Presupuesto y Gasto Público 101/2020: 261-282
Secretaría de Estado de Presupuestos y Gastos
© 2020, Instituto de Estudios Fiscales

Valoración de riesgos por inundaciones

NURIA OSÉS-ERASO
Universidad Pública de Navarra e INARBE

SÉBASTIEN FOUDI
Basque Centre for Climate Change BC3

Recibido: Noviembre 2020
Aceptado: Noviembre 2020

Resumen

Este trabajo analiza cómo las curvas de probabilidad daño y el daño anual esperado, como indicadores del riesgo de inundación, se ven afectados por el cambio climático, las medidas de prevención estructurales o no estructurales y los efectos inesperados como el efecto dique. Subraya las interacciones entre medidas privadas no estructurales y públicas estructurales en la adaptación al cambio climático. Un ejemplo, con la apertura del canal de Deusto en Bilbao, ilustra cómo una medida estructural modifica el riesgo de inundación y permite discutir el papel de las medidas no estructurales en la adaptación.

Palabras claves: curva probabilidad-daño, daño anual esperado, efecto dique, cambio climático, medidas estructurales y no-estructurales, medidas colectivas y privadas.

Clasificación JEL: Q54, Q58.

Abstract

This work presents how the damage-probability curves and expected annual damage curves, as indicators of flood risk, are affected by climate change, structural or non-structural prevention measures, and unexpected effects such as the levee effect. It highlights the interactions between private non-structural and public structures measures in climate change adaptation. An example, with the opening of the Deusto canal in Bilbao, illustrates how a structural measure modifies flood risk and allows us to discuss the role of non-structural measures in adaptation.

Keywords: damage-probability curve, expected annual damage, levee effect, climate change, structural and non-structural measures, collective and private measures.

JEL Clasificación: Q54, Q58.

1. Introducción

En muchas partes del mundo, los ríos han sido y son la columna vertebral alrededor de la cual se ha desarrollado la actividad socioeconómica (García Codron, 2004). Grandes ciudades están ubicadas en los márgenes de ríos y el desarrollo industrial y urbano en zonas próximas a los cauces ha propiciado grandes desastres como consecuencia de avenidas ya que la planificación urbanística no ha tenido en cuenta, en muchos lugares, el entorno fluvial y el riesgo de inundación (Berga Casafont, 2011).

Así, las inundaciones constituyen uno de los peligros naturales que pueden causar un mayor impacto económico y social en cortos períodos de tiempo (Benito *et al*., 2005). Las inundaciones fueron el desastre natural más frecuente a nivel mundial en el período 1998-2017, un 43% de todos los eventos registrados. Afectaron a más de dos billones de personas, causaron más de 142.000 muertos y ocasionaron pérdidas por valor de 656 billones de dólares (CRED, 2018). En el caso de España, en el período 1990-2010 las inundaciones produjeron 109 víctimas y los daños económicos fueron de 450 millones de euros al año en la década de las noventa y de 800 millones de euros al año en los 2000, mostrando una tendencia creciente (Berga Casafont, 2011). Además, España es el quinto país en Europa por volumen de población expuesta a inundaciones (Perles Roselló, 2018).

La Directiva de la Comisión Europea 2007/60/CE, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, plantea que es posible y conveniente reducir el riesgo de consecuencias negativas asociadas a las inundaciones, en particular para la salud y la vida humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural, la actividad económica y las infraestructuras (Comisión Europea, 2007). Para ello, la Directiva detalla la necesidad de preparar *mapas de peligrosidad* por inundación y *mapas de riesgo* de inundación en cada demarcación hidrográfica. Para la preparación de estos mapas, propone considerar tres escenarios: baja probabilidad de inundación o escenario de eventos extremos, probabilidad media de inundación y alta probabilidad de inundación. El análisis de estos mapas y escenarios será clave en el establecimiento de planes de gestión de riesgo, tal y como establece la Directiva. Los mapas de peligrosidad y los mapas de riesgo de inundación se revisarán cada cierto tiempo ya que puede haber cambios en peligrosidad, sobre todo en un contexto de cambio climático, y también puede haber cambios en la exposición y la vulnerabilidad a las inundaciones por la evolución de las condiciones sociodemográficas y económicas en las zonas inundables. En el caso de España, los primeros mapas de peligrosidad y de riesgo aprobados bajo el paraguas de la Directiva son de 2013 y, a finales de 2019, se presentaron las actualizaciones de estos mapas (Ministerio para la Transición Ecológica)[1].

Diversas medidas pueden adoptarse para tratar de evitar o reducir los daños ocasionados por las inundaciones, medidas que pueden ser tanto estructurales como no estructurales. De acuerdo con el Real Decreto 903/2010 de evaluación y gestión de riesgos de inundación que traspone al ordenamiento jurídico español la directiva comunitaria (BOE, 2010), las *medidas estructurales* consisten 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, como construcción de presas, encauzamientos de

ríos o construcción de diques de protección. Por otro lado, las *medidas no estructurales* son aquellas que, sin actuar sobre la avenida en sí, modifican la susceptibilidad de la zona inundable frente a los daños por inundación como planes de protección civil, la implantación de sistemas de alerta o medidas de ordenación del territorio.

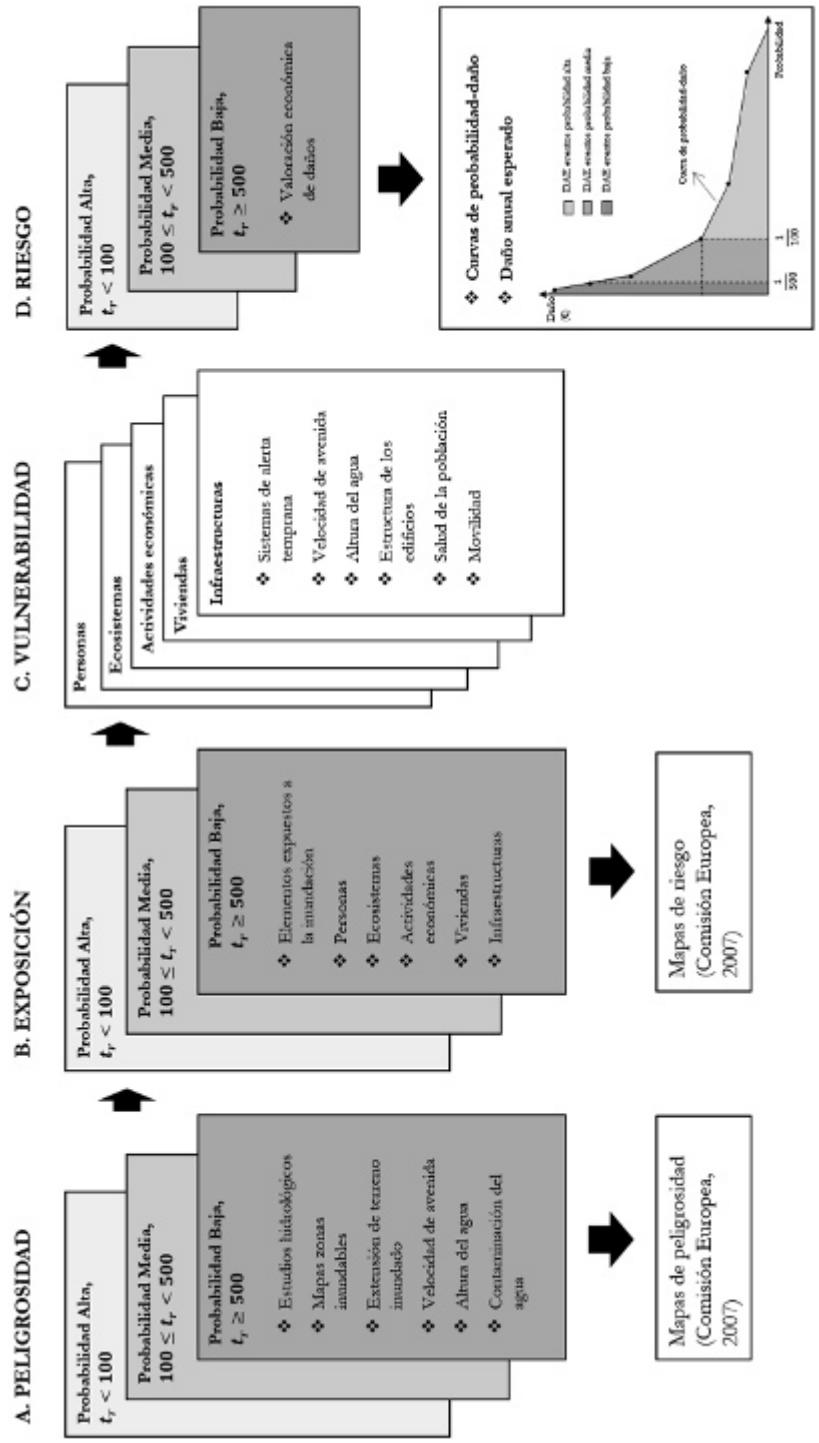
Los planes de gestión de riesgo requieren la implementación de alguna de estas medidas de prevención y/o protección ante inundaciones. Como el efecto de estas distintas medidas es diverso y su implementación es costosa, la realización de un buen plan de gestión requiere una evaluación en términos cuantitativos y monetarios de los potenciales daños de inundación en una determinada zona, evaluación que pueda incorporarse a estudios coste-beneficio para cada una de las medidas propuestas.

