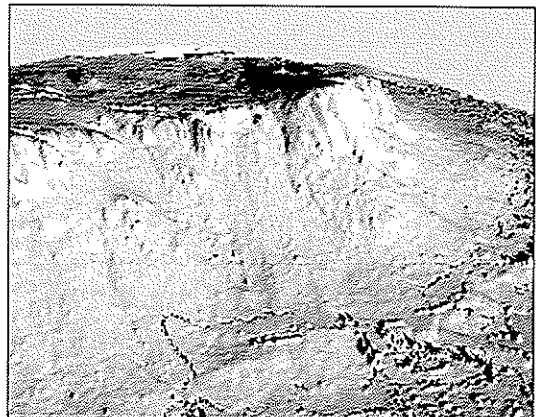


## CAPÍTULO 3

# UTILIZACIÓN DE LOS SIGs EN EL ANÁLISIS DEL RIESGO DE INUNDACIÓN EN EL ALTO ALBERCHE (CUENCA DEL TAJO)

*Andrés Díez Herrero*





# UTILIZACIÓN DE LOS SIGs EN EL ANÁLISIS DEL RIESGO DE INUNDACIÓN EN EL ALTO ALBERCHE (CUENCA DEL TAJO)

Por ANDRÉS DÍEZ HERRERO (\*)

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Los Sistemas de Información Geográfica (SIGs)

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un conjunto de herramientas para la adquisición, almacenamiento, análisis y edición de información espacial, que se estructura internamente como un sistema gestor de bases de datos georreferenciados.

Estas cuatro funciones básicas de los SIGs pueden realizarse de forma manual o automática (empleando máquinas como los ordenadores), y utilizando información análoga a la realidad (analógica) o codificada en forma de dígitos (digital), lo que nos da lugar a los cuatro diferentes tipos de sistemas. Por su mayor versatilidad, precisión y capacidad de cálculo, actualmente los SIGs más utilizados son automáticos y digitales.

Además, y en combinación con lo anterior, existe la posibilidad de concebir la realidad espacial desde dos modalidades o modelos de datos: vectorial, basada en elementos como los puntos, líneas o polígonos; y matricial, dividiendo el espacio en una retícula formada por celdillas o teselas (*picture elements* o *pixels*).

La adquisición de datos en los SIG digitales se denomina digitalización, y puede realizarse mediante vectorización (modelos vectoriales), barrido óptico (modelos matriciales) o teclado (principalmente datos alfanuméricos). El almacenamiento se realiza en estructuras de

datos, variables igualmente según la modalidad y grado de complejidad, y que abarcan desde las conocidas arco-nodo (vectorial) a los árboles cuaternarios (matricial).

El análisis se verifica mediante las denominadas operaciones, conjunto de herramientas que permite obtener nueva información a partir del tratamiento de los datos adquiridos. A grandes rasgos se diferencian cuatro conjuntos (Aronoff, 1989): búsqueda, reclasificación y medición; superposición o álgebra de mapas; vecindad o contexto; y contigüidad. Dentro de ellas existen innumerables funciones de análisis específico.

Por último, la edición de resultados se basa en la presentación de la salida de las operaciones de análisis, que puede ser de tipo cartográfico (composiciones para visualización o impresión), gráfico (univariado o multivariado) o mediante tablas de datos alfanuméricos (senillas o cruzadas).

### 1.2. Aplicaciones de los SIGs en Hidrología y Análisis de Riesgos

La Hidrología, como disciplina estrechamente vinculada al territorio y con variables y parámetros de fuerte componente espacial, ha utilizado los SIGs prácticamente desde su origen. Las principales aplicaciones se han desarrollado en el campo de la evaluación y gestión de los recursos hídricos (Cabezas y Vera, 1994; Estrela *et al.*, 1996), o el estudio de la calidad de las aguas; sin embargo, también se han utilizado con profusión en la evaluación de la magnitud y frecuencia de crecidas, en especial combinados con modelos hidrológicos e

(\*) Facultad de Biología. Universidad Internacional SEK. C/ Cardenal Zúñiga, s/n. 40.003 SEGOVIA

hidráulicos. Como bien señala Estrela (1994), existen dos posibilidades en el uso combinado de los modelos y SIG, lo que aplicado a modelos para el estudio de eventos extremos (crecidas) nos permite:

- a) Utilizar el SIG únicamente para regionalizar, agregar y/o calcular las variables y parámetros del modelo, utilizando los resultados como entradas al mismo (Baskar *et al.*, 1992). Sirvan como ejemplos la aplicación GISPLU sobre Idrisi (Ferrer y Ardiles, 1994; Menéndez *et al.*, 1996), y de la obtención del número de curva distribuido mediante Idrisi (CEDEX, 1994; Ferrer *et al.*, 1995) o Ilwis (Díez y Pedraza, 1997a). Incluso han llegado a desarrollarse módulos específicos para los programas de aplicación SIG que facilitan el cálculo de los parámetros necesarios en la modelización, como es el caso del menú hidrológico dentro de la extensión de análisis espacial para ArcView GIS (Kopp, 1998), o los módulos de SIPH sobre Arc/Info para HEC-1 y HEC-2 (Ortiz y Calle, 1997).
- b) Aplicar las ecuaciones del modelo en cada elemento de la cobertura SIG mediante las funciones propias del mismo, esto es, integrar ambos. Algunos modelos hidrológicos llevan implícita la distribución de parámetros y variables, por lo que son fácilmente adaptables al trabajo con SIG; es el caso de MIKE-SHE (*Danish Hydraulic Institute*), COE-HEC y HMS (HEC). Otros necesitan programación para ser integrados, como los modelos: PALANCIA (integración de Hidrograma Unitario e Idrisi; CEDEX, 1994), GISPLANA (integración de PLANA y GRASS; Estrela y Quintas, 1996), CASC2D (integración de onda cinemática y GRASS), y otras integraciones de HEC-1 con Genamap (Genasys), HEC-2 con Arc/Info (EPTISA) y HEC RAS con ArcView GIS (Buntz, 1998). Véase al respecto la recopilación de Francés (1994).

La integración de modelos matemáticos en los SIG puede facilitar la simulación, ya que se acelera el análisis espacial de variables y parámetros, permitiendo combinar datos distribuidos y agregados. El inconveniente actual pasa por que los SIG no tienen representación explí-

cita de la variable tiempo en las estructuras de datos, necesaria para la modelización de hechos dinámicos; esto se puede solventar a través del propio modelo cuando éste es sencillo. En este sentido será de enorme utilidad el uso de series temporales de datos incorporables a los modelos.

Una tercera vía pasa por usar el programa de aplicación SIG para realizar operaciones de tratamiento de imágenes procedentes de teledetección espacial, tales como imágenes del satélite LANDSAT, sensor *Thematic Mapper* (Speed, 1994; Gardner, 1994). Mediante su análisis pueden extraerse conclusiones acerca de los daños y afecciones de las inundaciones, y priorizar las medidas correctoras a aplicar (Rosenfeld, 1994; Bocco *et al.*, 1995); e incluso estimar la avenida máxima probable en una cuenca (Mettel, 1992) o parámetros meteorológicos de interés hidrológico (modelos BSWB e IFFA; Barrett, 1996).

Algo semejante ocurre con la aplicación de los SIGs al análisis de riesgos, si bien es cierto que el mayor desarrollo de estas herramientas se ha centrado únicamente en la introducción, almacenamiento y edición de la información espacial (mapas de peligrosidad, vulnerabilidad o exposición), desperdiciando las potencialidades para su uso en el análisis de la información. De esta forma, la utilización de los SIGs queda restringida a su capacidad como soporte de cartografía automática o, como mucho, a sus funciones de búsqueda selectiva de información por su componente temática y/o espacial; es el caso de la base de datos paleohidrológicos Paleotagus (Benito *et al.*, 1996; Díez-Herrero *et al.*, 1998).

Las verdaderas potencialidades del análisis SIG para la evaluación de riesgos naturales parten de la correlación espacial, esto es, el conocimiento de la repetición en otros elementos del territorio de objetos con determinados valores umbral para las variables que controlan el desencadenamiento de los fenómenos naturales (peligrosidad); así como el cruce (mediante álgebra de mapas) de estas áreas con los bienes y personas expuestos al riesgo y vulnerables al mismo (Emani, 1996).

Igualmente, pueden integrarse modelos específicos para determinados tipos de riesgos o peligrosidades naturales, de semejante manera a como se realizaba en el análisis hidrológico de eventos de crecida. De esta forma surgen las aplicaciones para la evaluación de la peligrosidad de: movimientos gravitacionales en taludes mediante SPANS (Grupo de trabajo del Dpto. de Geodinámica de la Univ. de Granada) o mediante Ilwis (Carrasco, 1997); aludes en el Pirineo Central (Panticosa; ITGE); y el análisis del riesgo volcánico mediante modelos de flujo lávico integrados en Ilwis (Tenerife; F. Gómez). En el caso particular del análisis del riesgo de inundaciones, existen experiencias al respecto para: el sector oeste de la ciudad de Málaga con Arc/Info (Dpto. de Geografía de la Univ. de Málaga), vega baja del Júcar con GISPLANA (Estrela y Quintas, 1996), cuenca del río Francolí con Arc/Info (Pujadas *et al.*, 1997) y Navaluenga con Ilwis (Díez y Sanz, 1998).

