que se han encontrado en la literatura. Los planteamientos que en adelante se describen son el propuesto en el modelo HAZUS-MH desarrollado por la Federal Emergency Management Agency (FEMA, 2015) de los Estados Unidos, el criterio propuesto en el proyecto CRUE (Francés *et al.*, 2008), y el propuesto por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE) (2009).

Criterio de la Federal Emergency Management Agency

La Agencia Federal de Gestión de Emergencias (FEMA) de Estados Unidos desarrolló en el año 2003 el proyecto HAZUS-MH (Federal Emergency Management Agency, FEMA, 2015), cuyo nombre proviene de “Hazard United States-Multiple Hazards”, en el que se combinan las ciencias, ingeniería y matemáticas con la tecnología de Sistemas de Información Geográfica, para poder estimar pérdidas en vidas y propiedades representándolos en un mapa. HAZUS-MH (FEMA, 2015) estima el impacto físico, social y económico que puede sufrir una comunidad por un terremoto, inundación o huracán. El objetivo del desarrollo de esta herramienta (software y metodología) es ayudar a prepararse para mitigar, responder y recuperarse del efecto de un evento peligroso como un huracán, inundaciones y terremotos. En concreto la parte del proyecto destinada a inundaciones es capaz de estimar los daños producidos por inundaciones de ríos o costeras y en particular estima daños potenciales causados a edificios, vías y áreas de agricultura, refugios y víctimas. Las pérdidas directas serán estimadas basadas en daño físico a la estructura, contenido e interior de los edificios. Pero el programa HAZUS-HM también ofrece la posibilidad de estimar el daño ocasionado a los vehículos por una inundación (Scawthorn *et al.*, 2006; FEMA, 2015). El procedimiento para llevar a cabo dicha evaluación del daño lo divide en 4 partes:

- a) Cálculo del inventariado de vehículos en la zona de análisis
- b) Localización de los vehículos según hora del día en diferentes posiciones
- c) Estimación del valor de los vehículos, y
- d) Aplicación de una curva de daños según tipo de vehículo

El sistema propuesto de estimación de la localización de los vehículos pretende obtener el número de vehículos según tipo de *parking*, edad del vehículo, tipo del vehículo y hora del día.

Además, el programa asocia una ratio de vehículos aparcados por metro cuadrado de categorías de edificios (11 tipos residenciales, 10 comerciales y 6 industriales). En el propio manual (FEMA, 2015) se pueden encontrar varios ejemplos ilustrativos del proceso de asignación de vehículo a alguna categoría de edificio. De esta manera se determina el número de vehículo potencialmente en riesgo, repartiendo dicha cifra en diferentes tipos de aparcamientos disponibles en la zona de estudio (en la calle, garajes descubiertos o subterráneos...). Por otro lado, los vehículos fueron clasificados en tres tipologías: coche, camión pequeño y camión grande. La distribución de la edad de los vehículos y del porcentaje de camiones frente a coches fue realizada por la National Automobile Dealers (NADA).

Tabla 1 | Distribución de vehículos por tipología y antigüedad según el criterio de la FEMA.

Edad	Coches	Camiones pequeños	Camiones grandes	Total
0-2	8.438%	4.631%	0.459%	13.53%
3-6	17.500%	6.703%	1.969%	26.17%
7-10	15.625%	5.241%	0.919%	21.78%
10+	20.938%	7.800%	9.778%	38.52%
Suma	62.500%	24.375%	13.125%	100%

Se proponen precios para estas tres tipologías de vehículos: 22618.47\$ (coches), 20969.21\$ (camiones pequeños) y 76087.67\$ (camiones grandes), resultados de promediar los diferentes valores obtenidos tras consultar a diferentes concesionarios y páginas web. El coste de un vehículo usado se asume ser igual al 50% del nuevo. Para calcular el valor total de los vehículos en la zona de estudio, el número total de vehículos se multiplicará por el porcentaje de coche/camión pequeño/camión grande, porcentaje de vehículos nuevos/usados y el valor promedio de los vehículos que encajan en ambas categorías. El usuario tiene la opción de estimar los daños sobre los vehículos según los valores por defecto incluidos en el programa, o considerar información local de la flota de vehículos, localización, concesionarios, y otra información disponible para los planificadores.

Las curvas de daño implementadas para la estimación de daños a los vehículos se desarrollaron considerando un daño gradual al vehículo ocasionado por la inundación. Es decir, mientras que para 30 a 60 cm de calado es poco probable que se produzcan daños al vehículo, se producirá una pérdida total cuando el compartimento del motor se encuentre completamente sumergido quedando así totalmente dañado los componentes electrónicos y el sistema eléctrico. Se considera además que un sistema temprano de aviso puede evitar completamente el daño del vehículo puesto que puede ser desplazado a una zona que no se vea afectada por la inundación. El desarrollo de las curvas de daños para cada tipo de vehículo fue llevado a cabo con el soporte de un experto en el campo.

La construcción de las curvas de daños se basó en la delimitación de tres niveles de calados: por debajo de las alfombrillas, entre las alfombrillas y el salpicadero y sobre el salpicadero (Tabla 2). Las curvas de daños completas para las tres tipologías de vehículos implementadas en el programa se muestran en la Figura 1.

Tabla 2 | Daños al vehículo según niveles de calados según el criterio de la FEMA. Dimensiones en metros.

Nivel de inundación o calado	Coche	Camión pequeño	Camión grande	% Daño
Por debajo de las alfombrillas	<0.46	<0.82	<1.52	15
Entre las alfombrillas y el salpicadero	0.46-0.73	0.82-1.13	1.52-2.29	60
Sobre el salpicadero	>0.73	>1.13	>2.29	100

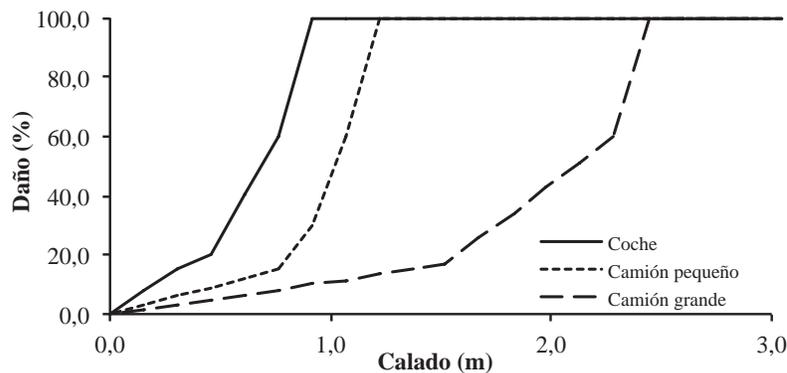


Figura 1 | Curvas de daños por tipo de vehículo propuestas en HAZUS-MH (FEMA).