En este trabajo se proponen la curva de probabilidad-daño y el daño anual esperado como medidas de valoración de riesgo de inundación. Se analiza cómo estas medidas pueden verse afectadas por el cambio climático y por la adopción de medidas tanto estructurales como no estructurales. Asimismo, se analiza el riesgo de inundación en la ciudad de Bilbao y cómo este riesgo se ha modificado con algunas de las medidas adoptadas en la ciudad, en concreto, la apertura de canal de Deusto.

2. Curvas probabilidad-daño y daño anual esperado

El riesgo de inundación es una combinación de la probabilidad de que se produzca una inundación y de las posibles consecuencias negativas para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica, asociadas a una inundación (Comisión Europea, 2007). Para realizar una estimación de este riesgo de inundación es necesario analizar la peligrosidad de la inundación, la exposición de distintos elementos a las inundaciones y la vulnerabilidad de los elementos expuestos (Kron, 2002; Penning-Rowsell *et al*., 2005; Merz *et al*., 2010; Foudi y Osés-Eraso, 2014). La Figura 1 muestra un esquema con estos tres factores que permiten llegar a la valoración del riesgo. A continuación, explicamos brevemente cada uno de estos factores, así como las principales medidas de valoración del riesgo que pueden derivarse de ellos, las curvas de probabilidad-daño y el daño anual esperado.

Figura 1
Análisis del riesgo de inundación



Fuente: adaptado de Foudi *et al*. (2015).

A. *Peligrosidad*

Los eventos naturales como terremotos, olas de calor, huracanes o inundaciones se caracterizan por diferentes niveles de intensidad o severidad. El intervalo de recurrencia de un evento de cierta intensidad es una medida estadística del intervalo de tiempo dentro del cual tendrá lugar el evento. Este intervalo se conoce generalmente como el período de retorno del evento natural. Los períodos de mayor retorno corresponden a eventos más severos.

En el caso de una inundación, definimos el período de retorno, t_r, como el número de años dentro de los cuales se espera que se repita una inundación dada. El período de retorno también es una medida de frecuencia y puede interpretarse como el inverso de la probabilidad de que se supere una determinada avenida en cualquier año, $t_r = 1/p_r$, donde p_r denota la probabilidad de inundación anual. Por ejemplo, una inundación de período de retorno 10 años tiene una probabilidad de ocurrencia de 0.1 en cualquier año, una inundación de período de retorno 100 años tiene una probabilidad de ocurrencia 0.01 en un año, y una inundación de período de retorno 500 años tiene una probabilidad de ocurrencia 0.002.

Los mapas de peligrosidad por inundación previstos en la Directiva 2007/60/CE, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación (Comisión Europea, 2007) deben incluir el estudio de inundaciones con períodos de retorno dentro de tres escenarios (i) alta probabilidad de inundación (ii) probabilidad media de inundación y (iii) baja probabilidad de inundación o escenario de eventos extremos. Sólo se detalla a qué período de retorno corresponden estos escenarios para el caso de la probabilidad media de inundación, período de retorno igual o superior a 100 años, dejándose a los Estados miembros la cuantificación del período de retorno para los otros dos escenarios (Comisión Europea, 2007; Berga Casafont, 2011). Estos mapas de peligrosidad incluyen información sobre la extensión de la inundación y, en la medida de lo posible, el nivel que puede alcanzar el agua o la velocidad de la misma.

En el caso de España, en 2013 se aprobaron los mapas de peligrosidad para las distintas demarcaciones hidrológicas y en 2019 se presentaron las actualizaciones de dichos mapas (Ministerio para la Transición Ecológica). En estos estudios se incluye, al menos, el análisis del período de retorno 10 (alta probabilidad), período de retorno 100 (probabilidad media) y período de retorno 500 (baja probabilidad).[2] Siguiendo esta definición adoptada en el ámbito español, definimos tres escenarios de peligrosidad, i) alta probabilidad, período de retorno menor de 100 años, ii) probabilidad media, período de retorno entre 100 y 500 años, iii) baja probabilidad, período de retorno superior o igual a 500 años.

B. *Exposición*

Dado que los mapas de peligrosidad incluyen información sobre la extensión de terreno que resulta inundado es posible analizar qué elementos podrían resultar afectados por la inundación. Considerando las características geográficas del área, para cada demarcación hidrográfica existe una relación entre el período de retorno (severidad de la inundación) y la extensión de la zona inundable. Hay ciertas áreas que se inundarán en cualquier período de retorno, pero otras se inundarán solo en los eventos más extremos.[3]

Las personas que se encuentren en la zona inundable así como las viviendas, las infraestructuras, las actividades económicas y negocios ubicados en dicha zona o los ecosistemas propios del área, están expuestos a las distintas avenidas y pueden verse afectadas por su duración, la velocidad de la avenida o la altura alcanzada por el agua. Así, un análisis de las consecuencias de las inundaciones debe incluir un estudio de exposición a las inundaciones que identifique y clasifique los elementos expuestos, como por ejemplo, actividades económicas, viviendas, infraestructuras y ecosistemas en riesgo de inundación (Merz *et al*., 2010).

Los mapas de riesgo de inundación recogidos en la Directiva (Comisión Europea, 2007) tienen por objeto analizar estos posibles elementos expuestos a las inundaciones, así como su vulnerabilidad.

C. *Vulnerabilidad*

Una vez identificados los distintos elementos expuestos a las inundaciones, es necesario realizar un análisis de vulnerabilidad para estimar los daños potenciales por inundación, ya sean estos directos o indirectos. Los daños directos resultan del contacto físico del agua con los distintos elementos expuestos, daños en viviendas y otros edificios y su contenido o daños sobre las personas que van desde heridos de diversa consideración hasta fallecimientos. Además, también hay pérdidas indirectas principalmente debido a la interrupción de las redes de comunicación y actividades sociales, pero también por problemas de salud sobrevenidos como ansiedad o incluso estrés post-traumático de las personas expuestas a las inundaciones (Foudi *et al*., 2017).

Los daños generados por la inundación son una función de la extensión de la inundación, pero también dependen de su duración, velocidad, profundidad y la contaminación de las aguas (Penning-Rowsell *et al*., 2005; Merz *et al*., 2010). En igualdad de condiciones, esperamos obtener una mayor estimación de daños cuanto más extensa sea la zona inundable. La mayor severidad de la inundación amplía las zonas inundables de forma que, a mayor período de retorno, mayor llanura de inundación, mayor el número de elementos expuestos a riesgo y, por lo tanto, los daños.

