




Implementación de un sistema de alerta temprana integral contra las inundaciones urbanas y desbordamientos de sistemas de saneamiento: el Proyecto LIFE BAETULO

LIFE BAETULO Project: Implementation of an Integrated Early Warning System to cope with urban floods

Montse Martínez Puentes ^{*a1}, Beniamino Russo ^{a2,b}, Andrea Paindelli ^{a3},
Paula Recolons Lopez-Pinto ^{a4}, Rubens Hernández Pérez ^{a5}, Joaquim Bofill Ananos ^{a6},
Josep Montes Carretero ^c

¹AQUATEC Proyectos para el Sector del Agua.

²Grupo de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (GIHA), Escuela universitaria Politécnica de La Almunia (EUPLA), Universidad de Zaragoza.

³Ayuntamiento de Badalona.

E-mail: ^{a1}montserrat.martinez@aquatec.es, ^{a2}beniamino.russo@aquatec.es, ^{a3}andrea.paindelli@aquatec.es, ^{a4}paula.recolonslopezpinto@agbar.es, ^{a5}rubens-luis.hernandez@aquatec.es, ^{a6}joaquim.bofill@aquatec.es, ^bbrusso@unizar.es, ^cjmontes@badalona.cat

*Autor para correspondencia

Recibido: 17/01/2023

Aceptado: 03/04/2023

Publicado: 30/04/2023

Citar como: Martínez-Puentes, M., Russo, B., Paindelli, A., Recolons Lopez-Pinto, P., Hernández-Pérez, R., Bofill-Ananos, J., Montes-Carretero, J. 2023. LIFE BAETULO Project: Implementation of an Integrated Early Warning System to cope with urban floods. *Ingeniería del agua*, 27(2), 93-110. <https://doi.org/10.4995/la.2023.19129>

RESUMEN

LIFE BAETULO (www.life-BAETULO.eu) ha sido un proyecto piloto de adaptación al cambio climático liderado por AQUATEC y con presupuesto de 1.2 millones de euros, financiado por la Comisión Europea en el marco del programa *LIFE Climate Action*. El objetivo del proyecto ha sido el desarrollo y la implementación de un sistema de Alerta Temprana Integral Multirriesgo en la ciudad de Badalona para reducir la exposición y la vulnerabilidad de los ciudadanos frente a los eventos climáticos. La duración de LIFE BAETULO ha sido de dos años y medio (Julio 2020 - Diciembre 2022). Tanto la fase de desarrollo como de implementación han contado con la participación de diferentes entidades como el Ayuntamiento de Badalona, el Área Metropolitana de Barcelona y *Aigües de Barcelona*, también socios del proyecto. Los principales peligros climáticos que permite gestionar el sistema de alerta integral son las inundaciones pluviales urbanas, los desbordamientos del sistema de saneamiento (DSS) (estas dos amenazas principalmente tratadas en este artículo), los temporales marítimos, las olas de calor y de frío, las nevadas, los temporales de viento, los incendios forestales y los episodios de contaminación atmosférica. El proyecto ha proporcionado un sistema capaz de detectar de manera temprana dichos eventuales peligros climáticos y ayudar en la gestión de eventos de crisis asociados a su ocurrencia. Como colofón al proyecto se ha desarrollado también una aplicación móvil como canal de comunicación del sistema con la ciudadanía, operadores y otros actores locales involucrados. BAETULO adopta un enfoque multirriesgo, en contraste con las soluciones sectoriales clásicas que se enfocan en un solo peligro a la vez. Este artículo describe los objetivos del proyecto, la arquitectura de la solución, la metodología de validación y los beneficios para la ciudad de Badalona.

Palabras clave | sistema de alerta temprana; adaptación al cambio climático; desbordamientos del sistema de saneamiento; evaluación de riesgo; inundación urbana.

ABSTRACT

LIFE BAETULO (www.life-BAETULO.eu) is an European pilot project led by AQUATEC, funded by the LIFE Climate Action programme, with a budget of around 1.2 million of euros and with a duration of 2.5 years (from July 2020 to December 2022). An Integrated Early Warning System was developed and implemented in Badalona as a technical and adaption measure to reduce exposure and

vulnerability of urban assets and citizens to climate change. The system considers major climate change-derived hazards such as floods, combined sewer overflows (CSOs) (mainly addressed in this paper), but also storm surges, heat and cold waves, snowfalls, windstorms, air pollution and forest fires. The platform was built on top of existing infrastructure such as meteorological and weather services, drainage infrastructure monitoring systems and official information channels. BAETULO adopted a multi-risk approach, in contrast with classic sectorial solutions which focus on just one hazard at a time. This paper describes the objectives of the project, the solution architecture, the validation methodology and the benefits for the city of Badalona.

Key words | *integrated early warning system; Climate change adaptation; risk management; urban floods.*

INTRODUCCIÓN

La mayor amenaza a la que se enfrenta la humanidad actualmente es el cambio climático: sus impactos se muestran en numerosas regiones de este planeta y plantean serios retos para las ciudades, tanto por su frecuencia como por la magnitud de los fenómenos meteorológicos derivados. De acuerdo con diferentes estudios y en particular con el último informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), la frecuencia de ocurrencia de eventos climáticos extremos, como lluvias torrenciales de corta duración, sequías prolongadas, olas de calor y de frío y temporales marítimos haya aumentado en los últimos años y la situación, para el futuro, tiende a exacerbarse en muchas zonas del planeta (IPCC, 2018).

En ámbito urbano, el aumento de las intensidades de lluvia y sus frecuencias, asociado al incremento demográfico y al desarrollo urbano de las últimas décadas, ha puesto de manifiesto la absoluta necesidad de actualizar los criterios de diseño de las infraestructuras asociadas al drenaje urbano para paliar los impactos sociales, económicos y ambientales generados por los cada vez más recurrentes fenómenos de inundaciones pluviales y desbordamientos de sistemas de saneamiento (DSS) (Ortiz, *et al.*, 2021) (Guerrero-Hidalga, *et al.*, 2020; EEA, 2021).

La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) lleva más de 40 años recogiendo en su Open Data (AEMET, 2019) las evidencias de los impactos del cambio climático en España, poniendo de manifiesto que alrededor de 32 millones de personas ya sufren las consecuencias directas de sus efectos. La expansión de los climas semiáridos, los veranos más largos caracterizados, cada vez más, por temperaturas más elevadas y más frecuencias de olas de calor, los aumentos de la temperatura superficial del mar Mediterráneo, el aumento de las noches tropicales, demuestran que las zonas costeras mediterráneas se han en entornos vulnerables con respecto a las amenazas climáticas (MITECO, 2020)

Adaptarse consiste en planificar, comprender y actuar y así poder prevenir los impactos antes de minimizar sus efectos y hacer frente a sus consecuencias. El IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) define como peligro climático la “posible ocurrencia de un evento físico natural o inducido por el hombre que genere pérdidas debidas a lesiones, impactos en la salud o daños a bienes, infraestructuras, prestaciones de servicios y recursos medioambientales” (IPCC, 2018). Para evitar o mitigar los impactos potenciales del cambio climático, la adaptación debe incluir una amplia gama de estrategias destinadas a promover una mejor preparación tanto para minimizar los impactos como para la recuperación posterior del daño. Las acciones de adaptación climática pueden ser efectivas al reducir la exposición y la vulnerabilidad de sistemas sociales, económicos y ecológicos frente al cambio climático y mejorar también su capacidad de recuperación temprana frente a un evento extremo. A través del documento de la Comisión Europea *Adaptation to Climate change-blueprint for a new, more ambitious EU strategy*, se evidencia la realidad de que las sociedades son vulnerables a los impactos sistémicos ya que cada vez están más interconectadas, y se prioriza la necesidad de aumentar la resiliencia en las ciudades (EC, 2020). El documento pretende promover la adaptación global y la reducción acelerada de las emisiones en la Unión Europea para contribuir a garantizar el bienestar de los ciudadanos y salvaguardar el entorno natural, además de proteger el patrimonio, las inversiones y los activos económicos de los ciudadanos.

Las acciones de adaptación como los sistemas de alerta temprana tienen varios y significativos efectos socioeconómicos y una relación coste-beneficio generalmente muy favorable (GCA, 2019). Según la clasificación de la GCA, los sistemas basados en alerta temprana como LIFE BAETULO se consideran una medida de adaptación de tipología blanda o *soft* (en inglés) mientras otras clasificaciones también lo categorizan como una medida de adaptación de tipo tecnológica-estructural o informativa-social. Estos tipos de sistemas también son implementados para la reducción del riesgo de desastres (UNDRR, 2020).

La presente publicación pretende describir las principales componentes del sistema de alerta LIFE BAETULO, centrándose en aquellos peligros climáticos más afines a la temática de esta revista, como las inundaciones pluviales y los desbordamientos del sistema de saneamiento. Con este fin, se presentan los principales módulos de la plataforma y la implementación del sistema de alerta para los riesgos que se acaban de mencionar, así como los resultados obtenidos hasta el momento, después de varios meses de prueba y funcionamiento del sistema. A nivel potencial, este sistema podría replicarse en cualquier lugar del mundo, que disponga de una cantidad suficiente de datos en tiempo real procedentes de sensores y sistemas de vigilancia meteorológica. La filosofía de este trabajo es proporcionar una línea guía, ofreciendo claros ejemplos de metodologías, reglas y acciones a completar para proporcionar un sistema de alerta temprana que pueda no solamente ofrecer soporte a los gestores de las infraestructuras urbanas, si no también coadyuvar en la protección de los diferentes receptores de riesgo climáticos: las personas, los bienes y nuestro patrimonio ambiental y cultural.

ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE ALERTA

El sistema de alerta temprana integral implementado a través del proyecto LIFE BAETULO ha sido diseñado con la funcionalidad principal de abordar aquellos peligros climáticos que afectan actualmente al municipio de Badalona (Cataluña) y sus 217.000 habitantes para mitigar los impactos directos e indirectos asociados a fenómenos meteorológicos extremos y otras amenazas asociadas a la calidad del aire o las aguas de baño. Los peligros contemplados por el sistema incluyen: inundaciones pluviales urbanas, desbordamientos del sistema de saneamiento (DDS), olas de calor y de frío, temporales de viento, episodios de contaminación atmosférica generados por óxidos de nitrógeno, ozono o partículas en suspensión, incendios forestales, temporales marítimos y nevadas. Es necesario destacar que las sequías no se han incluido en dicho sistema de alerta al tratarse de un peligro climático estacional que debe abordarse a través de modelos meteorológicos específicos que permitan llevar a cabo acciones de planificación y de gestión a largo plazo, mientras que el sistema de alerta temprana va dirigido a la implementación de acciones y estrategias a corto plazo.

Para cada uno de los peligros climáticos considerados en LIFE BAETULO existe un protocolo de emergencia, debidamente redactado por parte de la autoridad competente. Gracias a este proyecto, estos protocolos se han podido actualizar, digitalizar y desgranar en acciones concretas a ejecutar durante las fases de la gestión de crisis. Dichas acciones han sido integradas en la plataforma sistema de alerta LIFE BAETULO y el usuario gestor del sistema puede ir marcándolas a medida que se vayan ejecutando durante la gestión de la emergencia.

El sistema de alerta LIFE BAETULO se compone de 4 módulos (Figura 1): adquisición de datos, evaluación del peligro y del riesgo, preparación y respuesta y comunicación de resultados. Los módulos se interconectan entre ellos gracias a una plataforma web donde los gestores pueden analizar el estado del sistema, consultar históricos, validar alertas y activar los protocolos destinados a cada situación de emergencia.

A la hora de clasificar los eventos a nivel de riesgo, se establecieron diferentes niveles para cada uno de los peligros climáticos analizados. En un sistema de alerta integral como el del LIFE BAETULO esto se articula a través de la definición de varios umbrales de activación de 4 niveles de alerta para cada peligro climático, a partir de los cuales el potencial de recibir consecuencias adversas o impactos para los elementos territoriales expuestos al peligro (personas, edificios, infraestructuras, medio ambiente, etc.) puede tener nulas, bajas, medias o altas consecuencias.

Estos cuatro niveles son:

- Normalidad: situación en la cual todas las variables medidas están bajo cualquier umbral de activación, con lo cual no se supone ningún tipo de peligro asociado.
- Prealerta: situación de riesgo potencial asociada a la constatación de indicios o a la previsión de fenómenos que podrían desencadenar el episodio de peligro climático concreto.

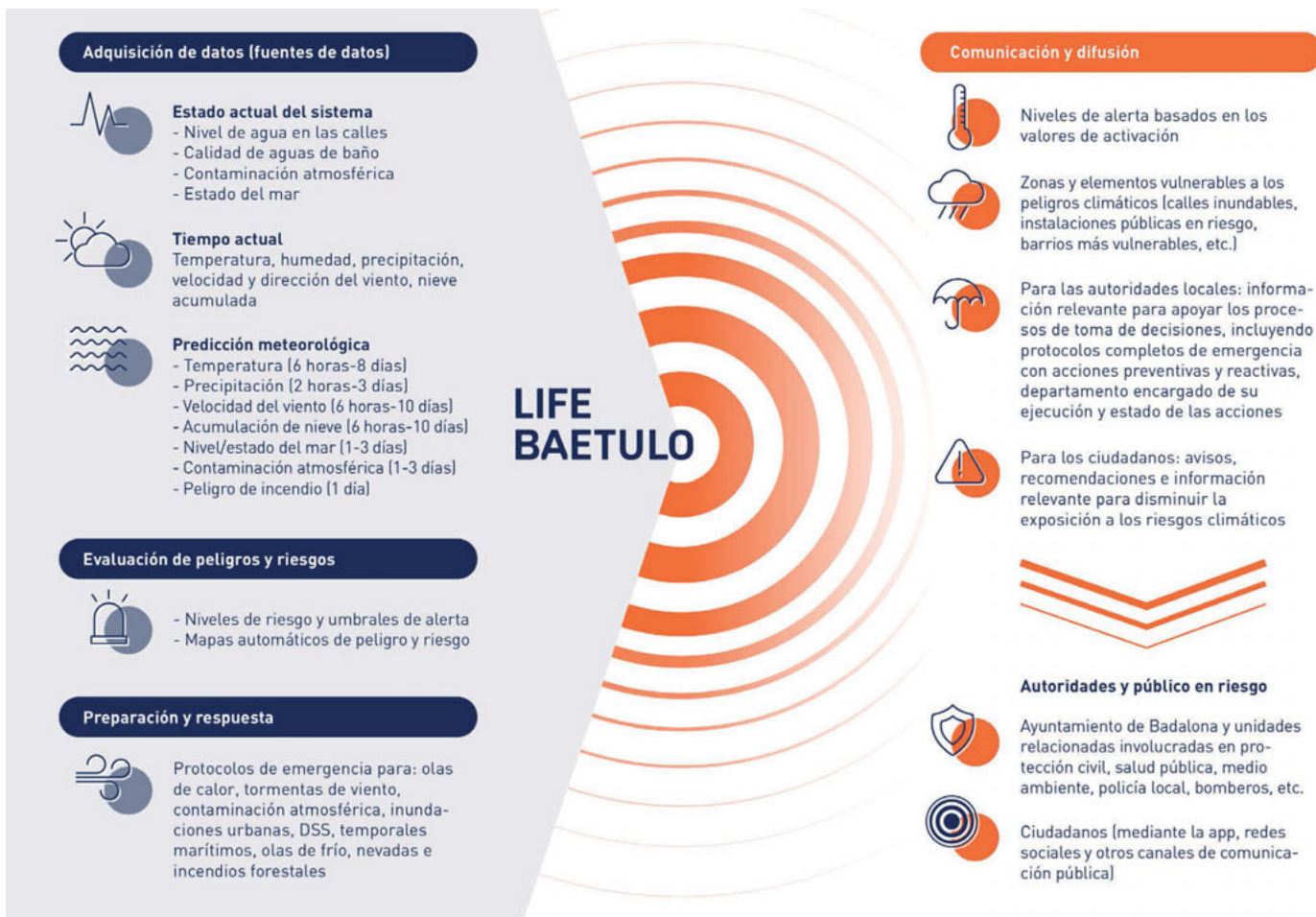


Figura 1 Estructura del Sistema de Alerta Temprana BAETULO.

- **Alerta:** situación de riesgo constatado o evidente, por datos observados, que indican que la situación es suficientemente grave o con una inminencia tal que requiere de la puesta en marcha de un protocolo de actuación destinado a la minimización de impactos.
- **Emergencia:** situación de riesgo constatado que está provocando impactos relevantes en la ciudad y/o a su población debido a que la respuesta municipal es insuficiente. Por ejemplo: cortes de suministro de servicios urbanos, colapso de la atención sanitaria primaria y/o hospitales, muerte de personas no pertenecientes al grupo de riesgo, etc.

Para la definición de estos niveles de alerta se han utilizado diferentes fuentes de referencia: principalmente normativas existentes, como la Directiva de aguas de baño 2006/7/CE (EU, 2006; BOE, 2006) para el peligro de DSS; indicaciones oficiales por parte del equipo de predicción y vigilancia del Servicio Meteorológico de Cataluña para los peligros de inundación, temporal marítimo, temporal de viento (SMC, 2022); umbrales ola de calor/frío y o contaminación atmosférica, dictaminados por el Agencia de Salud Pública (Ministerio de Sanidad, 2013) y relaciones derivadas desde estudios empíricos (niveles de peligrosidad y riesgo para los episodios de inundaciones pluviales (Martínez-Gomariz, *et al.*, 2019) y de descargas del sistema de saneamiento en Badalona (Locatelli, *et al.*, 2020);

Las variables de activación por cada peligro se recopilan en la tabla 1.

Tabla 1 | Resumen de las variables de corto y medio plazo trazadas y analizadas por el sistema de Alerta BAETULO.

Peligro climático	Tiempo real	Pronostico corto y medio plazo
Inundación pluvial	<ul style="list-style-type: none"> - Intensidad de lluvia - Lluvia acumulada - Nivel de agua en puntos críticos de la red de drenaje - Nivel de agua en las calles más críticas 	- Max Intensidad de lluvia - Max lluvia acumulada
Desbordamiento de Sistemas de Saneamiento (DSS)	<ul style="list-style-type: none"> - Intensidad de lluvia - Lluvia acumulada - Nivel de agua en puntos de alivio de la red de drenaje - Concentraciones de <i>E. coli</i> y <i>E. fecalis</i> en aguas de baño 	- Max Intensidad de lluvia - Max lluvia acumulada
Ola de calor y frío	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura 	- Max temperatura
Temporal de viento	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad del viento 	- Max velocidad del viento
Contaminación atmosférica	<ul style="list-style-type: none"> - Concentración de contaminante (NO₂, PM10 y O₃) 	- Concentración de contaminante (NO ₂ , PM10 y O ₃)
Incendio Forestal	<ul style="list-style-type: none"> - Mapas de peligro de incendio 	- 30-30-30 ÍNDICE (Índice meteorológico Forest Fire-FWI) (AEMET, 2022)
Temporal marítimo	<ul style="list-style-type: none"> - Altura de olas 	- Max altura de olas
Nevada	<ul style="list-style-type: none"> - Altura de nieve acumulada 	- Altura de nieve acumulada

Todas las variables analizadas por parte de LIFE BAETULO proceden de fuentes oficiales y se procede a listarlas en la tabla 2.

