



INTERPRETACIÓN HIDRODINÁMICA Y SEDIMENTARIA DE LA ROTURA DE LA Balsa DE SAN JUAN (ALTORRICÓN, HUESCA)

*Hydrodynamic and sedimentary interpretation of the San Juan Dam break
(Altorricón, Huesca)*

R. J. Batalla y J. C. Balasch

*Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl. Universitat de Lleida. Av. Alcalde Rovira Roure,
177. 25198 Lleida. rbatalla@macs.udl.es. Tel. 973 702676 / Fax. 973 702613*

Resumen: El objetivo de este trabajo es la reconstrucción e interpretación hidrodinámica y sedimentaria de la rotura y posterior colapso de una parte del dique de la balsa de riego de San Juan ocurrida en enero de 2001 en Altorricón (Huesca). Se describen los procesos y las formas geomorfológicas erosivas y deposicionales producidas por los caudales líquidos y sólidos liberados durante el suceso. El volumen de agua vertido fue de unos 300.000 m³ con un caudal pico estimado de 172 m³ s⁻¹. Como consecuencia de la rotura se liberaron alrededor de 3.350 toneladas de sedimentos, el 80% de los cuales se depositaron en forma de cono de deyección al pie de la brecha. El transporte de bloques métricos fue posible gracias a la formación de un flujo hiperconcentrado con una densidad aproximada 1,35 t m⁻³. La principal causa de la rotura y el colapso del dique de la balsa fueron las fugas hipodérmicas del agua de la balsa y un sellado incorrecto del fondo de su vaso, favorecidas por un emplazamiento inadecuado sobre materiales cuaternarios altamente permeables.

Palabras clave: balsa de riego, rotura, materiales cuaternarios, erosión, deposición, crecida, flujo hiperconcentrado, balance de sedimentos.

Abstract: This study presents a hydrodynamic and sedimentary reconstruction and interpretation of the San Juan dam-break occurred in January 2001 in Altorricón (Huesca). Geomorphic processes as well as erosional and depositional forms created by released water and sediment are also described. Approximately 300,000 m³ of water were released during the outflow following an estimated peak of 172 m³ s⁻¹. As a consequence, 3,350 metric tones of sediment were entrained, 80% of them subsequently deposited as an alluvial fan at the dam-break footstep. Metric blocs were transported by hyperconcentrated flows around 1.35 t m⁻³ in density. Dam break and collapse were mainly triggered by hypodermic fluxes and piping. Non-adequate sealing of the dam bottom and the inappropriate location on top of highly-permeable Quaternary sediments can be pointed out as main causes of the disaster.

Key-words: earth-dam, failure, Quaternary deposits, erosion, deposition, flood, hyperconcentrated flow, sediment budget.



Batalla, R. J. y Balasch, J. C. (2001). Interpretación hidrodinámica y sedimentaria de la rotura de la balsa de San Juan (Altorricón, Huesca). *Rev. C. & G.*, 15 (3-4), 109-123. © SEG. AEQUA. GEFORMAEdiciones

1. Introducción

La rotura de una presa puede producirse de manera gradual o instantánea. El tipo de rotura depende de las causas y del tipo de presa. Cuando una parte

importante de la presa se rompe y colapsa instantáneamente se produce una liberación súbita de agua, acompañada generalmente de sedimentos, que se propaga por toda la zona circundante y aguas abajo. Las presas de hormigón son las que sufren general-

mente este tipo de roturas. Los desastres por rotura en las presas de tierra son de tipo gradual a lo largo de un período de tiempo más largo. Los procesos de rotura y colapso duran, a menudo, algunas horas, aunque las causas iniciales y el proceso de preparación para la rotura pueden haberse producido durante varios días o semanas (Vischer y Hager, 1999).

Las zonas de la Depresión del Ebro transformadas en regadío mediante canales han crecido notablemente a lo largo del siglo XX. En este contexto, en la superficie regada por los canales de la vertiente izquierda del Ebro (por ejemplo, Urgell, Aragón y Cataluña) se ha construido un gran número de pequeños embalses o balsas de regulación para minimizar la estacionalidad y aumentar la capacidad y la eficacia de los períodos y los turnos de riego. Se calcula que, sólo en el área de Lleida regada por dichos canales, existen más de 300 balsas de riego similares a la estudiada, sin que exista una normativa específica sobre su seguridad. No se conocen en la zona antecedentes destacados de roturas en obras de este tipo, entre otras razones por la estabilidad de los materiales compactados y la idoneidad de la mayoría de substratos terciarios de la Depresión del Ebro.

El objetivo de este trabajo es la reconstrucción e interpretación hidrodinámica y sedimentaria de la rotura y posterior colapso de una parte del pantano de riego de la Comunidad de Regantes de San Juan en Altorricon (Huesca) en enero de 2001, y la descripción de los procesos y los efectos geomorfológicos producidos por los caudales líquidos y sólidos liberados durante el suceso. Asimismo, se propone un balance de agua y de sedimentos en órdenes de magnitud, y una secuencia temporal, tanto de los procesos que generaron la rotura de la balsa, como del proceso de vaciado (hidrograma de crecida), transporte y sedimentación del material arrancado. Se trata de un nuevo ejemplo de rotura de una balsa con dique de tierra que se enmarca en la serie mundial de decenas de presas derrumbadas hasta el momento descrita por Singh (1996).

