

Resumen ejecutivo de los resultados del análisis del impacto del cambio climático en Barcelona desarrollado en el marco del proyecto europeo RESCCUE

Julio del 2021



1	Introducció.....	10
2	Metodologia.....	11
3	Anàlisi dels impactes derivats de les inundacions provocades per episodis de pluja.....	14
3.1	Model d'inundació urbana.....	14
3.2	Risc per a les persones: estabilitat de vianants i vehicles.	20
3.3	Afectació al trànsit.....	45
3.4	Estabilitat dels contenidors de residus sòlids urbans.....	52
3.5	Afectació de les inundacions sobre les propietats i els vehicles: anàlisi dels danys tangibles directes.	60
3.6	Afectació a la qualitat de l'aigua de bany per abocaments al medi receptor	66
3.7	Afectació al sector elèctric.....	73
4	Anàlisi dels impactes derivats de la pujada del nivell del mar: afectació a les platges, infraestructures i serveis costaners	83
5	Anàlisi dels impactes sobre la disponibilitat d'aigua.....	86
6	Conclusions.....	89

Índice de figuras

Figura 1. Metodología utilizada para el desarrollo del análisis de riesgo.	11
Figura 2. Metodología de generación de los mapas de riesgo a partir de la combinación de los mapas de peligrosidad y vulnerabilidad.	12
Figura 3. Comparación entre la lluvia de diseño para el escenario actual (T10) y el escenario futuro (T10 CC) correspondientes al periodo de retorno de 10 años y el horizonte temporal 2071-2100.	15
Figura 4. Comportamiento de la red de alcantarillado en los escenarios actual y futuro (metros de cañerías).	15
Figura 5. Matriz de peligrosidad para peatones (a) y vehículos (b) en función de las variables hidráulicas, velocidad del flujo y calado.	20
Figura 6. Superficie total (en %) de niveles de peligrosidad para peatones para el escenario actual (BAS) y futuro (BAU) con todos los periodos de retorno simulados.	22
Figura 7. Superficie total (en %) de niveles de peligrosidad para vehículos en los escenarios actual y futuro para los periodos de retorno más significativos.	24
Figura 8. Criterios de vulnerabilidad para peatones expuestos a inundaciones urbanas.	25
Figura 9. Criterios de vulnerabilidad para vehículos expuestos a inundaciones urbanas.	25
Figura 10. Niveles de riesgo.	28
Figura 11. Áreas (en %) de alto riesgo para peatones en los escenarios actual y futuro para los periodos de retorno más significativos.	30
Figura 12. Incremento de área (en %) de alto riesgo para peatones previsto por el cambio climático para los periodos de retorno más significativos.	31
Figura 13. Áreas (en ha) de alto riesgo para peatones en los escenarios actual y futuro para los periodos de retorno más significativos en los ejes con una concentración más alta de áreas en riesgo alto.	32
Figura 14. Áreas (en ha) de alto riesgo para peatones en los escenarios actual y futuro para los periodos de retorno más significativos en los ejes con una concentración más alta de áreas en riesgo alto.	33
Figura 15. Áreas (en %) de alto riesgo para vehículos en los escenarios actual y futuro para los periodos de retorno más significativos.	36
Figura 16. Incremento de área (en %) de alto riesgo para vehículos previsto por el cambio climático para los periodos de retorno más significativos.	36
Figura 17. Decremento de área (en %) de alto riesgo para peatones como resultado de las medidas implantadas en los escenarios de adaptación 1 y 2 para los periodos de retorno más significativos.	42
Figura 18. Decremento de área (en %) de alto riesgo para vehículos como resultado de las medidas implantadas en los escenarios de adaptación 1 y 2 para los periodos de retorno más significativos.	42

Figura 19. Decremento de área (en %) de alto riesgo para peatones como resultado de las medidas implantadas en los escenarios de adaptación 1 y 2 para los periodos de retorno más significativos en los ejes con una concentración más elevada de áreas en riesgo alto.....	44
Figura 20. Metodología desarrollada por la Universidad de Exeter para elaborar el modelo de inundación-tráfico.....	45
Figura 21. Longitudes (en %) de calles con velocidad reducida y cerradas por efecto de las inundaciones en la ciudad de Barcelona para los escenarios actual, futuro, de adaptación 1 y 2 y para los periodos de retorno más significativos.....	50
Figura 22. Incremento de longitudes (en %) de calles con velocidad reducida y cerradas por efecto de las inundaciones en la ciudad de Barcelona previsto por el cambio climático y para los periodos de retorno más significativos.....	50
Figura 23. Decremento de longitudes (en %) de calles con velocidad reducida y cerradas por efecto de las inundaciones en la ciudad de Barcelona como resultado de las medidas implantadas en los escenarios de adaptación 1 y 2 para los periodos de retorno más significativos.....	51
Figura 24. Curvas de estabilidad de los contenedores de residuos urbanos en función del grado de llenado.....	53
Figura 25. Número de contenedores (en %) de residuos sólidos urbanos vacíos inestables para los escenarios actual y futuro (izquierda) e incremento de contenedores (en %) vacíos inestables previsto a causa del cambio climático (derecha) para el periodo de retorno T50.....	55
Figura 26. Decrecimiento de contenedores de residuos sólidos urbanos vacíos inestables (en %) como resultado de las medidas implantadas en los escenarios de adaptación 1 y 2, e incorporando las piezas de fijación para los contenedores para el periodo de retorno T50.....	59
Figura 27. Modelo conceptual para la estimación de los daños por inundación sobre las propiedades urbanas Fuente ³ :.....	60
Figura 28. Valor de los daños (M€) a propiedades y vehículos por efecto de las inundaciones en la ciudad de Barcelona para los escenarios actual, futuro y de adaptación 1 y 2 y para los periodos de retorno más significativos.....	64
Figura 29. Incremento del valor de los daños (en %) a propiedades y vehículos por efecto de las inundaciones en la ciudad de Barcelona previsto por el cambio climático y por los periodos de retorno más significativos.....	64
Figura 30. Decrecimiento del valor de los daños (en %) a propiedades y vehículos por efecto de las inundaciones en la ciudad de Barcelona como resultado de las medidas implantadas en los escenarios de adaptación 1 y 2 para los periodos de retorno más significativos.....	65
Figura 31. Ejemplo de simulación de calidad marítima después de un episodio de DSU (rojo = alta concentración de E. coli; azul = baja concentración de E. coli).....	66
Figura 32. Nueva batimetría para el modelo marítimo de Barcelona.....	67
Figura 33. Los tres niveles de mallas anidadas implementadas en el modelo marítimo de Barcelona.....	67
Figura 34. Serie pluviométrica del año medio seleccionado (2009).....	68

Figura 35. Tiempo de incumplimiento (en días) de los valores de contaminación bacteriológica marcados por la Directiva de aguas de baño por temporada de baño como consecuencia de los vertidos en el medio marino para los escenarios actual, futuro y de adaptación 1 y 2 para las playas de Barcelona y valor medio.....	69
Figura 36. Tiempo de incumplimiento (en %) de los valores de contaminación bacteriológica marcados por la Directiva de aguas de baño por temporada de baño como consecuencia de los vertidos en el medio marino para el escenario actual, futuro y de adaptación 1 y 2 para las playas de Barcelona y valor medio.....	69
Figura 37. Decrecimiento del tiempo de incumplimiento (en %) de los valores de contaminación bacteriológica marcados por la Directiva de aguas de baño por temporada de baño como consecuencia de los vertidos en el medio marino como resultado de las medidas implantadas en los escenarios de adaptación 1 y 2 para las playas de Barcelona y valor medio.....	70
Figura 38. Estimaciones de daños indirectos por pérdidas de negocio y días de contaminación alta por temporada de baño producidos por efecto de los vertidos en el medio marino para los escenarios actual, futuro y de adaptación 1 y 2.....	72
Figura 39. Decremento del valor de los daños estimados (en %) por pérdidas de negocio producidos por efecto de los vertidos en el medio marino como resultado de las medidas implantadas en los escenarios de adaptación 1 y 2.....	72
Figura 40. Explicación del umbral de categorización proporcionado, basado en la curva de fragilidad adaptada de FEMA, 2009.....	74
Figura 41. Número de subestaciones afectadas en los escenarios actual (BAS) y futuro (BAU) y sus porcentajes sobre el total de subestaciones ubicadas en Barcelona.	77
Figura 42. Número de subestaciones afectadas en los escenarios de adaptación 1 (SUDS) y adaptación 2 (SiE) y sus porcentajes sobre el total de subestaciones ubicadas en Barcelona.	78
Figura 43. Comparación del escenario BAU-SUDS con BAU-SiE, en que se muestra el número de subestaciones que están fuera de peligro en el escenario BAU aplicando los diferentes conjuntos de medidas de prevención y el porcentaje de reducción alcanzada.....	80
Figura 44. Media de reducción de la tasa de superficie afectada y profundidad del agua. Media alcanzada aplicando los diferentes conjuntos de medidas de prevención (SUDS y SiE) para cada periodo de retorno analizado.	81
Figura 45. Sistema de embalses en las cuencas del Ter y el Llobregat. Fuente:.....	86
Figura 46. Disminución de los recursos hídricos de la ciudad durante los últimos veinte años...87	87
Figura 47. Resultados de la simulación del modelo hidrológico utilizado.	87
Figura 48. Resultados de la simulación del modelo hidrológico utilizado.....	87
Figura 49. Estudios sobre la reducción de recursos hídricos esperada para Barcelona en los años 2050 y 2100.	88

Índice de mapas

Mapa 1. Inundabilidad urbana para el escenario actual con periodo de retorno T10.....	16
Mapa 2. Inundabilidad urbana para el escenario futuro con periodo de retorno T10.....	17
Mapa 3. Inundabilidad urbana para el escenario actual con periodo de retorno T100.....	17
Mapa 4. Inundabilidad urbana para el escenario futuro con periodo de retorno T100.	18
Mapa 5. Puntos críticos más importantes de la ciudad.....	19
Mapa 6. Zonas de peligrosidad alta para peatones para el escenario actual con los periodos de retorno T1, T10 y T100 simulados.	21
Mapa 7. Zonas de peligrosidad alta para peatones para el escenario futuro con los periodos de retorno T1, T10 y T100 simulados.	21
Mapa 8. Zonas de peligrosidad alta para vehículos para el escenario actual con los periodos de retorno T1, T10 y T100 simulados.	23
Mapa 9. Zonas de peligrosidad alta para vehículos para el escenario futuro con los periodos de retorno T1, T10 y T100 simulados.	23
Mapa 10. Mapa de vulnerabilidad para peatones.	27
Mapa 11. Mapa de vulnerabilidad para vehículos.....	27
Mapa 12. Mapa de riesgo para peatones en el escenario actual con periodo de retorno T10.....	28
Mapa 13. Mapa de riesgo para peatones en el escenario futuro con periodo de retorno T10.....	29
Mapa 14. Mapa de riesgo para peatones en el escenario actual con periodo de retorno T100.	29
Mapa 15. Mapa de riesgo para peatones en el escenario futuro con periodo de retorno T100.....	30
Mapa 16. Ejes críticos más importantes de la ciudad.....	32
Mapa 17. Riesgo para vehículos en el escenario actual con periodo de retorno T10.....	34
Mapa 18. Riesgo para vehículos en el escenario futuro con periodo de retorno T10.	34
Mapa 19. Riesgo para vehículos en el escenario actual con periodo de retorno T100.	35
Mapa 20. Riesgo para vehículos en el escenario futuro con periodo de retorno T100.....	35
Mapa 21. Riesgo para peatones en el escenario de adaptación 1 con periodo de retorno T10.	37
Mapa 22. Riesgo para peatones en el escenario de adaptación 2 con periodo de retorno T10.	38
Mapa 23. Riesgo para peatones en el escenario de adaptación 1 con periodo de retorno T100.	38
Mapa 24. Riesgo para peatones en el escenario de adaptación 2 con periodo de retorno T100.	39
Mapa 25. Riesgo para vehículos en el escenario de adaptación 1 con periodo de retorno T10.	39
Mapa 26. Riesgo para vehículos en el escenario de adaptación 2 con periodo de retorno T10.	40
Mapa 27. Riesgo para vehículos en el escenario de adaptación 1 con periodo de retorno T100.	40
Mapa 28. Riesgo para vehículos en el escenario de adaptación 2 con periodo de retorno T100.	41
Mapa 29. Efecto en el tráfico de superficie para el escenario actual con periodo de retorno T10.	46

Mapa 30. Efecto en el tráfico de superficie para el escenario futuro con periodo de retorno T10.	47
Mapa 31. Efecto en el tráfico de superficie para el escenario actual con periodo de retorno T100.	47
Mapa 32. Efecto en el tráfico de superficie para el escenario futuro con periodo de retorno T100.	48
Mapa 33. Mapas de efecto en el tráfico de superficie para el escenario de adaptación 1 (izquierda) y el escenario de adaptación 2 (derecha) con periodo de retorno T10.	48
Mapa 34. Mapas de efecto en el tráfico de superficie para el escenario de adaptación 1 (izquierda) y el escenario de adaptación 2 (derecha) con periodo de retorno T100.	49
Mapa 35. Inundabilidad urbana en el escenario futuro para el periodo de retorno T50.	53
Mapa 36 . Mapas de efecto en los contenedores de residuos sólidos urbanos para el escenario actual (izquierda) y el escenario futuro (derecha) con periodo de retorno T50.	55
Mapa 37. Efecto en los contenedores de residuos sólidos urbanos para el escenario futuro, incorporando solo las piezas de fijación para los contenedores con periodo de retorno T50.....	57
Mapa 38. Mapas de efecto en los contenedores de residuos sólidos urbanos para el escenario de adaptación 1 (izquierda) y el escenario de adaptación 2 (derecha) con periodo de retorno T50.....	57
Mapa 39. Mapas de efecto en los contenedores de residuos sólidos urbanos para el escenario de adaptación 1 (izquierda) y el escenario de adaptación 2 (derecha) con periodo de retorno T50, incorporando las piezas de fijación para los contenedores.	58
Mapa 40. Mapas de valor de los daños por inundación urbana en las propiedades para el escenario actual (izquierda) y el escenario futuro (derecha) con periodo de retorno T10.....	61
Mapa 41. Mapas de valor de los daños por inundación urbana en las propiedades para el escenario de adaptación 1 (izquierda) y el escenario de adaptación 2 (derecha) con periodo de retorno T10.	62
Mapa 42. Mapas de valor de los daños por inundación urbana en las propiedades para el escenario actual (izquierda) y el escenario futuro (derecha) con periodo de retorno T100.	62
Mapa 43. Mapas de valor de los daños por inundación urbana en las propiedades para el escenario de adaptación 1 (izquierda) y el escenario de adaptación 2 (derecha) con periodo de retorno T100.....	63
Mapa 44. Mapa de la zona costera de Barcelona, donde se destacan los distritos afectados por DSU.	71
Mapa 45. Infraestructuras eléctricas afectadas en caso de inundación urbana y el porcentaje de área afectado para el escenario actual.	75
Mapa 46. Infraestructuras eléctricas afectadas en caso de inundación urbana y el porcentaje de área afectado para el escenario futuro.....	76
Mapa 47. Representación de las diferentes subestaciones afectadas después de aplicar las medidas de adaptación 1 (SUDS) al escenario BAU, para los diferentes periodos de retorno analizados y teniendo en cuenta la tasa de área afectada (0-100 %).	79

Mapa 48. Representación de las diferentes subestaciones afectadas después de aplicar las medidas de adaptación 2 (SiE) al escenario BAU, para los diferentes periodos de retorno analizados y teniendo en cuenta la tasa de área afectada (0-100 %).	79
Mapa 49. Representación de las subestaciones donde se redujo la tasa de área afectada después de aplicar las medidas de adaptación 1 (SUDS) al escenario BAU para el diferente periodo de retorno analizado y teniendo en cuenta la tasa de área afectada (0-100 %).	82
Mapa 50. Representación de las subestaciones donde se redujo la tasa de área afectada después de aplicar las medidas de adaptación 2 (SiE) al escenario BAU para el diferente periodo de retorno analizado y teniendo en cuenta la tasa de área afectada (0-100 %).	82
Mapa 51. Principales efectos para el escenario RCP 4.5 2070-2100.	84
Mapa 52. Principales efectos para el escenario RCP 8.5 2070-2100.	84

1 Introducción

El objetivo principal del proyecto RESCCUE es ayudar a las ciudades a volverse más resilientes a los retos físicos, pero también a los sociales y económicos, derivados de los impactos del cambio climático, generando metodologías aplicables a varios tipos de ciudades con diferentes exposiciones al cambio climático. Concretamente, RESCCUE pretende mejorar la resiliencia urbana de nuestras ciudades mediante un conjunto de modelos y herramientas que evalúan los impactos del cambio climático en varios sectores urbanos estratégicos, como el ciclo del agua (tratamiento de agua, suministro de agua, drenaje urbano y tratamiento de aguas residuales), el transporte, el suministro de energía y los residuos sólidos. En segundo término, el proyecto estudia cómo estos servicios urbanos se interconectan para evaluar la resiliencia urbana para el estado actual y para los diferentes escenarios futuros de cambio climático y de adaptación.

El conocimiento detallado del comportamiento de nuestros sistemas urbanos ante los acontecimientos climáticos extremos representa la pieza básica inicial de todo el proceso de evaluación de la resiliencia de la ciudad. Para alcanzar este objetivo, el proyecto ha elaborado, calibrado y validado una serie de modelos sectoriales detallados partiendo de los diferentes escenarios futuros de cambio climático extraídos de nuevas proyecciones climáticas, así como para la situación actual. El uso de modelos sectoriales (o la integración de varios modelos sectoriales) puede ayudar a comprender al máximo el peligro potencial relacionado con los acontecimientos climáticos extremos y, finalmente, utilizarse para la evaluación de los múltiples riesgos que podrían afectar a la ciudad de Barcelona en el futuro. El proyecto se centró en el análisis de los impactos relacionados con el agua en tres ámbitos diferentes: **peligro de inundación, peligro de sequía y peligro por la subida del nivel del mar.**

En el marco del peligro de inundación, se hizo una evaluación multirriesgo de varios sectores expuestos a los efectos del cambio climático para cuatro escenarios diferentes: **el escenario actual**, que prevé la situación de hoy; **el escenario futuro**, que plantea las futuras alteraciones que implicará el cambio climático a partir de las nuevas proyecciones climáticas; **el escenario de adaptación 1**, que recoge las mejoras de la implantación de SUDS (sistemas urbanos de drenaje sostenible) respecto del escenario futuro; y **el escenario de adaptación 2**, que prevé la incorporación de medidas estructurales en la red de drenaje, además de los SUDS, respecto del escenario futuro.

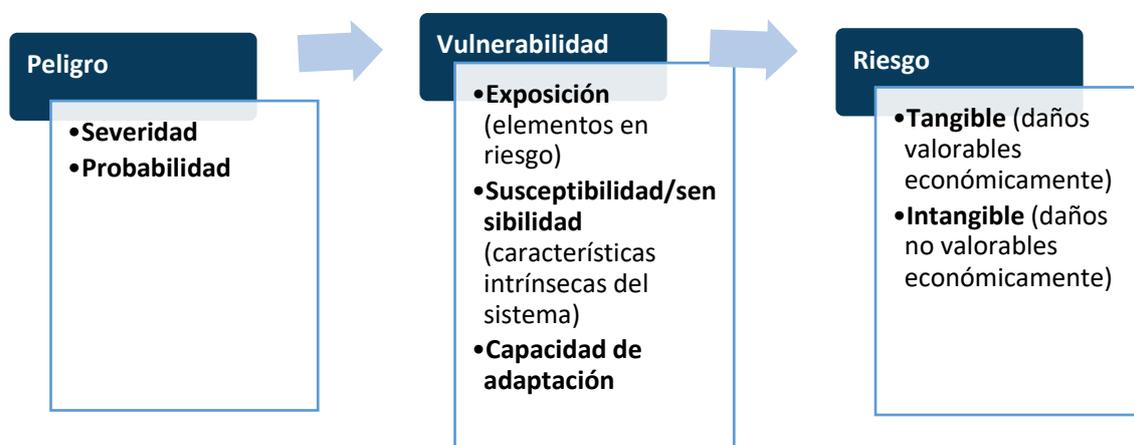
Los cuatro escenarios considerados para el peligro de inundación se han desarrollado para los periodos de retorno **T1, T10, T50, T100 y T500**. Ahora bien, en función del sector evaluado y sus características particulares, en este documento se considerarán los periodos de retornos más significativos.

En el caso de la subida del nivel del mar, los escenarios analizados recogen el horizonte temporal 2070-2100 para los RCP 4.5 y 8.5.

2 Metodología

En la figura 1 se muestra el marco conceptual de la evaluación del riesgo y las definiciones utilizadas.

Figura 1. Metodología utilizada para el desarrollo del análisis de riesgo.



El riesgo de los impactos relacionados con el clima resulta de la interacción de los peligros asociados propiamente con el clima (incluidos los acontecimientos extremos y las tendencias de cambio) con la vulnerabilidad de los sistemas humanos y naturales.

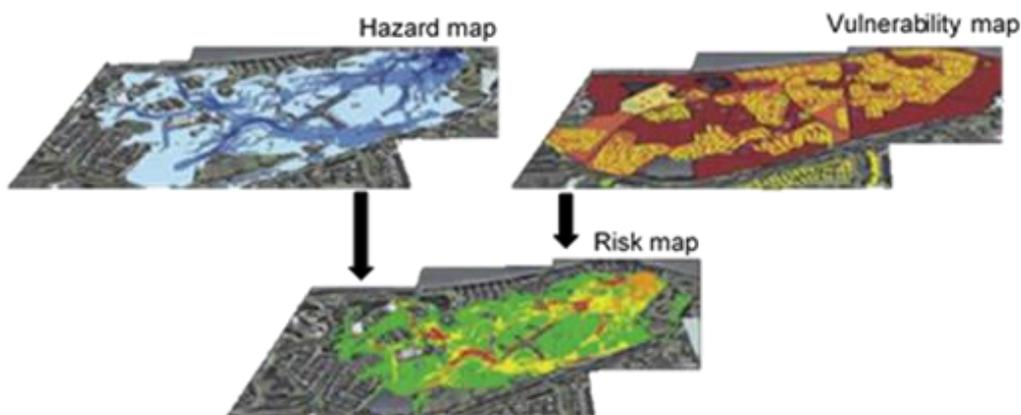
Se considera **peligro climático** cualquier condición de una variable climática que puede ser causa de un efecto adverso: como primer paso, se seleccionan las variables climáticas relevantes que sirven de base para obtener los índices climáticos necesarios para el análisis del peligro. Para cada peligro relacionado con el clima, se identifican unos o más índices relevantes, como la probabilidad de aparición o las superaciones de los valores umbrales. Los índices se calculan para un periodo climático definido y se pueden combinar con otros parámetros para evaluar diferentes escalas de peligro.

La **vulnerabilidad** se refiere a la propensión de elementos expuestos (como seres humanos, sus medios de vida y sus activos) a sufrir efectos adversos cuando se vean afectados por acontecimientos de peligro. Se corresponde con el inventario de elementos presentes en las zonas donde se pueden producir acontecimientos peligrosos (inundaciones, sequía y aumento del nivel del mar, en nuestro caso) que pueden afectarles negativamente (posiblemente dañados o alterados). Estos valores dependen de la presencia de personas, ecosistemas,

servicios y recursos ambientales, infraestructuras o bienes económicos, sociales y culturales en lugares que se podrían ver afectados negativamente. Por otra parte, la susceptibilidad (o sensibilidad) es el grado en que el sistema está afectado, que depende de las características intrínsecas de sus elementos expuestos dentro de la zona en la que se pueden producir acontecimientos peligrosos, mientras que la capacidad adaptativa de un sistema es su capacidad para soportar y superar cualquier perturbación, como las inundaciones, y mantener niveles importantes de eficiencia en sus componentes sociales, económicos, ambientales y físicos.

Finalmente, el proceso de **evaluación del riesgo** trabaja teniendo en cuenta las magnitudes y probabilidades de los impactos asociados a los riesgos identificados antes, con el objetivo de valorar la importancia de los activos afectados, identificándolos y localizándolos en un mapa de riesgo. Este mapa se desarrolla sobreponiendo el mapa de peligrosidad y el mapa de vulnerabilidad. El resultado de este proceso es un mapa que establece diferentes niveles de riesgo en zonas específicas de la ciudad para los diferentes ámbitos estudiados, basados en la combinación del nivel de peligro y el nivel de vulnerabilidad. En la figura 2 se observa el concepto de mapa de riesgos como la combinación de peligrosidad y vulnerabilidad:

Figura 2. Metodología de generación de los mapas de riesgo a partir de la combinación de los mapas de peligrosidad y vulnerabilidad.



Los resultados se clasifican por daños tangibles (daños económicos sobre los bienes) o daños intangibles (daños que no se pueden valorar económicamente, por ejemplo, la ampliación de zonas de alto riesgo, los impactos sociales sobre colectivos vulnerables o la pérdida de vidas humanas). Los resultados del análisis y la monetización de los riesgos derivados del impacto del cambio climático desarrollado en el marco del proyecto RESCCUE se pueden consultar en *RESCCUE Deliverable 3.5 Impact assessments of multiple hazards in case study areas* (<https://toolkit.resccue.eu/resccue-deliverables>).

ESCENARIOS DE ADAPTACIÓN

El modelo de inundación urbana permite la simulación de los escenarios de cambio climático y la aplicación de diferentes medidas de adaptación, y proporciona información sobre la **reducción del riesgo** de inundación en función de las medidas aplicadas. Concretamente, se han considerado dos escenarios de adaptación diferentes: **el escenario de adaptación 1**, que prevé las mejoras de la implantación de sistemas urbanos de drenaje sostenible; y **el escenario de adaptación 2**, que plantea la incorporación de medidas estructurales en la red de drenaje, además de los SUDS, respecto del escenario futuro.

3 Análisis de los impactos derivados de las inundaciones provocadas por episodios de lluvia

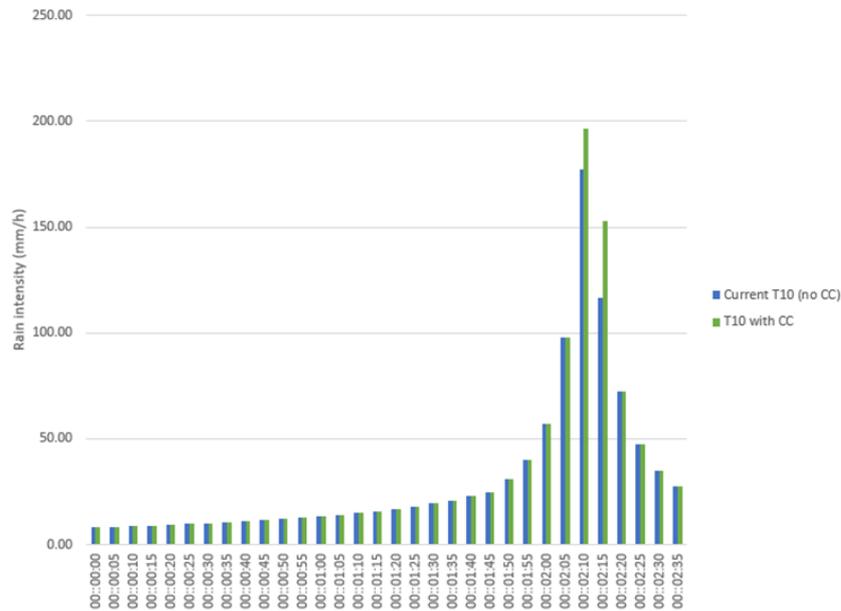
3.1 Modelo de inundación urbana

La modelización matemática del sistema de drenaje urbano de Barcelona sirve como punto de partida para el análisis del peligro de inundación y la evaluación de los impactos que estas inundaciones provocan sobre los bienes y las personas. El modelo de drenaje urbano desarrollado en el proyecto RESCCUE surge de la participación de BCASA como socio de proyecto, que aceptó proporcionar los resultados del modelo PDISBA (Plan director de saneamiento de Barcelona) al proyecto RESCCUE, de manera que los dos proyectos se benefician de las metodologías desarrolladas y sus resultados son coherentes.

La característica principal del nuevo modelo de drenaje urbano consiste en la modelización de toda la red de drenaje de la ciudad, tanto primaria como secundaria, y que caracteriza todos los elementos singulares que la componen (rejas, imbornales, tanques de retención, válvulas, estaciones de bombeo, etcétera). El modelo, denominado 1D/2D, combina la simulación del flujo de la red subterránea de alcantarillado con el modelo de circulación de agua en superficie, lo que proporciona información sobre las variables hidráulicas profundidad, velocidad y extensión de las zonas inundables de la ciudad durante episodios de lluvia torrencial.

La calibración del modelo de drenaje urbano se desarrolló, en el marco del PDISBA, sobre la base de la lluvia de diseño correspondiente al periodo de retorno de 10 años (T10) elaborada a partir de los datos históricos proporcionados por BCASA (figura 3).

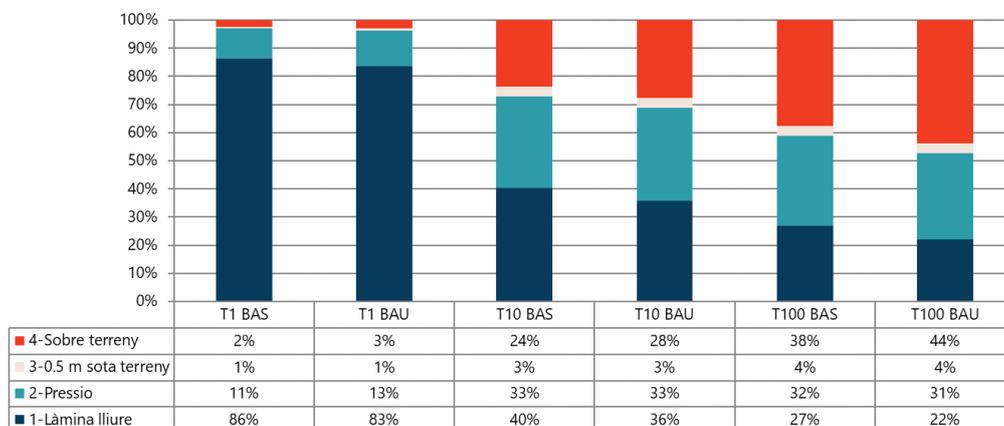
Figura 3. Comparación entre la lluvia de diseño para el escenario actual (T10) y el escenario futuro (T10 CC) correspondientes al periodo de retorno de 10 años y el horizonte temporal 2071-2100.



Una vez validado el modelo, se simularon los diferentes periodos de retorno (T1, T10, T50, T100, T500) para el escenario actual y para el escenario futuro de cambio climático aplicando los factores de cambio climático obtenidos de las proyecciones climáticas de precipitación resultantes de la regresión estadística de 20 series pluviométricas proporcionadas por 10 modelos climáticos globales forzados por los RCP 4.5 y 8.5, previamente validados para el periodo histórico 1976-2005.

De la simulación de las diferentes lluvias de diseño elaboradas se extrae el comportamiento de la red de alcantarillado para cada episodio de lluvia asociado, para el escenario actual y para el escenario futuro (figura 4):

Figura 4. Comportamiento de la red de alcantarillado en los escenarios actual y futuro (metros de cañerías).

