

# ESTUDIO HIDRÁULICO DEL RIESGO DE INUNDACIÓN EN EL MEANDRO DE RANILLAS: MODELOS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA

Pilar García Navarro<sup>1</sup>, Pilar Brufau<sup>1</sup>, Javier Murillo<sup>1</sup> y Carlos Zorraquino<sup>1</sup>

## Resumen:

En este trabajo se muestran los resultados obtenidos al aplicar técnicas de modelización numérica en flujos de lámina libre. Se aplica a la simulación de la evolución de la onda producida por una avenida extraordinaria en un tramo de meandro del río Ebro cercano a la ciudad de Zaragoza con la finalidad de estudiar la variación del flujo frente a modificaciones del cauce

**Palabras clave:** Flujo de superficie libre, modelo hidráulico, flujo transitorio, modelo bidimensional, modelo unidimensional.

## INTRODUCCIÓN

La simulación numérica por ordenador de ondas de avenida provocadas por la lluvia o por la destrucción espontánea o gradual de presas y muros de contención de grandes depósitos de agua es la herramienta más barata y que produce mayor cantidad de resultados para la predicción de la evolución de tales fenómenos y sus consecuencias, de gran interés para la Ingeniería Civil. Ahora bien, es necesario conocer sus fundamentos, simplificaciones, limitaciones y el comportamiento en casos prácticos sencillos, para poder obtener conclusiones juiciosas de aplicación en posteriores análisis y seguimientos.

Dentro del campo de la simulación numérica de flujos existen discrepancias sobre la idoneidad del uso de modelos basados en ecuaciones diferenciales debido a las simplificaciones e hipótesis asociadas, y también acerca de los propios métodos de

discretización y resolución aplicados para resolverlas. En este trabajo presentamos la aplicación de dos modelos de diferente complejidad al estudio de un caso práctico real.

Los problemas más usuales en la simulación numérica de flujos transitorios de lámina libre están relacionados con la captura de las ondas que se propagan, y de las transiciones dinámicas de estado supercrítico-subcrítico del flujo, producidas por las variaciones de caudal en geometría irregular como las de los cauces naturales.

La aplicación de técnicas numéricas a la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales que se establece como modelo matemático de esta clase de flujos, se remonta a los años sesenta (Cunge et al., 1980). Son conocidos los modelos simplificados de rodaje de avenidas tales como el cinemático y el difusivo (Fread, 1985). Estos modelos reducen de una u otra forma la dificultad asociada a la

<sup>1</sup> Área de Mecánica de Fluidos. C.P.S., Universidad de Zaragoza. María de Luna 3, 50018 Zaragoza. Tel: 976 761000 - 5057 Fax: 976 761882. E-mail: pigar@posta.unizar.es, brufau@posta.unizar.es, jmurillo@mafalda.cps.unizar.es

<sup>2</sup> SERS Consultores en Ingeniería, Paseo Rosales 34, 50008 Zaragoza. Tel: 976 597320 Fax: 976 461074. E-mail: czorraquino@jazfree.com

Artículo recibido el 18 de septiembre de 2002, recibido en forma revisada el 2 de marzo 2003 y aceptado para su publicación el 8 de abril de 2003. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

resolución del modelo dinámico de onda, de tipo hiperbólico y no lineal. De entre las técnicas más utilizadas para la discretización del problema completo destaca el esquema implícito de cuatro puntos o de Preissmann (Cunge et al., 1980) y su aplicación comercial más conocida (DAMBREAK). También se ha extendido el uso del esquema implícito de Abbott-Ionescu (Abbott, 1992) de seis puntos (MIKE 11). Estas técnicas implícitas se caracterizan por su eficiencia, logrando pasos de tiempo largos y espaciados no uniformes con estabilidad, en una amplia variedad de casos de interés. Su mayor desventaja radica en el tratamiento que realizan de las situaciones transcíticas. Incapaces de tolerarlas, las evitan proponiendo soluciones que suavizan los términos de inercia y representan una mayor disipación. Las técnicas explícitas en general se presentan mejor adaptadas a la resolución de flujos rápidos

Una simulación numérica tiene que describir un fenómeno particular con la suficiente precisión y con un coste bajo para ser de utilidad. Normalmente la precisión y el coste son magnitudes opuestas a la hora de diseñar un esquema numérico. En principio, la precisión del modelo puede aumentar indefinidamente pero en la práctica tiene que existir un compromiso entre la precisión en la descripción del proceso físico y el conocimiento disponible de las leyes físicas básicas del problema particular a resolver. Hay una gran diversidad entre las necesidades y las posibilidades de la simulación numérica y una consecuencia de ello es que en la práctica se utilizan un gran número de métodos numéricos diferentes. Existe un gran número de técnicas numéricas apropiadas para resolver flujos suaves; sin embargo, el caso de resolver un flujo general ha sido tradicionalmente difícil de tratar con un sólo método.

Algunas situaciones hidráulicas pueden ser descritas por medio de un modelo unidimensional, bien porque no sea necesaria la resolución en más detalle del flujo o porque la naturaleza del mismo sea marcadamente unidimensional, como el flujo en un canal. Cuando se intenta hacer uso de los modelos matemáticos como herramienta de predicción en la simulación de flujos de superficie libre, estas hipótesis de aproximación unidimensional no son siempre válidas. Esto ocurre en el caso de que se tenga una geometría totalmente irregular en el cauce, contracciones y expansiones abruptas o ríos con curvatura importante. Cuando se intentan reproducir este tipo de situaciones hidráulicas se hace necesario el uso de un formalismo bidimensional que

tenga en cuenta la influencia de las componentes transversales del flujo.

