

ANÁLISIS DEL AJUSTE DEL ÁREA INUNDABLE OBTENIDA MEDIANTE UNA EVALUACIÓN INTEGRADA DE LA PELIGROSIDAD DE INUNDACIÓN Y PELIGROS ASOCIADOS

MARÍA JESÚS PERLES ROSELLÓ
ANTONIO GALLEGOS REINA
FRANCISCO CANTARERO PRADOS

RESUMEN

En el texto se analiza el ajuste de distintas estrategias metodológicas para la evaluación del área inundable. Para ello se compara la extensión de la lámina de inundación en un evento real concreto, con la predicción de la misma obtenida a partir de dos modelos de simulación de la inundación. En un caso, la predicción se realiza mediante el programa HEC-RAS, y en el segundo caso este modelo se ve modificado a través de la evaluación integrada de la inundación y otros peligros que inciden directamente en la expansión de la lámina de agua (erosión hídrica y movimientos gravitacionales). Se ha utilizado como caso de análisis la inundación producida en las cuencas de los arroyos Gallegos y Las Piletas (costa oriental de la provincia de Málaga) en los días 27 y 28 de marzo de 2004, a partir de un evento pluviométrico de 229 mm en 24 h. Los resultados muestran un desfase considerable entre la realidad y las predicciones según ambos modelos, aunque se observa que la evaluación integrada de peligros asociados proporciona un mejor ajuste del área inundable.

ABSTRACT

In the article a flood area generated by a real extreme precipitation event is compared to different predicted flood areas for the same basin, in order to check the prediction adjust. The predicted areas are generated both by an simulation model (HEC- RAS), and a modified purpose based on the integration of erosion and slope movements in the flood process. The results show a wide difference between the predicted flood areas and the real spatial distribution, but the best results are obtained by the integrated method purposed.

1. INTRODUCCIÓN

Más allá de sus objetivos concretos, el artículo propone una reflexión sobre la necesidad de una evaluación integrada de la peligrosidad, una temática de interés en el tratamiento de la peligrosidad en su conjunto, y, de forma más específica, en la cartografía del peligro de inundación. A la luz de distintas experiencias aplicadas, se viene observando como son comunes los casos en los que los modelos de simulación de base hidrológica proporcionan unas predicciones de inundación con un considerable desfase respecto a la realidad observada en episodios concretos. Estos desajustes parecen incrementarse en los sectores del territorio en los que la interferencia entre los procesos humanos y naturales es intensa y confluyen procesos de peligrosidad de distinta etiología. Este es el caso de las cuencas situadas en la interfaz natural-urbana de espacios periurbanos o litorales turísticos mediterráneos.

Entre las causas que pueden explicar el nivel de desajuste puede citarse la escasa flexibilidad de los modelos para enfocar la generación de la inundación como un sistema con interacciones complejas. Una fuente de desajuste tiene su origen en la aplicación de los modelos predictivos sólo a los factores naturales que generan la peligrosidad, sin considerar la incidencia directa de los procesos artificiales en la producción de la misma. Por otra parte, es común que los modelos de base hidráulica ignoren los condicionantes eco-geomorfológicos de la producción del flujo y sus acarrees. Como consecuencia de este tratamiento sectorial de peligros que funcionan de forma asociada, se ignora el papel de la incorporación de sólidos al caudal, las consecuencias de este hecho en la dinámica geomorfológica de la cuenca y, en definitiva, en la conformación topográfica del área inundable. Ante estas carencias, se observa la necesidad de considerar la inundación como un vector de transferencia que incorpora materia y energía procedente de otros procesos de peligrosidad que inciden en ella (erosión hídrica y movimientos gravitacionales).

En este contexto, las aportaciones del presente artículo se fundamentan en una propuesta previa recogida en Perles et al. (2006), dónde se reseña las características de una estrategia metodológica para la cartografía y evaluación integrada de peligros que se presentan asociados espacial y temporalmente (inundación, erosión hídrica y movimientos en masa). En el presente trabajo se incorporan de la metodología citada únicamente los aspectos referidos a la incidencia del peligro de erosión y movimientos en masa en la determinación del área inundable.

1.1. Marco conceptual y antecedentes

Frente a una arraigada tradición de tratamiento sectorial de los riesgos según su etiología, diversos enfoques conceptuales contribuyen en la actualidad

al tratamiento del riesgo desde enfoques más transversales y comprensivos. Smith (1992) y su cada vez más aceptada definición del “peligro ambiental” difumina los límites entre los aspectos naturales, inducidos y tecnológicos de la producción de la catástrofe. Enfoques como el análisis de los riesgos en la complejidad de los espacios de interfaz, contribuyen igualmente a reforzar la idea de interconexión (Caballero, 2001). Autores como Cutter (1994 y 1996), Cutter, Boruff y Shirley (2003) o Tobin y Montz (1997), renuevan la teoría del “lugar de riesgo”, para definir la producción del mismo como una integración de aspectos parciales del lugar, que se manifiestan de forma imbricada.

En el ámbito más concreto de la peligrosidad, Perles (2004) recoge de forma específica un conjunto de interacciones entre peligros de distinta naturaleza pero de funcionamiento asociado; estas interacciones habitualmente no son consideradas en los métodos de evaluación sectorial, y apunta la idea de la evaluación integrada de estos peligros asociados como una de las aportaciones singulares de la Geografía al análisis del riesgo.