Tabla 2 | Resumen de las fuentes de datos del sistema de Alerta LIFE BAETULO.

Fuente	Descripción
Modelo Meteorológico del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC)	Modelo de pronóstico del tiempo SMC (<i>Servei Meteorològic de Catalunya</i>) basado en el WRF (modelo de investigación meteorológica y pronóstico) (SMC, 2022). Combina las principales variables climáticas en una resolución de 27×27 km para todo el español hasta un 3×3 km para la región catalana. Proporciona un pronóstico de lluvia con hasta 1 hora de anticipación.
SMP (Situación Meteorológica de Peligro) del SMC	Sistema oficial de alertas climáticas del SMC conectado a su modelo meteorológico. Depende de umbrales específicos (SMP, 2022). Se aplica a varios peligros no solamente al de inundación.
Radar SMC	Red XRAD del SMC capaz de proporcionar una estimación cuantitativa de lluvia de hasta 150 km de distancia cada 6 minutos (XRAD, 2022)
Radar Nowcasting (Hyds)	Pronóstico de lluvia a corto plazo con hasta 2 horas de anticipación utilizando imágenes de radar. (Propiedad Hyds)
Red de pluviómetros	Red de medidores de lluvia compuesta por diferentes entidades: AB (<i>Aigües de Barcelona</i>) pluviómetros privados y automáticos del SMC y otros medidores privados de lluvia (Ayuntamiento de Badalona). La frecuencia de actualización aumenta de 15 minutos a 1 minuto durante un evento de lluvia.
Red de limnímetros de alcantarillado	Red de sensores de nivel de agua procedentes de diferentes entidades: AB (<i>Aigües de Barcelona</i>) y otros sensores (Ayuntamiento de Badalona) distribuidos en todo el sistema de drenaje de Badalona con una frecuencia de medición que pasa de 15 minutos a 1 minuto durante un evento de lluvia.
Manual de Operación y Mantenimiento de la red de drenaje de Badalona (MOEC)	Manual de operación y mantenimiento de la red de drenaje de Badalona y su principal depósito de control de inundaciones “La Estrella” (AB, 2022)
Modelo meteorológico del Centre European Medium-Range Weather Forecast (ECMWF)	Modelo de pronóstico meteorológico del ECMWF (Centro Europeo para pronósticos meteorológicos de mediano alcance) que combina las principales variables atmosféricas (ECMWF, 2022)
Red sensores de detección descargas sistemas de saneamientos	Red de sensores de nivel de agua compuesta por diferentes entidades: AB (<i>Aigües de Barcelona</i>) y otros sensores privados (Ayuntamiento de Badalona) colocados en puntos de vertidos de la red de drenaje de Badalona. Se utilizan para detectar desbordamientos y estimar el volumen vertido. La frecuencia de actualización aumenta de 15 minutos a 1 minuto durante un evento de lluvia.
Análisis microbiológicos de aguas de baño	Análisis oficial de la calidad del agua de ACA (Agencia Catalana del Agua) para garantizar el cumplimiento de la Directiva 2006/7/CE (EU, 2006; BOE, 2006) (que define las máximas concentraciones admisibles de <i>E. coli</i> y <i>E. fecalis</i> en las aguas de baño). Las muestras se toman mensualmente durante el invierno y cada 15 días durante la temporada de baño. Se toman muestras adicionales después de cada evento de DSS, asegurando una certificación de calidad más refinada. Los resultados están disponibles entre 24 y 48 horas después del evento.

(Tabla 1, continúa en la página siguiente)

(Tabla 1, continúa de la página anterior)

Fuente	Descripción
Estimación de la duración de contaminación por <i>E. coli</i> y <i>E. fecalis</i> en aguas de baño	Estimación de la duración de contaminación por <i>E. coli</i> y <i>E. fecalis</i> en aguas de baño desarrollada en el marco del Proyecto BINGO para mejorar la operación de apertura/cierre de la gestión de la playa para la costa de Badalona. (Locatelli, <i>et al.</i> , 2020)
Estaciones meteorológicas (SMC y Ayuntamiento de Badalona)	Red de estaciones meteorológicas propiedad del municipio de Badalona y del <i>Servei Meteorologic de Catalunya</i>
Puertos del Estado, modelo de pronóstico en tiempo real oleaje	Modelo oficial de Puertos del Estado (PdE), basado en la observación de la boya más cercana a las costas de Badalona. Proporciona datos en tiempo real y pronósticos a corto plazo sobre el aumento del nivel del mar, la altura de las olas, el período y la frecuencia. (PdE, 2022)
Red de Estaciones de calidad de aire automáticas de Generalitat de Catalunya	Red de estaciones automáticas de calidad del aire distribuidas en el área metropolitana de Barcelona (GenCat, 2022)
Modelo de calidad del aire Caliope del Supercomputing Center de Barcelona	Modelo de calidad del aire de supercomputación de Barcelona (Caliope, 2022). Proporciona una concentración importante de contaminantes de calidad del aire con hasta 48 horas de anticipación con una resolución diferente (UE 12×12 km, España 4×4 km, Catalunya 1×1km)
Modelo Europeo de calidad del aire de CAMS	Modelo europeo de calidad del aire de Copernicus (CAMS, 2022). Proporciona una mayor concentración de contaminantes de calidad del aire con hasta 48 horas de anticipación con una resolución diferente.

Cada variable se registra en una base de datos debidamente conectada con todas las fuentes mencionadas. El sistema LIFE BAETULO consulta dicha base de datos con frecuencia 5-minutal para comprobar la existencia de nuevos datos registrados. A continuación, el motor de alerta analiza y confronta la combinación de las variables con los varios umbrales de cada peligro climático y, si alguno de ellos sobrepasa un determinado nivel, se activa una notificación en la plataforma. En caso de que sea efectivamente así, el usuario responsable de la operación de la plataforma procederá a confirmar dicha alerta la cual se lanzará automáticamente a los ciudadanos a través de una App móvil.

LOS RIESGOS DE INUNDACIÓN URBANA Y DESBORDAMIENTO DE SISTEMA DE SANEAMIENTO

Se define como inundación pluvial aquel evento de lluvia que, por un déficit de capacidad de drenaje local, genera un exceso de escorrentía que no puede ser drenado in situ y circula de forma descontrolada en superficie. Hay factores que agravan la situación como la insuficiencia o la mala distribución de los imbornales o, simplemente, su obstrucción (Gómez, 2019).

Algunos de los impactos generados por inundaciones pluviales urbanas están directamente relacionados con la seguridad de la circulación de peatones y vehículos (daños intangibles), y las pérdidas económicas asociadas a la interrupción de actividades (daños indirectos tangibles) o a los daños generados por contacto directo del agua con bienes e inmuebles (daños indirectos tangibles) (Figura 2).

En el marco del proyecto BINGO (BINGO, 2017), se consideraron dos objetivos principales asociados a la adaptación de la ciudad de Badalona frente al peligro de las inundaciones urbanas: prevención de los daños ocasionados a propiedades y vehículos y mejora de la seguridad de los peatones y los vehículos en caso de eventos de lluvia extrema. La evaluación de la componente de peligrosidad de estos riesgos (tanto de carácter intangible como tangible) se puede evaluar según diversos criterios: en caso de daños intangibles como los asociados a la seguridad de peatones y vehículos, se utiliza una combinación entre valores de velocidad y calado de escorrentía la cual. Combinando la peligrosidad con la información geoespacial de vulnerabilidad a través de una matriz cualitativa a partir de ciertos umbrales, se obtiene el riesgo para determinados periodos de retorno (Martínez-Gomariz, *et al.*, 2016). Por otro lado, la evaluación de daños tangibles se basa en el uso y la combinación de mapas de inundación con curvas de relación calados/daños debidamente calibradas, o disponibles en literatura (USACE, 2009) y mapas de usos de los suelo y generalmente con resultados en términos de mapas de pérdidas económicas por determinados periodos de retorno a partir de las cuales se estima el Daño Anual Esperado (EAD por su sigla en inglés) o sea el gasto que ocurriría en un año dado si los daños monetarios de todas las probabilidades y magnitudes de los peligros se distribuyeran por igual a lo largo del tiempo (CWCB, 2022). Para el caso de estudio de Badalona, el cálculo de la exposición y vulnerabilidad de los peatones se llevó a cabo según información proporcionada