2. Materiales y métodos

2.1 Situación geográfica y marco geológico

El pantano de riego está situado a 1,7 km al NNO de la población de Altorricon (La Litera,

Huesca) (Figura 1). La topografía original de la zona donde está ubicado corresponde a la de unos campos de cultivo aterrazados situados a 280 m de altura s.n.m. El drenaje natural de la zona lo constituye el Arroyo de Orriols que aporta sus escasas aguas a la Clamor de Almacelles (cuenca del Cinca), en el límite administrativo entre Cataluña y Aragón.

Los terrenos donde está emplazada la balsa pertenecen a los materiales terciarios y cuaternarios que conforman el relleno detrítico de la cuenca del Ebro. Los sedimentos terciarios representados en la zona corresponden a las areniscas y limos rojos de la Unidad de Sariñena que pertenecen al Ageniense (Oligoceno sup.-Mioceno inf.). Están compuestos por arcillas y limos rojos y ocres con intercalaciones de importantes paleocanales de areniscas de colores grises y ocres, que presentan una base claramente erosiva y extensión lateral limitada (Jerez y Gil, 1998). Internamente suelen presentar estratificación cruzada en surcos y planar y han sido interpretados como depósitos fluviales de canales meandriiformes instalados en la zona distal de abanicos aluviales de gran escala. Los depósitos de arcillas se corresponderían con las litofacies finas decantadas sobre las llanuras de inundación intercanal. En conjunto esta unidad puede presentar una potencia aproximada de 750 m.

El recubrimiento cuaternario está constituido por una formación superficial compuesta por cantos, gravas, arenas y limos del Pleistoceno superior. Estos materiales pertenecen a los retazos colgados de un extenso glacis de cobertera que debió cubrir en su momento la mayor parte de las dos vertientes de la Clamor de Almacelles (Sancho Marcén, 1991; Jerez y Gil, 1998). Los materiales del glacis proceden de las terrazas más elevadas y, por tanto, son retrabajados. Predominan los cantos calizos, de areniscas, cuarcíticos, de liditas, graníticos e incluso de conglomerados permotriásicos. La disposición estratigráfica de los niveles es en lentejones de reducida extensión lateral, con base netamente erosiva, clastos imbricados y cierta clasificación interna. El conjunto, aunque presenta algunos niveles con acumulación de carbonatos edáficos y nódulos de hierro, se encuentra escasamente cementado y las matrices arenosas muestran una porosidad intersticial elevada. El grosor de estos materiales, observado en el corte de la rotura y en los surcos

excavados por las aguas sobre los terrenos circundantes, puede alcanzar los 4 m.

Los restos que conforman este glacis recubren ahora las laderas más elevadas de la zona Algayón-Altorración, recordando la morfología del conjunto a la de un paleoabanico aluvial procedente del noroeste. Se ha producido, por tanto, una inversión del relieve por erosión diferencial, destacando en las partes elevadas del paisaje los elementos que correspondían a los antiguos drenajes pleistocenos (Calvet, 1980).

La balsa de riego de la Comunidad de Regantes de San Juan se encuentra emplazada justamente sobre uno de los retazos de la formación superficial pleistocena (Figura 1), caracterizada, desde el

punto de vista de su comportamiento hidráulico, por la alta permeabilidad de los niveles de cantos, gravas y matriz arenosa. En contraste, los materiales del substrato terciario presentan una conductividad hidráulica muy reducida, actuando como nivel de base de pequeños acuíferos locales cuando los depósitos terciarios están recubiertos por los glacis pleistocenos.

2.2 Descripción de la obra civil

La balsa objeto de estudio fue encargada por la Comunidad de Regantes de San Juan de Altorración. Se trata de una balsa con diques de tierra formada por el apilamiento de diversas capas de material

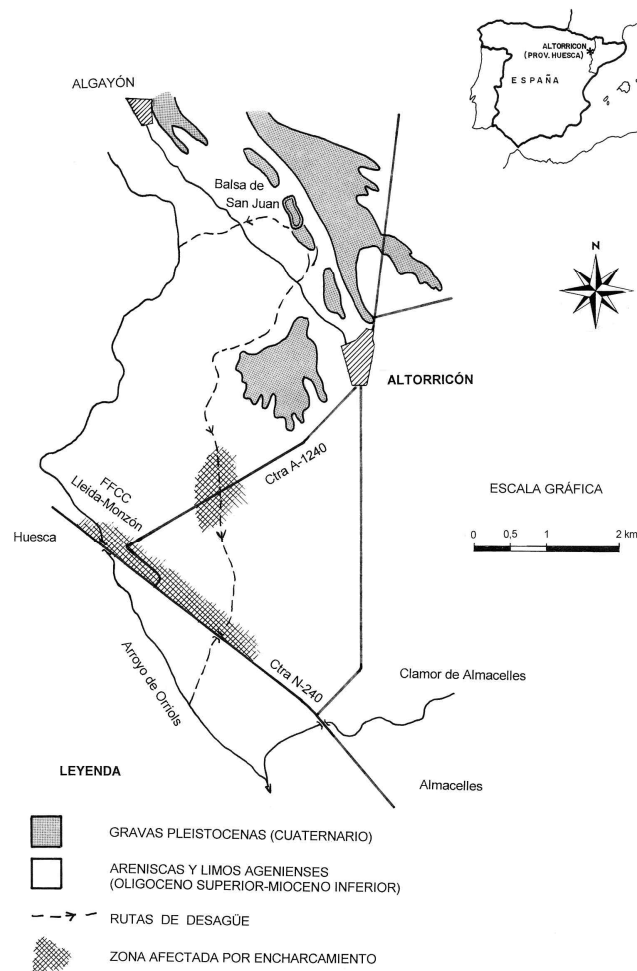


Figura 1. Mapa de situación del pantano de riego de San Juan (Altorración, Huesca) y traza de los flujos derramados. Contexto geológico de los materiales

