

## CARTOGRAFIA DE ZONAS INUNDABLES Y ANÁLISIS DE RIESGO EN CATALUÑA (PLAN INUNCAT)

Jorge FLETA \*, Lluís GODÉ \*\*, J.Lluís GOMÀ \*\*, Àlex GRACIA \*\*, Joan GRACIA \*\*\*, Jesús MARTÍNEZ \*\*, Jordi MARTURIÀ \*, J. Julio PALMA \*\*\*, Manel PARDO \*\*\*, Ana de PAZ \*, Inès SÁNCHEZ \*\*\* e Inma VERDAGUER \*\*\*

\* Departament de Política Territorial i Obres Públiques. Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC). Parc de Montjuïc, s/n 08038 Barcelona

\*\* Departament de Medi Ambient i Habitatge. Agència Catalana de l'Aigua (ACA). c/ Provença, 204-208 08036 Barcelona.

\*\*\* Departament d'Interior. Direcció General d'Emergències i Seguretat Civil (DGESC). Ctra. de la Universitat Autònoma, s/n 08290 Cerdanyola del Vallès.

### RESUMEN

Se expone el contenido y la metodología empleada en la elaboración del Plan de Emergencias por inundaciones de Cataluña (INUNCAT). El Plan comprende el sistema de alerta, la organización y los procedimientos de actuación en el caso de inundaciones extraordinarias, de los servicios de la Generalitat de Catalunya, de las otras administraciones y de las entidades públicas. La asignación del nivel de riesgo requiere del análisis de la peligrosidad para diferentes períodos de retorno, del análisis de la vulnerabilidad de los elementos expuestos, así como de la zonificación del territorio y la localización de los puntos conflictivos.

Palabras clave: cartografía, zonas inundables, vulnerabilidad, análisis de riesgo, plan Inuncat, Cataluña.

### ABSTRACT

The special plan of floods emergencies of Catalonia (INUNCAT) must face as main objective the flood emergencies in the territorial Catalonia (DGESC). Thus, the warning system, the organization and the procedures of performance in case of flood are defined. All its previous quantification and location of the fundamental aspects for the risk analysis, between which they emphasize the hazard analysis and the establishment of the recurrence times, the vulnerability, the zonation and the location of conflicting points.

Key words: Cartography, flood area, vulnerability, risk assessment, Inuncat plan, Catalonia.

### 1. INTRODUCCIÓN

La red hidrológica superficial de Catalunya corresponde a un área de 32.000 Km<sup>2</sup> y una longitud de 70.500 Km lineales. Con un clima mayoritariamente mediterráneo de pluviometrías muy irregulares (entre 350 mm y 1.100 mm) y orografía compleja, que comprende la cordillera pirenaica con altimetrías superiores a 3.000 m y el sistema mediterráneo donde destacan los 1.700 m del macizo del Montseny, hacen que en los valles

fluviales sean ocupados, y se produzcan situaciones de riesgo en los asentamientos humanos y los ejes viarios durante los episodios de avenidas extraordinarias. La dinámica hidroclimática presenta normalmente dos comportamientos diferenciados: episodios persistentes de pluviometrías superiores a los 100 mm, de intensidad moderada (entre Diciembre y Mayo), y episodios de pluviometrías de corta duración superiores a 50 mm/h, de gran intensidad (entre Junio y Noviembre).

La red hidrológica se divide a nivel administrativo en dos divisiones de similar extensión: las cuencas internas y las cuencas intercomunitarias. Las cuencas internas comprenden aquellas cuencas hidrográficas que desaguan al Mar Mediterráneo y al Norte de la desembocadura del Río Ebro (área de 16.300 Km<sup>2</sup> y unos 36.900 Km lineales de cursos fluviales). Las cuencas intercomunitarias, con una superficie de 15.700 Km<sup>2</sup> y unos 33.600 Km lineales de red hidrográfica, corresponden básicamente a las cuencas del río Ebro y el río Senia, que desembocan al Mediterráneo, y el río Garona única cuenca en Cataluña que desemboca al Océano Atlántico (figura 1).



Fig. 1: Divisiones administrativas de la red fluvial de Cataluña.