D. *Riesgo de inundación*

Los tres puntos anteriores, (A) Peligrosidad, (B) Exposición y (C) Vulnerabilidad, están claramente vinculados entre ellos y, tras su estudio, es posible construir la curva de probabilidad daño que relaciona la probabilidad anual de inundación con daños por inundación. Las *curvas probabilidad-daño* representan una relación entre la gravedad de la inundación (caracterizada por la probabilidad anual, es decir, el período de retorno) y los niveles de daño. Para que se pueda desarrollar una imagen precisa de la forma de las curvas de probabilidad-daño, se necesita analizar un número suficiente de inundaciones potenciales. Por lo general, se recomienda evaluar al menos cinco inundaciones (Penning-Rowsell *et al*., 2005). En la Figura 1 puede observarse una curva de probabilidad-daño, donde los eventos

más severos, con menor probabilidad de ocurrencia, generan daños mucho más elevados que los eventos con mayor probabilidad de ocurrencia cuya incidencia en términos de daños es mucho menor.

Otra medida muy utilizada para medir el riesgo de inundación es el *daño anual esperado* (DAE). Existen diferentes formas de calcular el DAE (Olsen *et al*., 2015), una de las cuales se basa en las curvas de probabilidad-daño (Foudi y Osés-Eraso, 2014; Foudi *et al*., 2015). Suponiendo que $D(p_r)$ representa la curva de probabilidad-daño, el daño anual esperado puede calcularse del siguiente modo,

$$DAE = \int_0^1 D\left(p_r\right) dp_r \tag{1}$$

Gráficamente, el área bajo la curva de probabilidad-daño equivale a este daño anual esperado. En este cálculo se puede analizar cuál es la contribución de eventos de baja, media y alta probabilidad a este DAE. Se cuantifica así la contribución relativa de eventos extremos (baja probabilidad/daños cuantiosos) y eventos frecuentes (alta probabilidad/daños pequeños) al DAE (Merz *et al*., 2009). Esta distinción puede ser relevante a la hora de proponer medidas de reducción de riesgo y cómo estas afectan en eventos de diferente período de retorno. En la Figura 1, el área sombreada bajo la curva de probabilidad daño equivale al DAE. Las áreas con distinta intensidad de sombreado, indican el peso de cada escenario de probabilidad de inundación (baja, media y alta) a este DAE.

Un análisis integral del riesgo de inundación debe considerar el esquema completo aquí presentado, peligrosidad, exposición, vulnerabilidad y riesgo. Para el caso español, pueden encontrase algunos análisis que realizan este estudio para determinadas demarcaciones geográficas, por ejemplo, Osés-Eraso (2009) para la cuenca de río Urola en Guipúzcoa o Foudi *et al*. (2015), para el río Ebro en la ciudad de Zaragoza y algunos municipios cercanos.

Asimismo, debe tenerse en cuenta que, tanto la evolución socioeconómica como la evolución climática pueden tener un efecto sobre esta estimación del riesgo. Posibles actuaciones encaminadas a reducir este riesgo de inundación deben ir acompañadas de estudios que indiquen los efectos que van a tener sobre este riesgo, si van a reducir la exposición, la vulnerabilidad o ambos y cómo va a afectar su implementación a las curvas de probabilidad-daño y al daño anual esperado. O si algunas medidas van a mejorar algún aspecto, pero van a perjudicar otro, teniendo un efecto incierto sobre el riesgo de inundación.

3. Gestión de inundaciones

La gestión de inundaciones está generalmente orientada a la reducción del riesgo. Por lo tanto, las medidas para reducir el riesgo pueden dirigirse a uno o varios de los elementos que determinan este riesgo: peligrosidad, exposición y vulnerabilidad. Así, para protegerse del riesgo de inundación pueden adoptarse medidas tales como la construcción de diques y defensas estructurales, que están generalmente orientadas a reducir o controlar la peligrosidad de algunas inundaciones, u otras medidas como la instauración de sistemas de alerta

temprana o la ordenación del territorio, que están orientadas a reducir la exposición y la vulnerabilidad. Asimismo, las medidas de autoprotección tales como evitar ubicar las habitaciones principales en la planta baja, instalar bombas para el agua en los edificios, tener sacos de arena en viviendas y negocios o suscribir seguros contra inundaciones, están más orientadas a reducir la vulnerabilidad de los elementos expuestos (Foudi y Osés-Eraso, 2014; Merz, 2010; Richert *et al*., 2016; Richert *et al*., 2019).

Existen distintas clasificaciones para estas medidas. Foudi y Osés-Eraso (2014) las clasifican en medidas institucionales, medidas de infraestructura, medidas medioambientales y medidas socioeconómicas, y señalan qué elemento o elementos del riesgo de inundación, peligrosidad, exposición y/o vulnerabilidad, se ven afectados. Richert *et al*. (2016) clasifican las medidas en acciones públicas y acciones privadas. Así la gestión de inundaciones puede promover medidas adoptadas de forma individual o privada, como tener sacos de arena en viviendas y negocios, o centrarse en el desarrollo de medidas públicas, tales como la construcción de diques o los sistemas de alarma. El Real Decreto 903/2010 de evaluación y gestión de riesgos de inundación que traspone al ordenamiento jurídico español la directiva comunitaria (BOE, 2010) distingue entre medidas estructurales y medidas no estructurales. Las primeras actúan sobre los mecanismos de generación, acción y propagación de las avenidas alterando sus características hidrológicas o hidráulicas y consisten, principalmente en la construcción de infraestructuras. Las segundas modifican la susceptibilidad de la zona inundable frente a los daños por inundación como planes de protección civil, la implantación de sistemas de alerta o medidas de ordenación del territorio.

Para cualquiera de estas medidas, es importante analizar cómo afectan a la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad y, por lo tanto, cómo modifican el riesgo de inundación. Su efecto se verá reflejado en cambios en la curva de probabilidad-daño y también en el daño anual esperado.

La primera de las medidas que aquí analizamos, construcción de infraestructuras de contención, es una medida estructural, de acuerdo con el Real Decreto 903/2010, una medida de infraestructura con el objetivo de alterar la peligrosidad, de acuerdo con Foudi y Osés-Eraso (2014) y una medida de protección colectiva dentro de la acción pública según (Richert *et al*. (2016). La segunda de las medidas que analizamos, instauración de sistemas de alerta temprana, es una medida no-estructural de acuerdo con el Real Decreto 903/2010, una medida institucional con el objetivo de alterar la exposición y la vulnerabilidad, de acuerdo con Foudi y Osés-Eraso (2014) y una medida de protección colectiva dentro de la acción pública según (Richert *et al*., 2016).

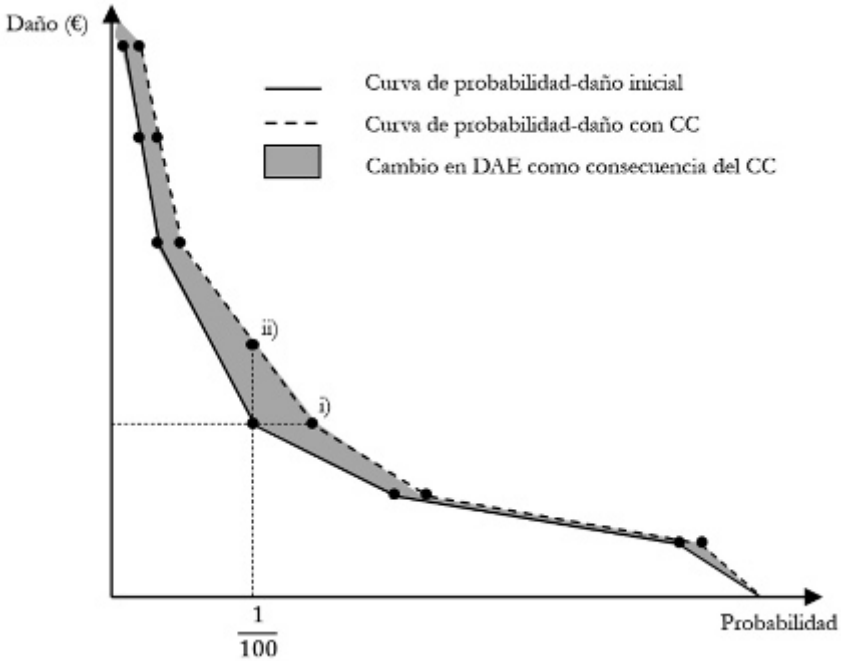
Estas medidas afectan de forma distinta al riesgo de inundación medido por las curvas de probabilidad-daño y el daño anual esperado. Además, sus efectos a corto plazo pueden ser diferentes a sus efectos a largo plazo. Una correcta gestión del riesgo de inundación necesita analizar si los efectos que se consiguen en el corto plazo, normalmente una reducción del riesgo de inundación, se mantendrán en el largo plazo. Cada medida tiene sus peculiaridades en este aspecto, pero todas ellas tienen un rasgo en común, su posible resiliencia o no, ante el cambio climático.