Criterio del proyecto europeo CRUE

ERA-Net CRUE (Francés *et al.*, 2008) es una red de departamentos de gobiernos europeos que financian directamente programas de gestión de riesgos de inundación y acciones de investigación relacionadas. Los problemas de gestión del riesgo de inundación transfronterizos cada vez son más importantes, siendo necesaria la suma de investigaciones e iniciativas en este aspecto. La creación e implementación de un área de investigación europea en gestión de riesgo de inundación, como pretende la CRUE ERA-Net, es una contribución muy importante en la investigación relacionada con las inundaciones desde una perspectiva transfronteriza en Europa.

El tema “Risk Assessment and Risk Management: Effectiveness and Efficiency of Nonstructural Flood Risk Management Measures” se seleccionó por seis de los países socios de la CRUE mediante un proceso intensivo de consulta. El anuncio fue designado para investigar y evaluar de forma crítica la eficacia y eficiencia de medidas no estructurales en comparación con aquellas estructurales e identificar las barreras de implementación de las llamadas técnicas suaves.

El anuncio fue un incentivo para el desarrollo de enfoques metodológicos innovadores. Además, desafiaba a los investigadores en toda Europa para integrar el conocimiento de diferentes disciplinas tales como ciencias naturales y sociales e ingeniería.

Cada uno de los siete proyectos exitosos de la primera iniciativa de financiación de la CRUE para investigación en gestión del riesgo de inundaciones, se diseñó para entender diferentes enfoques nacionales para el uso y evaluación de medidas no estructurales, explorar aquello que funcionaba correctamente, y qué se puede mejorar en términos de eficiencia y eficacia de tales medidas. Los resultados de la investigación presentados en el informe pretendían proporcionar a los *decisión-makers* un mejor entendimiento de cómo la gestión del riesgo de inundación, como parte de la gestión integrada de cuencas, puede proporcionar múltiples beneficios, por ejemplo, reducción del riesgo de inundación y mejora de la calidad medioambiental.

Uno de los capítulos del estudio se centra en el análisis del riesgo en la cuenca de la Rambla del Poyo, desarrollando en primer lugar los mapas de peligrosidad, en segundo lugar, estudiando la vulnerabilidad en la zona de inundación y finalmente estimando el riesgo. En la segunda fase (análisis de la vulnerabilidad) se pretende evaluar los daños a bienes muebles (en construcciones residenciales y elementos en áreas públicas) y a edificios (construcciones residenciales). También se estiman daños para mobiliario y estructura para usos industriales, comerciales y de almacenamiento. El propósito final es obtener la curva de vulnerabilidad (terminología usada en el propio informe) asociada a cada uso. La curva refleja el daño en Euros para cada tipo de uso afectado por el nivel de agua.

La Rambla del Poyo cubre el área Este de Valencia y principalmente afecta los municipios de Chiva, Cheste, Loriguilla, Quart de Poblet, Torrent, Picanya, Païporta y Catarroja. Los municipios analizados para obtener la curva de vulnerabilidad fueron los siguientes: Alaquás, Aldaia, Alfafar, Catarroja, Massanassa, Mislata, Païporta, Picanya, Quart de Poblet, Riba-roja del Túria, Torrente, Valencia y Xirivella.

De la misma forma que se propusieron curvas de daños para diferentes tipologías de edificios, se presentaron también curvas de daños para vehículos centrándose únicamente en dos tipologías: diésel o gasolina. En la Figura 2 (izquierda) se muestran las curvas de daños obtenidas, para vehículos tipo diésel, gasolina y la curva promedio de ambos. La escala de análisis en este caso de estudio para calcular el riesgo de inundación considera el número de coches por metro cuadrado de calle afectada. Tras un análisis de número de coches por área urbanizada se obtuvo un valor de 3.1379.

Considerando el reparto de coches por metro cuadrado se obtuvo un valor de 0.5446 coches/m² de área afectada, que dio lugar a la Figura 2 (derecha) en la que se representa una curva de daño promedio de ambos vehículos ajustada al valor económico del daño en euros por cada 100 m² de área afectada. Se incluyó además el coste de limpieza de calles y sistema de drenaje por cada 100 m² de área afectada.

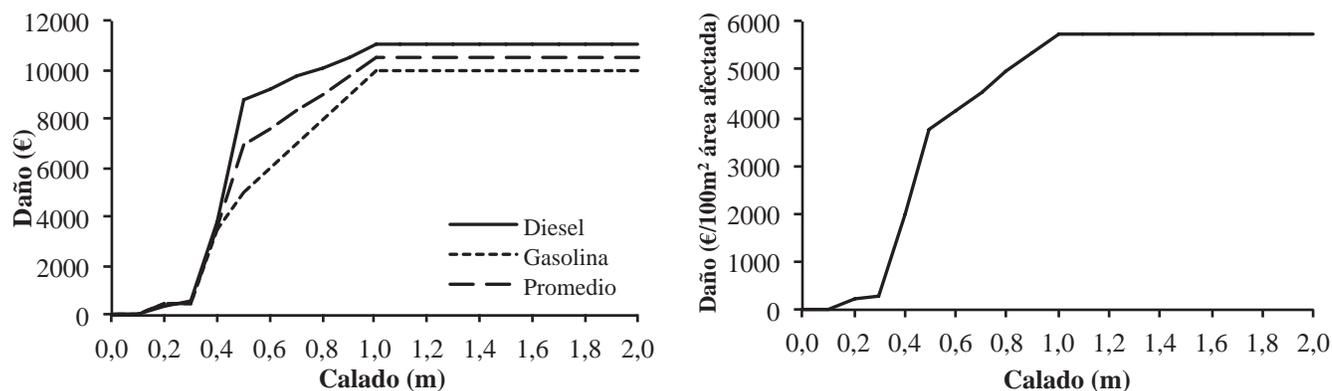


Figura 2 | Curvas de daños para las dos clases de vehículos considerados en el proyecto CRUE (izquierda) y curva adaptada a euros por 100 metros cuadrados de área afectada (derecha).

Criterio de la U.S. Army Corps of Engineers

El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América (USACE) llevó a cabo un estudio para el desarrollo de curvas de daños para vehículos expuestos a inundaciones. Dicho estudio está recogido como memorando: Economic Guidance Memorandum, 09-04, Generic Depth-Damage Relationships for Vehicles (U.S. Army Corps of Engineers, 2009). El “Flood Damage Data Collection Program” del instituto de los recursos de agua del USACE, recoge información de inundaciones producidas para estimar de manera fiable los daños económicos derivados de inundaciones. Como parte de las encuestas llevadas a cabo para averiguar las afectaciones de las inundaciones sobre propiedades residenciales, también se recogieron datos referentes a los daños ocasionados a los vehículos aparcados en tales viviendas para las diez comunidades que sufrieron las mayores inundaciones. La información base para el desarrollo de tales curvas era, por tanto, la de los datos aportados por los propios afectados en relación a la estimación del vehículo, del daño ocasionado y del calado de agua que afectó al vehículo.