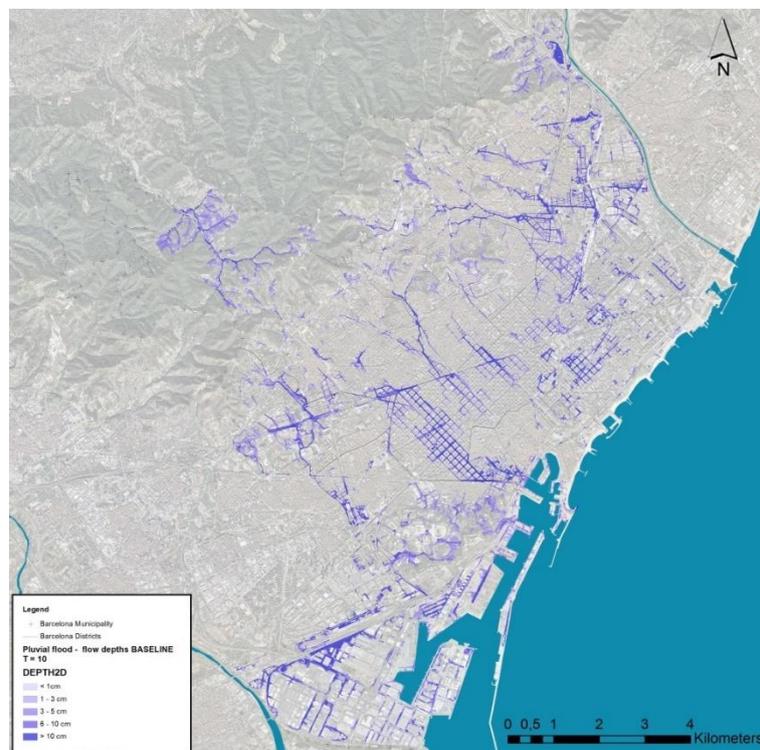


Lógicamente, a medida que se incrementa el periodo de retorno, hay menos tramos de colectores que funcionan en lámina libre, ya que cada vez están más solicitados. En la simulación del escenario futuro de cambio climático para el periodo de retorno de 10 años (T10) se observa un empeoramiento del funcionamiento de la red de alcantarillado con respecto al estado actual, de modo que aumentan hasta el 28 % los tramos donde el agua circula en superficie, al 3 % los tramos donde el agua circula 50 cm por debajo de la cota del terreno y al 33 % los tramos que funcionan a presión. El resto de la red, el 36 %, trabaja correctamente.

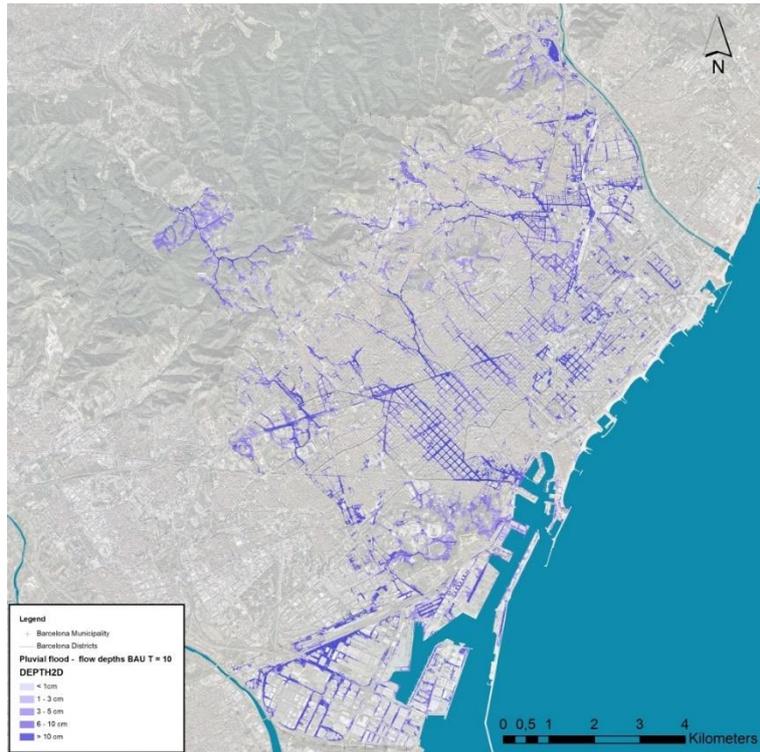
Según las nuevas proyecciones climáticas elaboradas en el marco del proyecto, se prevé que la intensidad de los episodios de lluvia torrencial en la ciudad aumente entre un 20 % y un 40 %. Teniendo en cuenta que la red de alcantarillado ya empieza a sufrir desbordamientos importantes con una lluvia de periodo de retorno de 10 años, este aumento de la intensidad de la precipitación comportará un aumento de las zonas inundables de la ciudad.

El modelo de drenaje urbano nos permite analizar el comportamiento del agua en superficie parametrizando la velocidad y el calado del agua, así como conocer la extensión de las zonas inundables de la ciudad. En los mapas siguientes se muestra cómo varían las variables hidráulicas analizadas (velocidad y calado del agua) para los periodos de retorno más significativos: T10, por representar una frecuencia habitual, y T100, por representar una frecuencia reducida, tanto para el escenario actual como para el escenario futuro:

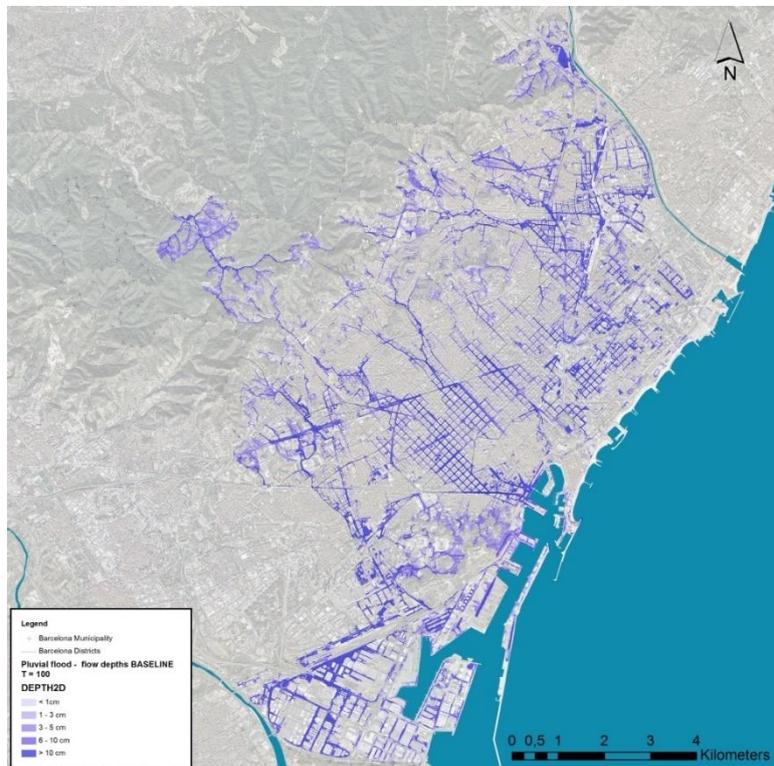
Mapa 1. Inundabilidad urbana para el escenario actual con periodo de retorno T10.



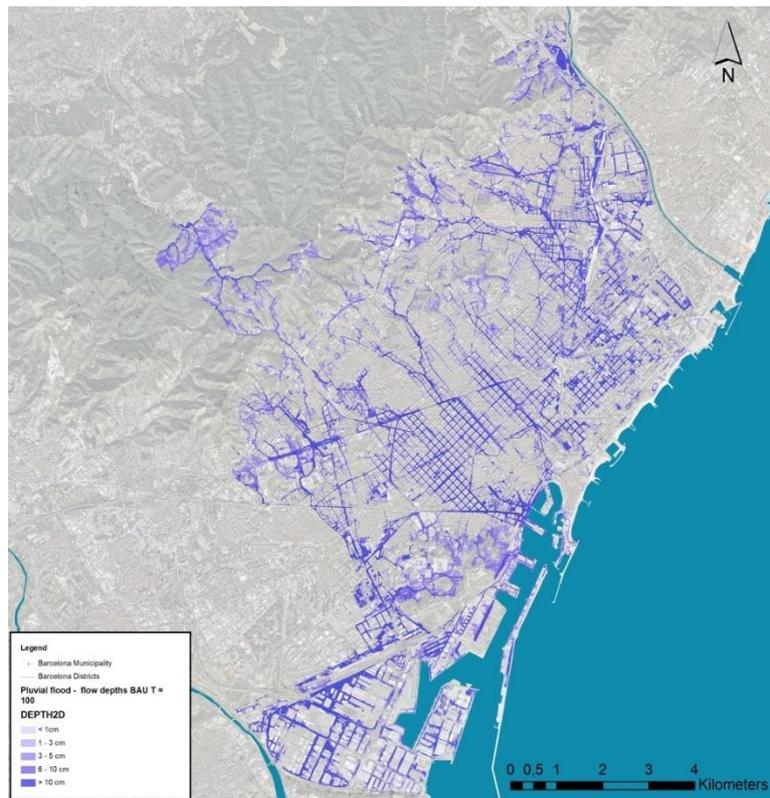
Mapa 2. Inundabilidad urbana para el escenario futuro con periodo de retorno T10.



Mapa 3. Inundabilidad urbana para el escenario actual con periodo de retorno T100.



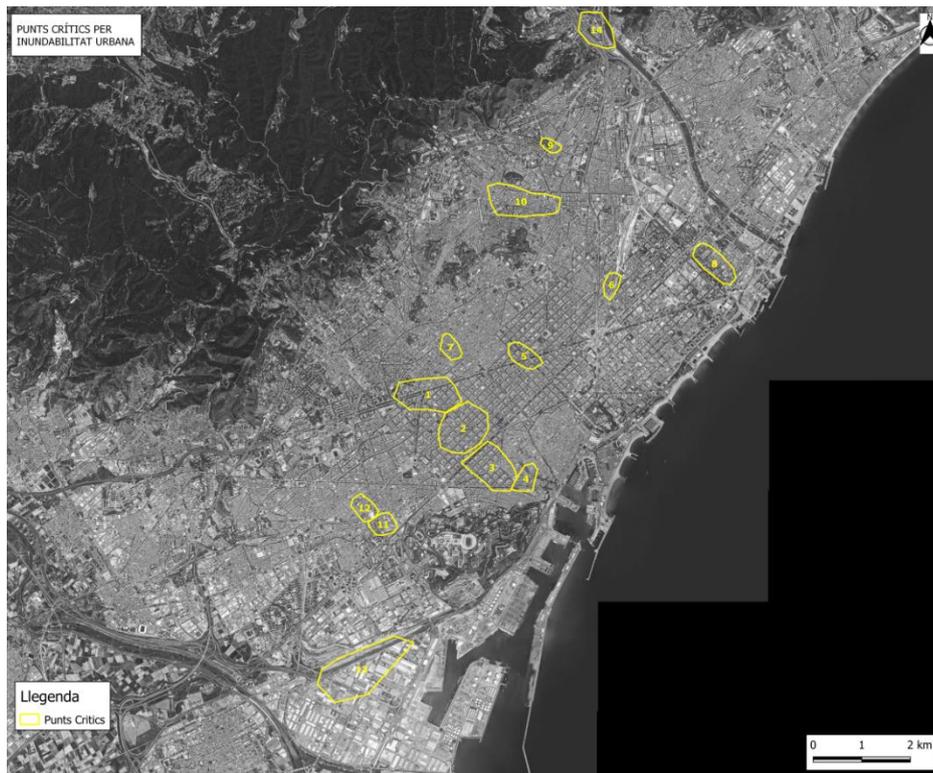
Mapa 4. Inundabilidad urbana para el escenario futuro con periodo de retorno T100.



Los planos permiten identificar cuáles son los puntos críticos más importantes de la ciudad a causa del mal funcionamiento de la red. Se pueden resumir en los siguientes:

1. Diagonal-plaza de Francesc Macià
2. Urgell-Casanova-av. Roma
3. Ronda de Sant Pau-av. Paral·lel
4. Alrededores de la calle de Sant Pau
5. Diagonal (Bruc-Roger de Flor)
6. Clot-Navas
7. Vía Augusta-Príncep d'Astúries-rambla del Prat
8. Alrededores de la rambla de Prim
9. Plaza de Lluçmajor
10. Tajo-Cartellà
11. Calle de Parcerisa
12. Riera Blanca
13. Alrededores de la Seat (Zona Franca)
14. Torrent de Tapioles

Mapa 5. Puntos críticos más importantes de la ciudad.



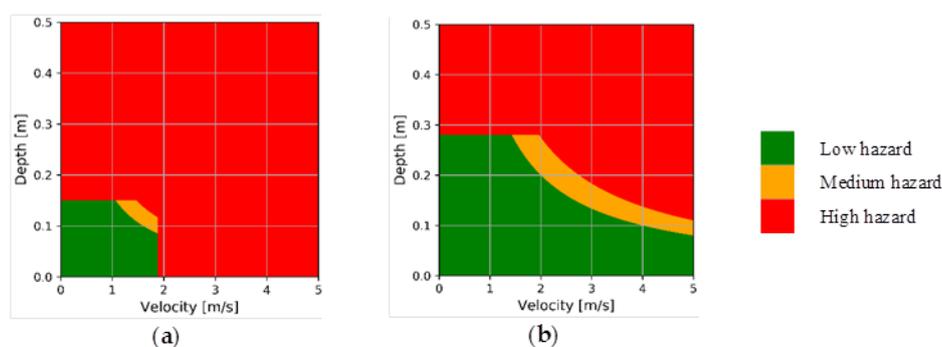
Los efectos de las inundaciones en un contexto potencial de cambio climático para la ciudad se han evaluado mediante un enfoque multirriesgo. Los resultados de esta evaluación se han presentado en términos de peligrosidad, vulnerabilidad y a través de los mapas de riesgo para los servicios urbanos afectados en caso de inundación (movilidad y residuos), así como el efecto en las personas (peatones y vehículos) y el efecto en la calidad del agua, con el fin de evaluar los impactos socioeconómicos de las descargas en el medio receptor. Los resultados de las simulaciones de inundación demuestran que Barcelona podría sufrir un aumento significativo de estos impactos. Por ejemplo, los incrementos de la intensidad máxima de las precipitaciones torrenciales entre el 12 % y el 16 % podrían suponer incrementos superiores al 25-30 % en términos de impactos sociales (daños intangibles como el aumento de áreas clasificadas con condiciones de alto riesgo) y pérdidas económicas (daños tangibles expresados en términos monetarios).

A continuación se muestran los principales resultados del análisis de los impactos provocados por las inundaciones en la ciudad de Barcelona.

3.2 Riesgo para las personas: estabilidad de peatones y vehículos.

El estudio sobre el efecto de las inundaciones en la estabilidad de los peatones y los vehículos se basa en los resultados del modelo hidrodinámico en que la velocidad y el calado se consideran las principales variables hidráulicas causantes que afectan a la estabilidad de los peatones y los vehículos en caso de inundaciones urbanas pluviales, de modo que la escorrentía superficial se caracteriza por una velocidad de flujo alta y una altura de flujo (calado) baja. En la figura 6 se muestra cómo la velocidad y el calado se transforman en un nivel de peligro según los umbrales propuestos¹ por el estudio, para peatones (a) y para vehículos (b):

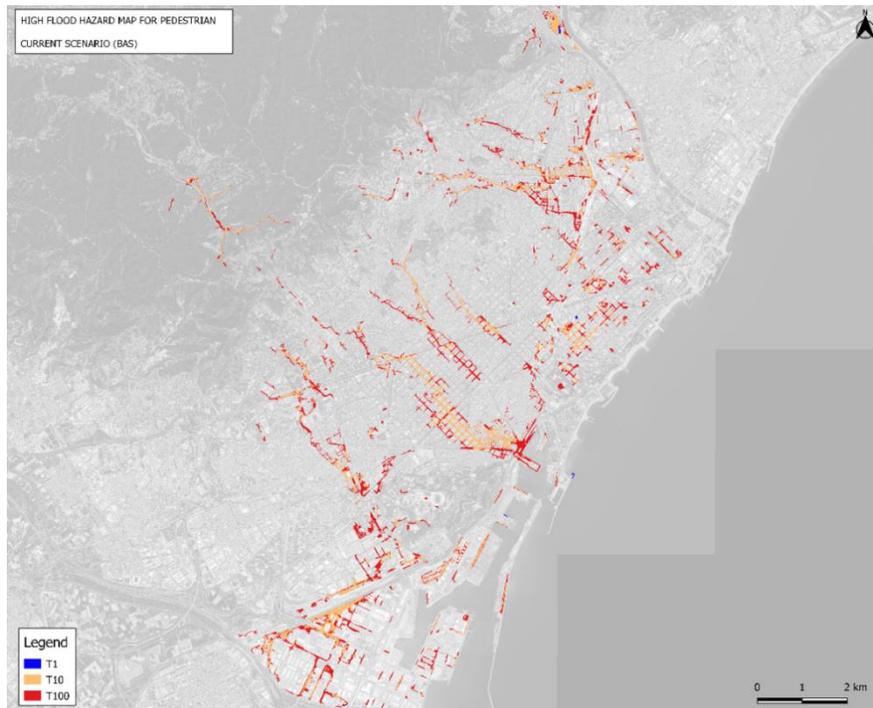
Figura 5. Matriz de peligrosidad para peatones (a) y vehículos (b) en función de las variables hidráulicas, velocidad del flujo y calado.



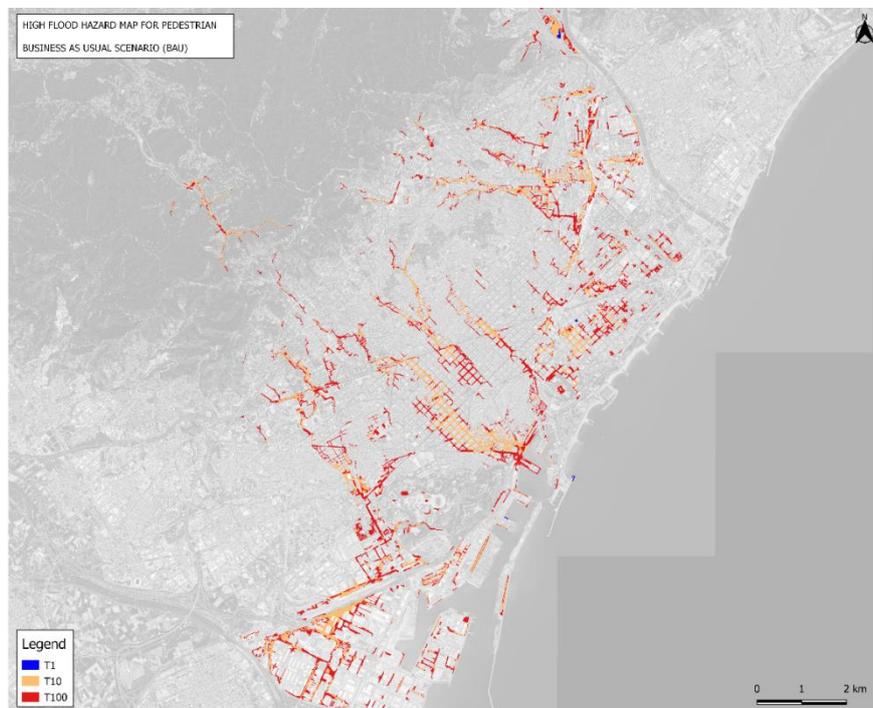
Los siguientes **mapas de peligrosidad** representan los niveles de probabilidad de que un peatón pierda la estabilidad y, por lo tanto, pueda caer y ser arrastrado por el flujo de agua. Las zonas de peligrosidad alta indican aquellas zonas donde las variables hidrodinámicas son capaces de causar una inestabilidad a una persona en función de la intensidad del episodio de lluvia, caracterizado por su periodo de retorno. En el siguiente mapa se observan las zonas con peligrosidad alta para peatones para todos los periodos de retorno simulados:

¹ Russo, B.; Gómez, M.; Macchione, F. (2013): "Pedestrian hazard criteria for flooded urban areas". *Nat. Hazards*, 69, 251-265. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0702-2>
Martínez-Gomariz, E.; Gómez, M.; Russo, B. (2016): "Experimental study of the stability of pedestrians exposed to urban pluvial flooding". *Nat. Hazards*, 82, 1259-1278.
Martínez-Gomariz, E.; Gómez, M.; Russo, B.; Djordjević, S. (2017): "A new experiments-based methodology to define the stability threshold for any vehicle exposed to flooding". *Urban Water J.*, 14, 930-939.

Mapa 6. Zonas de peligrosidad alta para peatones para el escenario actual con los periodos de retorno T1, T10 y T100 simulados.

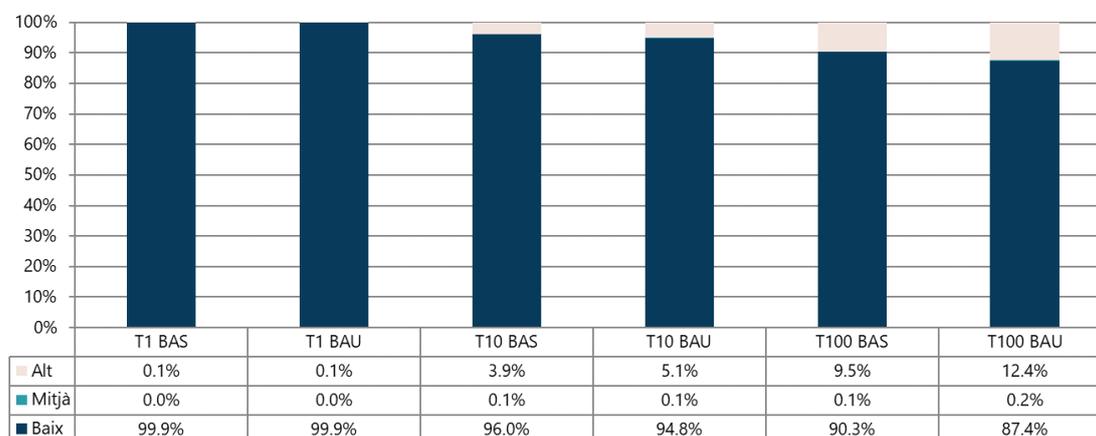


Mapa 7. Zonas de peligrosidad alta para peatones para el escenario futuro con los periodos de retorno T1, T10 y T100 simulados.



El siguiente gráfico resume los resultados de los mapas de peligrosidad para peatones clasificados por nivel de peligro:

Figura 6. Superficie total (en %) de niveles de peligrosidad para peatones para el escenario actual (BAS) y futuro (BAU) con todos los periodos de retorno simulados.

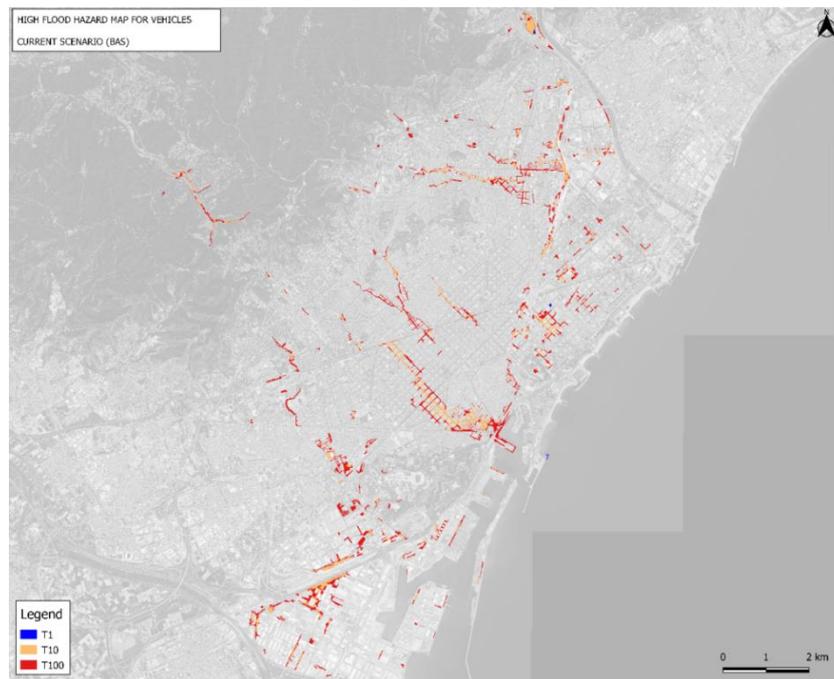


Para el periodo de retorno de un año (T1), tanto en el escenario actual como en el escenario futuro, las zonas de peligrosidad alta son anecdóticas (0,02 % y 0,03 % de la superficie, respectivamente). Por lo tanto, el cambio climático no supone un empeoramiento con respecto a la situación existente.

En el periodo de retorno de T10, las zonas de peligro alto suman 240 ha, que representan el 3,9 % del total de la superficie transitable de la ciudad. Con la acción del cambio climático no aparecen nuevas zonas de peligro alto, pero las existentes se incrementan de manera equitativa en todos los barrios hasta llegar a las 312 ha, que son el 5,1 % de la superficie total, lo que representa un incremento del 30 % de la superficie con peligro alto.

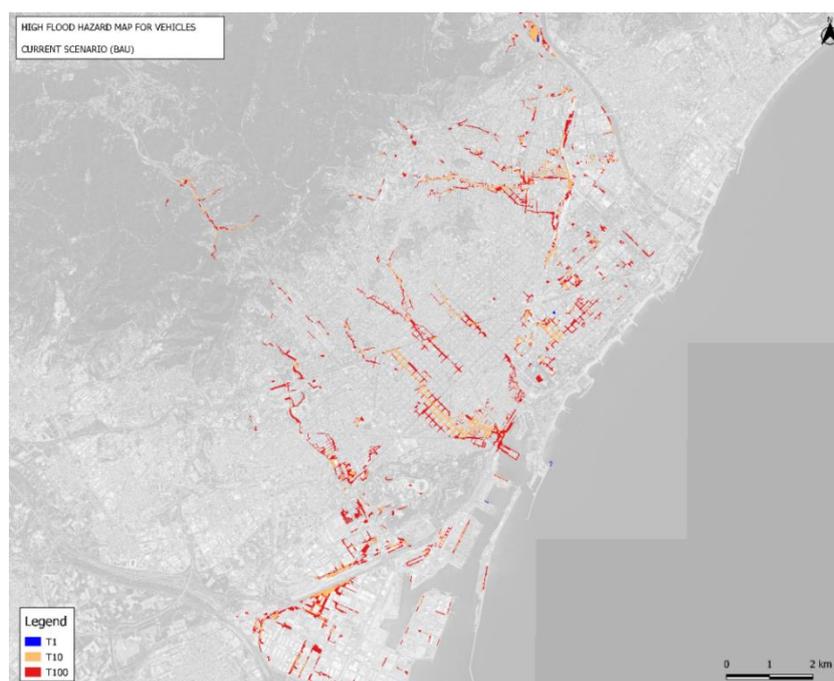
En el caso de la T100, la situación actual empeora de manera notable, ya que aparecen nuevas zonas con áreas de peligro alto y aumentan considerablemente las existentes para la T10, hasta llegar al 9,5 % de la superficie total de Barcelona (585 ha). En el caso del escenario futuro, otra vez se produce un incremento del 30% en la superficie transitable con peligrosidad alta para los peatones hasta llegar al 12,4 % de la superficie total (762 ha).

Mapa 8. Zonas de peligrosidad alta para vehículos para el escenario actual con los periodos de retorno T1, T10 y T100 simulados.



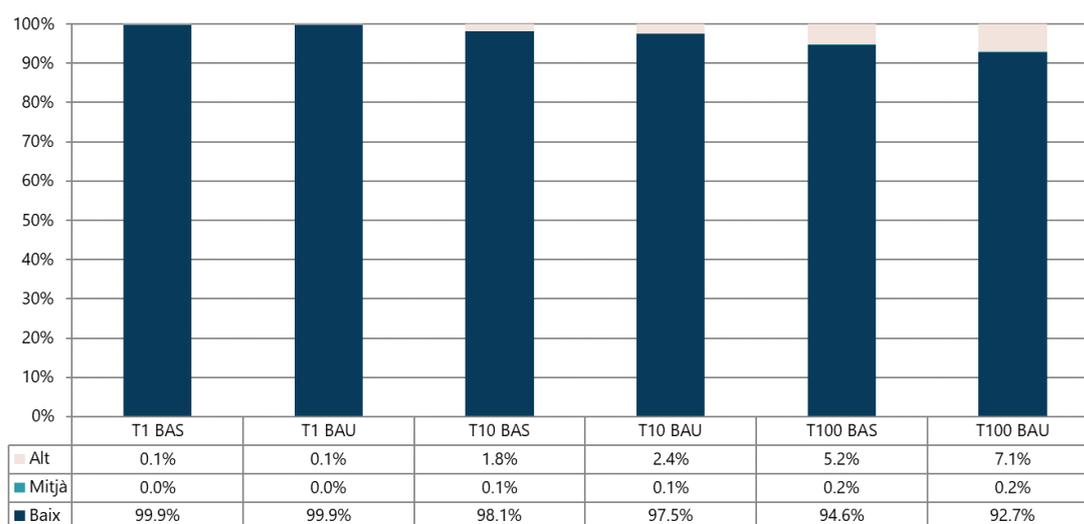
Los siguientes mapas de peligrosidad muestran la probabilidad de que un vehículo sea arrastrado por el flujo de agua en superficie:

Mapa 9. Zonas de peligrosidad alta para vehículos para el escenario futuro con los periodos de retorno T1, T10 y T100 simulados.



Otra vez, las zonas de peligrosidad alta en la T1 son irrelevantes. Con respecto a la T10, las zonas de alta peligrosidad son las mismas que en el caso del peligro para peatones, pero aquí se extienden a lo largo de un número de calles inferior al anterior, que suponen, en la situación actual, una superficie de 110 ha (1,8 % del total) y, en el escenario futuro, 148 ha (2,4 %), que implica un incremento del 34 %.

Figura 7. Superficie total (en %) de niveles de peligrosidad para vehículos en los escenarios actual y futuro para los periodos de retorno más significativos.



En el caso de la T100, se reproduce la tendencia de los resultados del peligro para los peatones, con un incremento en el escenario actual de hasta 318 ha (5,2 %), y en el escenario futuro, de hasta 433 ha (7,1%), de manera que el incremento se vuelve a situar en el 35 % aproximadamente.

Por lo tanto, una vez analizados los resultados de las zonas de peligro para peatones y para vehículos, se puede concluir que:

- Hay un comportamiento análogo entre el peligro para peatones y el peligro para vehículos.
- Las zonas de peligro de nivel medio son irrelevantes en todos los periodos de retorno.
- La superficie total de peligrosidad alta para los peatones es el doble de grande que la de peligrosidad alta para los vehículos, lo que pone de manifiesto que la estabilidad de los peatones es menor que la de los vehículos, que tienen más capacidad de resistencia al deslizamiento.
- Las zonas de peligrosidad alta son irrelevantes en T1, incluso en el escenario futuro. Eso se debe a que el sistema de alcantarillado de la ciudad está diseñado para un periodo de diseño de T10; por lo tanto, en T1 no se aprecia un impacto por el cambio climático

provocado por el incremento de la lluvia de diseño, ya que el sistema tiene capacidad para absorberlo sin ningún problema.