3.1. Cambio climático

De acuerdo con algunas predicciones climáticas, la frecuencia de inundaciones extremas está aumentando, aunque todas estas predicciones no están exentas de dificultades e incertidumbres (Milly *et al*., 2002; Palmer y Räisanen, 2002; Kundzewicz y Schellnhuber, 2004; Kleinen y Petschel-Held, 2007). La mayor magnitud y frecuencia de eventos de precipitación intensa contribuirán a un aumento en el riesgo de inundaciones provocadas por este tipo de lluvia, sobre todo las inundaciones repentinas. Además, los cambios provocados por el cambio climático en las precipitaciones y, en consecuencia, sobre las inundaciones no van a ser homogéneos entre distintas zonas del mundo, en general y dentro de Europa, en particular (Feyen *et al*., 2012, Guerreiro *et al*., 2018). Aunque algunos estudios se centran en eventos con probabilidad de ocurrencia media-baja (eventos con período de retorno mayor de 100 años) como Milly *et al*. (2002), otros también analizan eventos con probabilidad de ocurrencia alta (eventos con período de retorno 10) por ejemplo, en el caso de Guerreiro *et al*. (2018).

En el análisis de riesgo de inundación con curvas de probabilidad-daño, los posibles efectos del cambio climático en la frecuencia de inundaciones pueden analizarse desde dos perspectivas. Dada una inundación con período de retorno actual t_r, los cambios en la frecuencia de inundaciones pueden verse (i) como cambios en el período de retorno de dicha inundación o (ii) como cambios en la magnitud de una inundación con dicho período de retorno (Arnell y Gosling, 2016). La Figura 2 representa una curva de probabilidad daño en la situación de partida (línea continua) y en una situación en la que el cambio climático aumenta el riesgo de inundación (línea discontinua). Los puntos señalados como i) y ii) representan las dos interpretaciones señaladas anteriormente para los cambios en la frecuencia como consecuencia del cambio climático, en este caso para una inundación de período de retorno 100 años. Por otro lado, el área sombreada representa el aumento en el daño anual esperado como consecuencia de las alteraciones en la frecuencia de las inundaciones provocadas por el cambio climático. En el caso representado, el aumento en el DAE se debe, principalmente a cambios en los eventos con probabilidad media-baja que, según algunos análisis son los más afectados por el cambio climático (Milly *et al*., 2002).

Figura 2
Efectos del cambio climático



Fuente: elaboración propia.

3.2. Medidas estructurales de defensa contra inundaciones

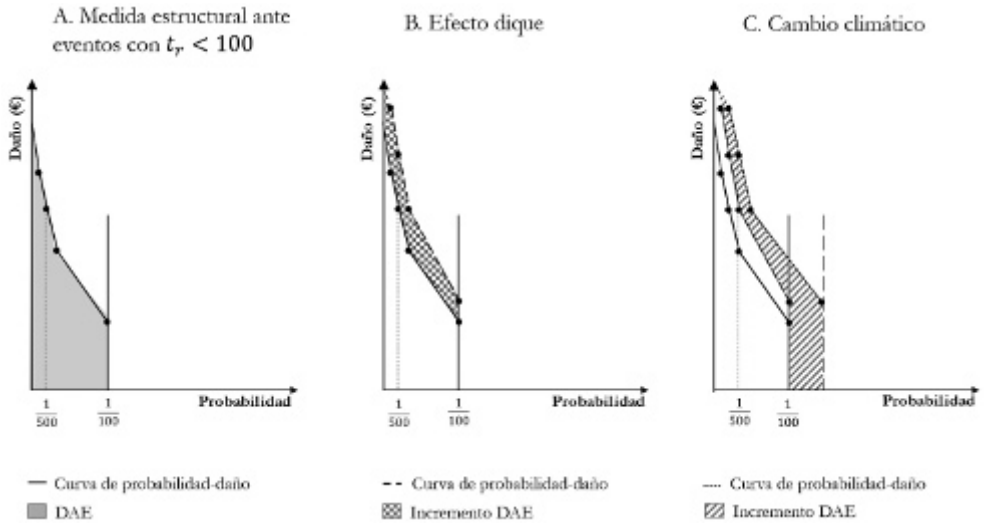
Las medidas estructurales se engloban dentro del enfoque tradicional de la ingeniería para el control de inundaciones y plantea medidas técnicas o diseño de infraestructuras para evitar inundaciones, como la construcción de diques de contención o el encauzamiento de ríos. Este tipo de medidas de defensa contra inundaciones se diseñan normalmente para controlar las inundaciones hasta un determinado período de retorno (Merz, 2010; Schumann, 2017). Como consecuencia, el riesgo restante, es decir, la posibilidad de que ocurra una avenida que sobrepase estas medidas técnicas, debe considerarse en los planes de gestión de riesgo de inundaciones junto con la posibilidad de que haya fallos en la protección que estas medidas proveen (Schumann, 2017). Cabe señalar que, durante décadas, este tipo de actuaciones eran las más habituales en la gestión de riesgo de inundación (Schumann, 2017; Perles Roselló, 2018), antes de la introducción del análisis integral del riesgo (Comisión Europea, 2007) y, en estos momentos, también se considera una medida útil en algunas demarcaciones geográficas con ciertas características de peligrosidad.

En la Figura 2A, se muestra el efecto que una medida estructural de defensa ante inundaciones de período de retorno inferior a 100 años tiene sobre la curva de probabili-

dad-daño y sobre el DAE. Los daños asociados a inundaciones con $t_r < 100$, desaparecen y la curva de probabilidad-daño sólo se estima para valores superiores a este. Como consecuencia, hay una reducción del daño anual esperado, ya que sólo queda la parte correspondiente a los eventos con período de retorno superior al protegido por la medida estructural. Así, es importante observar que las inundaciones que quedan fuera de la protección de estas medidas técnicas son las avenidas más severas, con baja probabilidad de ocurrir pero que generan los daños más cuantiosos. Sin embargo, esta es solo una visión a corto plazo de las consecuencias de estas medidas.

Figura 3

Medida estructural para prevenir avenidas con $t_r < 100$



Fuente: elaboración propia.

Una vez implementadas, las medidas estructurales de defensa contra inundaciones pueden generar una falsa sensación de seguridad que lleve a pensar que el riesgo de inundación ha desaparecido. Esto puede hacer que se reactive la actividad socioeconómica en la llanura de inundación. Como consecuencia, puede darse tanto un aumento de elementos expuestos al riesgo como un aumento de la vulnerabilidad al descuidar las medidas protectoras básicas (Merz, 2010, Richert *et al*., 2019). Este efecto se conoce como «efecto dique» (*levee effect*). En el diseño de políticas de gestión de inundaciones, el efecto dique puede ser importante ya que puede disminuir de forma considerable los beneficios inicialmente asociados a la medida estructural. En la Figura 3B se muestra cómo el efecto dique desplaza la curva de probabilidad-daño hacia arriba; para cada período de retorno no protegido, el daño potencial es mayor como consecuencia de un aumento de la exposición y la vulnerabilidad. Con el efecto dique, el daño anual esperado es mayor que el estimado para la me-

dida estructural bajo las condiciones de exposición y vulnerabilidad en el momento de la construcción. Por lo tanto, el análisis coste-beneficio de las medidas estructurales debería considerar este posible efecto dique que puede reducir e incluso revertir los beneficios tradicionalmente asociados a este tipo de actuaciones.