En lo que se refiere a los enfoques integradores aplicados al peligro de inundación, es son de reseñar las distintas metodologías cartográficas aportadas por el IGME (Llorente *et al.*, 2006) en las que junto a los criterios determinantes de la inundación se incorporan indicadores de los riesgos asociados de erosión, anegamiento de áreas endorréicas, movimientos en masa, movilización de depósitos no consolidados, sismicidad o aludes. La cartografía de peligrosidad de avenidas e inundaciones prevista en el Plan PRIGEO recoge estas mismas premisas y se propone integrar en el análisis los riesgos asociados de sufusión, movimientos de ladera, erosión, y aterramiento entre otros. La integración de la inundación con otros procesos geomorfológicos de peligrosidad se perfila igualmente en metodologías aplicadas como la del INUNCAT (Plan Especial de emergencias para inundaciones, recogido en Borrás *et al.*, 2006). Aplicaciones de estos enfoques integradores a la evaluación del peligro de inundación son, por ejemplo, los trabajos de Lahouse (1998), que relacionan los movimientos gravitacionales, las inundaciones torrenciales y el riesgo de avalancha en espacios de montaña. En un contexto espacial más próximo al caso de estudio, los trabajos de Cobos y Perles (2004) o Mérida, Perles y Blanco (1998) insisten en la imbricación de procesos como la transgresión marina y la inundación en cursos bajos, o los movimientos gravitacionales, el riesgo de colapso de cauces y la generación de picos de avenida.

Existen también algunos ejemplos aislados de voluntad integradora en el ámbito normativo, y, así, en la Directriz General para la evaluación del Riesgo de Inundación se especifica la necesidad de analizar de forma asociada los riesgos de movimiento en masa e inundación.

Como antecedentes específicos de la labor de comparación de hipótesis de área inundable con la realidad pueden citarse los trabajos de Camarasa

(1995) y los más recientes de Camarasa y Bescós (2004), que comparan tres situaciones de inundación real con sus correspondientes predicciones.

2. OBJETIVOS

El propósito del trabajo se centra en la comprobación del grado de ajuste a la realidad en la predicción del área inundable que ofrecen distintas estrategias metodológicas para la cartografía de inundación, así como de la inundación y peligros asociados (Perles et al, 2006). Como un objetivo paralelo, se pretende poner de manifiesto las carencias y desajustes observables en los modelos habituales de predicción del peligro de inundación que, al centrar su enfoque en una dinámica hidrológica simplificada, ignoran y subestiman el papel de la incorporación de sólidos al caudal. De forma más concreta, los objetivos del trabajo se resumen a continuación:

- mostrar la cartografía de distribución espacial real de la lámina de inundación en el evento acaecido en las cuencas del arroyo Gallegos y las Piletas en marzo de 2004. Analizar a partir de este documento el comportamiento general del proceso de inundación en un área de interfaz rural-urbana.
- Comparar los resultados espaciales de distribución de la lámina de agua observados sobre el terreno con las predicciones realizadas mediante dos estrategias de simulación del área inundable.
- Observar el grado de ajuste a la realidad de cada una de las predicciones aportadas, sus aciertos, fallos y posibles causas.
- Comprobar si la estrategia metodológica que propone la evaluación integrada de la inundación con otros peligros asociados mejora en su capacidad predictiva a la evaluación mediante un modelo hidrológico sectorial.

3. ÁREA DE ESTUDIO

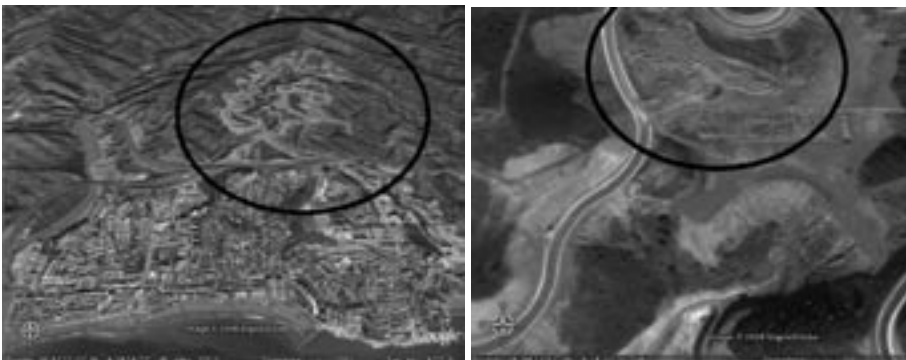
Se ha seleccionado un área de estudio que por sus características físicas y humanas contribuya a poner de manifiesto las carencias de los modelos sectoriales de predicción de avenidas e inundación. Este es el caso de la mayor parte de las cuencas del litoral oriental de la provincia de Málaga, donde se sitúa el área de estudio. Durante las inundaciones catastróficas producidas durante los días 27 y 28 de Marzo de 2004 en Rincón de la Victoria, pudo observarse de forma evidente como las graves consecuencias se derivaron, esencialmente, de la incorporación de sólidos al caudal. (ver figuras 1 y 2).



