

# COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

## GESTIÓN INTEGRADA DEL RIESGO DE INUNDACIÓN Y DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EMPLEANDO MODELIZACIÓN INTEGRADA METEOROLÓGICA, HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA

**Ernest Bladé i Castellet<sup>1</sup>**

**Marcos Sanz-Ramos<sup>2</sup>**

**Arnau Amengual<sup>3</sup>**

**Romualdo Romero<sup>4</sup>**

**Hélène Roux<sup>5</sup>**

**Jérémy Savatier<sup>6</sup>**

**Marie Cherriere<sup>7</sup>**

*RESUMEN: Las cuencas hidrológicas situadas en zonas de clima mediterráneo sufren, de manera recurrente, largos periodos de sequía y eventos extremos de precipitación, llegando incluso a producirse episodios de inundación durante épocas secas. Tanto la gestión de los recursos hídricos como del riesgo de inundación son dos de los*

---

<sup>1</sup> Institut Flumen. Universitat Politècnica de Catalunya. C/ Jordi Girona 1-3 08034 Barcelona, España. E-mail: marcos.sanz-ramos@upc.edu.

<sup>2</sup> Institut Flumen. Universitat Politècnica de Catalunya. C/ Jordi Girona 1-3 08034 Barcelona, España. E-mail: ernest.blade@upc.edu.

<sup>3</sup> Grup de Meteorologia (Dept. De Física, Universitat de les Illes Balears), Palma, Spain. E-mail: arnau.amengual@uib.es.

<sup>4</sup> Grup de Meteorologia (Dept. De Física, Universitat de les Illes Balears), Palma, Spain. E-mail: ro-mu.romero@uib.es.

<sup>5</sup> Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, IMFT, Université de Toulouse, CNRS - Toulouse, France. E-mail: helene.roux@imft.fr.

<sup>6</sup> ISL Ingénierie, Francia. E-mail: savatier@isl.fr.

<sup>7</sup> ISL Ingénierie, Francia. E-mail: savatier@isl.fr.

*grandes retos actuales. El objetivo del proyecto PGRI-EPM ha sido la optimización de las metodologías que actualmente se utilizan en las diferentes zonas de la Euroregión Pirineos-Mediterráneo para conservar al máximo los recursos hídricos en episodios extremos a la vez que se minimiza el riesgo de inundación, mediante una evaluación conjunta global. La metodología propuesta utiliza la predicción meteorológica local como punto de partida de la predicción hidrológica, que a su vez alimentará las herramientas de modelización hidráulica. Esta metodología ha sido calibrada y validada en dos cuencas piloto (Agly, Midi-Pyrénées; La Muga, Catalunya) mediante eventos históricos de inundación. La reconstrucción de los eventos permitió analizar y proponer gestiones alternativas a las realizadas con el fin de minimizar el riesgo de inundación y maximizar los recursos hídricos.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La Euroregión Pirineos-Mediterránea (EPM), por su situación geográfica, se encuentra expuesta a una fuerte irregularidad hídrica, característica del clima mediterráneo que la rodea. La creciente presión urbanística sobre el territorio y, como consecuencia, sobre los recursos hídricos, hace que sea especialmente vulnerable a largos periodos de escasez (sequías) y a cortos periodos de abundancia (inundaciones).

Estos dos fenómenos (inundación y sequía) tienen consecuencias negativas socialmente (pérdida de vidas humanas, carencia de disponibilidad de agua, etc.), económicamente (daños materiales, pérdidas en la agricultura y ganadería, etc.) y medio ambientalmente (impacto sobre hábitats, episodios de contaminación, etc.). Una situación extrema, que no poco frecuente, sería que se produjesen ambas situaciones de manera simultánea. En este sentido, son especialmente vulnerables las zonas costeras, donde la demanda de recursos hídricos es más elevada en épocas de estiaje y para la cual se producen también las precipitaciones más intensas.

Con el fin de paliar o, al menos mitigar, este tipo de situaciones, se hace necesario definir nuevas estrategias de gestión de los recursos hídricos para minimizar los riesgos asociados a la escasez de agua y los posibles daños que puedan causar las inundaciones.

