

## CLASIFICACIÓN DE LAS PRESAS EN FUNCIÓN DEL RIESGO POTENCIAL

TEMA: Obras Hidráulicas

**Luis G. Castillo E.<sup>1</sup>**

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Master of Arts in Society, Science and Technology

**Oscar de Cos M.<sup>2</sup>**

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

### RESUMEN

Las grandes realizaciones en política hidráulica llevadas a cabo en España, para alcanzar regular un 40% de las aportaciones anuales, ha dado lugar a un patrimonio hidráulico (más de 1.100 grandes presas en explotación) que debemos cuidar y conservar. Adicionalmente a los problemas de envejecimiento de las estructuras, se han creado zonas de riesgo potencial aguas abajo de dichas presas, principalmente debido a las actuaciones urbanísticas desarrolladas dentro del dominio público hidráulico.

En este contexto y de acuerdo a la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones, se recoge, comenta, aclara y actualiza los principales aspectos previstos que deben considerarse en los estudios de clasificación, redacción de las normas de explotación y planificación de emergencias ante el riesgo de rotura o avería grave de presas, descritos a partir de la experiencia obtenida en su aplicación práctica en las presas de la Confederación Hidrográfica del Norte.

### ABSTRACT

The great realizations in hydraulic politics carried out in Spain, in order to regulate a 40% of the annual contributions, has given place to a hydraulic patrimony (more than 1,100 big dams in exploitation) that we have to look after and conserve. Additionally to the problems of structures age ment, zones of risk have been created downstream of this dams, mainly due to the urban construction developed within the public hydraulic domain.

In this context and according to the Basic Guide of Planning of Civil Protection in front of Floods Risk is picked up, commented clarified and up dated the principal foreseen aspects that must be considered in the studies of classification, composition of the exploitation and planning norms of emergencies in front of the risk to breaking or critical damage of dams, described starting from the experience gotten in their practical application in the North Hydrographic Confederation Dams.

1

SENER, Ingeniería y Sistemas. Severo Ochoa 4.P.T.M. 28760 Tres Cantos - Madrid. ESPAÑA. E-mail: luis.castillo@mad.sener.es  
Asesor del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central del Ecuador.

2

SENER, Ingeniería y Sistemas. Avda. de Zugazarte, nº 56. 48930 Las Arenas (Vizcaya). ESPAÑA.  
Email: oscar.decos@bio.sener.es

## 1.- INTRODUCCIÓN

Como resultado de las grandes realizaciones de la política hidráulica en España, existen actualmente más de 1.100 grandes presas en explotación, muchas de ellas (más del 50%) con 25 o más años en servicio, y algunas sobrepasando el milenio y acercándose a los dos milenios. Ésto nos obliga a cuidar y conservar este patrimonio hidráulico, con el que se consigue regular del orden de un 40% de las aportaciones medias anuales, en contraste al 8% de regulación natural existente. Adicionalmente a los problemas de envejecimiento de las estructuras, se han creado zonas de riesgo potencial aguas abajo de las presas (principalmente por actuaciones urbanísticas dentro del dominio público hidráulico), que se deben observar y que han obligado a desarrollar un nuevo concepto sobre "seguridad" y "riesgo" [Castillo-E., L.G. (1996)].

En este contexto y de acuerdo a la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones, que ha sido publicada en el Boletín Oficial del Estado de España de fecha 14 de Febrero de 1995, se recoge los principales aspectos previstos que deben considerarse en la redacción de las normas de explotación y a la planificación de emergencias ante el riesgo de rotura o avería grave de presas.

Para determinar qué presas han de disponer de Plan de Emergencia, la directriz establece que todas las presas se habrán de clasificar en función del riesgo potencial que puede derivarse de su posible rotura o funcionamiento incorrecto en una de las siguientes categorías:

**Categoría A:** Presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede afectar gravemente a núcleos urbanos o servicios esenciales, o producir daños materiales o medioambientales muy importantes.

**Categoría B:** Presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede ocasionar daños materiales o medioambientales importantes o afectar a un reducido número de viviendas.

**Categoría C:** Presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede producir daños materiales de moderada importancia y solo incidentalmente pérdidas de vidas humanas. En todo caso a esta categoría pertenecerán todas las presas no incluidas en las Categorías A y B.

Para el desarrollo de estos trabajos el Ministerio de Medio Ambiente convocó un concurso público para la contratación de la asistencia Técnica con empresas privadas cualificadas, siendo la Empresa SENER, Ingeniería y Sistemas, S.A., la adjudicataria para realizar la "Propuesta de Clasificación de las Presas de Titularidad Estatal (9 presas) y el Análisis de los Informes de las Propuestas de Clasificación de las Presas de Concesionarios (52 presas) en función del Riesgo Potencial de la Cuenca Hidrográfica del Norte II y III". [SENER (1997)].

El estudio se abordó en tres fases principales:

- 1) Clasificación de las presas en función del riesgo potencial con una metodología simplificada [DAMBRK simplificado (SMPDBK), curvas envolventes, etc.].
- 2) Delimitación de las zonas para la restitución cartográfica y elaboración de los croquis de secciones características, elementos singulares y obstrucciones (puentes, azudes, etc.), coeficientes de rugosidad de los cauces y zonas de influencia de las presas con Categoría A y B.
- 3) Simulación detallada de la rotura de presa y tránsito de la onda de avenida de las presas de Categoría A o B con el programa DAMBRK, para el establecimiento de las bases de los planes de emergencia.