1 y 2. Ejemplos de consecuencias de la inundación

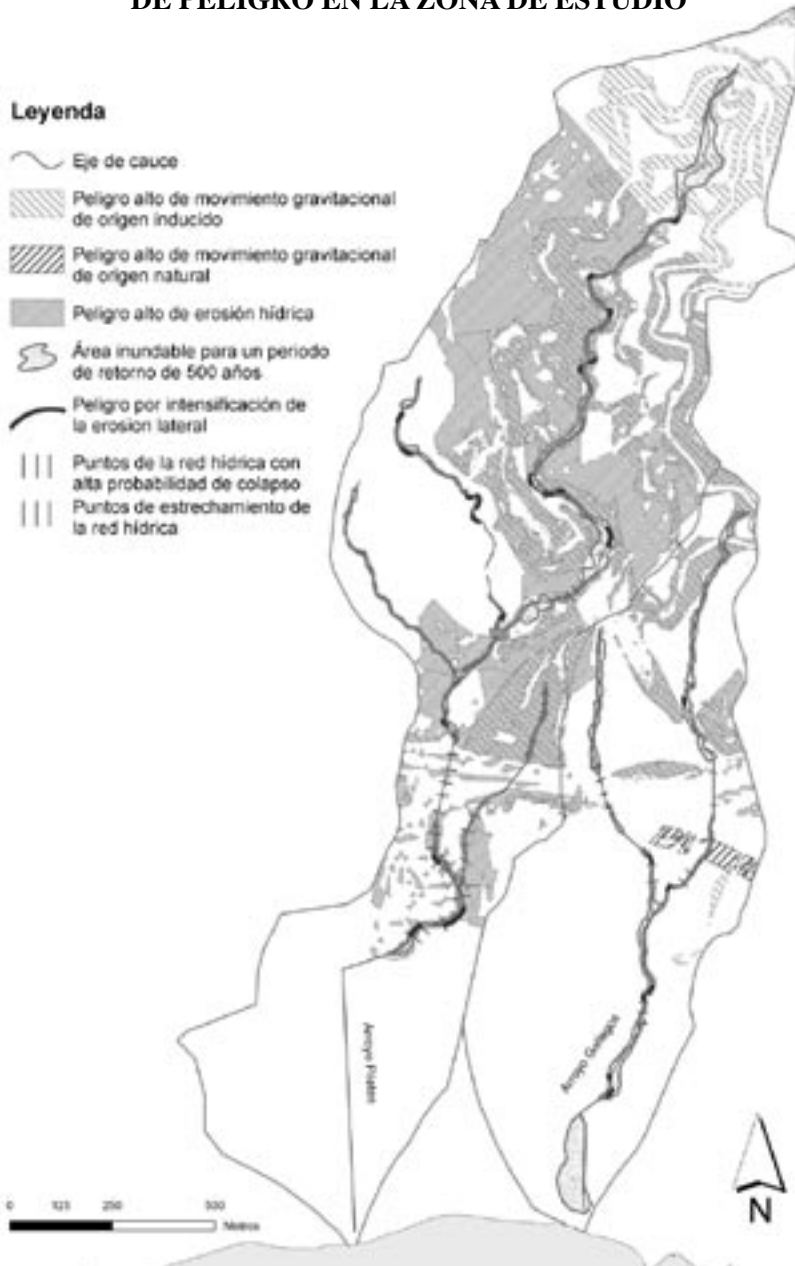
La relación directa de los acarrees con otros procesos de peligro como son la erosión hídrica y la movilización del terreno de las laderas aguas arriba, pone de manifiesto la necesidad de diseñar estrategias metodológicas de estimación de la peligrosidad que consideren las conexiones entre procesos asociados espacial y temporalmente a la producción de la avenida e inundación.

Las cuencas seleccionadas para el análisis (arroyo Gallegos y Arroyo Las Piletas) ocupan un total de 239 ha., sobre litología predominantemente metamórfica de edad primaria. Se caracterizan por poseer cabeceras escarpadas (más del 30% de pendiente) muy cercanas a la línea de costa, que contactan de forma brusca con las planicies litorales. La cubierta vegetal se compone de cultivos arbóreos de escaso porte y matorral disperso en su mayor parte, y presenta en general un estado degradado, con escasa densidad y porcentaje de



3 y 4. Ejemplos de movilización artificial del terreno.

MAPA 1
ESQUEMA HIDROGRÁFICO Y LOCALIZACIÓN DE LOS FOCOS
DE PELIGRO EN LA ZONA DE ESTUDIO



Fuente: Perles et al. (2006).

cobertura. La red hidrográfica tiene patrones dendríticos de trazado tortuoso en cabecera; está modificada en algunos tramos de la cuenca baja por embovedamientos y encauzamientos. El contacto entre los sectores en los que el cauce discurre confinado entre los relieves adyacentes y la apertura de la llanura de inundación de tipología lisa se produce de forma brusca. A partir de este contacto la llanura de inundación prácticamente contacta con la litoral, y entra en coalescencia con los llanos correspondiente a las cuencas adyacentes.

El uso humano de un espacio situado en la franja perirubana de la ciudad de Málaga define en estas cuencas un territorio intensamente urbanizado, con dinámicas de expansión muy rápidas y un alto grado de intervención sobre el terreno (ver figuras 3 y 4). En estas condiciones, la inducción de los procesos erosivos y gravitacionales es muy común, así como el incremento de la exposición, especialmente en el llano de inundación y su contacto con la franja costera. El mapa nº1 muestra un esquema de la red hidrográfica y de los principales focos de peligro en el área.