Las ocupaciones anteriormente descritas, han ocasionado a lo largo de la historia grandes inundaciones, entre las que destaca la del 25 de septiembre de 1962, donde el desbordamiento del río Llobregat y del Besòs, causó más de 700 muertos, así como numerosos daños materiales. Finalmente remarcar que el mayor número de avenidas extraordinarias tiene lugar en la Cuencas internas, Pirineo Oriental, con un 74% de los casos históricos reconocidos; donde se concentra la mayor parte de la población de Cataluña (92 %, más de 5,6 millones de habitantes).

El Plan Especial de emergencias por inundaciones de Cataluña (INUNCAT), realizado por Protección Civil en colaboración con diversas administraciones, tiene como principal objetivo hacer frente a las emergencias por inundaciones ocurridas en el ámbito territorial de Cataluña. El principal objetivo del presente documento es describir la metodología aplicada para el análisis de riesgo.

## 2. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

En la presente comunicación se aborda la metodología de trabajo en la delimitación de las zonas inundables (geomorfológica e hidráulica y escalas regional y de detalle). También se describen los trabajos que han permitido realizar un primer inventario y delimitación de los conos de deyección y, la posible interferencia con la reactivación de zonas identificadas con probables movimientos en masa que pudieran ocurrir durante episodios de avenidas extraordinarias para aquellas áreas donde se dispone de la información.

El número de fuentes documentales y/o proyectos utilizados para el análisis ha comportado localmente un cierto solapamiento de informaciones con diferentes grados de resolución propias de sus respectivas escalas cartográficas en origen. Así, se ha seleccionado la información de mayor resolución y menor escala para efectuar el análisis más preciso en cada caso. Por tanto, uno de los objetivos fundamentales de este trabajo ha sido realizar una homogeneización y síntesis de los datos disponibles, incluyendo las áreas delimitadas según criterios geomorfológicos y la información procedente de modelos matemáticos hidrológicos y hidráulicos de los cursos fluviales, para disponer de una cartografía de áreas potencialmente inundables de todo el territorio. Dicha síntesis constituye el punto de partida del análisis de vulnerabilidad de los elementos expuestos y, permite hacer una primera cuantificación de los posibles riesgos de los municipios catalanes.

La metodología comprende el análisis del peligro, el análisis de la vulnerabilidad y el análisis de riesgo. Partiendo de la información procedente de la modelización hidráulica, se realiza una síntesis y homogeneización de la información delimitada con criterios geomorfológicos, con un posterior proceso de estructuración y unificación en una única cobertura que permitirá hacer los análisis espaciales.

### 2. 1. Análisis del peligro

La metodología del estudio de la peligrosidad de la red hidrológica catalana ha incluido la delimitación de las zonas inundables según criterios geomorfológicos, la delimitación según criterios hidráulicos para diferentes períodos de retorno (50, 100 y 500 años) y la determinación de la peligrosidad intrínseca de cada cuenca, tramificando para cada curso, su tiempo de respuesta en caso de avenida.

La información sobre peligrosidad se ha complementado con información de identificación de los puntos negros o conflictivos, estudios de riesgos geológicos disponibles, delimitación de las zonas inundables por posibles roturas de presas y/o embalses y capacidad del drenaje urbano.

#### Delimitación de zonas inundables según criterios geomorfológicos

Para aquellos cursos fluviales donde todavía no se dispone de información hidráulica (que permita determinar la probabilidad de ocurrencia) se ha utilizado información geomorfológica, que sintetiza los umbrales máximos históricos conocidos. En relación con el

análisis geomorfológico se ha delimitado la extensión de las zonas potencialmente inundables a partir de las terrazas cuaternarias, las llanuras de inundación, los conos de deyección, las formaciones deltaicas y las llanuras costeras. Con respecto a los fenómenos geológicos asociados, se han incorporado aquellas vertientes que presentando una probabilidad alta de producir y/o reactivar movimientos de masa puedan experimentar un incremento areal significativo en caso de avenida excepcional.