Se elaboraron curvas de daños para cinco tipos de vehículos a partir de una muestra de un total de 640 vehículos. Tales datos fueron tratados estadísticamente para, mediante un análisis de regresión, construir dichas curvas.

En definitiva, el objeto de elaboración del memorando fue proporcionar unas directrices para el uso genérico de las curvas de daños desarrolladas para estudios de gestión de riesgo de inundaciones solicitados por el USACE. En el documento se afirma que no todos los estudios requieren una curva de daños para vehículos, ya que pueden considerarse como contenidos de las viviendas también y que se trata de curvas que normalmente se usan en estudios para inundaciones urbanas ya que en zonas rurales la densidad de vehículos no es considerable.

Hay dos métodos para aplicar estas curvas, el primero se centra en vehículos aparcados en ubicaciones residenciales y el otro se centra en localizaciones no residenciales. El primero requiere de diferentes datos: la altura del vehículo, que se supone que es la elevación de la propiedad residencial afectada; un promedio de vehículos por propiedad en la zona de estudio; la clasificación de éstos en los diferentes tipos propuestos; y finalmente el porcentaje de vehículos que realmente estarán aparcados en la propiedad

cuando la inundación afecte a esa zona. En el memorando se ofrecen diferentes fuentes de información en Estados Unidos para poder obtener los datos requeridos para el estudio de estimación de daños a vehículos.

La aplicación a vehículos que se encuentran aparcados en otros lugares no residenciales es análoga, pero se deben recoger datos más específicos para los que no se ofrecen fuentes en el memorando. La obtención del número de vehículos aparcados en comercios no puede llevarse a cabo a partir del método residencial propuesto. La distribución del número de vehículos y tipología debe ser agrupada por comercio individual para evaluar el daño con exactitud. Sin embargo, las mismas curvas de daño genéricas pueden usarse tanto para vehículos aparcados en zonas residenciales como en zonas comerciales.

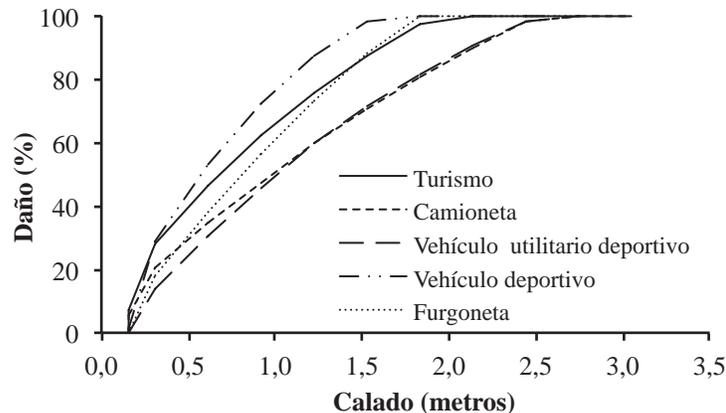


Figura 3 | Curvas de daños para vehículos desarrolladas por el USACE

Resumen de los criterios de evaluación de daños a vehículos ocasionados por inundaciones

En este apartado se presenta la Tabla 3 en la que se recogen, a modo de resumen, las características principales de las curvas de daño para vehículos descritas en este capítulo. Las diferencias en las tipologías de éstas presentan dificultades para ser comparadas mediante representación conjunta. Algunas se proponen como daño relativo, otras como daño total, y otras como daño económico asociado a una superficie afectada. Hasta el momento no se han encontrado trabajos que comparen curvas de daños para vehículos, pero sí en cambio se pueden encontrar comparaciones de curvas de daños para propiedades como el trabajo llevado a cabo por Merz *et al.* (2010) o el de Jongman *et al.* (2012).

Tabla 3 | Resumen de las características de las curvas de daños para vehículos descritas.

Ref.	Modelo	País	Desarrollo	Consideración del daño	Tipos de vehículos	Coste inicial	Enfoque de análisis
FEMA 2015, Scawthorn <i>et al.</i> , 2006a, 2006b	HAZUS-HM	EEUU	Sintético	Relativo (%)	Coche; Camión pequeño; Camión grande;	Nuevo o usado aplicando el 50% del nuevo	Objetos individuales
Francés <i>et al.</i> , 2008	CRUE	España	Sintético	Absoluto (€)	Gasolina; Diesel; Promedio	No especificado	Objetos individuales y cada 100 m ² afectados
USACE 2009	USACE	EEUU	Empírico-Sintético	Relativo (%)	Turismo; Camioneta; Vehículo utilitario deportivo; Vehículo deportivo; Furgoneta	Valor de mercado	Objetos individuales

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE DAÑOS A VEHÍCULOS

Aplicación a un caso de estudio: Badalona

Badalona es uno de los seis casos de estudio dentro del proyecto europeo BINGO (*Bringing INnovation to onGOing water management – a better future under climate change, 2015-2019*) que se centra en Portugal, España, Chipre, Alemania, Holanda y Noruega. El objetivo es proveer conocimientos prácticos y herramientas a usuarios, gestores de los servicios relacionados con el agua y políticos teniendo en cuenta los efectos del cambio climático (tanto inundaciones como sequías). En concreto, en Badalona, se van a estudiar los efectos de las inundaciones durante episodios de precipitación extrema, así como los efectos de las descargas de los sistemas de saneamiento sobre el medio receptor durante episodios moderados y extremos. La localidad tiene más de 215 000 habitantes dentro de sus límites administrativos en una superficie de 21.2 km² entre el mar Mediterráneo, la margen izquierda del río Besòs y la sierra de la Marina. Se encuentra dentro del área metropolitana de Barcelona y es la tercera ciudad más poblada de Catalunya. La densidad media de población supera los 10 000 hab/km², con valores superiores en algunas zonas del centro.

La morfología de esta localidad presenta gradientes del terreno muy elevados en las cabeceras de las cuencas rurales, y zonas muy planas cerca de la línea de costa. Estos factores permiten la rápida generación de escorrentía superficial con inundaciones en las zonas planas y en los puntos bajos de la ciudad. Esto es lo que sucedió el 14 de septiembre de 1999, con una precipitación de entre 50 – 100 mm en dos eventos de precipitación de una duración de una hora cada uno. Los cursos eventuales de agua urbana desbordaron y más de 1 millón de € fueron reclamados a las compañías de seguros para daños directos. De éstos, 136 000 € (un 14% del total) eran relativos a daños en vehículos.