El evento analizado se corresponde con una precipitación de 229,1 mm en 24 horas registrada en la estación pluviométrica de Rincón de la Victoria, cifra que se corresponde con un periodo de retorno de 200 años.

4. METODOLOGÍA

Los pasos metodológicos comprendidos en el trabajo se esquematizan como sigue:

- 1) Elaboración del mapa de extensión real de la lámina de inundación (área inundada)
- 2) Predicción y cartografía del área inundable mediante el modelo HEC-RAS.
- 3) Predicción y cartografía del área inundable mediante la modificación del modelo HEC-RAS en razón de la incidencia del peligro de erosión y de movimientos gravitacionales en el proceso de avenida e inundación.
- 4) Comparación de la distribución espacial de las áreas inundables predichas por los modelos de simulación en relación a la constatada en la realidad.

4.1. Elaboración del mapa de extensión real de la lámina de inundación

El mapa de extensión real de la lámina de inundación se ha elaborado con posterioridad a la producción del evento extremo mediante metodologías ha-

bituales de entrevista a los afectados (Dunne y Leopold, 1978), y observación de signos de inundación o abrasión. (La Roca y Carmona, 1983, Camarasa y Bescós, 2004, o Borrás, 2006). Junto a los datos de extensión de la lámina, se han recogido datos referentes al calado en cada punto. Los resultados se muestran en el mapa nº 2.

MAPA 2
ÁREA INUNDADA EN LAS CUENCAS DE LOS ARROYOS GALLEGOS Y LAS PILETAS DURANTE EL EVENTO DEL 27 Y 28 DE MARZO DE 2004. (229 MM EN 24 H.)



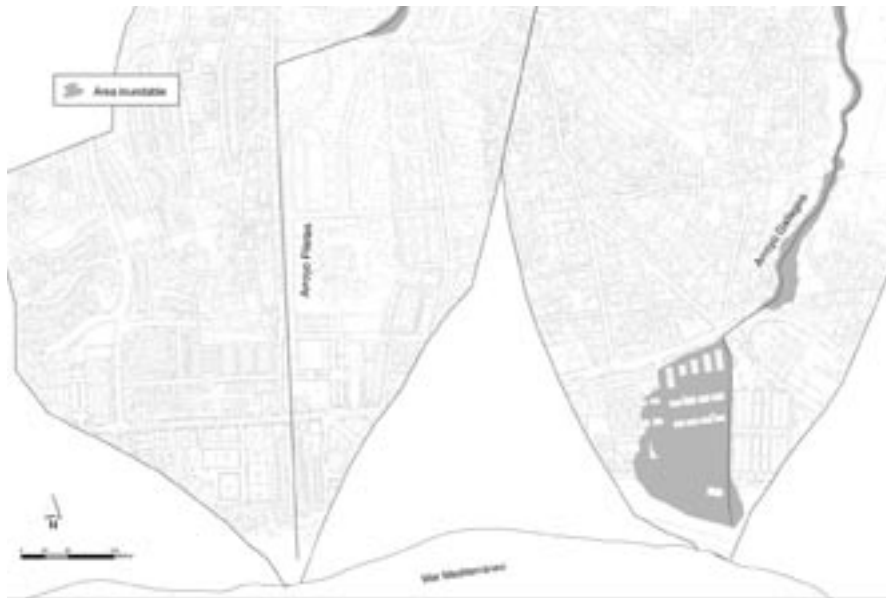
Fte: Elaboración propia.

4.2. Elaboración del mapa de predicción del área de inundación mediante el modelo HEC-RAS 3.1.3

Para la simulación se utilizó la precipitación equivalente a la del evento extremo del 27-28 de marzo de 2004, esto es 229 mm en 24 horas. Una vez calculado el caudal para un periodo de retorno 500 (a través del método racional), se estimó mediante el modelo hidráulico HEC-RAS la altura de la lámina de agua en 60 perfiles transversales sistemáticos a los los que se añaden algunos seleccionados en puntos expresivos de cambios en la sección del cauce. Dado el elevado nivel de intervención humana sobre el mismo, se han considerado tanto las alteraciones naturales como artificiales de la sección y

topografía inmediata, hacía el denominado concepto de “geometría efectiva” (Lewin y Manton, 1975). Los perfiles caracterizan la fisonomía transversal del cauce a lo largo de 2,7 km en el caso del arroyo Gallegos y 5,65 en el caso del arroyo Las Piletas. La fuente utilizada tanto para la caracterización topográfica del conjunto de la cuenca como para el levantamiento de los perfiles procede de un mapa topográfico a escala 1:1000 y con una equidistancia de curvas de nivel de 1 metro. Los resultados obtenidos según esté procedimiento se recogen en el mapa n° 3.