Algunas de las aproximaciones bidimensionales para problemas hidráulicos que se han llevado a cabo están basadas en la resolución de la ecuación de continuidad junto a conexiones hidráulicas para conocer el caudal (GISPLANA, Estrela y Quintas, 1996). Dentro de las aproximaciones que contemplan el modelo dinámico completo, algunas se basan en la técnica operator splitting (García y Kahawita, 1986). Otras técnicas implican el uso del método de características en 2D (Katopodes y Strelkoff, 1978), técnicas eulerianas-lagrangianas (Casulli, 1990) o técnicas de elementos finitos (Quecedo y otros, 2001). Los métodos de descentramiento son muy populares a la hora de simular flujos en los que domina marcadamente el término advectivo (Brufau y García-Navarro, 2000) y en particular aquéllos que contienen discontinuidades muy fuertes.

El objeto del presente estudio es limitar la cota de rasante del terraplén y de la base de un puente de nueva construcción denominado “puente del tercer milenio” en la ronda de Rabal de Zaragoza. Este puente cerrará el denominado tercer cinturón y la problemática fundamental que presenta es la necesidad de desaguar la avenida extrema, 500 años de retorno, de 5.200 m<sup>3</sup>/s. El área objeto de estudio constituye un gran meandro (meandro de Ranillas) que se encuentra en la proximidad inmediata de la ciudad de Zaragoza (Fig. 1) y se estableció entre el puente de la autopista A68 aguas arriba y el puente de la Almozara aguas abajo. En el interior del meandro, margen izquierda, se pueden encontrar campos y vegetación de ribera así como algunas edificaciones dedicadas a casetas de labranza o segundas residencias. En esta zona se encuentra también el club de equitación Ranillas y, algo más alejado, el barrio urbano Actur. En la margen derecha, que se encuentra más despejada, podemos encontrar como elementos de interés susceptibles de ser dañados el Club Deportivo Ebro y una subestación eléctrica.

## CAUDALES DE ESTUDIO

Es común para la evaluación de caudales de proyecto recurrir al ajuste estadístico de series de datos históricos, de estaciones de aforo cercanas, a funciones de evaluación de extremos. Concretamente en caudales de ríos las funciones más utilizadas son la función LOG-Pearson III de tipo III y la función de Gumbel, función de valores extremos de tipo I que responde a la siguiente formulación:

$$F(x) = e^{-e^{-(x-b)/a}} \quad (1)$$

$$a = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S_x \quad (2)$$

$$b = \bar{X} - E a \quad (3)$$

donde

$S_x$ : desviación típica muestral

$\bar{X}$ : media muestral

$E$ : constante de Euler (0,577)

El ajuste a la función LOG-Pearson III se ha llevado a cabo aplicando la formulación del factor de frecuencia que expresa cualquier variable aleatoria como

$$y_T = \bar{y} + K_T S_y \quad (4)$$

donde

$\bar{y}$ : media muestral de  $\log(x)$

$S_y$ : desviación típica muestral de  $\log(x)$

$K_T$ : factor de frecuencia que toma el valor

$$K_T = Z + (Z^2 - 1)K + \frac{Z^3 - 6Z}{3}K^2 - (Z^2 - 1)K^3 + ZK^4 + \frac{1}{3}K^5 \quad (5)$$

$Z$ : valor de la variable normal estandarizada para el período de retorno  $T$

$$K = \frac{C_s}{6}$$

$C_s$ : coeficiente de asimetría de  $\log(x)$

La estación más cercana a la zona de estudios es la EA-11 EBRO EN ZARAGOZA situada en el puente de Santiago en Zaragoza. Aplicando la metodología anterior a la serie histórica de dicha estación se obtienen los siguientes caudales de avenida.

Tabla 1.

RETORNO (años)	CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)	
	GUMBEL	LOG-PEARSON III
2	1.899,35	1.917,62
5	2.532,02	2.579,60
10	2.954,22	2.984,47
25	3.487,66	3.462,92
50	3.883,40	3.798,19
100	4.276,21	4.117,48
250	4.793,42	4.520,60
500	5.183,95	4.814,86

A la vista de los resultados anteriores, y aunque la función LP-III puede considerarse más adecuada para el cálculo de caudales máximos instantáneos,

se adopta la función de Gumbel, por ser oficial en España y obtener unos resultados más altos, con los siguientes caudales de cálculo, donde los tres primeros datos representan el caudal medio de estiaje, anual y aguas altas respectivamente:

Tabla 2.

RETORNO (años)	CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)
Estiaje	30
Medio	250
Alto	600
1	1.200
2	1.900
5	2.500
10	2.950
25	3.500
50	3.890
100	4.280
250	4.800
500	5.200

## MODELOS DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA

### Estudio unidimensional

En primer lugar se realizó un estudio unidimensional tradicional en régimen permanente el cauce que tiene como antecedente el *Estudio sobre la estabilización de la lámina del río Ebro a su paso por Zaragoza* realizado por el CEDEX en 1997. El objeto de este estudio unidimensional es proporcionar una primera aproximación al comportamiento hidráulico del meandro mediante la suposición de que el agua discurrirá por el cauce en situación de avenida, despreciando la componente de la velocidad normal al eje del cauce. Este tipo de suposición es correcta cuando se trata de avenidas que no sobrepasan el cauce normal, pero cuando se tienen avenidas que sí lo hacen el flujo general es muy diferente de la forma del cauce normal y, por lo tanto, los perfiles de río utilizados en el cálculo no representan la realidad.