En este sentido, la simulación numérica es una herramienta útil para evaluar escenarios futuros y poder así definir estrategias de gestión acordes con la prognosis. La simulación meteorológica (NWP, en sus siglas en inglés) de alta resolución permite obtener, de manera realista, predicciones de precipitación de carácter cuantitativo (QPF, en sus siglas en inglés). Sus resultados (precipitación) sirven para alimentar modelos hidrológicos, cuyo fin es realizar el proceso de transformación lluvia-escorrentía para obtener el hidrograma asociado a esa lluvia. Este hidrograma se emplea en modelos de simulación hidráulica para obtener la peligrosidad del evento (extensión de la inundación, niveles de agua, velocidad del flujo, etc.). Todo ello debe servir para evaluar los recursos hídricos disponibles (lluvia-escorrentía) y el riesgo asociado a la inundación (peligrosidad).

Bajo el amparo del proyecto europeo PGRI-EPM denominado “*Flood Risk Assessment and Management in the Pyrenees – Mediterranean Euroregion*”, se desarrolló una nueva metodología para la gestión de los recursos hídricos y el riesgo de inundación. Esta se puso a punto en la cuenca alta de La Muga (vertiente sureste de los Pirineos) y en la cuenca del Agly (vertiente noreste de los Pirineos) mediante la evaluación de diferentes eventos de precipitación. Para ello se analizaron y propusieron gestiones alternativas de los embalses de Boadella y del Agly. Los resulta-

dos obtenidos han sido prometedores, logrando en ambas cuencas el objetivo del trabajo: maximizar los recursos hídricos y minimizar el riesgo de inundación.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología propuesta utiliza la predicción meteorológica regional como punto de partida de la predicción hidrológica, que a su vez alimenta las herramientas de modelización hidráulica y esta en último término sirve para realizar el análisis del riesgo asociado a la inundación. Todo el proceso se basa en la integración de varias herramientas y métodos ya existentes diseñados y adaptados a las singularidades de la zona mediterránea.

La secuencia de modelizaciones meteorológica, hidrológica, hidráulica y de riesgo proporciona el impacto de un escenario en cuanto al riesgo de inundación generado y a la variación de los recursos hídricos. El impacto depende de las características del escenario (magnitud del episodio de lluvia), de la situación inicial (recursos hídricos almacenados en el embalse) y, en gran medida, de la operación y gestión que se haga del sistema (presa) antes y durante el episodio. El flujo de trabajo se muestra en la Figura 1.

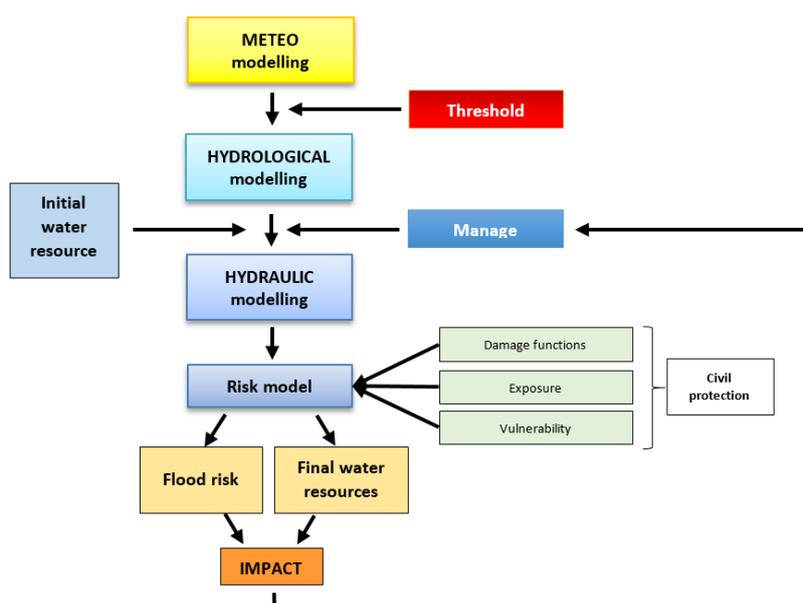


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología.

El objetivo ha sido la minimización del impacto entendido como la suma ponderada del riesgo de inundación y la disminución de recursos hídricos en todo el episodio.