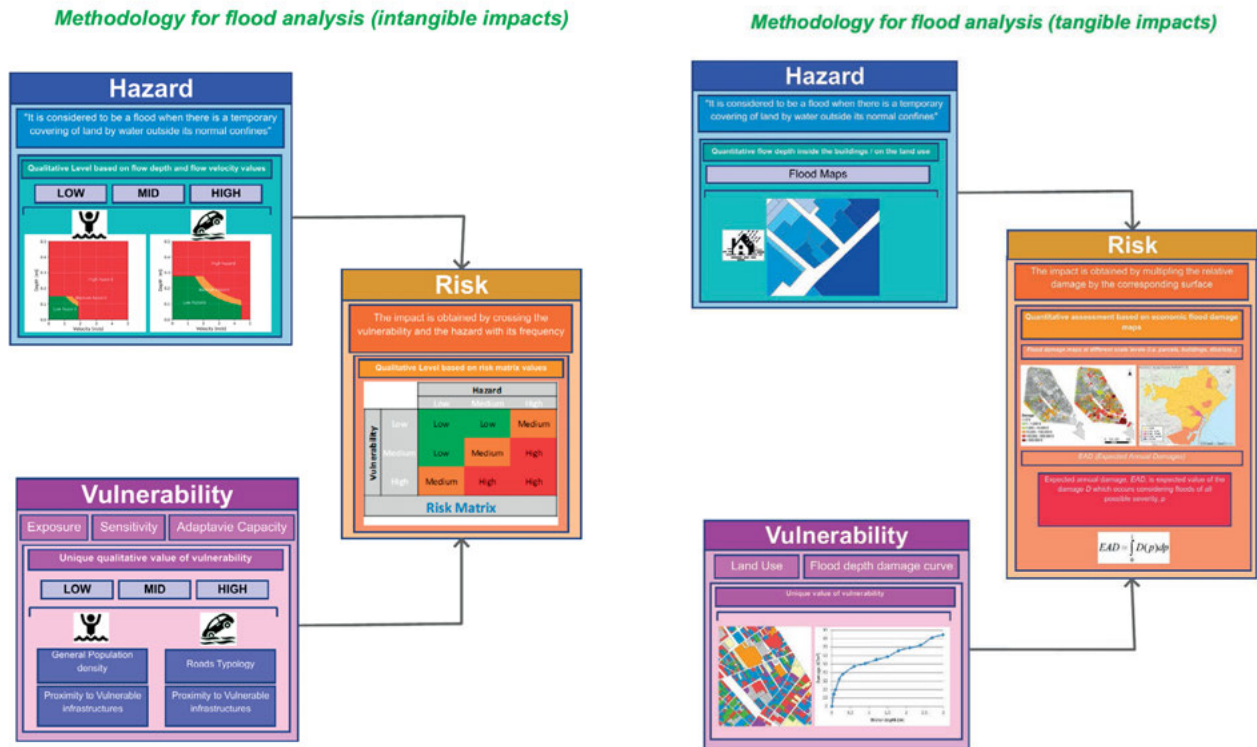


Figura 2 | Procedimiento para la estimación de daños intangibles (izquierda) y tangibles (derecha).

por el Ayuntamiento de Badalona y el Instituto Nacional de Estadística (INE) relativa a: densidad de población (personas/km²), infraestructuras vulnerables identificadas en las diferentes áreas censales, distribución de población con edad sensible (mayor de 65 años y menor de 15 años), densidad de extranjeros así como la presencia de edificios vulnerables (hospitales, escuelas, residencias de ancianos, etc.). Por lo que concierne a la evaluación de la vulnerabilidad de vehículos frente a las inundaciones, se tuvo en cuenta la tipología de calle y la densidad de vehículos diaria en carreteras y vías proporcionada por el Ayuntamiento de Badalona y obtenida de fuentes abiertas (OSM, 2022).

La siguiente imagen resume las metodologías adoptadas para el cálculo tanto de los daños tangibles como intangibles, a través la combinación de mapas de peligro, criterios de vulnerabilidad y relación entre daños y altura de inundación.

La definición de las zonas de peligro está basada en estudios empíricos de estabilidad de peatones (Russo, *et al.*, 2013) (Martínez-Gomariz, *et al.*, 2016) y flotación de vehículos (Martínez-Gomariz, *et al.*, 2019a), llevados a cabo en el Instituto de Investigación Flumen de la Universidad Politécnica de Catalunya. Los detalles de la relación entre calado y velocidad de escorrentía superficial se muestran en la siguiente imagen (Martínez-Gomariz, *et al.*, 2019).

Por lo que concierne la modelización hidráulica, se utilizó Innovyze InfoWorks ICM 9, software comercial especializado en la modelización hidrológica e hidráulica de redes de drenaje y su entorno, que utiliza un enfoque integrado en 1D y 2D para simular el flujo de agua, el transporte de sedimentos, la calidad del agua y la interacción con infraestructuras urbanas. El modelo hidráulico se construyó a partir de la información topográfica de la zona de estudio, datos catastrales, información GIS de la red de drenaje y el conjunto de simulaciones se basó en lluvias sintéticas derivadas de las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) de Barcelona (PDISBA, 2019). El modelo hidráulico se calibró y validó utilizando datos de lluvia y de inundación históricos para la zona de estudio, lo que permitió ajustar los parámetros del modelo para que reprodujera de manera precisa el comportamiento hidráulico del sistema en diferentes condiciones de lluvia y de operación del sistema de drenaje. Una vez calibrado el modelo, se utilizaron diferentes escenarios de lluvia para simular el comportamiento del sistema de drenaje y la propagación de inundaciones en la zona de estudio (2,10,100 y 500 años).

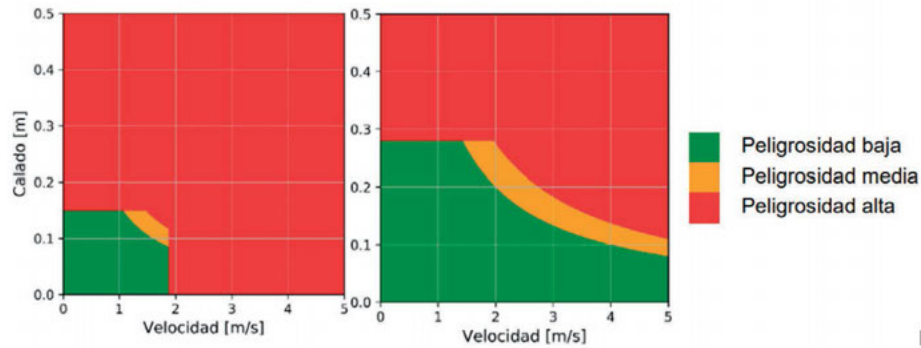


Figura 3 | Criterios de peligrosidad para peatones (izquierda) (Russo, *et al.*, 2016) y vehículos (derecha) (Martínez-Gomariz, *et al.*, 2019).

Gracias a la modelización completa de la red de drenaje y de las zonas de escorrentía preferencial para varias lluvias sintéticas y proyecciones futuras, se pudo obtener un portfolio de mapas de peligrosidad y riesgo tanto para peatones como para vehículos (Martínez-Gomariz, 2019) que se utilizaron como base para la definición de las zonas de riesgo y para la implementación de las medidas de gestión del riesgo a incluir en los protocolos de emergencia y finalmente en la plataforma del sistema de alerta LIFE BAETULO.

Para la cuantificación de las consecuencias tangibles, expresadas como EAD (Daño Anual Esperado) se tuvieron en cuenta los daños económicos tanto a propiedades como a vehículos. Como ya se ha mencionado, para la evaluación de los daños ocasionados por las lluvias intensas, se propuso utilizar una metodología precedentemente validada (Martínez-Gomariz, 2021), utilizando un modelo hidrodinámico acoplado, al que se le aplicaron curvas de daños y otras funciones de coeficientes de estanquidad para obtener el calado dentro de los edificios. Respecto a la evaluación de daños a vehículos, se propuso utilizar una metodología novedosa que, aunque basada en curvas de daños, presenta la dificultad e incertidumbre añadida de que los vehículos sean elementos móviles.

A continuación se presenta un ejemplo de información geoespacial de riesgo de inundación para peatones (izquierda) y para vehículos (derecha) (Figura 4).

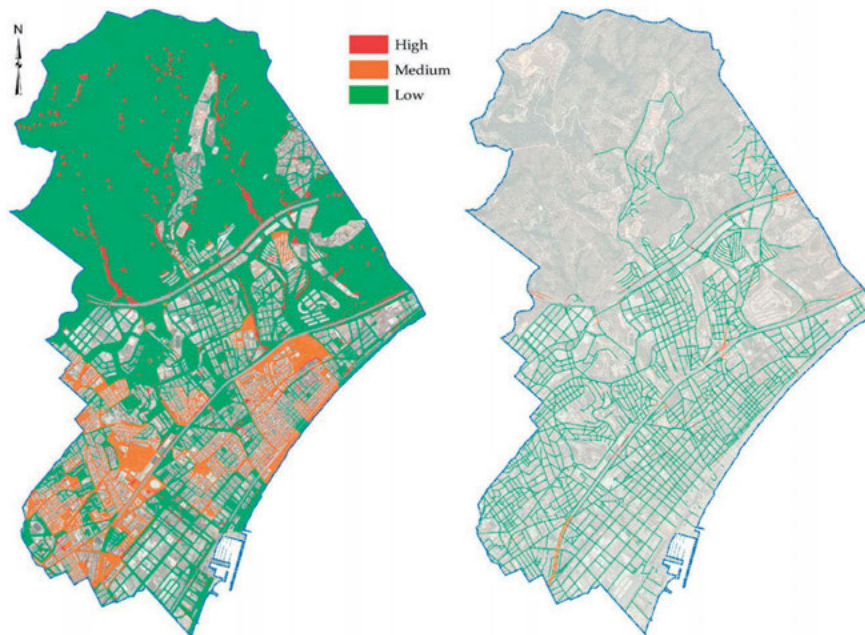


Figura 4 | Mapa de riesgo para peatones (izquierda) y vehículos (derecha) con tiempo de retorno de 500 años, elaboradas a partir de una matriz de riesgo a tres niveles (Russo, *et al.*, 2019).