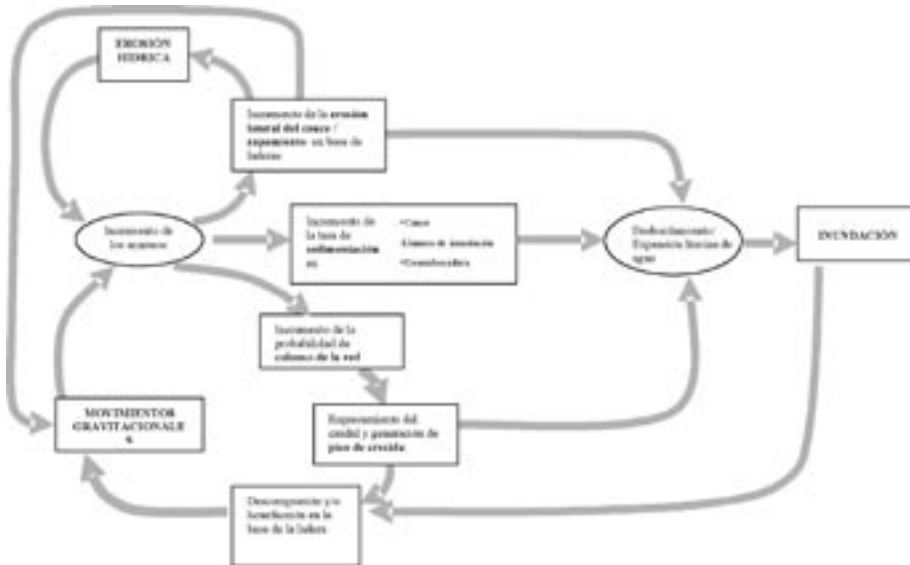
MAPA 3 ÁREA INUNDABLE SEGÚN EL MODELO HEC-RAS



Fuente: Elaboración propia

4.3. Elaboración del mapa de predicción del área inundable considerando la incidencia de los procesos gravitacionales y de erosión en el proceso de inundación

La base conceptual en la que se fundamenta la estrategia metodológica para la elaboración de este mapa está recogida con más detalle en Perles et al.(2006). En este trabajo se proponen los criterios para reflejar en una cartografía de peligros asociados las distintas interacciones posibles entre los procesos gravitacionales, la erosión y la inundación. Las principales líneas de interconexión entre los peligros citados se esquematizan en la figura X., y se resumen como sigue:



5. Esquema conceptual de las interrelaciones entre el peligro de erosión hídrica, de movimientos gravitacionales y de avenida e inundación.

Fte: Perles et al. 2006

a) Existe una interdependencia estrecha entre la peligrosidad de erosión, movimientos gravitacionales e inundación. La remoción del terreno originada por la erosión hídrica y/o por los movimientos gravitacionales en las laderas genera un aumento de aportes sólidos al caudal que pueden llegar a suponer un porcentaje de acarreos de gran entidad. La repercusión de este incremento de sólidos en un evento de avenida puede producir un aumento de la peligrosidad de la inundación, esencialmente, a través de los siguientes mecanismos:

- Aumento de la energía erosiva e intensificación de la erosión lateral del cauce, especialmente en las márgenes cóncavas de los meandros, dónde a su vez se favorecen los fenómenos de desbordamiento. El incremento de la de la erosión lateral redonda, nuevamente, en un aumento de acarreos procedentes de la remoción de las márgenes, con lo que el proceso se retroalimenta. En ocasiones, la erosión lateral puede producir el zapamiento de la base de las laderas, lo que puede actuar como factor activador de inestabilización de las mismas.
- Incremento del potencial de sedimentación en distintos puntos de la cuenca. Si la decantación se produce en el propio cauce puede producirse una colmatación del vaso, con la consiguiente pérdida de

capacidad de evacuación del caudal, elevación del nivel de base, y posible desbordamiento y expansión de la lámina de agua. Si el depósito se produce en la llanura de inundación se potencia igualmente la expansión de la lámina de inundación, y en caso de concentrarse en la desembocadura se favorecerá la generación de barras litorales, con la consiguiente obturación del flujo en este punto, tendencia al represamiento del caudal y expansión fuera del cauce. La expansión de la lámina de agua fuera del cauce propicia la activación de movimientos gravitacionales en zonas susceptibles que se afecten por la inundación.

- Propensión a la generación de colapsos del drenaje a lo largo de la red en aquellos puntos en los que coincidan una zona de terreno susceptible de moverse en masa, con un estrechamiento, natural o artificial, de la red hidrográfica. En circunstancias de avenida, la invasión súbita del cauce puede producir un represamiento temporal de las aguas que se resuelve finalmente mediante la rotura de la obturación por la presión creciente del agua represada. El resultado en la dinámica de la avenida es la generación de un pico de crecida muy destructivo, ya que está compuesto por caudales prácticamente sólidos. Se trata además de un proceso que puede retroalimentarse, ya que, una vez desmantelado el represamiento, la descompresión generada en la base de la ladera como consecuencia del zapamiento lateral del cauce, unida a su humefacción, puede activar de nuevo la desestabilización de la misma. El resultado de este conjunto de interacciones se traduce un aumento de las posibilidades de que, aguas abajo del punto de colapso, se produzcan expansiones excepcionales de la lámina de agua.

b) La dinámica gravitacional que regula todos los procesos de peligrosidad considerados produce el que la concurrencia de causas de peligrosidad en un punto no redunde necesariamente en un aumento de la peligrosidad in situ, sino en otro lugar definido por la dinámica topológica del conjunto de los procesos implicados. La avenida actúa como principal vector de transferencia espacial entre las causas y las consecuencias de los distintos peligros. La metodología debe reflejar en el procedimiento de integración aquellas interacciones que, a través de la transferencia de masa y/o energía, se traduzcan en un aumento de la peligrosidad.