Además, teniendo en cuenta que el daño anual esperado tras las medidas estructurales corresponde a eventos con probabilidad media-baja, es decir, eventos más severos, el cambio climático también podría afectar a la valoración del riesgo. Como ya hemos señalado anteriormente, de acuerdo con algunas predicciones climáticas, la frecuencia de eventos extremos está aumentando (Milly *et al*., 2002; Palmer y Räisanen, 2002; Kundzewicz y Schellnhuber, 2004; Kleinen y Petschel-Held, 2007). Así, en un contexto de cambio climático, el daño restante que dejan estas infraestructuras puede ser mayor que el estimado en el momento de su construcción. Las medidas de defensa que actualmente son suficientes para defenderse contra un evento de inundación de 100 años solo pueden representar una defensa adecuada contra un evento de 70 años para la década de 2080 (Feyen *et al*., 2012). Esto puede aumentar el daño anual esperado con respecto a la situación de partida y el efecto dique. En la Figura 3C puede verse cómo la medida estructural deja de ser efectiva para períodos de retorno inicialmente protegidos ya que aumenta la probabilidad de ocurrencia de los eventos extremos. Cabe recordar que este efecto puede ser diferente dependiendo de la zona analizada ya que el efecto del cambio climático no es homogéneo.

En resumen, un análisis de medidas estructurales contra inundaciones debería considerar a) el riesgo de partida (daño anual esperado restante tras la construcción de la infraestructura), b) el aumento del riesgo por cambios en vulnerabilidad y exposición por el efecto dique, c) el posible aumento del riesgo por la alteración en la frecuencia de inundaciones como consecuencia del cambio climático.

3.3. Medidas no estructurales

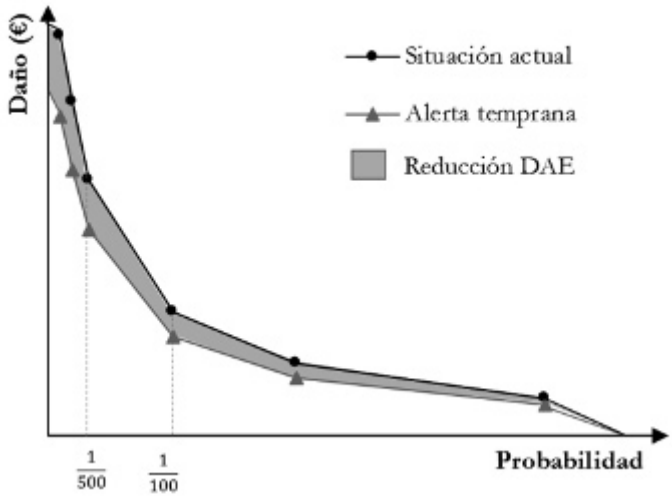
Las *medidas no estructurales* no actúan sobre la avenida en sí, pero tienen por objetivo modificar la exposición y la vulnerabilidad de la zona inundable. Son diversas las medidas que pueden considerarse como no-estructurales. Por ejemplo, medidas de ordenación del territorio. En ocasiones, el desconocimiento del riesgo lleva a tomar decisiones no adecuadas en las llanuras de inundación, como la construcción de viviendas en zonas con alta probabilidad de inundación. Las restricciones en los usos del suelo pueden reducir considerablemente los riesgos asociados a las avenidas más frecuentes. Pero, en muchos casos, estas medidas son difíciles de implementar cuando planificaciones urbanísticas pasadas han ocupado importantes llanuras de inundación (Berga Casafont, 2011).[4] Otras medidas no estructurales pueden ser los planes de protección civil y los sistemas de emergencias y evacuación que pueden intervenir en el momento de la avenida, reduciendo la vulnerabilidad sobre todo de las personas afectadas. También los sistemas de alerta temprana han sido propuestos como una medida no-estructural que puede ayudar a reducir los daños asociados a las inundaciones y, por lo tanto, reducir los riesgos. Un buen sistema de alarma pone sobre

aviso a las personas que viven en zonas inundables y, si el tiempo comprendido entre el aviso y la llegada de la avenida a una determinada zona es suficiente, estas pueden tomar medidas de autoprotección como retirar objetos de plantas bajas, sellar puertas y ventanas, colocar adecuadamente sacos de arena, entre otras. Por lo tanto, un sistema de alerta temprana necesita ser acompañado de un programa educativo-informativo que explique cómo entender la información suministrada y cómo reaccionar ante dicha información (Merz *et al.*, 2010; Berga Casafont, 2011).

Al contrario de lo que ocurre con las infraestructuras para contener las inundaciones analizadas anteriormente que eliminan el riesgo de inundación para determinados períodos de retorno, un sistema de alerta temprana puede reducir los daños para todos los períodos de retorno, aunque no elimina el riesgo para ninguno de ellos. Así, un sistema de alerta temprana puede desplazar la curva de probabilidad-daño hacia abajo, es decir, reduce los daños para cualquier período de retorno. Este potencial desplazamiento puede observarse en la Figura 4 con la consiguiente reducción del daño anual esperado.

Figura 4

Sistemas de alerta temprana



Fuente: elaboración propia.

Los sistemas de alerta temprana, sin embargo, no funcionan igual en todas las cuencas hidrográficas. En aquellos lugares en las que hay predominantemente inundaciones repentinas, el margen para la alerta temprana es muy limitado y los potenciales beneficios de este sistema también lo son. Sin embargo, distintos estudios tratan de avanzar en la caracterización de este tipo de inundaciones para poder mejorar las predicciones y conseguir sistemas de alerta temprana eficaces (Borga *et al*., 2011).

Es importante señalar que, en muchos lugares, las medidas para reducir el riesgo de inundaciones son varias. Se combinan medidas colectivas estructurales con medidas colectivas no-estructurales y se intenta fomentar también la iniciativa privada en la protección. En algunas ocasiones, unas medidas expulsan otras, como hemos visto en el caso del efecto dique por lo que combinarlas y motivar a los ciudadanos hacia la autoprotección no siempre es fácil (Ritcher *et al*., 2019).

4. Ejemplo: riesgo de inundación en Bilbao y apertura del canal de Deusto

Históricamente, la ciudad de Bilbao ha sufrido inundaciones de diversa consideración, siendo la más catastrófica la ocurrida en 1983. El proceso de urbanización e industrialización del Bilbao y de todo el valle del Nervión en las décadas de los 60, 70 y 80 incrementó la exposición y vulnerabilidad de la zona ante inundaciones (Ibisate *et al*., 2000) y la avenida de 1983 generó cuantiosas pérdidas materiales y la pérdida de vidas humanas. Como señalan Perles Roselló *et al*. (2018), las regiones de España que habían padecido eventos de inundación importantes, como es el caso del País Vasco, fueron las primeras en elaborar cartografía oficial de peligrosidad de inundaciones en los primeros años 90. Desde entonces, en el País Vasco se han elaborado diferentes estudios hidráulicos para analizar el riesgo de inundación, algunos de ellos bajo el auspicio de la Directiva de inundaciones de la Comisión Europea.