Figure 1. Location map of San Juan dam and spilled-water runs after dam break. Geological context

detrítico heterogéneo superpuestas y compactadas por separado. Los materiales utilizados proceden de la excavación y remoción de los depósitos terciarios de la propia zona. Las obras empezaron en 1999 y se dieron por finalizadas a principios del año 2000. La finalidad principal de la balsa es la aportación de agua para los riegos a partir de los aspersores de distribución radial ubicados en los campos que la rodean. La balsa tiene una planta aproximadamente rectangular con las esquinas redondeadas y unas dimensiones de 300 m de longitud y 150 m de anchura media. El dique de tierra que cierra el pantano tiene una altura que oscila entre 10 m en el lado meridional y los aproximadamente 20 m de la parte occidental. El dique está coronado por una plataforma de 6 m de anchura que circunda todo su perímetro. La pendiente del talud interno es de 20° y la del talud externo de 35°. La profundidad media del vaso construido (H_d) es de unos 16 m, y su capacidad es de 0,6 hm³.

En las paredes o caras laterales de la zona de rotura puede observarse la estructura interna del dique (Figura 2). La base está constituida por un nivel de unos 3 m de espesor de gravas, arenas y limos pleistocenos. Sobre ellos aparece una alternancia de capas de materiales detríticos, principalmente limos y arcillas compactados, que componen el cuerpo del muro levantado, con una altura máxima de 7 m. Los primeros 2 m contienen un número mucho mayor de bloques y cantos de areniscas terciarias que el resto de niveles superiores. En la parte más alta de los depósitos de gravas, cerca del contacto con los materiales superpuestos, pueden apreciarse restos de raíces y otros fragmentos vegetales que revelan la antigua superficie topográfica cultivada sobre la que se ha levantado el dique del pantano.

Tras el accidente de la rotura, la balsa de San Juan fue reparada y puesta de nuevo en servicio durante la primavera de 2001, después del saneamiento y reconstrucción de la zona derruida.

2.3. Trabajo de campo y análisis de datos

El trabajo de campo ha consistido en: a) la caracterización geológica de los materiales aflorantes en el substrato sobre el que se emplaza la balsa, b) el reconocimiento de los materiales utilizados en la construcción de la balsa, c) el análisis de los talu-

des y orificio de la zona de rotura, d) la cuantificación volumétrica de la zona derruida en el dique, e) la cartografía y el estudio granulométrico de los depósitos generados por el aluvión torrencial fruto de la ruptura, f) la reconstrucción de las líneas de los flujos preferenciales y g) la adopción de criterios cronológicos para la datación relativa de las etapas erosivas y deposicionales.

Posteriormente, se han examinado algunas relaciones entre los parámetros relativos a la geometría del hueco creado por el desplome del dique y otros parámetros específicos de la balsa y de la onda de crecida relacionada con el desguace súbito. Estas relaciones se han introducido junto a los resultados procedentes de otros casos similares registrados en presas de tierra de diversos puntos de la Tierra, siguiendo las pautas de análisis propuestas por Singh (1996).

3. Resultados y discusión

3.1 Características de la rotura: antecedentes y efectos

La rotura se produjo alrededor de las 6 de la mañana del día 21 de enero de 2001, cuando la balsa se encontraba al máximo nivel de carga, al final de la primera prueba de llenado total. El nivel del agua estaba situado aproximadamente a 1,5 m por debajo de la cota de coronación (Figura 3).

Anteriormente, a lo largo del año 2000, se habían realizado dos pruebas de carga parcial. Durante éstas, los vecinos de la zona indican que la balsa había presentado síntomas de pérdidas de agua en el mismo punto de la rotura, acompañadas de grietas por asentamiento del cuerpo. Estos hechos habían forzado a realizar reparaciones puntuales en las zonas del dique afectadas, consistentes en pequeños saneos y nuevos rellenos con materiales lutílicos posteriormente compactados. Paralelamente, algunas obras de riego que rodean la base del dique sufrían repetidamente daños por el colapso de los materiales que las sustentan. Se construyeron drenajes y zanjas alrededor de la base del talud para el control de las filtraciones que iban en aumento. Sin embargo, esta actuación no hizo más que contribuir a acelerar el proceso de erosión por escorrentía hipodérmica.