Como quedó expuesto en García-Navarro y Alcrudo (1995), la discretización de las ecuaciones unidimensionales de Saint Venant por el método de diferencias finitas, con las hipótesis de simplificación de la problemática que suponen, son aceptadas comunmente para la simulación de estados transitorios en ríos. Estas ecuaciones formulan la conservación de la masa y del momento lineal a lo largo del cauce, entre diversas secciones transversales,

teniendo como objeto seguir la evolución de la lámina de agua en el tiempo en cada sección transversal, conocido el estado inicial, la topografía y las condiciones de contorno. En formulación conservativa (Cunge et al., 1980) son :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2 / A + gI_1)}{\partial x} = gA(S_0 - S_f) + gI_2$$

Donde  $A$  es el área de la sección transversal,  $Q$  el caudal,  $x$  la distancia a lo largo del cauce,  $t$  el tiempo,  $I_1$  el término de presión hidrostática,  $I_2$  el de presión producida por variación del ancho de sección,  $S_0$  es la pendiente y  $S_f$  la fricción según la ley de Manning (Chow, 1959)

$$S_f = \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{\frac{4}{3}}} \quad (7)$$

Siendo  $n$  el coeficiente de fricción de Manning, y  $R$  el radio hidráulico definido como  $R=A/P$ , con  $P$  como perímetro mojado.

Para el estudio unidimensional se utilizó el programa HEC-RAS 2.2 del U.S. Army Corps of Engineers. Este programa realiza el cálculo de un cauce natural basándose en secciones transversales representativas de tramos del río y mediante la resolución del sistema anterior en régimen permanente.

Para la resolución numérica de este problema es necesario conocer :

- Área, anchura y perímetro mojado y como funciones de la altura de agua. En cauces irregulares se realiza mediante tablas generadas tras la descomposición en trapecios de cada sección transversal, conocidos los puntos que la definen.
- La pendiente del fondo y el coeficiente de fricción o de Manning en cada sección del cauce. Este último puede tomarse uniforme o variable con la altura. En este estudio se ha tomado un valor de 0,03 para el cauce y 0,06 para las riberas.
- Las condiciones de contorno en los extremos. Aguas arriba, usualmente un caudal o calado determinado, cuando el régimen es supercrítico y aguas abajo análogamente, o una relación matemática entre ellos, cuando el régimen es subcrítico.

- Los parámetros y dimensiones de un elemento hidráulico interno como el caso de una presa, con vertido a través de un vertedero, compuerta, turbina, puente, etc .

En el tramo de estudio se tomaron 23 secciones, coincidentes con las del estudio del CEDEX, de forma que la zona de interés, situada entre los perfiles 6 y 20 quede a 1.500 m de la sección aguas abajo y a 700 m de la sección aguas arriba con lo que no se ve afectada por las condiciones de contorno (Fig.1). Una vez introducidos los datos geométricos de las secciones del cauce, se realizó la simulación para los estados estacionarios dados por la Tabla 2.

Dado que el programa utilizado es diferente al propuesto por CEDEX e igualmente pueden existir diferencias en la consideración de algún detalle en la definición de los perfiles, los resultados obtenidos son naturalmente diferentes entre ambos estudios. No obstante, como comprobación de la equivalencia de ambos desde el punto de vista numérico y teniendo en cuenta su calidad de unidimensionales, se cotejaron ambos resultados, resultando ser totalmente comparables y admisibles como elemento de referencia con el método bidimensional. Los resultados numéricos se muestran en las Figuras. 2 y 3. De ellos se extrae como conclusión que la sobre-elevación producida por la construcción del puente es de unos pocos centímetros y la inundación adicional es prácticamente inapreciable. Otras conclusiones dignas de mención que ponen en duda la validez del método son:

- El Actur (Fig. 1) se encontraría bajo peligro de inundación para caudales superiores a 3.500 m<sup>3</sup>/s (cota 200,15), lo cual está en discordancia con los hechos observados, ya que en el año 1977 pasaron por el Ebro más de 3.100 m<sup>3</sup>/s y el resguardo observado fue superior a 1m.
- El puente de la autopista (Fig 1) cuya parte inferior se encuentra a la cota de 199m aproximadamente se encontraría bajo peligro de inestabilidad para caudales del orden de 3.500 m<sup>3</sup>/s y superiores, cuando en el año 1977 (año de construcción del puente de la autopista) pasaron 3.154 m<sup>3</sup>/s, la lámina no alcanzó la cota inferior de las vigas del puente y según el modelo unidimensional se debería haber alcanzado la cota 199,94m.

Estas dos observaciones de campo desvalorizan los resultados obtenidos en el estudio unidimensional



Figura 1: Vista general del plano de situación del meandro de Ranillas en el río Ebro a su paso por la ciudad de Zaragoza y localización de las secciones transversales usadas en el modelo unidimensional.

confirmando que la utilización de estudios unidimensionales en zonas de meandro puede resultar poco adecuada.

## Estudio bidimensional

El principio básico del modelo bidimensional es que el movimiento del fluido se supone gobernado por los principios fundamentales de conservación de la masa y segunda ley de Newton en dos direcciones horizontales. Esta aproximación lleva asociadas las mencionadas hipótesis que definen el modelo de aguas poco profundas (St. Venant). De entre ellas, es destacable la de distribución hidrostática de presiones. En términos matemáticos, adoptan la forma de ecuaciones en derivadas parciales. Se trata de un sistema hiperbólico no lineal de leyes de conservación para problemas no permanentes.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( hu^2 + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial huv}{\partial y} = gh(S_{0x} - S_{fx})$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( hv^2 + g \frac{h^2}{2} \right) = gh(S_{0y} - S_{fy})$$

donde  $h$  representa la profundidad del agua,  $hu$  y  $hv$  son los caudales unitarios a lo largo de las

direcciones coordenadas  $x$ , y respectivamente,  $S_{0x}$ ,  $S_{0y}$  dan cuenta de las variaciones del fondo del cauce en forma de pendiente y  $S_{fx}$ ,  $S_{fy}$  constituyen los términos de fricción del agua con el fondo del cauce en cada una de las direcciones coordenadas. La fricción se modela a partir de leyes semi-empíricas importadas de la teoría unidimensional en equilibrio. Son necesarias condiciones iniciales y de contorno para la resolución del sistema.