En el contexto del Plan Director de Alcantarillado de Badalona (2012) se desarrolló un modelo 1D de alcantarillado con en el programa comercial MOUSE. Para la cuantificación de los daños a vehículos el modelo fue mejorado y calibrado. Dentro del marco del proyecto BINGO el modelo se ha exportado al programa comercial InfoWorks Integrated Catchment Modelling (InfoWorks ICM), en el que se han incorporado todas las modificaciones de la red de alcantarillado y se ha acoplado un modelo 2D de escorrentía superficial. Finalmente, este modelo integrado se ha calibrado con los datos de 3 pluviómetros y más de 15 limnómetros instalados en la red, así como observaciones visuales en superficie. También se han utilizado 4 lluvias de diseño sintéticas de períodos de retorno 1, 10, 100 y 500 años (Casas *et al.*, 2010), como inputs del modelo acoplado 1D/2D, para la evaluación del Daño Anual Esperado. Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones numéricas son las evoluciones, en el tiempo, de las diferentes variables del flujo en cada una de las celdas triangulares que forman la malla 2D del dominio de análisis. Éste es el dato inicial para la aplicación de la metodología para la evaluación de los daños a vehículos por inundación para cada período de retorno considerados.

Caracterización de la ocupación de vehículos en Badalona

La ocupación vehicular, a diferencia de los edificios, presenta varias incertidumbres: tipología y temporalidad. El trabajo presentado se realiza a partir de fotografías aéreas de 25 cm de resolución, lo que permite distinguir la presencia de un vehículo, no así el tipo. Este aspecto se podrá resolver mediante la propuesta de una curva ponderada de daños, cuyo desarrollo se describe en los siguientes apartados. Respecto a la temporalidad, sería importante conocer el instante en el que fueron tomadas las fotografías (día de la semana, hora...). Si bien se podría deducir que se trata de un día laborable debido a la cantidad de coches en circulación, es una variable, a priori, difícil de conocer y, con las técnicas actuales, imposible de ajustar a los eventos estudiados. Por ello, se ha decidido delimitar ocho zonas de análisis, de 11.5 ha cada una, en las que se han delimitado todos y cada uno de los vehículos presentes, obteniendo número y área en planta. El área en planta de todos los vehículos en la zona permite definir la superficie útil, aquella donde pueden encontrarse vehículos. Estas zonas han sido distribuidas por toda Badalona y son representativas de áreas de mayor superficie de la localidad (Tabla 4). Esta división permite considerar una ocupación vehicular heterogeneidad en el municipio de Badalona.



Figura 4 | Localización de las ocho zonas de análisis, patrones de ocupación vehicular y detalle de la delimitación de vehículos en la zona 1.

Tabla 4 | Características de las zonas evaluadas y porcentaje de ocupación de vehículos de cada una.

Zona	Descripción patrón	Sup. útil (m ²)	Nº vehículos	% sobre el total	m ² vehículo	m ² vehículo/ m ² sup. útil
1	Zona Industrial de alta ocupación vehicular.	30487.83	449	0.46	2994.21	9.8
2	Zona residencial con alto porcentaje de zonas verdes y alta ocupación	35 522.64	418	0.42	2777.02	7.8
3	Zona Urbana Semiintensiva, con bajo porcentaje de zonas verdes y alta ocupación vehicular. Ubicación entre la carretera B-20 y la carretera C-31.	27 172.37	355	0.36	2 288.77	8.4
4	Zona Industrial de baja ocupación vehicular.	23 439.16	202	0.21	1289.96	5.5
5	Zona Urbana Semiintensiva, alto porcentaje de núcleo antiguo y alta ocupación vehicular. Ubicación entre la carretera C-31 y la costa.	37 327.20	515	0.52	3122.94	8.4
6	Zona Urbana con alto porcentaje de núcleo antiguo, alto porcentaje de zona verde y baja ocupación vehicular. Incluye carretera C-31 y la parte de zona urbana que no se encuentra en zona costera.	27.892.59	102	0.10	639.16	2.3
7	Zona residencial de baja ocupación vehicular, incluyendo carretera B-20.	49 376.99	196	0.20	1191.00	2.4
8	Zona residencial con alto porcentaje de zonas verdes y baja ocupación vehicular.	37 601.37	295	0.30	1837.11	4.9

Distribución espacial de los vehículos. Método de aplicación de la curva de daños ponderada

Podemos definir como *método completo*, aquel con el que se delimitarían todos los vehículos de la imagen para, una vez cruzada esta información con la hidrodinámica (calados), aplicar la curva de daños ponderada (€m^2) para la superficie en planta de cada vehículo. Se trata de la metodología ideal, puesto que se define con exactitud la posición de los vehículos en un instante de tiempo. La problemática es que dicho método es extremadamente laborioso si es llevado a cabo de forma manual. El desarrollo o aplicación de técnicas de fotogrametría, que permitan delimitar los vehículos presentes en la zona de interés, supondría un gran avance en este sentido, salvando así las dificultades que supone el trabajo manual. La disponibilidad frecuente de imágenes satelitales permitiría, además, llevar a cabo este proceso en varios instantes de tiempo y analizar las variaciones en cuanto a ocupación vehicular para diferentes momentos.

Pero en este estudio no se han aplicado técnicas de fotogrametría, siendo inviable, por tanto, el estudio de todo el municipio de Badalona mediante el método completo. En su lugar, habiéndose determinado previamente una ocupación vehicular heterogénea en Badalona, se establece un *método distribuido* considerando dicha ocupación en cada celda correspondiente al resultado hidrodinámico (Figura 5).

Con dicho método distribuido se impone en cada celda la ocupación vehicular correspondiente, según la localización de dicha celda. Ese porcentaje, multiplicado por el área de la celda, ofrece la superficie vehicular presente en la misma (Figura 5). Por tanto, cada celda tiene asociada una superficie vehicular (m^2) y un calado (m), con lo que mediante la curva de daños ponderada (€m^2 frente m) se obtiene un coste económico (€ por celda, y la suma de todas las celdas será el coste total en el área de estudio. Este método distribuido no presenta gran complejidad de implantación para una gran superficie como puede ser el término municipal de Badalona, siendo en cambio una tarea ardua la aplicación del método completo.

