

# Análisis de las incertidumbres, asociadas a las hipótesis de cálculo, en la estimación de curvas de gasto para crecidas, basada en el empleo de modelo matemático de cálculo hidráulico en régimen permanente

ANGEL LUIS ALDANA VALVERDE (\*); JUAN CARLOS GONZÁLEZ RODRÍGUEZ (\*\*)

**RESUMEN** Se analizan en este artículo algunos de los factores más importantes que pueden afectar a los resultados de cálculo de láminas de agua en un río para diferentes caudales bajo la hipótesis de régimen permanente. En este caso, el objetivo de este tipo de modelización ha sido la estimación de curvas de gasto para avenidas en las estaciones de aforo conectadas al sistema automático de información hidrológica (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Sur de España (CHSE), sistema conocido como red Hidrosur.

## ANALYSIS OF UNCERTAINTIES, ASSOCIATED TO THE CALCULATING HYPOTHESIS, IN DISCHARGE TABLES FOR HIGH FLOWS ESTIMATING, BASED ON MATHEMATICS MODELS FOR CALCULATING WATER SURFACE PROFILES FOR STEADY GRADUALLY VARIED FLOW

**ABSTRACT** *In this paper are analyzed some of the most important factors which can influence on the results of calculating water surface profiles for steady gradually varied flow. In this case, the objective of this kind of modeling, has been the estimation of discharges tables for high flows of river station gages connected to the hydrologic automatic information system (SAIH) of the Confederación Hidrográfica del Sur de España, system named "red Hidrosur".*

**Palabras clave:** Hidrometría; Hidráulica; Tiempo real; SAIH.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los modelos matemáticos pueden proporcionar una aproximación suficiente en la mayoría de los casos de aplicación práctica, según la finalidad última de la utilización de los resultados. En este caso, los trabajos realizados tenían como objetivo la estimación de curvas de gasto para ser usados en situaciones de avenida como dato de entrada al modelo de previsión en estaciones de aforos CRAF en la red Hidrosur.

El método alternativo a la utilización de un modelo matemático es el del aforo directo, midiendo velocidades en diferentes puntos de la sección en la que se desea estimar la relación entre caudales y niveles, pero esto es difícil de llevar a cabo en la práctica y es raro encontrar este tipo de medida en ríos como los que aquí se tratan, por encontrarse en cuencas con fenómenos hidrológicos que a menudo presentan un

carácter torrencial y que, al menos, responden a la lluvia de forma rápida.

Los trabajos de los que se extraen las conclusiones que aquí se presentan fueron realizados en el marco del convenio firmado entre la Confederación Hidrográfica del Sur de España (CHSE) y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) titulado "Convenio para la realización de trabajos de asistencia técnica en la implantación de modelos hidrológicos y de gestión hidráulica en la red Hidrosur". En la actualidad estas curvas están siendo usadas en la previsión de avenidas en tiempo real como un dato más para el citado modelo de previsión.

### 2. CARACTERÍSTICAS, BASE TEÓRICA Y LIMITACIONES DEL MODELO EMPLEADO

El software empleado para la realización de los cálculos de la lámina de agua es el denominado HEC-Ras, del Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers), que parte del conocido y ampliamente utilizado HEC-2, con varias mejoras con respecto a éste, entre las que destaca la interfase gráfica de usuario

(\*) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. CEH-CEDEX (Ministerio de Fomento).

(\*\*) Licenciado en Ciencias Químicas. Fundación Agustín de Bethancourt.

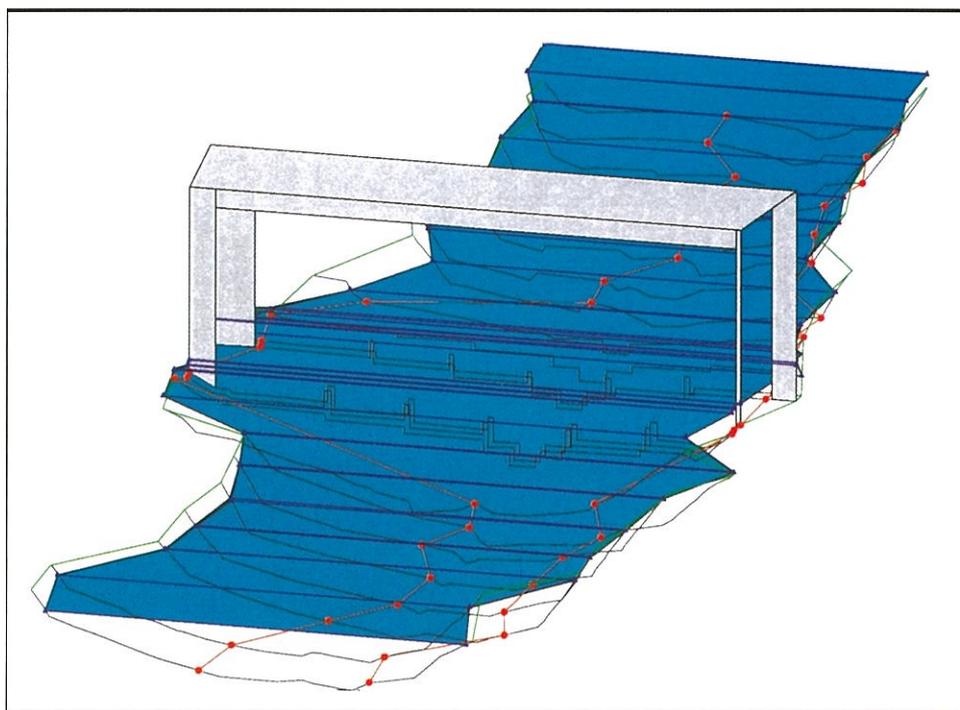


FIGURA 1. Almazora en Cantoria. Perspectiva de la estación de aforos

que facilita las labores de preproceso y postproceso. Este software permite el tratamiento de singularidades tales como puentes y su uso está muy extendido.