El dominio donde se mueve el flujo se subdivide o discretiza en un conjunto de celdas triangulares no estructuradas para su resolución numérica y se aplican las leyes de conservación para determinar las variables del flujo en los centros de las celdas. La elección de la malla es un factor importante en la simulación numérica. Las mallas no estructuradas suponen un gran avance en el análisis del flujo en varias dimensiones; particularmente por su flexibilidad cuando se construyen mallas ajustadas a un contorno en casos de geometrías complejas y, en general, porque muestran ausencia de direcciones privilegiadas. El mallado se generó a partir de información cartográfica y de los datos proporcionados por el estudio unidimensional para el fondo del cauce. Asimismo los valores de Manning fueron importados del modelo unidimensional.

Respecto a la técnica de resolución de las ecuaciones, se han usado métodos de volúmenes finitos porque tratan de combinar lo mejor de los métodos de elementos finitos, su flexibilidad geométrica, con lo mejor de los métodos en diferencias

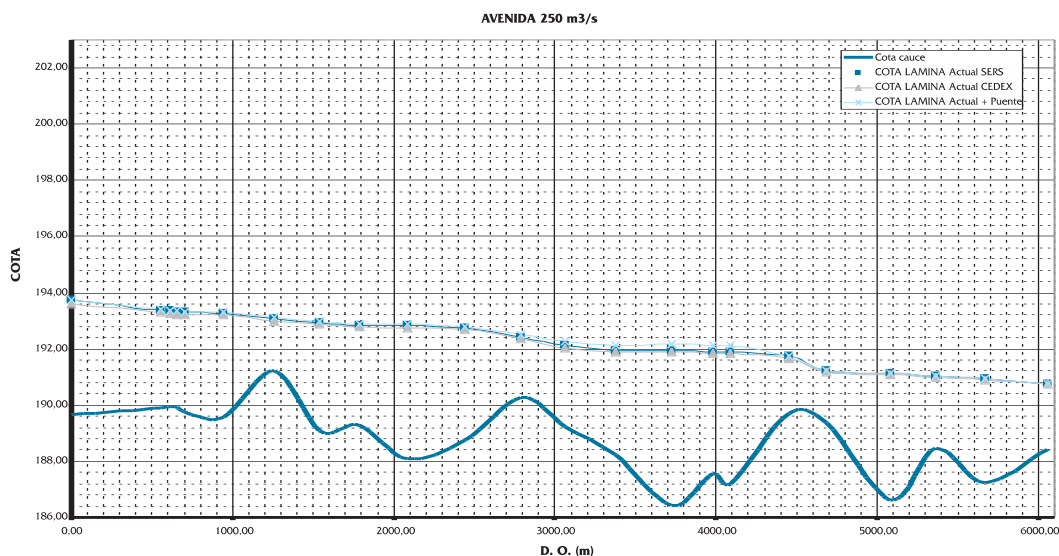


Figura 2: Calibración de los resultados obtenidos con HEC-RAS frente a los obtenidos por el CEDEX para un régimen estacionario de  $Q=250 \text{ m}^3/\text{s}$ .

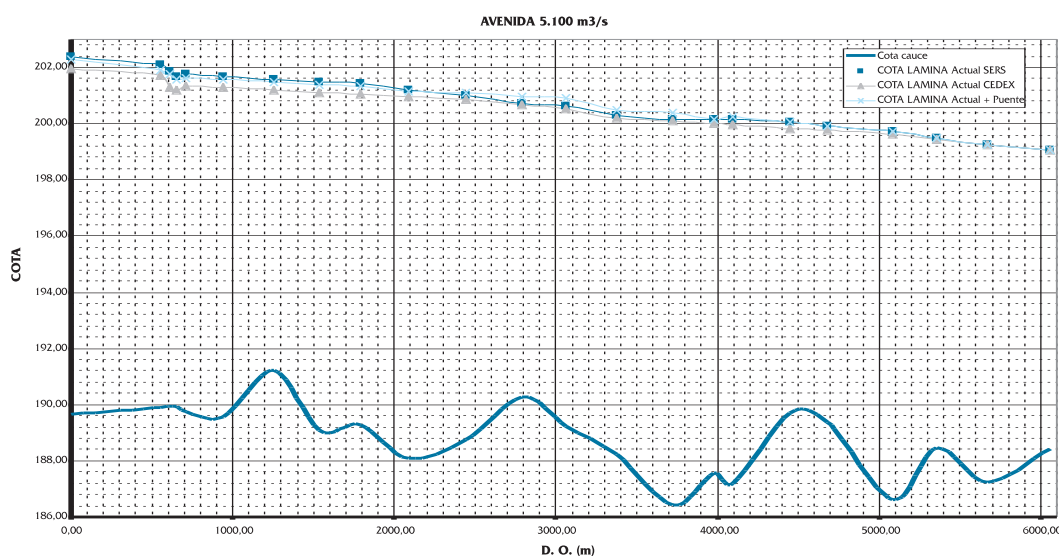


Figura 3: Calibración de los resultados obtenidos con HEC-RAS frente a los obtenidos por el CEDEX para un régimen estacionario de  $Q=5100 \text{ m}^3/\text{s}$ .

finitas, su flexibilidad en la definición del flujo discreto (valores discretos de las variables dependientes y sus flujos asociados).