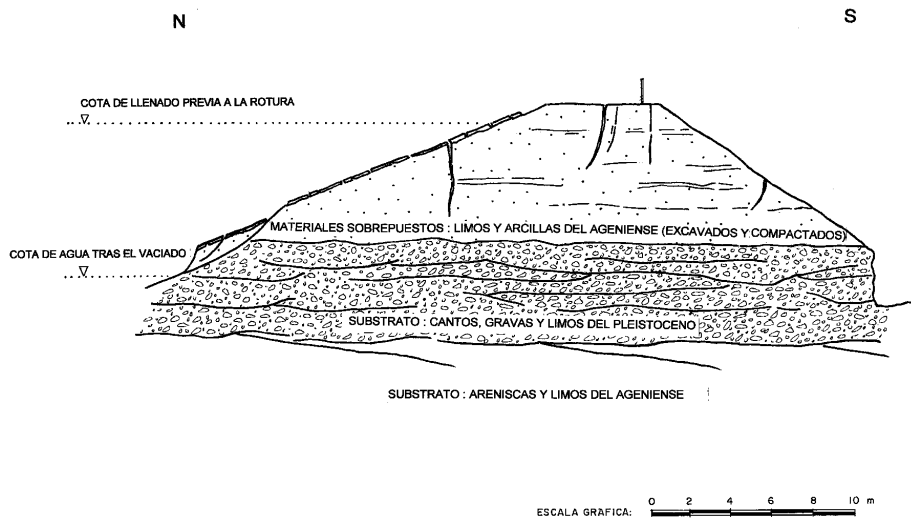


Figura 2. Corte esquemático y visión de los materiales el dique de la balsa en la brecha
 Figure 2. Schematic diagram and general view of materials in the inner part of dam break

Visto en planta, el eje de la rotura del dique de la balsa no es completamente perpendicular al muro sino levemente desviado hacia el SSE. También en planta, la anchura del dique afectado por la brecha es de 17 m en su cara interna y de 10 m en su parte externa. En perfil frontal, la rotura vista desde el exterior tiene forma trapezoidal con una altura (d) de 10 m y unas anchuras superior (B_s) de 16 m, e inferior (B_i) de 10 m.

Se da la circunstancia de que, una vez vaciado parte de la balsa por el vertido, fue posible observar una cicatriz de unos 15 m de anchura correspondiente a otro deslizamiento, situado en el dique occidental, que afecta el talud interno del vaso, con un aspecto muy similar al que dio inicio a la rotura que nos ocupa.

El volumen de agua vertido hasta la reparación de urgencia, efectuada el mismo día de la rotura, se



Figura 3. Vista general de la rotura de la balsa de San Juan (Altorricón, Huesca)
Figure 3. General view of the San Juan Dam break (Altorricón, Huesca)

ha calculado en unos 300.000 m³. El agua que escapó de la balsa siguió dos trayectos: a) El primero, el más caudaloso, siguió el sentido del vertido dirigiéndose hacia el sur para, más tarde, reorientarse hacia el suroeste en dirección al Arroyo de Orriols, cerca ya de la finca de la Melusa, inundando algunos tramos de la carretera A-1240 (de la N-240 a Altorricón) y, b) el segundo trayecto bordeó la base del dique hacia el oeste y fue a buscar directamente el Arroyo de Orriols después de atravesar y anegar la carretera local que comunica Altorricón y Algayón. La zona anegada por los dos flujos de agua ocupó unas 170 ha de plantaciones de frutales y cultivos diversos situados en las zonas más deprimidas de los desagües, con un recorrido máximo de 7 km. Además, el agua obligó a desalojar dos granjas y afectó momentáneamente a la vía férrea de Lleida a Zaragoza y a la carretera N-240.

3.2 Procesos responsables del colapso y rotura

Las observaciones sedimentológicas y geomorfológicas obtenidas de campo permiten proponer un escenario de procesos anteriores al colapso responsables del suceso ordenados cronológicamente:

Inicio de filtraciones, probablemente, a través de los materiales pleistocenos altamente permeables que aprovecharían algunas fisuras de las capas de recubrimiento impermeable. Las filtraciones aumentaron de magnitud con el incremento de la

presión hidrostática que acompaña a las primeras pruebas de carga parcial.

Formación de galerías hipodérmicas de mayores dimensiones, con un grado de organización y jerarquía más avanzado. La velocidad del flujo hipodérmico permite el arrastre de pequeñas partículas y el inicio de la erosión en los conductos preferenciales.

Vaciado erosivo de los conductos mayores que puede conllevar la aparición de los primeros colapsos. Esta dinámica dio lugar a la desestabilización interna de los materiales de la zona próxima a los conductos preferentes.

Transmisión de los colapsos a medida que aumenta la magnitud de los conductos subsuperficiales hasta la aparición de grietas en la superficie de los taludes de la balsa.

Desplome parcial del dique de la balsa dejando escapar el contenido de su vaso. La salida y vertido de las aguas almacenadas ocasionó una erosión superficial concentrada en la zona de la brecha que se fue acrecentando a medida que las aguas arrastraron los materiales que encontraron a su paso.

El proceso fue similar al ocurrido en la presa de Teton (Idaho) (Jansen, 1988). La presa estaba situada sobre tobas volcánicas altamente permeables, con una importante recarga subterránea regional. Su rotura y posterior colapso tuvieron lugar en junio de 1976, durante el primer llenado, con una altura de 84 m de agua almacenada (7,7 hm³), 7 m por debajo del nivel de máximo. Las primeras fil-

traciones se observaron a las siete de la mañana. Al mediodía la presa estaba totalmente fracturada y empezaron a aparecer corrientes fangosas, seguidas por procesos de tubificación y apertura de galerías, finalizando con el colapso de la coronación. A las seis de la tarde el embalse se había vaciado. El pico del vertido fue de $28.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Jansen (1988) concluyó que la causa de la rotura fue una inadecuada protección a la erosión interna del núcleo central impermeable.