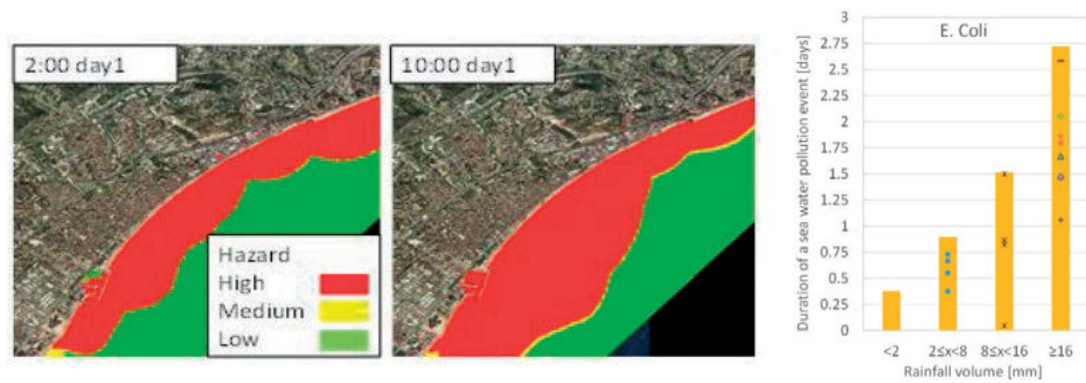


Figura 5 | Mapas de riesgo de contaminación marina (Izquierda) para Barcelona. Se note como varían en función del tiempo transcurrido desde el evento de vertido (Suñer, *et al.*, 2007). Relación lluvia acumulada, contaminación, ratio de decadencia (Locatelli, *et al.*, 2020).

Otros peligros destacables por la salud humana y del medioambiente son los desbordamientos de los sistemas de saneamiento (DSS). Para la cuantificación del riesgo relativo a los DSS se utilizó el protocolo descrito en el proyecto europeo BINGO (BINGO, 2017) que se basa en las Directivas Europeas (EU, 2006) y locales (BOE, 2006), las cuales establecen los criterios para clasificar la calidad de las aguas de baño tanto a largo como a corto plazo, considerando las concentraciones de *E. coli* (mala calidad para valores superiores a 500 UFC/100 mL y valores de *E. fecalis* superiores a 185 UFC/100 mL). Se estimaron los riesgos para la salud de los bañistas combinando, como siempre, peligrosidad y vulnerabilidad. Para su aplicación en casos reales, se definió la peligrosidad en función de la concentración de bacterias (se consideró alta cuando sobrepasaba los umbrales legales). En el caso de la vulnerabilidad esta fue definida en función de la exposición de los bañistas, siendo alta y estable durante toda la temporada alta de baño. El riesgo se cuantificó en función del tiempo promedio de calidad de agua insuficiente después de cada lluvia por cada temporada de baño. Los resultados obtenidos gracias a un modelo de drenaje acoplado a un modelo marino 3D (MOHID) (Locatelli, *et al.*, 2020) permitió simular la mortalidad y la propagación de las bacterias en el mar y elaborar mapas de riesgo de contaminación marina (Figura 5 a la izquierda). Los resultados de este estudio fueron útiles para la evaluación de riesgos relacionados con eventos de DSS y la consiguiente contaminación del agua de mar. Además, la correlación obtenida para predecir la duración de la calidad insuficiente del agua de baño como función del volumen de lluvia observado (Figura 5 a la derecha), se utiliza, por parte de los gestores de las playas de Badalona, para minimizar la limitación al acceso a las aguas de baño después de eventos de vertido y mejorar la gestión de estas infraestructuras tan fundamentales para la economía de la ciudad.

IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ALERTA LIFE BAETULO

Después de establecer los niveles de riesgo para cada peligro climático, se han definido las reglas de activación de prealerta, alerta y emergencia en base a específicas condiciones a cumplir (SI) con operadores lógicos tipo Y-O (AND-OR en inglés). Por ejemplo, una regla de activación para inundación pluvial sería: SI (pluviómetro > 20 mm) O (nivel de agua en calles > 15 cm), ENTONCES “Activar nivel de alerta de inundación por lluvia”.

Definir reglas lógicas es uno de los pasos clave para implementar un sistema de alerta temprana. Para LIFE BAETULO, estas reglas se han configurado en colaboración con los gestores locales del riesgo por inundación y DSS (Ayuntamiento de Badalona). Se han realizado los ajustes necesarios durante la fase de validación de la herramienta, para que los valores de activación sean realistas y efectivos, aunque se esperan futuras modificaciones para refinar aún más el funcionamiento del sistema.

Para dotar de redundancia el sistema, siendo alimentados de muchos sensores y fuentes de información, ha sido fundamental trabajar teniendo en cuenta cada elemento disponible. Utilizando como base de referencia las curvas IDF de Barcelona (PDISBA, 2019) se identificaron varios niveles de activación de cada sistema (sensor o modelo de predicción), para prealerta, alerta y emergencia. La imagen a continuación muestra como ejemplo la comparación de umbrales de activación en función de los diferentes

sistemas y sensores considerados. Teniendo en cuenta que cada sistema puede tener una metodología de cálculo y registro diferente a los otros (cada 20, 30, 60 minutos, etc.), es importante identificar el valor correcto de lluvia para cada elemento y compararlo con los de los otros sistemas para que pueda relacionarse con el umbral correcto de activación.

En función del sistema considerado (modelo o sensor), se utilizan valores de predicción de acumulación, predicción de intensidad, lluvia acumulada e intensidad de lluvia registrada. Los modelos meteorológicos suelen trabajar con ambos parámetros de intensidad y acumulación, así como muchos de los sensores instalados. Destaca la presencia de un sistema de alerta relacionado con niveles de intensidad de lluvia (SMP, 2022) que ya a su vez proporciona una definición de riesgo de inundación pluvial.

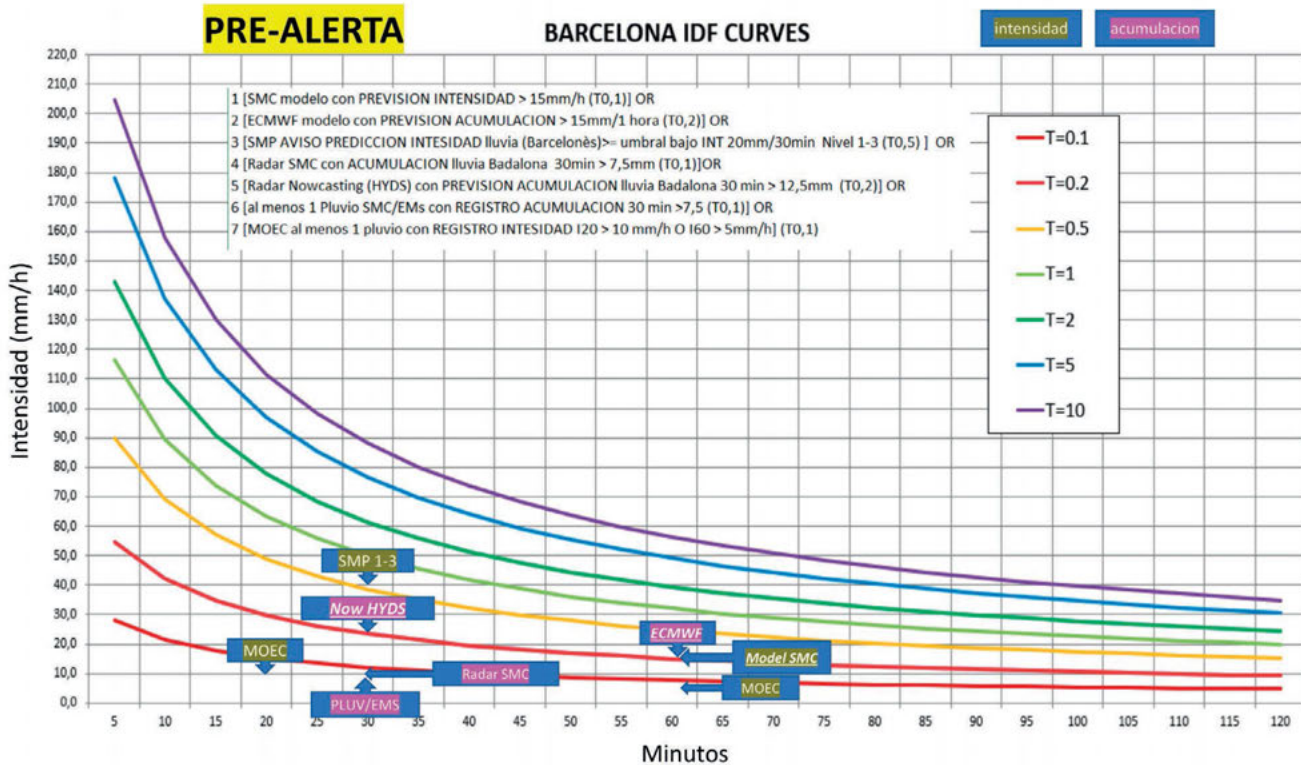


Figura 6 | Curvas IDF de Barcelona (PDISBA, 2019) con niveles de activación de Pre-Alerta por el peligro de Inundación (datos observados y predicciones a corto plazo).

Cabe destacar como para los niveles de prealerta y alerta coexisten predicción (lluvia prevista) y datos reales (lluvia efectivamente caída y registrada), mientras que en nivel de emergencia se han considerado solamente datos reales. Es preferible que la emergencia por inundaciones pluviales, así como por vertidos asociados a DSS, esté relacionada a acontecimientos y acciones concretas y no previstas.

El listado completo de activadores para el riesgo de inundación pluvial se presenta a continuación. En total cuenta de 27 activadores, 9 para prealerta, 11 para alerta y 7 para emergencia.

La ciudad de Badalona cuenta con 7 pluviómetros, 49 limnómetros de alcantarillado y de control de vertido y 4 cámaras/limnómetros para la detección de inundación superficial. Considerada la extensión relativamente limitada del ámbito municipal (menos de 21 kilómetros cuadrados), la redundancia es bastante elevada.