La presencia de pendientes elevadas, valores altos de rozamiento y cambios fuertes dentro de una geometría irregular representan una dificultad que puede conducir a importantes errores numéricos presumiblemente producidos por el tratamiento numérico de los términos fuente. Recientes contribuciones en el estudio de problemas con términos fuente ponen de manifiesto que están presentes en gran número de problemas de interés tecnológico. Vázquez-Cendón (1994) ha propuesto una me-

todología general, para extender algunos de los esquemas descentrados clásicos al caso de leyes de conservación con términos fuente. Partiendo de este trabajo, se han usado técnicas especiales de descentramiento para la discretización de los fondos irregulares.

Debido a los valores iniciales en problemas de avance sobre fondo seco y en el caso en que se tenga un valor muy alto de rugosidad (al querer representar los efectos que producen la vegetación, una composición del suelo especialmente rugosa o un fondo de un cauce real de un río), los términos de fricción se vuelven dominantes en el problema y

pueden añadir errores numéricos en los resultados. Para evitar este problema, lo que se ha hecho es aproximar los términos de fricción en una forma semi-implícita.

El esquema anterior precisa de condiciones de contorno en todo el borde del área estudiada, éstos han sido:

- Sección aguas arriba: imposición de caudal
- Sección aguas abajo: curva de gastos obtenida por el CEDEX en 1997
- Contornos laterales: velocidad ortogonal al contorno nula

Con estas características se elaboraron dos mallas de cálculo correspondientes al estado actual o con el puente construido (ver Figuras 4 y 5). Para la elaboración de las mallas se partió de la toma de puntos de cota, de los perfiles del CEDEX, y se completó el área mediante puntos procedentes de las cartografías 1/5.000 del Ayuntamiento de Zaragoza y 1/1.000 específica de proyecto. Con estos puntos y mediante un programa de mallado de elementos finitos se ha procedido a construir sendas mallas de elementos triangulares.

En cuanto al hidrograma de cálculo, y dado que se trata de programas que realizan la integración de forma explícita y en régimen transitorio, se ha optado por utilizar un hidrograma lineal que subiera desde 0 hasta 5.200 m<sup>3</sup>/s en 5,5 horas.

Los estados se almacenan cada 15 minutos exponiendo en el presente estudio únicamente los que corresponden, aproximadamente, a los mo-

mentos en que por la sección de aguas abajo está circulando el caudal correspondiente al período de retorno estudiado, de forma que el caudal circulante por el resto del cauce siempre es matizadamente superior quedando así del lado de la seguridad.

El análisis bidimensional permite conocer, en verdadera magnitud, las áreas de inundación y la velocidad del agua en valor y dirección en todos los puntos, aspecto que no puede ser deducido de los estudios unidimensionales. Las Figuras 6 y 7 son un ejemplo de la información que proporciona un modelo de este tipo; en ellas se representa el resultado correspondiente a simular el rodaje de una misma onda de avenida sobre el escenario actual y sobre el futuro cauce con puente y terraplén. En principio un estudio bidimensional será más preciso que un estudio unidimensional y esto redundará en una bajada de los calados de lámina, lo que se corresponde con las observaciones de campo y se muestra en las Figuras 8 y 9 donde se representa la predicción de la altura de lámina de agua según los modelos uni y bidimensional siguiendo la línea central del cauce del río y donde la sección 1.675-1.723 corresponde con el puente del Tercer Milenio y la sección 5.392-5.439 corresponde al puente de la autopista.

A la vista de los resultados, podemos concluir:

1. Los resultados obtenidos coinciden con la realidad observada.
2. La inundación del Actur no se produce actualmente para caudales superiores a 5.200 m<sup>3</sup>/s (avenida de 500 años). Una vez construido el puente, la cota de la lámina se mantiene por debajo de la mota de guarda con un resguardo de 15 cm.

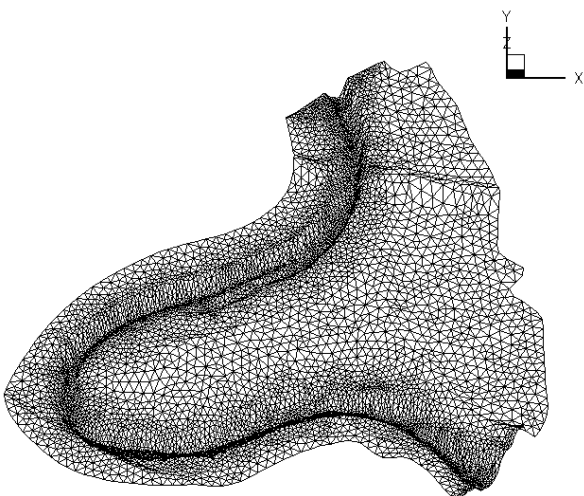


Figura 4: Malla triangular utilizada para la discretización del meandro en la simulación de la onda de crecida en el cauce actual.

