

La peligrosidad de avenidas torrenciales e inundaciones en PRIGEO

M. Llorente Isidro, A. Díez Herrero, L. Laín Huerta y J. A. Ballesteros Cánovas

1. Introducción

PRIGEO es el acrónimo que recibe el Plan de Cartografía de Riesgos Geológicos que diseñó y aprobó el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en 2005. Entre sus objetivos destaca la creación de una infraestructura de conocimiento en materia de peligrosidad geológica para el territorio español y que pueda servir como instrumento para la gestión y ordenamiento territorial, así como constituir una herramienta útil para la concienciación social hacia un modelo de mayor resiliencia por una convivencia sensible hacia la dinámica natural que nos rodea. Entre los procesos geológicos potencialmente peligrosos que contempla estudiar el Plan están los siguientes:

- avenidas e inundaciones,
- movimientos del terreno y aludes,
- terremotos y tsunamis,
- volcanismo, y
- procesos ligados a la dinámica litoral.

España presenta una de las orografías más accidentadas de entre los distintos países que conforman la Unión Europea y seguramente sea el estado miembro cuyas pendientes promedio sean las más elevadas. Partiendo de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de 1x1 km de celda, se deduce que aproximadamente el 73,5% del territorio español presenta pendientes superiores al 1,5% y más de una cuarta parte del área total de España presenta pendientes superiores al 6% (Figura 1). Si a este hecho se le añade el marcado clima mediterráneo de la Península, el resultado no puede ser otro que un predominio de cauces de elevada pendiente y corrientes efímeras, lo que en términos generales se conoce como torrentes o ramblas.

Según las estimaciones realizadas por el IGME (Ferrer *et al.*, 2004), las pérdidas económicas promedio derivadas directamente de las riadas, podrían ser del orden de los 2 millones de euros cada día (y creciendo), estando la mayor parte de los daños ligados a las crecidas en las grandes corrientes fluviales de la Península. Sin embargo, la mayor parte de las víctimas mortales de nuestro país se concentran en regiones relacionadas con la dinámica torrencial y con episodios de avenidas relámpago, caracterizados por el escaso tiempo que discurre entre el comienzo de la precipitación (generalmente procedente de un núcleo convectivo) y la gran cantidad de material sólido que arrastra la corriente.

En los torrentes y ramblas, es frecuente que el volumen de material sólido que es transportado durante un episodio de avenida, supere al volumen de agua que circula por el cauce. En algunos trabajos (Bodoque *et al.*, 2006), se hace una síntesis de los distintos procesos de movimientos de material en sentido amplio y en suave transición desde avenidas de agua limpia (como la derivada de la liberación de agua por los desagües de superficie de un embalse) hasta los movimientos de ladera 'en seco' (como las caídas de bloques, Figura 2). La coalescencia de procesos de movimientos de ladera y fuertes precipitaciones, puede llegar a dar lugar a corrientes de derrubios con más

Llorente Isidro, M. *et al.*, 2008. La peligrosidad de avenidas torrenciales e inundaciones en PRIGEO. En: Galindo Jiménez, I., Laín Huerta, L. y Llorente Isidro, M. (Eds.). *El estudio y la gestión de los riesgos geológicos*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Medio Ambiente. Riesgos Geológicos N.º 12. 13-20. Madrid

de un 90 % de volumen de caudal sólido circulando por torrenteras (Bodoque et al., 2006). Este tipo de fenómenos da lugar a cicatrices características en el paisaje debido a su gran capacidad erosiva y produce grandes formas en el terreno como consecuencia de la deposición de los materiales (abanicos aluviales, barras, diques). Ambas circunstancias propician una variabilidad significativa en el trazado de los cauces (por avulsiones y capturas fluviales), lo que eventualmente se refleja en la cartografía de base con trazados difusos, discontinuos y entrelazados, y cuya actividad se sucede y alterna en el tiempo y el espacio.