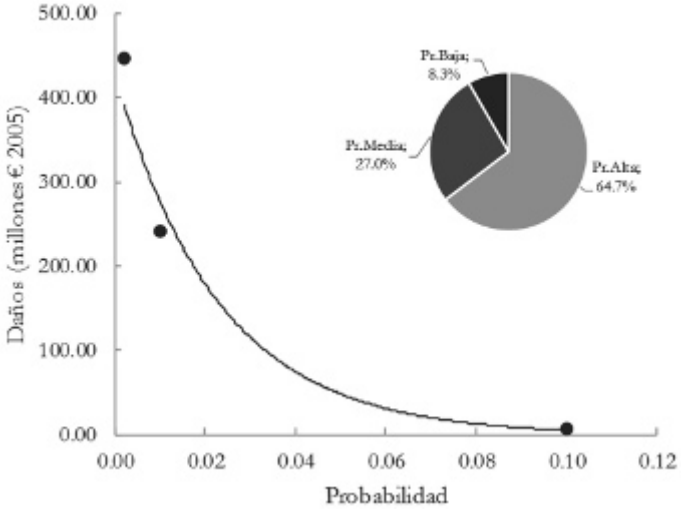
Boyd y Hunt (2006) realizaron un estudio de valoración de daños por inundación para la ciudad de Bilbao basado en un análisis de exposición y vulnerabilidad ante tres posibles eventos: período de retorno 10 años (escenario de probabilidad alta), período de retorno 100 años (escenario de probabilidad media) y período de retorno 500 años (escenario de probabilidad baja). Los mapas de peligrosidad utilizados para este estudio provenían de los trabajos realizados por Sener Ingeniería y Sistemas, S.A., empleando el modelo HEC-RAS 3.0 (Hydrologic Engineering Center River Analysis System) que describían la situación en el año 2005. En este análisis del riesgo de inundación, se incluyeron daños directos sobre la propiedad, tanto propiedad residencial como no-residencial, así como una estimación de daños en salud, tanto directos (fallecimientos y heridos) como indirectos (trastornos posteriores como ansiedad), una estimación de costes de servicios de emergencia o las pérdidas por suspensión temporal de actividad económica. En su estimación más conservadora, en el año 2005, los daños ocasionados por un evento de período de retorno de 10 años podrían ascender en Bilbao a 5.5 millones de euros, los daños ocasionados por un evento de período de retorno de 100 años a 241.3 millones de euros y los daños ocasionados por un evento de inundación de 500 años a 444.3 millones de euros, todas estas cifras a precios de 2005.[5]

Aunque estos autores sólo proveen datos para estos tres períodos de retorno, se puede realizar una estimación de la curva de probabilidad-daño y del daño anual esperado. La Figura 5 recoge una aproximación exponencial a la curva de probabilidad-daño basada en estas estimaciones. El daño anual esperado correspondiente a esta curva es de 9.8 millones

de euros (precios de 2005).[6] Analizando los escenarios propuestos en la Directiva europea relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, el 64.7% de este daño anual esperado proviene de escenarios de probabilidad alta de ocurrencia, es decir, período de retorno inferior a 100 años, el 27% corresponde a escenarios de inundación de probabilidad media mientras que el 8.3% restante se debe a escenarios de probabilidad baja, es decir, eventos extremos de período de retorno superior a 500 años. Por lo tanto, las inundaciones que más contribuyen al DAE en Bilbao son las del escenario de alta probabilidad de ocurrencia.

Figura 5

Curva de probabilidad-daño y DAE. Estimaciones para Bilbao



Fuente: elaboración propia, con datos de Boyd y Hunt (2006).

A finales de 2012, el ayuntamiento de Bilbao aprobó de forma definitiva el Plan Especial de Ordenación Urbana de Zorrotzaurre, plan que incorpora acuerdos para la supresión de los rellenos del canal de Deusto y convertir así la península de Zorrotzaurre en una isla. Esta transformación se completó en el año 2018. Uno de los objetivos de esta apertura del canal de Deusto era la reducción del riesgo de inundación en la ciudad de Bilbao. Así, se realizó un análisis de la influencia de la apertura del canal y de su anchura en los niveles de inundación. Las estimaciones realizadas cuantifican que el desagüe adicional conseguido con esta apertura permite reducir la altura de la lámina de agua en una potencial inundación en un intervalo que se mueve entre los 1,07 y los 0,70 metros.

Uno de los factores más relevantes en las estimaciones de Boyd y Hunt (2006) es, precisamente, la altura alcanzada por la lámina de agua. La vulnerabilidad de los elementos expuestos al riesgo de inundación depende de factores como la duración de la inundación,

la velocidad de la avenida o la altura del agua. Por ello, cuantificamos el efecto que la reducción de la lámina de agua tiene en los daños potenciales por inundación de cada uno de los períodos de retorno. En cada período de retorno, se analizan las zonas que dejan de estar expuestas, así como la reducción de la vulnerabilidad de los distintos elementos: propiedad residencial y no-residencial, personas, sistemas de transporte y otros. El Cuadro 1 recoge tanto los datos de la situación de partida (Boyd y Hunt, 2006) como los resultados de estas estimaciones para los dos extremos del intervalo de reducción de la lámina de agua con la apertura del canal, 1.07 metros y 0.7 metros.

Cuadro 1

Riesgo de inundación. Estimaciones para Bilbao (millones de Euros precios 2005)

Período de retorno	Situación de partida[(a)]	Canal (–0.7 metros)[(b)]	Canal (–1.07 metros)[(b)]
10 años	5.5	–	–
100 años	241.3	96.4	64.6
500 años	444.3	340.9	264.5
DAE	9.8	3.0	2.2

(a) Estimaciones de Boyd y Hunt (2006); (b) Estimaciones propias a partir de Boyd y Hunt (2006).

Como puede observarse, esta actuación sobre el canal de Deusto elimina el riesgo de inundación en el período de retorno de 10 años, para todo el intervalo de reducción de la lámina de agua considerado. La valoración del riesgo de inundación se reduce de forma notable para los otros dos períodos de retorno, pero no se elimina. En el caso del período 100 años, la valoración del riesgo de inundación se reduce entre un 60% y un 73%, pasando de estar en 241 millones a situarse entre 96.4 y 64.6 millones. Asimismo, para una inundación de período de retorno de 500 años, la estimación del riesgo de inundación también se reduce, pero en menor porcentaje. El efecto de la apertura del canal de Deusto se queda entre un 23% y un 40% por debajo de la estimación de partida, pasando de 444 millones de euros a situarse entre 340 y 264 millones de euros.

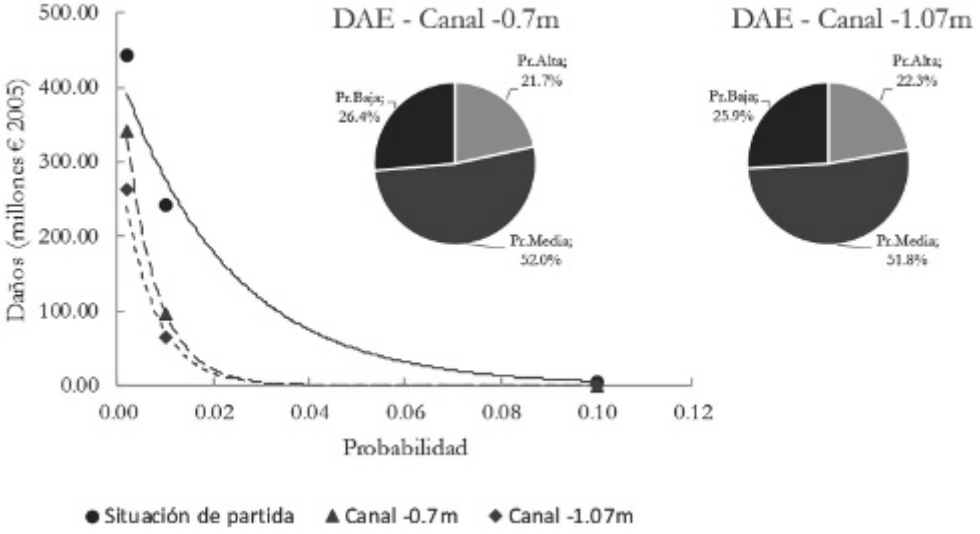
Calculando las curvas de probabilidad-daño en base a estas nuevas estimaciones (ver Figura 6), observamos cómo la apertura del canal de Deusto desplaza la curva hacia abajo, reduciendo la estimación del daño para cualquier período de retorno. De hecho, se reduce el daño anual esperado entre un 70 y un 78%, pasando de 9.8 millones de euros a estar entre 2.2 y 3 millones de euros (ver Cuadro 1).