Para la delimitación de las zonas potencialmente inundables se han considerado las siguientes fuentes documentales (figura 2):

- Geomorfología de detalle (escala 1:5.000) que corresponde al Área Metropolitana de Barcelona, el Noguera Pallaresa, la Noguera Ribagorzana, el Segre bajo, la franja litoral catalana, el Garona y zonas colindantes de campings de Lleida y Girona (ACA).
- Geomorfología Inuncat (escala 1:50.000) que corresponde a las cuencas internas y a las cuencas intercomunitarias (ACA).
- Red hidrográfica y cuencas hidrográficas (escala 1:50.000) se realiza la codificación de todos los cursos de agua y de todos los conos de deyección (ICC).
- Movimientos de masa se ha utilizado el Mapa Geológico Digital de España y el Mapa geológico de España (escala 1:50.000), el Mapa geológico de Catalunya (escala 1:250.000), el mapa de riesgos geológicos de zonas de Alta Montaña inferiores a 2000 m de altura (escala 1:50.000, inédito DPTOP), Mapa Comarcal de Prevención de Riesgos Geológicos (escala 1:50.000, inédito DPTOP), informes técnicos, artículos y publicaciones del ICC y Servei Geològic de Catalunya (ICC, 2006).

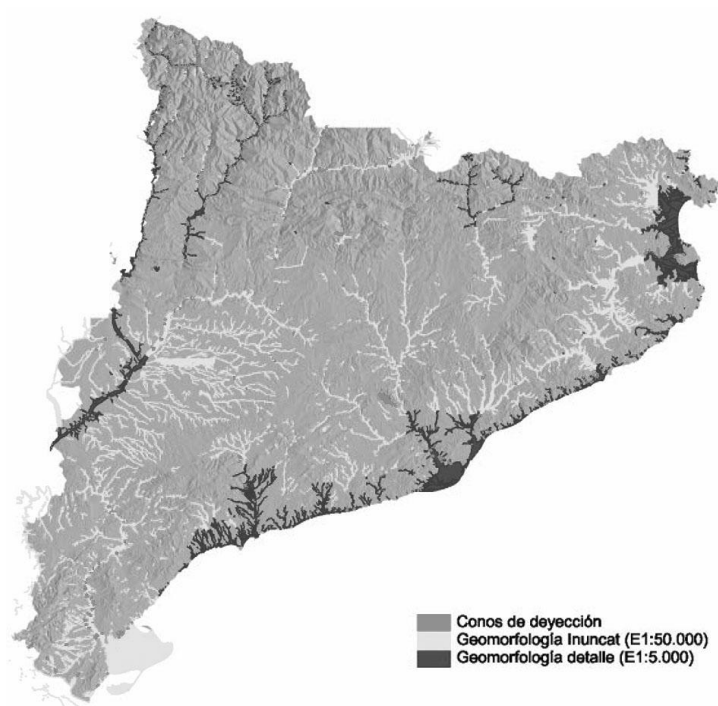


Fig. 2: Fuentes de información correspondientes a la geomorfología.

La delimitación de los conos de deyección ha permitido evaluar los núcleos urbanos y vías susceptibles de sufrir daños por inundaciones (1038 conos identificados de los cuales 584 afectan a 231 municipios catalanes). El mayor número se localiza en el contexto del Pirineo de Lérida (figura 3), y tan sólo 7 de las 41 comarcas de Cataluña, en principio, no se ven afectadas por estos fenómenos.

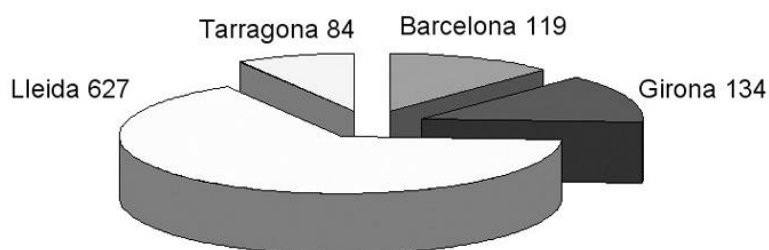


Fig. 3: Número de conos de deyección identificados por provincias.