### 1.3. Planteamiento de la problemática y objetivos del estudio

La cuenca alta del río Alberche, decimoquinto afluente del Tajo por su margen derecha, se sitúa en las estribaciones del sector oriental de la Sierra de Gredos, entre las alineaciones montañosas de La Serrota-Paramera y la Sierra del Valle (provincia de Ávila, Castilla y León). Con una superficie de más de mil kilómetros cuadrados, esta cuenca, y hasta el embalse de El Burguillo (El Tiemblo), no presenta ningún tipo de regulación artificial de los caudales fluviales digna de ser reseñada, por lo que puede considerarse básicamente en régimen natural.

El río Alberche y varios de sus afluentes (Astillero, Gaznata, etc.) presentan un característico régimen nivo-pluvial, con importantes eventos de crecida concentrados entre los meses de septiembre y mayo, que producen inundaciones en sus riberas con una periodicidad casi anual (Díez y Pedraza, 1997b). Precisamente en las márgenes de las corrientes principales se concentra el mayor número de bienes y personas expuestas al riesgo de inundación y, en ocasiones, con alta vulnerabi-

lidad intrínseca. Entre las poblaciones expuestas destaca el casco urbano de Navaluenga (2.000 habitantes), con un importante desarrollo económico en torno al sector turístico y una población flotante que en período estival supera los 10.000 habitantes (Díez y Sanz, 1998). Inundaciones acaecidas en el período histórico e incluso en fechas recientes, han producido importantes pérdidas económicas y sensación de inseguridad en la población local.

A la vista de esta problemática, los objetivos de los estudios que se están llevando a cabo en la cuenca alta del río Alberche, y en particular en Navaluenga, se concretan en la caracterización espacio-temporal de las causas y efectos de las inundaciones para la adopción de medidas de carácter preventivo, así como el análisis de situaciones de emergencia para su inclusión en los planes de protección civil y la aplicación de medidas correctoras.

Dentro del desarrollo metodológico utilizado para la consecución de dichos objetivos, una herramienta básica ha sido la utilización de los sistemas de información geográfica. La combinación de los modelos hidrológicos e hidráulicos que se utilizan en la estimación de la peligrosidad de inundación con los SIGs, se ha realizado mediante la primera de las posibilidades contempladas por Estrela (1994), esto es, utilizando los SIGs de forma puntual en la evaluación de parámetros y variables, y no integrando las ecuaciones del modelo en el SIG. Con ello se pierde cierta capacidad de cálculo y simulación, pero se gana en flexibilidad y capacidad de innovar e introducir nuevas aplicaciones, que de ceñirnos al modelo integrado sólo pueden solventarse mediante nueva programación informática.

## 2. ADQUISICIÓN Y ALMACENAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Atendiendo al orden lógico de las cuatro funcionalidades básicas de los sistemas de información geográfica, la primera operación a realizar para la utilización de los SIGs será la adquisición de la información espacial, introduciendo al sistema los datos existentes sobre la zona de estudio, así como adoptando un sis-

tema cuya estructura de almacenamiento de la información y modalidad de datos sean acordes a las necesidades de análisis y edición que se requieren en el estudio.

### 2.1. Tipología y características del sistema de información geográfica

Con objeto de facilitar el manejo de la información, agilizar los cálculos a realizar en las operaciones de análisis, y optimizar las salidas gráficas de los resultados, se utilizará un sistema de información geográfica digital y automático. De esta forma, el programa informático de aplicación elegido por su versatilidad, sencilla utilización y adecuada combinación de las modalidades matricial y vectorial fue ILWIS, *The Integrated Land and Watershed Information System*, en su versión 1.41 para MS-DOS, comercializado por ITC (Holanda); la licencia pertenece al Departamento de Geodinámica de la UCM. De forma subsidiaria se empleará otro programa de aplicación, IDRISI 2.0 *for Windows*, comercializado por Clark Labs (Estados Unidos), cuya licencia pertenece al Dpto. de Medio Ambiente de la UEM.

El soporte informático físico sobre el que se ejecutará el programa será un ordenador personal con procesador Pentium II, al que se acoplan diversos periféricos de entrada y salida, como una tableta digitalizadora Calcomp (modelo *Drawing Slate II*, tamaño A-3), una impresora LaserJet 5L y un trazador gráfico DesignJet 350C (Hewlett Packard).

### 2.2. Fuentes de datos espaciales

Las fuentes de datos utilizadas como información de entrada al sistema, así como los organismos de los que proceden, son las siguientes:

#### \* Cartografía básica y temática

- Mapa topográfico a escala 1:200.000 de la provincia de Ávila (IGN).
- Mapa de suelos de Castilla y León a escala 1:400.000 (Junta de Castilla y León).
- Mapa de cultivos y aprovechamientos a escala 1:200.000 de la provincia de Ávila

(Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación).

- Mapa de las Series de Vegetación de España, escala 1:400.000 (ICONA, MAPA).
- Mapa de la cuenca alta del río Alberche y de las divisorias de sus subcuencas.
- Plano parcelario a escala 1:1.000 del municipio de Navalunga, completado con datos de puntos acotados obtenidos del plano 1:500 (Ministerio de Hacienda).
- Plano de las categorías del suelo de Navalunga (Normas Subsidiarias)
- Plano con el trazado de las principales líneas de servicio (conducciones de agua, energía eléctrica y teléfono) de Navalunga (Normas Subsidiarias).
- Plano de situación de los perfiles transversales realizados en el modelo hidráulico (Díez y Santos, 1998).

#### \* Información alfanumérica y tabular

- Situación de las estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca alta del río Alberche y su entorno (Instituto Nacional de Meteorología).
- Resultados del análisis estadístico de las precipitaciones máximas diarias calculadas para las estaciones meteorológicas (Díez y Pedraza, 1997a).
- Tablas para la obtención del número de curva según el método del *Soil Conservation Service* (USDA, EE.UU.).
- Tablas de conversión de las clases de cultivos y aprovechamientos a clases hidrológicas de vegetación, según su estado fenológico.
- Encuestas de campo a los habitantes de las márgenes del río Alberche en Navalunga (alumnos de 2º curso de CC. Ambientales, UEM).

### 2.3. Adquisición y almacenamiento de los datos

La introducción de la información cartográfica en el sistema se realizó básicamente por digitalización mediante vectorización de los diversos mapas y planos empleando la tableta digitalizadora y el cursor, y representando los objetos que contienen como coberturas vectoriales de puntos, líneas y polígonos, según sus

dimensiones en las correspondientes escalas. Para ello, ILWIS 1.41 dispone de un módulo de digitalización, que se completó con el empleo del programa CartaLinx Data Boulder ver. 1.0 de Clark Labs (Estados Unidos). El almacenamiento se verifica en estructuras vectoriales simples, como *spaguetti* o diccionario de vértices, ya que no se precisan relaciones topológicas que harían necesario el empleo de estructuras de tipo arco-nodo (CartaLinx).

La información alfanumérica y tabular se introdujo mediante teclado de los valores, siendo añadidos a las coberturas vectoriales como datos georreferenciables. Su almacenamiento en el sistema se realiza como bases de datos alfanuméricas con sistemas gestores de tipo relacional.

### 3. OPERACIONES EN EL ANÁLISIS DE LOS DATOS

Una vez introducida y convenientemente almacenada la información, se procede a aplicar las operaciones de análisis necesarias para la obtención de resultados útiles a los objetivos del proyecto.

#### 3.1. Regionalización de parámetros meteorológicos desde datos puntuales

A partir de la cartografía básica de la cuenca, y empleando la situación de las estaciones meteorológicas, se procedió a la regionalización de parámetros meteorológicos tan importantes en el cálculo hidrometeorológico de caudales de crecida, como la precipitación máxima diaria. Para ello se empleó el denominado método de Thiessen modificado, combinación del clásico método de los polígonos de Thiessen y el método de las isoyetas.

Los programas de aplicación disponen de comandos específicos para el trazado de las áreas de influencia de cada estación (representada como un punto) en forma de polígonos de Thiessen (THIESSEN en Idrisi); utilizando éstos se realizó una cobertura vectorial de polígonos. Esta cobertura se rasterizó para transformarla a modalidad matricial, con un tamaño de

celdilla de 200x200 m, aplicando a cada polígono el valor de precipitación correspondiente a cada estación para un determinado período de retorno (Díez y Pedraza, 1997a).

Por otro lado, se rasterizó la cobertura de puntos de situación de las estaciones y se introdujeron como valores de las celdas los datos de precipitación máxima diaria para los diferentes períodos de retorno calculados (Díez y Pedraza, 1997a). A esta cobertura matricial se aplicó una función de interpolación de valores, obteniéndose un mapa con la distribución de las precipitaciones máximas diarias en toda la cuenca y su entorno.

Se cruzaron las dos coberturas matriciales (Thiessen e interpolada) mediante álgebra de mapas con funciones aritméticas para obtener los valores de precipitación modificados. Finalmente, esta cobertura matricial se vectorizó para obtener un mapa de isolíneas de precipitación máxima diaria para cada período de retorno (figura 1).

#### 3.2. Obtención de parámetros morfométricos de la cuenca y red desde el MDT

Tomando la cobertura vectorial de las isohipsas digitalizadas a partir del mapa topográfico a escala 1:200.000, se procedió a su rasterización (*pixel* de 200x200 m), asignando a las celdas correspondientes el valor de cota de la isohipsa respecto al nivel del mar. Estos valores se interpolaron para obtener un modelo digital del terreno (MDT), con la distribución de cotas de toda la cuenca alta del río Alberche.