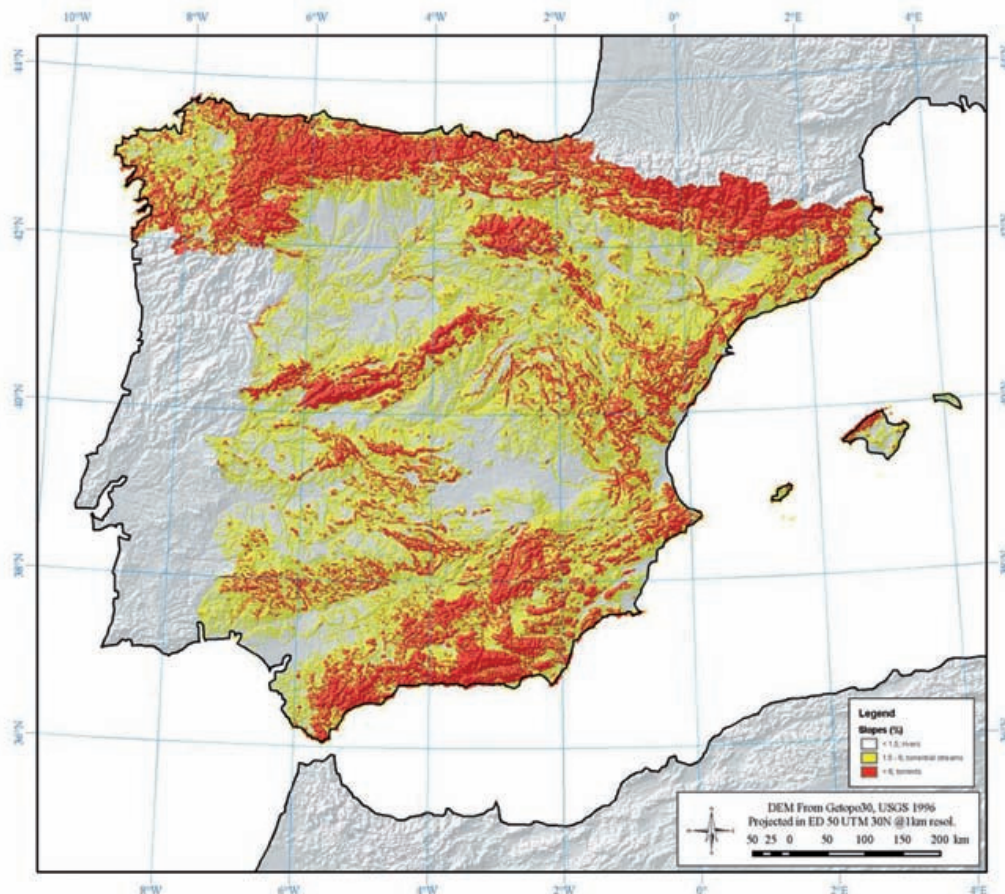


Fig 1. Mapa de pendientes de la España peninsular y Baleares reclasificado: zonas rojas representan pendientes >6%, amarillas entre 1,5 y 6% y sin color las zonas de pendientes menores del 1,5% (Llorente et al., 2007).

2. Métodos de estudio de las avenidas e inundaciones

En el estudio de las avenidas e inundaciones hay cuatro grandes líneas de trabajo o métodos de estudio (Díez, 2002), que con frecuencia se reducen a tres o incluso a dos debido a la proximidad o complementariedad necesaria de unos y otros. Tan sólo en algunos estudios modélicos se emplean a fondo con todas ellas. Estas cuatro líneas son:

- los estudios hidrológicos,
- los estudios hidráulicos,
- los estudios históricos, y
- los estudios geológicos.