3.3 Características geométricas de la rotura y del tiempo de colapso

Singh (1996) ha resumido las principales características geométricas de las roturas de presas de tierra. En ellas se relacionan parámetros relativos a las dimensiones del embalse con las dimensiones de la zona dañada. En este marco se describe la rotura de la balsa de Altorricón. La forma de las roturas analizadas por Singh (1996) es generalmente trapezoidal, con una relación entre las anchuras superior (B_s) e inferior (B_i) de 1,29 ($\pm 0,18$), con valores extremos desde 1,06 hasta 1,74. En el caso de la balsa de Altorricón esta relación es de 1,6 ($B_s=16 \text{ m}$, $B_i=10 \text{ m}$).

El cociente entre la anchura superior (B_s) y la profundidad de la rotura (d) depende linealmente de la relación H_s/H_d , o altura relativa del dique de la balsa, donde H_s es igual a la profundidad media relativa de agua embalsada, o profundidad equivalente, calculada a partir de $H_s = V_s^{1/3}$, siendo V_s el volumen de agua almacenado en la balsa, y H_d su

altura media (Figura 4a). En el caso de la balsa de San Juan, $H_s = V_s^{1/3} = (600.000 \text{ m}^3)^{1/3} = 84 \text{ m}$, y por tanto, el cociente $H_s/H_d = 84/16 = 5,25$.

Existe asimismo una relación entre el cociente de la anchura y la profundidad de rotura, y el cociente entre la profundidad equivalente (H_s) y la altura media del dique de la balsa (H_d). Esta relación se expresa por la ecuación $B_s/d = 0,40(H_s/H_d)$, siempre que H_d sea mayor que 8 m. En el caso de estudio ambos términos se aproximan claramente aunque no llegan a confluir ya que $B_s/d=1,6$ mientras que $0,40(H_s/H_d)=2,1$. La rotura de la balsa de Altorricón es más profunda y estrecha que la media resultante de aplicar las relaciones empíricas de Singh (1996).

El ángulo de los taludes resultantes de la rotura de la balsa se sitúa en la mayoría de los casos analizados por Singh (1996) entre 40° y 50° . En el caso de la balsa de San Juan está entre 65° y 70° . El tiempo de colapso se encuentra entre media hora y doce horas (Singh, 1996). Para la mayor parte de los casos estudiados el tiempo de rotura fue menor de tres horas. Con una probabilidad del 50% el tiempo de rotura es menor de 90 minutos, tiempo estimado como probable para la balsa de San Juan a partir de las informaciones de los vecinos de la zona.

3.4 Hidrograma de la crecida

El caudal pico relativo se puede relacionar con la altura relativa de la balsa a partir de la expresión $Q_p/(gB_a^2H_d^3)^{1/2} = 1,25 \cdot 10^{-2}(H_s/H_d)$, donde B_a es la anchura media de la rotura (Figura 4b). El cálculo

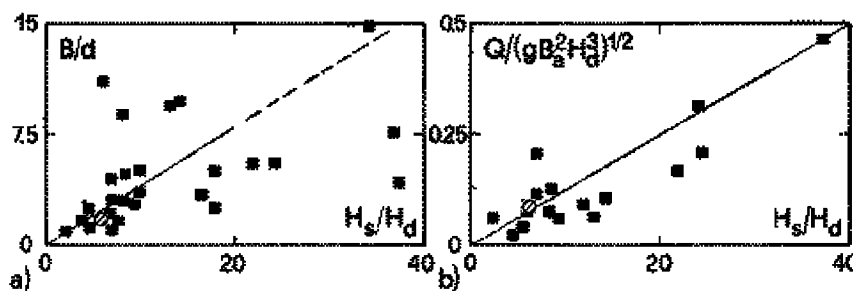


Figura 4. Relaciones empíricas entre (a) la geometría de la rotura (H_s/H_d) y la anchura máxima relativa (B/d) y (b) el pico de la descarga ($Q/(gB_a^2H_d^3)^{1/2}$) y geometría de la rotura o altura relativa del dique de la balsa (H_s/H_d) (Singh, 1996). En círculos (●) se indican los valores de la balsa de San Juan, y en cuadros negros (■) los casos estudiados por Singh (1996).

Figure 4. Empirical relations between (a) dam-break geometry (H_s/H_d) and maximum relative width (B/d) and, (b) peak of discharge ($Q/(gB_a^2H_d^3)^{1/2}$) and dam-break geometry or dam relative high (H_s/H_d) (Singh, 1996). Circles indicate the San Juan Dam break values and black squares the cases studied by Singh (1996)

para la rotura de la balsa de San Juan en Altorricón ofrece un caudal pico estimado de $172 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Para poder reconstruir de manera más aproximada a la realidad la curva de recesión del hidrograma, se ha estimado el caudal en el canal lateral que socavó la base del dique de la balsa hacia el oeste y que el agua abrió una vez bloqueada la salida preferente por materiales gruesos depositados en el ápex del cono de deyección (Figura 5). El caudal estimado es de $6,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ calculado a partir del área de la sección ($3,5 \text{ m}^2$) y la velocidad media del flujo a partir de la ecuación de Manning ($1,8 \text{ m s}^{-1}$) ($n=0,040$).