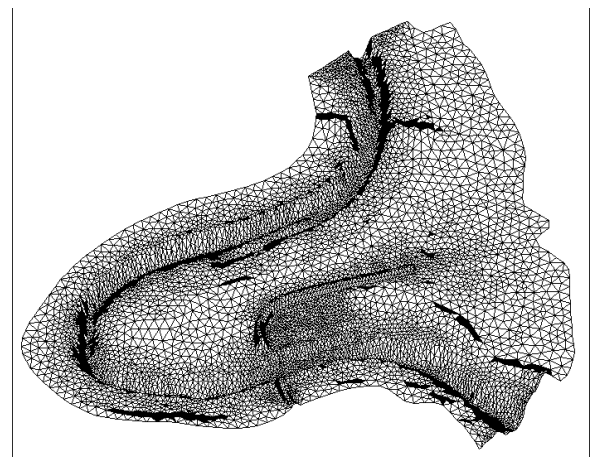


Figura 5: Malla triangular utilizada para la discretización del meandro en la simulación de la onda de crecida con terraplén para el nuevo puente

3. El puente de la autopista no ve alcanzada la parte inferior de las vigas con caudales  $5.200 \text{ m}^3/\text{s}$  (500 años aproximadamente) alcanzándose en este punto la cota 199,34 en estado actual y 200,06 en estado modificado, lo que supone un resguardo aproximado de 0,74 m aproximadamente.

4. Como era de esperar se produce un pequeño vertido de una lámina de 20 cm de espesor a la altura de la glorieta de Pablo Ruiz Picasso (Fig. 7). Dada la escasa velocidad del agua en esta zona no se esperan daños producidos por dicho vertido. En cualquier caso es fácil defender la glorieta mediante una barandilla en lo que se puede poner un pequeño zócalo de 0,50 m, en el tramo final de la Ronda.

5. Hay que señalar un notable descenso de la cota de lámina con respecto al análisis unidimensional de forma que en la sección del puente pasamos de alcanzar, para 500 años, la cota 200,16 a la cota 199,30, una vez construido el puente, quedando así un resguardo de 0,70 m con respecto a la cota de los apoyos.

6. Como se puede observar en los resultados anteriores para caudales inferiores a  $2.500 \text{ m}^3/\text{s}$  el estrechamiento del cauce produce una aceleración del flujo, lo que se traduce en una bajada de la lámina de agua. Sin embargo, conforme aumenta el caudal este hecho pierde importancia frente al hecho de que se produce un embalse aguas arriba del puente con el consiguiente aumento de la cota de lámina de agua.

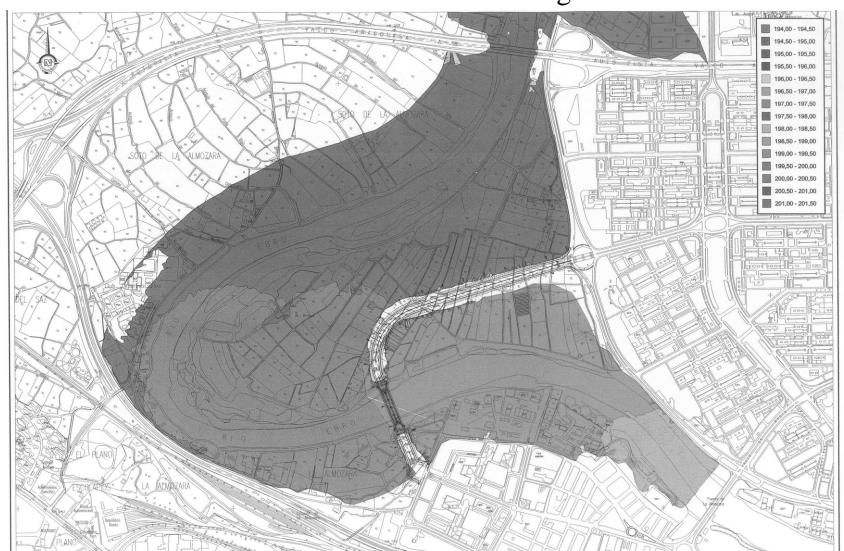


Figura 6 : Mapa de la cota de la lámina de agua en el momento en que pasa el caudal máximo de avenida ( $5100 \text{ m}^3/\text{s}$ ) por el puente de la Almozara. Resultados de la simulación de la avenida en presencia del terraplén del nuevo puente usando el modelo bidimensional

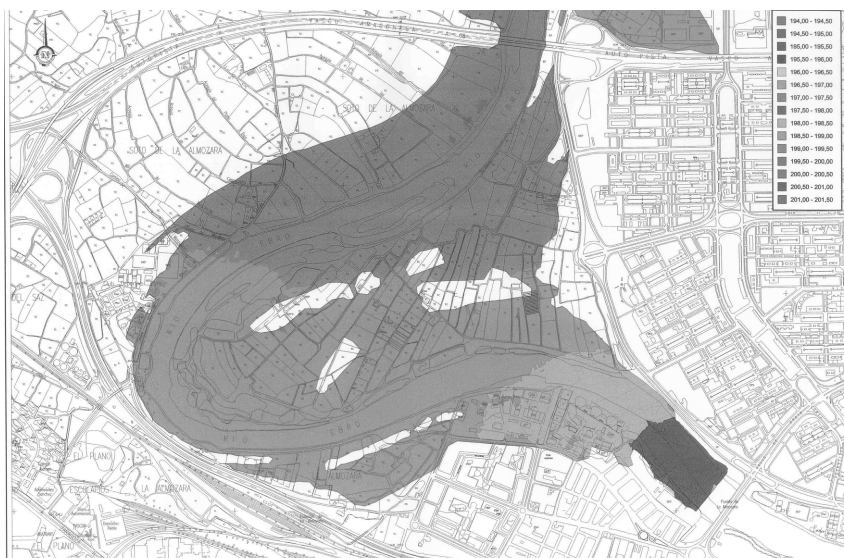


Figura 7 : Mapa de la cota de la lámina de agua en el momento en que pasa el caudal máximo de avenida ( $5100 \text{ m}^3/\text{s}$ ) por el puente de la Almozara. Resultados de la simulación de la avenida en el cauce actual usando el modelo bidimensional