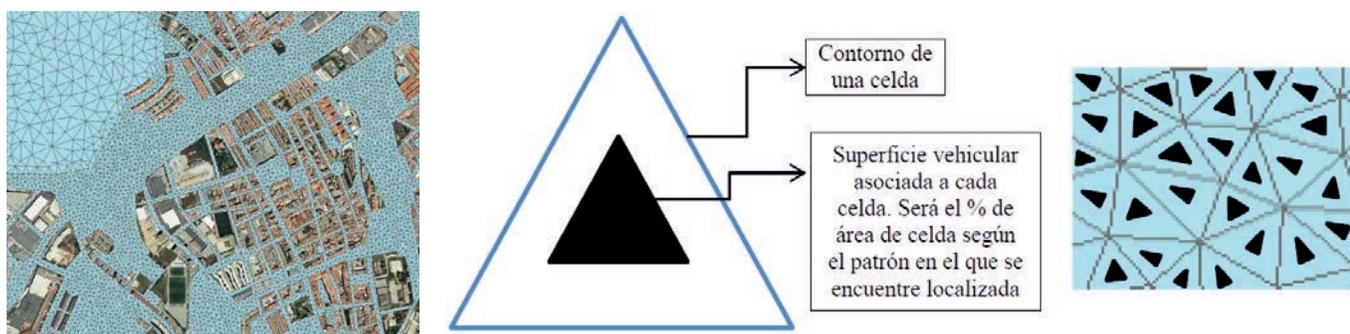


Figura 5 | Superficie vehicular asociada a una celda para la aplicación del método distribuido.

Puesto que en las ocho zonas de análisis se ha llevado a cabo la delimitación de todos los vehículos presentes (método completo), se ha realizado una comprobación del método distribuido frente al completo en cada una de las zonas de análisis. Para ello se ha cruzado la delimitación de cada vehículo, con las celdas que almacenan los resultados de calados.

Mediante esta operación se obtiene el calado relacionado a cada vehículo, con lo que la curva de daños ponderada puede ser aplicada a cada uno de ellos. En los casos en los que un vehículo se encuentra entre dos o más celdas, cada calado se asocia a la superficie de vehículo contenida en cada celda. Puesto que la diferencia de calado entre celdas contiguas no es significativa (entre 1 y 3 cm en la mayoría de los casos), el daño económico obtenido es prácticamente el mismo que considerando únicamente el mayor de los calados o el promedio de ellos sobre la totalidad de la superficie del vehículo.

Los resultados obtenidos de la evaluación económica de daños a vehículos, en las ocho zonas en las que se delimitaron todos los vehículos, se presentan en la Tabla 5. Esta tabla recoge la evaluación económica, para una inundación derivada de un evento de lluvia de 500 años de periodo de retorno, en cada zona mediante ambos métodos: completo y distribuido. Se observa que los resultados en ambos casos presentan el mismo orden de magnitud. El mayor desvío entre ellos es de un 428% para la

zona 6, aunque el error considerando la suma de los daños calculados ($\sum_1^8 \text{€}$) en cada zona para ambos métodos sería de un 7% ($(\sum_1^8 \text{€}_{\text{Distribuido}} - \sum_1^8 \text{€}_{\text{Completo}}) / \sum_1^8 \text{€}_{\text{Distribuido}}$), siendo el método distribuido el que ofrecería el valor más elevado. Se considera el método distribuido, por tanto, suficientemente representativo y válido para la estimación de daños en una gran superficie como puede ser el término municipal de Badalona. Nótese que el mayor error corresponde al menor de los daños calculados, siendo así una metodología poco representativa para valores tan bajos y más eficiente para grandes daños.

Tabla 5 | Comparativa de la valoración económica del método distribuido frente al completo.

500 años	Zona							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Método								
Completo	30311.87 €	32811.38 €	8686.23 €	2482.04 €	8872.70 €	261.79 €	41424.83 €	32621.32 €
Distribuido	24914.40 €	26963.44 €	13938.91 €	1575.10 €	15231.68 €	1381.00 €	58927.77 €	25622.86 €
Error (%)*	-18%	-18%	60%	-37%	72%	428%	42%	-21%

* Error negativo indica que el daño es menor que el obtenido por el método completo (real). Error positivo indica un daño mayor al real.

Una vez comprobado que el método distribuido es aplicable al caso de estudio, se lleva a cabo el procedimiento descrito para este método para las inundaciones derivadas de los eventos de precipitación de 1, 5, 10, 100 y 500 años de periodo de retorno. El resultado final, más allá de la preparación del mapa de daños, será un valor económico del daño asociado a cada uno de los tres periodos de retorno considerados.

De los 3 desarrollos de curvas de daños descritos en apartados anteriores, se ha escogido en este estudio el elaborado por el USACE porque es el estudio más reciente, descrito de manera más exhaustiva y los daños están expresados como porcentajes (permitiendo de esta manera extrapolar los resultados a otros países y tener en cuenta los precios locales de los vehículos). Para poder aplicar estas curvas en la metodología que se explicará a continuación, se deben modificar a €/m² de área afectada.

Según los datos facilitados por el Ayuntamiento de Badalona, el 85% de vehículos registrados son de tipo turismo, y el 15% restante son camiones y furgonetas. Este 15% restante se ha dividido en el resto de tipos propuestos en USACE (2009). Otras características necesarias son el área media en planta y la depreciación media del precio del vehículo. La primera se ha obtenido a partir de una muestra de 50 vehículos habituales en España. Y para la segunda, se han aplicado las depreciaciones establecidas por el ministerio de economía, industria y competitividad del gobierno español (España, 2016) según la información del ayuntamiento de Badalona en cuanto a la edad media de los vehículos (Tabla 6).

Tabla 6 | Comparativa de la valoración económica del método distribuido frente al completo.

Tipo de vehículo	Área en planta promedio (m ²)	Precio medio (€)	Edad media (años)	Depreciación (%)	Precio medio depreciado (€)	% en Badalona
Turismo	7.31	18253 €	12	87	2373	85
Camioneta	7.54	17599 €	13	90	1760	7.5
Vehículo Utilitario Deportivo	8.80	58337 €	13	90	5834	1.5
Vehículo Deportivo	8.80	103949 €	12	87	13513	0.5
Furgoneta	9.35	29961 €	13	90	2996	7.5

A partir de las características promedio para cada grupo de vehículos, se obtienen valores para un vehículo tipo para cada grupo. De esta manera se pueden construir las curvas de daños asociadas a cada uno de ellos donde el porcentaje de vehículos asociado a cada grupo es la probabilidad de que un vehículo recogido en uno de esos grupos sufra daños por inundación. Finalmente, se ha construido una única curva de daños obtenida a partir de la ponderación de cada una de ellas, que se verá afectada por el porcentaje de cada grupo (Figura 6) y se aplicará en este caso de estudio.