A partir de estos datos y suponiendo un tiempo alrededor de 15 minutos desde la aparición de galeñas importantes hasta el colapso de la balsa y el pico de la crecida, y una recesión máxima de 8

horas, según las observaciones de los vecinos de la zona, se ha realizado una aproximación al hidrograma de la avenida de agua, al que se ha ajustado una función exponencial negativa de agotamiento de la reserva de agua (Figura 6). Un cambio del tiempo de retardo estimado, pasando por ejemplo de 15 minutos a 30 o 60, no alteraría notablemente la forma del hidrograma ni la orientación del trabajo, que no es la de presentar un estudio exacto sino la de ofrecer datos aproximados y ordenes de magnitud del suceso ocurrido.

3.5 Consecuencias geomorfológicas

La acción conjunta de los materiales deslizados al pie del dique de la balsa y de los flujos de agua



Figura 5. Socavación por flujo concentrado en la base del talud de la balsa
Figure 5. Rill erosion at the dam-basement

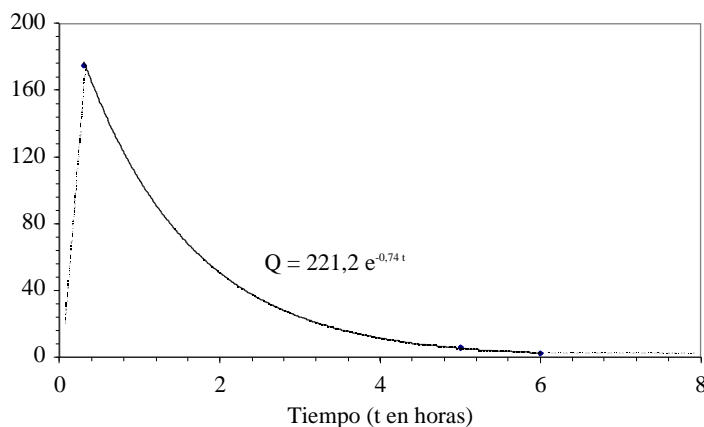


Figura 6. Reconstrucción del hidrograma teórico de la rotura y desguace de la balsa de San Juan.
Figure 6. Hydrograph reconstruction after dam-break and water-wave release at the San Juan Dam

que escaparon de la balsa propició la creación de un complejo conjunto de formas deposicionales y, ocasionalmente, erosivas, extendidas delante de la base de la brecha. Este conjunto deposicional presenta la morfología de un cono de deyección principal integrado por una amalgama de materiales arrancados del substrato y del edificio de la balsa (Figura 7). El cono central se encuentra acompañado por otro cono lateral menor (al este), varios canales erosivos que recorren la superficie del cono

y un canal lateral que socavó la base del muro de la balsa hacia el oeste (Figura 8).

El cono de deyección principal tiene una longitud máxima de unos 100 m y una altura máxima de 0,70 m sobre los campos de cultivo circundantes. En la zona proximal del cono aparecen localizados los fragmentos de mayor tamaño. Se trata de bloques, algunos de calibre superior a 1 metro, de fragmentos de las gravas pleistocenas y de las losas de hormigón que recubren el talud interno de la