La Guía Técnica (1996) "Clasificación de presas en función del riesgo potencial" de la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas del Ministerio de Medio Ambiente de España, es un documento muy valioso que ha permitido unificar metodologías y criterios, pero que ha sido corregido últimamente y en cuya labor los autores han participado activamente a través de las distintas reuniones de trabajo que se han llevado a cabo en el desarrollo de la Clasificación de las Presas de la Confederación Hidrográfica del Norte. Sin embargo, todavía no puede considerarse un documento que contemple todos los casos que se pueden presentar en la práctica ni tampoco analiza ni garantiza el funcionamiento interno de los modelos de rotura. De entre los diversos modelos hidráulicos existentes, la Guía Técnica recomienda el empleo del programa de dominio público DAMBRK del National Water Service (NWS) de los Estados Unidos, por considerar que constituye el modelo más versátil, experimentado, práctico y, también, el recomendado en las normativas de otros países [Penas M. J. et. al. (1996)]. En este contexto, se llama la atención en la utilización del

programa simplificado SMPDBK [Wetmore, J.N. and Fread, D.L. (1981)], puesto que la formulación del cálculo del caudal de rotura no siempre produce el caudal máximo para un mayor ancho de brecha (tal como dispone la Guía Técnica), debido ésto a las simplificaciones introducidas en el método, lo que produce en algunas combinaciones de altura de presa y volumen, caudales inferiores de desagüe. La demostración y desarrollo de la formulación para el caudal máximo absoluto y las aplicaciones a diferentes presas es el objetivo del artículo "Corrección de la fórmula del SMPDBK para el cálculo del caudal pico de rotura de presas" [Castillo-E. L.G. y De Cos, O. (1997)], presentado igualmente en este Congreso.

## 2.- PRINCIPALES TIPOS DE ESTUDIOS

### 2.1 Estudios previos

Los criterios y metodología a aplicar a la clasificación de las presas, constituyó uno de los primeras tareas, en donde se fijaron y acordaron los aspectos y criterios que sirvieron de base para fases posteriores; así entre otros:

- Aspectos relacionados con trabajos de base (escalas topográficas, antigüedad máxima de la topografía, ámbito geográfico hacia aguas abajo, etc.).
- Aspectos relacionados con la forma de rotura (situación del embalse en el momento de la rotura, forma y dimensiones de la brecha, etc.).
- Aspectos relacionados con el avance de la onda y niveles (caracterización del cauce, tratamiento de singularidades, etc.).
- Aspectos relacionados con la valoración de daños.

A partir de la información indicada se elaboró un informe básico que permitió definir y situar adecuadamente el marco de trabajo. En estos estudios se incluyeron asimismo los temas relacionados con geomorfología, climatología, hidrología e hidráulica. Así, fue necesario disponer de los siguientes tipos de datos:

- a) Datos meteorológicos, pluviométricos e hidrológicos.** Para poder estimar la evolución probable de la situación climatológica en las zonas de estudio y la interrelación de cuencas próximas.
- b) Datos morfodinámicos.** Son todos aquellos datos, no estrictamente hidráulicos, que intervienen en la formación de los hidrogramas y ondas de rotura. Algunos de estos datos fueron prácticamente fijos (relieve de la cuenca, permeabilidad del terreno y su conexión hidrogeológica, morfología de la red de drenaje, etc.), siendo otros de tipo variable (contenido de humedad del suelo, cobertura de nieve, etc.). Interesa conocer y determinar la forma en que se modifican los hidrogramas al discurrir por los cauces y los tiempos que emplean en recorrer los diferentes tramos, así como los niveles que alcanzan las aguas en cada lugar en función de los caudales circulantes. De esta forma, los datos que interesa obtener se concretan en aquellos que influyen sobre la circulación de las aguas; es decir, morfología del cauce, rugosidad de los diferentes tramos y características de los puntos singulares donde se pueden producir pérdidas localizadas de energía (puentes, azudes, estrechamientos, etc.). Las características geométricas de los cauces se obtuvieron de vuelos y restituciones aerofotogramétricas, complementándose con levantamientos taquimétricos de diversas secciones transversales.
- c) Datos de curvas características.** Se obtuvieron las relaciones cota-volumen y cota-superficie de los diferentes embalses. Estas curvas son prácticamente fijas, puesto que su modificación se realiza lentamente, en función de los sedimentos que se depositan en los embalses.
- d) Datos de los sistemas de desagüe.** Se consideraron todos los dispositivos hidráulicos (fijos o móviles) que permiten evacuar los caudales desde los embalses, tales como aliviaderos, compuertas, válvulas, turbinas, etc.; con el fin de determinar las normas de explotación y establecer las bases de los planes de emergencia. Los datos que se precisan se refieren a sus características, capacidad de desagüe en función del nivel del embalse y posición de los elementos de cierre. Esta información se obtuvo en su mayor parte de los documentos XYZT (informes y planos de la situación geométrica final) de las presas, pero que fueron comprobados y actualizados convenientemente, puesto que constituyen los elementos básicos para definir las consignas de explotación de avenidas.

**e) Datos de explotación de embalses.** El nivel del agua en los embalses deber ser conocido con suficiente precisión y oportunidad y estar adecuadamente establecidos en las consignas de operación durante las avenidas. Por lo tanto, estos datos nos permiten conocer en cada instante los siguientes aspectos:

-Volumen de agua embalsado y, por lo tanto, volumen vacío disponible para albergar la avenida afluyente.

-Caudal que se puede evacuar por cada uno de los dispositivos de desagüe y, en consecuencia, caudal total evacuado, así como la distribución óptima entre aquellos.

**f) Datos socio-económicos.** Estos estudios se centraron en la identificación de los daños que para cada nivel de agua (y en función de los caudales desaguados por las presas) se puedan producir en las márgenes de los ríos. De esta forma fue preciso identificar en los planos todas aquellas zonas y estructuras susceptibles de sufrir daños; estudiándose paralelamente los procedimientos más adecuados para su minimización, así como la redacción de las bases de los planes de emergencia respectivos.

**g) Inventario de servicios e infraestructura existente.** Se realizó un inventario de todas aquellas obras de infraestructura que podrían influir en la propagación de las avenidas (puentes, obras de control, macro variaciones de la rugosidad, expansiones y contracciones, desbordamientos, etc.) y de las que pudieran ser afectadas por las crecidas (incluyendo todos los datos que pueden ser de interés para los estudios posteriores). Este inventario se basó en estudios previos, complementándose y actualizándose con la investigación de campo correspondiente. Se redactaron unas fichas que incluyeron a demás de las observaciones pertinentes, el croquis de situación de la obra, descripción detallada y su estado actual.