A partir de estos planteamientos generales, se determinan las siguientes modificaciones metodológica:

- Incremento del caudal de avenida en cada sub-cuenca en razón proporcional al incremento potencial de sólidos provenientes de la erosión hídrica y los movimientos gravitacionales. Se ha utilizado como criterio de incremento del caudal el porcentaje de superficie de la sub-cuenca afectada por un grado alto de peligrosidad de erosión o movimientos gravitacionales. Estos valores de superficie de alta peligrosidad han sido ponderados por un coeficiente que refleja la importancia relativa de cada tipo peligro en la producción e incorporación de sólidos al caudal, mayor en el caso de los movimientos en masa y menor en el caso de la erosión hídrica. Se ha distinguido igualmente la mayor susceptibilidad del terreno a ser arrastrado en los casos en los que el riesgo de movilización del terreno este asociado a un proceso de inducción (remoción artificial del terreno). De este modo, el porcentaje de incremento del caudal en cada cuenca se calcula a partir del siguiente algoritmo:

$$\text{Incremento de caudal} = \sum S \times C$$

donde:

- S = % de superficie de peligro alto en la sub-cuenca para cada tipo de peligro
- C = coeficiente de ponderación para cada tipo de peligro según tabla 1.

TABLA 1
COEFICIENTES DE PONDERACIÓN DE LA
SUPERFICIE SEGÚN EL TIPO DE PELIGRO

Tipo de peligro	Coeficiente de ponderación
Erosión hídrica	1
Movimiento gravitacional del terreno (natural)	1,25
Movimiento gravitacional del terreno (inducido)	1,5

Fuente: Elaboración propia

- Incremento del caudal para cada sub-cuenca proporcional al número de puntos de estrechamiento y colapso potencial presentes en la misma. Se ha considerado como punto de estrechamiento de la red aquellos sectores del cauce en los que se detecta una reducción del perfil transversal de dos tercios respecto al tramo anterior y subsecuente. Los casos de estrechamiento que coincidan con riesgo de movimientos gravitacionales en un radio de 50 m. aguas arriba del estrechamiento han sido identificados como puntos potenciales de colapso. En atención a la diferente importancia de ambos casos de interferencia

de la red en el aumento de la peligrosidad de inundación (mayor en el caso de los puntos de colapso) se han establecido los siguientes incrementos del caudal (tabla n° 2):

TABLA 2
PORCENTAJE DE INCREMENTO DE CAUDAL SEGÚN EL TIPO DE INTERFERENCIA DE LA RED HÍDRICA

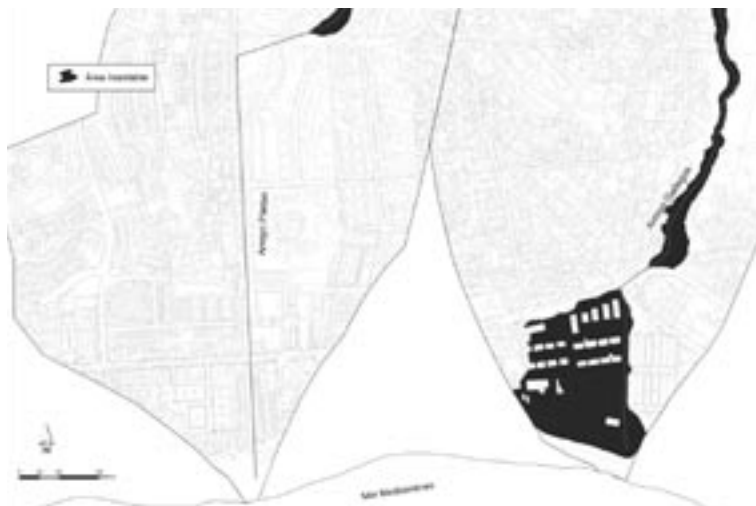
Tipo de interferencia de la red hídrica	% de incremento del caudal
Punto de estrechamiento de la red hídrica	2%
Puntos potenciales de colapso del flujo hídrico	5%

Fte- Elaboración propia

Como paso previo a la aplicación de los incrementos de caudal descrito se han elaborado los mapas individuales de peligrosidad de erosión hídrica, movimientos gravitacionales e inundación, así como los de puntos de interferencia de la red hídrica. En el caso de los peligros de erosión hídrica y movimientos gravitacionales, la obtención de la cartografía parcial se ha resuelto mediante la superposición y adición de factores de riesgo. La metodología específica para este procedimiento conjunto está recogida en Perles et al (2006).

Los resultados obtenidos según esté procedimiento se recogen en el mapa n° 4

MAPA 4
ÁREA INUNDABLE SEGÚN EL MODELO HEC-RAS MODIFICADO EN RAZÓN DE LOS PELIGROS ASOCIADOS



Fuente: Elaboración propia.