El modelo numérico incluido en este programa informático, permite realizar análisis del flujo permanente unidimensional gradualmente variado en lámina libre. Para su utilización se han de definir unas secciones transversales que representen una discretización del tramo o tramos a analizar.

La mayor parte de las limitaciones del modelo vienen derivadas de las hipótesis propias del modelo numérico, generales a los modelos matemáticos habitualmente empleados.

En primer lugar hay que recordar que el modelo de análisis que se emplea, opera bajo la hipótesis de régimen permanente, lo que conduce a resultados aceptables cuando no hay variaciones importantes en los hidrogramas de entrada al modelo, de tal forma que sean despreciables los términos inerciales de las ecuaciones completas de la hidráulica. Difierirá más de la realidad, cuanto más bruscas sean estas variaciones, o cuando los valores de los sumandos despreciados tengan una importancia relativa alta. En estos casos suelen observarse en la realidad fenómenos de histéresis notables.

Este tipo de modelo no tiene en cuenta el transporte de sólidos, lo que puede ser otra de las causas que desvían los resultados del modelo de la realidad. De producirse en el tramo de estudio un transporte importante de sólidos, por arrastre o suspensión, los calados necesarios para conducir iguales caudales líquidos serán mayores. Además, en la realidad, sobre todo para los caudales mayores que moverán cantidades más importantes de sólidos, pueden observarse modificaciones de la geometría del cauce que repercutan de forma notable en su comportamiento hidráulico.

Cuando los modelos numéricos tratan de resolver el problema hidráulico en situaciones en las que se presenta el régimen crítico, cuentan con la dificultad añadida de que en estos casos, las hipótesis implícitas en las ecuaciones bási-

cas no son del todo ciertas, pues las líneas de corriente presentan en la realidad fuertes curvaturas, es decir, no son ciertas las hipótesis de régimen gradualmente variado. Cuando se presenta este régimen, se observan inestabilidades que suelen manifestarse como ondulaciones en superficie.

### 3. FACTORES QUE SE ANALIZAN

Se analizan en los siguientes apartados un conjunto de factores que dependen bien de las ecuaciones del modelo, de los algoritmos de cálculo, de los parámetros de modelización o de la información de que se dispone y sirve de entrada al modelo. En concreto se tratan:

- Modo de cálculo.
- Rugosidad.
- Distribución transversal de caudales.
- Condición de contorno.
- Modificación de geometría.

Además se reflexiona en un apartado sobre un tema que afecta especialmente al objetivo de estos cálculos: la diferencia entre la realidad y los resultados del modelo matemático en lo concerniente al régimen crítico.

#### 3.1. MODO DE CÁLCULO

El modelo empleado da opción a que el usuario elija entre tres modos de cálculo: subcrítico, supercrítico y mixto. Para el primer modo (modo correspondiente a la hipótesis de flujo en régimen lento, también denominado subcrítico) se realizan cálculos partiendo de la condición de contorno en la sección más aguas abajo, avanzando hacia aguas arriba, contrariamente a lo que se hace en el modo supercrítico (régimen rápido), pues en este caso se parte de la

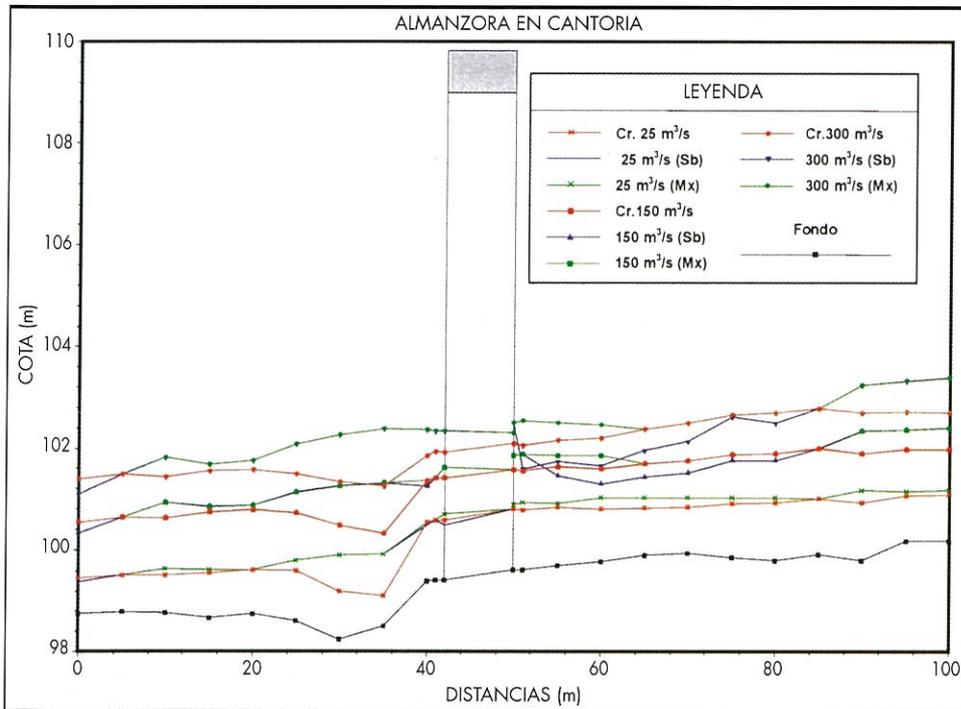


FIGURA 2. Almanzora en Cantoria. Cálculos realizados en modo mixto (azul) y subcrítico (verde) para caudales de 25, 150 y 300 m<sup>3</sup>/s.