**h) Trabajos cartográficos.** A partir de estos trabajos se obtuvo parte de la información que se necesitó para realizar los estudios geomorfológico, hidrológicos e hidráulicos con las herramientas de análisis, cálculo y simulación y se determinó con suficientemente aproximación la franja sujeta a inundaciones que afectaría a los núcleos de población; así como también en aquellas zonas en donde se detectó la necesidad de actuaciones localizadas o puntuales.

Los principales parámetros críticos fueron el punto límite del estudio aguas abajo de cada presa y la escala de la cartografía necesaria, ya que ambos únicamente pueden ser conocidos adecuadamente a la finalización del estudio, por lo que inicialmente solamente fue posible efectuar unas estimaciones aproximadas. En una primera instancia se adoptaron los criterios siguientes que fueron revisados en el curso de los trabajos:

- Longitud de tramo a estudiar: 1.000 H, siendo H = altura de la presa sobre el cauce.
- Escala de trabajo: 1:2.000 con equidistancia 1 m.
- Ancho a restituir: el superior de entre los siguientes:

- . Zona de policía (área inundada por el nivel correspondiente a los caudales de avenidas máximas ordinarias y extendida 100 m en cada margen).
- . Área inundada por la avenida de 500 años (o en su defecto llanura de inundación) extendida 50 m en cada margen.

La Guía Técnica establece la escala mínima de trabajo para la redacción de las bases de los planes de emergencia en función del calado mínimo de análisis. En el cuadro 1 se presentan dichas relaciones.

Calado mínimo de análisis (m)	Equidistancia máxima (m)	Escala asociada
1	0,5	1:500
2	1,0	1:1.000
4	2,0	1:2.000
10	5,0	1:5.000
20	10,0	1:10.000 (1:25.000)
40	20,0	(1:50.000)

**CUADRO 1.- Escala mínima de trabajo [Desde Guía Técnica (1996)]**

## 2.2. Estudio hidráulico

El estudio hidráulico comenzó por un diagnóstico de la situación actual mediante la simulación del funcionamiento de la infraestructura hidráulica existente, en donde se incluyó el análisis de la capacidad de los distintos cauces. En los sitios de interés particular y en donde existió registros de aforos de avenidas, se realizó un análisis de sensibilidad de los coeficientes de rugosidad, con el objeto de calibrar dicho parámetro, para lo cual se consideró la restitución de crecidas observadas y los valores deducidos de los máximos niveles históricos.

**2.2.1 Caudales desaguados.** Los caudales que se pueden desaguar en cada instante depende del nivel del agua en el embalse y de la posición de los órganos de cierre y dispositivos de desagüe. Por tanto, se dispuso de las curvas por cada elemento, para establecer las normas de explotación en los planes de emergencia.

**2.2.2 Niveles en el cauce aguas abajo.** Una de las mayores preocupaciones durante las avenidas es el de evitar o reducir al máximo posible los daños aguas abajo. Por tanto se necesita conocer el nivel que alcanzan las aguas en el cauce para cada caudal circulante. Este nivel puede también depender, además del caudal desaguado desde la presa, de otros caudales proporcionados por la red de afluentes aguas abajo. El cálculo se estableció en régimen no permanente, aplicándose la solución numérica de las ecuaciones completas de Saint Venant (flujo no permanente y gradualmente variado).

**2.2.3 El cálculo en régimen no permanente** permitió establecer las bases de los planes de emergencia y se realizó con el programa DAMBRK, determinándose las características principales de la evolución de la onda de avenida como su celeridad y altura. Se efectuaron estudios de inundabilidad, daños hipotéticos, delimitación de zonas de daño potencial y propuestas de planes de evacuación y protección civil. Adicionalmente, se estudiaron las diversas condiciones especiales como el flujo súbito desde los afluentes, cambios bruscos "temporales" en la sección del cauce como estrechamientos (ocupación por deslizamientos de taludes) o expansiones (por rotura de puentes) o cuando el hidrograma de entrada tenía un tiempo base muy corto (avenida súbita y/o rotura de presa). En la solución se consideró las condiciones de contorno externas, internas e iniciales, las mismas que se acoplaron adecuadamente en la formulación general.

Las ecuaciones de Saint Venant, expresadas con términos adicionales para considerar los efectos de expansión/contracción [Fread (1976)], sinuosidad del cauce [DeLong (1986)] y condiciones de flujo No-Newtoniano [Fread (1987b)], consisten de una ecuación de conservación de masa:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S(A + A_0)}{\partial t} - q = 0 \quad (1)$$

y una ecuación de conservación de la cantidad de movimiento o momentum:

$$\frac{\partial(SQ)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta Q^2 / A)}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e + S_j \right) + L' = 0 \quad (2)$$

Donde: **h** es la elevación de la superficie de agua; **A** área de la sección transversal activa del flujo; **A<sub>0</sub>** área de la sección transversal inactiva del flujo (almacenamiento fuera del cauce principal); **S** factor de sinuosidad adimensional que varía con **h**; **x** distancia longitudinal a lo largo del cauce; **t** tiempo; **q** caudal unitario de entrada (+) o salida (-) a lo largo del cauce; **β** coeficiente del momentum de la distribución de velocidades; **g** aceleración de la gravedad; **S<sub>f</sub>** pendiente de fricción del contorno; **S<sub>e</sub>** pendiente por expansión/contracción; **S<sub>j</sub>** pendiente de fricción adicional asociada con la disipación interna viscosa de los fluidos No-Newtonianos (flujos de fango, lodo, barro y/o escombros); **L'** efecto del momentum del flujo lateral, asumido perpendicular a la dirección principal del flujo.

Estas Ecuaciones de Saint Venant expandidas constituyen un sistema de ecuaciones diferenciales parciales con dos variables independientes **x** y **t**, y dos variables dependientes **h** y **Q**; siendo los restantes términos funciones de **x**, **t**, **h** y/o **Q** o valores constantes.