- A partir de la T10 sí se ve un incremento de peligrosidad proporcional a todos los periodos de retorno del orden del 30-35 %.

El siguiente paso define la **vulnerabilidad** de las personas consideradas en riesgo en este estudio. Se establecen diferentes niveles de vulnerabilidad según la exposición de la gente (densidad de personas) y sus características físicas (sensibilidad) teniendo en cuenta indicadores como el porcentaje de personas en edad crítica, la densidad de población o el porcentaje de personas foráneas. Por otra parte, también se consideró, en la valoración de la vulnerabilidad, la presencia de infraestructuras vulnerables como escuelas, hospitales o casales de personas mayores. En la figura 8 se muestran los criterios de vulnerabilidad para peatones expuestos a inundaciones urbanas:

Figura 8. Criterios de vulnerabilidad para peatones expuestos a inundaciones urbanas.

VULNERABILITY FOR PEDESTRIANS IN CENSAL AREAS FOR BARCELONA CITY				
Vulnerability index / score	A. Population density (person/km ²)	B. % areas of infrastructures vulnerability	C. % of people with critical age	D. % of foreign people
1 (low)	≤ 384,62	0%	≤ 25%	≤ 10%
2 (medium)	384,62 < X ≤ 15,747	0% < X ≤ 15%	25% < X ≤ 33%	10% < X ≤ 25%
3 (high)	> 15,747	> 15%	> 33%	> 25%

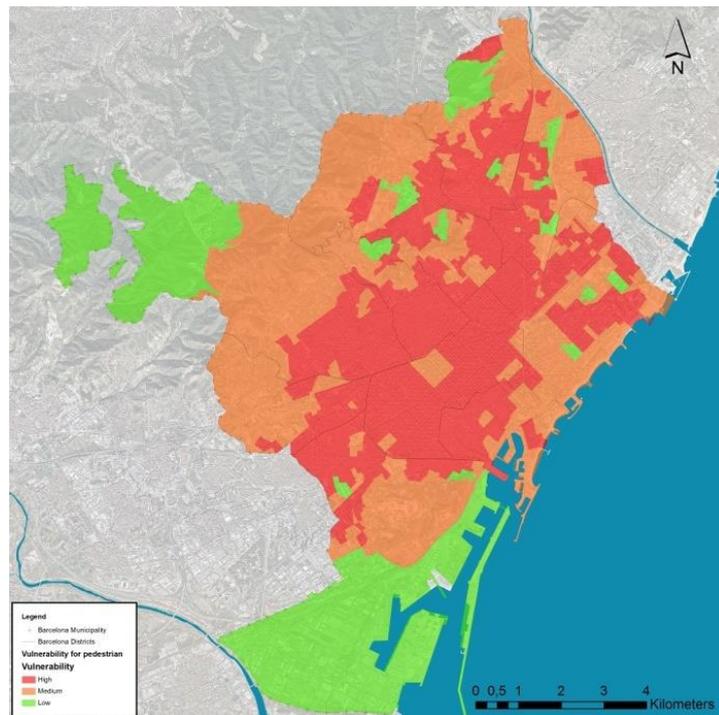
Además, la estabilidad de los vehículos puede comprometer la seguridad de las personas, de modo que se analiza el flujo de tráfico (indicador de exposición) para definir los niveles de vulnerabilidad de cada carretera. En la figura 9 se muestran los criterios de vulnerabilidad para vehículos expuestos a inundaciones urbanas:

Figura 9. Criterios de vulnerabilidad para vehículos expuestos a inundaciones urbanas.

VULNERABILITY FOR VEHICLES	
Vulnerability index / score	Vehicular flow intensity (VFI) (veh/day)
1 (low)	< 5,000
2 (medium)	$5,000 \leq X \leq 10,000$
3 (high)	> 10,000

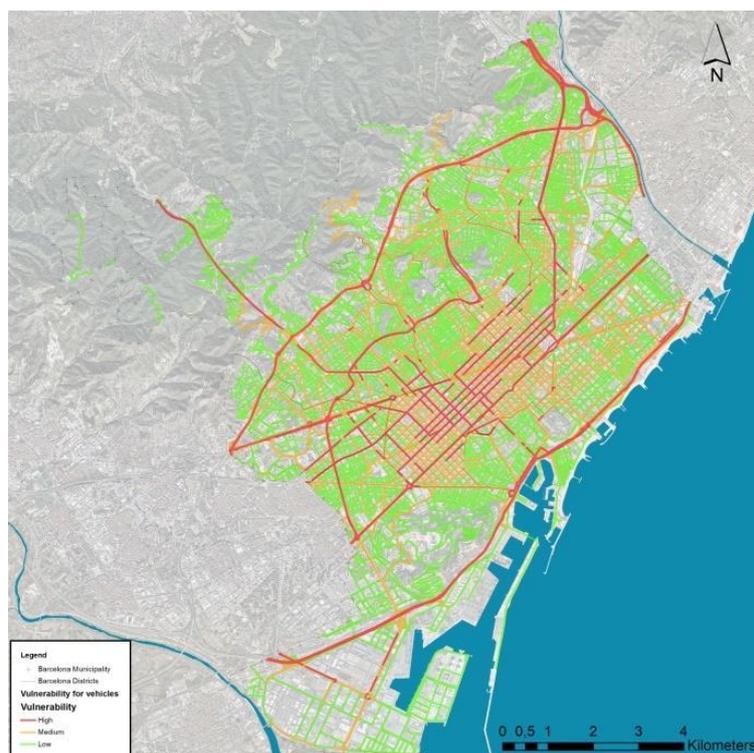
Los mapas de vulnerabilidad representan la vulnerabilidad de los peatones o de los vehículos cuando se exponen a inundaciones pluviales en zonas concretas de la ciudad y establecen tres niveles cualitativos: bajo, medio y alto.

Mapa 10. Mapa de vulnerabilidad para peatones.



Con respecto al mapa de vulnerabilidad para peatones, el mayor peso otorgado a la densidad de población (50 %) provoca que las zonas con más vulnerabilidad para peatones sean prácticamente coincidentes con las zonas de los barrios con más densidad de población.

Mapa 11. Mapa de vulnerabilidad para vehículos.



En relación con el mapa de vulnerabilidad de vehículos, las vías principales con más tráfico son al mismo tiempo las más vulnerables.

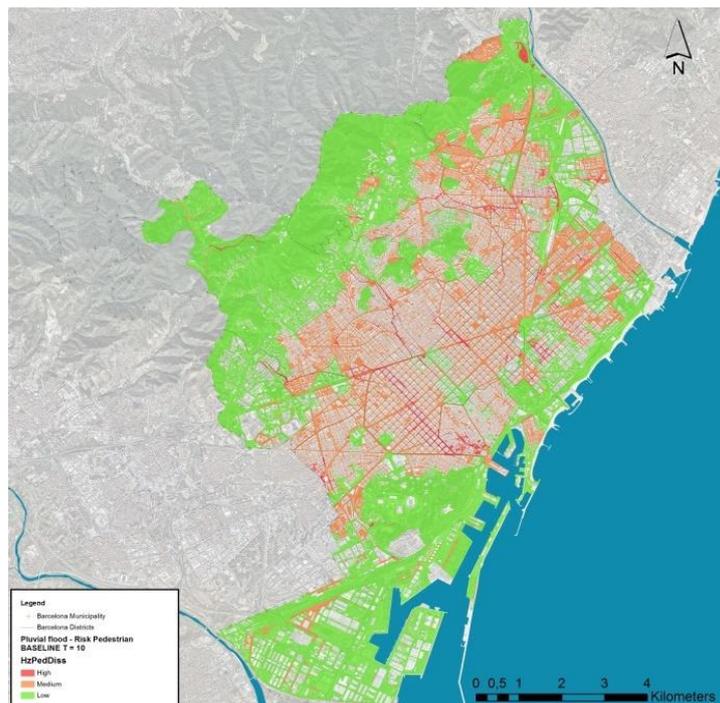
Una vez definidos el peligro y la vulnerabilidad, se desarrollan los **mapas de riesgo**. El resultado de este proceso es un mapa cualitativo que establece tres niveles de riesgo en zonas específicas de la ciudad, para peatones o vehículos, a partir de la combinación del nivel de peligro producido por la inundación pluvial y el nivel de vulnerabilidad. En la figura 10 se muestran los diferentes niveles de riesgo como resultado de la combinación de peligro provocado por las inundaciones y el nivel de vulnerabilidad:

Figura 10. Niveles de riesgo.

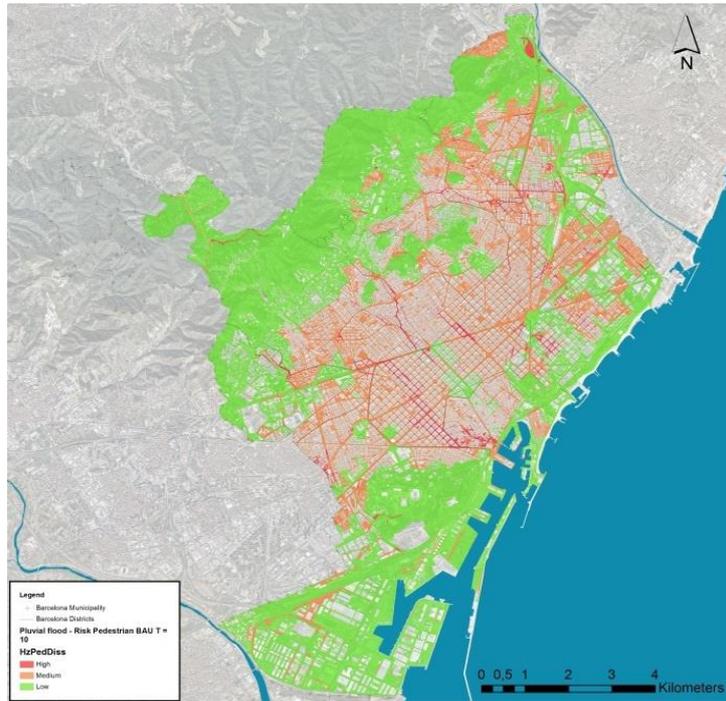
		Hazard		
		Low	Medium	High
Vulnerability	Low	Low	Low	Medium
	Medium	Low	Medium	High
	High	Medium	High	High

A continuación, se muestran los diferentes mapas de riesgo para peatones y vehículos en los escenarios actual y de cambio climático para los periodos de retorno T10 y T100:

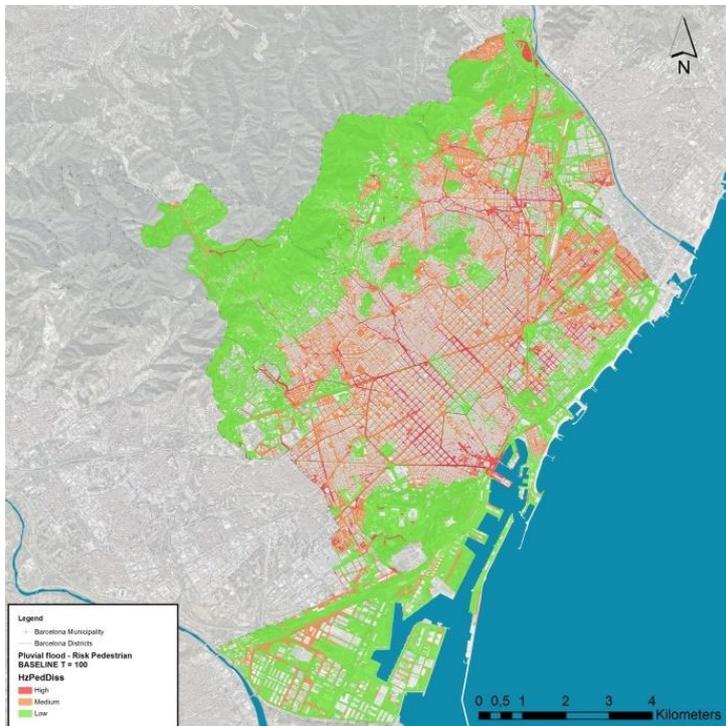
Mapa 12. Mapa de riesgo para peatones en el escenario actual con periodo de retorno T10.



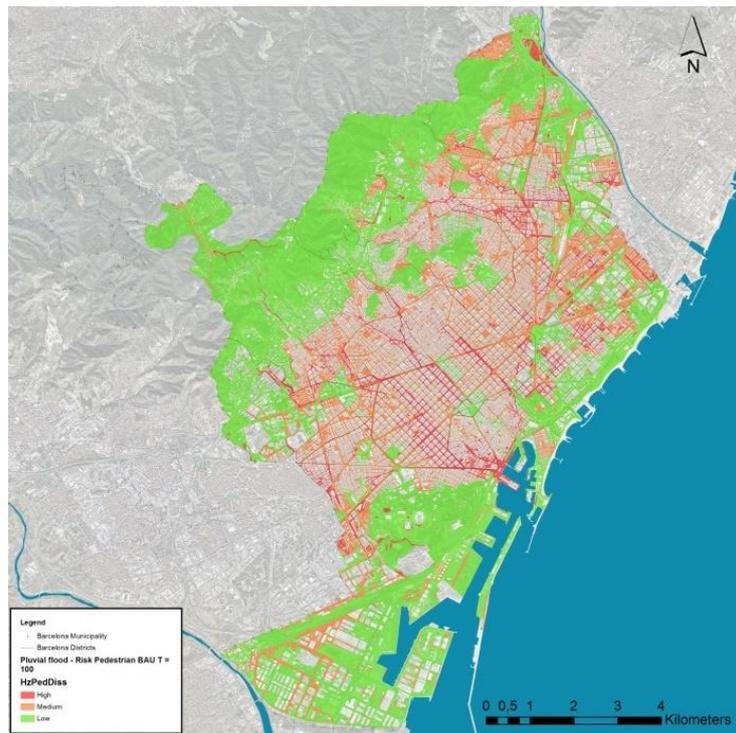
Mapa 13. Mapa de riesgo para peatones en el escenario futuro con periodo de retorno T10.



Mapa 14. Mapa de riesgo para peatones en el escenario actual con periodo de retorno T100.

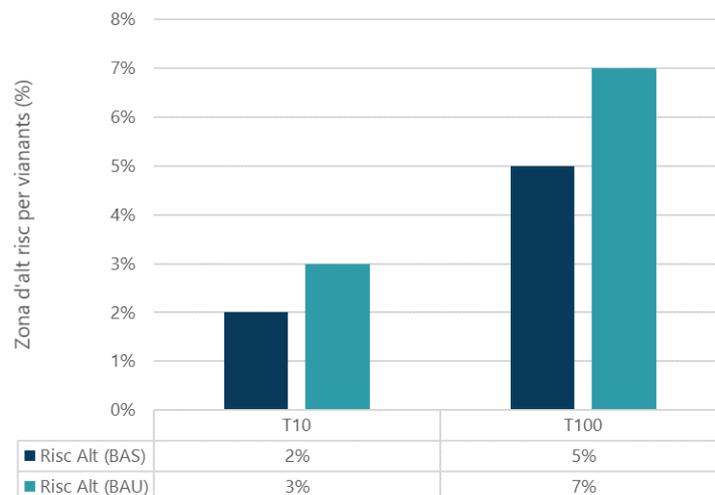


Mapa 15. Mapa de riesgo para peatones en el escenario futuro con periodo de retorno T100.



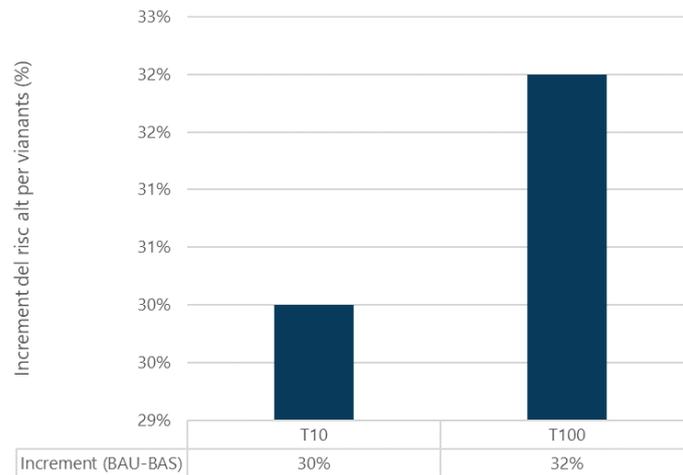
En general, y teniendo en consideración las conclusiones expuestas en los mapas de peligro, los resultados de las zonas de alto riesgo de toda la ciudad se presentan resumidos en la siguiente figura:

Figura 11. Áreas (en %) de alto riesgo para peatones en los escenarios actual y futuro para los periodos de retorno más significativos.



Además, con el objetivo de resaltar el efecto del cambio climático en términos de incremento de áreas de alto riesgo en Barcelona, se presenta la variación de áreas de riesgo para los peatones.

Figura 12. Incremento de área (en %) de alto riesgo para peatones previsto por el cambio climático para los periodos de retorno más significativos.



En el gráfico anterior se puede observar que el incremento de la intensidad máxima de las precipitaciones torrenciales a causa de los efectos del cambio climático provoca un aumento del riesgo para los peatones del orden del 30 %.

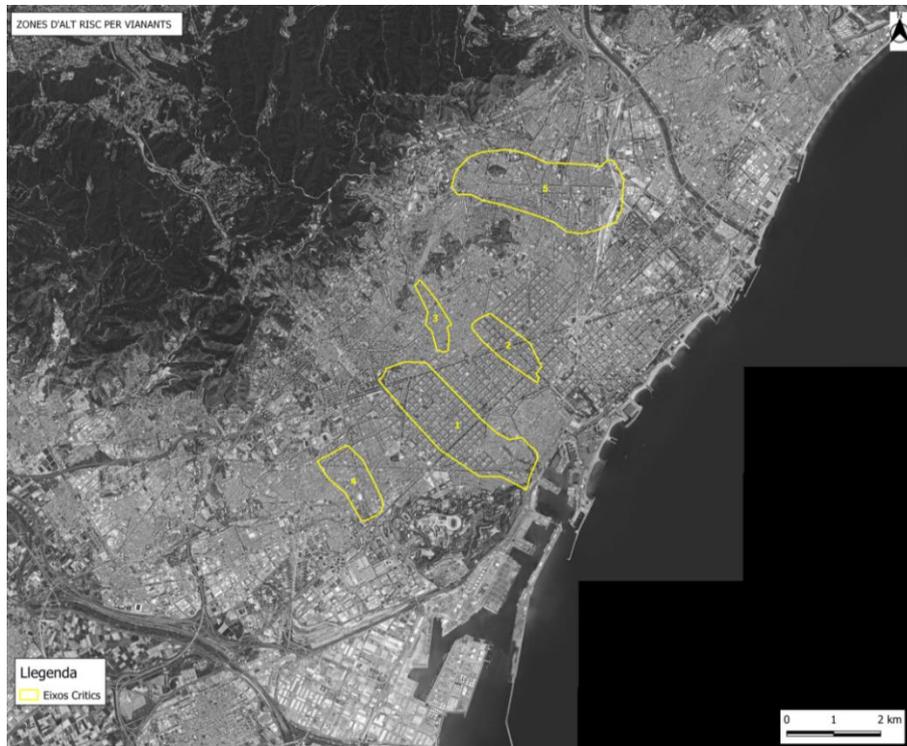
Además, los mapas de riesgo anteriores permiten definir las zonas más problemáticas de la ciudad para los peatones según sus áreas de riesgo alto, tanto en la situación actual como para la situación futura, y se puede comprobar el efecto del cambio climático sobre el incremento del riesgo.

En primer lugar, se identifican las zonas con más concentración de áreas en riesgo alto, que son prácticamente coincidentes con los puntos críticos más importantes de la ciudad a causa del mal funcionamiento de la red, a excepción de aquellos lugares donde la densidad de población es baja (y, por lo tanto, no son zonas de alta vulnerabilidad). Para facilitar la comprensión se han clasificado en ejes:

- Eje 1: el formado en la Esquerra de l'Eixample, barrio de Sant Antoni y el Raval, que empieza en la zona de Diagonal-pl. Francesc Macià, continuando por Villarroel, Casanova, av. Roma, Comte d'Urgell y Comte Borrell, hasta acabar en los alrededores de la calle de Sant Pau: zona de la ronda y calle de Sant Pau, Sant Antoni Abat, Paral·lel, rambla del Raval y avenida de las Drassanes.
- Eje 2: paseo de Sant Joan, Bailèn, av. Diagonal.
- Eje 3: Vallcarca, Riera de Cassoles, Vía Augusta.
- Eje 4: zona comprendida entre la rambla de Badal y Riera Blanca, desde Munné-calle de Sants, Bacardí y Parcerisa a la altura de Constitució hasta la calle del Quetzal.

- Eje 5: zona de Sant Andreu, empezando en Nou Barris y hasta la playa de vías de la Sagrera. Eje entre la calle de Alella y las ramblas de Fabra i Puig y Onze de Setembre, y eje Tajo, Cartellà, Riera de Horta.

Mapa 16. Ejes críticos más importantes de la ciudad.



En las siguientes figuras se muestran las áreas de alto riesgo para los peatones y su incremento, clasificadas según estos ejes.

Figura 13. Áreas (en ha) de alto riesgo para peatones en los escenarios actual y futuro para los periodos de retorno más significativos en los ejes con una concentración más alta de áreas en riesgo alto.

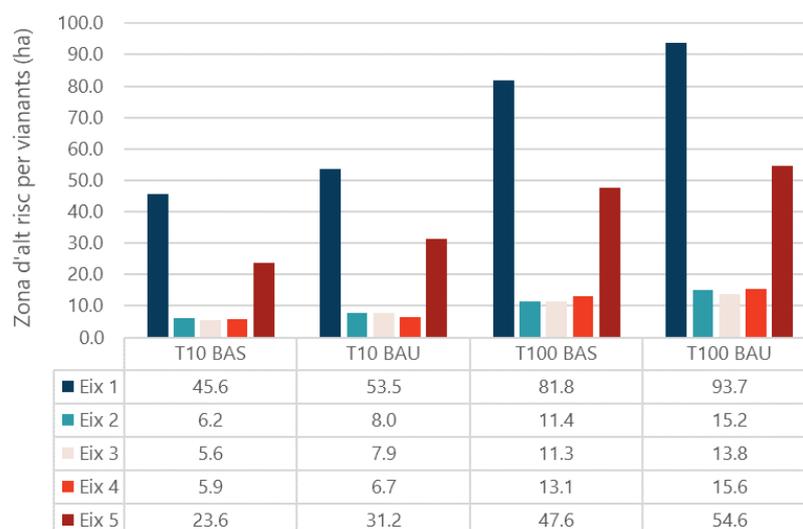
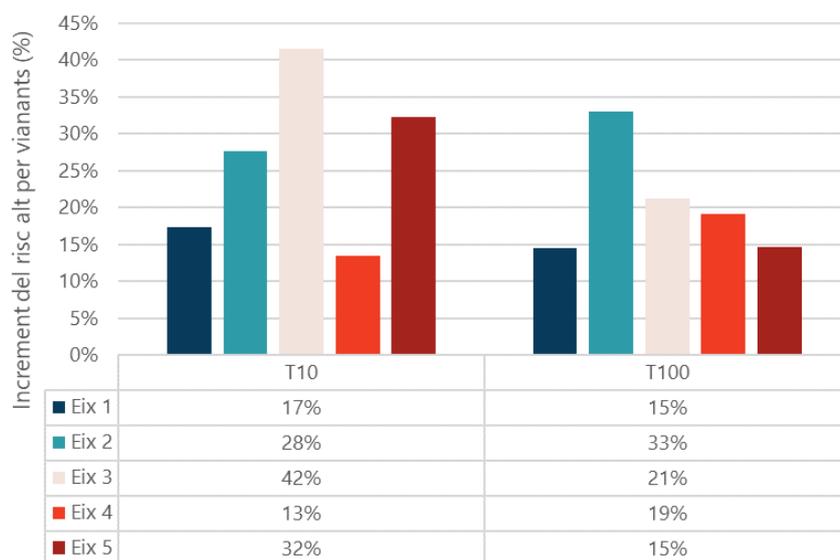


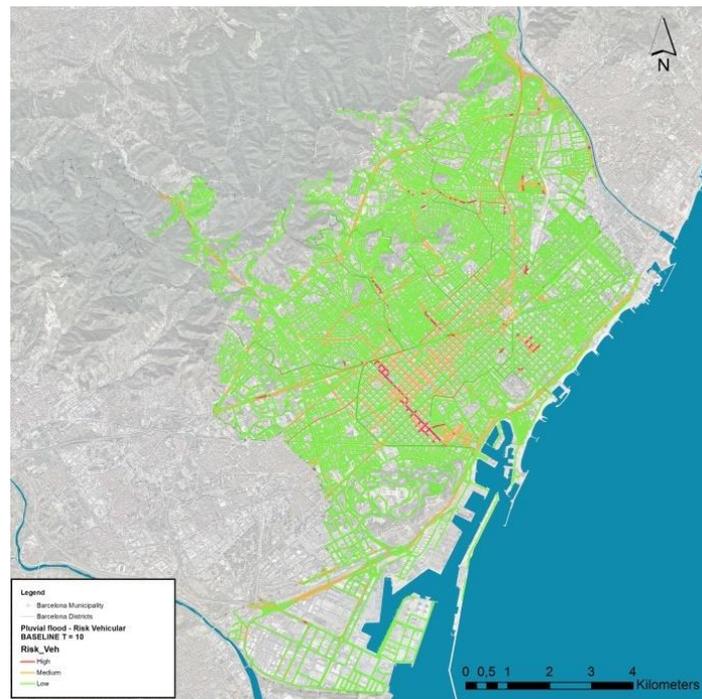
Figura 14. Áreas (en ha) de alto riesgo para peatones en los escenarios actual y futuro para los periodos de retorno más significativos en los ejes con una concentración más alta de áreas en riesgo alto.



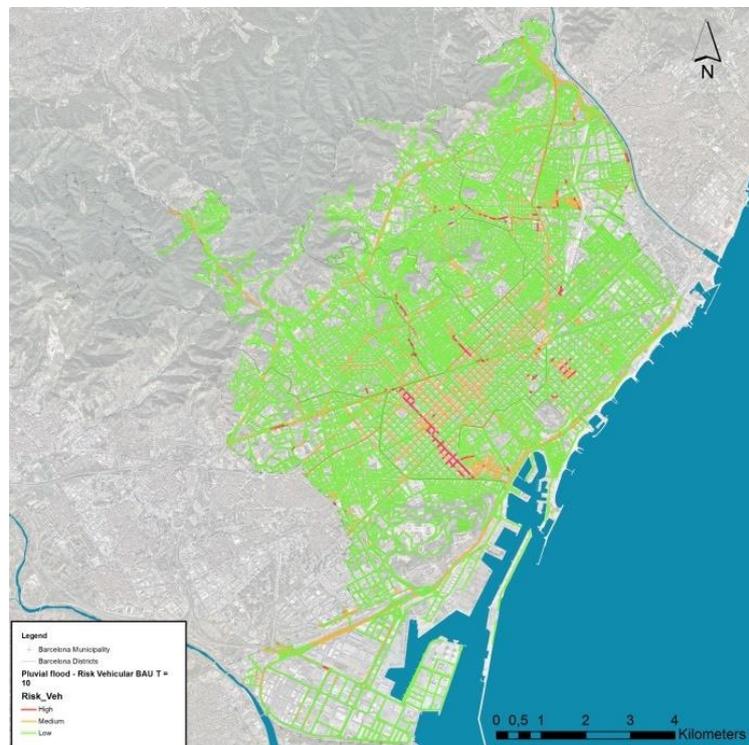
Los resultados muestran que, para un periodo de retorno de 10 años, el cambio climático puede producir un incremento medio de las áreas de riesgo alto del 15 % en los ejes 1 y 4, del 30 % en los ejes 2 y 5 y hasta de un 42 % en el eje 3.

Con respecto a las zonas de riesgo alto para vehículos, los resultados siguen la tendencia de los obtenidos para evaluar la peligrosidad para los vehículos y el riesgo para los peatones, y, por lo tanto, son válidas las conclusiones y consideraciones especificadas anteriormente.

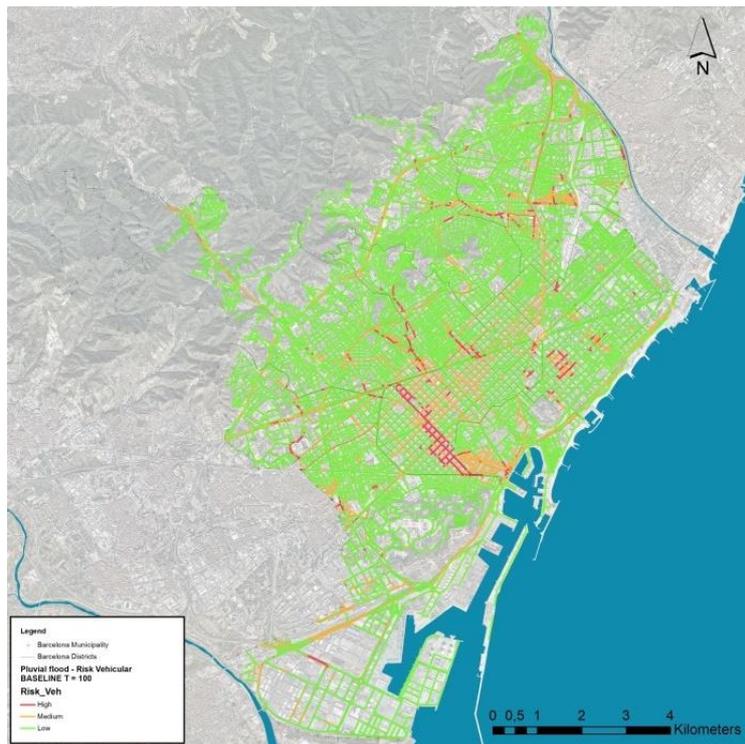
Mapa 17. Riesgo para vehículos en el escenario actual con periodo de retorno T10.



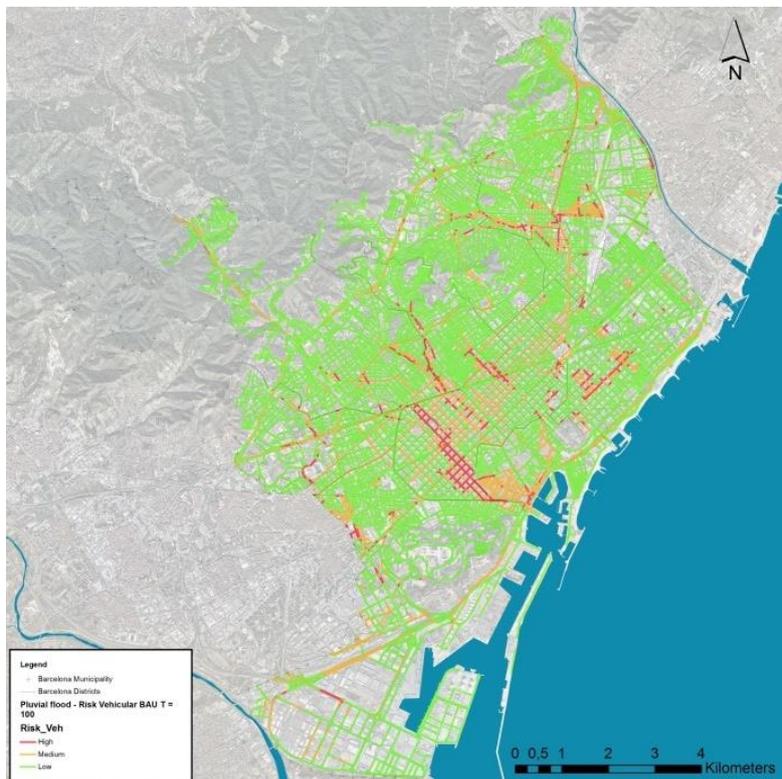
Mapa 18. Riesgo para vehículos en el escenario futuro con periodo de retorno T10.