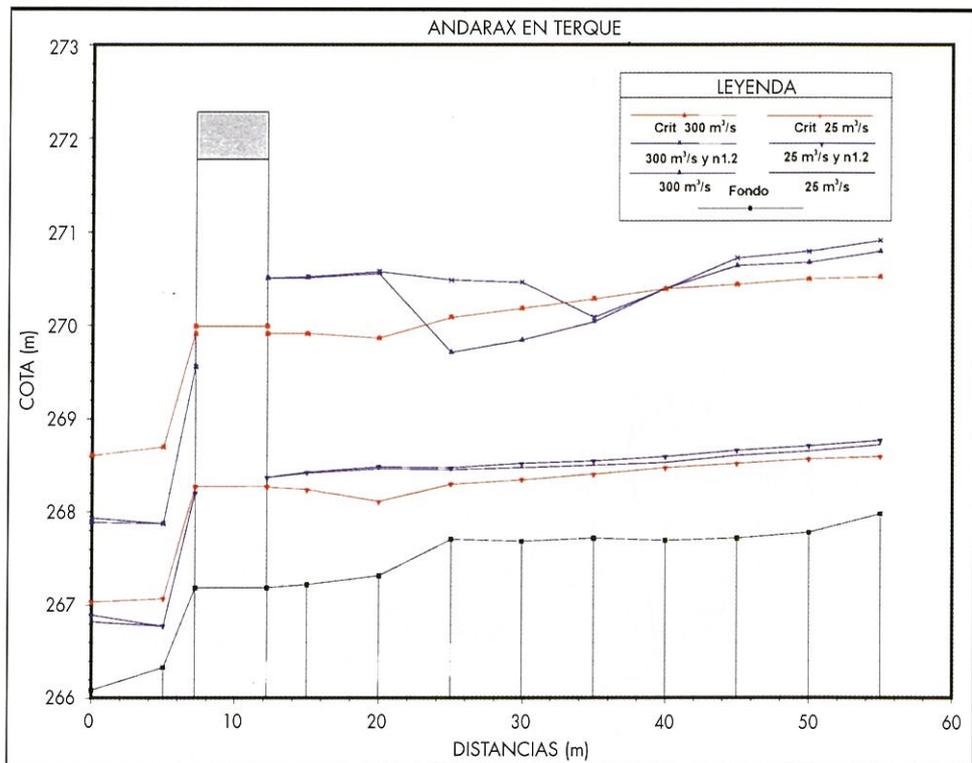


FIGURA 3. Andarax en Terque. Efecto de la rugosidad.

condición de contorno en el extremo aguas arriba avanzando hacia aguas abajo. Además, este modelo proporciona el modo de cálculo denominado mixto, en el cual el algoritmo de cálculo realiza varias pasadas en ambos sentidos buscando los cambios de régimen, situando y calculando los resaltos hidráulicos.

Como ejemplo de análisis de diferencias de los cálculos en este modo respecto a alguno de los anteriores, se cita la aplicación del modelo en la estimación de la curva de gasto para avenidas en la estación de aforos que se encuentra en el río Almanzora a su paso por el término de Cantoria (Almería). El régimen de flujo que se deduce de los cálculos es

subcrítico muy próximo al crítico. A causa de esto puede que se presenten resaltos que se manifestarán como ondulaciones de la lámina. El modelo, al realizar cálculos en modo mixto, sitúa resaltos, claramente definidos para caudales altos, aguas arriba del puente, tal y como puede apreciarse en el gráfico de perfiles longitudinales de las láminas de agua para los diferentes modos (Figura 2), en la que se presentan los resultados de los cálculos realizados

en modo mixto (azul) y subcrítico (verde) para caudales de 25, 150 y 300 m<sup>3</sup>/s.

En cualquier caso, en la zona próxima a la sección de medida, el calado es muy próximo al crítico en todas las hipótesis contempladas en el estudio, lo que permite realizar una estimación de la relación nivel-caudal en este punto, excepto para los caudales mayores por lo que, como se verá sucesivos apartados, se contará para ellos con otras incertidumbres.