El modelo DAMBRK aborda la solución de este sistema, a través de la solución numérica de un sistema de ecuaciones algebraicas en diferencias finitas [esquema implícito de cuatro puntos

ponderados de Preissmann (1961)]. El sistema resultante de  $2N$  ecuaciones no-lineales con  $2N$  incógnitas se resuelve con el método de Newton-Raphson; donde  $N$  es el número de nodos o secciones transversales en que se discretiza el modelo.

Una presentación detallada de estas ecuaciones, su solución numérica e implementación informática se puede consultar en Fread (1988). Gates and Al-Zahrani (1996a)(1996b) presentan las Ecuaciones de Saint-Venant como un Sistema de Ecuaciones Diferenciales Parciales Estocásticas, cuyos parámetros constituyen Campos Aleatorios Espaciotemporales. Un análisis extensivo de datos de campo muestra la evidencia de que los parámetros poseen alta variabilidad relativa, son estadísticamente no-homogéneos y, concretamente, poseen residuos con distribución de tipo no-normal y con una fuerte dependencia de retardo en su estructura de correlación.

La sensibilidad del nivel de incertidumbre en la predicción de las variables de flujo en relación con el nivel de incertidumbre de los parámetros principales, lo efectúan a través de un análisis factorial fraccional de los coeficientes de variación; así, la incertidumbre en la predicción de la velocidad es más sensible con la incertidumbre que existe en la determinación de la geometría de la sección transversal del cauce (particularmente con la escala y los parámetros de forma de la sección de flujo). La incertidumbre en la predicción del calado de flujo es predominantemente sensible a la incertidumbre que existe en la determinación de la pendiente del fondo. Sin embargo, han encontrado una insensibilidad general de estos parámetros, con la incertidumbre del coeficiente de resistencia de Manning.

La aplicación de las ecuaciones de Saint Venant con uno, dos o todos los términos adicionales y, la aplicación de las conclusiones apuntadas anteriormente, se ha realizado en función de las características propias de cada caso particular.

**Las condiciones de contorno internas** representan los obstáculos y singularidades del cauce (presas, azudes, puentes, cascadas, etc.); de tal forma que con la ecuación de continuidad y la ecuación característica del funcionamiento hidráulico (flujo rápidamente variado) del obstáculo respectivo (flujo sobre aliviaderos, orificios, compuertas, crítico, etc.), se resuelve el sistema de ecuaciones respectivo.

Concretamente con respecto a las obstrucciones en el cauce provocado por los terraplenes de infraestructura viaria y de puentes, se consideró que romperían cuando el nivel de agua alcanzara la cota de coronación del terraplén o la cota superior del tablero. Se consideró su efecto en el tránsito de la onda de avenida cuando se cumplió alguna de estas circunstancias:

- Superficie obstruida  $> 20\%$  de la superficie del cauce
- Embalse temporal por obstrucción  $> 5\%$  del volumen de la onda de rotura de la presa

**Con respecto a las condiciones de contorno externas**, se incluyó en la simulación como punto extremo aguas arriba, la presa y las condiciones en las que se postuló su rotura. En cualquier caso y en relación con esta sección, se ha tenido en cuenta no sólo la formación de la brecha sino también el nivel del embalse aguas arriba de la misma, que está influido por las relaciones entre el caudal que sale en cada momento, el volumen almacenado y los caudales entrantes.

Se han considerado las condiciones de contorno aguas abajo del tramo que se simula, representándose ésta última sección ya sea a través de una relación entre caudal-profundidad o profundidad-tiempo.

**En cuanto a las condiciones iniciales**, se partió del conocimiento de una situación inicial que en general fue planteado asociado a las condiciones de flujo permanente, correspondiente a los caudales ordinarios.

Se han tenido en cuenta los posibles problemas de estabilidad y convergencia por efecto del cambio de régimen, admitiéndose un rango del 5% en el valor del Número de Froude para las condiciones de régimen crítico ( $0,95 < Fr < 1,05$ ); e inclusive en ciertos casos, no se ha permitido el movimiento de los resaltos hidráulicos sino hasta cuando se alcanzaron valores del número de Froude superiores a 2.

Adicionalmente, en el estudio de las bases de emergencia, se ha tenido en cuenta la incorporación de caudales laterales, las pérdidas por infiltración, sobre todo en las llanuras de inundación, sitios de atrapamiento como presas y azudes, etc.

### 2.3. Estudio de la rotura de presas

La mayor parte de los métodos de cálculo parten de la definición de la formación de una brecha caracterizada por la anchura del fondo, la altura y los taludes laterales. Se asume que esta brecha se propaga a una determinada velocidad, dependiendo del tipo de presa.

**En las presas bóveda**, se suele suponer que la brecha coincide con la forma de la cerrada modificada por los estribos, proponiéndose en la Guía Técnica un tiempo de formación de 5 a 10 minutos.

**En las presas de gravedad y contrafuertes**, se suele admitir que la brecha se forma con la caída o deslizamiento de un bloque, normalmente el que se encuentre en peores condiciones en relación al vuelco o al deslizamiento. Según la Guía Técnica, la forma de la brecha se considerará rectangular y hasta el fondo del cauce, con un ancho del que resulte mayor entre el tercio (1/3) de la longitud de coronación o de tres (3) bloques de construcción de la presa. El tiempo de formación se asume entre 10 y 15 minutos.

**En las presas de materiales sueltos**, el método es análogo aunque en este caso la velocidad de avance de la brecha y las características geométricas pueden calcularse con cierta precisión teniendo en cuenta los datos propios de la presa (tamaño medio de materiales de espaldones y núcleos, taludes, etc.) y características del embalse, que determinan la velocidad de vaciado. De esta velocidad depende la diferencia de cotas entre la lámina de aguas arriba y la cota del fondo de la brecha en cada instante, constituyendo un dato esencial puesto que de éste valor depende directamente la velocidad erosiva de salida. La Guía Técnica propone el tiempo de rotura (**T**) y el ancho medio de la brecha (**b**) [ancho a una altura **h/2**] a partir de una ecuación empírica obtenida por el ajuste de datos de fallos de presas [Froelich (1987)] y, que está en función del volumen (**V**) del embalse y de la altura de la presa (**h**); así:  $T = 4,8 V^{0,5} / h$ ;  $b = 20 (V h)^{0,25}$ ; en donde **T** está en horas, **V** en  $Hm^3$ , **b** y **h** en metros.