5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La superposición de las áreas de inundación obtenidas mediante los distintos procesos de evaluación junto al caso real de comparación (ver mapa nº5), permite la observación de los siguientes resultados:

- El mapa real de área inundada (ver mapa nº2) permite observar las siguientes consideraciones referentes al comportamiento general de la inundación:

1. La distribución espacial de la lámina de agua está condicionada intensamente por la trama urbana de la cuenca baja. Tanto en el caso del arroyo Las Piletas como el del arroyo Gallegos, la lámina de inundación a la llegada a la planicie litoral se expande en un sentido transversal a la dirección del flujo en concordancia con la distribución lineal oeste-este del callejero.
2. Las mayores acumulaciones de flujo y calados (plaza de la Laguna, 70 cm) se muestran condicionadas igualmente por la dirección y disposición de las calles, que actúan como canales de evacuación de la lámina de agua embalsada. En este caso, la acumulación de flujo se origina por la confluencia en este punto de tres viales paralelos a la dirección de desagüe; al no existir un vial con capacidad equivalente de evacuación a partir de este punto se produce un represamiento que ocasionó los valores más altos de calado.
3. Se observa una tendencia a la expansión de la lámina de agua asociada a la presencia de embovedamientos y encauzamientos de tramos del cauce en ambas cuencas. La entrada de estos canales artificiales, al perder capacidad de evacuación por los aportes sólidos genera una retención del flujo que provoca el represamiento y la expansión de la lámina de inundación aguas arriba de estos puntos.
 - La comparación de los resultados para los dos supuestos de predicción en relación al área de inundación real permite observar diversas cuestiones:
 1. Las dos estrategias de predicción utilizadas subestiman de una forma clara la generación de caudales de avenida y, en consecuencia, la extensión de la lámina de inundación (ver tabla 2). Este desajuste se hace más evidente en el caso de la estimación simple de los caudales mediante el modelo HEC; el segundo supuesto de predicción, el que incrementa el volumen de caudal en razón de la incorporación potencial de sedimentos, proporciona unos valores de área inundable más cercanos a la realidad tanto en su extensión como en su distribución espacial.

MAPA 5
SUPERPOSICIÓN DE ÁREAS DE INUNDACIÓN OBTENIDAS MEDIANTE LAS DISTINTAS METODOLOGÍAS



Fuente: Elaboración propia

TABLA 3
EXTENSIÓN DE LA LÁMINA DE INUNDACIÓN PARA LOS TRES CASOS OBSERVADOS

Caso de estudio	Extensión de la lámina de inundación
Evento real	10,31 has.
Predicción modelo HEC	2,47 has.
Predicción modelo HEC modificado por aportes sólidos	3,51 has.

Fuente: Elaboración propia

El comportamiento observado no se corresponde con el detectado en otros trabajos paralelos (Camarasa y Bescós, 2004), en los que, en sentido contrario, se observa una tendencia a la sobrevaloración del área inundable por parte del modelo HEC-RAS, tendencia que se acentúa especialmente en los eventos de menor magnitud.

La explicación a este comportamiento divergente puede deberse a distintas cuestiones. De un lado, las cuencas analizadas en este trabajo ejemplifican comportamientos excepcionalmente extremos, definidos tanto por la morfometría de la cuenca y la red hidrográfica como por la intensidad de la intervención humana, hechos que se unen al ambiente rexistásico. En estas condiciones la capacidad de laminación del sistema queda prácticamente anulada, y, por el contrario, la incorporación de sólidos al caudal se extrema.

De otro lado, de contemplarse como válida la hipótesis de que el nivel de ajuste entre la predicción y la realidad presente una tendencia a la minusvaloración del área inundable proporcional a la magnitud del evento, para corregirse en los eventos de mayor caudal (Camarasa y Bescós, 2004), es posible considerar que esta tendencia se invierta hacia la minusvaloración del área inundable a partir de un umbral de magnitud. En esta línea argumental un evento de magnitud tan excepcional como el que se analiza en el trabajo presentaría un ajuste muy a la baja de la predicción.

Diversas razones pueden explicar la tendencia del modelo de predicción a minusvalorar el peligro en los eventos extremos. Ciertamente, la intensidad de los procesos hidrogeomorfológicos de una cuenca como respuesta ante eventos de intensidad creciente no presenta una tendencia de comportamiento lineal, sino exponencial y poco modelable, en tanto en cuanto está marcada por estadios a partir de los cuales se incrementa de forma brusca el ritmo de la dinámica. Así, por ejemplo, es a partir de un determinado umbral cuando se activan, los movimientos en masa y se generan los colapsos, para producir este hecho un cambio drástico en el comportamiento del sistema y en la magnitud de la avenida y la inundación. Un modelo que no contempla la interacción de otros procesos en la generación y dinámica de los caudales presentará una tendencia a la minusvaloración tanto más acusada cuanto más y más importantes sean los procesos asociados a la dinámica de la cuenca, procesos que no tienen que activarse necesariamente en eventos de escasa magnitud.

6. CONCLUSIONES

La comparación de las distintas estrategias metodológicas para el análisis de la peligrosidad de inundación, y el desajuste de las predicciones en su distribución y magnitud con la realidad pone de manifiesto la necesidad acuciante de considerar en la predicción de la inundación la influencia de los procesos de peligrosidad asociados que condicionan de forma determinante la incorporación de sólidos al caudal, la dinámica de la avenida, la expansión de la lámina de agua, y, en última instancia, la peligrosidad de la inundación.

La propuesta de modificación del modelo más común de estimación de caudales (HEC-RAS), hacia una evaluación que integre los peligros asociados a la avenida e inundación se muestra como una tentativa inicial de resultados positivos; la predicción obtenida mediante este modelo se ajusta mejor, tanto en la distribución de la lámina de agua como en la magnitud de su expansión, a la realidad. A pesar de esta mejora relativa respecto a la estimación más simplificada mediante el modelo HEC-RAS, el desajuste en la predicción con la realidad es muy apreciable. Los resultados deben considerarse, por tanto, como un punto de partida inicial hacia la calibración de la propuesta hacia un mejor ajuste.