Mapa 19. Riesgo para vehículos en el escenario actual con periodo de retorno T100.



Mapa 20. Riesgo para vehículos en el escenario futuro con periodo de retorno T100.



Cabe destacar que los resultados muestran que algunas áreas clasificadas de peligrosidad alta de inundabilidad tienen un riesgo reducido para vehículos comparado con el riesgo para los peatones. Pese a ello, los resultados muestran que el cambio climático puede producir un incremento del riesgo alto de cerca del 35 % (figura 13).

Figura 15. Áreas (en %) de alto riesgo para vehículos en los escenarios actual y futuro para los periodos de retorno más significativos.

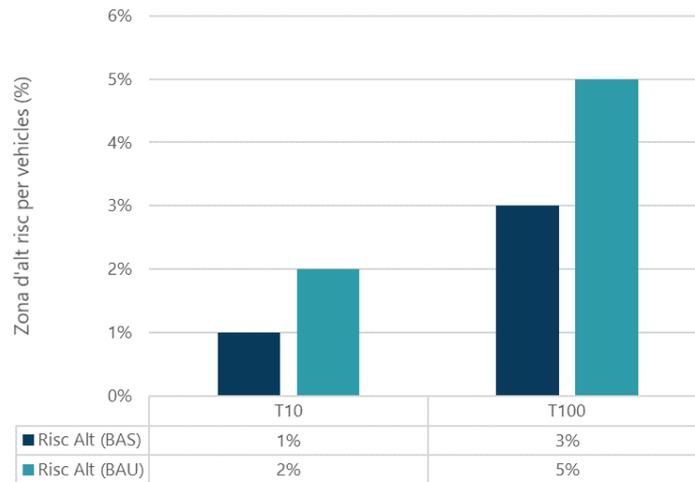
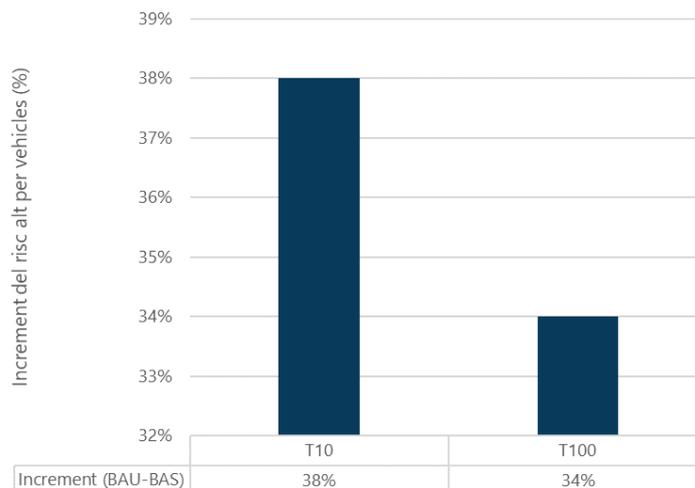


Figura 16. Incremento de área (en %) de alto riesgo para vehículos previsto por el cambio climático para los periodos de retorno más significativos.

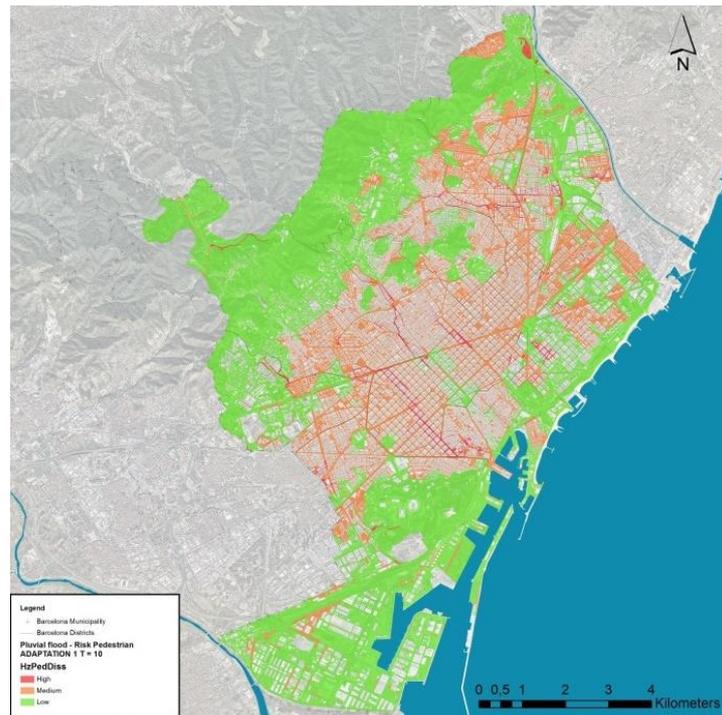


Una vez evaluado el incremento de las zonas de alto riesgo tanto para peatones como para vehículos, el proyecto pasa a evaluar la introducción de mejoras en la red de alcantarillado. Estas mejoras se han diferenciado en dos escenarios de adaptación: el primero prevé la instalación de

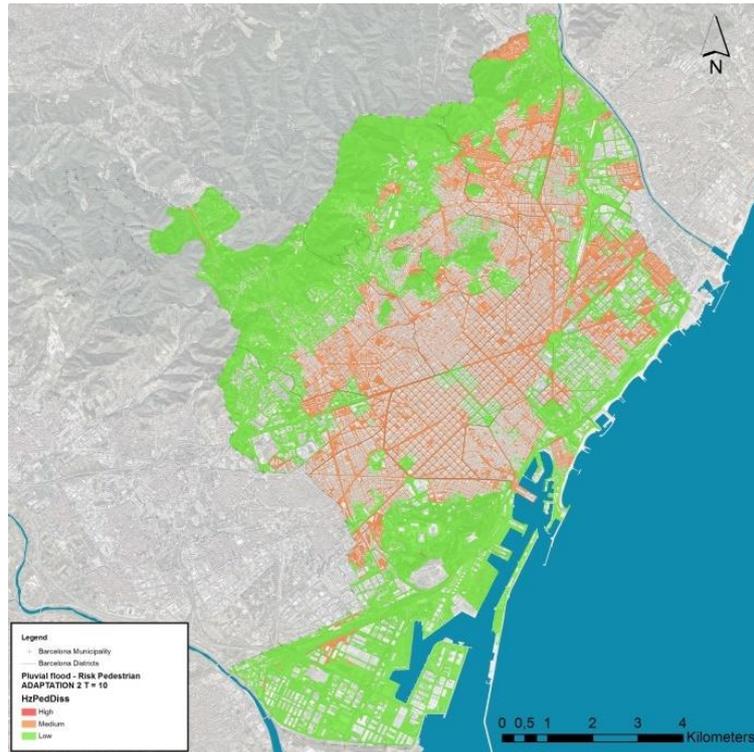
SUDS (sistemas de drenaje sostenible) en la ciudad —escenario de adaptación 1— y el segundo prevé la introducción de mejoras estructurales en la red de alcantarillado (mejora de las cañerías, implementación de tanques de retención de aguas pluviales) junto con los SUDS —escenario de adaptación 2—.

A continuación se muestran los mapas de riesgo para peatones y vehículos resultantes de la simulación de los modelos una vez introducidos los escenarios de adaptación 1 y 2:

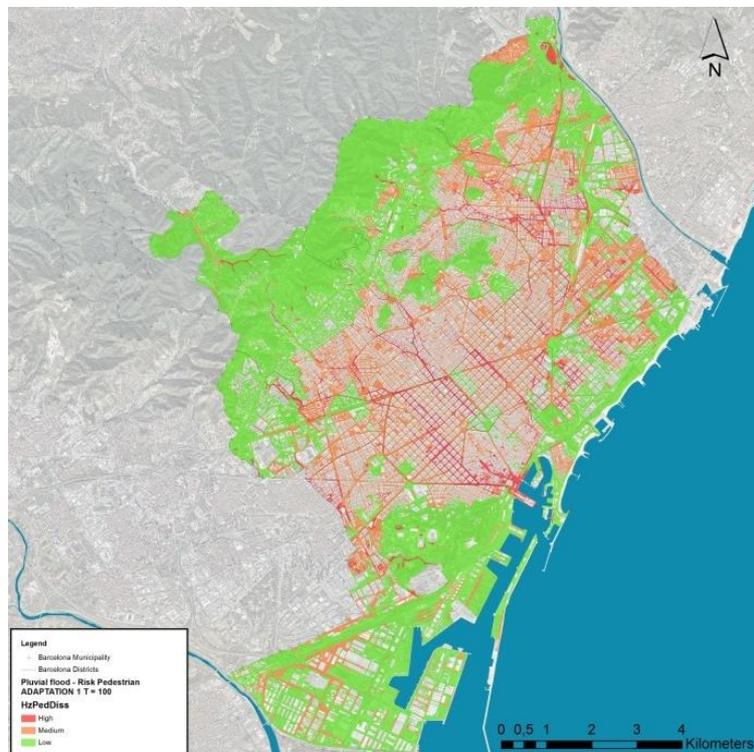
Mapa 21. Riesgo para peatones en el escenario de adaptación 1 con periodo de retorno T10.



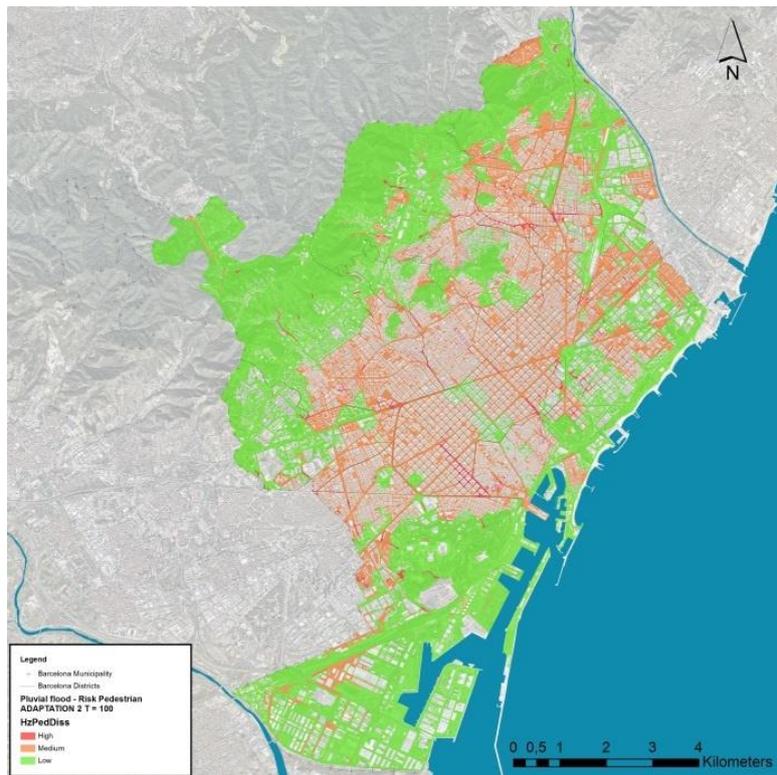
Mapa 22. Riesgo para peatones en el escenario de adaptación 2 con periodo de retorno T10.



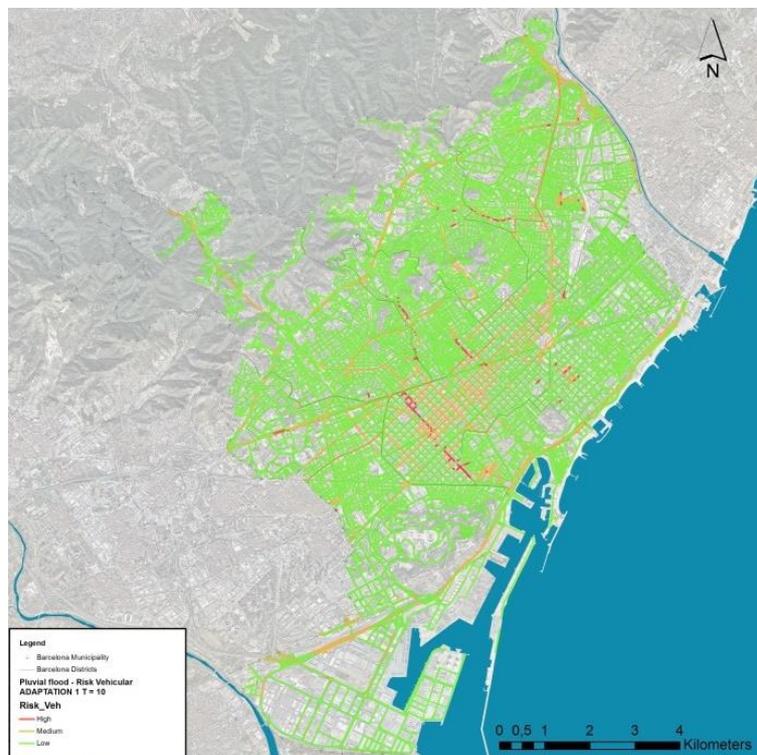
Mapa 23. Riesgo para peatones en el escenario de adaptación 1 con periodo de retorno T100.



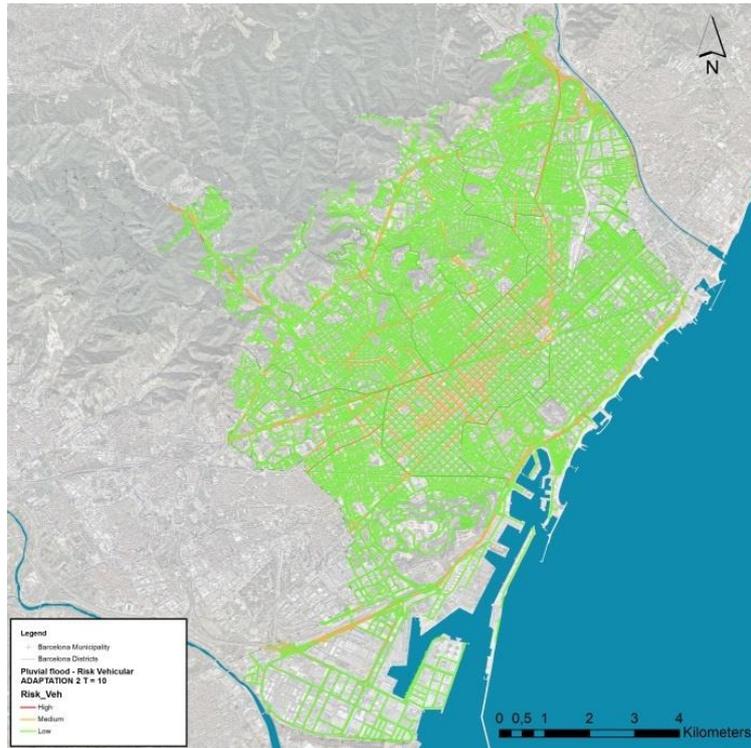
Mapa 24. Riesgo para peatones en el escenario de adaptación 2 con periodo de retorno T100.



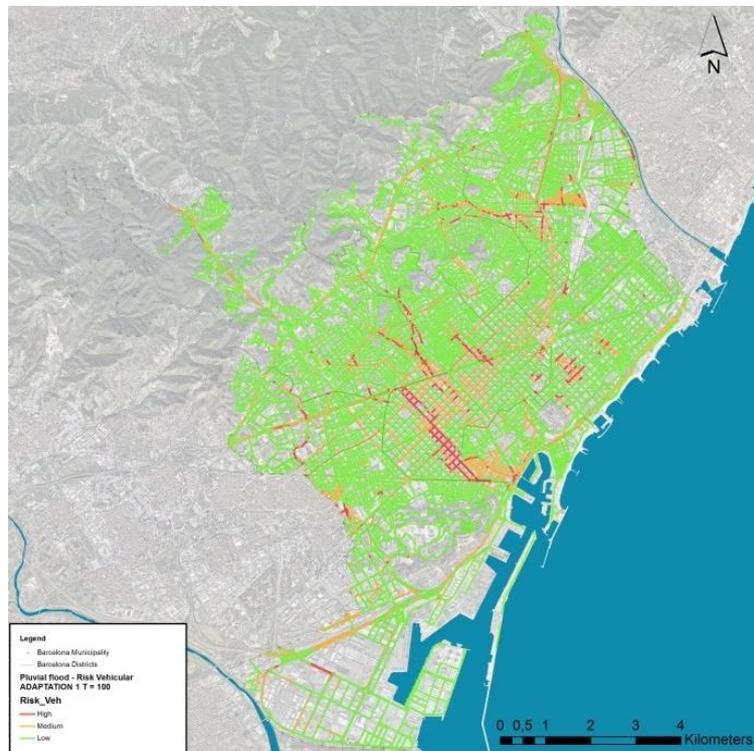
Mapa 25. Riesgo para vehículos en el escenario de adaptación 1 con periodo de retorno T10.



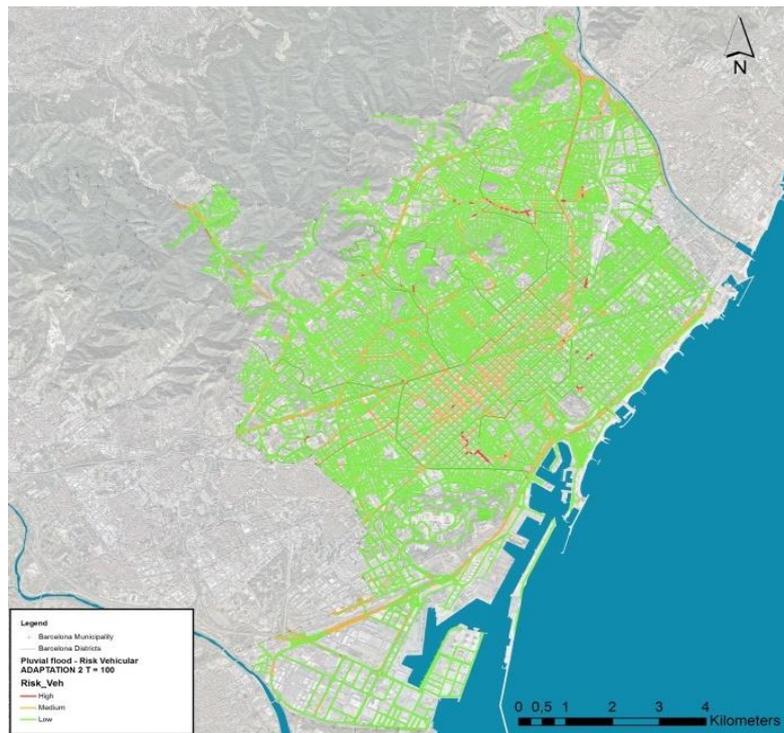
Mapa 26. Riesgo para vehículos en el escenario de adaptación 2 con periodo de retorno T10.



Mapa 27. Riesgo para vehículos en el escenario de adaptación 1 con periodo de retorno T100.



Mapa 28. Riesgo para vehículos en el escenario de adaptación 2 con periodo de retorno T100.



Si se compara el escenario de futuro, es decir, el estado actual de la ciudad afectado por las futuras condiciones de lluvia debidas al cambio climático, con los diferentes escenarios de adaptación, se puede obtener la reducción del riesgo como reducción del porcentaje de área con riesgo alto de inundación.

Las siguientes figuras indican la reducción del riesgo obtenida para los peatones y vehículos, respectivamente:

Figura 17. Decremento de área (en %) de alto riesgo para peatones como resultado de las medidas implantadas en los escenarios de adaptación 1 y 2 para los periodos de retorno más significativos.

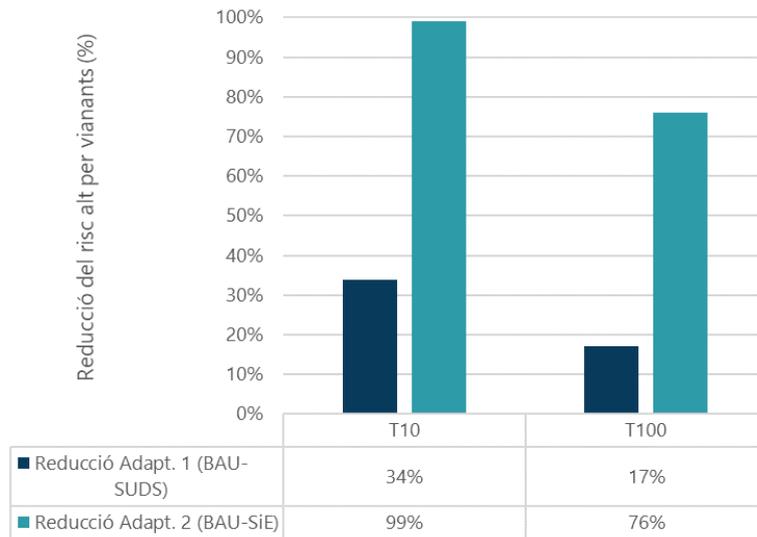
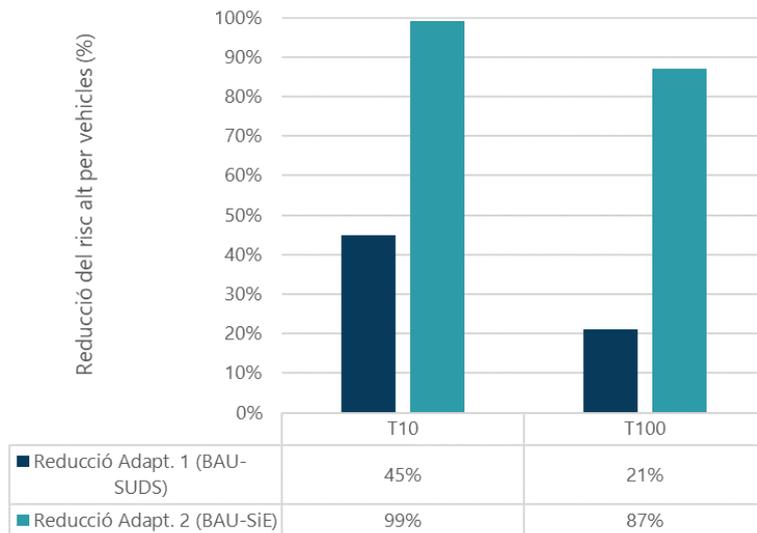


Figura 18. Decremento de área (en %) de alto riesgo para vehículos como resultado de las medidas implantadas en los escenarios de adaptación 1 y 2 para los periodos de retorno más significativos.



Como se puede observar, se prevé que los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) implementados en toda la ciudad reduzcan en cerca del 40 % los dos riesgos cuando se trate de precipitaciones con un periodo de retorno de 10 años, aunque se calcula que para periodos de retorno superiores, las reducciones del riesgo sean del 20 % o inferiores.

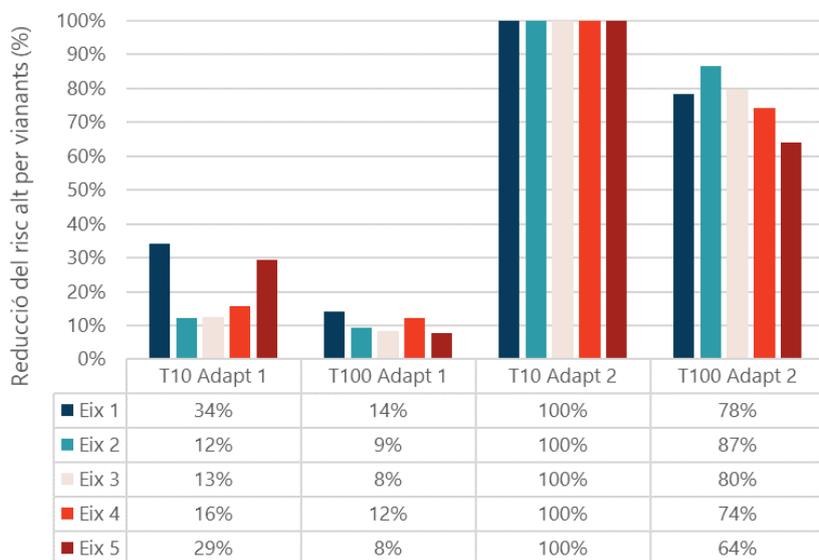
Por otra parte, la implementación conjunta tanto de SUDS como de medidas estructurales conducen a la reducción prácticamente del 100 % de los dos riesgos para tormentas de diseño

de 10 años de periodo de retorno. Esta cifra se reduce a medida que aumenta el periodo de retorno, de modo que se obtiene una reducción de cerca de un 80 % para el periodo de retorno de 100 años.

Cabe remarcar que el escenario de adaptación 2 prevé la propuesta de actuaciones para la red primaria de la ciudad y considera la red secundaria con bastante capacidad.

Además, se ha hecho un análisis detallado sobre la reducción del riesgo para los peatones (caso más desfavorable) en los ejes con una concentración más elevada de áreas en riesgo alto.

Figura 19. Decremento de área (en %) de alto riesgo para peatones como resultado de las medidas implantadas en los escenarios de adaptación 1 y 2 para los periodos de retorno más significativos en los ejes con una concentración más elevada de áreas en riesgo alto.



Aunque se observa un comportamiento similar en términos de reducción de riesgo para los peatones a escala de ciudad, se identifican algunas diferencias entre ejes.

Los ejes 1, en la Esquerra de l'Eixample, barrio de Sant Antoni y el Raval, y 5, en la zona de Sant Andreu-Nou Barris, son los que más se benefician de la implementación de SUDS al reducir su riesgo para los peatones en cerca de un 30 % para las precipitaciones más frecuentes (periodo de retorno de 10 años). Por el contrario, los ejes 2, en paseo de Sant Joan, y 3, en Riera de Cassoles, son los que menos se benefician de la implementación de las actuaciones con solo un 12-13 % de reducción de riesgo para los peatones. Cabe recalcar que los ejes 1 y 5 son los mayores y, por lo tanto, los que tienen más área de riesgo alto (figura 16) y que, en consecuencia, son los que se benefician de una reducción del riesgo más elevada.

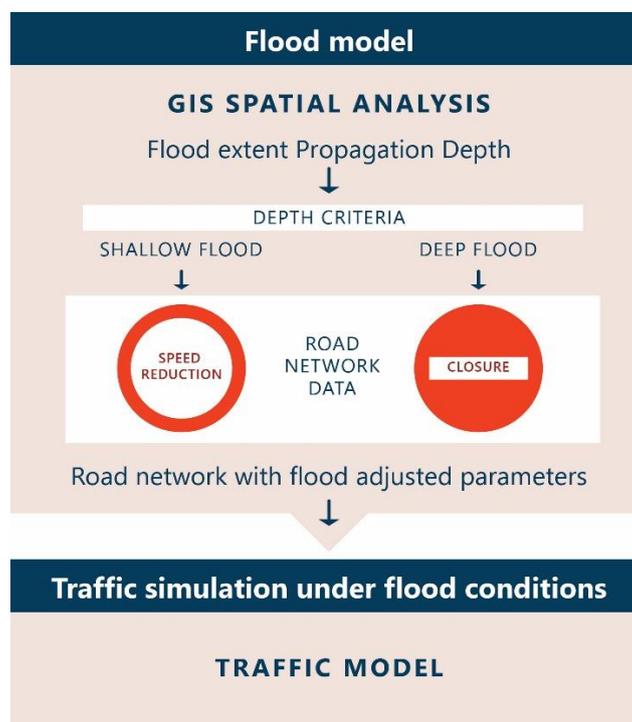
No obstante, el despliegue del segundo escenario de adaptación implica una reducción de riesgo total para todos los ejes cuando se trata de tormentas de diseño a 10 años.

3.3 Efecto en el tráfico

Cuando se produce una inundación urbana, la escorrentía superficial podría suponer daños indirectos por interrupción del tráfico. En el proyecto RESCCUE se ha evaluado la reducción de las velocidades de desplazamiento permitidas a través de los diferentes transectos en relación con las profundidades de flujo de agua presente. Esta clase de análisis permitió evaluar el peligro de inundación en el sector del transporte de superficie. Además, los resultados de la modelización se han utilizado para alimentar el modelo de transporte dinámico Transcad, que utiliza la Dirección de Movilidad del Ayuntamiento de Barcelona para estimar los impactos producidos por las inundaciones urbanas pluviales sobre el servicio de tráfico.

El modelo hidrodinámico proporciona una profundidad de inundación en la superficie para cada celda del dominio. Estas profundidades de inundación se utilizan para elaborar mapas de peligro según criterios específicos de peligrosidad. La metodología, desarrollada por la Universidad de Exeter, se muestra en la siguiente figura.

Figura 20. Metodología desarrollada por la Universidad de Exeter para elaborar el modelo de inundación-tráfico.