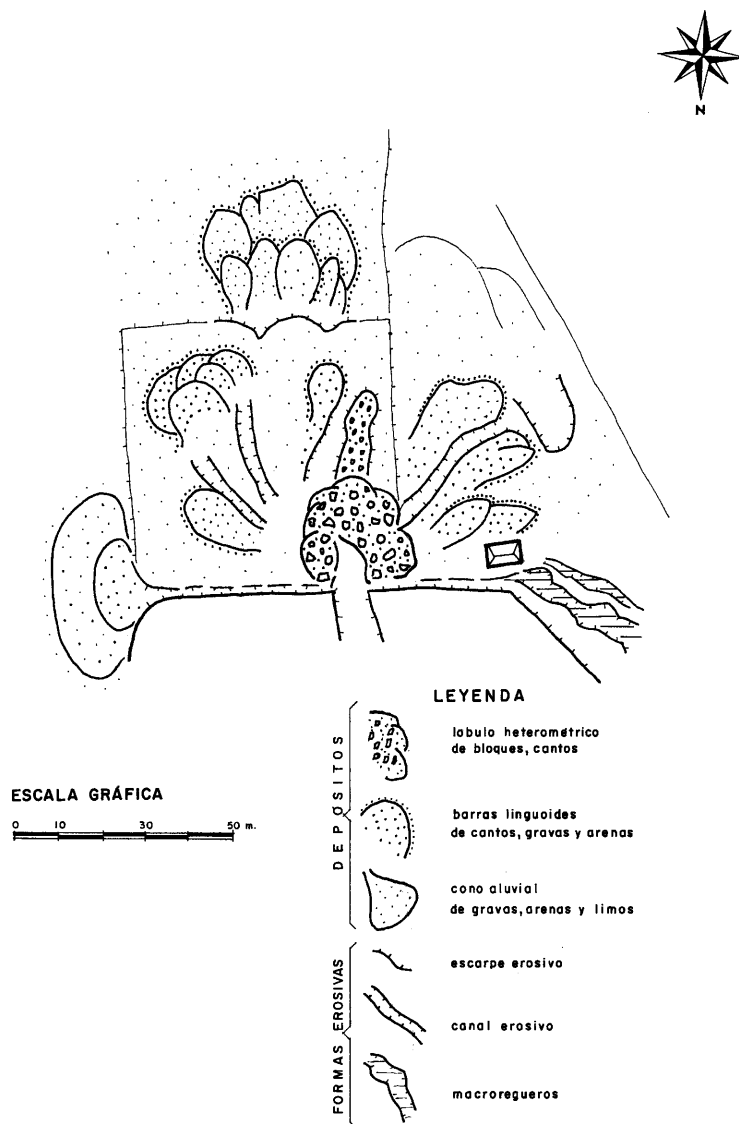


Figura 7. Croquis de los depósitos del cono de deyección emplazado al pie de la rotura.
Figure 7. Scheme of alluvial fan deposits at the dam-break footslope

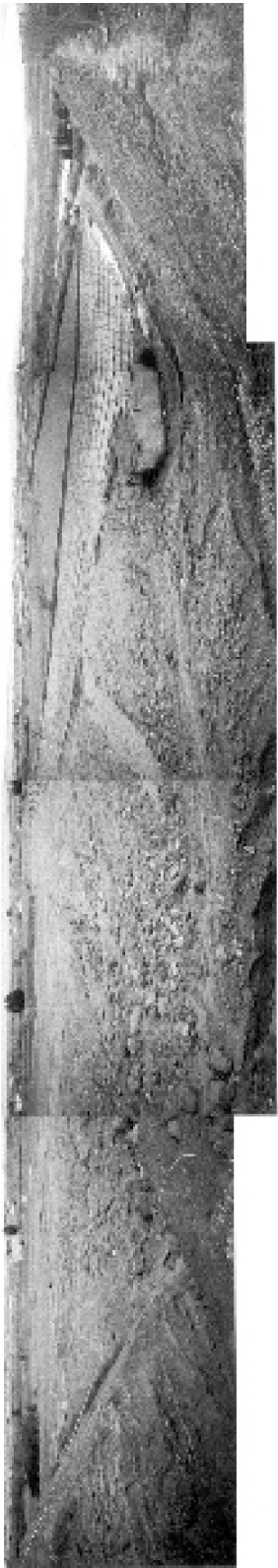


Figura 8. Vista panorámica de las formas deposicionales (conos de deyección) y erosivas (regueros interlobulares) al pie de la rotura de la balsa
Figure 8. Panoramic view of depositional (alluvial fan) and erosional (interlobe rills) forms at the dam-break footslope

balsa. Los grandes bloques se emplazaron sobre la superficie de los campos sin una aparente erosión basal, pues entre los bloques subsisten emplazadas sin grandes daños las vides cultivadas en estos campos, ligeramente peinadas por el aluvión.

En las zonas distales se encuentran acumulaciones de gravas, arenas y limos que forman barras linguoides, dunas, y a menor escala *ripples*. Una serie de canales radiales de diferente anchura, intersecta la superficie del cono principal. En estos canales los materiales del cono han sido erosionados y aparece la hierba que poblaba la superficie de los campos. Esta alfombra herbácea raramente se encuentra erosionada, salvo en el salto entre bancales.

El cono lateral menor se extiende al este del principal, tiene un radio de unos 40 m y una acumulación máxima de 0,3 m. Se ha formado por un flujo que siguiendo la base del muro hacia el este de la brecha ha alcanzado unos campos situados a una cota inferior. Lo integran bloques (en una proporción y tamaños muy inferiores a los del cono principal), gravas, arenas y limos, reabajados de la margen del cono central y del canal de aproximación. Los bloques se encuentran ocupando la zona central del abanico, por la superposición de canales de gravas y arenas en el ápex y ambos canales laterales. En las partes más externas se hace manifiesta una clara granoselección de las gravas, arenas, limos y arcillas.

Las aguas que escaparon paralelas a la base del talud externo en sentido oeste y se dirigieron hacia el Arroyo de Orriols, socavaron profundamente la base del muro creando un canal de unos 4 m de anchura y 1 m de profundidad. Al llegar a una zona de mayor pendiente situada justo al lado de la balsa, el agua excavó surcos de profundidad superior a 1,5 m sobre los materiales pleistocenos, alcanzando la superficie de contacto con las areniscas terciarias.

3.6. Balance de masas y flujo hiperconcentrado

La realización de un balance de sedimentos entre el material liberado por la rotura de la balsa y el material depositado es un elemento importante para apoyar la reconstrucción e interpretación hidrodinámica y geomorfológica del evento. El balance de sedimento asume una igualdad teórica entre la cantidad liberada por la rotura de la balsa (S_l) y el material depositado (S_d) en el exterior ($S_l = S_d$). Se pre-

senta un balance de masas entre los materiales desprendidos del dique de la balsa y los depositados en los campos adyacentes, con el simple objetivo de aproximarnos a los órdenes de magnitud del fenómeno. Las densidades de los distintos materiales del conjunto (substrato y dique de la balsa) se han obtenido a partir de bibliografía especializada y consultas con expertos locales, ya que no se pudieron recoger muestras para obtener experimentalmente dichos valores.