Cabe destacar que, para cada limnómetro, se definieron umbrales de activación diferentes en función de las dimensiones del conducto donde están ubicados, así como de la presencia de eventuales muretes o rejas de protección (Tabla 3).

Tabla 3 | Umbrales de activación de niveles de alerta. Se puede notar como sean diferentes en función del punto de vertido/conducto.

	BA02	BA03	BA04	BA05	BA06	BA07	BA08	BA09
	Calado [m]	Calado [m]	Calado [m]	Calado [m]	Calado [m]	Calado [m]	Calado [m]	Calado [m]
Prealerta	0.64	0.64	0.66				0.60	0.60
Alerta	1.12	1.12	1.16	5.60	5.05	4.62	1.05	1.05
Emergencia	1.44	1.44	1.49	10.20	9.65	9.22	1.35	1.35

	BS64	BS65	BS66	BS71	BS72a	BS72b	F01	F0201
	Calado [m]	Calado [m]	Calado [m]	Calado [m]	Calado [m]	Calado [m]	Calado [m]	Calado [m]
Prealerta								
Alerta	2.82	0.30	0.32	0.31	0.31	0.75	0.72	0.43
Emergencia	4.02	0.35	0.4	0.39	0.35	0.81	0.85	0.50

Por lo que concierne al DSS, la emergencia se activa exclusivamente en caso de datos reales, o sea, sólo si un limnómetro detecta volumen vertido o si los resultados de las analíticas periódicas del ACA (*Agencia Catalana del Aigua*) muestran valores por encima de los umbrales normativos (EU, 2006; BOE, 2006).

En resumen, el proceso de activación de alertas climáticas sigue un recorrido circular, como muestra la imagen a continuación:

**Figura 7** | Esquema activación/desactivación alertas climáticas.

HERRAMIENTAS PARA LA GESTIÓN DEL SISTEMA Y LAS COMUNICACIONES

Para poder gestionar de una forma cómoda y sencilla todo el volumen de información que se recibe a través de las diferentes fuentes de información (sensores y modelos), se ha desarrollado una plataforma web que permite al gestor interactuar desde cualquier dispositivo que disponga de una conexión a internet.

La plataforma se articula en varias pestañas: desde un resumen completo del estado (Figura 8), hasta la visualización de cada variable de cada sensor, pasando por el cuadro de activación, históricos de alertas y acciones realizadas.

En función del peligro climático activo, la plataforma proporcionará la información relevante como: elementos vulnerables afectados, listado de activadores, e información complementaria como los mapas de riesgo para peatones y vehículos.

Para cada nivel de peligro activo, el usuario gestor podrá ir marcando todas aquellas acciones procedentes de la digitalización de los protocolos de emergencias locales que se vayan realizando para gestionar de forma correcta la emergencia.

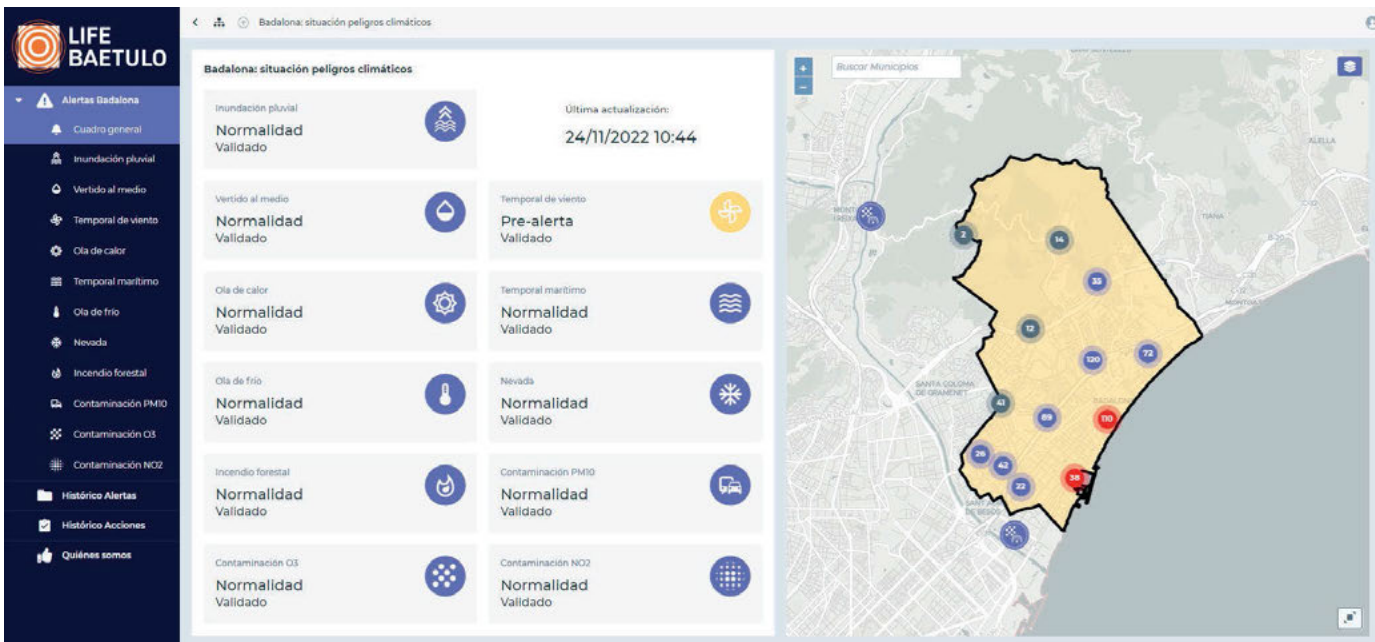


Figura 8 | Imagen de la ventana de resumen general del estado del sistema de Alerta LIFE BAETULO.

Para cada amenaza activa en el mapa, se mostrarán aquellos elementos vulnerables relacionados con el peligro activo. De los 773 elementos vulnerables definidos en Badalona, existe una clasificación según su tipología: salud, educación, servicios sociales, puntos bajos, playas, comercio, deporte, vivienda, calles inundables y núcleos urbanos. Estos elementos suelen ser espacios y edificios que albergan a ciudadanos vulnerables, o infraestructuras especialmente expuestas al peligro considerado.

Para comunicar de forma eficaz y rápida los resultados del sistema de alerta con la ciudadanía, se ha llevado a cabo el desarrollo de una app para dispositivos móviles Android y Apple, que permite recibir notificaciones sobre los niveles de alerta activados por la plataforma LIFE BAETULO. Cabe destacar que no todos los niveles son notificados sino únicamente aquellos para los cuales la ciudadanía puede emprender alguna acción para evitar estar expuestos a tal evento. En este caso, la mayoría de alertas son notificadas a partir del nivel de alerta, a excepción de incendios forestales o contaminación atmosférica, que se notifican a partir del nivel de prealerta o DSS que se notifica únicamente en nivel de emergencia (cuando el vertido ya ha sido producido).

Además de la notificación del peligro activo, el ciudadano podrá, siempre a través de la App, informarse sobre aquellas acciones necesarias para protegerse (¿Qué hacer? y ¿Qué no hacer?). A la finalización del evento climático se recibirá otra notificación informando sobre la vuelta a la normalidad (Figura 9).

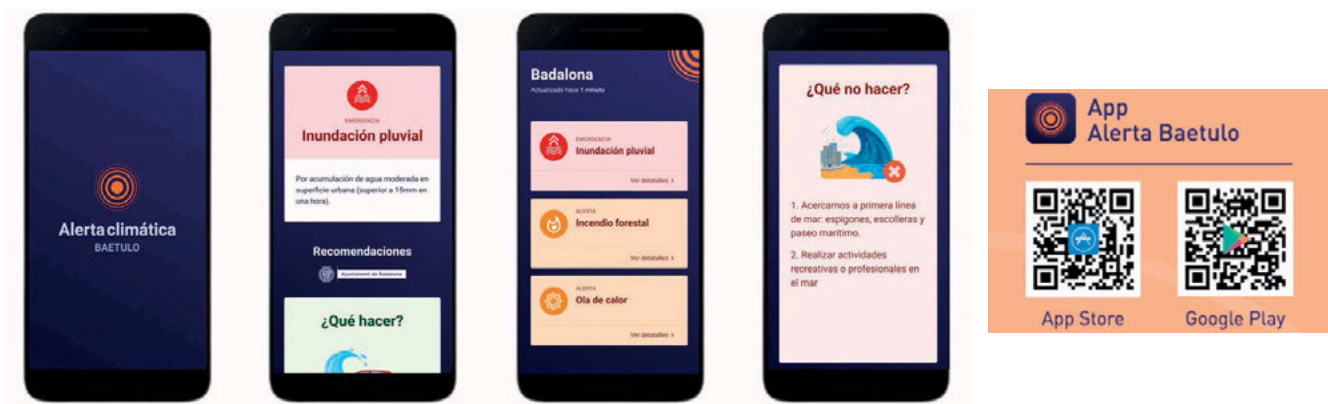


Figura 9 | Imágenes de la App de LIFE BAETULO y QRCode para descargarse la App oficial de notificación de Alertas LIFE BAETULO.

Ambas aplicaciones pueden descargarse de forma totalmente gratuita desde las tiendas oficiales Google Play Store y Apple Store, a través del código QR relativo de la imagen adjunta (Figura 9).

LISTADO DE ACCIONES A CUMPLIR

A modo informativo se muestran las listas de acciones procedentes de la digitalización de los protocolos de inundación y vertido al medio que se tienen que ejecutar antes, durante y después del evento climático considerado.