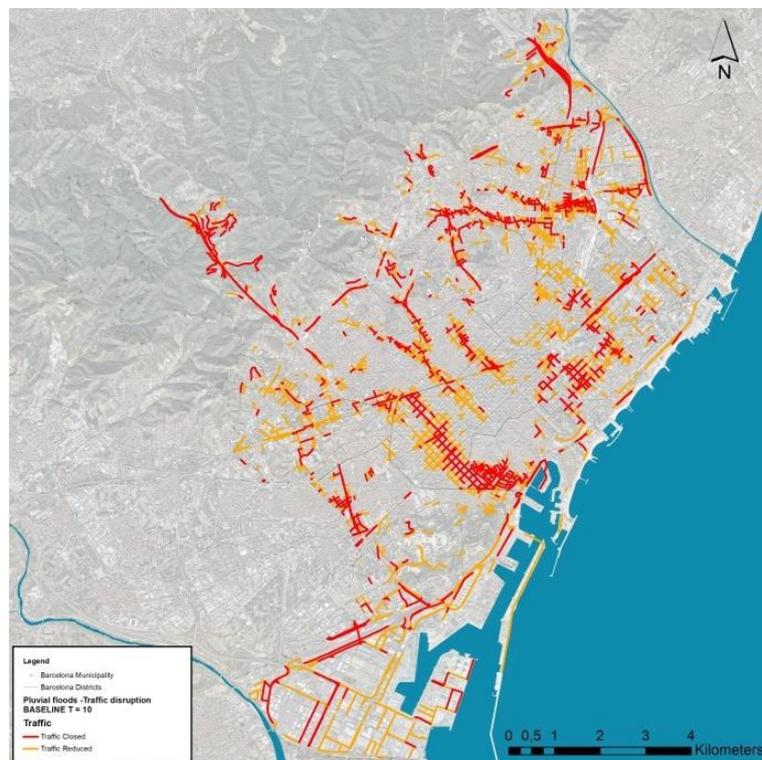


Para la evaluación del peligro de inundación en la infraestructura viaria se ha hecho un análisis espacial en base GIS y se han aplicado las reglas sobre la reducción de la velocidad del tráfico que se muestran en la siguiente tabla:

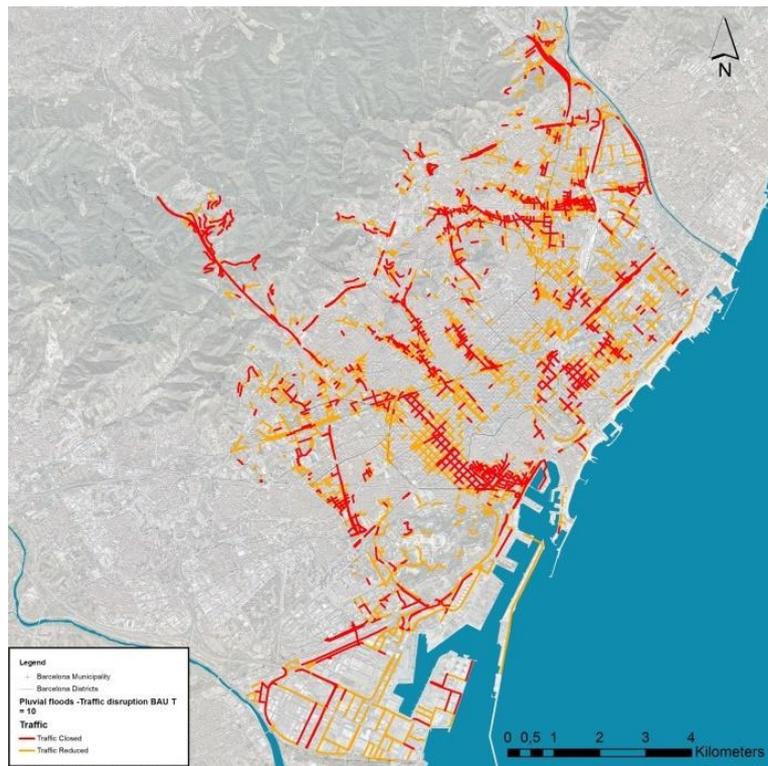
Flood Depth Range (cm)	Maximum Permitted Speed kmh ⁻¹
0,00 – 10,00	Roads maximum speed
10,00 – 30,00	20
30,00 +	0 (road closed)

Según la metodología expuesta, se han elaborado mapas de riesgo cualitativos clasificando el peligro en tres niveles (**bajo, medio y alto**) para el escenario actual y para los escenarios de cambio climático obtenidos mediante técnicas estadísticas y de regresión temporal, para 20 series pluviométricas futuras proporcionadas por 10 modelos de circulación atmosférica general, forzados por escenarios RCP 4.5 y 8.5, y previamente validados para un periodo de control histórico (1976-2005). A continuación se muestran los mapas de efecto en el tráfico por el riesgo de inundación en el escenario actual y el escenario futuro, para los periodos de retorno T10 y T100:

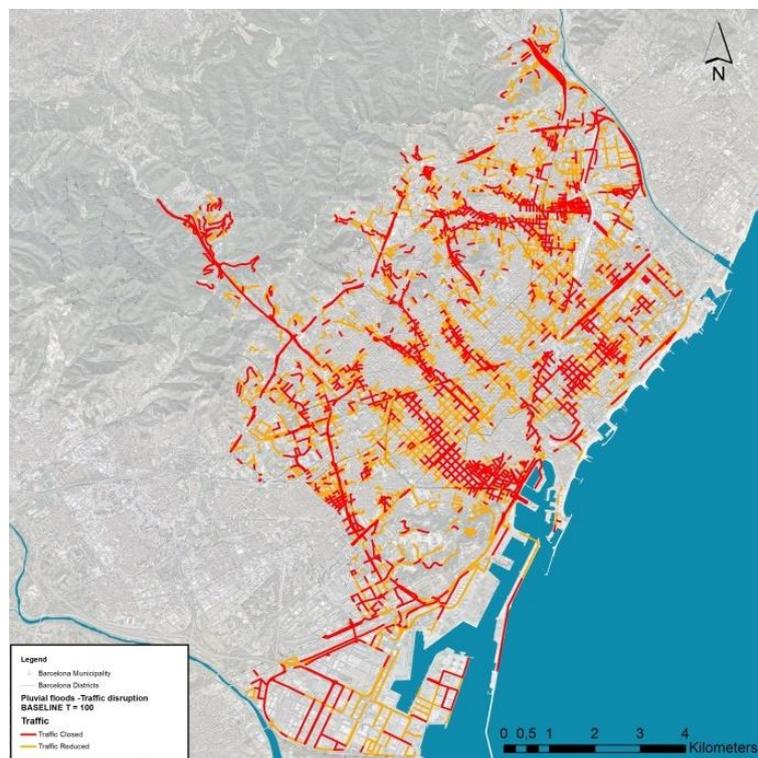
Mapa 29. Efecto en el tráfico de superficie para el escenario actual con periodo de retorno T10.



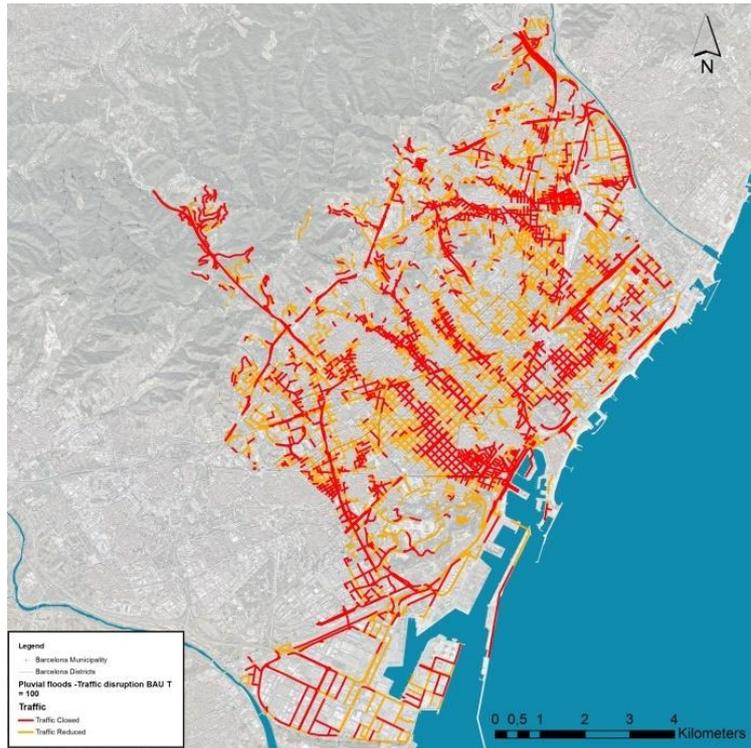
Mapa 30. Efecto en el tráfico de superficie para el escenario futuro con periodo de retorno T10.



Mapa 31. Efecto en el tráfico de superficie para el escenario actual con periodo de retorno T100.

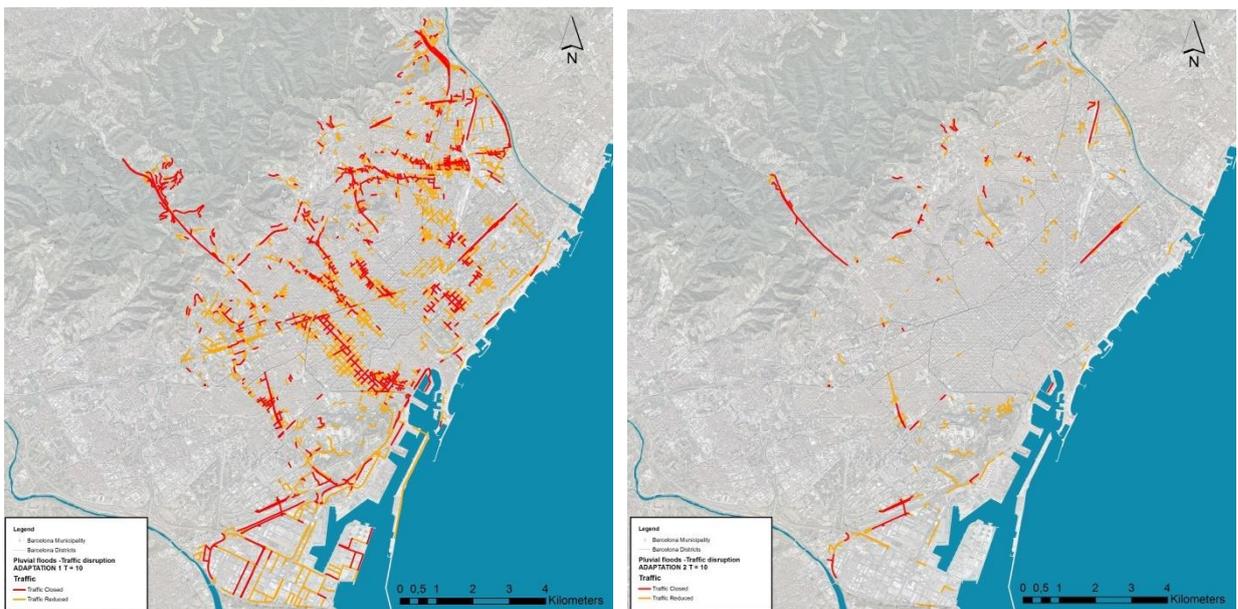


Mapa 32. Efecto en el tráfico de superficie para el escenario futuro con periodo de retorno T100.

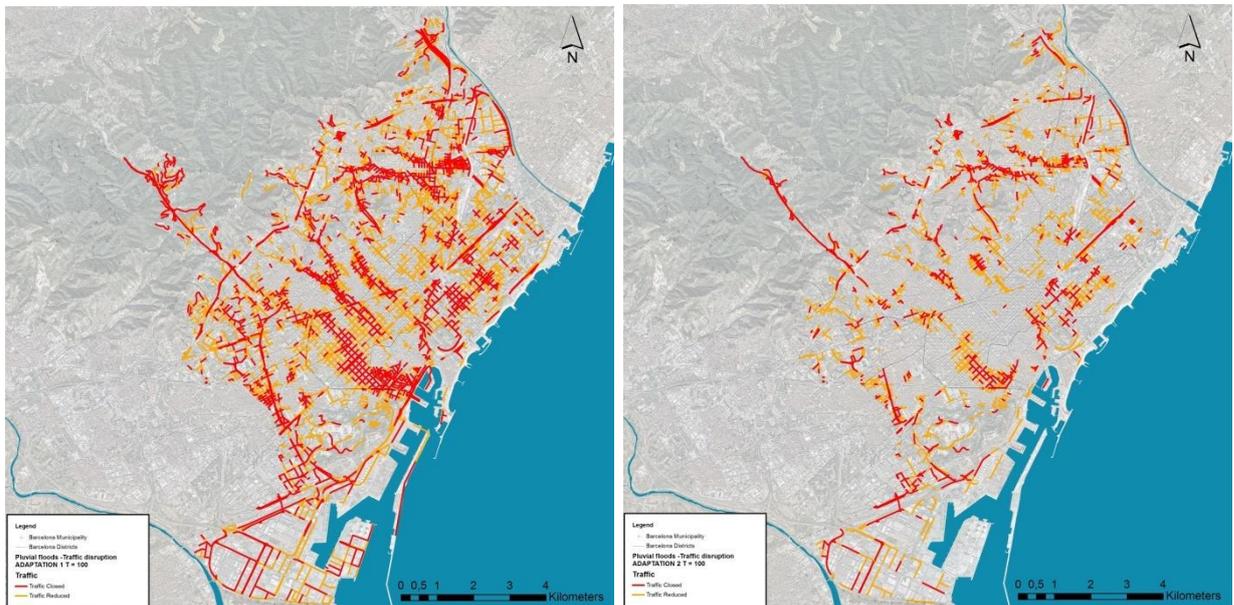


A continuación se muestran los mapas de efecto en el tráfico de superficie teniendo en cuenta la incorporación de medidas de adaptación a través de los escenarios de adaptación 1 y 2:

Mapa 33. Mapas de efecto en el tráfico de superficie para el escenario de adaptación 1 (izquierda) y el escenario de adaptación 2 (derecha) con periodo de retorno T10.



Mapa 34. Mapas de efecto en el tráfico de superficie para el escenario de adaptación 1 (izquierda) y el escenario de adaptación 2 (derecha) con periodo de retorno T100.



El modelo de tráfico del Transcad incluye, entre otros parámetros de tráfico, la información de la velocidad máxima permitida en cada tramo de calle. A partir de los calados de agua calculados en el modelo hidrodinámico 1D/2D en todos los escenarios y periodos de retorno estudiados, y teniendo en consideración la tabla anterior de los efectos del peligro de inundación en el tráfico, se modifican los límites de velocidad máxima permitida en cada uno de los tramos de calles inundados dentro del modelo de tráfico y se vuelve a generar el modelo con estas nuevas condiciones.

Este tipo de información se puede introducir en el modelo de tráfico del departamento de movilidad de la ciudad para evaluar el incremento del tiempo de viaje a la ciudad y, posteriormente, hacer análisis de monetización, incremento de emisiones y consumo, etcétera.

En las figuras siguientes se puede observar la evolución de la situación del efecto en el tráfico de superficie en las calles de Barcelona para los escenarios actual, futuro y de adaptación 1 y 2 y los periodos de retorno de 10 y 100 años.

Figura 21. Longitudes (en %) de calles con velocidad reducida y cerradas por efecto de las inundaciones en la ciudad de Barcelona para los escenarios actual, futuro, de adaptación 1 y 2 y para los periodos de retorno más significativos.

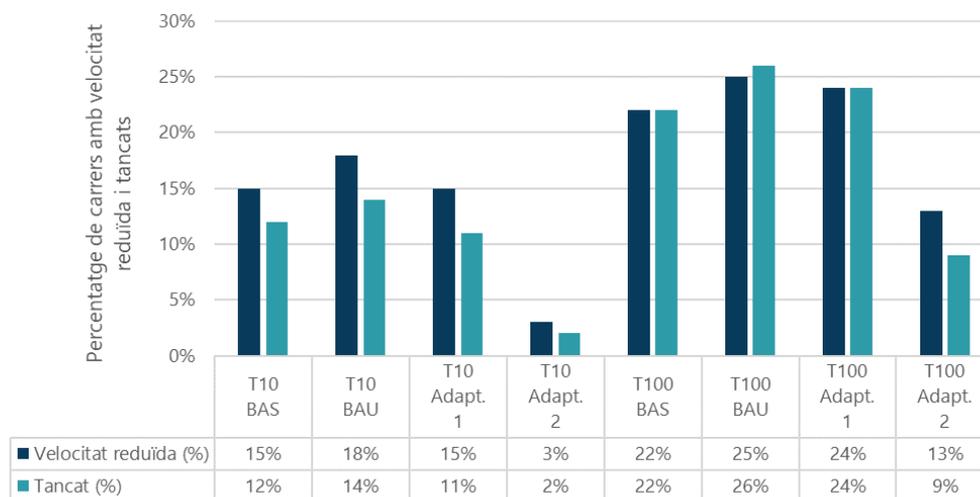


Figura 22. Incremento de longitudes (en %) de calles con velocidad reducida y cerradas por efecto de las inundaciones en la ciudad de Barcelona previsto por el cambio climático y para los periodos de retorno más significativos.

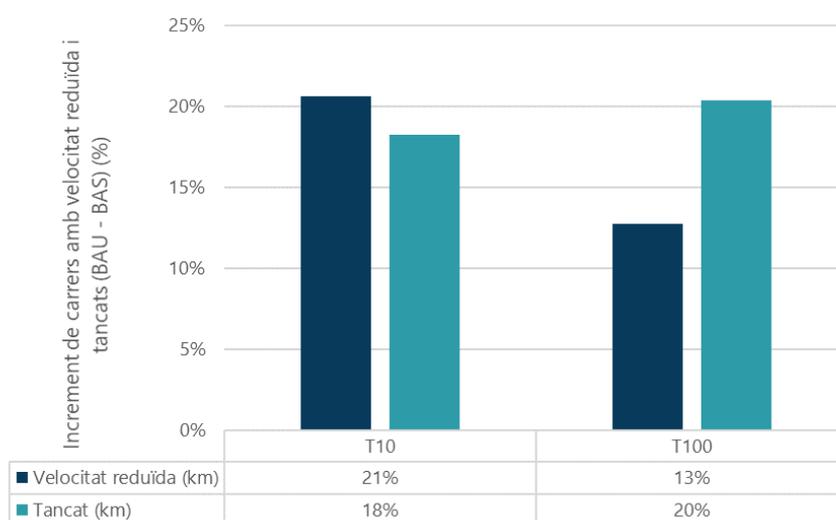
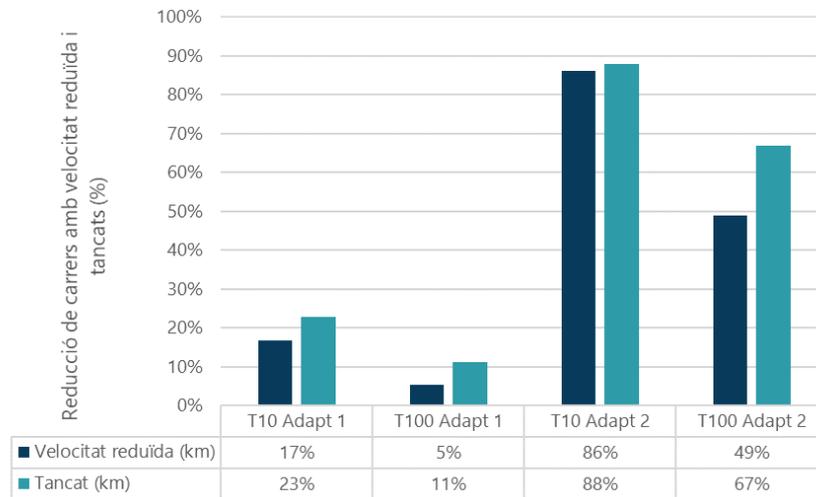


Figura 23. Decremento de longitudes (en %) de calles con velocidad reducida y cerradas por efecto de las inundaciones en la ciudad de Barcelona como resultado de las medidas implantadas en los escenarios de adaptación 1 y 2 para los periodos de retorno más significativos.



El análisis de los resultados muestra que, a medida que aumenta el periodo de retorno, el número de tramos de calles afectadas aumenta en consecuencia. La figura 15 presenta el porcentaje de kilómetros de calle que se clasifican como cerradas o con velocidad reducida, y cómo este porcentaje aumenta con el periodo de retorno. Lógicamente, estos porcentajes también aumentan en el escenario de cambio climático y disminuyen en los escenarios de adaptación gracias a las medidas implementadas.

Comparando los resultados de los dos escenarios (actuales y futuros), se puede observar que para un total de 1.492 km, las calles que se pueden ver afectadas por una reducción de velocidad se incrementan entre el 13 % y el 21 % según el periodo de retorno, mientras que el aumento de calles cortadas puede ser de cerca del 20 % para todos los periodos de retorno.

En cuanto al efecto de las medidas de adaptación, las variaciones de los escenarios de actuaciones se han considerado en relación con el escenario futuro con cambio climático. Los resultados indican que el decremento de calles afectadas se sitúa en cerca del 20 % (escenario de adaptación 1) y del 90 % (escenario de adaptación 2) para el periodo de retorno de diseño (T10).

3.4 Estabilidad de los contenedores de residuos sólidos urbanos

Antes de que los residuos sólidos se transporten hasta los vertederos, el proceso de recogida de las grandes ciudades empieza a partir de una recogida regular del servicio municipal de residuos domésticos que se hace a través de contenedores de calle. Por lo tanto, cuando se produce una inundación urbana, estos contenedores pueden perder la estabilidad, lo que puede provocar que los desperdicios se escapen del contenedor y contaminen el agua de la inundación. Este estudio pretende proporcionar la ubicación de contenedores potencialmente inestables en la ciudad cuando se exponen a diferentes frecuencias de inundaciones. Los riesgos relacionados con la estabilidad de los contenedores se pueden resumir en colisiones con otros elementos o propiedades urbanas, esfuerzos y gastos adicionales para volver a ponerlos en su lugar, contaminación del agua, seguridad de los peatones, interrupción del tráfico, posibles bloqueos del alcantarillado y aumento de la probabilidad de efectos en cascada por inundaciones.

La metodología desarrollada² considera que la estabilidad de los contenedores se puede ver comprometida cuando las variables hidrodinámicas, calado y velocidad del agua superan un umbral determinado. Estas variables se han combinado y comparado con los umbrales de estabilidad de deslizamiento y vuelco de los diferentes contenedores.

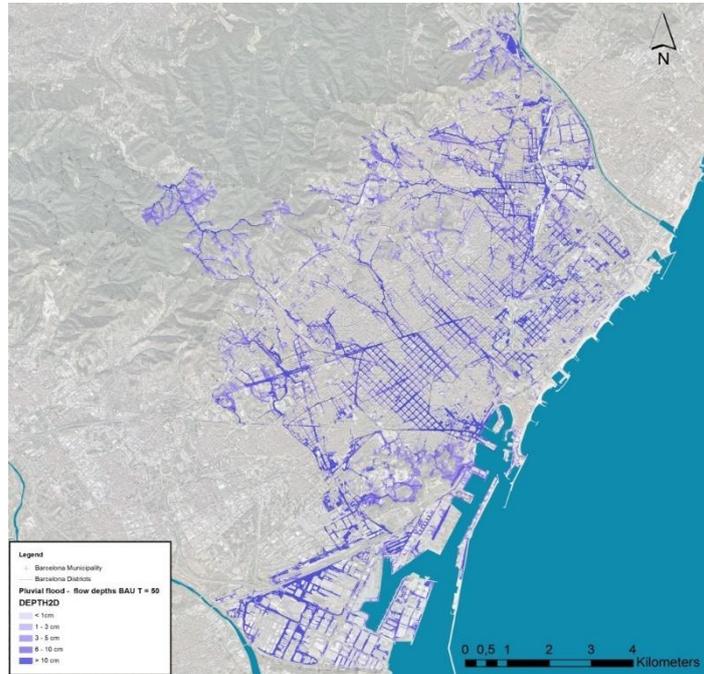
En Barcelona hay un total de 27.134 contenedores, que se pueden clasificar según la fracción que contienen: desechos (44 %), orgánicos (22 %), papel y cartón (12 %), envases (11 %) y vidrio (11 %); por su volumen en litros (3.200, 3.000, 2.400, 2.200 y 1.800); o por la manera de cargarlos: lateral (62 %), bilateral (25 %), posterior (12 %) y subterránea (1 %). A causa del pequeño porcentaje de contenedores de carga posterior y subterránea cuando se compara con los de tipo lateral y bilateral, solo se han tenido en cuenta estos últimos en el estudio, lo que supone un 87 % del total de los contenedores. Un contenedor puede ser más o menos vulnerable a las inundaciones, en función de su volumen, fracción y grado de llenado. Se han estudiado tres escenarios de llenado: contenedores vacíos, 50 % llenos y completamente llenos.

La vulnerabilidad se define mediante curvas de estabilidad que se han desarrollado para cada tipo de contenedor. Todos los contenedores considerados en el estudio se presentan en estos mapas con la indicación de su capacidad y la clase de fracción. Las funciones de estabilidad se han desarrollado a partir de un análisis de las fuerzas que actúan sobre un contenedor estableciendo condiciones de equilibrio para los diferentes modos de inestabilidad (es decir, deslizar, volcar y flotar). Estas funciones dependen de la velocidad y de la profundidad del agua (calado). Además, las características de cada contenedor (por ejemplo, el volumen, las dimensiones o la fracción que puede contener) determinan la forma de cada función. Los umbrales de estabilidad obtenidos se utilizan para analizar el comportamiento potencial de los contenedores ante las inundaciones en Barcelona causadas por lluvias de diseño para periodos

² Martínez-Gomariz, E., Russo, B., Gómez, M., Plumed, A. (2020): "An approach to the modelling of stability of waste containers during urban flooding". *J. Flood Risk Manag.* 13, jfr3.12558. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12558>

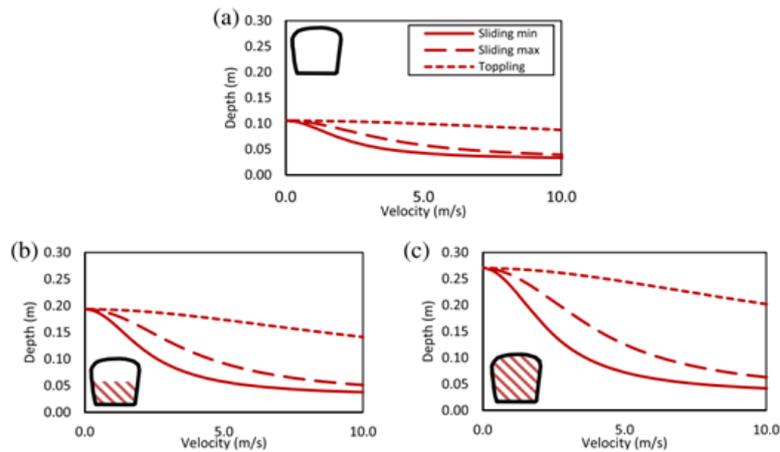
históricos y de corto periodo de retorno, es decir, entre 1, 10 y 50 años. A continuación se muestra el mapa de inundabilidad urbana correspondiente a un periodo de retorno de 50 años para el escenario futuro:

Mapa 35. Inundabilidad urbana en el escenario futuro para el periodo de retorno T50.



En la figura siguiente se muestran las curvas de estabilidad con respecto al deslizamiento y al vuelco para un contenedor de carga lateral de 3.200 l y fracción de desechos para diferentes escenarios: (a) contenedor vacío, (b) contenedor lleno al 50 % y (c) contenedor completo:

Figura 24. Curvas de estabilidad de los contenedores de residuos urbanos en función del grado de llenado.



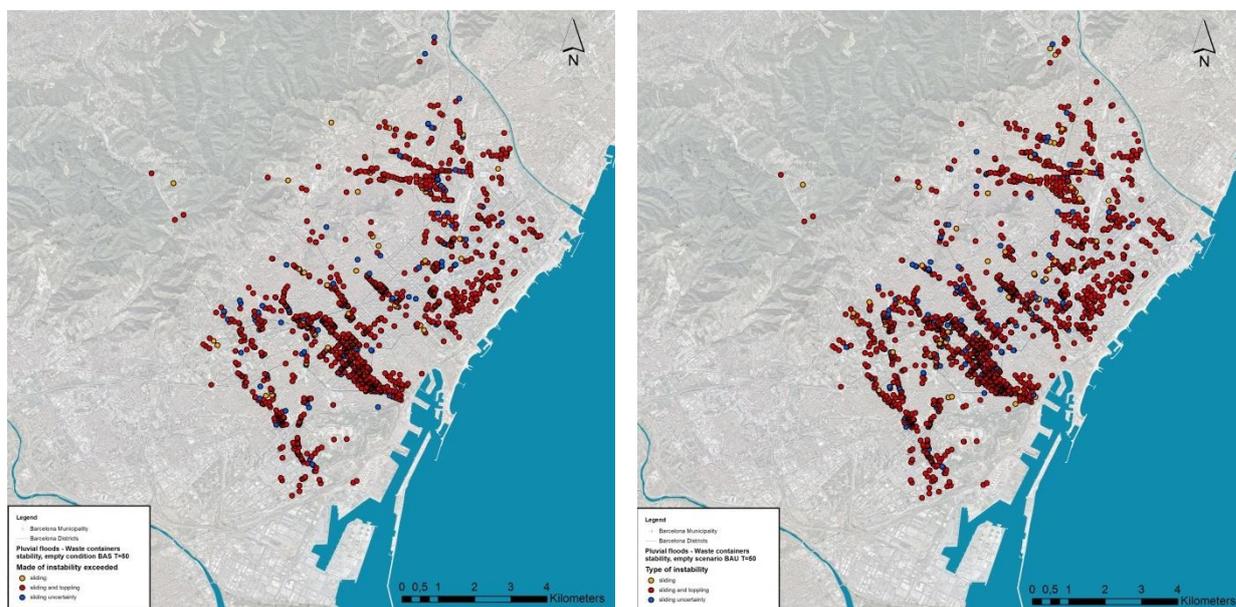
Este tipo de desperdicios transportados por aguas de inundación pueden restringir todavía más una calle estrecha y aumentar el riesgo, ya que pueden crear una cuenca cerrada sin salida para la escorrentía y agravar los efectos de las inundaciones. Por otra parte, las entradas en las alcantarillas pueden quedar obstruidas con residuos sólidos si salen del contenedor después de perder la estabilidad y empeorar el sistema de drenaje. Además, la pérdida de estabilidad de los contenedores puede provocar efectos en cascada, como la interrupción del tráfico, la interrupción de la recogida de residuos y el bloqueo potencial de las alcantarillas, así como causar impactos en las personas u otros bienes.

La evaluación del riesgo que se ha hecho se basa en los contenedores específicos expuestos a un cierto nivel de peligro determinado por la profundidad y la velocidad del agua, de manera que se han identificado las zonas de alto riesgo donde se espera que una gran cantidad de contenedores pierdan la estabilidad.

La principal incertidumbre de este estudio es el grado de llenado de cada contenedor. Aunque se consideran tres escenarios diferentes en cuanto al grado de llenado, la asunción de todos ellos al mismo tiempo, que deben llenarse en el mismo grado, implica una incertidumbre importante.

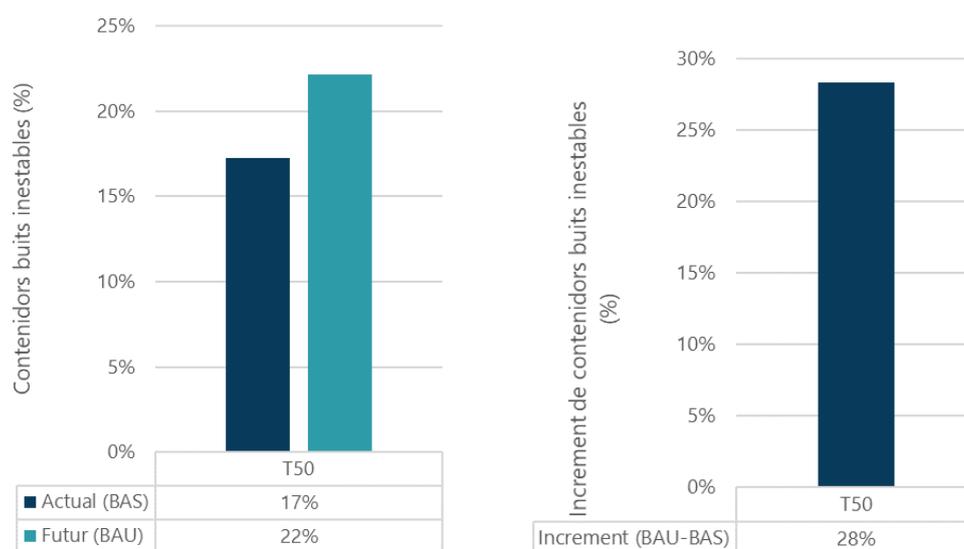
Los mapas generados representan los contenedores que pueden perder la estabilidad según diferentes tipos de modos de inestabilidad (flotabilidad, deslizamiento y vuelco) y basados en diferentes escenarios de llenado (vacíos, medio llenos, totalmente llenos). A continuación, se muestran los mapas para un escenario de riesgo alto: contenedores vacíos por un periodo de retorno de 50 años para los escenarios actual y futuro.