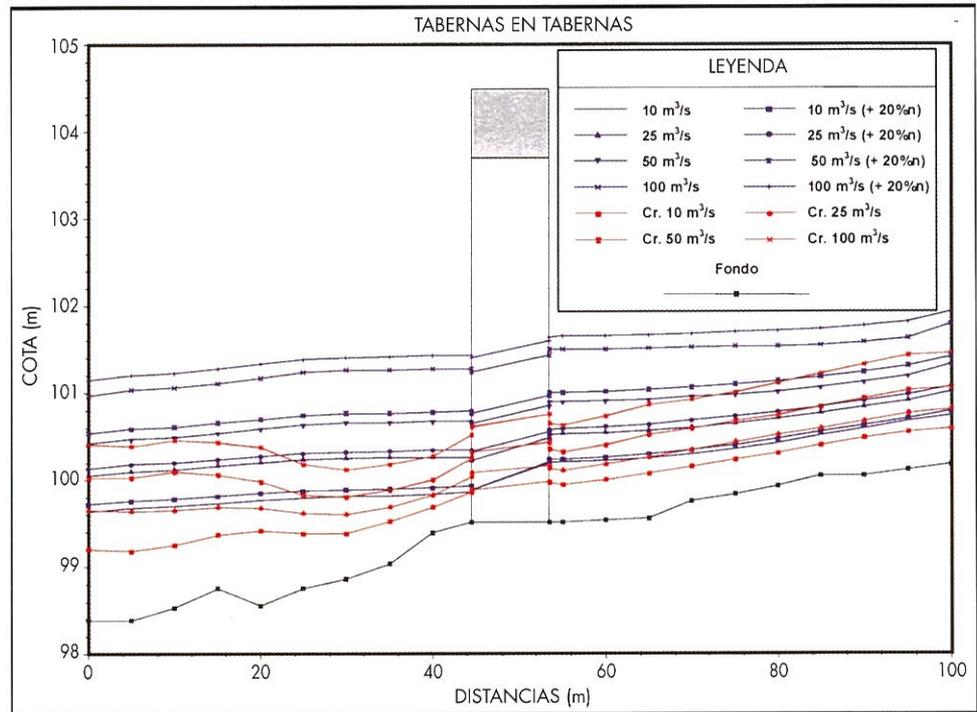


FIGURA 4. Rambla de Tabernas. Efecto de la rugosidad.

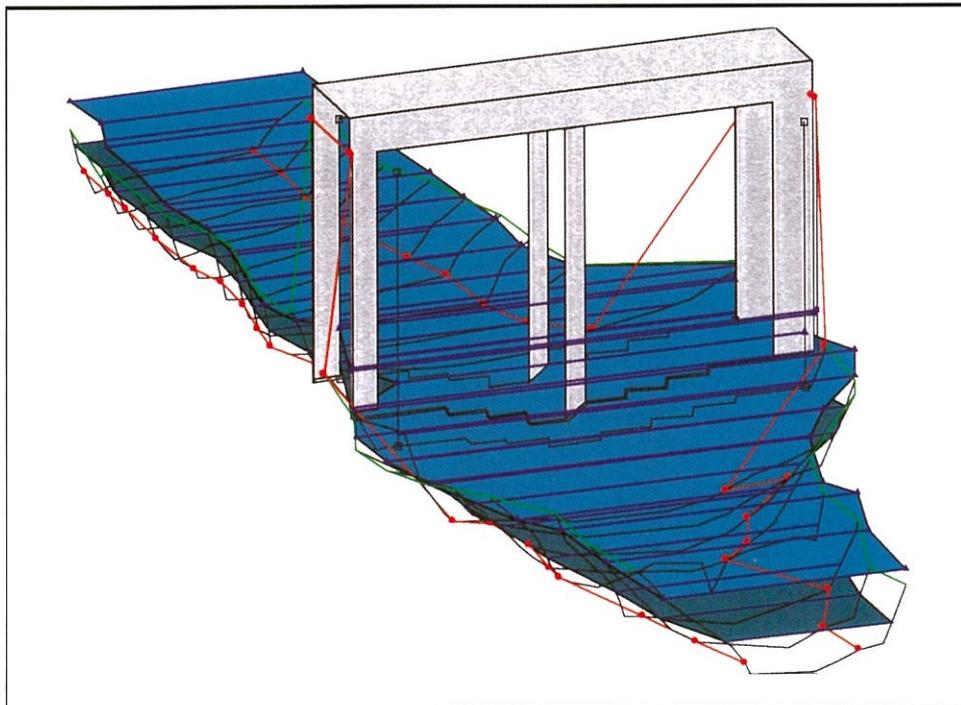


FIGURA 5. Genal en Algotocín y Jubrique. Perspectiva de la estación de aforos.

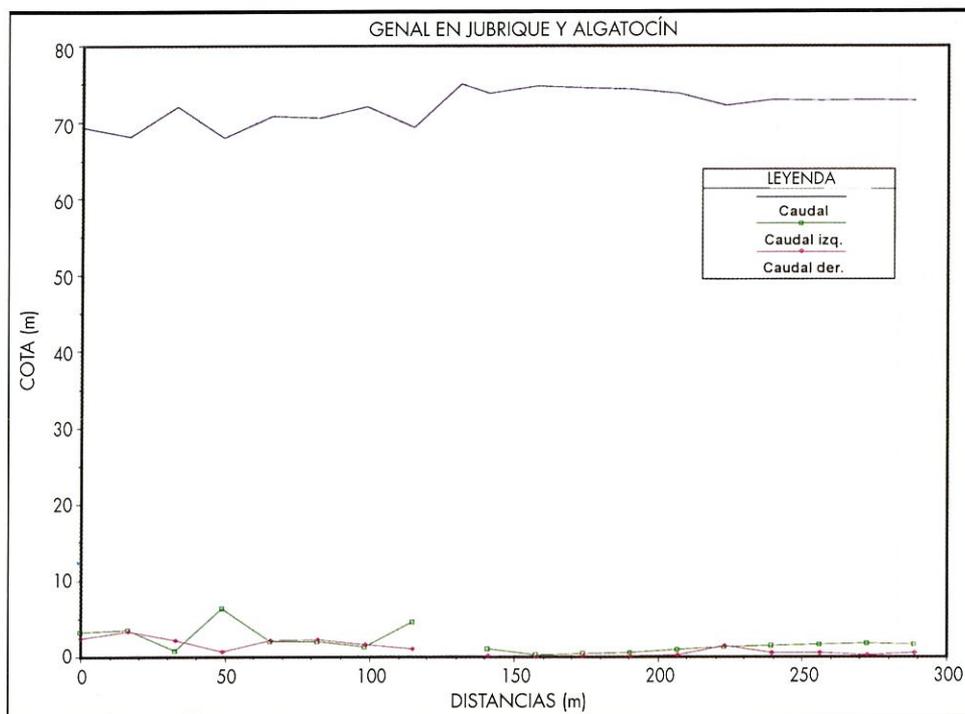


FIGURA 6. Distribución de caudales en la sección transversal en el río Genal.