Es interesante observar cómo esta medida estructural para el control de inundaciones modifica la contribución que cada posible escenario de inundación tiene sobre este daño anual esperado. Así, con la apertura del canal de Deusto, el escenario de probabilidad media, inundaciones de período de retorno entre 100 y 500 años, es el que más peso tiene, alrededor del 50%, cuando antes de la intervención era del 27%. También aumenta el peso en este DAE de los eventos extremos, que representan aproximadamente el 22% frente al 8% inicial. Por lo tanto, la contribución que más se reduce es la del escenario de probabilidad alta y

bajo período de retorno. Estos escenarios son los que alcanzan láminas de agua más bajas y, por lo tanto, en algunos casos la apertura del canal incluso elimina el riesgo, como hemos visto anteriormente para el período de retorno 10 años. Aun así, los eventos de inundación más frecuentes siguen teniendo un peso importante, aproximadamente el 26%, en el cálculo del DAE.

Figura 6

Curva de probabilidad-daño y DAE. Estimaciones para Bilbao tras la apertura del canal de Deusto



Fuente: elaboración propia.

Esta estimación del riesgo está sujeta a una importante incertidumbre epistémica debida a que se basa en la modelización de las inundaciones de 3 períodos de retorno, 10, 100, 500 años. Cambios en la relación entre el período de retorno y la altura del agua, el principal componente de peligrosidad de este análisis, muestra que tanto el DAE como el peso de las probabilidades bajas, medias y altas cambian significativamente. Con la simulación de 6 períodos de retorno adicionales[7], el DAE se reduciría un 55-70% frente al 70-78% del caso con tres períodos de retorno. Más importante es observar (ver Cuadro 2) cómo el peso de los eventos frecuentes en el DAE, con probabilidad altas o con períodos de retorno bajo, cambiarían de un 21-22% (Figura 6) a un 34-43%. Eso modificaría profundamente el tipo de política de prevención del riesgo a implementar.

Cuadro 2

Riesgo de inundación con 6 períodos de retorno adicionales simulados

	Partida	Canal (–0.7 metros)	Canal (–1.07 metros)
DAE (millones de euros)	8.3	3.7	2.5
Porcentajes de reducción		55.4%	69.8%
Peso de probabilidades			
Baja	8.6%	15.5%	19.3%
Media	27.7%	41.4%	46.5%
Alta	63.6%	43.1%	34.2%

Fuente: elaboración propia.

Es importante observar que la apertura del canal de Deusto reduce el riesgo de inundación, pero no lo evita, salvo para algunos períodos de retorno. Sigue habiendo un riesgo remanente que debe tenerse en cuenta. [8] De otro modo, la creación de una falsa sensación de seguridad puede relajar las medidas de autoprotección tomadas por los habitantes de las zonas inundables, aumentando su vulnerabilidad, e incluso puede provocar un efecto dique, aumentando el número de elementos expuestos al riesgo de inundación y posteriormente la vulnerabilidad de esos elementos, tal y como muestran Richert *et al*. (2019) en otros contextos. Estos factores pueden volver a aumentar el DAE en Bilbao, compensando las mejoras obtenidas con la apertura del canal de Deusto. La evolución urbanística de la zona, así como su desarrollo socioeconómico en los próximos años, serán determinantes para evaluar el efecto final de la apertura del canal de Deusto en el riesgo de inundación de Bilbao.

El desarrollo urbanístico y socio-económico puede asociarse con un plan de prevención de riesgo de inundación con el fin de fomentar la adopción de medidas de prevención y reducir los daños esperados tal y como está ilustrado en la Figura 4. Esos planes tienen la capacidad de fomentar acciones privadas de prevención (Richert *et al*., 2019). Las acciones privadas se aplican tanto a la hora de edificar como después de la edificación. Se refieren a la elevación del suelo, el uso de materiales resistentes al agua, tener bombas de agua, puertas y ventanas anti-inundación, un seguro. La colocación en altura de los sistemas eléctrico y de calefacción permite también reducir los daños (Poussin *et al*., 2015). Las medidas privadas, como las públicas, están destinadas a limitar el impacto de una inundación con una cierta probabilidad de ocurrencia. Si en el caso de la apertura del canal de Deusto, los daños de probabilidad alta estarían evitados por la obra, las medidas privadas podrían tratar daños por inundaciones menos frecuentes para complementar la medida pública.

Varios factores motivan las acciones privadas de protección. La evaluación de la amenaza de las inundaciones (tanto las consecuencias como la probabilidad de ocurrencia) es uno de los motores de la toma de medidas de prevención, como establece la Teoría de Motivación a Protegerse[9] (Grothmann y Reusswig, 2006; Richert *et al*., 2016), junto a la percepción de la eficacia de dichas medidas y la experiencia frente a las inundaciones. La confianza en la protección por medidas públicas, estructurales o de compensación por pér-

didas es otro factor, pero tiende a que las medidas públicas sustituyan a las medidas privadas y contribuye explicar el efecto dique. Este efecto confiere a los planes de prevención y de gestión de riegos el papel de reducir el efecto dique y fomentar las acciones privadas de prevención, tanto por los hogares como por el sector socio-económico.

5. Conclusiones

La gestión del riesgo de inundación pasa por una evaluación previa de este riesgo, evaluación que implica la estimación de la peligrosidad de las avenidas y el análisis de la exposición y la vulnerabilidad de los elementos en riesgo. Las curvas de probabilidad daño y el daño anual esperado son unos indicadores del riesgo cuyos cambios frente al cambio climático, frente a medidas de prevención estructurales o no estructurales y/o frente a efectos inesperados como el efecto dique, se han presentado en este trabajo. Un ejemplo, con la apertura del canal de Deusto en Bilbao, ilustra cómo el riesgo se modifica con una medida estructural y permite discutir el papel de las medidas no estructurales.

Los planes de gestión del riego pueden girar en torno a varios tipos de medidas, estructurales, no estructurales, públicas y/o privadas. Las medidas estructurales, como la construcción de diques o presas, se establecen para eliminar el riesgo de inundaciones hasta cierto período de retorno. Sin embargo, estas medidas tienden a crear una excesiva sensación de protección conocida como el efecto dique. El resultado es una mayor exposición y vulnerabilidad detrás del dique: mayor acumulación de riqueza y, posiblemente, menores medidas de protección por parte del sector privado, tanto ciudadanos como sector socio-económico. Las medidas no estructurales, como la ordenación territorial, los planes de protección civil y los sistemas de alerta, actúan sobre la exposición y la vulnerabilidad. De esta forma, estas medidas pueden reducir los daños para todos los períodos de retorno, aunque su eficacia está condicionada a la buena aplicación de las medidas, a la colaboración del sector privado y a su puesta en práctica de forma sostenida en el tiempo. La implicación del sector privado a través de un programa educativo-informativo que explique cómo actuar y qué tipo de medidas privadas se pueden desarrollar para reducir el riesgo permitiría mejorar la eficacia de la prevención.

El cambio climático también es un factor a tener en cuenta en los planes de gestión de riesgo de inundación. El efecto del cambio climático en el riesgo de inundación se puede interpretar tanto como cambios en el período de retorno de una determinada inundación, generalmente una disminución del período de retorno, es decir, un aumento de la probabilidad de ocurrencia, como cambios en la magnitud de los daños generados por una inundación con un determinado período de retorno, generalmente un incremento de los daños. Así, las obras estructurales de protección cubrirán períodos de retorno menores de lo inicialmente previsto. Se esperarán daños más frecuentes y/o más altos, y además inflados por el efecto dique. Las medidas no estructurales tendrán un papel más relevante en la gestión del riesgo en un contexto de cambio climático ya que permitirían reducir los daños de todos los períodos de retorno.