Mapa 36. Mapas de efecto en los contenedores de residuos sólidos urbanos para el escenario actual (izquierda) y el escenario futuro (derecha) con periodo de retorno T50.



Si representamos gráficamente el número y la variación de contenedores de residuos sólidos urbanos de los mapas anteriores, obtenemos lo siguiente:

Figura 25. Número de contenedores (en %) de residuos sólidos urbanos vacíos inestables para los escenarios actual y futuro (izquierda) e incremento de contenedores (en %) vacíos inestables previsto a causa del cambio climático (derecha) para el periodo de retorno T50.

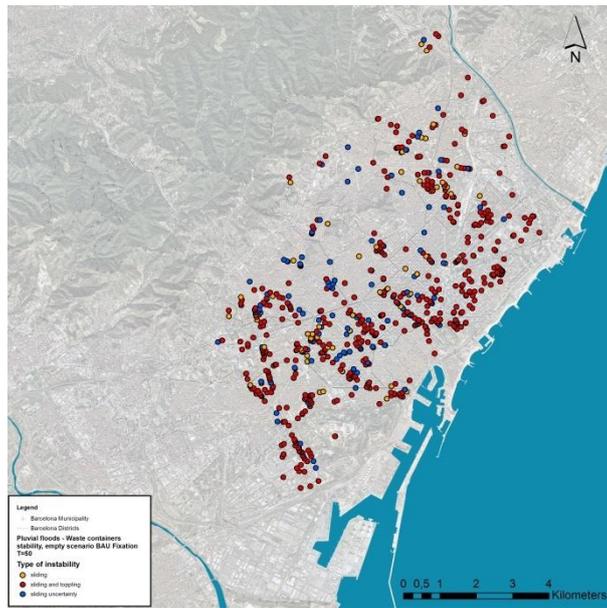


El análisis ha demostrado que, con las lluvias actuales correspondientes al periodo de retorno T50, el 17 % del total de contenedores de la ciudad pierden la estabilidad, y que esta cantidad podría aumentar hasta el 22 % con las condiciones de lluvias futuras, lo que supone un

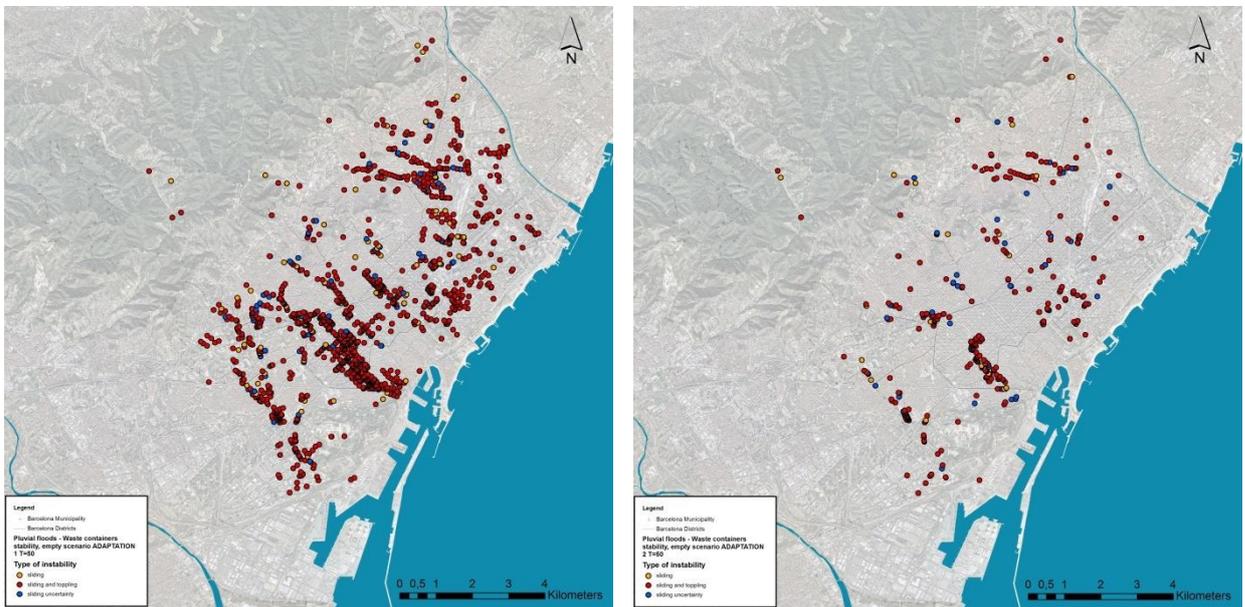
incremento del 28 % en el número de contenedores vacíos potencialmente inestables como consecuencia del cambio climático.

Para el sector de los residuos sólidos urbanos, además de los escenarios de adaptación 1 y 2, se ha elaborado un tercer escenario que prevé la incorporación de piezas de fijación para los diferentes tipos de contenedores. Además, este tercer escenario se ha combinado con los otros dos y ha dado como resultado un total de cinco escenarios de adaptación diferentes. A continuación, se muestran los mapas de efecto en los contenedores de residuos sólidos urbanos para un escenario de riesgo alto: contenedores vacíos y periodo de retorno de T50 años para los cinco diferentes escenarios de adaptación:

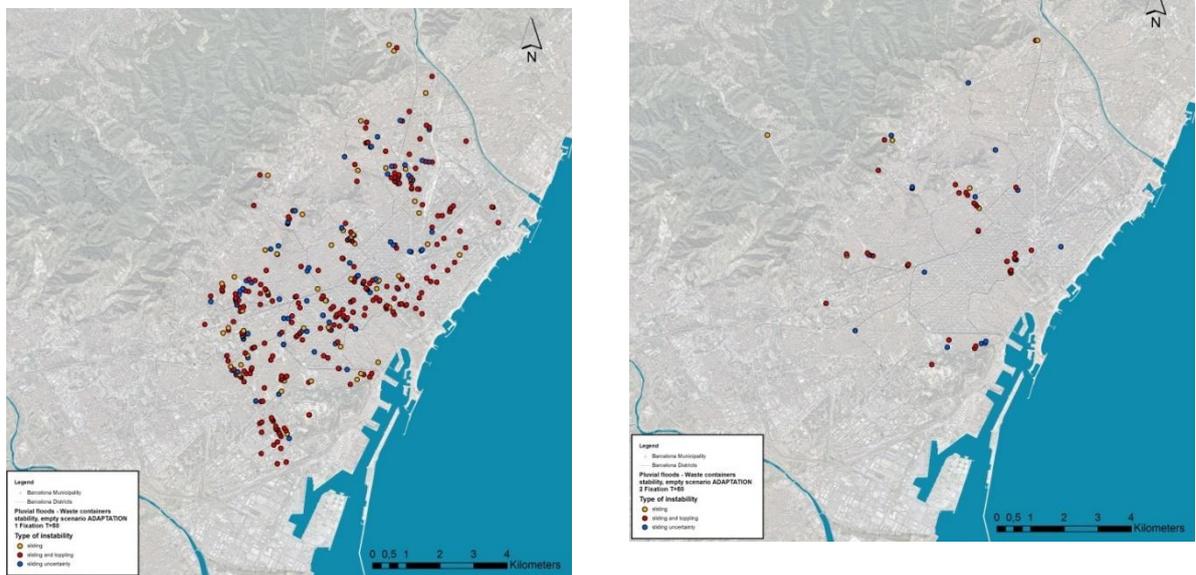
Mapa 37. Efecto en los contenedores de residuos sólidos urbanos para el escenario futuro, incorporando solo las piezas de fijación para los contenedores con periodo de retorno T50.



Mapa 38. Mapas de efecto en los contenedores de residuos sólidos urbanos para el escenario de adaptación 1 (izquierda) y el escenario de adaptación 2 (derecha) con periodo de retorno T50.

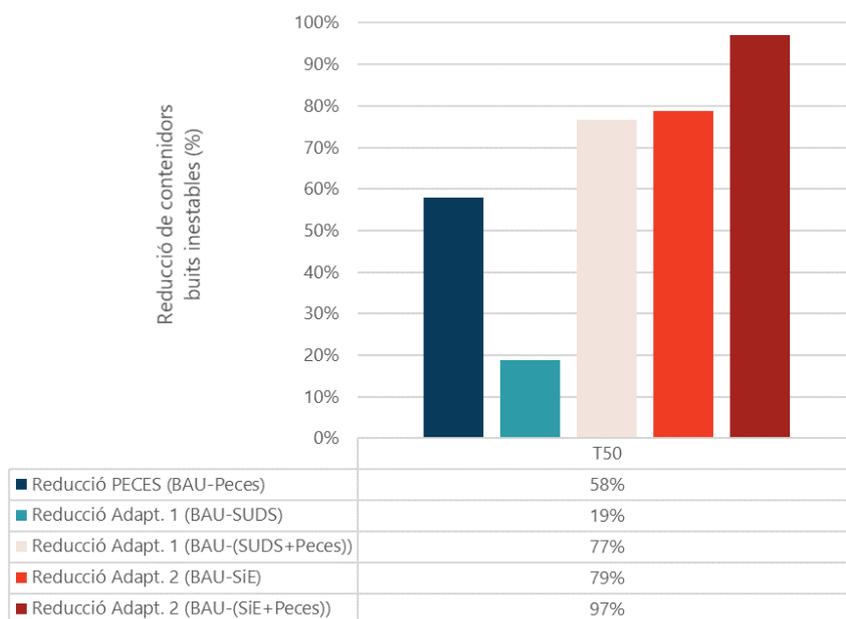


Mapa 39. Mapas de efecto en los contenedores de residuos sólidos urbanos para el escenario de adaptación 1 (izquierda) y el escenario de adaptación 2 (derecha) con periodo de retorno T50, incorporando las piezas de fijación para los contenedores.



En la figura 23 se presentan los resultados sobre la efectividad de la aplicación de las piezas de fijación, del escenario de adaptación SUDS y la implementación conjunta de SUDS y medidas estructurales (SM) sobre la estabilidad de los contenedores de residuos sólidos urbanos para una inundación relacionada con un periodo de retorno de 50 años y en el escenario de contenedores vacíos.

Figura 26. *Decrecimiento de contenedores de residuos sólidos urbanos vacíos inestables (en %) como resultado de las medidas implantadas en los escenarios de adaptación 1 y 2, e incorporando las piezas de fijación para los contenedores para el periodo de retorno T50.*



El efecto aislado de las piezas de fijación se traduce en una reducción del 58 % del número de contenedores inestables. Por lo tanto, se trata de una solución de bajo coste muy efectiva.

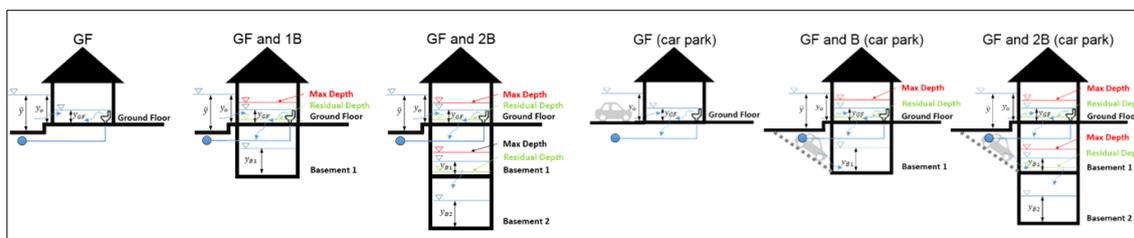
Por otra parte, aunque la implementación conjunta de SUDS y medidas estructurales (escenario de adaptación 2) es muy eficaz (79 % de reducción), la instalación de piezas de fijación junto con el escenario de adaptación de SUDS sería suficiente para evitar el movimiento de casi el mismo porcentaje (77 %) de contenedores a un coste muy menor. Finalmente, el movimiento de los contenedores vacíos casi se evita cuando se implementan conjuntamente SUDS, medidas estructurales y piezas de fijación (97 %).

3.5 Efectos de las inundaciones en las propiedades y los vehículos: análisis de los daños tangibles directos

Para la estimación de daños directos tangibles causados por inundaciones pluviales en zonas urbanas, se ha considerado el impacto económico sobre las propiedades y los vehículos, que son los bienes más afectados según los datos de indemnizaciones proporcionadas por la compañía española Consorcio de Compensación de Seguros (CCS), que es la entidad pública que da cobertura a las pérdidas generadas, entre otros, por fenómenos climáticos extremos.

La evaluación de los daños inmobiliarios se ha hecho siguiendo una metodología³ basada en el uso de curvas de daños, que miden los daños en función del calado de inundación. El primer paso ha consistido en transferir al interior de las propiedades los calados de agua de las calles que los rodean (provenientes del modelo hidrodinámico), a partir de unos coeficientes de estanquidad desarrollados para catorce usos del suelo (tipo de propiedades) de Barcelona y de la eventual existencia de un peldaño en la entrada de la propiedad. Como segundo paso, se evaluaron los daños por inundaciones causados en las propiedades a partir de las curvas de daños específicas basadas en los calados de inundación dentro de los edificios, desarrolladas para los catorce tipos de propiedad. Además, se propone un calado máximo cuando existen pisos inferiores, de manera que, cuando se llega a este nivel, únicamente se produce transferencia de agua a niveles inferiores. Se han considerado diferentes tipologías de propiedades: sin sótano, con un sótano y con un máximo de dos sótanos. Por otra parte, se consideraron configuraciones con aparcamiento o sin este, ya que, cuando hay aparcamiento, el agua accede desde el piso superior, pero también directamente desde la calle, aspecto que se tiene en consideración también mediante las curvas de los coeficientes de estanquidad. El modelo se implementa a través de unas herramientas SIG para establecer una profundidad de agua dentro de los edificios y calcular el daño correspondiente.

Figura 27. Modelo conceptual para la estimación de los daños por inundación sobre las propiedades urbanas Fuente³:

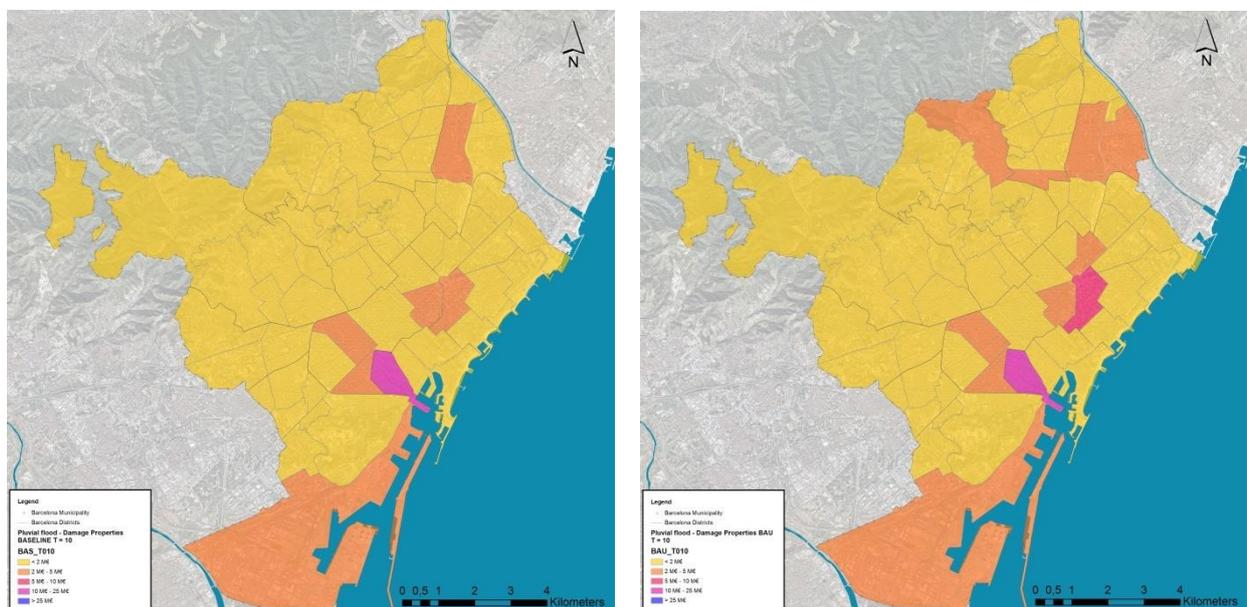


³ Martínez-Gomariz, E.; Forero-Ortiz, E.; Guerrero-Hidalga, M.; Castán, S.; Gómez, M. (2020): "Flood Depth–Damage Curves for Spanish Urban Areas". *Sustainability*, 12, 2666. <https://doi.org/10.3390/su12072666>
Martínez-Gomariz, E.; Guerrero-Hidalga, M.; Russo, B.; Yubero, D.; Gómez, M.; y Castán, S. (2019): "Desarrollo y aplicación de curvas de daño y estanquidad para la estimación del impacto económico de las inundaciones en zonas urbanas españolas". *Ingeniería del Agua*, 23 (4), 229-245. <https://doi.org/10.4995/ia.2019.12137>

Con respecto a la evaluación de daños para vehículos, se ha implementado una metodología innovadora que también se basa en el concepto de las curvas de daño. La metodología intenta reducir la incertidumbre debida a la movilidad de los vehículos, proponiendo una ocupación vehicular heterogénea para varias zonas de la ciudad basada en la información proporcionada por fotografías aéreas de alta resolución. El primer paso es adaptar las curvas de daños por inundaciones para cinco tipos de vehículos desarrolladas por USACE⁴ al caso de Barcelona. Estas curvas se convirtieron en una única curva de daño ponderada según el porcentaje de vehículos de cada tipología existente en Barcelona, y también considerando la depreciación según la información estadística por tipo de vehículo y edad media.

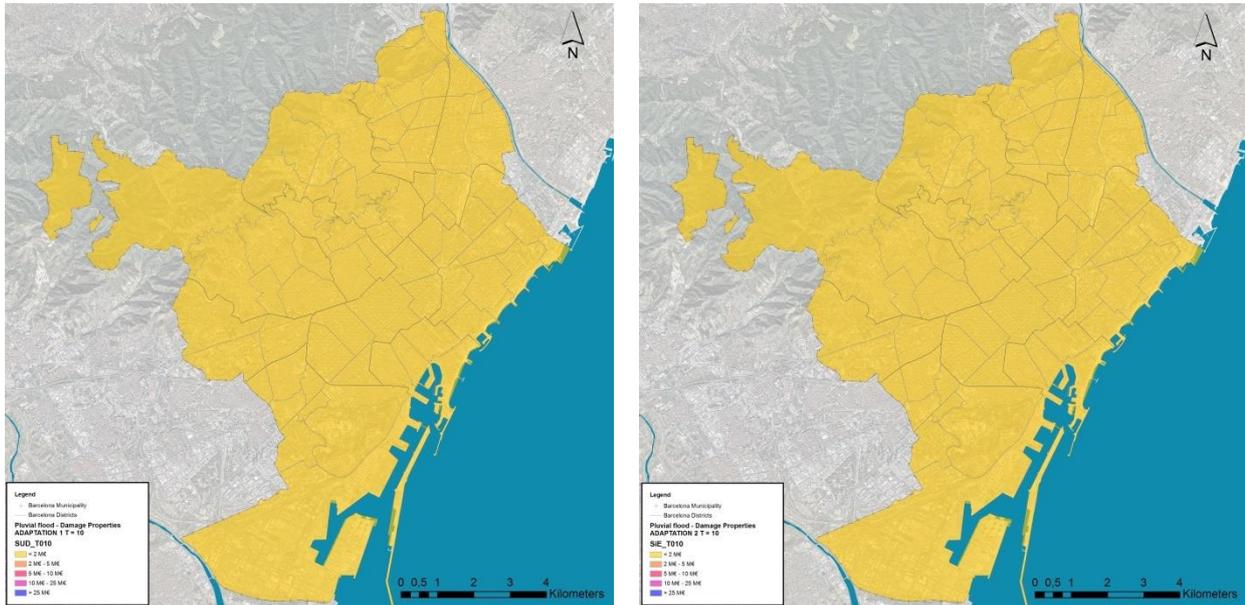
Se han obtenido mapas de daños directos tangibles causados por inundaciones pluviales en zonas urbanas tanto para propiedades como para vehículos, por los periodos de retorno T1, T10 y T100, y escenarios actuales, futuros y de adaptación 1 y 2, con el valor de los daños calculados agregados para cada barrio de la ciudad. En el caso del periodo de retorno T1, el valor de los daños es nulo y, por este motivo, no se representan los planos. Tampoco se representan los mapas de daños para vehículos, ya que las diferencias no son muy representativas en cuanto a los barrios afectados, y el valor de los daños provocados por inundación a los vehículos son del orden de diez veces inferiores a los daños provocados a las propiedades.

Mapa 40. Mapas de valor de los daños por inundación urbana en las propiedades para el escenario actual (izquierda) y el escenario futuro (derecha) con periodo de retorno T10.

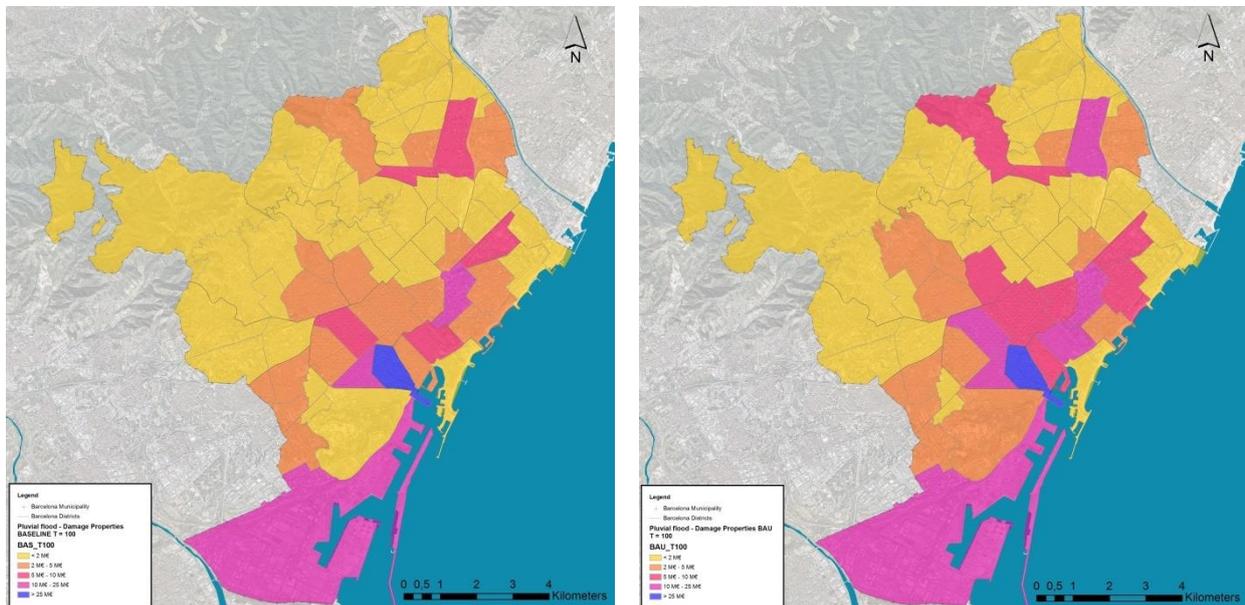


⁴ US Army Corps of Engineers (USACE) (2009): "Economic Guidance Memorandum, 09-04, Generic Depth-Damage Relationships for Vehicles". Washington D. C. Retrieved from <http://planning.usace.army.mil/toolbox/library/EGMs/egm09-04.pdf>

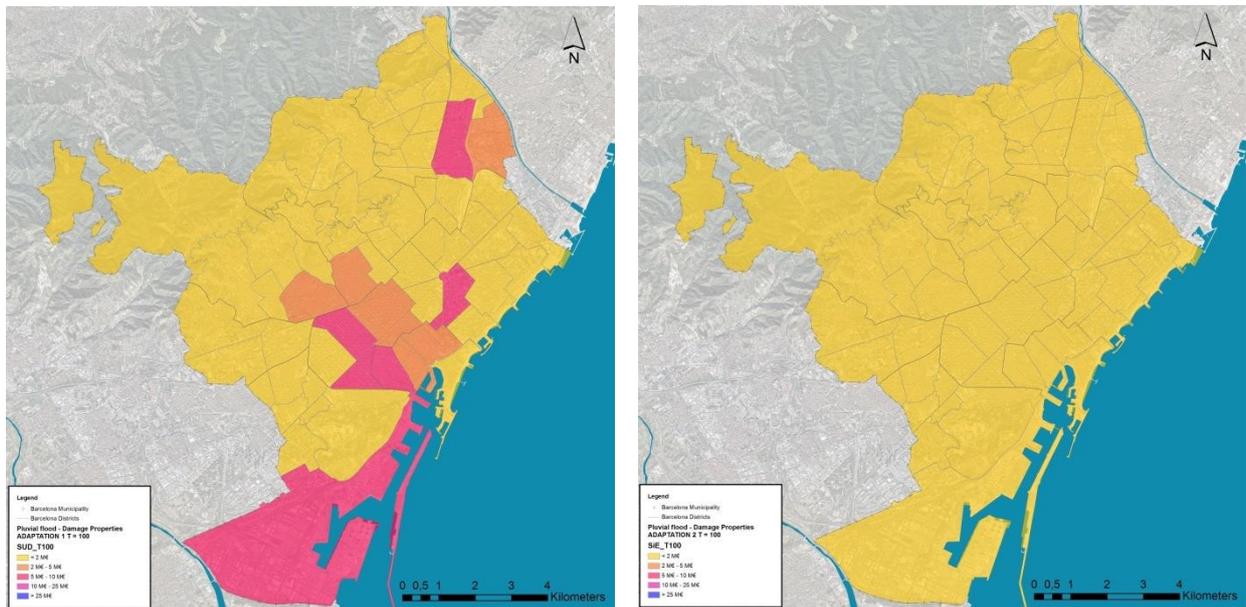
Mapa 41. Mapas de valor de los daños por inundación urbana en las propiedades para el escenario de adaptación 1 (izquierda) y el escenario de adaptación 2 (derecha) con periodo de retorno T10.



Mapa 42. Mapas de valor de los daños por inundación urbana en las propiedades para el escenario actual (izquierda) y el escenario futuro (derecha) con periodo de retorno T100.



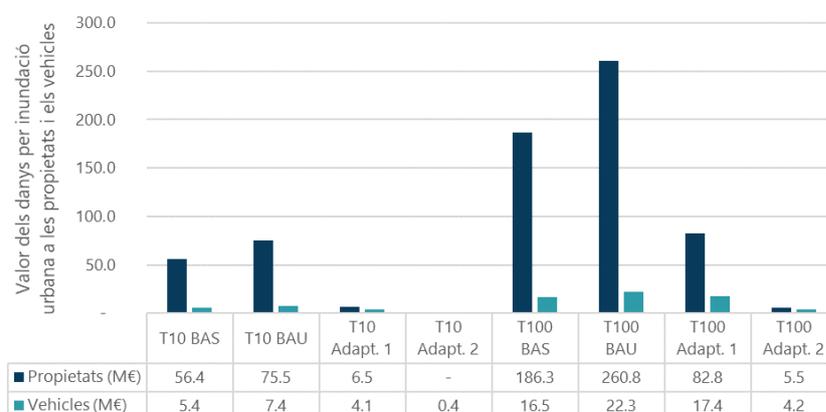
Mapa 43. Mapas de valor de los daños por inundación urbana en las propiedades para el escenario de adaptación 1 (izquierda) y el escenario de adaptación 2 (derecha) con periodo de retorno T100.



Estos mapas muestran cómo los barrios más afectados por daños en las propiedades son el Raval, el Parc i la Llacuna del Poblenou, Sant Andreu, Sant Antoni, la Esquerra de l'Eixample, la Marina del Prat Vermell y la Zona Franca, y que las futuras lluvias agravadas por el cambio climático empeoran significativamente la situación en varios barrios, principalmente en el centro de la ciudad.

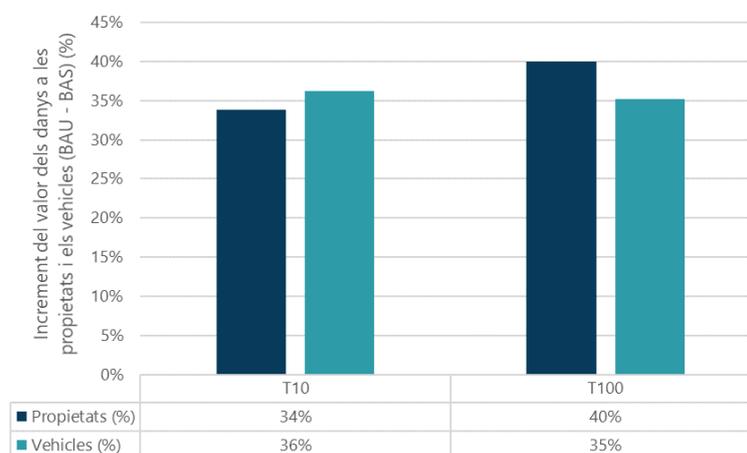
En los siguientes gráficos y tablas asociadas se resumen los resultados obtenidos, y se puede observar la evolución de la estimación de los daños por inundación urbana a las propiedades y los vehículos de la ciudad de Barcelona para el escenario actual, futuro y de adaptación 1 y 2 y los periodos de retorno de 10 y 100 años.

Figura 28. Valor de los daños (M€) a propiedades y vehículos por efecto de las inundaciones en la ciudad de Barcelona para los escenarios actual, futuro y de adaptación 1 y 2 y para los periodos de retorno más significativos.



Como las intensidades de las lluvias futuras son superiores a las actuales, el valor de los daños a propiedades y vehículos del escenario futuro es, en general, un 35 % superior al deseado para el escenario actual. Esta diferencia supone el coste (con relación a los daños directos tangibles) potencial de no actuar ante el cambio climático.

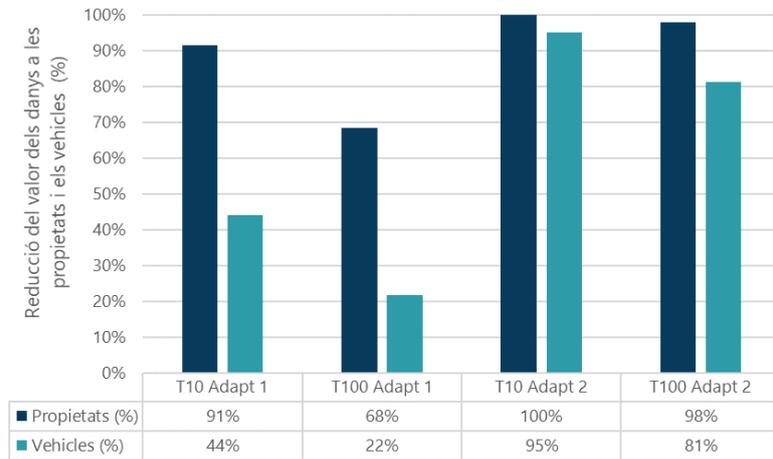
Figura 29. Incremento del valor de los daños (en %) a propiedades y vehículos por efecto de las inundaciones en la ciudad de Barcelona previsto por el cambio climático y por los periodos de retorno más significativos.