# ESTUDIO HIDRÁULICO DEL RIESGO DE INUNDACIÓN EN EL MEANDRO DE RANILLAS: MODELOS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA

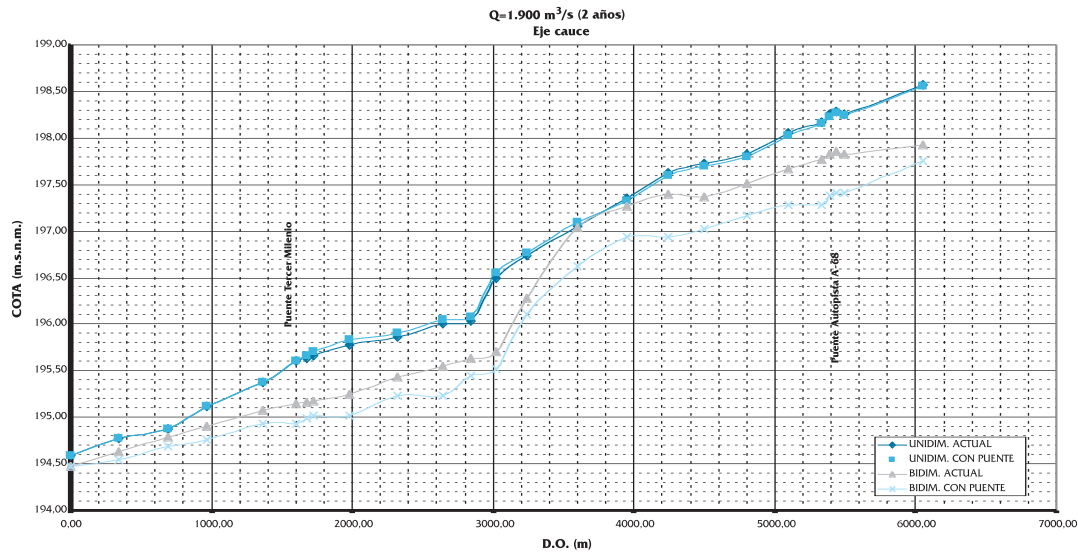


Figura 8 : Comparación de las previsiones de altura de lámina de agua proporcionadas por los modelos unidimensional y bidimensional siguiendo el eje central del río para un caudal de 1900 m<sup>3</sup>/s

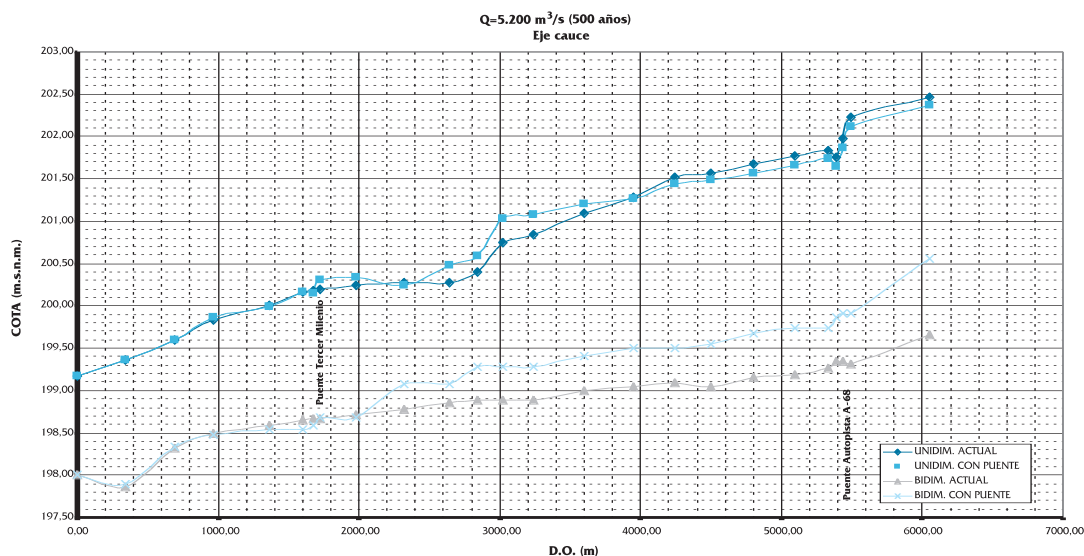


Figura 9 : Comparación de las previsiones de altura de lámina de agua proporcionadas por los modelos unidimensional y bidimensional siguiendo el eje central del río para un caudal de 5200 m<sup>3</sup>/s

## CONCLUSIONES

Desde el punto de vista de la modelización numérica, el caso de estudio presentado representa una simulación ambiciosa por la irregularidad de la topografía y permite concluir que el modelo bidimensional propuesto en este trabajo es apto para estudios de este tipo. Al tratarse de un modelo explícito posee una limitación inherente en el cálculo de los pasos de tiempo, salvada en cierto modo con la velocidad de procesamiento de los ordenadores actuales, pero supone un patrón y referencia para el desarrollo de modelos implícitos que no poseen dichas restricciones. Las técnicas explícitas en general presentan mejores propiedades de cara a la si-

mulación numérica de frentes de onda transcritos. Es posible, sin embargo, adaptar técnicas implícitas a este problema y esa será la dirección de nuestro trabajo futuro.