A partir del MDT, y en combinación con los mapas de la cuenca y subcuencas, se pudieron realizar operaciones de análisis de superficies, como el cálculo de medidas y parámetros morfométricos de interés hidrológico (área, altura media, curva hipsométrica, etc.), entre los cuales destacan la posibilidad de realizar perfiles longitudinales de las corrientes fluviales y la obtención de un mapa de pendientes de la cuenca (figura 2). Las medidas morfométricas básicas como el área de cada subcuenca resultaron fundamentales para los métodos hidro-

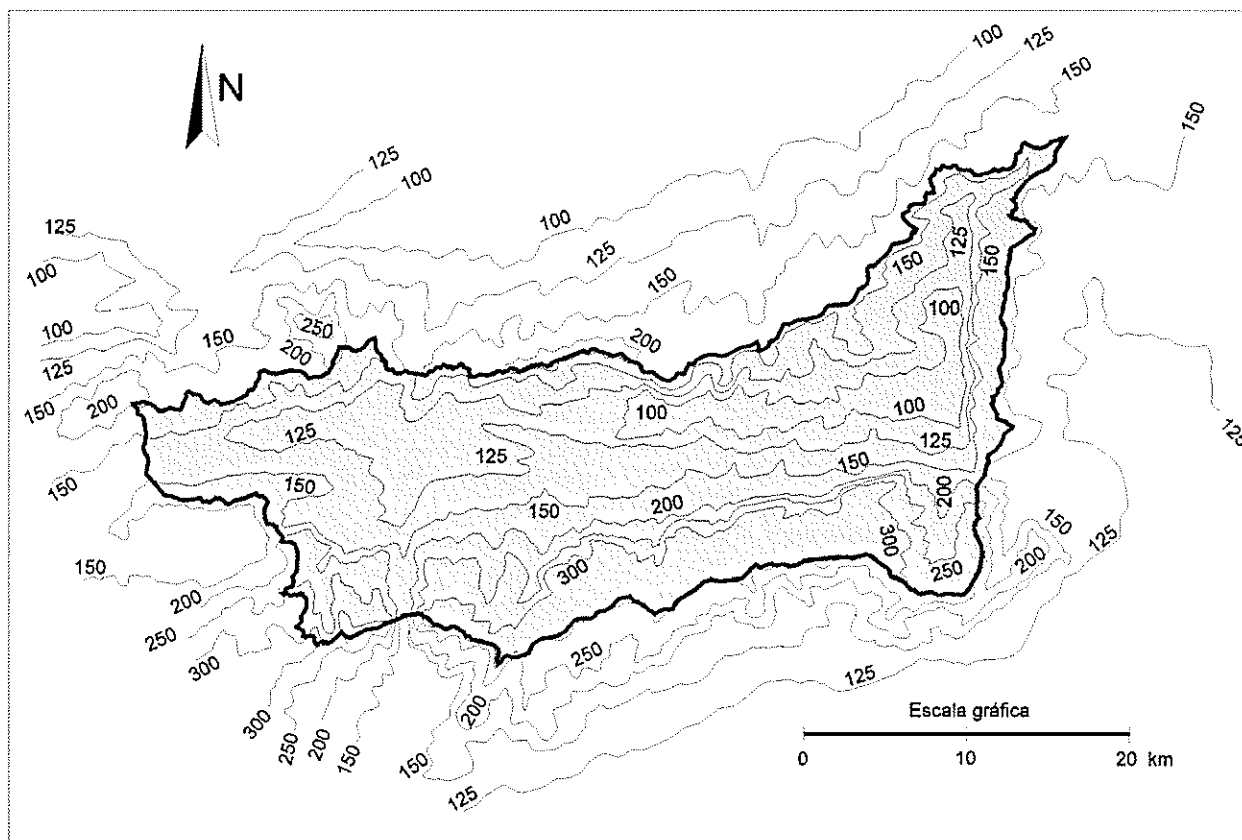


Figura 1

Mapa de las isoyetas de precipitaciones máximas diarias, para un período de retorno de 500 años, en la cuenca alta del río Alberche; los datos de precipitación aparecen en mm de altura, y la cuenca del río Alberche sombreada. Tomado de Díez y Pedraza (1997a).

meteorológicos y en la estimación de parámetros del método racional modificado ( $K_A$ , de Témez).

### 3.3. Discretización espacial de parámetros hidrológicos

Para la utilización de los métodos hidrometeorológicos más difundidos, como el método racional o el hidrograma unitario, en el cálculo de caudales de crecida era preciso la obtención de un parámetro hidrológico de enorme importancia: el umbral de escorrentía. Entre las diversas metodologías existentes, se optó por aplicar la propuesta del *Soil Conservation Service*, que tan sólo precisa tres variables de entrada: la pendiente del terreno, el tipo hidrológico de suelo y la clase de vegetación y/o cul-

tivo. Los valores del número de curva (correspondiente a un determinado umbral de escorrentía) para cada posibilidad de cruce de las variables se encuentran tabulados, lo que ofrece la posibilidad de utilizar sistemas de información geográfica en su estimación.

De esta forma, y utilizando la metodología propuesta por Ferrer *et al.* (1995) ligeramente modificada, se realizaron operaciones de reclasificación a las coberturas de pendientes, suelos, y cultivos y aprovechamientos (éstas dos últimas previamente rasterizadas), y se cruzaron aplicando álgebra de mapas con una operación aritmética (producto). En la codificación de las clases se utilizaron números primos para evitar posibles duplicaciones de resultados, que fueron convertidos a valores de número de curva mediante una tabla de con-





Figura 2

Mapa de pendientes de la cuenca alta del río Alberche, reclasificadas según los criterios del *Soil Conservation Service* para la obtención del umbral de escorrentía; en amarillo, la divisoria de la cuenca, en rojo las zonas con pendiente menor o igual a tres por ciento, y en blanco las zonas de pendiente mayor del tres por ciento.

tingencia y transformados a umbral de escorrentía mediante una nueva función aritmética en la que se introdujo la fórmula de conversión (figura 3). La modificación metodológica consistió básicamente en la utilización de diferentes tablas de reclasificación del mapa de cultivos y aprovechamientos para los distintos meses, en función del estado fenológico de la vegetación durante el período en el cual se producen las crecidas en la cuenca (septiembre-mayo).

Una vez discretizados los valores del parámetro umbral de escorrentía, se agregaron a dos escalas diferentes (cuenca completa o subcuencas) para su aplicación en el cálculo de caudales mediante los métodos hidrometeorológicos agregados.

### 3.4. Estimación de áreas inundables y calados para diferentes períodos de retorno

Una vez calculados los caudales esperables para cada período de retorno al paso del río Alberche por Navalunga, se procedió a la esti-

mación hidráulica de calados y velocidades (Díez y Sanz, 1998). Para ello se utilizaron modelos en régimen estacionario gradualmente variado para flujo unidimensional (HEC-2 y HEC-RAS), que nos ofrecieron resultados de cotas alcanzadas por los distintos caudales en determinadas secciones transversales al canal.

El trazado de dichas secciones fue introducido al SIG como una cobertura vectorial de líneas y posteriormente rasterizado, asignando a cada celda el correspondiente valor de la cota alcanzada para cada caudal. Esta cobertura matricial se interpoló, obteniéndose un modelo digital de elevaciones de la lámina de agua para cada caudal correspondiente a cada período de retorno.

Por otro lado, las isohipsas y cotas singulares del plano parcelario de Navalunga que se habían digitalizado en una cobertura vectorial, fueron rasterizadas e interpoladas para obtener un MDT del casco urbano con un tamaño de celdilla de 1x1 m y una precisión altitudinal centimétrica.

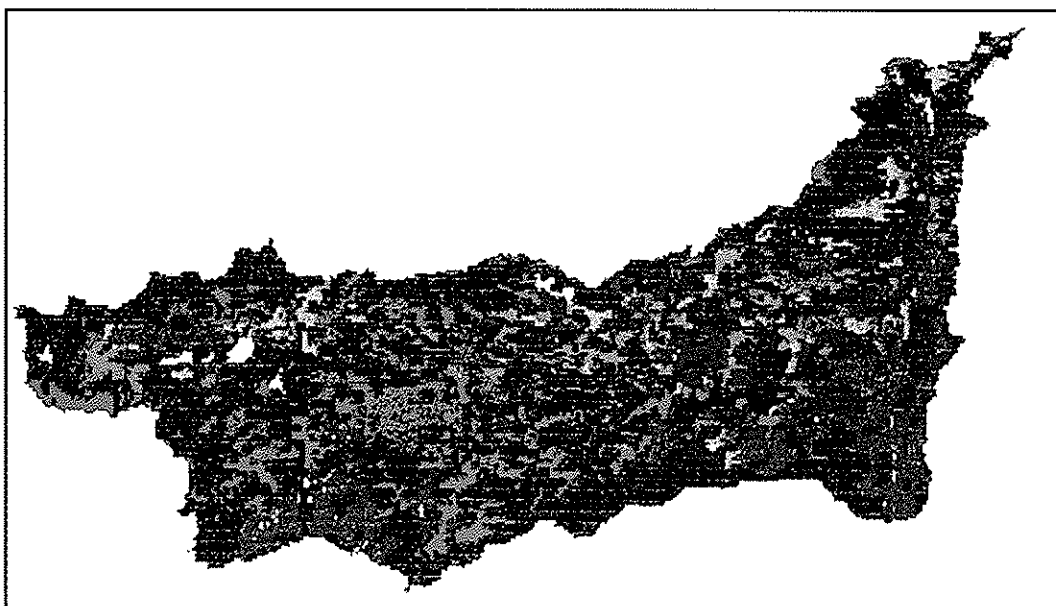


Figura 3

Mapa de distribución del parámetro  $P_0$  (umbral de escorrentía), en la cuenca alta del río Alberche, obtenido por el método del *Soil Conservation Service*.