### 2.1. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA

#### 2.1.1. Modelización meteorológica

Los modelos numéricos de predicción del clima (NWP, en sus siglas en inglés) de alta resolución permiten obtener, de manera realista, predicciones de precipitación de carácter cuantitativo (QPF, en sus siglas en inglés). Estos modelos son capaces de reproducir adecuadamente eventos de precipitación convectiva, muy dependientes de la orografía local [1,2].

Las predicciones meteorológicas se desarrollaron mediante el modelo Weather and Research Forecasting (WRF). Los resultados de este modelo (mapas de precipitación distribuida) se emplearon directamente en las cuencas de estudio, a pesar de su reducido tamaño, sin necesidad de implementar ningún procedimiento de regionalización adicional [3–5].

### **2.1.2. Modelización hidrológica**

La modelización hidrológica se llevó a cabo mediante dos estrategias diferentes. Por un lado, en la cuenca del Agly, se empleó el modelo hidrológico MARINE [6], que ofrece como resultado el hidrograma producido por la cuenca en cualquier punto de la zona de estudio. Por otro lado, se utilizó el modelo hidrológico-hidráulico Iber [7] en la cuenca de La Muga, siendo capaz de reproducir al mismo tiempo el proceso de transformación lluvia-escorrentía (hidrograma) y la propagación de la avenida a través de la zona de estudio (inundación).

### **2.1.3. Modelización hidráulica**

El cálculo de la zona inundable y los parámetros de peligrosidad (niveles de agua y velocidad del flujo) se llevó a cabo en ambas cuencas mediante el modelo Iber [7]. Este ha sido mejorado incorporando procesos de precipitación y pérdidas globales (infiltración, retención, etc.), así como un algoritmo de cálculo más eficiente para estudios hidrológico que reduce los tiempos de cálculo a la mitad [8].

### **2.1.4. Modelo de riesgo**

Para la evaluación del riesgo por inundación se utilizó la normativa vigente en cada cuenca de estudio. En La Muga se empleó la “*Metodología de realización de los mapas de riesgo de inundación*” del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de España (julio de 2013). Mientras que en la cuenca del Agly se utilizó el análisis multicriterio AMC desarrollado por el Ministère de l’Ecologie, du Développement Durable et de l’Ecologie a través del “*Analyse multicritères des projets de prévention des inondations - juillet 2014*”.

Ambas metodologías se emplearon para comparar el nivel de riesgo para la gestión actual y para la gestión alternativa propuesta.

## **2.2. IMPACTO. RECURSOS HÍDRICOS – RIESGO DE INUNDACIÓN**

El impacto de la gestión alternativa propuesta se evaluó en términos económicos. Para los recursos hídricos se tomó como referencia el Valor Añadido Bruto (VAB) descrito por el “*Pla de gestió del districte de conca fluvial de Catalunya*”, y que estima el valor del agua en 0,93 €/m<sup>3</sup>. Por otro lado, el impacto sobre el riesgo de inundación se midió según los documentos descritos anteriormente para cada una de las cuencas, también en términos económicos.

## **3. ZONAS DE ESTUDIO**

Las dos zonas de estudio se encuentran en la región más oriental de la cordillera de los Pirineos: el Agly al norte y La Muga al sur (Figura 2). Ambas cuencas tienen unas características hidrográficas similares (diversos afluentes de importancia) y se encuentran reguladas por una presa (la del Agly y la de Boadella). La cuenca fran-

cesa se encuentra más influenciada por el clima oceánico que la española, pero ambas presentan similitudes en cuanto a la hidrología (alta variabilidad estacional de las precipitaciones) y en las zonas vulnerables por inundaciones (grandes poblaciones y alta variabilidad poblacional por el turismo).

Los tramos de estudio para el riesgo de inundación comprenden una longitud de 10 y 25 km en La Muga y en el Agly, respectivamente. En ellos se ubican diversas localidades, áreas industriales y zonas de interés natural que son vulnerables en caso de inundación.