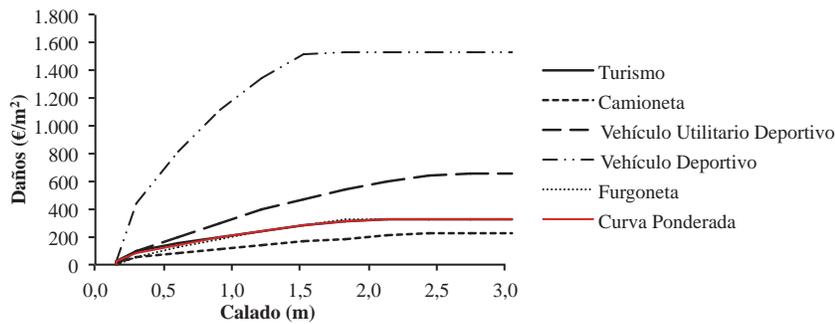


Figura 6 | Adaptación de las curvas del USACE y curva ponderada propuesta.

RESULTADOS

Daño Anual Esperado (DAE) y mapas de daños

Una vez comprobada la aplicabilidad del método, se ha aplicado para eventos de precipitación sintéticos de 1, 10 y 100 y 500 años de período de retorno. El resultado es un valor económico del daño asociado a cada uno de los periodos de retorno considerados, junto con la representación espacial del daño (mapas de daños, Figura 7). Con estos datos se puede calcular el DAE, asumiendo que la evaluación del riesgo sigue sólo una perspectiva de evaluación económica. Usando esta idea el DAE se calcula con integración del área bajo la curva que se forma al graficar la probabilidad de ocurrencia del daño respecto a la cantidad económica de daños, según Meyer *et al.* (2011).

La representación gráfica de estos valores se presenta en la Figura 8, siendo el DAE para el municipio de Badalona de 320983.31€

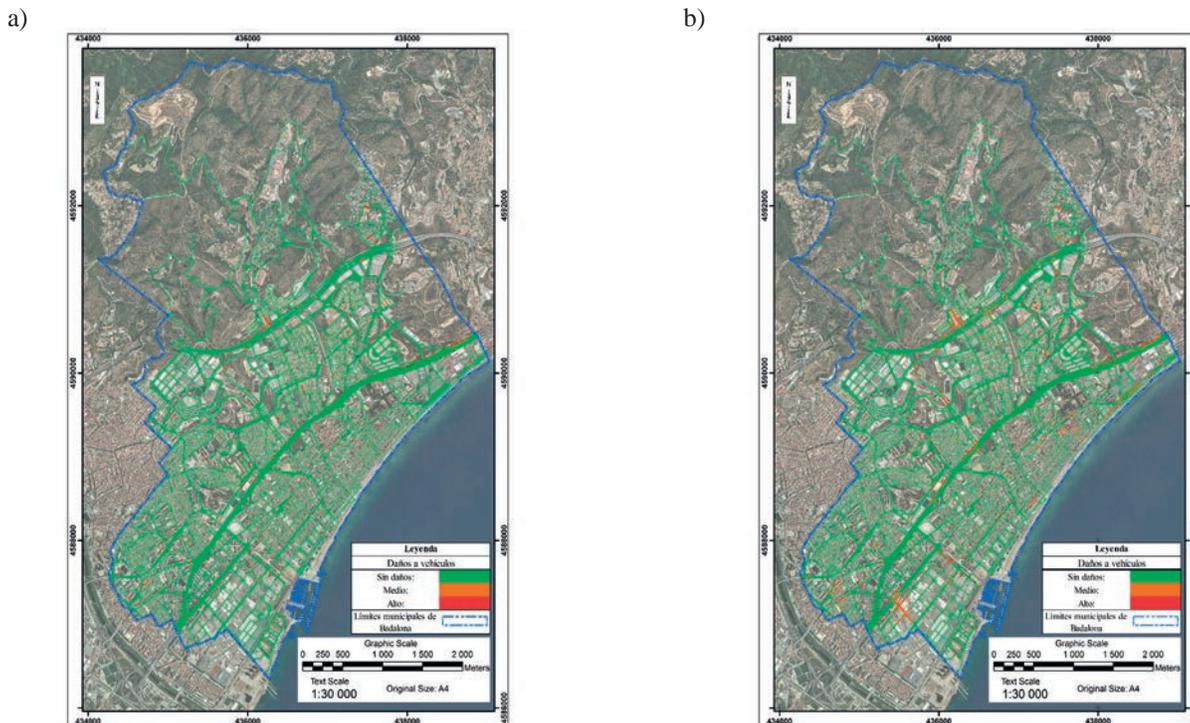


Figura 7 | Mapas de daños a vehículos para periodos de retorno de a) 10 y b) 500 años.

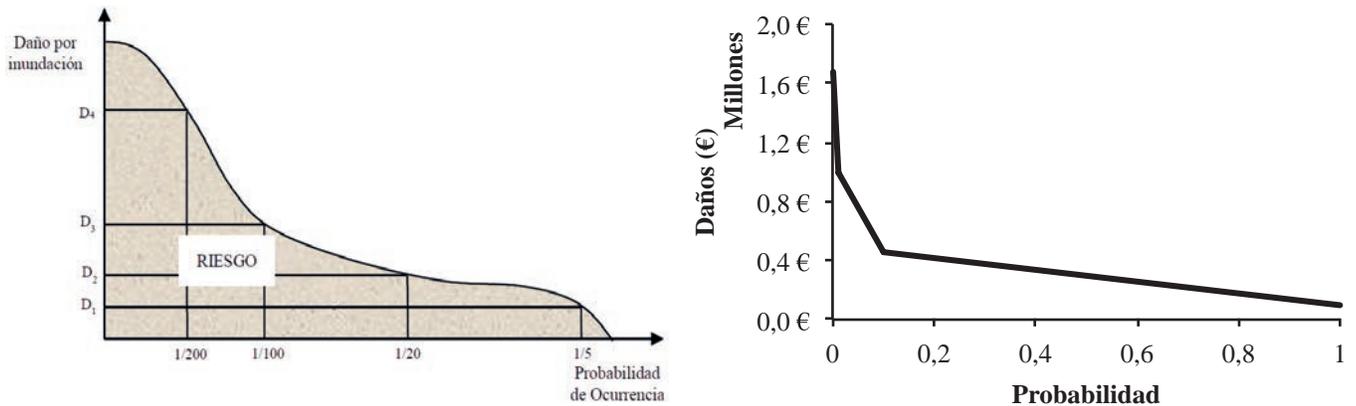


Figura 8 | Curva que relaciona el daño (expresado en €) con la probabilidad de ocurrencia (teórica a la izquierda y calculada a la derecha). El área bajo la curva representa el DAE.