De la superposición del modelo digital de elevaciones de la lámina de agua con el MDT de Navalunga empleando funciones lógicas se puede obtener qué áreas quedarán anegadas por el agua durante el evento de crecida asociado a cada período de retorno (figura 4). Además, aplicando funciones aritméticas (resta) se pueden calcular las profundidades que se alcanzarán en cada punto del cauce; vectorizando en isolíneas esta cartografía puede obtenerse de forma automática un mapa de isobatas durante la inundación (figura 5). De semejante manera se procedió con la estimación de áreas ocupadas por los caudales correspondientes a la máxima crecida ordinaria, obteniéndose el dominio público hidráulico de acuerdo a la Ley de Aguas de 1985 (figura 6).

Otro tipo de inundación que se ha considerado para el municipio de Navalunga es el anegamiento de áreas de escasa pendiente o endorreicas por acumulación de precipitación *in situ*, esto es, encharcamiento. Para ello se realizaron operaciones de análisis topográfico al MDT de Navalunga con objeto de detectar las

áreas de escasa o nula pendiente y/o con drenaje endorreico hasta un determinado umbral (figura 7). A estas zonas, una vez cartografiadas automáticamente, se les aplicaron los niveles de inundación correspondientes a las precipitaciones máximas diarias esperables para diferentes períodos de retorno (Díez y Sanz, 1998).

### 3.5. Simulación de situaciones preoperacionales

Las operaciones de análisis SIG permiten igualmente la simulación de las crecidas en situaciones hipotéticas, bajo condiciones de contorno diferentes a las actuales. Este es el caso de la estimación de las avenidas correspondientes a un estado preantrópico, esto es, previo a la intervención masiva del ser humano en el territorio y, por tanto, con la vegetación supuestamente natural sin alteración alguna. Para ello, en la estimación del umbral de escorrentía (véase apartado 3.3), se introduce en lugar del mapa de cultivos y aprovechamientos (que representa la vegetación y

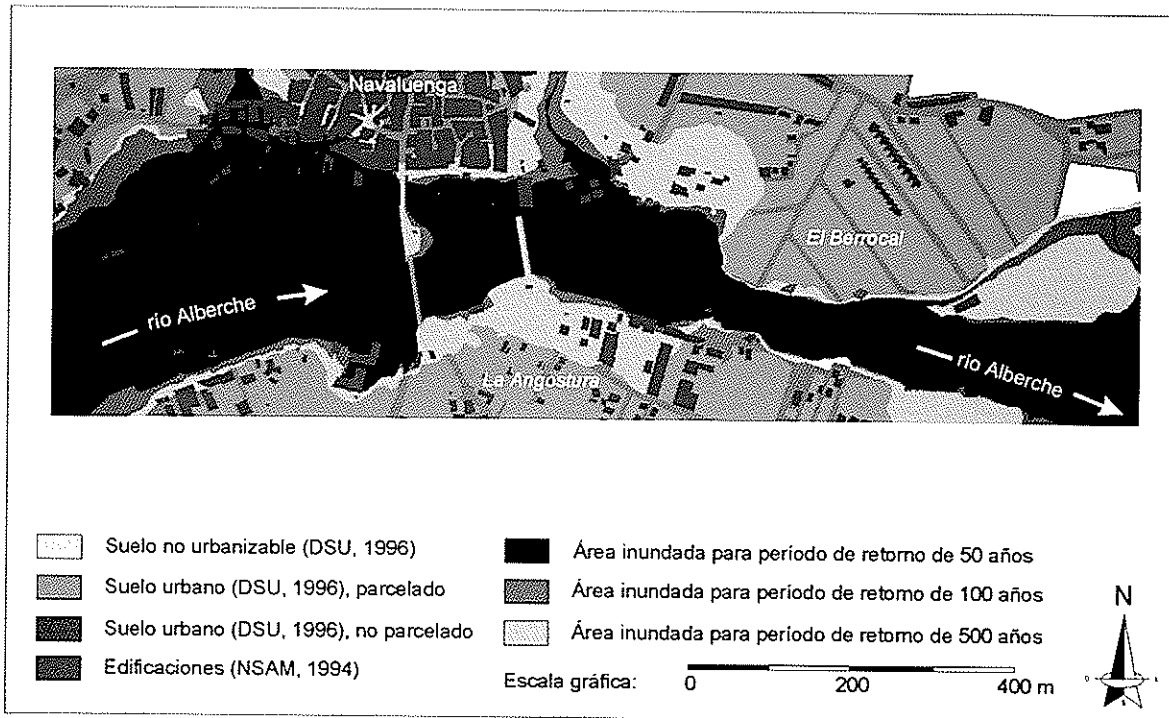


Figura 4

Mapa de áreas inundables del casco urbano de Navaluenga para los períodos de retorno de 50, 100 y 500 años. Tomado de Díez y Sanz (1998).

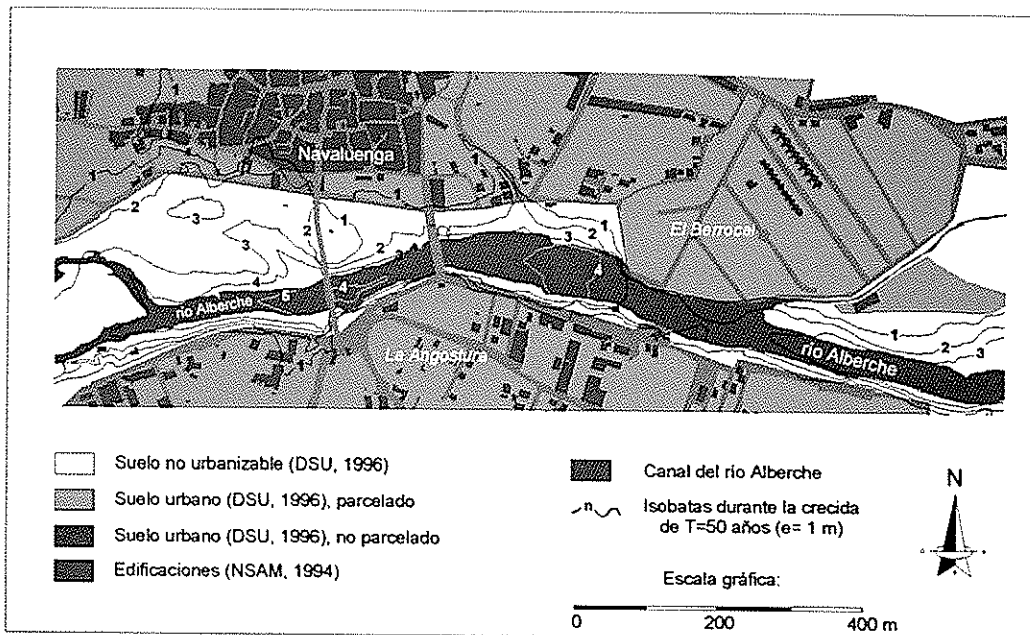


Figura 5

Mapa de isobatas para la profundidad de la lámina de agua durante la crecida con período de retorno de 50 años, en el casco urbano de Navaluenga; la equidistancia es de 1m. Tomado de Díez y Sanz (1998).

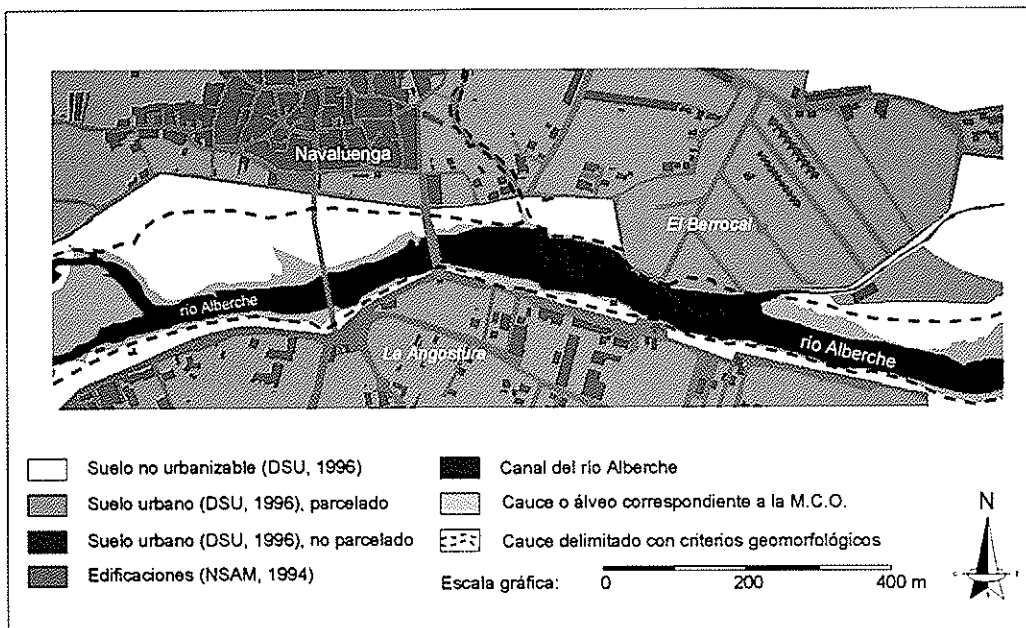


Figura 6

Mapa del dominio público hidráulico en Navaluenga, obtenido mediante la máxima crecida ordinaria y mediante criterios geomorfológicos.