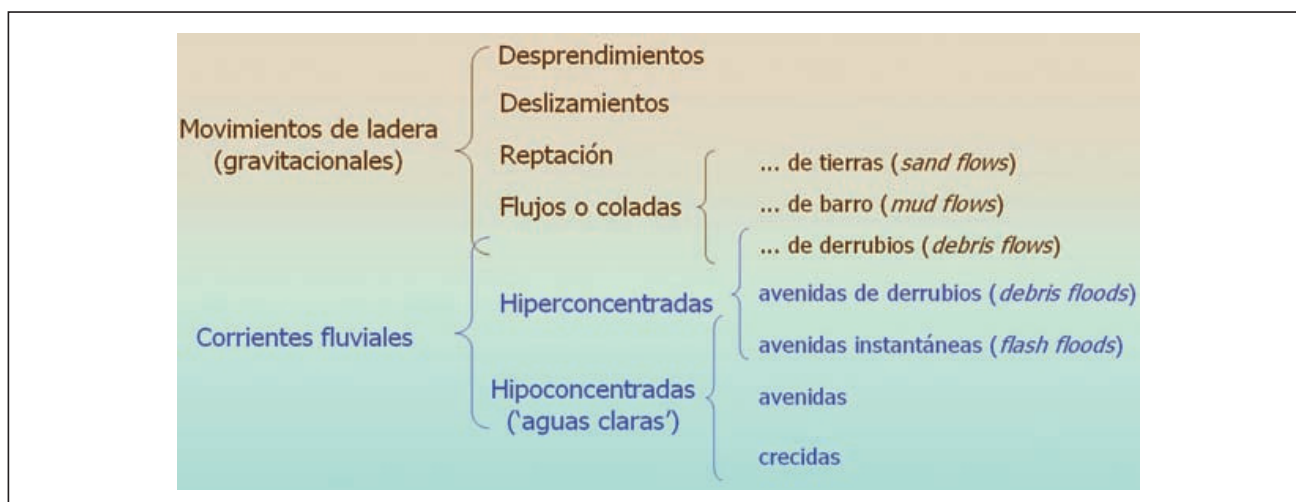


Fig. 2. Relación entre los procesos fluviales y los movimientos de ladera. El color de fondo indica la relación de predominio entre carga sólida (marrón) y agua (azul). Bodoque et al., 2006.

Habitualmente, la Hidrología, que persigue la simulación del proceso precipitación-escorrentía o la estimación de caudales en un punto mediante análisis estadístico, es el complemento de la Hidráulica, que persigue la transformación de los caudales de crecida o avenida en alturas de lámina de agua, velocidades de flujo y calados. Junto con los estudios históricos a veces se incluyen los estudios geológicos debido a la búsqueda de registros sedimentarios que refuercen las observaciones recogidas en las crónicas y las amplíen en el tiempo. Tanto los estudios hidrológicos como los históricos contemplan con frecuencia la incorporación de técnicas estadísticas de análisis. No obstante, estas cuatro líneas o métodos de estudio son claramente distinguibles por las distintas formas de abordar el problema planteado y los distintos objetivos en que se centra cada una de ellas.

2.1. La problemática de los estudios hidrológicos

En la comunidad científica no cabe duda de que las observaciones directas forman un pilar esencial del empirismo. Los estudios estadísticos en el fenómeno de las avenidas e inundaciones, persiguen la caracterización mediante funciones de distribución de uno de los principales parámetros que intervienen en el fenómeno: los caudales de avenida. Su principal problema reside en que las series son muy costosas de obtener, son frecuentemente muy cortas y con demasiada frecuencia carecen de eventos extremos, ya que durante la ocurrencia de éstos no es infrecuente que la estación de aforo se vea gravemente dañada o superada y se pierda el dato del caudal máximo instantáneo. Eso por no mentar que generalmente las estaciones de aforo se diseñaron con el objeto de servir para analizar los recursos hídricos (aportaciones de caudales) y por tanto están enfocadas hacia eventos cotidianos más que hacia eventos de gran magnitud o intensidad (baja probabilidad de ocurrencia); que su ubicación no suele ser la más apropiada para eventos extremos, y que además de ser escasas, no están repartidas de un modo uniforme.

De manera tradicional, las avenidas e inundaciones han sido consideradas procesos más próximos al ámbito de estudio de la física atmosférica que de la geología superficial, lo que en muchos casos se ajusta bien a la problemática de los recursos naturales en relación con la climatología. La hidrología y la hidráulica han sido las disciplinas predominantes a la hora de cuantificar aportes de caudales y, aplicadas con el rigor que corresponde, dan respuestas fiables y precisas a la hora de conocer el comportamiento cotidiano de una corriente y por tanto, pueden responder adecuadamente a la disponibilidad de agua superficial. Sin embargo, en el estudio de eventos extremos, esto es, para

eventos con períodos de retorno superiores a cincuenta años, la hidrología parte de principios que son difíciles de sostener, tal como el estudio del registro sistemático de series pluviométricas y su análisis estadístico. Los motivos son varios, desde la escasa representatividad de los puntos de observación y la más que cuestionable interpolación entre ellos (tanto por existencia de límites naturales que producen discontinuidades en los frentes de lluvia como por la variación de la precipitación con la altura), hasta la dudosa validez de los métodos estadísticos dada la ausencia o alta improbabilidad de disponer de suficientes registros como para tener observaciones de eventos extremos. Esto por no mencionar la gran cantidad de contingencias que pueden coalescer para dar lugar a un evento de inundación fuera de lo cotidiano (retornos superiores a 10 años), tales como la variabilidad natural de los usos del suelo por efecto de incendios naturales o períodos que favorezcan notablemente el desarrollo de cobertera vegetal, o la disponibilidad de material sólido; factores que condicionan muy sensiblemente la transformación de la precipitación en escorrentía.