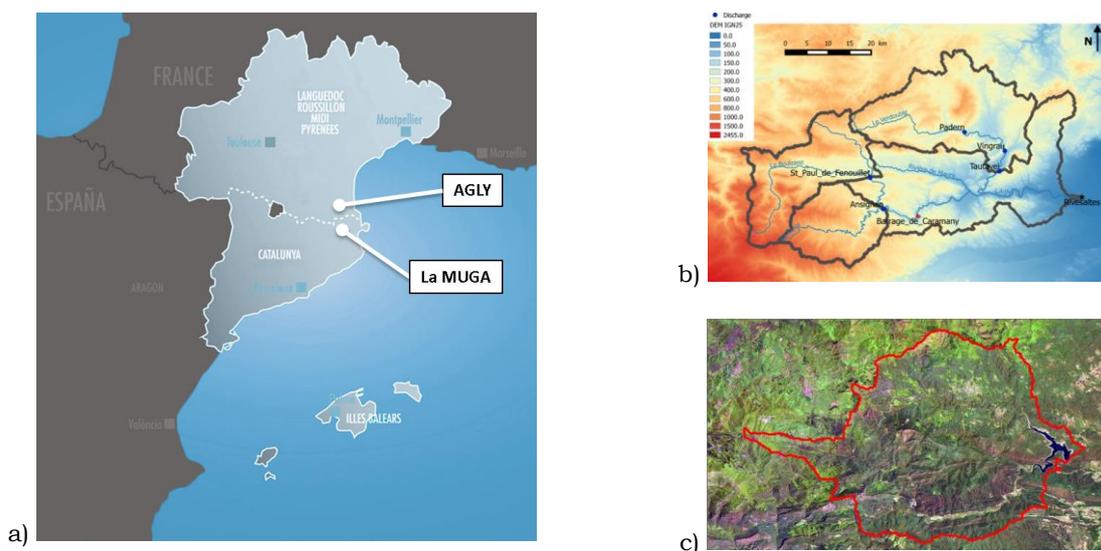


Figura 2. Zonas de estudio en la EPM. Ubicación de las cuencas de La Muga y del Agly (a) y límites de la cuenca alta del Agly (b) y de La Muga (c).

### 3.1. EVENTOS DE PRECIPITACIÓN

La metodología se evaluó en 5 eventos de precipitación diferentes, y cuyas características (cantidad de lluvia y suceso de inundación) motivaron su elección. Para ello se emplearon datos de pluviómetro (precipitación uniforme) y de radar meteorológico proporcionados por el Servei Meteorològic de Catalunya, en La Muga y Meteo France, en el Agly (precipitación distribuida), así como datos de prognosis de lluvia determinados mediante modelo numérico (precipitación distribuida).

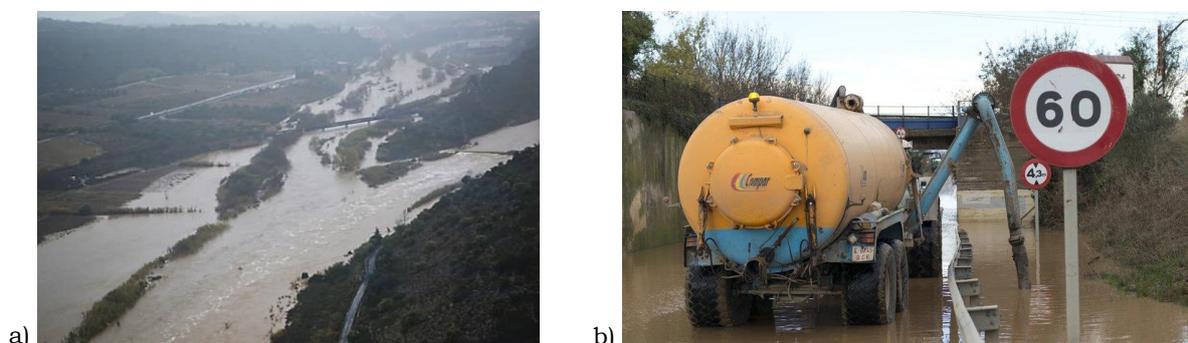


Figura 3. Inundaciones producidas en las cuencas de estudio. a) Vista de la inundación de marzo de 2013 en intersección entre el Agly y el Verdoube aguas abajo de la localidad de Estagel (fuente: SMB-VA). b) Un camión drenando agua en la localidad de Pont de Molins durante la inundación de noviembre de 2014 (fuente: G. Sánchez, Iconna).