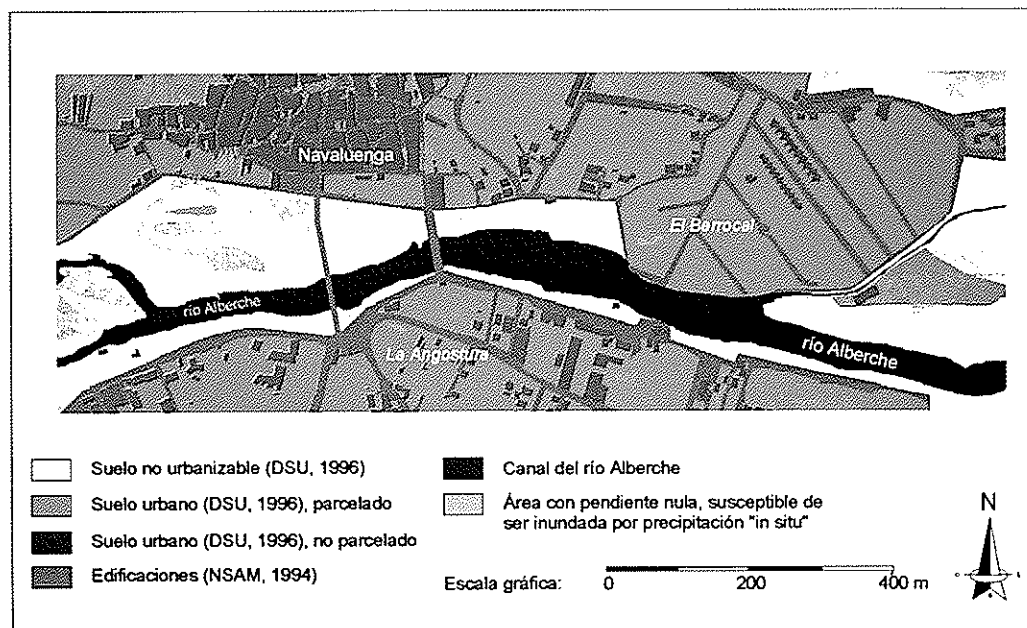


Figura 7

Mapa de áreas con pendiente nula o endorreicas, susceptibles de ser inundadas por precipitación *in situ* (encharcamiento). Tomado de Díez y Sanz (1998).

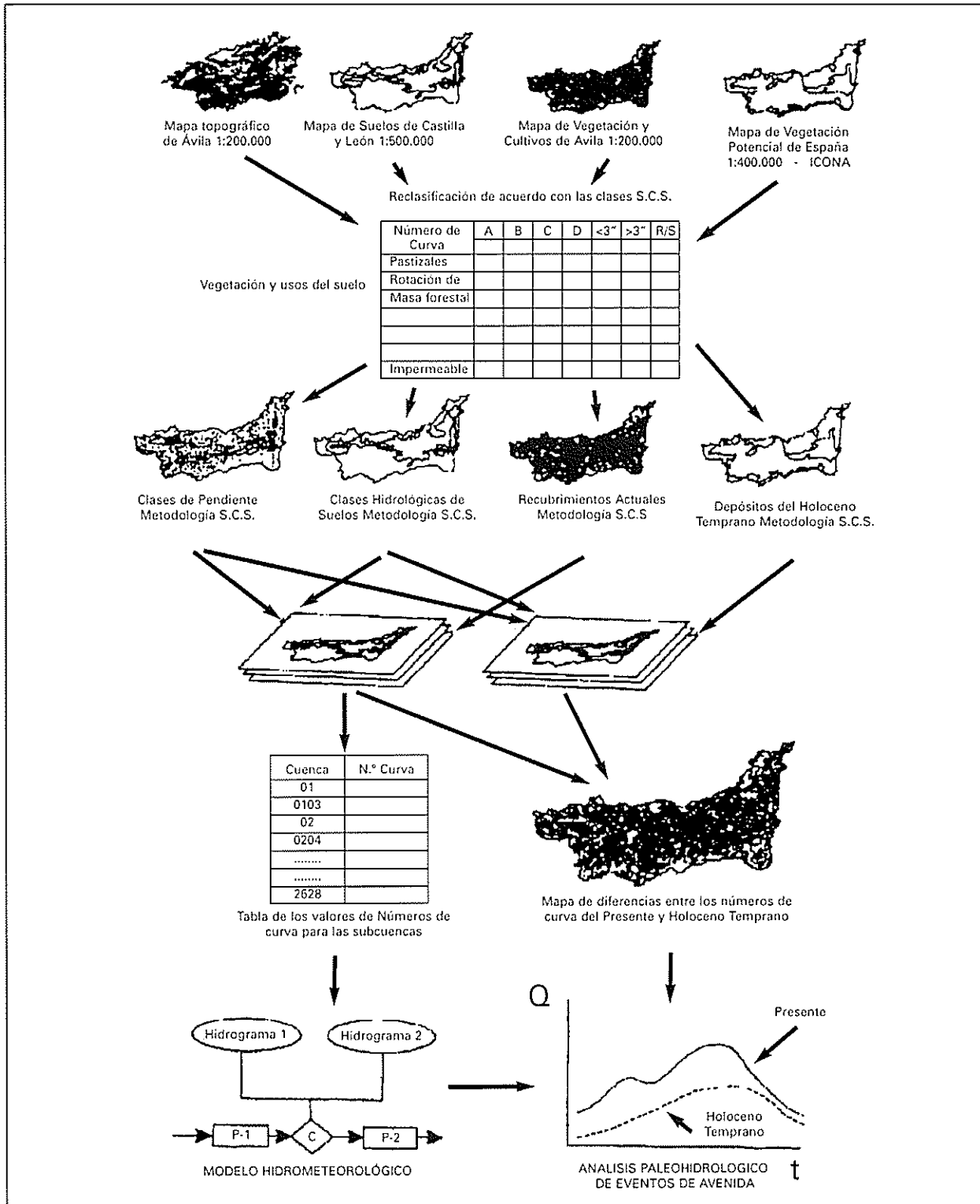


Figura 8

Procedimiento de obtención de los hidrogramas de crecida actual y preantropógeno en la cuenca alta del río Albarche, mediante la determinación del número curva por el método del *Soil Conservation Service*. Tomado de Diez-Herrero *et al.* (1998).

usos actuales) el mapa de vegetación potencial procedente de los mapas de las series de vegetación de España (ICONA, MAPA). Procediendo de semejante manera a como se indicó en dicho apartado se llega a un segundo valor de umbral de escorrentía para la situación pre-operacional, tanto para la cuenca completa como para las subcuencas. Con estos valores y los modelos hidrometeorológicos se han calculado los hidrogramas correspondientes a las avenidas previas a la ocupación humana del territorio (figura 8; Díez-Herrero *et al.*, 1998). Finalmente, a partir de la comparación con los hidrogramas actuales pueden extraerse interesantes conclusiones acerca de la ordenación de usos conducentes a la laminación de crecidas y por tanto a la prevención de inundaciones.

### 3.6. Análisis del riesgo de afección a bienes y servicios

A partir de los planos parcelarios digitalizados de Navaluenga, y cruzando la información mediante una simple operación de superposi-

ción por álgebra de mapas, pueden obtenerse las áreas con diferentes categorías de suelo (urbano, no urbanizable, urbanizable...) que serán ocupados potencialmente por las crecidas con distintos periodos de retorno. Además, obtenerse los tramos de conducciones de servicio (eléctricas, telefónicas, hídricas, etc.), mobiliario urbano y similares, afectados por cada inundabilidad. Así, se han evaluado los bienes inmuebles en riesgo (tabla 1). Como consecuencia de la superposición de los bienes expuestos y vulnerables, y conforme a los criterios de la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil, surge el mapa de riesgo de inundaciones, donde se diferencian las zonas A, B y C (figura 9).

### 3.7. Diseño del Plan de Protección Civil de Ámbito Local

Por lo que respecta a la población expuesta al riesgo, se está elaborando actualmente todo un sistema de apoyo al futuro Plan de Protección Civil de Navaluenga, en colaboración con D. Rafael Aramendi, técnico de la

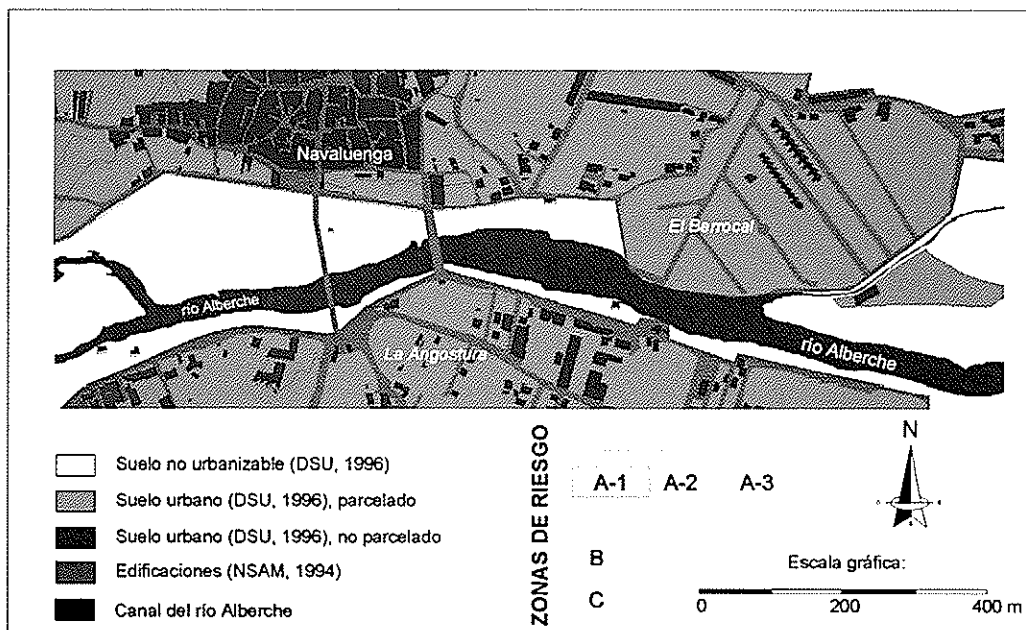


Figura 9  
Mapa del riesgo de inundaciones delimitado con los criterios de la Directriz Básica de Protección Civil.