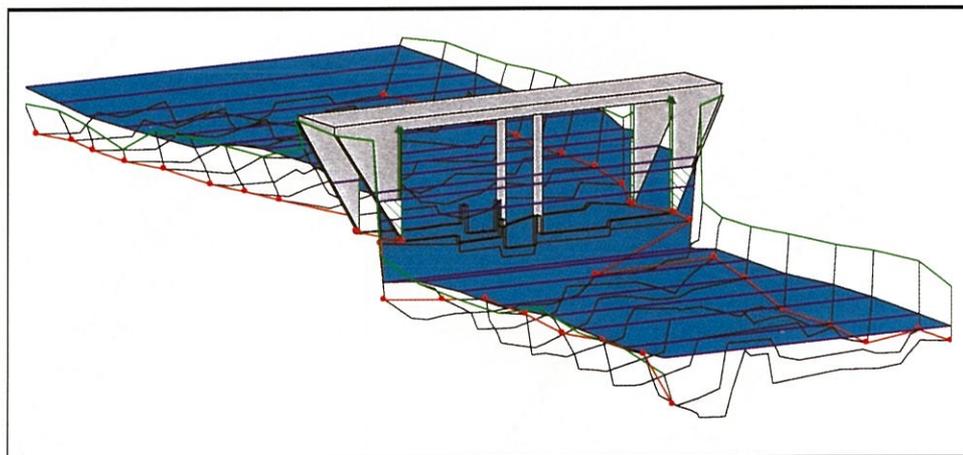


FIGURA 7. Guadalfeo en Lobras. Perspectiva de la estación de aforos.

### 3.2. RUGOSIDAD

Cuando el régimen del flujo en el tramo de estudio sea próximo al crítico, apenas se apreciarán cambios en los resultados de cálculo al variar la rugosidad, como es el caso de la estación de aforos del río Andarax en el término municipal de Terque, para el que se muestran los resultados de incrementar un 20% los valores de rugosidad supuestos. Sin embargo, tal y como puede comprobarse en el gráfico adjunto, el incremento de rugosidad sí afecta a lo concerniente a la formación del resalto hidráulico en los caudales mayores (Figura 3).

En un caso en el que el régimen de circulación del agua sea muy distinto al crítico, el efecto de la rugosidad puede ser importante, como se aprecia en el gráfico adjunto de resultados de cálculos (Figura 4) de la modelización de la estación de aforos de la rambla de Tabernas, situada en el

término de Tabernas, en el que se muestran los resultados de cálculo correspondientes a la rugosidad inicialmente supuesta y a los correspondientes a un incremento del 20% sobre la inicialmente supuesta, además de las láminas de agua que corresponderían a los calados críticos para cuatro caudales. El fondo del cauce en la zona de esta estación se encuentra cubierto de abundante vegetación, por lo que se le ha asignado un alto valor a la rugosidad, y en ella el agua circula en claro régimen subcrítico.

Este efecto podría suprimirse o al menos limitarse, si al final de la estación de aforos, en su extremo aguas abajo, se mantuviera el escalón con el que la estación se proyectó y construyó, hoy inexistente a causa de las sedimentaciones y que podría reconstruirse con unas sencillas labores de mantenimiento de la estación. De este modo se lograría que el agua alcanzase el régimen crítico a su paso por la estación.

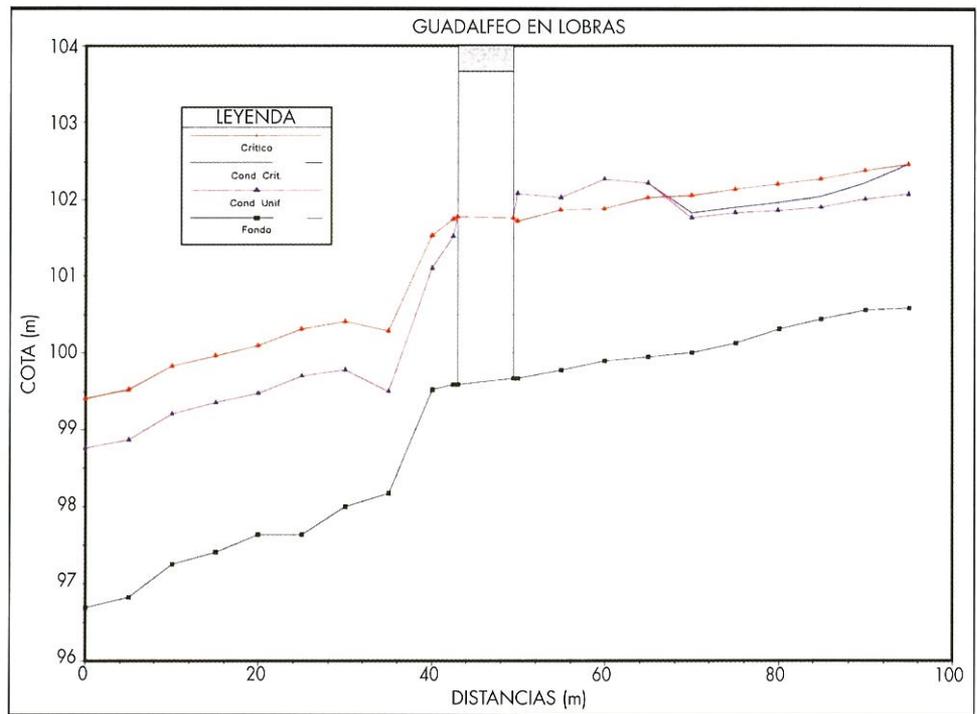


FIGURA 8. Guadalfeo en Lobras. Influencia de la condición de contorno (para caudal de 200 m³/s).