Validación de los resultados

El Daño Anual Esperado (DAE), más allá del valor en sí mismo, sirve como estado de referencia inicial para la definición de acciones de mitigación y respuesta en la preparación de un plan de gestión de emergencias a medio plazo, así como para proponer nuevas políticas en este sentido (de la misma manera que para evaluar daños a propiedades (viviendas, comercios, etc.), según se puede encontrar en la literatura).

En España corresponde al Consorcio de Compensación de Seguros (CCS), como aseguradora, cubrir los costes debido a episodios catastróficos. Ésta ha sido la fuente para la obtención de los daños a vehículos para los dos eventos con peores consecuencias para Badalona en los últimos años: 14 de septiembre de 1999 y 31 de julio de 2002. Los daños alcanzaron un total de 136000 € y 142000 €, respectivamente. Se han comparado estos valores con los daños estimados a partir de los períodos de retorno asociados (3.3 y 1.7 de período de retorno, respectivamente) que se han introducido en la ecuación de ajuste de graficar los daños económicos respecto a los períodos de retorno asociados de las lluvias de diseño simuladas (Figura 9). Los daños estimados obtenidos son de 199240.14 € para el primer episodio y 145864.72 € para el segundo episodio.

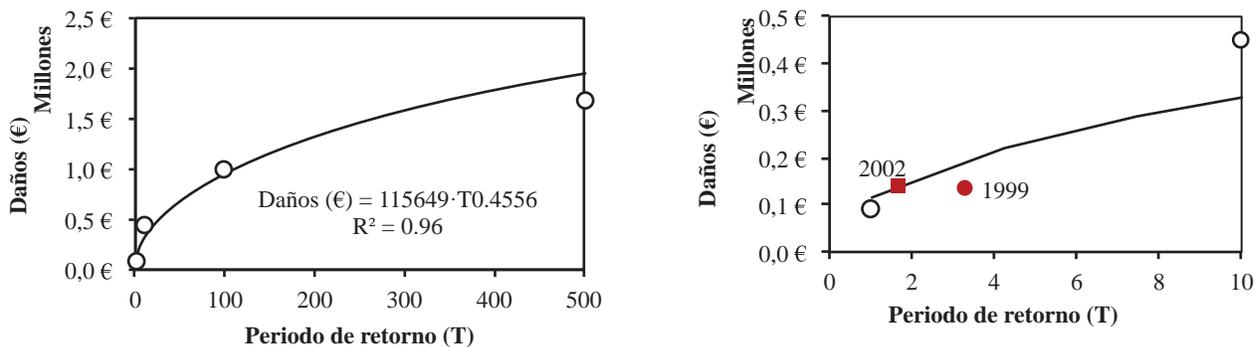


Figura 9 | Daños a vehículos en relación con el período de retorno de la lluvia de diseño, curva potencial de ajuste y representación de los eventos reales considerados para la validación del método.

El conocimiento del coste real de los daños para los eventos registrados ha permitido, con uno de los eventos ajustar algunos parámetros de calibración, como el umbral mínimo de daños, y validar el modelo con el segundo de los eventos reales. Después de un análisis de las reclamaciones de ambos eventos se puede comprobar que menos del 5% de reclamaciones están por debajo de los 500 € por lo que se decidió establecer este valor como límite para cada vehículo.

Pequeños errores de los resultados hidrodinámicos fueron corregidos para ajustar los daños obtenidos numéricamente, de tal forma que celdas aisladas con altos calados no fueron consideradas en el cálculo de daños tras una observación visual debido a probables problemas de resolución del modelo digital del terreno empleado para las simulaciones numéricas. Dichos errores localizados podrían no ser significativos para otros estudios, sí en cambio para la presente evaluación de daños.

A pesar de estar el modelo calibrado y las hipótesis realizadas, los valores de daños estimados son superiores a los valores proporcionados por el CCS. Si bien, estos resultados podrían considerarse inadecuados, las diferencias obtenidas pueden explicarse como:

- Por diferentes causas no todos los propietarios deciden reportar sus daños al CCS (Velasco *et al.*, 2015). Este hecho está descrito también para otros lugares y está estudiado en Estados Unidos (Cummins *et al.*, 2010), donde se encontró que, para muchos desastres naturales, la ratio entre pérdidas y daños pagados era en promedio poco menor al 50%.
- Si bien, la distribución espacial de la lluvia es esencial para la evaluación de daños en áreas grandes, como es el caso de la ciudad de Badalona, no existía esta información para los eventos estudiados. Además, las lluvias de diseño para cada período de retorno se han considerado uniformes.
- Los propietarios de vehículos, alertados por la inminente posibilidad de peligro de inundación, pueden decidir retirar los vehículos de las zonas potencialmente afectadas. Este hecho no se ha tenido en cuenta en el modelo.
- Existen daños reales asociados a vehículos en zonas cubiertas, como pueden ser *parkings* subterráneos, que no se consideran en este estudio y que harían desviar en mayor o menor medida el valor estimado del reclamado.

CONCLUSIONES

Los estudios de daños por inundación ponen su foco mayormente en propiedades (viviendas, comercios, etc.), sin embargo, eventos extremos de precipitación pueden generar daños directos muy significativos sobre los vehículos u otros elementos urbanos en caso de pérdida de estabilidad de estos, así como daños intangibles a los peatones.

La revisión del estado de la cuestión llevada a cabo, en lo que se refiere al desarrollo de curvas de daños para vehículos, indica que dicho campo de investigación se encuentra aún en fase de desarrollo. Prácticamente no se han encontrado curvas de daños y, en la mayoría de los pocos trabajos encontrados, no se presenta una explicación justificada de su desarrollo.

Dentro del marco del proyecto europeo BINGO, se ha realizado un estudio para evaluar el impacto económico que tendría una inundación desde el punto de vista de daños directos a vehículos en Badalona. Para ello, se ha partido de las curvas de daños a vehículos desarrolladas por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE), por ser estas las mejor justificadas, las más recientes y las más fácilmente adaptable a otras ciudades por considerar daños porcentuales (daños relativos).

Una vez definida una distribución heterogénea de vehículos, en base al análisis de ortofotos, se propone un método de estimación de daños denominado como distribuido. Dicha metodología se ha aplicado a inundaciones derivadas de eventos de lluvias sintéticos de 1, 10, 100 y 500 años de periodo de retorno. Los daños estimados para cada período de retorno han permitido evaluar el Daño Anual Esperado (DAE) de la misma forma en que en la literatura se aplica habitualmente para propiedades. En este caso el valor del DAE para Badalona asciende a 320983.21 €. Los resultados obtenidos han sido validados a partir de los dos eventos que ocasionaron más daños en los últimos años.