**Tabla1**

Magnitudes relativas de bienes inmuebles sometidos a riesgo bajo diferentes factores de inundabilidad. Las cifras en **negrita** suponen la destrucción total del elemento; los números en  *cursiva* los desperfectos ocasionados que conllevan la pérdida de productividad o necesidad de reparaciones; la tipología normal de números se aplica a elementos expuestos al riesgo y que previsiblemente no sufren daño alguno.

Elementos en riesgo (unidades en que se miden)	Inundabilidad de las zonas		
	Frecuente	Ocasional	Excepcional
Suelo no urbanizable (m <sup>2</sup> )	<b>157311</b>	<i>167781</i>	<i>179210</i>
Suelo urbano parcelado (m <sup>2</sup> )	23043	36753	83564
Suelo edificado (m <sup>2</sup> )	<i>7039</i>	<i>10680</i>	<i>21324</i>
Obras hidráulicas (número)	2+4	4+2	5+1
Mobiliario urbano (número)	4+8	4+8	12
Vías de comunicación (metros)	<i>15095</i>	<i>19189</i>	<i>30983</i>
Vegetación arbórea (nº de pies)	20+130	35+125	75+135
Conducciones de servicio (km)	1.2+0.4	1.2+0.4	1+1.2+1.3

Unidad de Protección Civil de Ávila. Este Plan pretende ser homologado de acuerdo a los requisitos de la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones.

En su primera fase, ya concluida por alumnos de 2º curso de CC. Ambientales de la Universidad Europea de Madrid, se ha confeccionado una base de datos con la información sobre la población expuesta al riesgo, a partir de una encuesta de campo realizada durante verano de 1998. Dicha encuesta recogía, en sus más de 30 campos, aspectos sobre la población y bienes de cada edificación, sus características, la vulnerabilidad de usos y personas (discapacidades y agravantes del riesgo), disponibilidad ante situaciones de emergencia, grado de conocimiento de los medios de protección civil, etc. (figura 10).

La segunda fase, aún en elaboración, consiste en la introducción de esta base de datos como atributos georreferenciables asociados a la cobertura vectorial de polígonos que se tiene del plano parcelario de Navalunga. Se está realizando mediante la aplicación informática CartaLinx Data Boulder en el Laboratorio de

Meteorología y Teledetección de la Universidad Europea de Madrid, implementada por los propios alumnos de la asignatura "Sistemas de Información Geográfica" de la Licenciatura en CC. Ambientales.

La tercera y última fase consistirá en la aplicación de operaciones de análisis conducentes a la explotación de la base de datos. Algunos de los aspectos que se abordarán son:

- \* Operaciones de búsqueda, reclasificación y medición
- Búsqueda mediante consulta de la base de datos por su componente temática:
  - Viviendas con un determinado número total de personas
  - Viviendas con un determinado número de personas en planta baja
  - Viviendas con sótanos, bodegas o hábitáculos bajo el nivel del suelo
  - Viviendas con personas altamente vulnerables al riesgo:
    - Minusvalías físicas: locomotrices, ceguera, sordera, ...
    - Minusvalías psíquicas
    - Menores de edad (bebés, niños o adolescentes)

Departamento de Medio Ambiente  
 Universidad Europea de Madrid  
 Villaviciosa de Odón (Madrid)

Excmo. Ayuntamiento de Navalunga  
 Plaza de España, 1  
 Navalunga (Ávila)

## PLAN DE PROTECCIÓN CIVIL DE ÁMBITO LOCAL ANTE EL RIESGO DE INUNDACIONES PARA EL CASCO URBANO DE NAVALUENGA (ÁVILA)

### FICHA DE RECOGIDA DE INFORMACIÓN EN CAMPO

PARCELA: ..... MANZANA: .....  
 BLOQUE: ..... CALLE o PLAZA: .....  
 NÚMERO: ..... PISO: ..... PUERTA: .....

**· USO DEL SUELO**

Residencial     Comercial     Agrícola     Ganadero     Industrial     Sin uso  
 Otros usos (especificar cuáles) .....

**· PERSONAS EN RIESGO**

· Número de inquilinos totales de la vivienda: ..... Saben nadar (número) .....  
 · Régimen de permanencia de los inquilinos:  
 Continuo/Diario     Fines de semana     Puentes y festivos     Periodo estival  
 Otros regimenes (especificar cuáles) .....

**Presencia de personas especialmente vulnerables:**

Minusválidos físicos (especificar número y tipo) .....  
 Minusválidos psíquicos (especificar número y tipo) .....  
 Menores de edad (especificar número y edades) .....  
 Ancianos (especificar número, edad y autonomía) .....  
 Personas con enfermedades transitorias (número y tipo) .....  
 Embarazadas (número y estado de gestación) .....  
 Personas con enfermedades crónicas (especificar número y tipo) .....  
 Otras personas vulnerables (número y tipo) .....

**· BIENES EN RIESGO**

Mobiliario habitual de la vivienda .....  
 Electrodomésticos (frigorífico, televisor, etc.) .....  
 Colecciones de obras de arte u otros objetos de valor .....  
 Animales domésticos .....  
 Medicación necesaria en enfermedades crónicas .....  
 Mobiliario urbano .....  
 Ganado y/o animales domésticos .....  
 Productos agrícolas .....  
 Mercancías almacenadas .....  
 Otros bienes vulnerables (número y tipo) .....

**Elementos agravantes de la situación:**

Presencia de mercancías tóxicas y peligrosas (especificar número y tipo) .....  
 Líneas de servicio o Redlines (conducciones de gas, eléctricas o telefónicas).....



**· DESCRIPCIÓN (SÓLO PARA EDIFICACIONES)**

· Altura del suelo de la planta principal respecto al nivel de calle (en centímetros) .....

· Superficie edificada (en metros cuadrados) .....

· Puertas y ventanas (describir número, tipo, situación y elementos obstaculizantes como barrotes).....

.....

· Sótanos, subsuelos, bodegas o similares (describir número, situación, profundidad y disposición) .....

.....

· Dormitorios (describir situación respecto al nivel de calle y las salidas del edificio) .....

.....

· Presencia de bombas de agua u otros instrumentos de achique .....

· Suscripción de pólizas de seguro de la vivienda (tipo, compañía y bienes asegurados) .....

.....

· Vías de comunicación en caso de emergencia:

Radio       Televisión       Teléfono       Fax       Internet       Correo electrónico

Otros (especificar) .....

· Persona y número de teléfono de contacto en caso de emergencia .....

.....

**· DISPONIBILIDAD ANTE SITUACIONES DE EMERGENCIA**

· Número de personas dispuestas a colaborar y grado de implicación .....

· Vehículos todo terreno, tractores, palas mecánicas o similares disponibles .....

· Disponibilidad para acoger y alojar damnificados .....

· Donación de enseres básicos .....

.....

**· GRADO DE CONOCIMIENTO DE LOS MEDIOS DE PROTECCIÓN CIVIL**

· Situación del centro de asistencia sanitaria más próximo .....

· Teléfonos a utilizar en una emergencia .....

· Percepción de la sensación del riesgo .....

.....

**· OTROS COMENTARIOS O DATOS QUE SE CONSIDEREN DE INTERÉS**

.....

.....

.....

.....

.....

**· DATOS SOBRE EL TÉCNICO RESPONSABLE DE LA CUMPLIMENTACIÓN DE LA FICHA**

· Nombre y apellidos .....

· Grupo, organismo o empresa .....

· Teléfono de contacto .....

.....

**· FECHA DE CUMPLIMENTACIÓN**

Día de la semana ..... Día del mes ..... Mes ..... Año ..... Hora .....

Consideración:  Laborable       Festivo local       Festivo nacional       Otros .....

Figura 10

Ficha de campo para la encuesta realizada a la población expuesta al riesgo de inundaciones en Navalunga, durante el verano de 1998.