Existen también interacciones entre medidas estructurales públicas y medidas no estructurales, tanto públicas como privadas. El desarrollo de medidas estructurales, como la apertura de un canal o la construcción de un dique, modifican el riesgo remanente y el peso de los diferentes períodos de retorno en el daño anual esperado. Las medidas de prevención no estructurales, deben entonces adecuarse a la naturaleza del riesgo remanente para tener como objetivo los períodos de retornos adecuados con el fin de evitar duplicar la prevención del riesgo. Además, el exceso de confianza en las medidas públicas tiende a expulsar las medidas privadas. Asociar a una obra estructural un plan de prevención que, bajo el impulso de la Administración, fomente medidas no estructurales públicas, como un sistema de alerta temprana, pero también fomente medidas no estructurales privadas, dando a conocer los riesgos de vivir en determinadas zonas y lo que cada uno puede hacer individualmente para protegerse, puede complementar la prevención del riesgo, reducir el efecto dique y contribuir a la adaptación al cambio climático.

Notas

1. En España, históricamente se han elaborado mapas relacionados con las inundaciones, sobre todo cartografía de zonas afectadas por inundaciones, aunque solo en los últimos años se han comenzado a elaborar mapas de riesgo que incorporan peligrosidad, exposición y vulnerabilidad (Olcina Cantos y Díez-Herrero, 2017).
2. Los mapas de peligrosidad de las distintas demarcaciones geográficas españolas pueden consultarse en la página web del Ministerio para la Transición Ecológica, https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/mapa-peligrosidad-riesgo-inundacion/, acceso 29 de junio de 2020.
3. El Real Decreto 903/2010 de evaluación y gestión de riesgos de inundación (BOE, 2010) distingue entre zona inundable (período de retorno 500 años) y zona de flujo preferente (período de retorno 100 años).
4. Berga Casafont (2011) señala que en circunstancias en las que hay ocupaciones extensas de la llanura de inundación que hacen imposible las restricciones de los usos del suelo o incluso otras medidas no estructurales, las medidas estructurales pueden ser una alternativa altamente viable.
5. Boyd y Hunt (2006) señalan que las inundaciones que tuvieron lugar en Bilbao en agosto de 1983 provocaron alrededor de 361,07 millones de euros en daños (precios de 1983). Estos daños corresponden a más de 1000 millones de euros en el año 2005. Comparando con sus estimaciones, señalan que dichas inundaciones superaron fácilmente el período de retorno de 500 años.
6. Esta cifra corresponde aproximadamente a 12 millones a precios de 2019.
7. Se simulan los períodos de retorno 25, 55, 75, 300, 300, 400 asumiendo una relación cóncava entre el período de retorno y la altura del agua alcanzada en dichas inundaciones.
8. Así lo indican desbordamientos ocurridos en Bilbao tras esta apertura, https://cadenaser.com/emisora/2019/01/24/radio_bilbao/1548314892_765380.html; https://www.naiz.eus/es/actualidad/noticia/20190125/el-ayuntamiento-se-defiende-diciendo-que-quedan-obras-pendientes-para-evitar-inundaciones.
9. Del inglés *Protection Motivation Theory* (Grothmann and Reusswig, 2006).

Referencias

Arnell, N. W. y Gosling, S. N. (2016). «The impacts of climate change on river flood risk at the global scale». *Climatic Change* 134: 387-401.

Benito, G., Barriendos, M., Llasat, C., Machado, M. y Thorndycraft, V. (2005). «Impactos sobre los riesgos naturales de origen climático. Riesgo de crecidas fluviales», en *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*, Moreno, J. M. (coord.), Ministerio de Medio Ambiente.

Berga Casafont, L. (2011). «Las inundaciones en España. La nueva Directiva Europea de inundaciones». *Revista de Obras Públicas*, n.º 3.520: 7-18.

BOE (2010). «Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación». *Boletín Oficial del Estado*, jueves 15 de julio de 2010.

Borga, M; Anagnostou, E. N.; Blöschl, G.; Creutin, J.-D. (2011). «Flash flood forecasting, warning and risk management: the HYDRATE project». *Environmental Science & Policy*, 14: 834-844.

Boyd R.; Hunt, A. (2006): *Costing the local and regional impacts of climate change using the UKCIP costing methodology*, Metroeconomica Limited.

CRED (2018). *Economic losses, poverty &disasters (1998-2017)*. UNISDR y CRED report.

Comisión Europea (2007). Directiva 2007/60/EC del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2007 relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación. http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/index.htm. Acceso junio 2018.

Feyen, L., Dankers; r. Bódis, K., Salamon, P. Barredo, J. I. (2012). «Fluvial flood risk in Europe in present and future climates». *Climatic Change* 112:47-62.

Foudi, S. and Osés-Eraso, N. (2014). «Flood risk management: assessment for prevention with hydro-economic approaches». In: Markandya, A., Galarraga, I., Sainzde Murieta, E. (eds.), *Routledge Handbook of the Economics of Climate Change Adaptation*. Taylor & Francis.

Foudi, S., Osés-Eraso, N. and Galarraga, I. (2017). «The effect of flooding on mental health: lessons learned for building resilience». *Water Resources Research*, 53: 5831-5844.

Foudi, S., Osés-Eraso, N, Tamayo, I. (2015). «Integrated spatial flood risk assessment: The case of Zaragoza». *Land Use Policy* 42: 278-292.

García Codron, J. C. (2004). «Las ciudades españolas y el riesgo de inundación: permanencia y cambio de un problema crónico», *Boletín de la A.G.E.*, 37:85-99.

Grothmann, T., Reusswig, F., 2006. «People at Risk of Flooding: Why Some Residents Take Precautionary Action While Others Do Not». *Nat Hazards* 38, 101-120. https://doi.org/10.1007/s11069-0.

Guerreiro, S. B., Dawson, R. J., Kilsby, C., Lewis, E., Ford, A. (2018). «Future heat-waves, droughts and floods in 571 European cities». *Environmental Research Letters* 13 (2018).

Merz, B., Elmer, F. and Thieken, A. H. (2009). «Significance of "high probability/low damage" versus "low probability/high damage" flood events». *Natural Hazards and Earth Systems Science* 9: 1033-1046.

Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R. and Thieken, A. (2010). «Assessment of economic flood damage». *Natural Hazards and Earth Systems Science*, 10, 1697-1724.

Kron, W. 2002. «Flood risk = hazard x exposure x vulnerability. Flood defence», Wu *et al*. (eds.), Science Press, New York Ltd.

Olcina Cantos, J.; Díez-Herrero, A. (2017). «Cartografía de inundaciones en España». *Estudios Geográficos*, Vol. 78 (282): 283-315.

Olsen, A. S., Zhou, Q. Linde, J. J., Arnbjerg-Nielsen, K. (2015). «Comparing Methods of Calculating Expected Annual Damage in Urban Pluvial Flood Risk Assessments». *Water*, 7, 255-270.

Penning-Rowsell, E., Johnson, C., Tunstall, S., Tapsell, S., Morris, J., Chatterton, J. and Green, C. (2005). *The benefits of flood and coastal risk management: A handbook of assessment techniques*. Middlesex University Press.

Perles Roselló, M. J., Olcina Cantos, J; Mérida Rodríguez, M. (2018). «Balance de las políticas de gestión del riesgo de inundaciones en España: de las acciones estructurales a la ordenación territorial». *Ciudad y Territorio. Estudios territoriales*, 50 (197): 417-438.

Poussin, J. K., Wouter Botzen, W. J., Aerts, J. C. J. H., 2015. «Effectiveness of flood damage mitigation measures: Empirical evidence from French flood disasters». *Global Environmental Change* 31, 74-84.

Richert, C., Erdlenbruch, K., Figuières, C. (2016). «The determinants of households' flood mitigation decisions in France — on the possibility of feedback effects from past investments». *Ecological Economics* 131: 342-352.

Richert, C., Erdlenbruch, K., Grelot, F. (2019). «The impact of flood management policies on individual adaptation actions: Insights from a French case study». *Ecological Economics* 165: 106387.

Schumann, A. (2017). «Flood Safety versus Remaining Risks — Options and Limitations of Probabilistic Concepts in Flood Management». *Water Resources Management* 31: 3131-3145