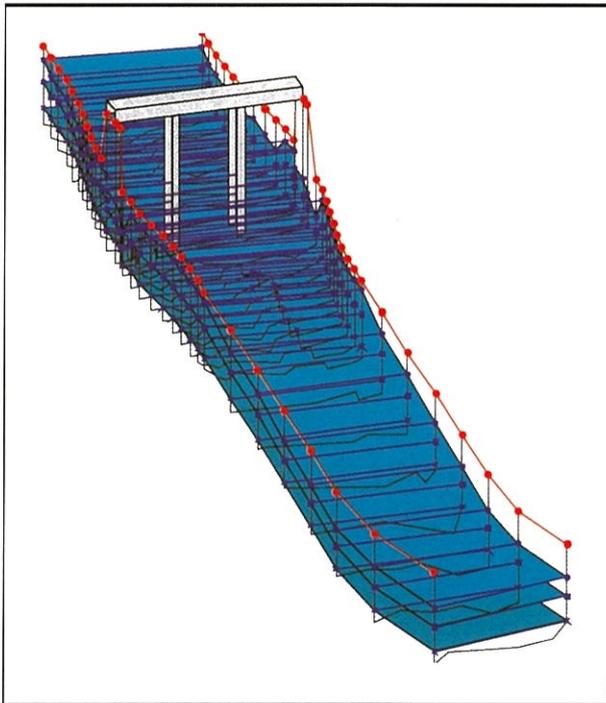


FIGURA 9. Nacimiento en Terque. Perspectiva con geometría actual.

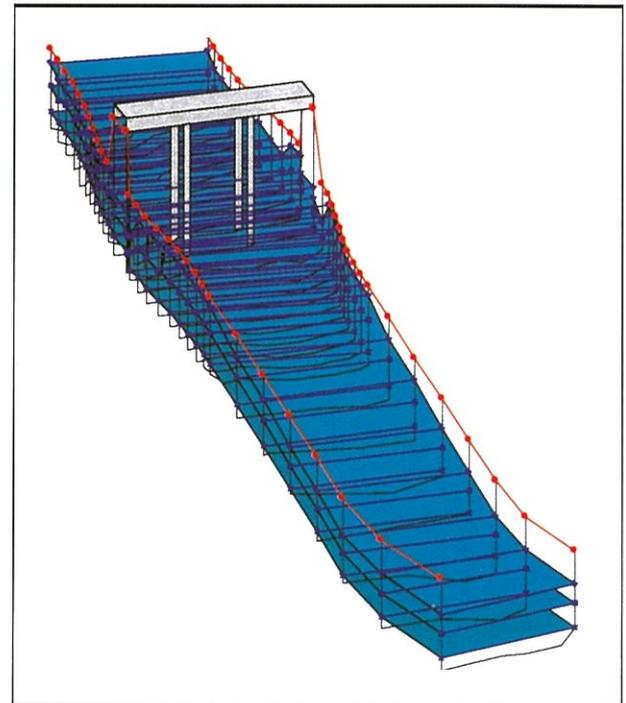


FIGURA 10. Nacimiento en Terque. Nacimiento con geometría modificada.

### 3.3. DISTRIBUCIÓN TRANSVERSAL DE CAUDALES (GENAL EN ALGATOCÍN Y JUBRIQUE)

En algunas ocasiones se puede dar la circunstancia de que se desee estimar la lámina de agua a que daría lugar un determinado caudal y que para esta lámina la cartografía de que se dispone resulte insuficiente. Si se conoce la zona, gra-

cias a la obligada visita al lugar, quizás sean admisibles extrapolaciones de esta cartografía si el análisis de la influencia que el error que en esta operación se produzca tiene poca repercusión en los resultados de cálculo. Tal es el caso de la estación de aforos del río Genal que se encuentra en el límite municipal de las poblaciones de Algotocín y Jubrique