Para evaluar la eficiencia de las medidas implantadas en los escenarios de adaptación 1 y 2, se ha considerado la reducción de daños tangibles en las propiedades y vehículos que se produce al comparar los resultados de estos dos escenarios de adaptación con los obtenidos del escenario futuro con cambio climático (BAU). El escenario de adaptación 1 (implementación de solamente sistemas urbanos de drenaje sostenible —SUDS— en toda Barcelona) proporciona entre un 90 % y un 70 % de reducción del valor de los daños a propiedades y entre un 40 % y

un 20 % de los daños a vehículos, mientras que la implementación conjunta de SUDS y medidas estructurales (escenario de adaptación 2) eliminaría prácticamente la totalidad de los daños.

Figura 30. *Decrecimiento del valor de los daños (en %) a propiedades y vehículos por efecto de las inundaciones en la ciudad de Barcelona como resultado de las medidas implantadas en los escenarios de adaptación 1 y 2 para los periodos de retorno más significativos.*



3.6 Efecto en la calidad del agua de baño por vertidos en el medio receptor

El modelo de drenaje de la ciudad de Barcelona se caracteriza por ser un sistema unitario; eso significa que tanto las aguas negras como las aguas de lluvia son conducidas por los mismos colectores hacia las plantas de tratamiento. Este modelo unitario supone un riesgo a partir del momento en que las plantas de tratamiento no tienen bastante capacidad para absorber el exceso de agua provocado por lluvias torrenciales, y entonces la red de drenaje dirige las aguas hacia los vertederos marinos. Estos vertidos provocan un descenso en la calidad del agua de baño, lo que habitualmente comporta el cierre de las playas de la ciudad, con los impactos correspondientes en las actividades vinculadas al litoral barcelonés.

Para conocer mejor cómo se producen estos vertidos y sus repercusiones, se ha creado un modelo de calidad del agua del mar con el objetivo de estudiar el impacto de las descargas del sistema unitario (DSU) de la ciudad en las zonas de baño. El modelo marino se utiliza para simular la distribución espacial y temporal de la bacteria *E. coli* en el agua del mar durante y después de los acontecimientos de DSU. La *E. coli* es una de las bacterias indicadas en la normativa europea y estatal sobre la calidad de las aguas de baño.

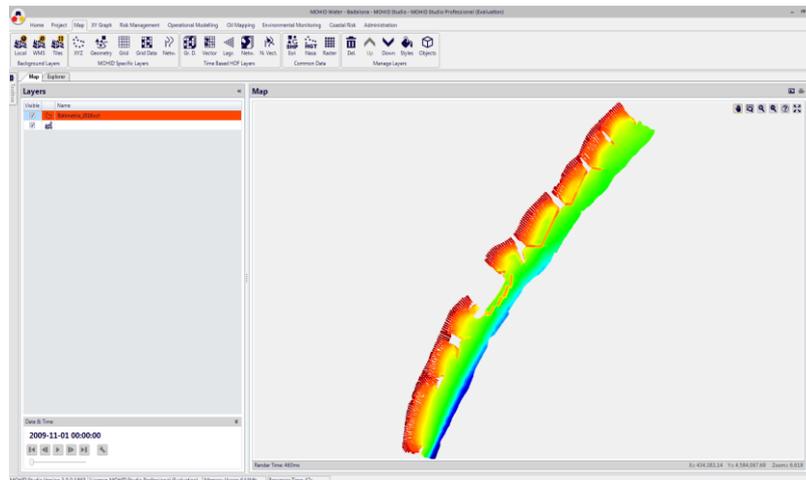
Figura 31. Ejemplo de simulación de calidad marítima después de un episodio de DSU (rojo = alta concentración de *E. coli*; azul = baja concentración de *E. coli*).



El modelo original se desarrolló dentro del proyecto COWAMA (Coastal Water Management), que proporcionó un modelo computacional en funcionamiento desde el 2007 para simulaciones en tiempo real de la calidad de las aguas de baño de las playas de Barcelona. El modelo marino

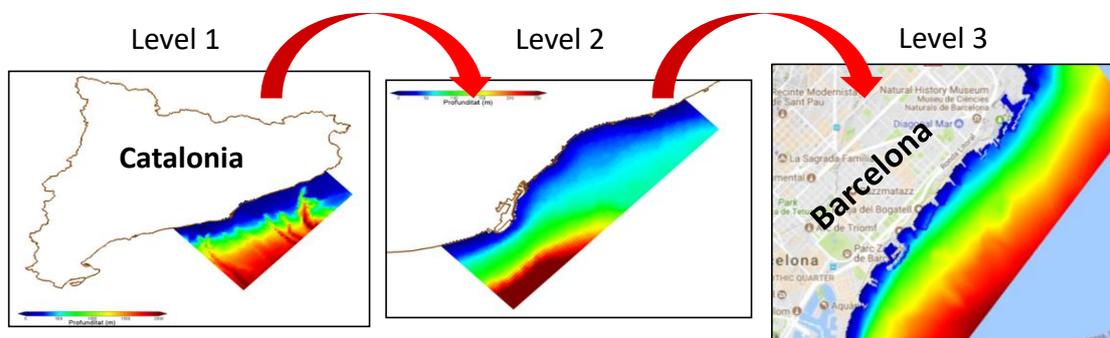
incluye una nueva malla 3D elaborada a partir de nuevos datos de batimetría obtenidos en el 2016, una nueva calibración y una nueva validación con datos de concentraciones de *E. coli* medidas en el periodo 2014-2017.

Figura 32. Nueva batimetría para el modelo marítimo de Barcelona.



La simulación de la calidad del agua cerca de la línea de costa requiere escalas de discretización espacial del orden de decenas de metros, mientras que los procesos hidrodinámicos costeros pueden producirse en escalas de centenares de kilómetros. Por lo tanto, tres dominios anidados se utilizan para simular procesos hidrodinámicos desde la gran escala regional hasta la escala local cerca de la costa de Barcelona.

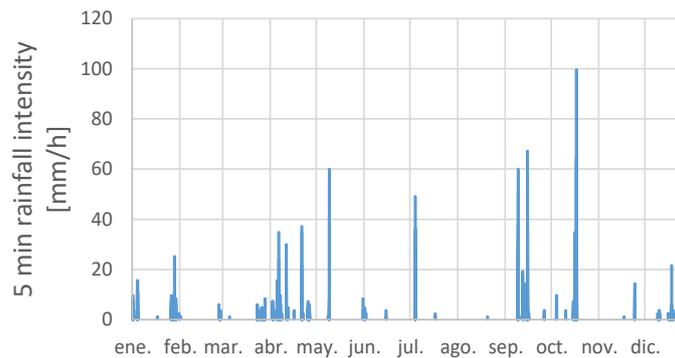
Figura 33. Los tres niveles de mallas anidadas implementadas en el modelo marítimo de Barcelona.



De forma análoga al análisis elaborado para obtener las lluvias de diseño en el modelo de inundación urbana produciendo series de datos de cambio climático, se analizan las DSU para

los escenarios hidrológicos ordinarios, pero en este caso se concluye que los escenarios de precipitaciones futuros no suponen un empeoramiento con respecto a la situación actual, ya que el cambio climático no hará aumentar la pluviometría media y el número de episodios de manera significativa. Así, para el análisis de las DSU, tanto para el escenario actual como para el escenario de cambio climático, se selecciona la serie de lluvias del 2009, en el que se produjeron 60 episodios de DSU con una pluviometría total de 520 mm.

Figura 34. Serie pluviométrica del año medio seleccionado (2009).



Haciendo simulaciones mediante la aplicación de manera acoplada del modelo de inundación urbana y el modelo marítimo durante la temporada de baño (del 25 de mayo al 15 de setiembre) se obtienen las concentraciones de *E. coli* en el agua de mar. Los impactos se cuantifican en términos de tiempo de incumplimiento de los valores de contaminación bacteriológica (concentraciones de *E. coli* > 500 cfu/100 ml), de acuerdo con las recomendaciones del Real decreto 1341/2007 y de la Directiva de aguas de baño para la temporada de baño considerada como referencia (2009) en cada playa de Barcelona. Los siguientes gráficos muestran los resultados para los escenarios actual y futuro (coincidentes) y para los dos escenarios de adaptación.

Figura 35. Tiempo de incumplimiento (en días) de los valores de contaminación bacteriológica marcados por la Directiva de aguas de baño por temporada de baño como consecuencia de los vertidos en el medio marino para los escenarios actual, futuro y de adaptación 1 y 2 para las playas de Barcelona y valor medio.

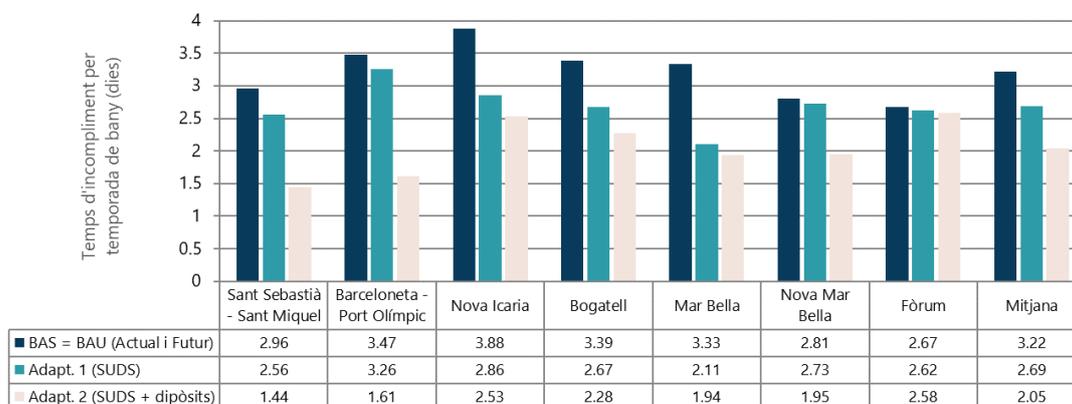
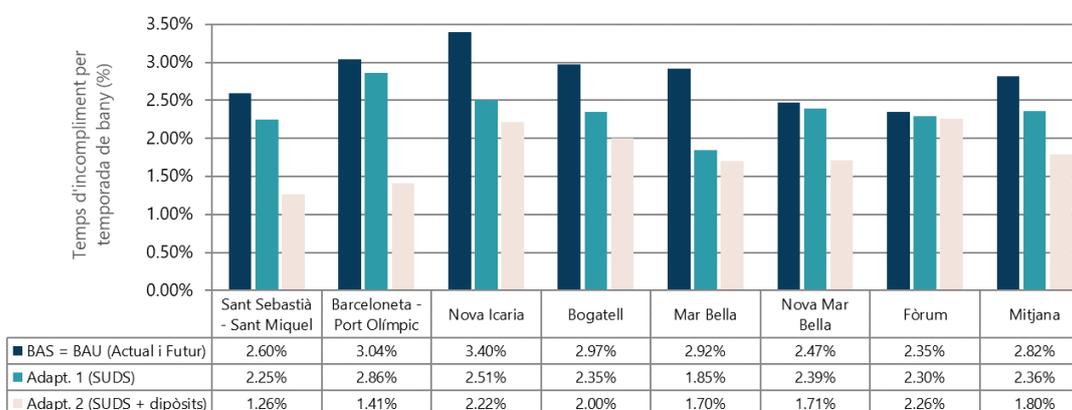


Figura 36. Tiempo de incumplimiento (en %) de los valores de contaminación bacteriológica marcados por la Directiva de aguas de baño por temporada de baño como consecuencia de los vertidos en el medio marino para el escenario actual, futuro y de adaptación 1 y 2 para las playas de Barcelona y valor medio.

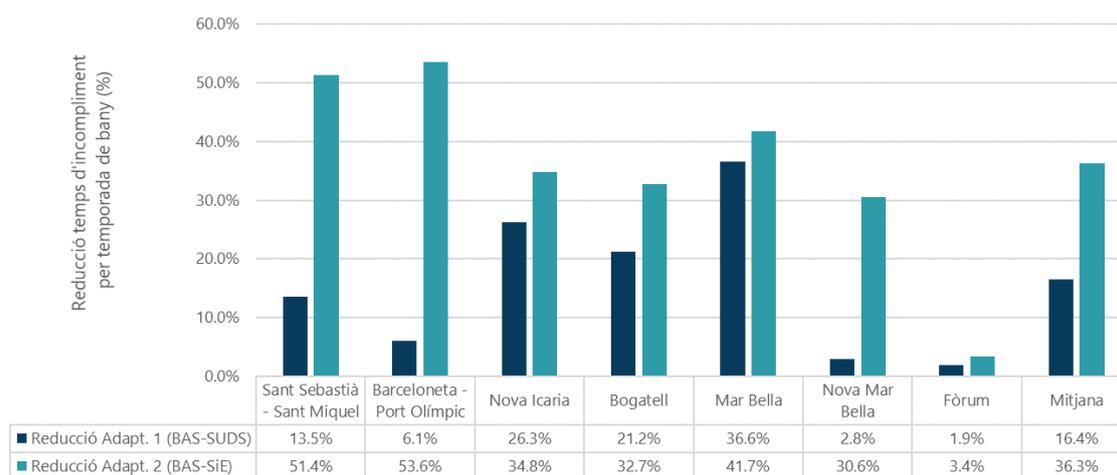


De los resultados de la simulación del escenario actual (coincidente con el futuro sin adaptación) se obtiene que, por término medio, en todas las playas de Barcelona se incumplió la Directiva de aguas de baño un total de 3,22 días, lo que equivale a un 2,82 % de la duración de la temporada de baño. La variación entre las diferentes playas se sitúa en el rango entre el 2,35 % en el Fòrum y el 3,40 % en la Nova Icaria.

Por término medio, en el escenario de adaptación 1, los SUDS pueden reducir el tiempo hasta el 2,36 %, mientras que, para el escenario de adaptación 2 (actuaciones SUDS y estructurales), el tiempo de incumplimiento se reduce hasta el 1,8 %, un poco superior al 1,5 % objetivo de la

circular de la Agencia Catalana del Agua (ACA). No obstante, este valor del 1,5 % era orientativo, de manera que las actuaciones propuestas se consideran que cumplen los objetivos marcados.

Figura 37. *Decrecimiento del tiempo de incumplimiento (en %) de los valores de contaminación bacteriológica marcados por la Directiva de aguas de baño por temporada de baño como consecuencia de los vertidos en el medio marino como resultado de las medidas implantadas en los escenarios de adaptación 1 y 2 para las playas de Barcelona y valor medio.*



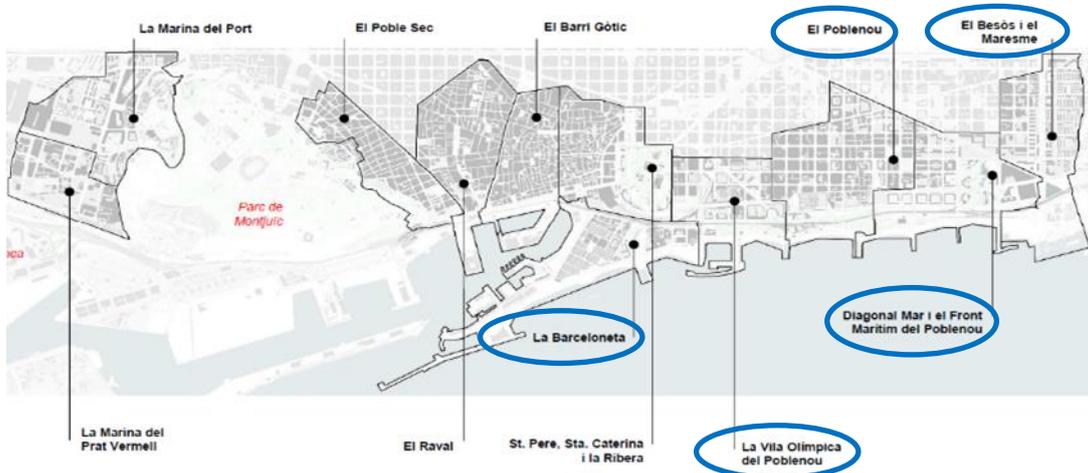
Del gráfico 28 se puede extraer que el efecto de las medidas de adaptación es muy variable en función de la playa de la que se trate, de modo que es prácticamente inapreciable en la playa del Fòrum. En cambio, se producen reducciones superiores al 50 % en el caso de la combinación SUDS y depósitos anti-DSU en las playas de Sant Sebastià-Sant Miquel y Barceloneta-Port del Fòrum.

Por otra parte, los vertidos a los ecosistemas marinos no solo tienen impactos negativos en la salud y el medio ambiente, sino que también afectan a las actividades económicas de la zona. Es de suponer que hay pérdidas económicas asociadas al cierre de las playas como consecuencia del alto nivel de contaminantes. Esto es especialmente relevante para una ciudad como Barcelona, en la que el turismo y el ocio tienen un peso importante en su economía, con playas urbanas de las que se benefician la población local y los turistas.

Del mismo modo que se hacía con respecto a las inundaciones pluviales, los impactos económicos de las descargas de sistemas unitarios (DSU) en las playas de la ciudad se clasifican como daños indirectos, ya que las pérdidas de negocio son inducidas por los vertidos, pero las empresas no se ven afectadas directamente. Se ha desarrollado una metodología para estimar los costes soportados por los negocios costeros que considera el número de días de cierre de playa por alta contaminación bacteriológica en las aguas causada por vertidos de DSU (dato proveniente del modelo marino sobre las DSU en la zona costera de baño de la ciudad) y el impacto añadido directo a la economía asociada (a partir de los datos del informe de análisis económico sobre la actividad económica litoral de Barcelona para el 2017).

Para evitar una sobrevaloración, se ha reducido la zona de estudio a aquellos distritos costeros donde hay puntos de vertido, como se puede ver en el mapa xx. Los distritos afectados representan el 40,5 % del total de la economía litoral de Barcelona.

Mapa 44. Mapa de la zona costera de Barcelona, donde se destacan los distritos afectados por DSU.



A efectos de la modelización, se ha supuesto que durante un episodio de DSU en temporada de baño se sube una bandera roja y los usuarios de la playa no pueden nadar y, por lo tanto, se les desaconseja quedarse en la playa. Con este supuesto, los sectores económicos incluidos son solo aquellos directamente relacionados con actividades turísticas y de ocio que se pueden ver afectados por un cierre de playa, por ejemplo, pequeños comercios, restaurantes y actividades lúdicas y acuáticas. Para acabar, el modelo también considera el factor de estacionalidad que considera que el periodo estival supone el 50 % de la renta turística anual.

Después de estas hipótesis, y considerando una temporada de baño de 114 días, el daño indirecto se estima en 510.328 € por día de cierre de playa. Con estos datos y los datos de duración de contaminación elevada en las playas de Barcelona para el año medio (3,22 días), se estiman unas pérdidas de 1.643.265 € para la temporada de baño.

Aplicando la misma metodología a los escenarios de adaptación, se obtienen los resultados de los gráficos siguientes, de los que hay que destacar que las medidas para implementar en los escenarios de adaptación, especialmente las estructurales (depósitos anti-DSU), tienen un efecto de reducción de las pérdidas de los negocios costeros de aproximadamente un 35 %.

Figura 38. Estimaciones de daños indirectos por pérdidas de negocio y días de contaminación alta por temporada de baño producidos por efecto de los vertidos en el medio marino para los escenarios actual, futuro y de adaptación 1 y 2.

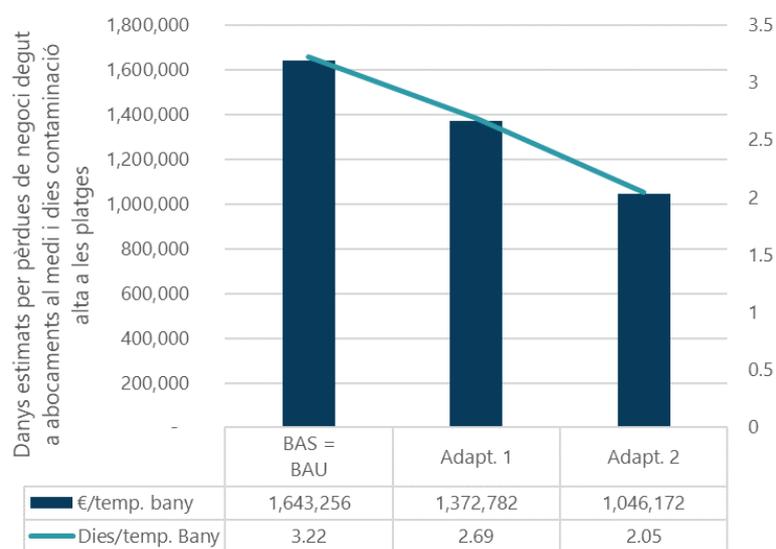
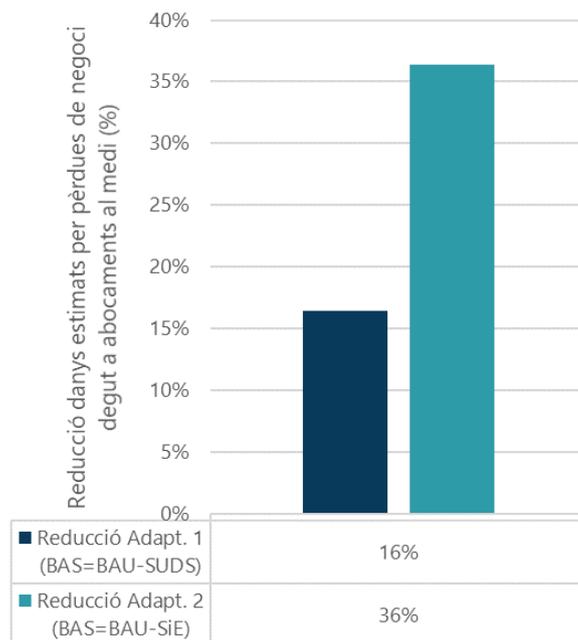


Figura 39. Decremento del valor de los daños estimados (en %) por pérdidas de negocio producidos por efecto de los vertidos en el medio marino como resultado de las medidas implantadas en los escenarios de adaptación 1 y 2.



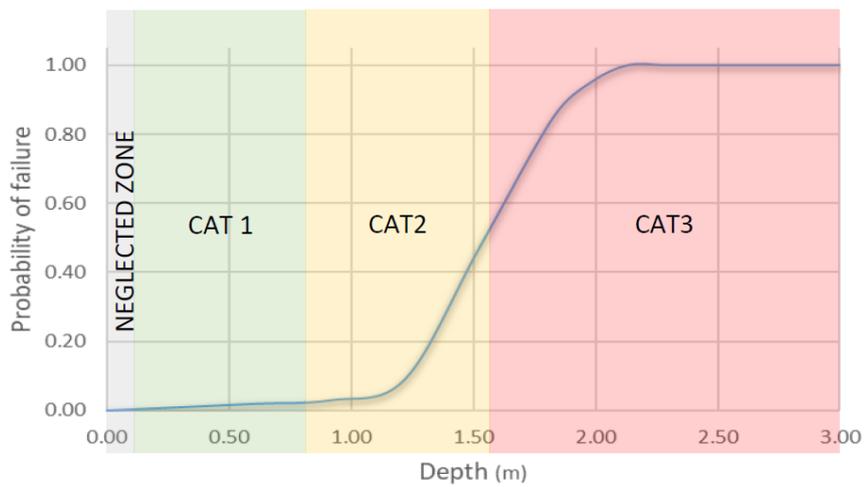
3.7 Efecto en el sector eléctrico

Para el análisis de los impactos de las inundaciones urbanas en el sector eléctrico se han examinado los centros de media tensión (MV) y alta tensión (HV) localizados dentro del término municipal de la ciudad, área que se corresponde con el ámbito de análisis del modelo de drenaje urbano desarrollado en el proyecto. Normalmente, este tipo de infraestructuras han sido protegidas y aisladas contra las inundaciones en el momento en que se establecieron, teniendo en cuenta un periodo de retorno. Sin embargo, se podría plantear un problema en el futuro si no se tuvieran en cuenta los aumentos de magnitud provocados por el cambio climático. En consecuencia, las medidas de protección podrían no ser suficientes en algunos casos y existiría la posibilidad de provocar cortes eléctricos que afectaran a barrios enteros o, incluso, a distritos.

Una de las incertidumbres más importantes de este modelo fue la falta de conocimiento sobre la ubicación específica de las infraestructuras eléctricas críticas (a veces situadas en superficie y otras veces subterráneas o con elementos de autoprotección que no siempre se conocían). Para el análisis de los impactos, se utilizó una curva de vulnerabilidad (conocida como curva de fragilidad en el sector energético) de la infraestructura eléctrica propuesta por la Agencia Federal de Gestión de Emergencias de los EE. UU. (FEMA). La curva relaciona la probabilidad de fallo de una infraestructura eléctrica con la profundidad de inundación (figura 29). Los resultados obtenidos a partir del análisis del porcentaje de área afectada (AAR) en cada subestación y de la curva de fragilidad se calcularon para obtener una probabilidad de fallo y, posteriormente, se clasificaron en tres categorías de riesgo diferentes:

- Categoría 1 ($10 \text{ cm} < \text{WDA} \leq 80 \text{ cm}$). Se cuentan todas las subestaciones afectadas dentro de los 10 y 80 cm. 80 cm corresponde a una probabilidad de fallo inferior al 3 %. Estos no se cuentan en la categoría siguiente.
- Categoría 2 ($80 \text{ cm} < \text{WDA} \leq 160 \text{ cm}$). Se cuentan todas las subestaciones afectadas dentro de los 80 y 160 cm. 160 cm corresponde a una probabilidad de fallo del 50 %. Estos no se cuentan en la categoría siguiente.
- Categoría 3 ($\text{WDA} > 160 \text{ cm}$). Se cuentan todas las subestaciones afectadas con 160 cm de profundidad de agua o más.

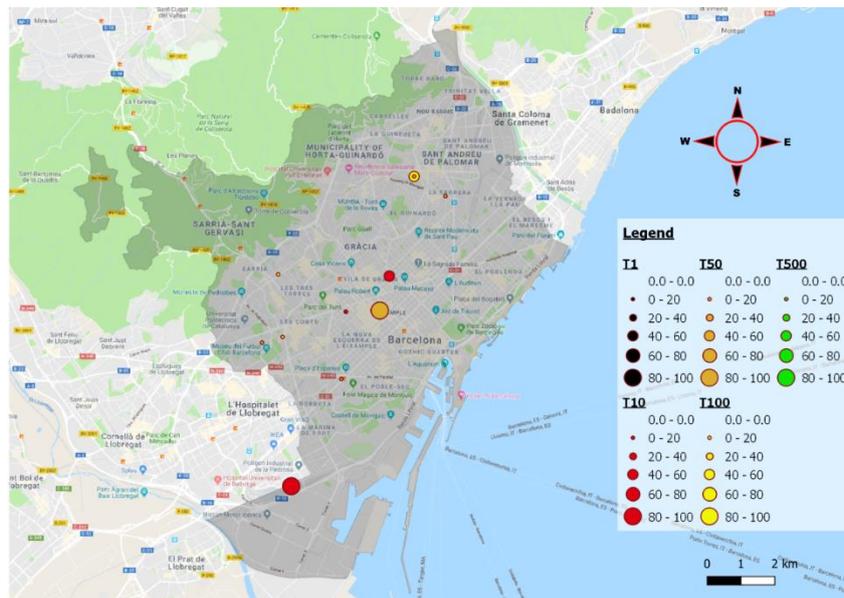
Figura 40. Explicación del umbral de categorización proporcionado, basado en la curva de fragilidad adaptada de FEMA, 2009.



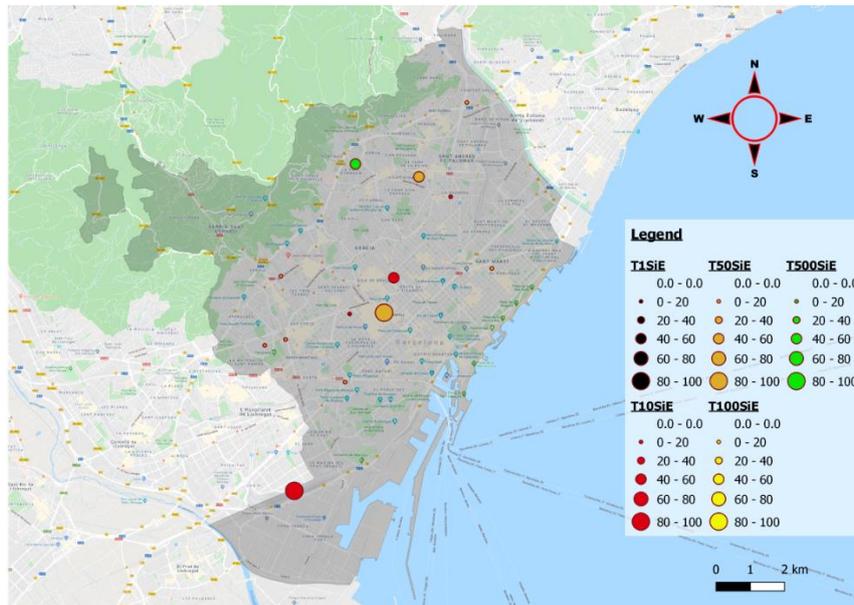
Sin embargo, en las subestaciones eléctricas de Barcelona solo se ha alcanzado la primera categoría.

A continuación se muestran los mapas de infraestructuras eléctricas afectadas en caso de inundaciones para el escenario actual (BAS) y futuro (BAU). Hay que remarcar que las subestaciones afectadas en un periodo de retorno determinado también se ven afectadas en un periodo de retorno superior, pero se superponen al periodo de retorno mostrado porque las dos presentan el mismo tamaño y, en consecuencia, el mismo porcentaje de área afectada (AAR):

Mapa 45. Infraestructuras eléctricas afectadas en caso de inundación urbana y el porcentaje de área afectado para el escenario actual.

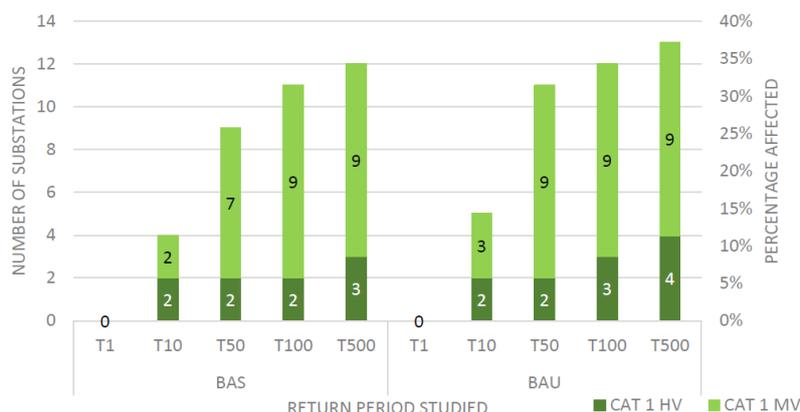


Mapa 46. Infraestructuras eléctricas afectadas en caso de inundación urbana y el porcentaje de área afectado para el escenario futuro.