- Ancianos
- Personas con enfermedades transitorias (lisiados, rotura de articulaciones)
- Embarazadas
- Medición y conteo:
  - Número de personas en riesgo por área de riesgo o sector
  - Número de viviendas en riesgo por área de riesgo o sector
- \* Operaciones de superposición o álgebra de mapas
- Mapas de densidad de elementos en riesgo (viviendas y/o personas) según vulnerabilidad.
- \* Operaciones de contigüidad
- Cálculo de mapas de distancias de coste desde los elementos en riesgo hasta los puntos con recursos de Protección Civil (bomberos, centros hospitalarios, etc.)
- Funciones de análisis de redes para cálculo de recorridos óptimos de evacuación:
  - Distancia lineal (helicóptero)
  - Disposición de los viales no inundados (a pie, vehículos motorizados, ...)
  - Disposición de los viales inundados en función de la profundidad del agua (vehículos motorizados especiales)
- Estimación de ubicaciones alternativas y/o complementarias para los recursos de Protección Civil, de acuerdo con la accesibilidad a los elementos en riesgo.
- Mapa de las isohipsas del sur de la provincia de Ávila (equidistancia 50 m).
- Mapa de la cuenca alta del río Alberche y sus subcuencas (figura 11).
- Mapa de suelos de la cuenca alta del río Alberche.
- Mapa de las estaciones meteorológicas en la cuenca alta del río Alberche.
- Mapa de cultivos y aprovechamientos de la cuenca alta del río Alberche.
- Mapa de vegetación potencial de la cuenca alta del río Alberche.
- Plano de las isohipsas del casco urbano de Navaluenga.
- Plano de las parcelas y edificaciones del casco urbano de Navaluenga.
- Plano de las categorías de suelo de Navaluenga.
- Plano de las principales líneas de servicio de Navaluenga.
- Plano de los perfiles transversales realizados en el modelo hidráulico.

Fruto de los análisis de datos indicados anteriormente y de la introducción de mapas temáticos como cartografía automática, han surgido nuevas composiciones cartográficas, destacando:

- \* Coberturas vectoriales o matriciales+vectoriales
- Mapa de los polígonos de Thiessen de las estaciones meteorológicas.
- Mapa de isoyetas de precipitaciones máximas diarias en la cuenca (figura 1).
- Mapa de isobatas durante la inundación para distintos períodos de retorno (equidistancia 1 m; figura 5).
- Mapa del riesgo de inundación zonificado acorde a la Directriz Básica (figura 9).
- Mapa de riesgos y otros procesos geológicos asociados a la inundación (figura 12).
- Mapa de puntos conflictivos durante la inundación (figura 13).
- \* Coberturas matriciales
- Modelo digital del terreno de la cuenca alta del río Alberche (200x200 m).
- Mapa de clases hidrológicas de suelos según los criterios del SCS.
- Mapa de clases hidrológicas de vegetación según los criterios del SCS.

#### 4. EDICIÓN DE RESULTADOS

Las salidas de resultados, ya adelantadas a lo largo de los epígrafes anteriores, se centran en dos de los tres clásicos aspectos de la edición de resultados en los SIGs: composiciones cartográficas y tablas.

##### 4.1. Composiciones cartográficas

Se dispone de toda una batería de mapas en formato digital y modalidad vectorial, procedentes de la adquisición de la información de entrada, como son:

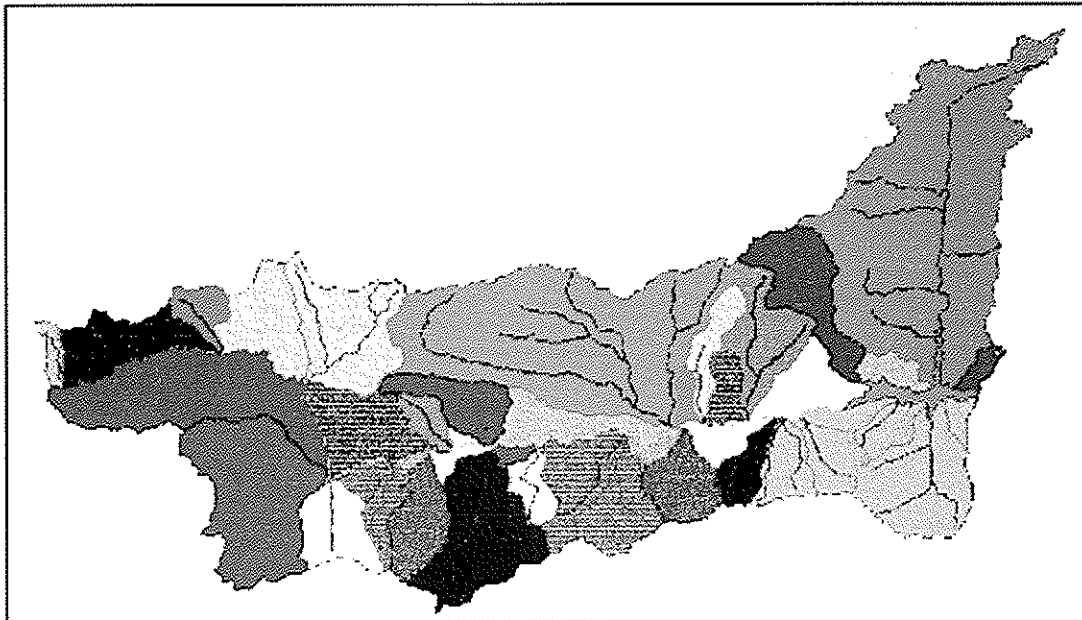


Figura 11

Mapa con las principales subcuencas y afluentes del río Alberche en la cuenca alta del mismo, a escala 1:500.000.

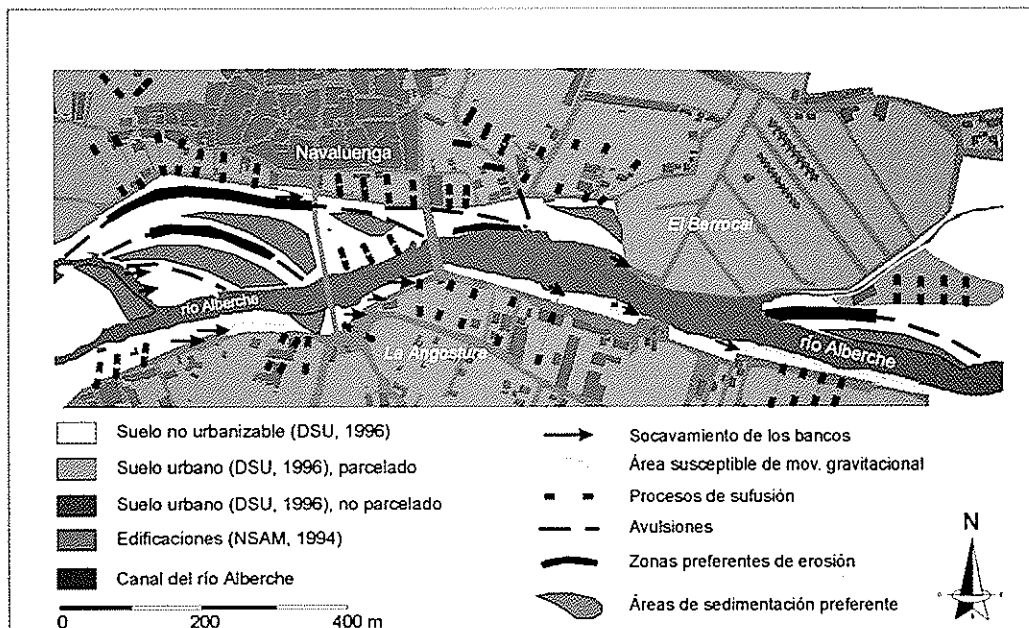


Figura 12

Mapa de los principales procesos geológicos asociados a la inundación en las márgenes del cauce del río Alberche a su paso por Navaluenga.

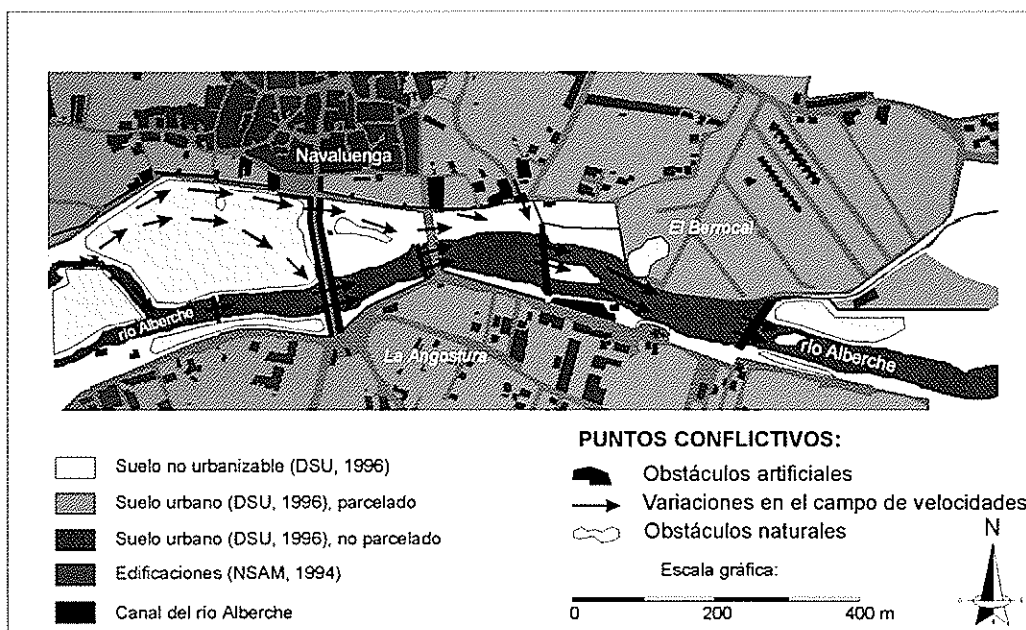


Figura 13

Mapa de los principales puntos conflictivos, como obstáculos a la corriente y cambios en el campo de velocidades, que pueden agravar los efectos de anegamiento de la inundación.