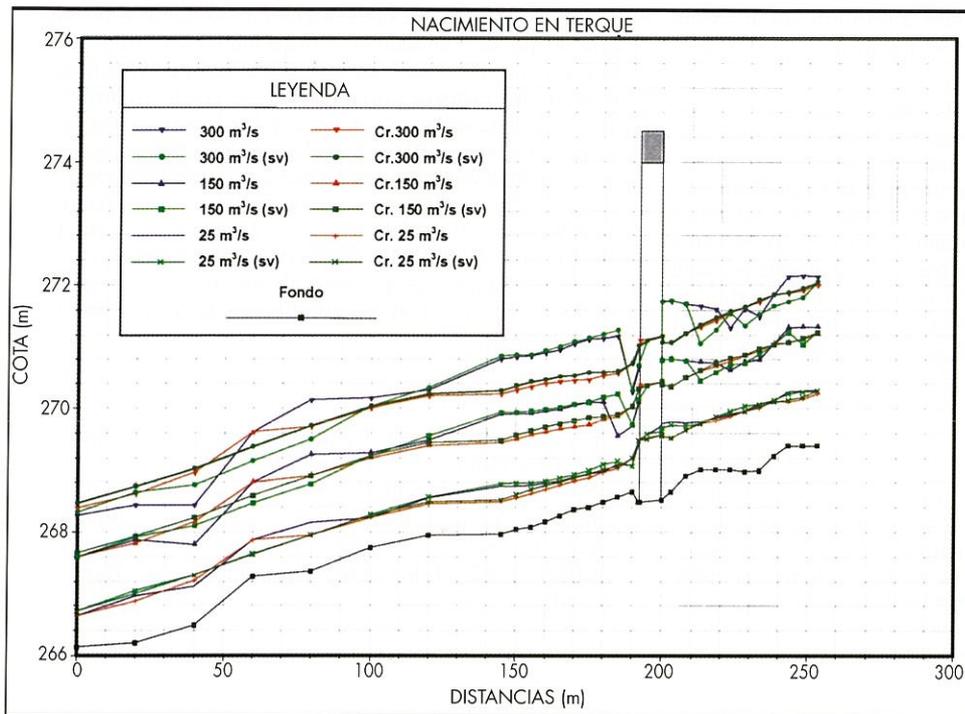


FIGURA 10. Nacimiento en Terque. Efecto de la modificación de la geometría.

(Málaga), en el puente que une ambas, en el que se detectó insuficiente la cartografía por ambas márgenes, aunque esto no tuvo apenas influencia en la curva estimada gracias a la distribución de caudales en la sección transversal, que aunque es un resultado de cálculo discutible en los aspectos cuantitativos, desde el punto de vista cualitativo es totalmente admisible.

La abundante y espesa vegetación de la zona dificulta el flujo del agua especialmente en las márgenes, fuera de lo que se ha considerado el cauce principal (zona media de la sección), por lo que el caudal en el canal central es mucho mayor que en las márgenes, según puede verse en la figura adjunta (Figura 6) que corresponde a un caudal total que se ajusta a la extensión de las secciones incluida en la cartografía disponible, lo que justifica que se acepten resultados de cálculos para caudales que proporcionen alturas de lámina algo superiores a lo que alcanza esta cartografía, bajo el supuesto de que no se producen desbordamientos u otros efectos importantes.

### 3.4. CONDICIÓN DE CONTORNO (GUADALFEO EN LOBRAS)

La condición de contorno del problema de modelación hidráulico de un tramo de río puede ser otra de las incógnitas o, al menos, puede tener asociada una incertidumbre alta. Ante esta situación, que debe evaluarse siempre, hay que evaluar la repercusión que el error en la estimación de condición de contorno pueda tener en los resultados finales a los que se pretende llegar: la estimación de la relación de calados con caudales, en este caso.

Como ejemplo se muestra el caso de la estación del río Guadalfeo que se encuentra en el término municipal de Lobras (Granada). En el tramo estudiado el agua fluye en régimen supercrítico, pudiéndose formar un resalto hidráulico aguas arriba del puente para caudales superior a los 100 m<sup>3</sup>/s, atravesando el puente en régimen crítico. Al realizar un análisis de la influencia de la condición de contorno, im-

puesta en la sección aguas arriba, sobre la sección de medida se concluye en que la afección es nula, tal y como puede comprobarse en el gráfico de resultados de este análisis (Figura 8), que muestra las láminas resultantes del cálculo bajo la hipótesis de condición dada por el calado crítico y la correspondiente a calado uniforme.

Sin embargo, en el caso antes mencionado de la estación de la rambla de Tabernas, dado que el agua fluye en un régimen distinto del crítico y no alcanza este régimen en la zona de medida, esta incertidumbre se superpondría a otras.

### 3.5. MODIFICACIÓN DE GEOMETRÍA (NACIMIENTO EN TERQUE)

La geometría del cauce puede sufrir modificaciones por efecto de una avenida, por lo que la definición de ésta, aparte de otros posibles errores, puede ser otra de las incertidumbres con que hay que contar en al menos aquellos casos en los que esto sea previsible. Tal es el caso del tramo del río Nacimiento estudiada para la estimación de la curva de gasto para avenidas en la estación de aforos situada en este río.

Su geometría presenta muchas irregularidades en su fondo que probablemente desaparezcan al paso de una avenida, por lo que se ha realizado una prueba de cálculo suponiendo que se suaviza tal y como muestran las figuras adjuntas (Figura 9 e Figura 10).

Las diferencias que se detectan son pequeñas (Figura 11), repitiéndose los mismos fenómenos en torno al puente (donde está situada la estación) para una y otra geometría.

### 3.6. CONSIDERACIONES SOBRE LA POSICIÓN DE LA SECCIÓN CON CALADO CRÍTICO

El modelo matemático fija una sección con calado crítico que puede no coincidir con la realidad. En relación con esto hay que recordar lo mencionado anteriormente sobre el cálculo

hidráulico en régimen crítico, pues contradice las hipótesis básicas de las ecuaciones, lo que se manifiesta en estas diferencias.

En la realidad puede darse la circunstancia que no se presente una sección con este régimen claramente definido, sino que exista una zona de río con un número de Froude que oscila con valores próximos a la unidad a lo largo de su longitud. En otros casos, como el que se presenta en estaciones en las que el modelo fija el calado crítico en su extremo aguas abajo, inmediatamente antes del escalón que le suele seguir, puede presentarse en la realidad aguas arriba de este extremo, lo que suele ocurrir en estaciones en las que el agua llega en régimen subcrítico y hay espacio suficiente como para que adquiera velocidad.

#### 4. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta el objetivo final del uso de los modelos matemáticos, éstos pueden ser una herramienta útil para la estimación de curvas de gasto para avenidas a pesar de las incertidumbres con que se cuenta, siempre que tras el análisis de las mismas se deduzca un error admisible.