En la figura 41 se puede observar la exposición de subestaciones de diferentes tensiones a las inundaciones. No hay alteraciones para los periodos de retorno de T1 y es en el periodo de retorno T10 cuando dos ubicaciones de cada clase (MV y HV) empiezan a ser afectadas en el escenario BAS y una subestación MT más en el escenario BAU. A partir de la T50, el número de subestaciones de MV expuestas al peligro de inundación aumenta hasta nueve en los dos escenarios y hasta tres subestaciones de alta tensión potencialmente afectadas para la T500 en BAS y hasta cuatro en BAU. Por lo tanto, hay que remarcar el claro incremento que se produjo desde el escenario de referencia hasta el escenario normal de las subestaciones expuestas al peligro de inundación.

Figura 41. Número de subestaciones afectadas en los escenarios actual (BAS) y futuro (BAU) y sus porcentajes sobre el total de subestaciones ubicadas en Barcelona.



La evaluación de la reducción del riesgo de inundación del sistema eléctrico en Barcelona se ha hecho de acuerdo con los dos escenarios de adaptación (SUDS y SiE) y siguiendo la misma metodología y criterios adoptados para los escenarios Baseline y BAU. En la figura xx se resumen los resultados numéricos de los lugares potencialmente afectados por inundaciones después de aplicar las medidas de prevención que contienen los modelos SUDS y SiE. Para el escenario de adaptación SUDS, cuatro subestaciones parecen estar potencialmente afectadas por inundaciones en T10 (2 MV y 2 HV), diez subestaciones en T50 (8 MV y 2 HV), once subestaciones en T100 (9 MV y 2 HV) y trece en el periodo de retorno T500 (9 MV y 4 HV). Eso significa que, en el peor de los casos, el 37 % de las subestaciones de Barcelona estarían expuestas a inundaciones.

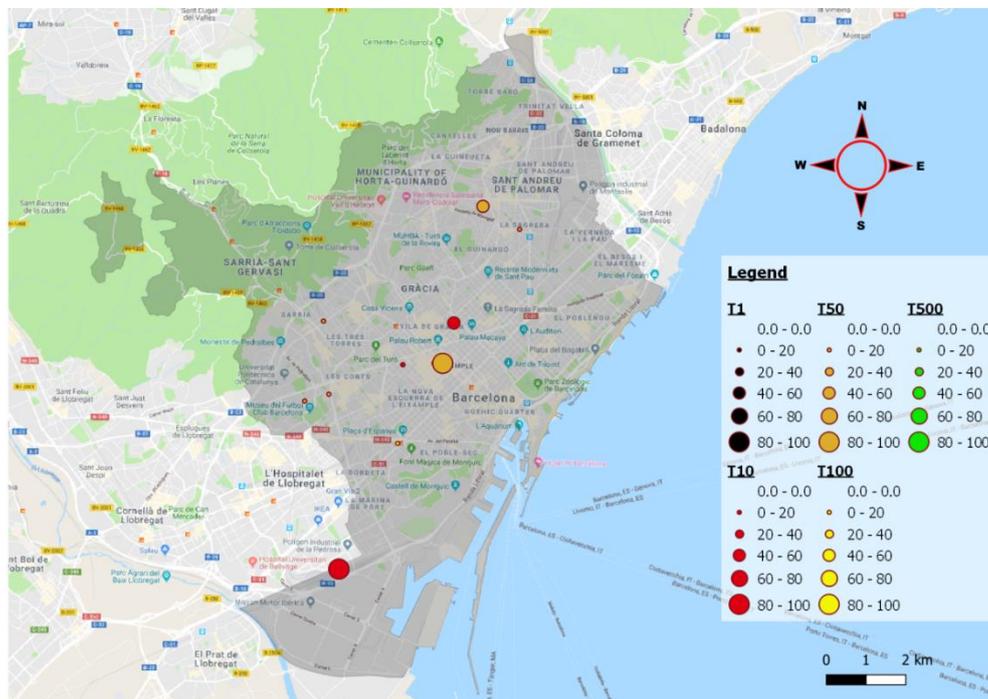
Sin embargo, cuando se aplica la combinación de medidas SUDS y medidas estructurales (SiE), solo se expone una subestación HV, mientras que tan solo se exponen cinco subestaciones MT cuando se produce un acontecimiento de inundación T500. Así, el peor de los casos sería durante una inundación de la T500 en que estarían expuestas el 18 % de las subestaciones de Barcelona (figura 42).

Figura 42. Número de subestaciones afectadas en los escenarios de adaptación 1 (SUDS) y adaptación 2 (SiE) y sus porcentajes sobre el total de subestaciones ubicadas en Barcelona.

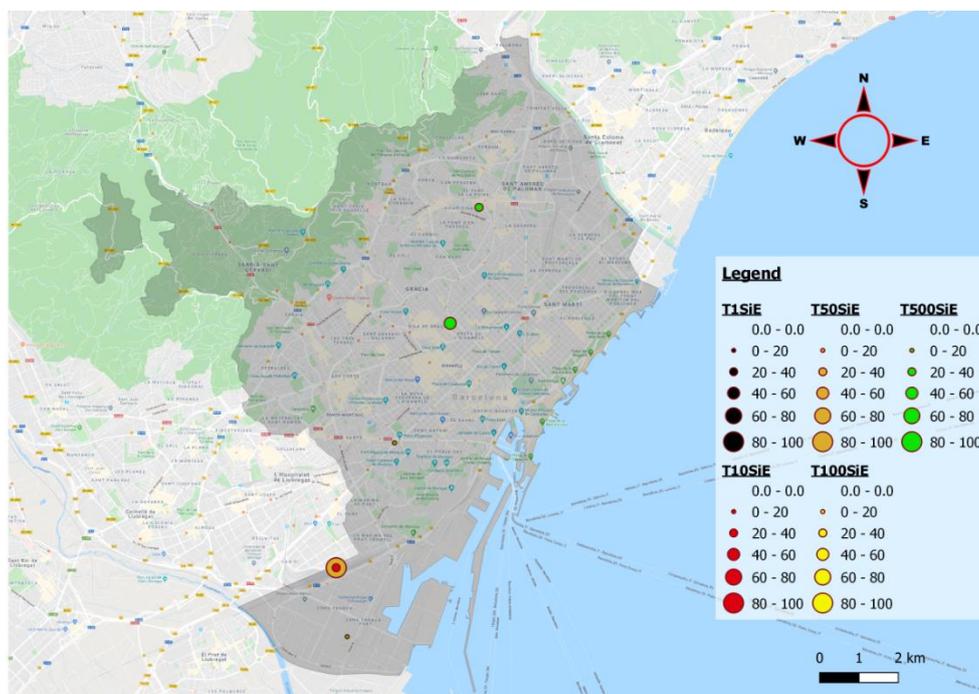


A continuación se muestran los mapas de afectación de las diferentes infraestructuras eléctricas en caso de inundación para el escenario futuro teniendo en cuenta el escenario de adaptación 1 (SUDS) y el escenario de adaptación 2 (SiE):

Mapa 47. Representación de las diferentes subestaciones afectadas después de aplicar las medidas de adaptación 1 (SUDS) al escenario BAU, para los diferentes periodos de retorno analizados y teniendo en cuenta la tasa de área afectada (0-100 %).

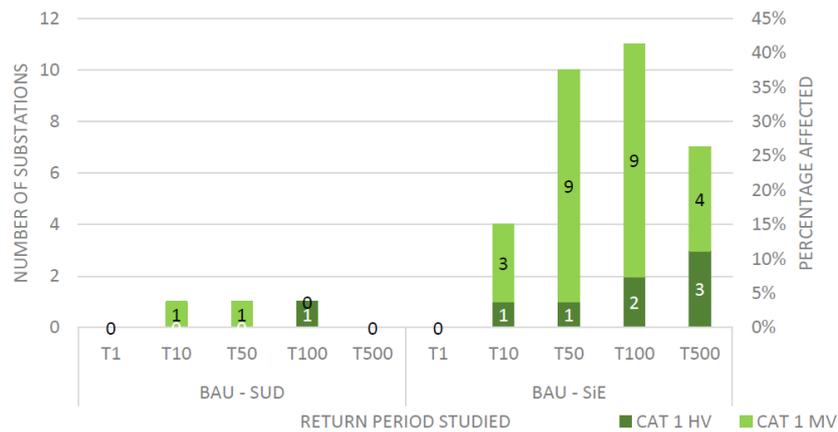


Mapa 48. Representación de las diferentes subestaciones afectadas después de aplicar las medidas de adaptación 2 (SiE) al escenario BAU, para los diferentes periodos de retorno analizados y teniendo en cuenta la tasa de área afectada (0-100 %).



La figura 43 presenta la comparación entre el escenario BAU y los escenarios de adaptación SUDS y SiE una vez que se aplican las medidas de adaptación:

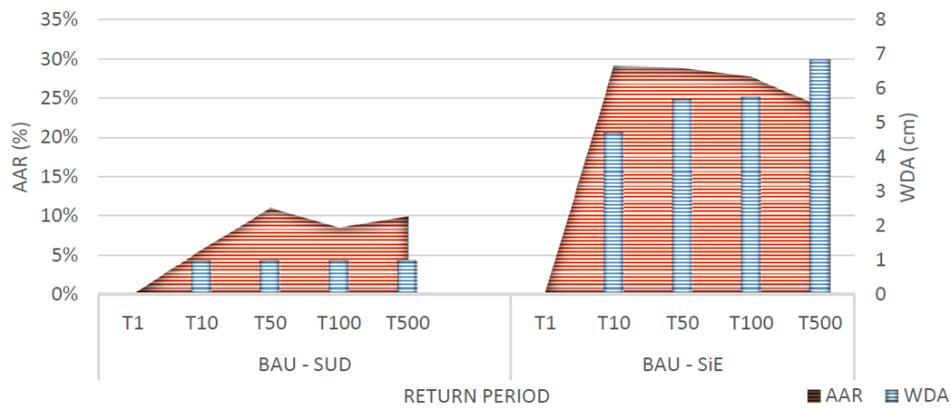
Figura 43. Comparación del escenario BAU-SUDS con BAU-SiE, en que se muestra el número de subestaciones que están fuera de peligro en el escenario BAU aplicando los diferentes conjuntos de medidas de prevención y el porcentaje de reducción alcanzada.



Para representar la eficacia de las medidas consideradas, los resultados se expresan en términos de reducción del número de lugares afectados después de aplicar medidas de adaptación y en términos de porcentaje de reducción sobre el número total de subestaciones. Por lo tanto, cuando se aplican SUDS, se muestra cómo se elimina una subestación del riesgo de inundación. Por lo tanto, se puede afirmar que las medidas SUDS no son muy efectivas con respecto al sector eléctrico. En la figura 33 también se muestra cómo la reducción de AAR conseguida para todos los periodos de retorno es de aproximadamente un 10 %.

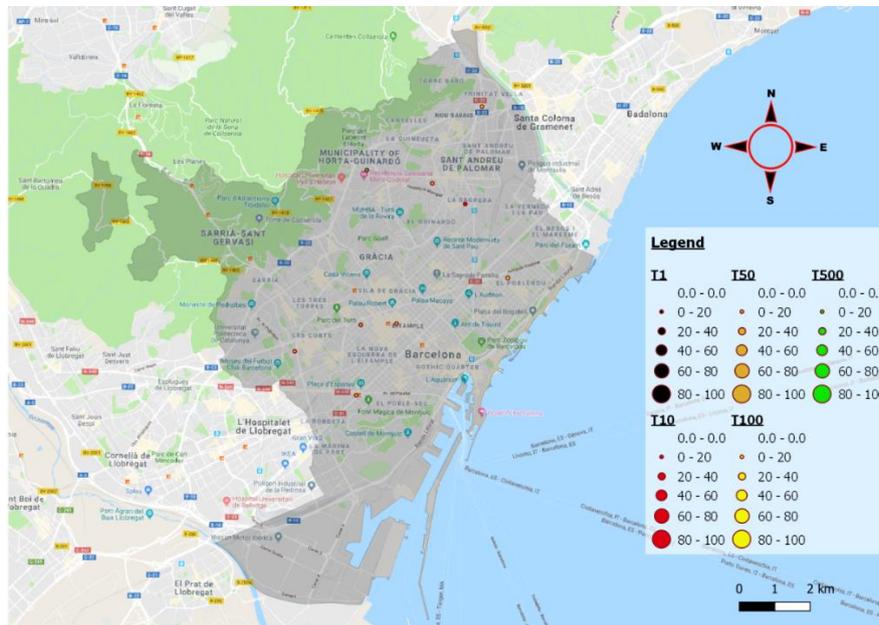
La eficacia aumenta considerablemente cuando también se aplican medidas estructurales (SiE). La figura 44 muestra cómo se reduce el número de subestaciones afectadas en cuatro para T10, diez para T50, once para T100 y siete para T500, de modo que, en el mejor de los casos, disminuye hasta un 47 % teniendo en cuenta los dos tipos de subestaciones (MV y HV). Cuando se tienen en cuenta las medias, es posible ver una reducción media de la AAR afectada de cerca de un 30 % y de 5 a 7 cm de profundidad de agua menos (WDA) (figura 39).

Figura 44. Media de reducción de la tasa de superficie afectada y profundidad del agua. Media alcanzada aplicando los diferentes conjuntos de medidas de prevención (SUDS y SiE) para cada periodo de retorno analizado.

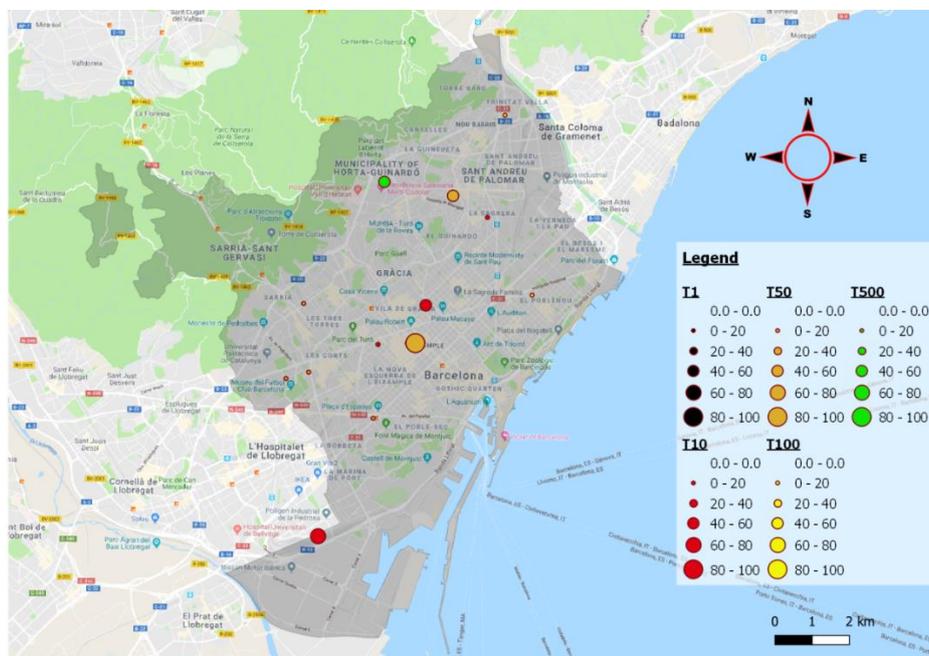


A continuación se muestran los mapas de reducción de área afectada en caso de inundación para las diferentes infraestructuras eléctricas aplicando las diversas medidas de adaptación al escenario futuro:

Mapa 49. Representación de las subestaciones donde se redujo la tasa de área afectada después de aplicar las medidas de adaptación 1 (SUDS) al escenario BAU para el diferente periodo de retorno analizado y teniendo en cuenta la tasa de área afectada (0-100 %).



Mapa 50. Representación de las subestaciones donde se redujo la tasa de área afectada después de aplicar las medidas de adaptación 2 (SiE) al escenario BAU para el diferente periodo de retorno analizado y teniendo en cuenta la tasa de área afectada (0-100 %).



4 Análisis de los impactos derivados de la subida del nivel del mar: efecto en las playas, infraestructuras y servicios costeros

El objetivo de este modelo es evaluar los impactos del aumento del nivel del mar a causa del cambio climático en diferentes zonas y estructuras costeras:

- Espigones de los puntos de descarga del sistema unitario de drenaje
- Playas (superficie real de 30,32 ha)
- Drassanes
- Espigones de los puertos
- Muelles del puerto
- Delta del río Besòs
- Delta del río Llobregat
- Cañerías de descarga del sistema unitario de drenaje

El modelo se basa en un simple análisis espacial GIS que, en vista de la futura subida media del nivel del mar simulada a partir de los resultados de las proyecciones climáticas, evalúa el área de estructuras inundadas permanentes y zonas costeras. Cabe remarcar que el análisis considera solo el efecto de subida del nivel del mar sin tener en cuenta el oleaje y las mareas.

El análisis comparativo entre zonas inundadas reales y futuras para la costa y sus infraestructuras asociadas toma como hipótesis principal y punto de partida que en el escenario actual no se ven afectados y, por lo tanto, se mide la afectación en las zonas costeras del impacto por el aumento del nivel del mar en dos escenarios futuros diferentes para el horizonte 2071-2100:

- Subida del nivel del mar media de 35 cm según el RCP 4.5
- Subida del nivel del mar media de 50 cm según el RCP 8.5

Los impactos del aumento del nivel del mar se cuantifican en términos de:

- Principales puntos de descarga del sistema unitario (DSU) y cañerías que podrían ser parcialmente inundadas por el aumento del nivel del mar (y producirse, además, el problema indirecto de la introducción de salinidad en el sistema de saneamiento).
- Playas permanentemente inundadas (prácticamente perdidas), deltas fluviales, etcétera.
- Infraestructuras críticas (espigones y muelles), potencialmente expuestas a las inundaciones producidas por la subida del nivel del mar.

Los mapas representan los elementos vulnerables potencialmente expuestos a inundarse por culpa de la subida del nivel del mar para los dos escenarios futuros:

Mapa 51. Principales efectos para el escenario RCP 4.5 2070-2100.



Mapa 52. Principales efectos para el escenario RCP 8.5 2070-2100.



Conclusiones

Tomando como referencia el estado actual en que las playas ocupan una superficie de 30,32 ha, esta superficie se verá reducida en aproximadamente 3,35 ha (cerca de un 11 % del total) en el

caso de 35 cm de aumento medio del nivel del mar y 5 ha (aproximadamente un 17 % del total) en el caso de 50 cm de aumento medio del nivel del mar.

En la siguiente tabla se pueden observar las superficies (en ha) inundadas de las diferentes playas de Barcelona, excepto para la playa del Bogatell, que no se vería afectada en ninguno de los dos escenarios de futuro previstos:

Playas	RCP 4.5 (+35 cm)	RCP 8.5 (+50 cm)
Barceloneta	0,29	0,46
Llevant	0,28	0,38
Mar Bella	0,23	0,42
Nova Icària	0,00	0,02
Nova Mar Bella	0,93	1,40
Somorrostro	0,70	0,90
Sant Sebastià-Sant Miquel	0,92	1,42
Total general	3,35	5,00

Con respecto al resto de infraestructuras costeras afectadas, en la siguiente tabla se puede ver cómo resultarán afectadas en los dos escenarios de cambio climático estudiados:

Datos del modelo GIS de subida del nivel del mar	Área costera inundada (ha) para una subida del nivel del mar de 35 cm (RCP 4.5)	Área costera inundada (ha) para una subida del nivel del mar de 50 cm (RCP 8.5)
Espigones de los puntos de descarga del sistema de drenaje	0,72	1,26
Drassanes	0,95	0,96
Espigones	1,34	3,46
Muelles de zonas portuarias	0,41	0,56
Delta del Besòs	0,07	0,16
Delta del Llobregat	13,16	20,11

5 Análisis de los impactos sobre la disponibilidad de agua

El suministro de agua en Barcelona está garantizado por los recursos hídricos de las cuencas del Llobregat y del Ter y depende básicamente de los volúmenes de agua almacenados en su sistema de embalses (fig. 40).

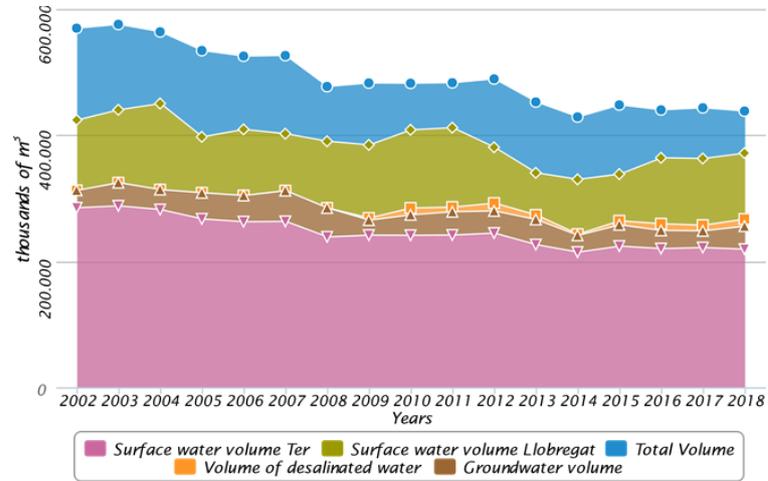
Figura 45. Sistema de embalses en las cuencas del Ter y el Llobregat. Fuente⁵:



Cuando estos volúmenes son inferiores a algunos niveles específicos establecidos por el plan de sequía desarrollado por la Agencia Catalana del Agua (ACA), la ciudad puede entrar en varios estados de sequía, cada uno de los cuales comporta varias restricciones (actividades de ocio, riego, usos industriales, reducción de presión en las cañerías, etcétera). En la figura 41 se puede observar cómo los recursos hídricos disponibles han ido disminuyendo durante los últimos veinte años.

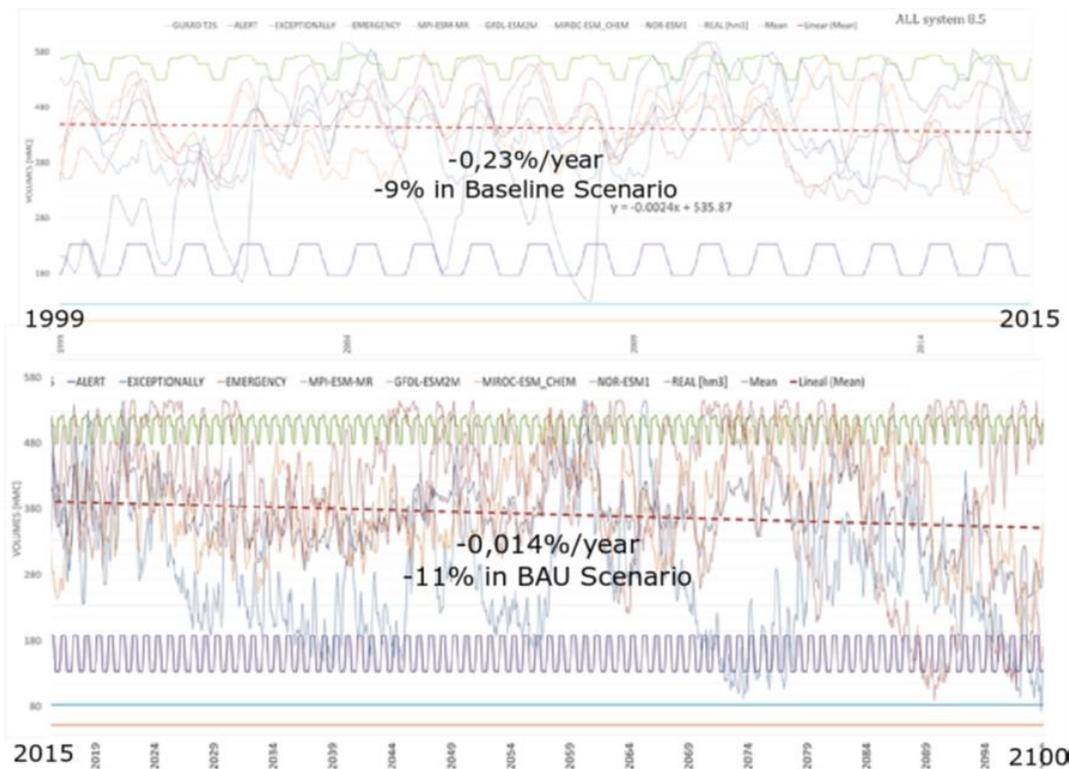
⁵ Forero-Ortiz, E.; Martínez-Gomariz, E.; y Monjo, R. (2020): "Climate Change Implications for Water Availability: A Case Study of Barcelona City". *Sustainability*, 12 (5), 1779. <https://doi.org/10.3390/su12051779>

Figura 46. Disminución de los recursos hídricos de la ciudad durante los últimos veinte años.



El objetivo de este modelo de recursos hídricos y de sequía es representar las aportaciones de agua que entran en los embalses en una escala de tiempo mensual en función de la precipitación caída sobre las subcuencas de cada embalse.

Figura 47. Resultados de la simulación del modelo hidrológico utilizado.



Las simulaciones de las aportaciones de volumen en cada embalse se han llevado a cabo aplicando un sistema de modelización hidrológica integrado desarrollado en el Instituto

Figura 48. Resultados de la simulación del modelo hidrológico utilizado.

Hidrológico Meteorológico de Suecia (modelo HBV). El modelo aplica tres módulos de embalse diferentes: uno simula el comportamiento del suelo, el segundo el embalse superior y, finalmente, el embalse inferior que representa el caudal de la base de las aguas subterráneas y que se ha considerado adecuado para reproducir las aportaciones de los embalses sobre las cuencas del Llobregat y del Ter.

El resultado de las simulaciones efectuadas indica que la disponibilidad de agua disminuirá posiblemente en este siglo XXI para el sistema conjunto de embalses. Las intercorrelaciones entre los nueve modelos ejecutados proporcionaron una línea de tendencia del comportamiento previsto del volumen de agua en el sistema de embalses. Para el 2019-2100, los modelos pronostican una reducción media de la disponibilidad de agua del 11 % de cara al 2100 y un 9 % de cara al 2050. Estos resultados están alineados con otros estudios anteriores (figura 43). Estos cambios en la disponibilidad de agua sostenible tendrían consecuencias a escala de ciudad, tanto para las condiciones socioeconómicas como para los ecosistemas.

Figura 49. Estudios sobre la reducción de recursos hídricos esperada para Barcelona en los años 2050 y 2100.

Study	Mean Expected Reduction by 2050	Mean Expected Reduction by 2100
Climate change impacts study in Barcelona—water cycle [10]	12%	No Data
RESCCUE Project	9%	11%
Water and climate change. Diagnosis of the impacts predicted in Catalonia [17,37]	7%–15% according to diverse scenarios	No Data

6 Conclusiones

- El resultado de las simulaciones del modelo de drenaje urbano es la identificación de los puntos críticos con problemas de inundaciones históricas más importantes de la ciudad (mapa 5, pág. 9).
- Teniendo en cuenta que el sistema de alcantarillado de Barcelona ya sufre desbordamientos en el 24 % de la red para una lluvia con un periodo de retorno de frecuencia media (T10), se estima que, con el efecto negativo del cambio climático, este valor se incrementará un 4 %, hasta llegar al 28 % de desbordamientos de la red, alcanzando valores del 44 % para lluvias con periodo de retorno menos habituales (T100).
- Con respecto al riesgo para las personas, y los efectos provocados en caso de inundación en la estabilidad de peatones y vehículos, las zonas de alto riesgo aumentarán del orden del 30 %, lo que implica pasar de 240 a 312 ha de la superficie transitable de la ciudad para los peatones y de 110 a 148 ha para los vehículos, para el periodo de retorno de 10 años. Si consideramos el periodo de retorno de 100 años, estas superficies con peligro alto serían de 585 ha actualmente y se incrementarían hasta 762 ha (12,4 % de la superficie total transitable de la ciudad) para los peatones. Para los vehículos pasaríamos de las 318 ha actuales a 433 ha para el escenario futuro (7,1 % de la superficie total transitable de la ciudad).
- El efecto en la red viaria, con respecto a reducción de la velocidad y cortes de calles provocados por inundaciones, también empeora con el cambio climático. Comparando los resultados de los escenarios actual y futuro, del total de 1.492 km de red vial, entre el 13 % y el 21 % de las calles —para los periodos de retorno T10 y T100, respectivamente— experimentarán reducciones de velocidad, mientras que el número de calles cortadas en el escenario futuro de cambio climático se incrementa del orden del 20 % en todos los periodos de retorno, cosa que se traduce en aproximadamente 30 km de calles cortadas para el periodo de retorno de 10 años y unos 60 km de calles cortadas para el periodo de retorno de 100 años.
- Al analizar el efecto de los contenedores de residuos urbanos mediante la evaluación del peligro de deslizamiento y vuelco provocado por inundaciones con periodo de retorno de 50 años y teniendo en cuenta su grado de llenado, comprobamos que un 17 % del total de los contenedores de la ciudad estudiados pierden la estabilidad en el escenario actual y que esta cantidad podría aumentar hasta el 22 % con las condiciones de lluvias futuras, lo que implica un incremento del 28 % en el número de contenedores vacíos potencialmente inestables a consecuencia del cambio climático.
- El modelo de contaminación de aguas marinas por descargas en el medio receptor del sistema unitario de drenaje, que simula los efectos en la calidad del agua por contaminación de la bacteria *E. coli*, muestra que durante la temporada de baño las

playas podrían sufrir hasta 3,22 días de cierre con bandera roja por baja calidad del agua.

- Los barrios más afectados por daños en las propiedades son el Raval, el Parc i la Llacuna del Poblenou, Sant Andreu, Sant Antoni, la Esquerra de l'Eixample, la Marina del Prat Vermell y la Zona Franca. Actualmente, la ciudad sufre daños en las propiedades por valor de 56 millones de euros por un episodio de lluvia con periodo de retorno de 10 años y de 186 millones de euros por un episodio de lluvia con periodo de retorno de 100 años. Con las lluvias futuras, agravadas por el cambio climático, estos daños empeoran significativamente entre un 35 % y 40 % para los periodos de retorno de 10 y 100 años, respectivamente, de manera que los daños provocados se estiman en 75 millones de euros y 260 millones de euros para los periodos de retorno de 10 y 100 años, respectivamente
- La principal conclusión derivada de la modelización del sistema eléctrico de la ciudad es la necesidad de profundizar más en este ámbito, dado que los resultados del proyecto se basan en una serie de hipótesis y premisas elaboradas con datos estimativos y no reflejan la realidad del sistema.
- Los principales efectos en el litoral por la subida del nivel de mar se producen en las playas de la ciudad, las cuales perderán aproximadamente 3,36 ha (aproximadamente un 11 % del total) en el caso de 35 cm de subida media del nivel del mar para el escenario RCP 4.5 a finales de siglo y 5,03 ha (aproximadamente un 17 % del total) en el caso de 50 cm de subida media del nivel del mar para el escenario RCP 8.5 a finales de siglo.
- Los resultados del análisis de la capacidad de abastecimiento del sistema de embalses de las cuencas del Ter y el Llobregat indican una disminución del 11 % de los recursos hídricos a finales de siglo, considerando el peor de los escenarios de cambio climático.