Para el suceso observado, se concluye también la validación de la hipótesis que sostiene que la evaluación de la peligrosidad de avenida e inundación mediante modelos de estimación de caudales que no integran otros procesos asociados supone una subestimación palpable de la peligrosidad de inundación. Esta realidad se observa especialmente en casos como el analizado, esto es, en cuencas del ámbito mediterráneo con dinámicas intensivas de ocupación del espacio y durante sucesos extremos. La integración de los factores de peligrosidad de origen natural y humano en la metodología como factores equivalentes del sistema contribuye a acercar los resultados a la realidad territorial, ya que la generación del peligro se produce en un patrón territorial mixto, muy alejado de la idealización de un sistema natural modélico.

BIBLIOGRAFÍA

- BORRAS, G.; GODÉ, LL.; GOMÁ, A.; GRACIA, A. Y MARTÍNEZ, J. (2006): “Delimitación de zonas inundables en el ámbito autonómico: Cataluña”. En: Díez Herreros, A.; Laín Huerta, L. y Llorente Isidro, M. (eds). *Mapas de peligrosidad de avenidas e inundaciones. Métodos, experiencias y aplicación*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Medio Ambiente. Riesgos Geológicos N° 7. 73-88. Madrid.
- CABALLERO, D.(2001): “Particularidades del incendio forestal en el interfaz urbano. Caso de estudio en la Comunidad de Madrid” II Jornadas de Prevención de Incendios Forestales. ETSI Montes. Madrid.
- CAMARASA A.M.y BESCÓS, A. (2004): “Cartografía de áreas inundables: Comparación entre mapas de peligro y mapas de inundaciones concretas”, en *Riesgos Naturales y Antrópicos en Geomorfología*, G. Benito & Díez Herrero (eds.), SEG y CSIC, Madrid.
- COBOS RODRIGUEZ, A, PERLES ROSELLÓ, M.J. y ANDREO NAVARRO, B. (2004): “Relaciones entre los procesos de transgresión marina y el riesgo de inundación en cursos del litoral malagueño. El caso de la Desembocadura del Río Fuengirola (Málaga)”. *Riesgos Naturales y Antrópicos en Geomorfología*, SEG, Toledo.
- CUTTER, S.L.(1994): *Environmental Risk and Hazards*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall.
- CUTTER, S.L.(1996): “Vulnerability to environmental hazards”, *Progress in Human Geography*, 20, 4, pp. 529-539
- CUTTER, S.L., BORUFF, B y SHIRLEY, W.L. (2003): Social vulnerability to Environmental Hazards”, *Social Science Quarterly*, vol.84, 2.
- DUNNE, T. y LEOPOLD, L.B. (1978): *Water in environmental planning..* Freeman and Company. S. Francisco.
- LA ROCA, N. y CARMONA, P.(1983): Fotointerpretación de la Ribera del Xúquer después de la inundación de octubre de 1982. *Cuadernos de Geografía*, 32-33, 121-136
- LAHOUSE, P. (1998): “Essai de cartographie intégrée des aléas naturels en zone de montagne. L'exemple de le vallée de la Guisane (Haute-Alpes, Briançonnais)”. *Annales de Géographie*, 604, pp. 467-486
- LEWIN, J. y Manton, M. (1975): “Welsh floodplain studies: the nature of floodplain geometry, *Journal of Hydrology*, 25, 37-50.
- LLORENTE ISIDRO, M.; DÍEZ HERRERO, A. Y LAÍN HUERTA, L. (2006): La experiencia del IGME en cartografía de peligrosidad de avenidas torrenciales e inundaciones: de Casiano de Prado a PRIGEO. En: Díez Herreros, A.; Laín Huerta, L. y Llorente Isidro, M. (eds). *Mapas de peligrosidad de avenidas e inundaciones. Métodos, experiencias y aplicación*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Medio Ambiente. Riesgos Geológicos N° 7. 41-63. Madrid.
- MÉRIDA RODRIGUEZ, M., PERLES ROSELLÓ, M.J. y BLANCO SEPÚLVEDA (1998): Urbanización, infraestructuras y riesgos naturales en la periferia mon-

tañosa de la ciudad de Málaga. El caso del monte San Antón. *Revista Baética*, vol. 20, pp.129-157.

MONTZ, B.E.(1994): "Methodologies for análisis of multiple hazard probabilities: An application in Rotura, New Zealand, Centre for Environmental and Resource Studies, University of Waikato, Hamilton.

PERLES ROSELLÓ, M.J. (2004): "Evolución histórica de los estudios sobre riesgos. Propuestas temáticas y metodológicas para la mejora del análisis y gestión del riesgo desde una perspectiva geográfica". *Revista Baética*, vol. 26, pp. 103-127.

PERLES ROSELLÓ, M.J.; CANTARERO PRADOS, F.; GALACHO JIMÉNEZ, F.B.; GALLEGOS REINA, A.; VÍAS MARTINEZ, J.M (2006): "propuesta metodológica para el análisis integrado de peligros asociados. Aplicación al peligro de inundación, movimientos gravitacionales y erosión hídrica", *Actas del XII Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica*, Granada.

TOBIN, G.A. y MONTZ, B.E.(1997): *Natural Hazards: explanation and integration*, Guilford Press, Londres, 388 pp.