Podría ocurrir que de este análisis se llegue a la conclusión de que este método de estimación no sea admisible por el error que lleve asociado, bien por la importancia de alguno de los factores antes tratados o por la superposición de algunos de éstos, o bien porque las hipótesis básicas del modelo no se cumplan. En alguno de estos casos habría que buscar datos adicionales para calibrar el modelo o recurrir a otro método, que bien podría ser el que recurriese al empleo de un modelo físico que sirviera para salvar las deficiencias del modelo matemático analizando y cuantificando los fenómenos que este último no puede reproducir, es decir, con la utilización simultánea de modelación física y matemática.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

- VEN TE CHOW, 1994: "Hidráulica de canales abiertos". Mac Graw Hill.  
 HEC, 1997: "Hydraulic Reference Manual". Hydrologic Engineering Center. US Army Corps of Engineers. 609 Second Street. Davis, CA 95616.  
 CEDEX, 1997: "Aplicación CRAF. Versión 1.0. Manual del usuario."



Convocado por la Fundación San Benito de Alcántara

## El Museo Guggenheim de Bilbao, ganador del VI Premio Internacional Puente de Alcántara



**E**l Museo Guggenheim de Bilbao ha resultado ganador de la sexta edición del Premio Internacional Puente de Alcántara, instituido por la Fundación San Benito de Alcántara.

Después de un minucioso estudio, el Jurado acordó conceder el premio al Museo Guggenheim, por considerarlo desde su inauguración un referente obligado de Bilbao en el final del siglo XX y constituir uno de los catalizadores para el progreso sociocultural de la ciudad de cara al tercer milenio.

El Museo, aún contando con casi 30.000 m<sup>2</sup> de superficie y 54 metros de altura, consigue una escala urbana y humana en virtud de la cual ningún cuerpo se impone a la ciudad, permitiendo al mismo tiempo que su enorme fuerza no grave sobre el visitante.

El edificio en su conjunto consta de una planta baja y tres alturas, además de una torre abierta que surge al otro lado del puente con un cometido puramente simbólico. Cuenta con tres galerías de exposiciones sobre las que gravitan el resto de las estructuras, cubiertas y anexos.

Las diferentes fases de construcción se desarrollaron con un programa de diseño tridimensional, nacido de la investigación aeronáutica. En la cimentación se emplearon 664 pilotes de diferente diámetro y 14 metros de longitud media, sobre los que se han levantado las estructuras de acero laminado que constituyen el esqueleto de los diferentes núcleos del edificio.

El revestimiento exterior de titanio de sus estructuras metálicas acentúa el efecto espectacular y vanguardista del Museo, en contraste con las otras fachadas rectas del edificio que están acabadas en aplacados de piedra caliza o muros cortina.

Una de las características fundamentales de la estructura es que no hay dos piezas iguales o simétricas, ni tampoco dos nudos idénticos, por lo que el trabajo de ingeniería para su diseño y cálculo ha sido tremendamente exhaustivo.

Asimismo, el Jurado ha otorgado una mención especial al Proyecto de Irrigación de Chavirnochic, en la costa norte del Perú, uno de los de mayor alcance y dimensión de su género en este país. Concebido como un aprovechamiento hídrico de propósitos múltiples para el desarrollo de esta región, permite ganar para la agricultura todas las tierras de la zona adecuadas para el cultivo y aumentar los rendimientos de las que ya se encuentran cultivadas.



El Premio Internacional Puente de Alcántara, que cumple ya su sexta edición, fue instituido por la Fundación San Benito de Alcántara en el año 1988 para galardonar, dentro del ámbito iberoamericano y con una periodicidad bienal, la obra pública que reúna mayor importancia cultural, tecnológica, estética, funcional y social.

Este Premio utiliza como símbolo el Puente Romano de Alcántara por su avanzada técnica en su tiempo y por la función económica-social que ha venido desarrollando a lo largo de los siglos. El Premio se otorga compartidamente a la institución promotora, autores de los proyectos y empresas constructoras. En esta edición se han presentado 30 proyectos correspondientes a 11 países.

En sus anteriores ediciones este galardón fue concedido a obras tan representativas como el Puente Tampico sobre el río Pánuco, en Méjico; el Puente de Encarnación-Posadas que une Argentina con Paraguay; la Torre de Comunicaciones de Collserola, en Barcelona; los aprovechamientos hidroeléctricos del Alto Lindoso y Touvedo, en Portugal, y el tramo de carretera Novellana-Cada-vedo, en Asturias.

El jurado, presidido por S.A.R. el Infante Don Carlos, ha contado en esta edición con entre sus miembros con las siguientes personalidades: Leopoldo Calvo Sotelo, Expresidente del Gobierno; Miguel Artola Gallego, Premio Príncipe de Asturias de Ciencias Sociales; Manuel Veiga, Presidente de la Asamblea de Extremadura; César Chaparro, Rector Magnífico de la Universidad de Extremadura; José Antonio Torroja, Presidente del Colegio de Ingenieros, Canales y Puertos; César Nombela, Presidente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, y Antonio Sáenz de Miera, Presidente del Centro Español de Fundaciones y Secretario del Jurado.

Los ganadores recibirán una obra escultórica original de Miguel Berrocal, que lleva por nombre "El Torso de Alcántara" y que representa el Puente del mismo nombre.

La Fundación San Benito de Alcántara, con sede en el Convento de San Benito de Alcántara (Cáceres), fue creada en 1985 por Iberdrola, la Orden de Alcántara, la Diputación Provincial y la Cámara de Comercio e Industria de Cáceres, y el Ayuntamiento de Alcántara.