La profundidad de la brecha se considera hasta el contacto con el cauce y la forma se asume trapecial con taludes 1:1.

#### 2.4. Análisis de daños

Una vez obtenida la descripción de la onda de rotura y de la inundación consecuente, se tendría que determinar los daños a través de los métodos habituales de defensa contra avenidas (daños esperados por efecto del nivel de agua alcanzado, velocidad y el tiempo de inundación). Sin embargo, la Guía Técnica no plantea la necesidad de evaluar el daño esperado para los efectos de clasificación; es decir, no se propone evaluar la conversión desde la probabilidad de daños hacia los daños esperados, sino que se exige únicamente la estimación exclusiva del riesgo potencial del daño, analizándolo independientemente como afecciones a Riesgo para la Población, Servicios Esenciales, Daños Materiales y Daños Medioambientales. En el cuadro 2 se recogen los criterios de clasificación establecidos en la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil. Se destaca que basta con alcanzar uno cualquiera de las afecciones indicadas para que la presa quede clasificada con la categoría más exigente; es decir, no cabe ponderar y sumar los daños y afecciones en los cuatro aspectos sino sólo analizar cada uno de ellos individualmente y considerar el más desfavorable.

Categoría de la Presa	Riesgo para la población	Servicios Esenciales	Daños materiales	Daños medioambientales
A	Afección grave a núcleos urbanos	Afección grave a servicios esenciales	Muy importantes	Muy importantes
B	Afección a un número reducido de viviendas	-	Importantes	Importantes
C	Pérdidas incidentales de vidas humanas	-	Moderados	-

**CUADRO 2.- Criterios de clasificación de presas [Desde Penas. M. J. et. al. (1996)]**

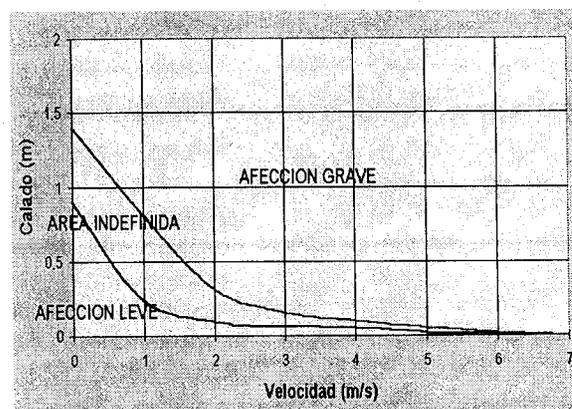
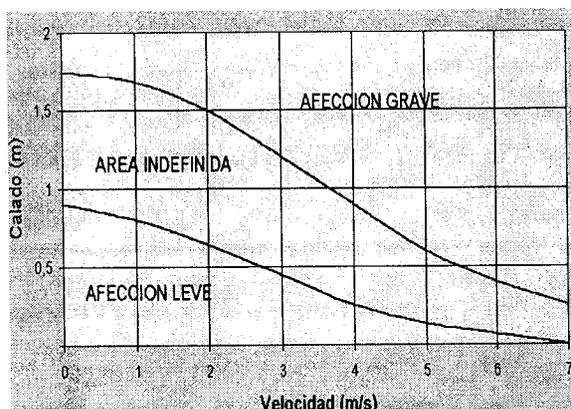
**En cuanto a los riesgos para la población**, la Guía Técnica clasifica una presa como Tipo A cuando se produzca una afección a más de 5 viviendas habitadas (riesgo potencial para unas 12 a 15 personas de acuerdo al número medio de habitantes por vivienda en España) y representa un riesgo para la vida de los habitantes ("Afección grave a núcleos urbanos"), en función del calado y la velocidad de la onda de avenida; tal como puede verse en las figuras 1 y 2. Se considera un número reducido de viviendas al comprendido entre 1 y 5 viviendas habitadas y por lo tanto la presa se clasificará como Tipo B. Finalmente, para que una presa sea clasificada como Tipo C, no podrá existir ninguna vivienda habitada en el área de la posible afección.

**Se considera afección de servicios esenciales** (abastecimiento y saneamiento, suministro de energía, sistema sanitario, sistema de comunicación y transporte, etc.) al que es indispensable para el

desarrollo de las actividades humanas y económicas y en torno a una población de 10.000 habitantes. Se considera afección grave cuando el servicio se interrumpe de forma permanente, sin contar con servicio alternativo y sin que pueda ser reparado inmediatamente.

**En cuanto a los daños materiales**, la Guía Técnica a efectos de clasificación no considera necesario realizar una valoración en términos económicos, sino sólo una evaluación cualitativa, para lo cual propone unos criterios orientativos que se recogen en el cuadro 3.

**Se consideran elementos sensible de sufrir daño medioambiental** (incluyendo los bienes de interés cultural y los elementos integrados en el patrimonio histórico-artístico) solamente aquellos elementos o territorios con alguna figura legal de protección, incluyéndose para los que exista algún procedimiento administrativo iniciado. Se define como daños "muy importantes" aquellos que tienen la consideración de irreversibles y críticos, mientras que como "importantes" a los reversibles y severos.