2.2. La problemática de los estudios hidráulicos

Por su parte, la hidráulica también parte de principios controvertidos. Para eventos frecuentes (10 años o menos), se suelen cumplir los principios básicos de lecho fijo y agua limpia (flujo unifásico); o en todo caso, el lecho se moviliza suficientemente poco y el agua circula lo bastante limpia como para que ambas circunstancias puedan desestimarse o incluirse como fuentes de pequeñas incertidumbres. Sin embargo, para eventos de períodos de retorno superiores a los 50 años, ninguna de estas premisas se cumple. La movilización del lecho introduce variaciones muy significativas en los parámetros hidráulicos, tales como el aumento del área mojada y el incremento de la fricción, que si bien son variables cuyos errores tienden a desviar las estimaciones en sentido opuesto (el aumento de la fricción aumentaría la altura de la lámina de agua por reducción de la velocidad y el aumento del área mojada incrementaría la capacidad de desagüe), los errores ya no son despreciables. Por otra parte, el arrastre de materiales sólidos alcanza valores relativos muy grandes como ya se ha mencionado, lo que puede traer como consecuencia que el fluido cambie sus propiedades notablemente, desde un aumento radical en su densidad (hasta valores superiores a 1,6 gr/cm³ para un volumen del 40% de carga sólida, como pudo ser la riada de Albuñol en 1974; Llorente *et al.*, 2005), hasta la pérdida de continuidad del flujo (tal y como describe Martín Vide en 2003 para las rieras de Arenas y Rubí). Hasta el momento, ninguna de las más de una decena de ecuaciones propuestas por distintos sectores de la ingeniería fluvial (Bravo-Espinosa *et al.*, 2004) son capaces de dar una respuesta similar al problema que plantea el material sólido y, aunque ya han sido incorporadas muchas de ellas en distintas herramientas matemáticas de cálculo hidráulico (por ejemplo en la última versión de HEC-RAS, o Mike21C de DHI), sus resultados sólo se pueden considerar desde un punto de vista cualitativo, lo que por otra parte refuerza y corrobora la información y validez de los estudios geomorfológicos.

2.3. La problemática de los estudios históricos

Los análisis históricos también presentan dificultades notables a la hora de realizar juicios sobre el comportamiento de un determinado río o torrente, ya que en los anales de la historia suelen quedar reflejados tan sólo aquellos eventos que, por sus repercusiones en la sociedad, fueran dignos de mentar. Es decir, durante épocas en las que se incrementa la ocupación humana de la llanura de inundación, también aumenta el número de registros de inundación, lo que en ningún caso debe conducir a una lectura simplista de que la corriente haya cambiado su comportamiento o de que exista un período de cambio climático más o menos significativo (Llorente *et al.*, 2007b). No al menos sin contrastar esa información con la procedente de otras fuentes, principalmente las geológicas. Desde la década de 1950 hasta la actualidad, la cantidad de medios de difusión de información y la cantidad de observado-

res del planeta se ha incrementado de manera exponencial (Llorente *et al.*, 2007b), lo que ha dado lugar a un crecimiento igualmente exponencial de la cantidad de fenómenos naturales que se describen, sin que probablemente exista un aumento real en el número de eventos acontecidos. Eliminar el sesgo de la disponibilidad documental es por tanto un paso necesario en cualquier estudio histórico, así como su contraste con los registros geológicos de variabilidad climática reciente, como podrían ser los estudios de los sedimentos lacustres o los indicadores de actividad solar, y en todo caso para los últimos 3000 años aproximadamente, en los que se considera que las condiciones de circulación atmosférica son similares a las actuales (Benito *et al.*, 2005).