Los episodios escogidos (marzo, 2011; marzo, 2013; noviembre, 2013; noviembre, 2014 y marzo, 2015) ponen de relieve la climatología de las cuencas de estudio y los diferentes escenarios hídricos (épocas de abundancia o escaseces de recursos hídricos), así como diferentes épocas del año.

### 3.2. REGLAS DE GESTIÓN

La gestión en las dos cuencas de estudio se realiza mediante presas, cuyas reglas de operación se basan en el cierre/apertura de compuertas (Figura 4). Para el Agly, la gestión es función de la época del año, siendo el embalse un mero elemento para el tránsito en caso de avenida cuando está a su máxima capacidad. Por el contrario, el objetivo de la gestión operacional del embalse de Boadella (La Muga) es maximizar los recursos hídricos y evitar daños mayores por el solape de las avenidas de los principales tributarios aguas abajo de la presa.

En el caso del Agly no fue posible realizar una gestión real debido a que se desconocía el volumen de agua al inicio de cada evento. En este caso se optó por realizar una gestión hipotética considerando que el embalse tuvo capacidad suficiente para almacenar la totalidad del volumen de la avenida.



Figura 4. Órganos de gestión de las presas del Agly (a) y de Boadella (b).

## 4. EVALUACIÓN DEL RIESGO Y GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN

La metodología propuesta se basa en la evaluación de los resultados de la modelización meteorológica, hidrológica e hidráulica. A los resultados de la última (hidráulica) está asociado el nivel de riesgo, que debe permitir evaluar el riesgo de la posible inundación.

La gestión de un embalse puede llegar a ser altamente compleja, puesto que si no puede depender únicamente de los caudales de entrada y salida principales, también de captaciones por abastecimiento, requerimientos de generación de energía hidroeléctrica, etc.. Por lo tanto, se ha definido una metodología simplificada que contemple las reglas generales en casos extremos de precipitación mediante dos estrategias posibles: “no” gestión y gestión (Figura 5).

### 4.1. EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

La evolución de la cantidad de agua almacenada en el embalse durante el evento se determinó mediante el proceso de modelización hidrológica. Para ello se tuvo en

cuenta el estado inicial del embalse y la gestión que se hizo del mismo durante el evento, así como la gestión alternativa propuesta. Asimismo, se determinó el hidrograma vertido desde cada presa como resultado de la estrategia alternativa de gestión.

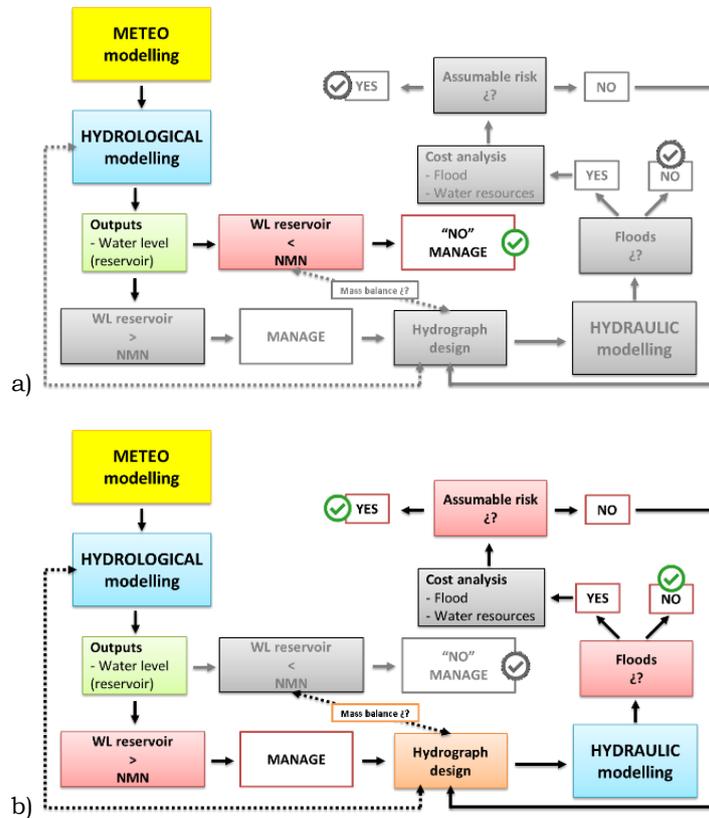


Figura 5. Diagrama de flujo utilizado para la gestión de la presa. Caso de "no" gestión (a) y caso de gestión (b). WL: nivel de agua ("water level"); NMN: máximo nivel de agua gestionable en el embalse.