**FIGURA 1.- Áreas viviendas/Núcleos urbanos  
Riesgo para vidas humanas, en función del calado y la velocidad [Desde Guía Técnica (1996)]**

**FIGURA 2.- Áreas viviendas campo abierto  
Riesgo para vidas humanas, en función del calado y la velocidad [Desde Guía Técnica (1996)]**

Elemento	Daños materiales		
	Moderados	Importantes	Muy importantes
Industrias y polígonos industriales y propiedades rústicas <sup>(1)</sup>	nº de instalaciones < 10	10 < nº instalaciones < 50	nº instalaciones > 50
Cultivos secano	Superficie < 3.000 Ha	3.000 Ha < superficie < 10.000 Ha	Superficie > 10.000 Ha
Cultivos de regadío	Superficie < 1.000 Ha	1.000 Ha < superficie < 5.000 Ha	Superficie > 5.000 Ha
Carretera		Red general de las CC.AA. u otras redes de importancia equivalente	Red general del estado y red básica de las CC.AA.
Ferrocarril		FF.CC vía estrecha	FF vía estrecha y Alta Velocidad

<sup>(1)</sup> Estos límites deberán reducirse en caso de instalaciones de singular importancia

**CUADRO 3.- Evaluación de daños materiales [Desde Guía Técnica (1996)]**

### 3. ESCENARIOS DE CÁLCULO PARA LA CLASIFICACIÓN DE LAS PRESAS

En cuanto a los Criterios Básicos para el Análisis de las Roturas Potenciales de las Presas, la Guía Técnica define dos Escenarios Generales de Análisis de Rotura: Rotura Individual y Efecto de Rotura en Cadena o Dominó.

**En el análisis de la rotura individual**, los escenarios se definen por la situación del embalse y por las condiciones hidrológicas existentes (caudales entrantes al embalse). En todo caso, se considera suficiente analizar dos escenarios extremos:

- Rotura no coincidente con avenidas. El nivel considerado es el correspondiente al Máximo Nivel Normal.
- Rotura con situación de avenida. Se considera la Avenida de Proyecto (Período de Retorno de 500 años) y la Avenida Extrema. El embalse se considera lleno hasta la coronación de la presa.

Se considera únicamente los daños incrementales debidos a la rotura; es decir, el exceso en daños que produce la rotura respecto a los que se hubieran producido debido al desagüe de la avenida considerada.

En el análisis del efecto en cadena o dominó, se estudia la interdependencia mutua de las relaciones entre las presas de aguas arriba y aguas abajo y los posibles daños potenciales. En la presa de aguas arriba, se analiza la rotura con los dos escenarios extremos, calculándose la onda de rotura y propagación hasta el embalse de aguas abajo y evaluándose los efectos sobre dicha presa. Pueden darse dos situaciones:

- **Situación 1:** El embalse de aguas abajo puede absorber la onda de rotura, en condiciones similares para la que fue diseñada para la avenida de proyecto e inclusive, hasta la proximidad de coronación si no es probable que se presenten avenidas de manera simultánea en ambas presas. En este caso no se produce la rotura en cadena y cada presa se clasifica de forma independiente.
- **Situación 2:** El embalse de aguas abajo no puede absorber la onda de rotura que le llega de la presa de aguas arriba, vertiendo sobre su coronación. En este caso se produce rotura simultánea con el desagüe de la onda de llegada al embalse; surgiendo por tanto un nuevo escenario de análisis: Rotura con nivel de embalse en coronación pero considerando simultáneamente la presentación de la onda de rotura de la presa de aguas arriba.

En todo caso, en general, si la rotura de la presa de aguas arriba puede provocar la rotura de otras aguas abajo, la categoría de la presa de aguas arriba debe ser como mínimo la misma que la mayor de las categorías de las presas de aguas abajo.

#### 4.- ESTABLECIMIENTO DE LAS BASES PARA LOS PLANES DE EMERGENCIA

En los casos de presas clasificadas en las categorías A o B es preciso, de acuerdo con la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones, elaborar unos planes de emergencia, cuyo punto de partida constituyeron los resultados obtenidos en la elaboración de la propuesta de clasificación. En concreto se establecieron los siguientes aspectos, para todas las presas del Estado e independientemente de la propuesta de clasificación realizada:

- a) Escala de trabajo, equidistancia y área a cartografiar para la elaboración del plan de emergencia.
- b) Extensión longitudinal del análisis a realizar en la elaboración del plan de emergencia.
- c) Elementos que deben ser considerados (núcleos de población, etc.), en el plan de emergencia.
- d) Zona inundada, calado, velocidad y tiempo de presentación de la onda en los puntos considerados sensibles en el plan de emergencia.

#### 5.- INFORMATIZACIÓN DE LOS RESULTADOS

Como consecuencia de todas las propuestas de clasificación se dispone de una serie de datos y resultados relativos a las características de la presas y de los embalses y de los riesgos potenciales agua abajo.

Todos estos valores son procesados informáticamente y volcados en una base de datos relacional, según una estructura dispuesta por el Ministerio de Medio Ambiente [TYPASA-ECM (1997)]. La base de datos está programada en Microsoft Acces y dos ejemplos de pantallas de presentación se indican en las figura 3 y 4.



FIGURA 3  
Pantalla general del sistema informático

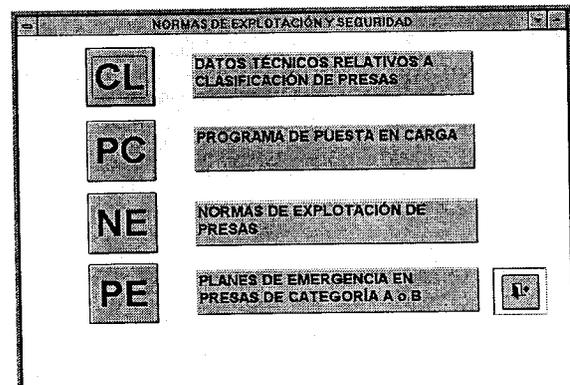


FIGURA 4  
Pantalla de normas de seguridad y explotación

## 6.- PRESENTACIÓN DE CASOS PRÁCTICOS

En el cuadro 4 se presenta un resumen de los principales datos y resultados del proceso de clasificación llevado a cabo para algunas de las presas estudiadas dentro del ámbito del estudio. Como se puede observar, los métodos de cálculo que han sido aplicados son el DAMBRK simplificado (SMPDBK) y el de las Curvas Envolventes (C.E.) en la Presa de Bárcena.