2.4. La problemática de los estudios geológicos

Los estudios geológicos en el ámbito de las avenidas y las inundaciones persiguen la descripción de la dinámica natural de un sistema fluvial mediante la lectura de las evidencias que nos brindan las rocas y las formas del paisaje. Es incuestionable que las cicatrices de la dinámica hidrológica que hoy vemos en el territorio son el resultado del cúmulo de toda la historia de una corriente superficial, al menos cuando la intervención antrópica no ha obliterado dichas señales o cuando la intervención ha supuesto una alteración del régimen natural de un modo prácticamente irreversible, en cuyo caso, también se pueden percibir otros indicios que apunten a este hecho (tal como el fuerte encajamiento de un cauce tras la dramática reducción en su sinuosidad). La interpretación del territorio en este sentido, nos permite identificar áreas susceptibles a sufrir procesos ligados a la dinámica fluvial y torrencial que son esenciales en la gestión del territorio y que suelen pasar totalmente desapercibidos en otros tipos de estudios y aproximaciones, tales como áreas con predominio de erosión o de sedimentación, zonas de avulsiones y migraciones de meandros, erosión de orillas, formación de depósitos y capturas fluviales.

La complicación que presentan las técnicas geológicas se refiere principalmente a los entresijos inherentes a la interpretación de los materiales y a la dificultad que entraña distinguir entre cambio climático y fluctuaciones normales del régimen hidrológico. Por ejemplo, para que los depósitos de paleoavenidas puedan ser utilizables para establecer umbrales mínimos de altura de lámina de agua, es necesario, además de garantizar que se trata de un evento de avenida, que éstos depósitos estén en lugares donde se garantice una sección estable durante un período de tiempo largo (más de 50 años). Otro ejemplo sería la dificultad interpretativa de distinguir en los registros lacustres lo que son episodios derivados de las características climáticas locales de lo que son las características climáticas regionales. Debido al paso del tiempo y al imparable avance de los procesos de meteorización y degradación de las rocas, añadido a la fuerte antropización del territorio, no es fácil establecer una correlación entre formas y períodos de recurrencia sin acudir a un compendio de técnicas que permitan aprovechar al máximo las virtudes de cada una

2.5. Otras fuentes de información

En la actualidad se están investigando nuevas fuentes de datos que permitan mejorar los estudios de avenidas e inundaciones. De un modo particularmente prometedor se presentan las técnicas de dendrocronología, que se fundamentan en el estudio de anomalías en el crecimiento de determinadas especies arbóreas. Estas anomalías pueden responder tanto a cambios climáticos regionales como a cambios locales (por disponibilidad de luz o nutrientes, o cambios en el dinámico equilibrio ecológico). Para las avenidas torrenciales resulta de especial interés una anomalía particular del crecimiento de los árboles, cuyo origen son los impactos de rocas en su corteza y las cicatrices que se registran en el interior del árbol por efecto del crecimiento de las áreas no dañadas por el impacto. Si bien es cierto que esta técnica aún está en fase de experimentación, se espera que de la recolección de este tipo de información se puedan mejorar las series sistemáticas y las no sistemáticas de registro de eventos.

3. PRIGEO-inundaciones

En el IGME, desde antes de 2002 y ya con miras a un plan de desarrollo cartográfico, se han ido ensayando distintos modelos y aproximaciones para abordar una problemática grave de nuestro territorio, como lo es la interacción entre el hombre y los eventos naturales que pueden ocasionar daños de consideración. En las últimas tentativas, se abordaba la cuestión de los peligros geológicos a una escala de término municipal (1/25.000), lo que permitía elaborar unidades homogéneas de peligrosidad para el ámbito de actuación municipal, pero sobre todo, permitía obtener una guía para centrar esfuerzos de estudios de detalle por las autoridades competentes allí donde, o bien existía una elevada exposición, o bien se preveía un mayor desarrollo. Esta escala de trabajo (1/25.000) continúa siendo la referencia al objeto de poder establecer un primer marco para las actuaciones más locales, si bien es cierto que se pretende sintetizar esta información para abarcar una representación areal más extensa (escala 1/50.000). La conclusión que se obtuvo de aquellos primeros ensayos, como no podía ser de otro modo, apuntaba a que la forma ideal de abordar los estudios de avenidas pasa por un profuso análisis multidisciplinar que integre las cuatro grandes líneas que se comentaban en el apartado anterior, pero al mismo tiempo, hacía impracticable la ejecución de una infraestructura cartográfica de síntesis para todo el territorio nacional, en un plazo de tiempo y limitaciones de presupuesto como las que se venían apuntando.