#### Delimitación de las zonas inundables según criterios hidráulicos

El análisis hidrológico-hidráulico ha consistido en la determinación de los caudales de los ríos asociados a diversos períodos de retorno, para posteriormente hacer la modelización hidráulica para los períodos de retorno de 50, 100 y 500 años. La información generada corresponde a dos escalas de detalle, 1:5.000 y 1:1.000 (figura 4), realizada la primera con un modelo matemático de régimen permanente sobre más de 2.000 km lineales y, la segunda mediante un modelo de régimen variable sobre más de 600 km lineales. A partir de dicha información, se ha generado una cobertura de calados máximos para cada uno de los períodos de retorno.

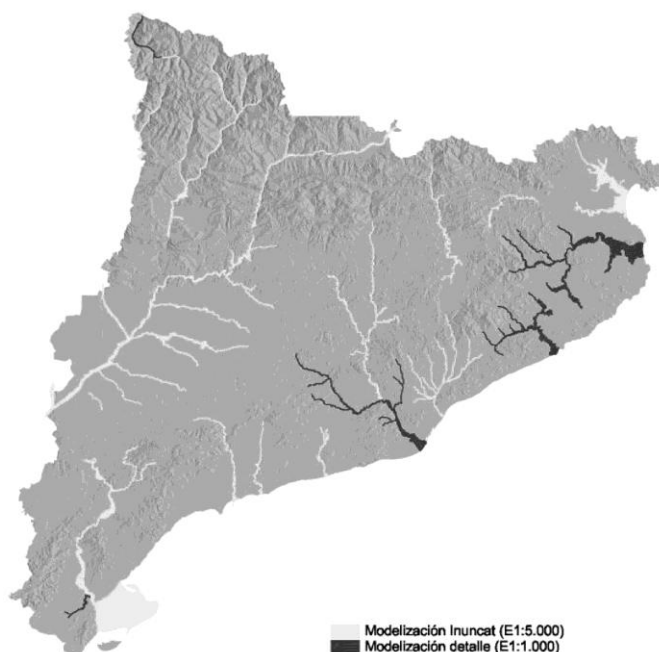


Fig. 4: Nivel de detalle de las modelizaciones.

Para la delimitación de las zonas inundables se han utilizado los siguientes datos de base:

- Base Altimétrica de Catalunya (BDA15) con 15 m de paso de malla se puede alcanzar 1 m de precisión (ICC, 2005) (figura 5).



Fig. 5: Imagen del modelo digital de elevaciones de Cataluña (BDA15).

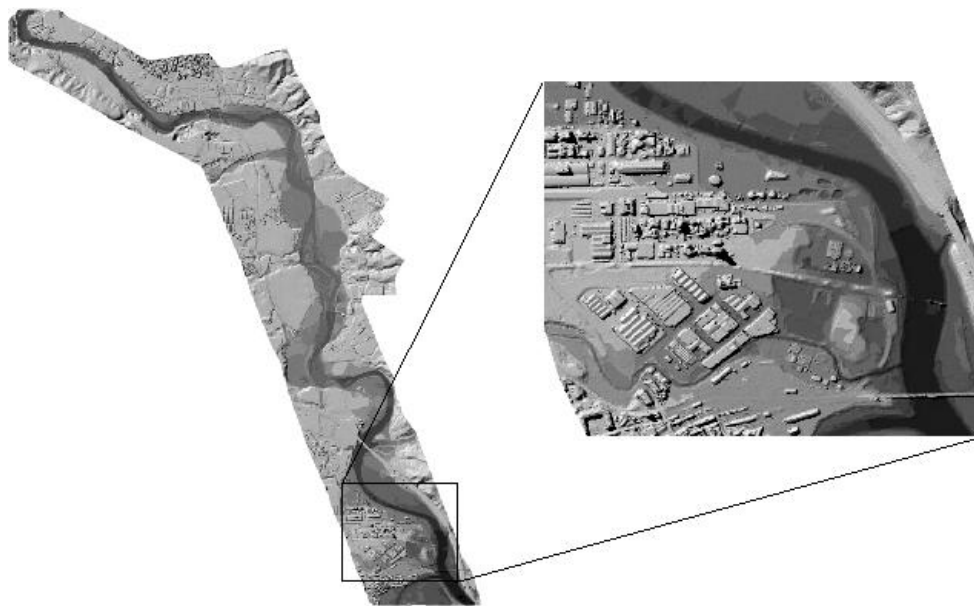


Fig. 6: Ejemplo de zona capturada con LIDAR superponiendo la zona inundable de 500 años.