El método simplificado de las Curvas Envolventes consiste en la aplicación de una familia de curvas adimensionales y que han sido establecidas a partir de múltiples pasadas del programa DAMBRK. Estas curvas se agrupan en 8 gráficos que relacionan envolventes de calados máximos y mínimos, adimensionalizados con el calado del embalse en el momento de la rotura (Y/H), en función de distintos parámetros considerados como más representativos del fenómeno (forma del cauce, pendiente media, rugosidad y volumen del embalse), debiéndose respetar los rangos de aplicación establecidos [Guía Técnica (1996)]. Con este método, se obtiene directamente los calados en los distintos sitios de análisis. Por esta razón, en Bárcena no se tiene calculado los caudales de rotura ni en el sitio de la presa (brecha) ni en el sitio de clasificación; tampoco se tiene calculado con este método el tiempo de viaje de la onda. Este método es de aplicación únicamente para presas de categoría A (generalmente de clasificación obvia, como en el presente caso) y categoría C.

Presa	Tip. <sup>(1)</sup>	Altura <sup>(2)</sup> (m)	Volumen <sup>(3)</sup> (Hm <sup>3</sup> )	Brecha			Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Método <sup>(5)</sup>
				Ancho (m)	Tiempo <sup>(4)</sup> (min)	Talud (H:V)		
Alfilorios	E	67	9,14	90,5	19	1:1	25.500	SMP.
La Mortera	G	8	0,02	30,3	10	0	93	SMP. <sup>(9)</sup>
Bárcena	G	109	341,40	55,3	15	-	-	C. E.
F. del Azufre	G	50	2,00	40,0	15	0	570	SMP.
Ibiur	RC	68	7,53	60,0	15	0	20.900	SMP.

Punto que primero asigna la categoría a la presa

Presa	Distancia (Km.)	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Tiempo <sup>(6)</sup> (min.)	Calado (m)	Daños <sup>(7)</sup>	Afecciones	Categoría <sup>(8)</sup>
Alfilorios	2,09	16.000	20	11,38	Graves	> 5 viviendas	A
La Mortera	1,64	85	16	2,00	Ninguno	Ninguna	C
Bárcena	4,54	-	-	21,60	Graves	> 5 viviendas	A
F. del Azufre	0,85	454	19	2,10	Graves	> 5 viviendas	A
Ibiur	2,23	18.370	19	14,63	Graves	> 5 viviendas	A

CUADRO 4.- Resumen de resultados del proceso de clasificación de algunas presas

(1) Tipología: E Escollera - G Gravedad de Hormigón - RC Hormigón Compactado

(2) Desde cimientos

(3) A Máximo Nivel Normal de Embalse

(4) Tiempo de desarrollo de la brecha

(5) SMP: SMPDBK - CE: Curvas Envolventes

(6) Tiempo de llegada del caudal pico

(7) Según figuras 1 y 2

(8) Según apartado 2.4

(9) Análisis con avenida. El punto de clasificación debe entenderse como el más desfavorable de las zonas sensibles a rotura.

Se puede observar que los caudales pico de rotura de presas van desde 93 m<sup>3</sup>/s (La Mortera), hasta 25.500 m<sup>3</sup>/s (Alfilorios). Los calados en dichos sitios son de 2 m (La Mortera) y 11,38 m (Alfilorios).

Los tiempos de viaje de la onda hasta los puntos sensibles de clasificación van desde 16 a 20 minutos. Estos tiempos son muy reducidos y, en el caso hipotético de producirse la rotura, no permitirían aplicar actuaciones de emergencia. Por esta razón, en la redacción de las bases de los planes de emergencia, se tienen que considerar todas las medidas adecuadas (normas de explotación y vigilancia de las presas, redacción de planes de contingencia, etc.); de tal forma que se minimice el riesgo de la rotura de las presas y, en los casos hipotéticos de rotura, se gane tiempo de preaviso.

Las afecciones que se producirían por la rotura de las presas se han clasificado de Graves, por lo que la Clasificación asignada es la Tipo A; a excepción de La Mortera que al no haber afecciones, se ha clasificado como Tipo C.

En el cuadro 5 se presentan los resultados del análisis de la presa de Ibiur, en donde se indican para las diferentes secciones transversales del cauce, niveles y cotas de lámina de agua, caudales,

velocidades, tiempos de viaje de la onda y los elementos sensibles que condicionan la clasificación de la presa. Las características principales, así como el tamaño de brecha y caudal de rotura se recogen en el cuadro 4.

PK	Caudal	Velocidad	Calado	Cota lámina	Cota afección	Tiempo pico	Calado daños	Daños acumulados	Tipo daños
(Km)	(m <sup>3</sup> /s)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(min)	(m)	(viviendas)	
0+550	20.700	7,5	12,79	111,5	103	15	8,5	2	Graves
1+775	20.240	14,3	14,59	111,5	102	17	9,5	3	Graves
1+800	19.010	7,2	13,32	108,4	100	18	8,4	5	Graves
2+225	18.370	7,8	14,63	108,4	95	19	13,4	10	Graves

#### CUADRO 5.- Resumen de resultados del análisis hidráulico y daños de la presa de Ibiur

En la figura 5 se indica la laminación sufrida por el caudal pico en su tránsito aguas abajo. En 25 Km. de tránsito el caudal pico queda laminado un 73%, disminuyendo hasta el 87% en la desembocadura del río (45,5 Km). Se observa que aunque la cota de lámina disminuye hacia aguas abajo, el calado de agua aumenta en ciertas secciones, debido a los fuertes estrechamientos existentes.

En la figura 6 se indica los hidrogramas de rotura de presa y los transitados hasta el lugar que condiciona la clasificación (Pk 1+800) y aguas abajo del mismo (Pk 15+000), observándose que el caudal se ha laminado en un 9,1% y 61,1%, respectivamente.