Las técnicas y métodos de estudio han evolucionado en estos últimos cinco años y, con la finalidad de poder abordar la cuestión para la mayor parte del territorio, se está trabajando en la obtención de índices de peligrosidad que permitan rápidamente asociar las formas del territorio a distintos grados de peligro. Así, por ejemplo, está previsto utilizar combinaciones novedosas de los distintos métodos, como los criterios hidrológicos e hidráulicos de base geomorfológica (ratios Q_r/Q_b), que ya han sido ensayados con éxito en otros estudios (como en el proyecto del IGME de Riesgo de Inundaciones en Castilla-La Mancha, RICAM, en fase de finalización).

Uno de los primeros pasos en la elaboración de cartografía de peligrosidad de avenidas e inundaciones, implica la obtención de mapas inventario de procesos torrenciales y su grado de actividad, deducido éste a partir del número de registros de evidencias de flujos hiperdensos. También la toma en consideración de la carga sólida transportada, mediante la adaptación de fórmulas tipo MUSLE para eventos de diseño.

Próximamente verá la luz una detallada guía metodológica que recogerá buena parte de estas aportaciones.

4. Bibliografía

- Benito, G. 2005. Impactos sobre los riesgos naturales de origen climático. A) Riesgo de crecidas fluviales. En MMA (2005): *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*. 527-548.
- Bodoque, J.M., Díez, A., De Pedraza, J., Martín, J.F. y Olivera, F. 2006. Estimación de la carga sólida en avenidas de derrubios mediante modelos geomecánicos, hidrológicos e hidráulicos combinados: Venero Claro (Ávila). En: Pérez Alberti, A. y López Bedoya, J. (eds.), *Geomorfología y territorio*. Actas de la IX Reunión Nacional de Geomorfología, Santiago de Compostela, 13-15 de septiembre de 2006. Cursos y Congresos, 171, 483-495, Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, 1037 pp.
- Bravo-Espinosa, M., Osterkamp, W.R. y Lopes, V.L. 2004. Transporte de sedimentos en corrientes naturales: revisión técnica de ecuaciones empíricas de predicción del arrastre de sedimentos de fondo. *Terra Latinoamericana*, 22, 337-386.
- Díez, A. 2002. Condicionantes geomorfológicos de las avenidas y cálculo de caudales y calados. En: Ayala-Carcedo, F. J. y Olcina Santos J. (Coords.), *Riesgos Naturales*. Cap. 49, págs. 921-952, Editorial Ariel, Ariel Ciencia, 1ª edición, Barcelona, 1512 pp.

- Díez, A., Lain, L. y Llorente, M. 2006. *Mapas de peligrosidad de avenidas e inundaciones. Métodos, experiencias y aplicación.* Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Medio Ambiente, Riesgos Geológicos nº 7, Madrid, 230 pp.
- Ferrer, M., González de Vallejo, L., García López-Davalillo, J.C. y Rodríguez, A. 2004. *Pérdidas por terremotos e inundaciones en España en el periodo 1987-2001 y su estimación para los próximos 30 años (2004-2033).* IGME-Consortio de Compensación de Seguros. Madrid. 126 pp.
- Llorente, M., Lain, L. y Díez, A. 2005. *Los mapas de peligrosidad geológica de Albuñol (Granada).* I Jornadas de Jóvenes Investigadores del IGME, Madrid 21-25 de noviembre de 2005. Instituto Geológico y Minero de España.
- Llorente-Isidro, M., Díez-Herrero, A., Benito, G., Lain, L. y Ballesteros, J.A. 2007a. Incidencia de la disponibilidad documental y el cambio en los usos del suelo en la percepción del fenómeno de las inundaciones y el sesgo en los análisis de su frecuencia. Libro de resúmenes. I Congreso Nacional sobre el Cambio Global, Madrid, 25-27 de abril de 2007.
- Llorente-Isidro, M., Díez-Herrero, A. y Lain-Huerta, L. 2007b. PRIGEO Flood hazard map: new insights for risk assessment tools. *Geophysical Research Abstracts*, 9, 06894. Sref-ID: 1607-7962/gra/EGU2007-A-06894. Abstracts of the Contributions of the EGU General Assembly 2007, Vienna (Austria), 15-20 April 2007. European Geosciences Union.
- Martín Vide, J.P. 2003. Criterios de cálculo hidráulico de las rieras de las Arenas y Rubí en condiciones torrenciales. Informe inédito. Agència Catalana de l'Aigua, Cataluña.