- PEFCAT, para la modelización hidráulica de los espacios fluviales de Cataluña se ha utilizado el altímetro láser ALTM 3025 (1.680 km lineales y 170.000 ha, figura 6). Con este sensor se puede obtener un DTM Lidar con una precisión de 15 cm que es apoyado por una base de datos de elevaciones con alturas ortométricas de vértices de cuadrícula de 1 m de paso y los levantamientos taquimétricos en 3D georreferenciados de los puentes y obras de fábrica necesarios para la delimitación de las áreas inundables

#### Aspectos adicionales considerados

Otro tipo de datos de interés introducidos en el análisis del peligro de inundaciones corresponde a la localización de los puntos negros, considerando los puntos negros como aquellos lugares que con frecuencia, las lluvias fuertes, las inundaciones o fenómenos de acumulación pueden afectar de forma significativa a las personas, bienes y líneas de vida. Estos puntos tienen una procedencia diversa que comprende desde la ACA y bomberos, hasta la policía autonómica.

Hasta el momento de la redacción del Plan, en julio 2005, se han inventariado 1.852 casos. Básicamente, corresponden a tres tipos de categorías consideradas: estructuras (elementos estructurales cuya funcionalidad puede verse condicionada por una riada), hidráulico (zonas anegadas) y morfodinámico (contempla los fenómenos propios de la dinámica fluvial: erosivos y modelados del terreno). A modo de ejemplo, destacan los 206 puntos negros detectados en la provincia de Girona por Bomberos y los 29 del Área metropolitana de Barcelona.

Además en el Plan también se han considerado otros fenómenos, que se refieren a cambios bruscos del nivel del mar, temporales relacionados con sobre elevaciones del nivel del mar y tsunamis, que pueden provocar ligeras inundaciones tierra dentro:

- cambios bruscos del nivel del mar que se pueden producir en condiciones meteorológicas y geométricas de línea de costa muy determinada (“seixes”). Se ha concluido que el riesgo es mínimo, ya que sólo se han detectado amplitudes de onda de orden decimétrico que han afectado a algunas embarcaciones.
- temporales y sobreelevaciones del nivel del mar que pueden además provocar la dificultad en el desagüe de los principales cursos fluviales. Se ha concluido que el riesgo es elevado y que puede coincidir con episodios de lluvias intensas agravando la situación, por tanto se recomienda que en futuras revisiones del plan debieran ser estudiadas más a fondo.
- una primera valoración cuantitativa de la incidencia de un posible tsunami en las costas catalanas. El tsunami de Argelia de  $M = 6.8$  del año 2003, provocó daños importantes y olas de hasta 2 m en Baleares, en Catalunya los daños fueron inapreciables ya que el nivel del mar solo cambió unos centímetros. No obstante, la configuración de algunas zonas deltaicas y costeras catalanas, con intensa actividad, recomienda evaluar en futuras revisiones la incidencia de tsunamis de alturas moderadas.

## 2.2. Análisis de la vulnerabilidad

El cálculo de la vulnerabilidad determina el grado de daño o pérdida de un elemento expuesto a la ocurrencia de un fenómeno de una determinada magnitud e intensidad. Existen diversos factores que permiten evaluar los daños o pérdidas provocados por una inundación, entre los que destacan el calado o altura de agua, la velocidad, la duración del evento, la concentración de sedimentos (WHITE, 1945). Éste análisis debe completarse con información referente a variables sociales y económicas, variables relacionadas a las infraestructuras, a la alerta y a la respuesta de la población (PENNING-ROUSELL and FORDHAM, 1994).

Partiendo de los datos de análisis de peligro obtenidos de la fase anterior, se ha optado por escoger el calado de agua como factor principal en el análisis de vulnerabilidad.

La determinación del grado de vulnerabilidad se ha evaluado en función de:

Valoración de pérdidas monetarias, se han evaluado los daños tangibles directos a nivel municipal, refiriéndolos a una curva de daños-calado del agua. Dicha curva representa la relación entre el calado del agua y los costos de los daños para cada tipo de uso del suelo. El tipo de uso del suelo se ha expresado como un precio por unidad de área, hecho que ha implicado conocer el valor económico del elemento.