Para la cuenca francesa, se realizó una gestión hipotética asumiendo que el embalse tuvo capacidad suficiente para almacenar todo el volumen de la avenida. Bajo este supuesto, tan solo fue posible valorar el beneficio potencial máximo. Sin embargo, para los eventos analizados, el volumen de la avenida entrante en el embalse fue muy superior a la capacidad del embalse, por lo que no resulta adecuado valorar los beneficios económicos deducidos por la ganancia de recursos hídricos, pero sí se puede tener una estimación en cuanto al riesgo de inundación.

En La Muga, el embalse de Boadella tiene una capacidad de regulación mínima de 15,3 hm<sup>3</sup> (volumen comprendido entre la cota más baja y más alta de las compuertas). Para los eventos analizados, tan solo dos de ellos requirieron optimización: marzo de 2011 y marzo de 2013. Únicamente en el primero la gestión llevada a cabo repercutió negativamente aumentando el riesgo de inundación. Así pues, como resultado de aplicar la gestión alternativa propuesta, en estos dos eventos los recursos hídricos hubiesen aumentado 0,9 y 2 hm<sup>3</sup> respectivamente.

## 4.2. GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN

Para evaluar los beneficios de la gestión alternativa, se analizaron y compararon para ambas situaciones parámetros como la población potencialmente afectada, personas en riesgo, daños causados a bienes e inmuebles, etc..

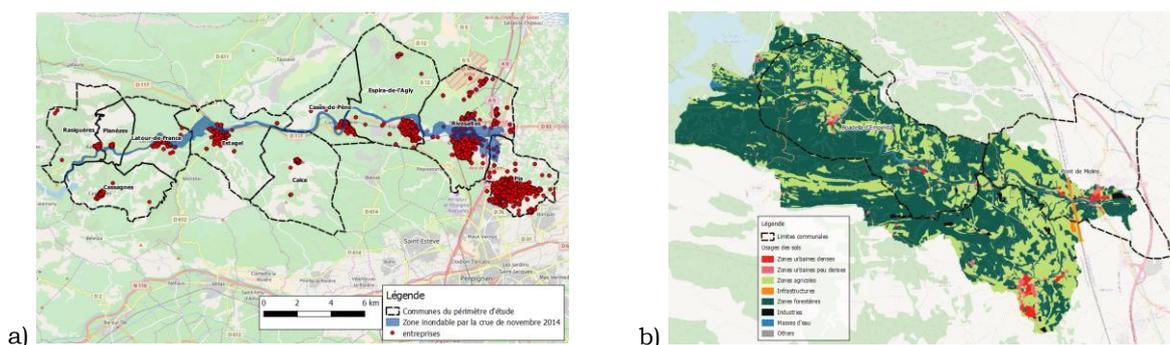


Figura 6. Elementos para la evaluación del riesgo de inundación. Ubicación de las empresas e inundación de 2014 en el Agly (a) y mapa de usos del suelo en La Muga (b).

De ambos escenarios se obtuvo directamente el impacto económico, cuya diferencia sería el beneficio de la gestión alternativa.

## 5. IMPACTO

El impacto global, valorado en términos monetarios, se obtuvo como la suma de los beneficios por ganancia de recursos hídricos y por reducción del riesgo.

En el caso del Agly, el impacto global se evaluó únicamente teniendo en cuenta los beneficios por la disminución del riesgo de inundación. La disminución de los daños estaría entre el 20 y el 87 %, siendo el escenario de noviembre de 2013 el que mayor beneficio potencial tendría (87 %) contra el de noviembre de 2014, con tan sólo un 20 %. El sector más beneficiado de esta estrategia de gestión sería la industria, alcanzando una reducción potencial de daños de hasta el 100 %.