De acuerdo con otros estudios encontrados en bibliografía, existen distintas incertidumbres que pueden explicar las diferencias entre los valores estimados y las cifras oficiales. Estas posibles causas se han citado en el presente trabajo

Por otro lado, la estimación de daños a vehículos es un campo con muy poca trayectoria investigadora. Existen por lo tanto multitud de aspectos y técnicas a ser estudiados con más profundidad, entre los cuales se proponen algunos:

- La metodología propuesta y aplicada en el caso de estudio de Badalona debería ser utilizada en más casos de estudio para contrastar su aplicabilidad.

- Para la delimitación de vehículos en la zona de estudio se escogieron ocho zonas suficientemente representativas, de forma que la tarea de identificar visualmente cada uno de los vehículos presentes en la fotografía aérea no fuera una tarea inabordable. Se propone, en este sentido, el desarrollo o aplicación de técnicas de fotogrametría, que permitan delimitar los vehículos presentes en la zona de interés. Esto permitiría evaluar el daño a vehículos sin necesidad de aplicar patrones de ocupación vehicular, puesto que se podría tener el número de vehículos y ubicación exacta de cada uno de ellos en un instante de tiempo. La disponibilidad frecuente de imágenes satelitales permitiría, además, llevar a cabo este proceso en diferentes instantes de tiempo y analizar las variaciones en cuanto a ocupación vehicular para diferentes momentos.
- En esta investigación se ha estudiado el impacto de daños directos a vehículos cuando se produce una inundación en una zona urbana. Para dicho estudio se han aplicado curvas de daños a vehículos desarrolladas por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América (USACE), las cuales han sido elaboradas con mucho detalle. Se propone la elaboración de curvas de daños propias, que respondan con mayor exactitud a los vehículos que habitualmente se encuentran en ciudades españolas y europeas.
- En la evaluación de daños, el único factor de vulnerabilidad que se suele tener en cuenta es el calado de agua, mediante el uso de curvas de daños, ya sea a edificios o a vehículos, como es el caso en cuestión. Otras variables como la velocidad, la duración de la inundación y la carga contaminante o de sedimentos transportada por el agua pueden tener un impacto importante en los daños producidos por la inundación. Merece la pena, por lo tanto, investigar sobre los efectos reales de otros factores distintos al calado sobre los vehículos.
- El daño a vehículos considerado aquí ha sido el directo, aunque la interrupción del tráfico es un daño indirecto que puede ocasionar grandes pérdidas económicas. Por tanto, se debe estudiar también el impacto en cuanto a daños indirectos cuando los vehículos ven interrumpidos sus trayectos a causa de una inundación. Los daños indirectos normalmente no suelen contemplarse en los análisis de riesgo económico ante inundaciones. En ocasiones el principal motivo es la falta de datos empíricos.
- Cuando un vehículo pierde la estabilidad, los daños ocasionados serán los derivados de colisiones con otros vehículos u otros obstáculos en medio urbano. Se debe estudiar, por tanto, cómo relacionar la curva de daños con el umbral de estabilidad, de manera que la estimación de daños no sea la misma que cuando el vehículo se encuentra quieto en una posición.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en este artículo se ha realizado en el marco del proyecto BINGO (Project ID: 641739) financiado por el programa H2020 de la Unión Europea (Acuerdo No. 641739).

REFERENCIAS

- Casas, M.C., Rodríguez, R., Redaño, Á. 2010. Analysis of extreme rainfall in Barcelona using a microscale rain gauge network. *Meteorological Applications*, 17(1), 117-123.
- Cummins, J.D., Suher, M., Zanjani, G., 2010. Federal financial exposure to natural catastrophe. In: D. Lucas, ed. *Measuring and managing Federal financial risk*. Chicago, IL: University of Chicago Press, 61-92. <https://doi.org/10.7208/chicago/9780226496597.003.0005>
- España. 2016. Orden HFP/1895/2016, de 14 de diciembre. Boletín Oficial del Estado, 17 de diciembre de 2016, 304, 87816-88485. [online: <http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2016-11948>].
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). Department of Homeland Security. Mitigation Division. 2015. Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Flood Model. *Hazus-MH MR5 Technical Manual*. Washington, D.C., USA. 449p.

- Francés, F., García-Bartual, R., Ortiz, E., Salazar, S., Miralles, J.L., Blöschl, G., Komma, J., Haberer, C., Bronstert, A., Blume, T. 2008. Efficiency of non-structural flood mitigation measures: “room for the river” and “retaining water in the landscape.” *CRUE Research Report No I-6*. 242p.
- Grigg, N.S., Helweg, O.J. 1975. State-of-the-art of estimating flood damage in urban areas. *Journal of the American Water Resources Association*, 11, 379-390. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1975.tb00689.x>
- Hammond, M.J., Chen, A.S., Djordjević, S., Butler, D., Mark, O. 2015. Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review. *Urban Water Journal*, 12, 14-29. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.857421>
- Jongman, B., Kreibich, H., Apel, H., Barredo, J.I., Bates, P.D., Feyen, L., Gericke, A., Neal, J., Aerts, J.C.J.H., Ward, P.J. 2012. Comparative flood damage model assessment: towards a European approach. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(12), 3733-3752. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3733-2012>
- Martínez-Gomariz, E., Gómez, M., Russo, B., Djordjević, S. 2016. Stability criteria for flooded vehicles: a state-of-the-art review. *Journal of Flood Risk Management*. 10pp. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12262>
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., Thielen, A. 2010. Review article “Assessment of economic flood damage.” *Natural Hazards and Earth System Science*, 10(8), 1697-1724. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1697-2010>
- Meyer, V., Priest, S., Kuhlicke, C. 2011. Economic evaluation of structural and non-structural flood risk management measures: examples from the Mulde River. *Natural Hazards*, 62, 301-324. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9997-z>
- Shand, T.D., Cox, R.J., Blacka, M.J., Smith, G.P. 2011. Australian Rainfall and Runoff (AR&R). Revision Project 10: Appropriate Safety Criteria for Vehicles (Report Number: P10/S2/020). Sydney, Australia. 7p.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE) 2009. Economic Guidance Memorandum, 09-04, Generic Depth-Damage Relationships for Vehicles. Washington, D.C, USA. 9p.
- Velasco, M., Cabello, À., Russo, B. 2015. Flood damage assessment in urban areas. Application to the Raval district of Barcelona using synthetic depth damage curves. *Urban Water Journal*, 13(4), 426-440. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.994005>
- White, G.F. 1945. Human Adjustment to Floods: A Geographical Approach to the Flood Problem in the United States. PhD Thesis, University of Chicago, USA.