Los tipos de usos del suelo que se han diferenciado a la hora de realizar la valoración han sido, viviendas, zonas industriales y comerciales, camping y zonas agrícolas. Para cada topología de uso se ha aplicado una curva de daños-calado del agua específica.

En el caso de viviendas se han empleado las curvas de “Economic Guidance Memorandum (EGM) 01-03” de la USACE, para zonas industriales, comerciales y camping, las curvas de daños genéricas elaboradas por FEMA (Federal Emergency Management Agency). Para zonas agrícolas, la estimación de daños se ha realizado a partir de estadísticas de rendimientos agrarios y de primas base de seguros.

El proceso ha consistido en evaluar para cada celda (de 5 m) el valor correspondiente de peligrosidad, combinando la información referente a los distintos periodos de retorno con los calados del agua. La valoración final de pérdidas se ha realizado a partir de las curvas de daños y las valoraciones monetarias establecidas según la tipología del uso. El balance a nivel municipal ha consistido en la suma de los resultados para cada uno de los municipios.

De los resultados finales generados se obtiene que las mayores pérdidas monetarias se localizan en los municipios de Tortosa, Barcelona y Prat del Llobregat.

Estimación de la población ubicada en áreas inundables. Se han estimado el número de personas que pueden encontrarse en zona inundable. El recuento de la población se ha realizado a partir de datos del Instituto de Estadística de Cataluña. Los municipios con mayor número de habitantes afectados por inundaciones son Barcelona, Tortosa y Castelló d’Empúries.

Estimación de los kilómetros de vías de comunicación susceptibles a inundarse, se ha cuantificado la longitud total de vías afectadas por calados superiores a 0,3 metros, valor considerado crítico para la circulación rodada de vehículos. Los municipios con una mayor afección de sus infraestructuras corresponden a Amposta, Tortosa y Deltebre.



Para la delimitación de los elementos vulnerables se han utilizado los siguientes datos de base:

- Mapa de usos del suelo, corresponde a una categorización de los usos de 1997, con 15 m de paso de malla, realizado a partir de imágenes multitemporales captadas por el sensor Thematic Mapper y el satélite Landsat (ICC).
- Mapa de la superficie urbanizada generada por el DMA a partir del topográfico 1:250.000 del ICC y otras fuentes.

### 2.3. Análisis del riesgo de inundación

Se entiende el riesgo como el grado de pérdidas esperadas a personas, propiedades e infraestructuras debido a la exposición a un determinado peligro en una determinada área y período de tiempo. Por tanto, la asignación del nivel de riesgo requiere del análisis previo del peligro y de la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

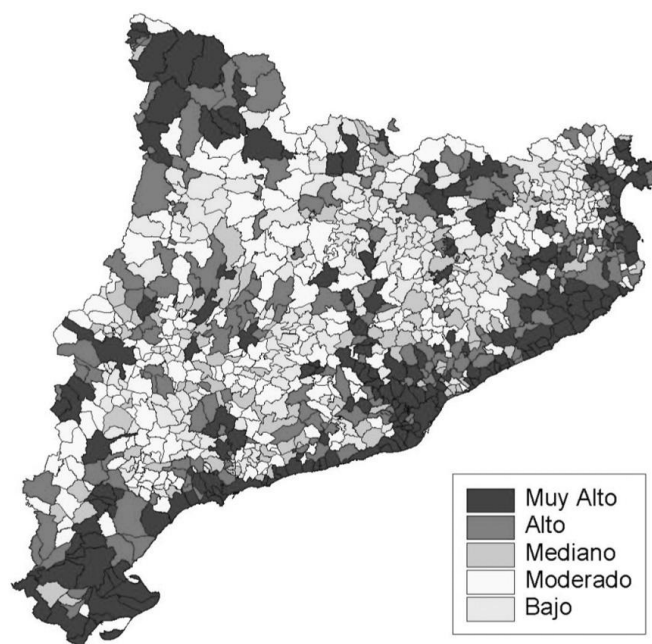


Fig. 7: Riesgo municipal frente a las inundaciones.