El modelo bidimensional es un modelo universitario propio en desarrollo que, en la actualidad, no se encuentra adaptado a una explotación comercial, pero que puede competir con otros productos similares de software extranjero aliviando la actual dependencia que hay en España de tales códigos. La inclusión de estructuras como puentes, vertederos y otros elementos internos, así como la optimización de la velocidad de cálculo son los objetivos a cubrir en un futuro inmediato.

Desde el punto de vista de la aplicación en Ingeniería, la primera conclusión que se extrae del estudio es que la obra proyectada produce una sobre-elevación de la lámina, en torno a los 0,50 m para la avenida de 500 años y 0,40 m para la de 100 años.

Además cabe destacar que se pone de manifiesto en el presente estudio que la utilización de métodos unidimensionales en áreas de meandros, donde difieren notablemente el cauce normal y el de avenida, no es correcta y, en este caso, llevan a una importante sobreestimación de la lámina de agua. Una buena aproximación de este tipo de métodos consiste en modificar el eje del cauce, de forma que se represente el flujo en situación de inundación y no el permanente, como ya se hizo en el estudio realizado por SERS, S.A. en el año 1982 donde se obtenían unas cotas de inundación intermedias entre el resultado del CEDEX y el resultado bidimensional.

En cuanto a las diferencias entre las sobre elevaciones producidas en los resultados en uno y otro método hay que señalar que se debe a que el método bidimensional tiene en cuenta las llanuras de inundación existentes como cauce en toda su dimensión real y, por lo tanto, la energía necesaria para la circulación del agua resulta menor, cuando situamos el terraplén y el puente estamos obligando al mismo flujo a realizar un camino más largo y por lo tanto la energía necesaria para recorrerlo aumenta, naturalmente, acercándose la realidad del movimiento al cálculo unidimensional que representa el esquema más desfavorable en cuanto a niveles de lámina para la circulación del agua.

### LISTA DE SÍMBOLOS

$a, b$	Parámetros de ajuste de la función de Gumbel
$F(x)$	Función de Gumbel
$x$	Variable estadística.
$S_x$	desviación típica muestral
$\bar{x}$	media muestral
$E$	constante de Euler (0,577)
$y$	media muestral de $\log(x)$
$S_y$	desviación típica muestral de $\log(x)$
$KT$	factor de frecuencia en la función LogPearson III
$Z$	valor de la variable normal estandarizada para el período de retorno T

$$K = \frac{C_s}{6}$$

$C_s$	coeficiente de asimetría de $\log(x)$
$A$	área de la sección transversal
$Q$	caudal
$X$	distancia a lo largo del cauce
$t$	tiempo
$I_1$	término de presión hidrostática
$I_2$	término de presión producida por variación del ancho de sección
$S_0$	pendiente del fondo del cauce
$S_f$	pendiente de la línea de energía hidráulica.
$n$	coeficiente de fricción de Manning
$R$	radio hidráulico
$P$	perímetro mojado
$h$	profundidad del agua
$hu, hv$	caudales unitarios a lo largo de las direcciones coordenadas x, y respectivamente,
$S_{0x}, S_{0y}$	variaciones del fondo del cauce en forma de pendiente en cada una de las direcciones coordenadas
$S_{fx}, S_{fy}$	términos de fricción del agua con el fondo del cauce en cada una de las direcciones coordenadas

### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a Manuel Jesús Castro, de la universidad de Málaga, por la ayuda prestada con el mallado y a M<sup>a</sup> Elena Vázquez Cendón, de la Universidad de Santiago de Compostela, por las discusiones mantenidas.

### BIBLIOGRAFÍA

Abbott M. B. (1992) .Computational Hydraulics. Ashgate, Aldershot, U.K.

Brufau P. y P. García Navarro (2000) Two-dimensional dam break flow simulation. Int. J. Num. Meth. Fluids, 33:35-57.

Brufau P. y P. García Navarro (2001) Modelo de simulación bidimensional de transitorios en aguas superficiales: Aplicación a roturas de presa Ingeniería Civil, 121.

Casulli.V. (1990) Semi-implicit finite difference methods for the two dimensional shallow water equations. J. Comp. Phys., 86:56-74.

Cunge,J.A., F.M. Holly y A. Verwey. (1980) Practical aspects of computational river hydraulics. Pitman Pub. Inc.

Estrela T. y L. Quintas.(1996) El modelo de flujo bidimensional GISPLANA. CEDEX Ingeniería Civil, 104:13-21.

Fread D.L. (1985). Channel routing. Hidrological forecasting. M. G. Anderson and T.P. Burt, eds., Jhon Wiley and Sons Ltd. N.Y.

- García R. y R.A. Kahawita.(1986) Numerical solution of the St. Venant equations with the MacCormack finite difference scheme. *Int. J. Num. Meth. Fluids*, 6:259-274.
- García-Navarro P. y F. Alcrudo (1995). Simulación de flujo transitorio en cauces naturales. *Ingeniería del Agua*. 2 (1).
- Katopodes N. y T. Strelkoff.(1978) Computing two dimensional dam break flood waves. *ASCE J. Hyd. Eng.*, 104:1269-1288.
- Quecedo M. , M.Pastor, M<sup>a</sup>Isabel Herreros y J.A. Fernández-Merodo (2001), Simulación de ondas de avenida causadas por roturas de presas, *Ingeniería Civil*, 121.
- Vázquez Cendón M.E. (1994) Estudio de esquemas descentrados para su aplicación a las leyes de conservación hiperbólicas con términos fuente. Tesis Doctoral, Univ. de Santiago de Compostela.
- Villanueva I., P. García-Navarro y V. Zorraquino (1999) Validación experimental de un modelo computacional unidimensional para el cálculo de ondas de avenida, *Ingeniería del Agua* , 6(1).