- Mapa de pendientes en grados de la cuenca alta del río Alberche.
- Mapa de pendientes reclasificado según criterios SCS (figura 2).
- Mapa del umbral de escorrentía en la cuenca alta del río Alberche (figura 3).
- Modelos digitales de elevaciones de la lámina de agua para diferentes períodos de retorno y para la crecida máxima ordinaria.
- Modelo digital del terreno del casco urbano de Navaluenga (1x1 m)
- Mapa de inundabilidad de Navaluenga para diferentes períodos de retorno (figura 4).
- Mapa de batimetría de la inundación para diferentes períodos de retorno.
- Mapa del dominio público hidráulico en Navaluenga (figura 6).
- Mapa de pendientes del casco urbano de Navaluenga.
- Mapa de áreas inundables por precipitación *in situ* y encharcamiento (figura 7).
- Mapa de la vegetación potencial reclasificada según criterios del SCS.
- Mapa del umbral de escorrentía para la situación preantrópica.

Todas estas composiciones cartográficas se encuentran disponibles en formatos digitales estandarizados, preparadas para su visualización en pantalla o su impresión.

#### 4.2. Información alfanumérica tabular

Básicamente recoge los resultados de las mediciones y conteos realizados en las operaciones de análisis, centrados normalmente en la estimación de áreas, densidades (por unidad de áreas), medidas de elementos lineales o conteos de puntos. Sirva como ejemplo la tabla de bienes expuestos al riesgo en Navaluenga (tabla 1), o las tablas de áreas, umbrales de escorrentía y parámetros  $K_A$  de la cuenca y las diferentes subcuencas.

#### 5. CONCLUSIONES

La utilización de los sistemas de información geográfica en la regionalización, agregación y cálculo de variables y parámetros de los mode-

los hidrológicos e hidráulicos para crecidas, así como su capacidad para la explotación de bases de datos espaciales que contienen los bienes expuestos y vulnerables al riesgo, abre una nueva vía en la mejora de las metodologías de análisis del riesgo de inundación y su integración en los planes de protección civil.

Para ello es preciso superar la simple utilización de los SIGs como herramientas para adquisición y edición de cartografía automática, y potenciar las capacidades de análisis de las operaciones y funciones que contienen los programas informáticos de aplicación al uso. En este sentido resulta de especial interés la flexibilidad y posibilidades de innovación que ofrece la utilización del SIG en diversos aspectos de las metodologías de análisis de la peligrosidad, sin ceñirse a los modelos integrados preexistentes; igualmente las enormes capacidades que las operaciones de análisis ofrecen en el desarrollo de cartografías de interés para los planes de protección civil, tanto de carácter preventivo como operativo en situaciones de emergencia.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aronoff, S. (1989): *Geographic Information Systems; a management perspective*. WDL Publications, Ottawa, Canada, 294 págs.
- Barrett, E.C. (1996): Remote Sensing & Flood Control. En: T. Estrela y L. Quintas (Eds.), *Curso sobre utilización de los Sistemas de Información Geográfica en Hidrología*, CEDEX, MOPTMA, Madrid, pag. var.
- Baskar, N.R.; James, W.P.; Devulapalli, R.S. (1992): Hydrologic parameter estimation using GIS. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 118(5).
- Benito, G.; Laín Huerta, L.; Rey, R.; Machado, M.J.; Ojeda, R. y Romanos, M.J. (1996): Paleotagus database. Regional palaeoflood information for evaluation flood hazard and water resources in Central Spain. *GLO-COPH'96*, Toledo, pág. 31.
- Bocco, G.; Sánchez, R. y Riemann, H. (1995): GIS affects flood planning efforts. *GIS World*, 8(2), 58-60.
- Buntz, R. (1998): Integrating the HEC RAS Hydraulic Model with ArcView GIS. *ArcUser*, 1(2), 14-17.
- Cabezas, F. y Vera, J.A. (1996): Aplicación de un SIG como herramienta de ayuda a la planificación en la Confederación Hidrográfica del Segura. En: T. Estrela y L. Quintas (Eds.), *Curso sobre utilización de los Sistemas de Información Geográfica en Hidrología*, CEDEX, MOPTMA, Madrid, pag. var.
- Carrasco, R.M. (1997): *Estudio geomorfológico del Valle del Jerte (Sistema Central español): secuencia de procesos y dinámica morfogenética actual*. Tesis Doctoral, Departamento de Geodinámica (UCM), Madrid, inédita.
- CEDEX (1994): Modelos hidrológicos de previsión de avenidas. Aplicación en cuencas experimentales. Informe parcial nº 3. *Caracterización geomorfológica de la cuenca alta del río Palancia*. Utilización de la teledetección y de los Sistemas de Información Geográfica, Madrid, inédito.
- Díez-Herrero, A.; Benito, G & Laín-Huerta, L. (1998): Regional Palaeoflood Databases Applied to Flood Hazards and Paleoclimate Analysis. En: G. Benito, V.R. Baker & K.J. Gregory (Eds.), *Palaeohydrology and Environmental Change*, Chapter 24, 335-347, John Wiley & Sons, Chichester.
- Díez, A. y Pedraza, J. de (1997a): Cálculo hidrometeorológico de caudales de avenida para la subcuenca de El Burguillo (río Alberche, Cuenca del Tajo). *Geogaceta*, 21, 93-96.
- Díez, A. y Pedraza, J. de (1997b): Análisis estadístico de caudales de crecida para la subcuenca de El Burguillo (río Alberche, Cuenca del Tajo). *Geogaceta*, 21, 97-99.
- Díez, A. y Sanz, M.A. (1998): Análisis de la inundabilidad de Navalunga (Ávila, Castilla y León). En: A. Gómez y F. Salvador (Eds.), *Investigaciones recientes de la Geomorfología española*, 593-602, Universidad de Granada y Universitat de Barcelona, Barcelona.
- Emani, S. (1996): GIS Application in Hazard Assessment and Management. A Review. En: S. Emani (Ed.), *Applications in Hazard Assessment and Management*. Explorations In Geographic Information Systems Technology, 6, UNITAR, Switzerland, 1-47.
- Estrela, T. (1994): Los SIG en Hidrología. En: T. Estrela y L. Quintas (Eds.), *Curso sobre utilización de los Sistemas de Información*

- Geográfica en Hidrología*, CEDEX, MOPTMA, Madrid, pag. var.
- Estrela, T. y Quintas, L. (1996): El modelo de flujo bidimensional GISPLANA. *Ingeniería Civil*, 104, 13-21.
- Estrela, T., Quintas, L. y Ferrer, M. (1996): Los Sistemas de Información Geográfica orientados a la hidrología en el CEDEX. *Ingeniería Civil*, 104, 23-36.
- Ferrer, J. y Ardiles, L. (1994): Análisis estadístico de las series anuales de máximas lluvias diarias en España. *Ingeniería Civil*, 95.
- Ferrer, M.; Rodríguez, J. y Estrela, T. (1995): Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica. *Ingeniería del agua*, 2(4), 43-58.
- Francés, F. (1994): Uso de los SIG en la generación de hidrogramas de avenida. En: T. Estrela y L. Quintas (Eds.), *Curso sobre utilización de los Sistemas de Información Geográfica en Hidrología*, CEDEX, MOPTMA, Madrid, pag. var.
- Gardner, J.V. (1994): Landsat and the midwest flood of 1993. *Second Thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, New Orleans, LA.
- Kopp, S. (1998): Developing a Hydrology Extension for ArcView Spatial Analyst. *ArcUser*, 1(2), 18-20.
- Menéndez, M.; Ferrer, J. y Ardiles, L. (1996): GISPLU y MAXPLU: Obtención de máximas precipitaciones diarias en la España Peninsular, *Ingeniería Civil*, 141-146.
- Mettel, C. (1992): GIS and satellite images provide precise calculations of probable maximum flood. *Geo Info Systems*, 2(5), 44-48.
- Ortiz, D. y Calle, J.V. (1997): La EUP de Mérida participa en el desarrollo de un sistema para la planificación hidrológica. *Mapping*, 40, 14-15.
- Pujadas, J.; De Paz, A. y Marturia, J. (1997): La Riba map: a pilot project on detailed flood-hazard mapping in Catalunya. *Proceedings Second Congress on Regional Geological Cartography and Information Systems*, Barcelona, 181-193.
- Rosenfeld, C. (1994): Flood hazard reduction: GIS maps survival strategies in Bangladesh. *Geo Info Systems*, 4(5), 29-37.
- Speed, V. (1994): GIS and satellite imagery take center stage in Mississippi flood relief. *Geo Info Systems*, 4, 40-43.

#### AGRADECIMIENTOS

El presente estudio se desarrolla en el marco de la Tesis Doctoral del autor, dirigida por el Dr. Javier de Pedraza Gilsanz, Profesor Titular del Departamento de Geodinámica de la UCM. Quisiera agradecer la colaboración desinteresada en las diferentes fases a las siguientes personas y colectivos: Dr. José Fco. Martín-Duque, D. Miguel Ángel Sanz, Dr. Gerardo Benito, D. Luis Laín Huerta, Institución Gran Duque de Alba, Ayuntamiento de Navalunga, Confederación Hidrográfica del Tajo, Protección Civil de Ávila, Centro de Gestión Urbana y Catastral de Ávila, Departamento de Geodinámica de la UCM y Departamento de Medio Ambiente de la Universidad Europea de Madrid.

□