En La Muga se estimó una reducción potencial en el número de heridos entre el 62 y el 81 %, siendo entre el 42 y el 58 % la reducción en víctimas mortales. Los daños materiales se redujeron con la estrategia alternativa entre 15 y 28 %, siendo el sector agrícola y las viviendas las más beneficiadas. El impacto global fue de aproximadamente 3,3 M€ y 2,9 M€ para los eventos de marzo de 2011 y marzo de 2013, respectivamente.

## 6. CONCLUSIONES

La implementación integrada de sistemas en tiempo real de predicción hidrometeorológica basados en el acoplamiento de modelos meteorológicos, hidrológicos, hidráulicos y de riesgo ha sido fundamental para conseguir los objetivos del proyecto PGRI-EPM. Las herramientas utilizadas han demostrado ser complementarias. Se ha trabajado por su integración y la utilización conjunta en el nuevo sistema de evaluación/predicción desarrollado.

Se ha desarrollado, calibrado y validado una nueva metodología para el diseño de estrategias para la gestión de los recursos hídricos, minimizando los riesgos asociados a las inundaciones torrenciales propias del clima mediterráneo, a la vez que se preservan al máximo los recursos hídricos, muy escasos en esta zona.

La metodología propuesta permite el diseño de estrategias de gestión con horizontes temporales de entre uno y cinco días.

La flexibilidad del método desarrollado permite la aplicación en otras zonas, puesto que tan sólo sería necesario modificar los criterios de análisis de daños y

recursos, o por diferentes estrategias de gestión de las presas. De este modo se garantiza el exportabilidad en otras áreas.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Euroregión Pirineos – Mediterráneo la co-financiación del presente proyecto en el marco de ayudas de 2014 “*Gestión del agua – Gestión del riesgo (inundaciones, sequías, sumersión...)*”.

## 6. REFERENCIAS

- [1] E. Fiori, A. Comellas, L. Molini, N. Rebora, F. Siccardi, D.J. Gochis, S. Tanelli, A. Parodi, Analysis and hindcast simulations of an extreme rainfall event in the Mediterranean area: The Genoa 2011 case, *Atmos. Res.* 138 (2014) 13–29. doi:10.1016/j.atmosres.2013.10.007.
- [2] G. Leoncini, R.S. Plant, S.L. Gray, P.A. Clark, Ensemble forecasts of a flood-producing storm: Comparison of the influence of model-state perturbations and parameter modifications, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 139 (2013) 198–211. doi:10.1002/qj.1951.
- [3] N. Addor, S. Jaun, F. Fundel, M. Zappa, An operational hydrological ensemble prediction system for the city of Zurich (Switzerland): Skill, case studies and scenarios, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15 (2011) 2327–2347. doi:10.5194/hess-15-2327-2011.
- [4] A. Amengual, R. Romero, S. Alonso, Hydrometeorological ensemble simulations of flood events over a small basin of Majorca Island, Spain, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 134 (2008) 1221–1242. doi:10.1002/qj.291.
- [5] B. Vincendon, V. Ducrocq, O. Nuissier, B. Vié, Perturbation of convection-permitting NWP forecasts for flash-flood ensemble forecasting, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11 (2011) 1529–1544. doi:10.5194/nhess-11-1529-2011.
- [6] H. Roux, D. Labat, P.-A. Garambois, M.-M. Maubourguet, J. Chorda, D. Dartus, A physically-based parsimonious hydrological model for flash floods in Mediterranean catchments, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11 (2011) 2567–2582. doi:10.5194/nhess-11-2567-2011.
- [7] M. Sanz-Ramos, E. Blade, A. Palau Ibars, Iber: herramienta de simulación numérica para la evaluación de la habitabilidad para peces (HPU), in: *Limnol. 2016 XVII Congr. Iber. Assoc. Limnol. B. Abstr.*, Tortosa, 2016: p. 125.
- [8] L. Cea, E. Bladé, A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications, *Water Resour. Res.* 51 (2015) 5464–5486. doi:10.1002/2014WR016259.