El análisis de riesgo de inundación se ha efectuado a dos niveles:

En un primer nivel se ha caracterizado el riesgo de inundación que corresponde a cada uno de los elementos existentes en el territorio, a partir de la clasificación establecida en la Directriz Básica de Inundaciones, que establece el nivel de riesgo de cada elemento en función del periodo de retorno o probabilidad de ocurrencia y del nivel de daños producidos (clases A, B y C). En el análisis efectuado se ha diferenciado el riesgo de inundación al que están sometidas las edificaciones y las personas; se ha utilizado para ello rangos de calados del agua distintos para parametrizar los daños.

En un segundo nivel se ha caracterizado el riesgo para el conjunto del municipio. a partir del valor de distintos factores entre los que destacan la clasificación del nivel de riesgo de los elementos del territorio, los cálculos realizados para la evaluación de la vulnerabilidad (pérdidas monetarias, personas ubicadas en áreas inundables, longitud total de vías de comunicación posiblemente afectadas) y parámetros relativos a la peligrosidad de las cuencas. A partir de la conjunción de los valores de las variables anteriores a nivel municipal, se ha procedido a clasificar los municipios en función del riesgo (figura 7). La distribución de los municipios en función del riesgo, es la siguiente: riesgo muy alto (200), riesgo alto (180), riesgo medio (108), riesgo moderado (260) y riesgo bajo (198).

A partir de los resultados anteriores, de clasificación del nivel de riesgo, se ha elaborado una lista de municipios que deben elaborar el plan de actuación municipal por inundaciones. Atendiendo a la obligatoriedad o no de elaboración del plan de actuación municipal se establece la siguiente clasificación de municipios: municipios obligados a elaborar PAM: 501 (riesgo municipal muy alto, alto y medio), municipios a los que se recomienda elaborar PAM: 252 (riesgo municipal moderado) y municipios que no deben elaborar PAM: 193 (riesgo municipal bajo).

### 3. CONCLUSIONES

Los diferentes tipos de análisis se han realizado gracias a la utilización de un Sistema de Información Geográfico basado en tecnología Esri, que además compila todo el conjunto de datos cartográficos disponibles (UTM31 ED50).

Con el fin de facilitar la consulta y difusión de la información, algunos de los datos obtenidos en el análisis se han integrado en un visor de distribución gratuita (figura 8). Entre los datos disponibles en el visor destacan los siguientes:

- Zonas potencialmente inundables según criterios geomorfológicos donde no existe modelo hidráulico Escala 1:50.000 (incluye formas lacustres, litoralesn y conos de deyección).
- Zonas inundables obtenidas del modelo hidráulico para los periodos de retorno 50, 100 y 500 años.
- Puntos negros (localización, tipología y personal que ha realizado el inventario).
- Catálogo de imágenes en formato Mpsid Lizardtech, topográficos y ortofotomapas escala 1:50.000 y 1:25.000.

El presente estudio ha permitido realizar una primera cuantificación del riesgo de inundación de los municipios catalanes, a partir del cual se han establecido las acciones de autoprotección y de actuación adecuadas en cada caso.

Así se ha obtenido una estimación de las zonas potencialmente inundables, que atendiendo a criterios geomorfológicos implicaría que un 6,28% del área total de Cataluña es susceptible de ser afectada por inundaciones. Atendiendo al mismo criterio, la provincia de Cataluña más afectada es Tarragona, con 1,96% de extensión susceptible de inundarse. Finalmente, se constata que la franja litoral catalana, donde se concentra la mayor parte de la población sobre algunas llanuras deltaicas, es la que se ve más afectada.