Las acciones se dividen entre:

- Acciones Preventivas: acciones a cumplir antes de que se desencadene el evento (nivel de prealerta)
- Acciones Reactivas: acciones a cumplir durante el evento (nivel de alerta)
- Acciones de Emergencia: acciones extraordinarias a cumplir en caso de que la magnitud del evento sea elevada (nivel de emergencia-fase 1)
- Acciones de Recuperación: acciones a cumplir después del evento (nivel de emergencia-fase 2)

En cada acción se identifica el responsable de la actuación, así como algunas sugerencias para facilitar el cumplimiento de las acciones. Algunas de estas son específicas para el municipio de Badalona (ejemplo Acción Preventiva 1) mientras que otras son más genéricas y podrían aplicarse en cualquier otro lugar (ejemplo Acción Preventiva 4).

Para el peligro de inundación se han definido 48 acciones a cumplir, mientras que para el de DSS son 29.

Tabla 4 | Ejemplo de acciones preventivas, reactivas, de emergencia y de recuperación para el peligro de inundación pluvial.

Acciones Preventivas	
1-	Seguir atentamente la información meteorológica y las notificaciones que emita el Centro de Coordinación Operativa de Cataluña (CECAT) [Coordinador Municipal de la emergencia]
2-	Determinar las actuaciones relacionadas con el control del tráfico que habría que hacer en caso de inundación [Responsable del seguimiento de las afectaciones en la vía pública]: -Comprobación y señalización de los puntos más conflictivos. -Cortes de caminos y carreteras y establecimiento de rutas alternativas.
Acciones Reactivas	
6-	Seguir atentamente la información meteorológica y las notificaciones que emita el Centro de Coordinación Operativa de Cataluña (CECAT) [Coordinador Municipal de la emergencia]
7-	Proponer posibles suspensiones de eventos públicos [Coordinador Municipal de la emergencia]
8-	Hacer el seguimiento especial de aquella población que pueda considerarse muy vulnerable (personas mayores, personas con necesidades médicas, etc.) En caso de que necesiten tratamientos diarios importantes (diálisis, quimioterapia...), tratar de asegurar que puedan ir al hospital donde los tratan [Responsable Servicios Sociales]
Acciones de Emergencia	
24-	Convocar el Comité de Emergencia municipal al CECOPAL [Coordinador Municipal de la emergencia]
25-	Estar en contacto con la población, sobre todo de la más vulnerable (personas mayores, personas que sufren algún tipo de enfermedad, etc.). En caso de que necesiten tratamientos diarios importantes (diálisis, quimioterapia, etc.), tratar de asegurar que puedan ir al Hospital donde los tratan [Responsable Servicios Sociales]
26-	Avisar a los hospitales o centros de atención primaria del municipio de posibles problemas de accesibilidad en sus centros [Coordinador Municipal de la emergencia]
43-	Informar a la población sobre los consejos de autoprotección y de los centros de acogida a través de los canales habituales de comunicación. Recordar el número 112 como teléfono de emergencias y el teléfono de emergencia de Badalona [Responsable de avisos a la población]
Acciones de Recuperación	
44-	Identificación y la evaluación de los daños y perjuicios producidos [Coordinador Municipal de la emergencia]
45-	Medidas a adoptar directamente por la administración que aprueba el plan, con una programación temporal de las actuaciones [Coordinador municipal de la emergencia]
46-	Propuesta de medidas que corresponde adoptar a otras administraciones [Coordinador Municipal de la emergencia]

Tabla 5 | Ejemplo de acciones preventivas, reactivas, de emergencia y de recuperación y para el peligro de DSS.

Acciones Preventivas	
1-	Seguir atentamente la información meteorológica y las notificaciones que emita el Centro de Coordinación Operativa de Cataluña (CECAT) [Coordinador Municipal de la emergencia]
2-	Comprobar que las salidas a mar de los puntos de DSS no estén obturadas de arena [Vía Pública y red de saneamiento]
3-	Limpiar el alcantarillado, los imbornales, los posibles pasos de agua, etc., a fin de que el agua se pueda drenar rápidamente. Hay que tener en cuenta especialmente aquellas zonas donde se hayan producido incendios forestales, episodios de fuertes temporales o inundaciones. También después de episodios de sequía prolongados que hayan provocado la caída masiva de las hojas de los árboles [Vía Pública y red de saneamiento]
Acciones Reactivas	
4-	Seguir atentamente la información meteorológica y las notificaciones que emita el Centro de Coordinación Operativa de Cataluña (CECAT) [Coordinador Municipal de la emergencia]
5-	Alertar a los servicios municipales para que, cuando comience el episodio de vertido, inicien lo más rápidamente posible las tareas que tienen asignadas [Responsable del grupo de orden]
6-	Comprobar, cortar y señalizar, los accesos a zonas contaminadas (playas, aguas de baño, zonas de vertidos localizadas, etc.) [Vía Pública]
Acciones de Emergencia	
9-	Convocar el Comité de Emergencia municipal al CECOPAL [Coordinador Municipal de la emergencia]
10-	Verificar la información sobre los valores de vertido en los diferentes puntos de DSS, en especial cuando ocurra un vertido en tiempo seco [Medio Natural]
11-	Indicar a Salvamento y Socorrismo la colocación de bandera roja en las playas, como mínimo durante 24 horas por DSS [Medio Natural]
Acciones de Recuperación	
23-	Identificación y la evaluación de los daños y perjuicios producidos [Coordinador Municipal de la emergencia]
24-	Limpieza del agua estancada a la salida del punto de vertido y de los residuos sólidos (toallitas, etc.) que se hayan depositado en los alrededores [Vía Pública y red de saneamiento]
25-	Limpieza con máquina de la arena [AMB]

RESULTADOS

Durante el periodo incluido entre Julio 2021 y Diciembre 2022, se han podido comprobar las efectivas capacidades de LIFE BAETULO sobre la activación de diferentes episodios climáticos. La segunda fase de testeo corresponde a la calibración de los diferentes umbrales de activación, debido a que es posible que algunos de ellos fueran demasiado o pocos estrictos.

Por lo que concierne los peligros climáticos tratados en esta publicación, se cuentan 71 eventos de inundación, de los cuales 20 resultaron efectivos, y 153 de DSS, de los cuales 45 resultaron efectivos. La inefectividad (no cumplimiento de los niveles de alerta previstos) se debe a principalmente a una imprecisión del modelo de predicción meteorológica, no por un mal funcionamiento del sistema de alerta. En cualquier caso, cabe destacar que este año y medio de testeo y validación de la herramienta BAETULO ha permitido, a parte de modificar o precisar algunos umbrales de alerta, incluir nuevas funcionalidades a la plataforma tales como: la activación manual de los niveles de alerta (para asegurar que en aquellos casos que el gestor del riesgo quiera modificar algún nivel lo pueda hacer e indicar el motivo) y la validación de los niveles de alerta antes de trasladarlos a la ciudadanía (para asegurar el correcto flujo de información con las personas en riesgo).

Destaca particularmente la importancia de un correcto mantenimiento preventivo y correctivo de todos los sensores, con el fin de disminuir el porcentaje de falsos positivos que, como se puede imaginar, pueden generar una pérdida de confianza por parte de los gestores y ciudadanos en estos sistemas de alerta. Un ejemplo concreto de falso positivo difícilmente detectable es la intrusión de agua marina especialmente durante eventos de temporales de viento que generan olas más altas. Mientras que otros falsos positivos como lecturas erróneas en fase de mantenimiento (limpieza sensor, cambio de batería, etc.) o fallo del sensor, pueden detectarse de una forma relativamente sencilla gracias a una correcta comunicación con el equipo de campo responsable del mantenimiento.

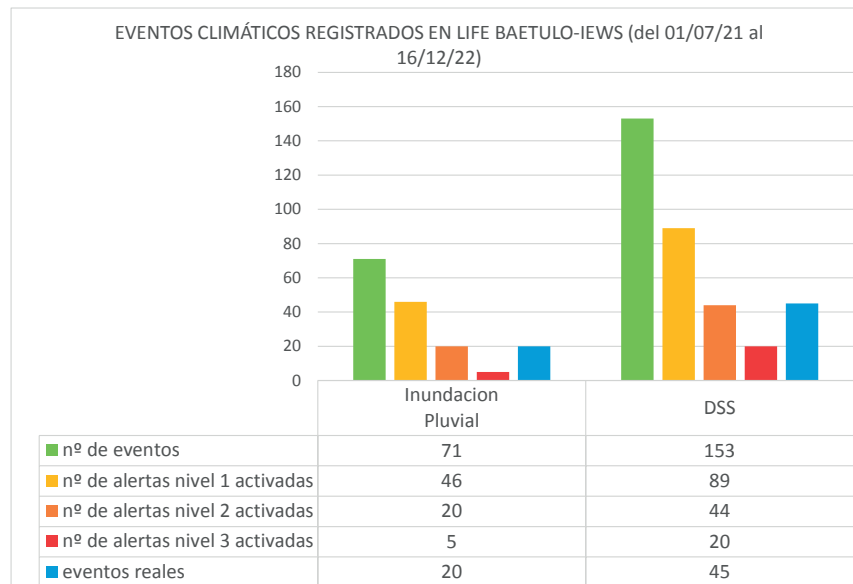


Figura 10 | Eventos climáticos registrados y alertas activadas desde Julio 2021 hasta Agosto 2022.

CONCLUSIONES

El sistema LIFE BAETULO representa una solución innovadora y pionera, potencialmente adaptable a cualquier entorno que quiera disponer de una medida tecnológica de adaptación al cambio climático, focalizada en la disminución de la exposición y de la vulnerabilidad de los habitantes, infraestructuras y elementos urbanos frente a los riesgos climáticos.