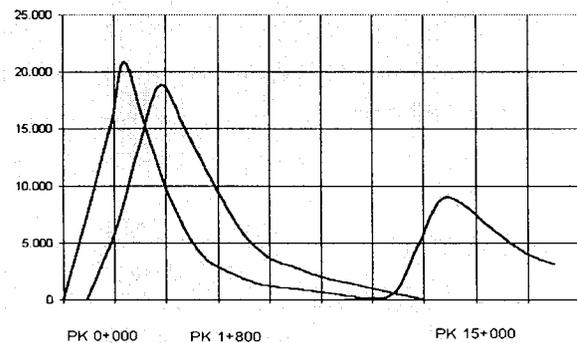
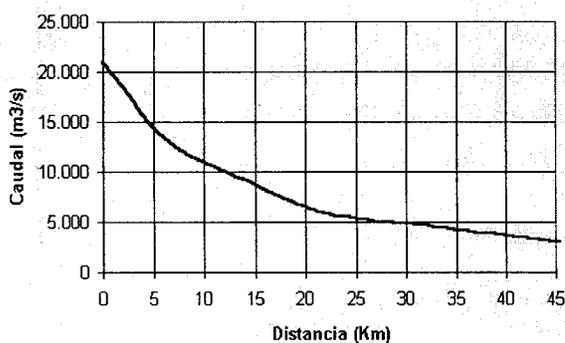


FIGURA 5.- Laminación del caudal pico de rotura

FIGURA 6.- Hidrogramas de rotura y transitado

En la figura 7 se presenta la evolución del calado de agua en el lugar que condiciona la clasificación (Pk 1+800), en función del tiempo. Se puede observar que el calado aumenta desde 0,48 m (correspondiente a un caudal ordinario de  $Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$ ), hasta 13,32 m (correspondiente al caudal de rotura de presa laminado  $Q=19.010 \text{ m}^3/\text{s}$ ), en un tiempo de 18 minutos. En la misma figura se indica el calado (4,92 m) a partir del cual comienzan a producirse afecciones a viviendas.

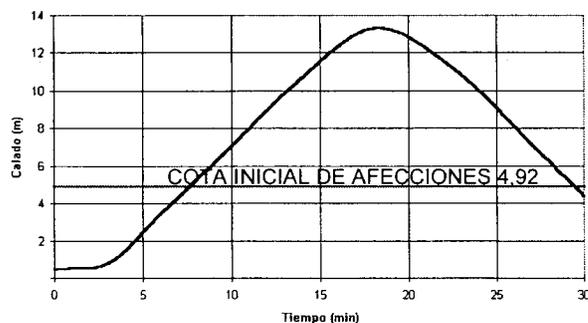


FIGURA 7.- Calado-tiempo en PK 1+800

## 6.- CONCLUSIONES

En este artículo se ha puesto de manifiesto la importancia que tiene la clasificación de las presas en función del riesgo potencial y el establecimiento de las bases de los planes de emergencia ante el riesgo de inundaciones.

Se ha hecho una revisión general de los principales estudios a realizar, comentándose, aclarándose y actualizándose los distintos conceptos contenidos en la Guía Técnica de Clasificación de Presas del Ministerio de Medio Ambiente de España.

Se han comentado los temas relacionados a la geomorfología, climatología, hidrología, hidráulica y disposición de datos, se ha llamado la atención en cuanto al uso del programa SMPDBK (propuesta de corrección de la formulación del caudal pico de rotura de presa) y, finalmente, se ha presentado el resumen de unos casos prácticos.

## 7.- REFERENCIAS

- **Castillo-E. L.G.; De Cos, O. (1997)**. "Modificación de la fórmula del SMPDBK para el cálculo del caudal pico de rotura de presas" VII Congreso Ecuatoriano de Hidráulica. Quito-Ecuador.
- **Castillo-E. L.G. (1996)**. "Present Problematic of the Water Resources Planning in Spain and the World". Master Thesis in Society, Science and Technology. Economic Science Faculty. Business Administration Institute. Autonomous University of Madrid.
- **DeLong, L.L. (1986)**. "Extension of the Unsteady One-Dimensional Open-Channel Flow Equations for Flow Simulation in Meandering Channels with Flood Plains". Selected Papers in Hydrology Science. pp.101-105.
- **Fread, D.L. (1988)**. "The NWS DAMBRK Model: Theoretical Background/User Documentation". U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE. National Oceanic and Atmospheric Administration. National Weather Service. Silver Spring. USA. October.
- **Fread, D.L. (1987)**. "NWS Dam Breach Models for Microcomputers". ASCE. Annual Conference of Irrigation and Drainage Division. Portland. Oregon, July. pp. 28-31.
- **Froehlich, D.C. (1987)**. "Embankment-Dam Breach Parameters". Proceedings of the 1987 National Conference on Hydraulic Engineering. ASCE, New York. Aug., pp. 570-575.
- **Gates, T.K. and Al-Zahrani, M.A. (1996a)**. "Spatiotemporal Stochastic Open-Channel Flow. I: Model and Its Parameter Data". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 122, No. 11, ASCE. November.
- **Gates, T.K. and Al-Zahrani, M.A. (1996b)**. "Spatiotemporal Stochastic Open-Channel Flow. II: Simulation Experiments". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 122, No. 11, ASCE. November.
- **Guía Técnica (1996)**. "Clasificación de presas en función del riesgo potencial". Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Noviembre. Madrid-España.
- **Penas, M.J.; Berga, C.L.; Rodríguez, T.M. (1996)**. "Clasificación de presas en función del riesgo potencial. Criterios básicos y metodología". V Jornadas españolas de presas. Valencia-España.
- **Preissmann, A. (1961)**. "Propagation of Translatory Waves in Channels and Rivers". Paper presented at First Congress of French Assoc. for Computation, Grenoble, Sept. 14-16, Proceedings, AFCAL, pp. 433-442.
- **SENER (1997)**. "Asistencia técnica de estudios para realizar la propuesta de clasificación de las presas de titularidad estatal y análisis e informe de las propuestas de clasificación de las presas de concesionarios en función del riesgo potencial. Cuenca Hidrográfica del Norte". Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Madrid-España.
- **TYPSA-ECM (1997)**. "Documento de trabajo: Desarrollo del sistema informático". Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Mayo Madrid-España.
- **Wetmore, J.N. and Fread, D.L. (1981)**. "The NWS Simplified Dam Break Flood Forecasting Model". Proceedings of the Fifth Canadian Hydrotechnical Conference, Fredericton; New Brunswick, Canada, May.