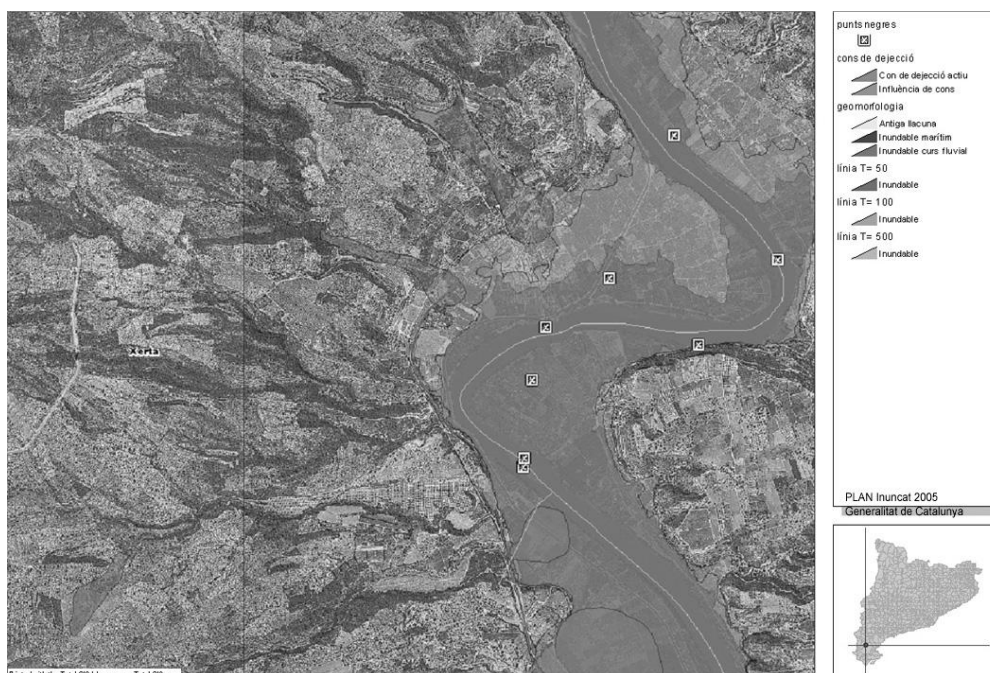


Fig. 8: Ejemplo de visualización de la delimitación de zonas inundables, elementos geomorfológicos, conos de deyección y puntos negros.

#### 4. AGRADECIMIENTOS

A todas las personas, organizaciones e instituciones que han participado en la elaboración del Pla Especial d'Emergències per Inundacions de Catalunya. Toda la información incluida en este resumen forma parte de la memoria del citado plan.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

- ACA (2002). *Delimitació de zones inundables per a la redacció de l'Inuncat, conques Internes de Catalunya*. Generalitat de Catalunya.
- ACA and CONFEDERACIÓ HIDROGRÀFICA DE L'EBRE (2002). *Delimitació de zones inundables per a la redacció de l'Inuncat, conques Intercomunitàries*. Generalitat de Catalunya.
- DEFRA (2003). *Flood Risks to people. R&D Technical Report FD 2317/TR*. ISBN 1844321355. 114 pp.
- EMERGENCY MANAGEMENT AUSTRALIA (2002). *Disaster Loss Assessment*.
- FEMA (2003). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Flood Model. HAZUS MH*. 22 pp.
- ICC (2005). *Base d'elevacions de Catalunya (BDA15)*. Fitxer digital. Institut Cartogràfic de Catalunya. Generalitat de Catalunya.
- ICC (2006). Sistema de gestió documental. Llibreria d'arxius tècnics de la Unitat de Geologia. Institut Cartogràfic de Catalunya. Generalitat de Catalunya.

- LATORRE, X. (1998). *Història de l'Aigua*. Ed l'Abecedari.
- MELBOURNE WATER (2003). *Guideliness for Development in flood-prone areas*.
- PENNING-ROUSEL, E., FORDHAM, M. (1994). *Floods Across Europe Hazard Assessment, Modelling and Management*. ISBN 1898253013. Middlesex University Press, Middlesex, 214 pp.
- PLA ESPECIAL D'EMERGÈNCIES PER A INUNDACIONS (INUNCAT). Aprobado por la Generalitat de Catalunya el año 2005 y en la actualidad, Abril de 2006, en proceso de homologación del Ministerio del Interior.
- USACE (2000). *EGM 01-03, Generic Depth-Damage Relationships*.
- WHITE, G.F. (1945). *Human Adjustements to Floods. A Geographical Approach to the Flood Problem in the United States*. Doctoral Dissertation and Research paper no. 29. Dept. of Geography, University of Chicago.