Concretamente, la solución LIFE BAETULO ha estado concebida como un sistema que pueda replicarse en cualquier lugar que disponga de instrumentación adecuada y sistema de predicción meteorológica relativamente fiable y que permita conectarse a estos sistemas de una forma directa, estable y continua. Aunque hablar de un número mínimo de sensor no sería correcto, en función del área cubierta por el sistema y la extensión y la complejidad de la red de drenaje es muy importante identificar cuantos sensores y cuáles serían las mejores ubicaciones con el fin de reproducir el correcto comportamiento de la red. Seguramente cada punto de alivio tiene que estar debidamente monitorizado, mientras que para el tema de identificación de las áreas sujetas a inundación y de los umbrales de activación de alarmas, se necesita un estudio exhaustivo con modelación 1D-2D de toda la red de drenaje involucrada.

A la hora de redactar este documento no se han podido cuantificar todos los beneficios en términos tangibles e intangibles obtenidos gracias al uso del sistema LIFE BAETULO, siendo que la implementación de dicho sistema lleva solamente unos meses. De todas maneras se prevé publicar una actualización de este documento a final de 2023 con resultados de mínimo 1 año de funcionamiento continuo, profundizando con una discusión sobre eficiencia de detección de alertas y ratio de falsos alarmas.

Para más información sobre el proyecto y sus resultados se puede consultar su página web: www.life-baetulo.eu.

AGRADECIMIENTOS

El Proyecto LIFE BAETULO se ha llevado a cabo gracias a la financiación del programa LIFE Climate Action LIFE19 CCA/ES/001180-LIFE BAETULO.

REFERENCIAS

- AB. 2022. MOEC: Manual de Operacion y Mantenimiento de la red de drenaje de Badalona.
- AEMET. 2019. Informe sobre el estado del clima de España 2019. <http://www.aemet.es>.
- AEMET. 2022. Índice Meteorológico de Riesgo de Incendio Forestal FWI (Fire Weather Index). https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/343_indice-meteorologico-de-riesgo-de-incendio-forestal-fwi-fire-weather-index.
- BINGO. 2017. BIngo: a better future under Climate Change. <http://www.projectbingo.eu>.
- BOE. 2006. Directiva 2006/7/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de febrero de 2006, relativa a la gestión de la calidad de las aguas de baño y por la que se deroga la Directiva 76/160/CEE. BOI.
- BOE. 2007. Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera. Jefatura del Estado, <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-19744&p=20171223&tn=1>.
- Caliopé. 2022. Caliopé Barcelona Supercomputing Air Quality Model, s.l. <http://www.bsc.es/caliopé/en?language=en>.
- CAMS. 2022. European Copernicus Air Quality Model website, s.l. <https://atmosphere.copernicus.eu>.
- CWCB. 2022. Colorado Water Conseravtion Board. <https://storymaps.arcgis.com/stories/7878c89c592e4a78b45f03b4b696ccac>.
- EC. 2020. Adaptation to climate change: Blueprint for a new, more ambitious EU strategy. https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/consultations/docs/0037/blueprint_en.pdf.
- ECMWF. 2022. European Centre for Medium Range Wather Forecast model, s.l. <https://www.ecmwf.int/en/forecasts>.
- EEA. 2021. Europe's changing climate hazards — an index-based interactive EEA report. <https://doi.org/10.2800/458052>.
- EU. 2006. Directive 2006/7/EC of the European Parliament and of the Council of 15 February 2006 concerning the management of bathing water quality and repealing Directive 76/160/EEC. EUR-Lex, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32006L0007>.
- GCA. 2019. Adapt now: a global call for leadership on climate resilience. <https://gca.org/reports/adapt-now-a-global-call-for-leadership-on-climate-resilience>.
- GenCat. 2022. Xarxa de Vigilància i Previsió de la Contaminació Atmosfèrica (XVPCA), s.l.: <https://airemetropolita.amb.cat>.
- Gómez, M.V. 2007. Curso de Hidrología Urbana. <https://www.flumen.upc.edu/en/documents/books/urban-hydrology-courses>, ISBN: 978-84-612-1514-0.
- Gómez, M., Parés, J., Russo, B., Martínez-Gomariz, E. 2019. Methodology to quantify clogging coefficients for grated inlets. Application to SANT MARTI catchment (Barcelona). *Journal of Flood Risk Management*, 12, e12479. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12479>.
- Guerrero-Hidalga, M., Martínez-Gomariz, E., Evans, B., Webber, J., Termes-Rifé, M., Russo, B., Locatelli, L. 2020. Methodology to Prioritize Climate Adaptation Measures in Urban Areas. Barcelona and Bristol Case Studies. *Sustainability*, 12(12), 4807. <https://doi.org/10.3390/su12124807>.
- Gutiérrez, E., Malgrat, P., Suñer, D., Otheguy, P. 2010. Real Time Management of Bathing Water Quality in Barcelona. s.l., Groupe de Recherche Rhône-Alpes sur les Infrastructures et l'Eau (GRAIE), Lyon, France, 1–10, 2010.
- IPCC. 2018. Annex I: Glossary. In *Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty* (pp. 541-562). Cambridge: Cambridge University Press., <https://doi.org/10.1017/9781009157940.008>.

- Locatelli, L., Russo, B., Acero-Oliete, A., Sánchez-Catalán, J.C., Martínez-Gomariz, E., Martínez, M. 2020. Modeling of *E. coli* distribution for hazard assessment of bathing waters affected by combined sewer overflows. *Natural Hazard and Earth System Science*, 20, 1219-1232, <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1219-2020>.
- Martínez-Gomariz, E., Gómez, V.M., Russo, B. 2016. Experimental study of the stability of pedestrians exposed to urban pluvial flooding. *Natural Hazards*, 82, 1259-1278. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2242-z>.
- Martínez-Gomariz, E., Russo, B., Sanchez, P.M., Montes, J.A., 2018. Methodology for the damage assessment of vehicles exposed to flooding in urban areas. *Journal of Flood Risk Management*, 12(3), e12475. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12475>.
- Martínez-Gomariz, E., Locatelli, L., Guerrero, M., Russo, B., Martínez, M. 2019a. Socio-Economic Potential Impacts Due to Urban Pluvial Floods in Badalona (Spain) in a Context of Climate Change.. *Water: MDPI*. 11(12), 2658., <https://doi.org/10.3390/w11122658>.
- Martínez-Gomariz, E., Gomez, M., Russo, B., 2019b. Estabilidad de vehículos frente a inundaciones: estudio numérico-experimental. *Ribagua*, 6(2), 123-137. <https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1685921>.
- Martínez-Gomariz, E., Forero-Ortiz, E., Russo, B., Locatelli, L., Guerrero-Hidalga, M., Yubero, D., Castan, S. 2021. A novel expert opinion-based approach to compute estimations of flood damage to property in dense urban environments. Barcelona case study.. *Journal of Hydrology*, 598, 126244. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126244>.
- Ministerio de Sanidad. 2013. Impactos del Cambio Climático en la Salud. <http://publicacionesoficiales.boe.es/>.
- MITECO, M. p. l. T.E. y. e. R.D. 2020. PNACC Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, s.l. ISBN: 978-84-18508-32-5.
- MOHID, 2022. Water Modelling System. <http://www.mohid.com/>.
- Ortiz, A., Ortiz, A., Velasco, M.J., Esbri, O., Medina, V., Russo, B. 2020. The economic impact of climate change on urban drainage master planning in Barcelona. *Sustainability*, 13(1), 71. <https://doi.org/10.3390/su13010071>.
- OSM. 2022. OpenStreetsMap. <https://www.openstreetmap.org/#map=6/40.007/-2.488>.
- PdE. 2022. Puertos del Estado website, s.l.: <https://www.puertos.es/en-us>.
- PDISBA. 2019. Pla Director Integral de Sanejament de la ciutat de Barcelona (PDISBA). <https://bcnroc.ajuntament.barcelona.cat/jspui/handle/11703/119275>.
- Russo, B., Gómez, V.M., Macchione, F. 2013. Pedestrian hazard criteria for flooded urban areas. *Natural Hazards*, 69, 251-265. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0702-2>.
- Russo, B., Gomariz, E.M., Locatelli, L., Martínez, M., Carretero, J.A.M. 2019. Evaluación del riesgo asociado a inundaciones y DSS para la ciudad de Badalona en un contexto de cambio climático: el proyecto Bingo. In *XXXV Jornadas Técnicas de AEAS* (pp. 428-438). Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento.
- SMC. 2022. Servei Meteorologic de Catalunya Weather model, s.l. <https://www.meteo.cat/wpweb/predicccio/>.
- SMC. 2022. Situació Meteorologica de Perill. <https://www.meteo.cat/wpweb/divulgacio/la-predicccio-meteorologica/situacio-meteorologica-de-perill>.
- SMP. 2022. Situació Meteorologica de Perill of SMC, s.l. <https://www.meteo.cat/wpweb/divulgacio/la-predicccio-meteorologica/situacio-meteorologica-de-perill/>.
- Suñer, D., Malgrat, P., Gutiérrez, E., Clochard, B. 2007. COWAMA (Coastal Water Management) Integrated and Real Time Management System of Urban Water Cycle to Protect the Quality of Bathing Waters.
- UNDRR. 2020. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres. <https://www.undrr.org/es>.

USACE. 2009. Economic Guidance Memorandum, 09-04, Generic Depth-Damage Relationships for Vehicles, U.S. Army Corps of Engineers. <https://www.usace.army.mil/Missions/Civil-Works/Policy-And-Guidance>.

XRAD. 2022. Network of Radars v1.0 (XEMA) SMC. <https://www.meteo.cat/wpweb/divulgacio/equipaments-meteorologics/radar-meteorologic/xarxa-de-radars-xrad/>