La cantidad de sedimento liberada por la rotura se ha estimado alrededor de 3.350 toneladas, a partir del volumen del agujero y las características de los dos tipos de materiales: a) depósitos cuaternarios, con cantos, gravas y limos pleistocenos: $L \cdot B_a \cdot d \cdot \rho_s = 19,5 \text{ m} \cdot 13,5 \text{ m} \cdot 3 \text{ m} \cdot 1,65 \text{ t m}^{-3}$, siendo L la longitud media de la base del trapecio, B_a la anchura media, d la altura media en el centro de la rotura, y ρ_s la densidad media para este tipo de depósitos (Giménez Salas y De Justo, 1975; Rodríguez, R. comunicación personal) y, b) de construcción del dique de la balsa: $L \cdot B_a \cdot d \cdot \rho_s' = 11,5 \text{ m} \cdot 13,5 \text{ m} \cdot 7 \text{ m} \cdot 1,88 \text{ t m}^{-3}$, siendo ρ_s' la densidad de la arcilla compactada en este tipo de diques (Giménez Salas y De Justo, 1975).

Para la estimación del material depositado se han utilizado dos tipos de datos: a) el número de bloques con un eje b superior a 600 mm depositados en el cono de deyección principal al pie de la rotura y b) la profundidad media del material depositado también en el cono de deyección principal, sin tener en cuenta las zonas interlobulares del cono erosionadas por el agua menos cargada de sedimentos en una fase posterior de la avenida y anterior al bloqueo del ápex.

- a) Se han contabilizado 52 bloques con un eje b superior a 1.200 mm y 130 bloques con un eje b entre 600 y 1.200 mm. Asumiendo una forma esférica generalizada ($V=4/3 r^3$), excepto para alguno de los bloques mayores que presenta una forma subangular, el volumen total para la primera clase de material es de 90 m³ y para la segunda clase de 55 m³, siendo el volumen total de material grueso desalojado y depositado en el cono de 140 m³ y su masa de 250 t, a partir de una densidad de 1,75 t m⁻³, correspondiente a la media entre la densidad de los materiales

cuaternarios y de la arcilla compactada del dique. Existe una gradación del calibre de los materiales desde el ápex hasta los límites del cono (Figura 8). La mayor distancia recorrida por bloques submétricos es superior a 60 m, mientras que los bloques mayores de 1.200 mm están depositados en un radio no superior a 30 m. Una parte importante de los bloques de mayor tamaño provienen del nivel de gravas cuaternario, encontrándose también en el depósito bloques de arcillas compactadas y piezas de hormigón procedentes del recubrimiento interno de la balsa.

- b) Para la estimación de la sedimentación general en el cono de deyección se ha asumido que éste presenta una forma semicircular con un radio medio de 50 m, por lo que su superficie total es aproximadamente de 8.000 m². Esta superficie se ha corregido mediante un factor de 0,5 para descontar las zonas erosionadas (canales o zonas interlobulares) en la fase de erosión por agua limpia, quedando la superficie de acumulación real en 4.000 m². El grueso de la deposición de material fino-medio (de arcilla hasta gravas gruesas y cantos) medida en el campo tiene un valor medio de 0,4 m, por lo que el volumen del sedimento actual en el cono esta alrededor de 1.600 m³, lo que significa 2.400 t a partir de una densidad de 1,50 t m⁻³, habitualmente atribuida a sedimentos recientes no compactados (Julien, 1998).

El sedimento total depositado en el cono es, por lo tanto, de 2.650 t lo que supone el 80% del sedimento liberado durante la rotura. El resto de sedimento (700 t) fue probablemente depositado en el cono en una primera instancia y posteriormente lavado en las zonas preferenciales interlobulares de erosión, y transportado por los campos de cultivo y los bancales hasta centenares de metros (Figura 9). Se ha estimado asimismo la erosión ocasionada por el flujo lateral que socavó la base del talud de la balsa (materiales cuaternarios y materiales de relleno compactados) en fases posteriores de la crecida en aproximadamente 385 t de sedimentos, a partir de la longitud (ca. 60 m) y la sección del reguero (3,5 m²), y una densidad media de los materiales de 1,75 t m⁻³.

¿Cómo pudieron ser transportados bloques de hasta 2 m de eje b y más de 10 toneladas alguna decenas de metros en un terreno prácticamente llano?

En primer lugar hay que tener en cuenta el empuje del agua durante algunos minutos alrededor del pico de la avenida. A partir de la relación de Baker y Ritter (1975) para el cálculo de la competencia del flujo en paleocreidas ($D_{max} = 65 \tau_o^{0,54}$, en la que τ_o es la tensión de corte media del fluido), se puede estimar que la competencia instantánea de un supuesto vertido de agua limpia hubiera solamente alcanzado hasta bloques de 0,5 m. La tensión de corte ($\tau_o = \rho_w \cdot g \cdot s \cdot d$) en este hipotético escenario ha sido calculada asumiendo un terreno casi llano con una pendiente inferior al 0,1% (s), una concentración media de sedimento inferior al 5% ($\rho_w < 1050 \text{ kg m}^{-3}$), y una profundidad media del flujo de 5 m (d).

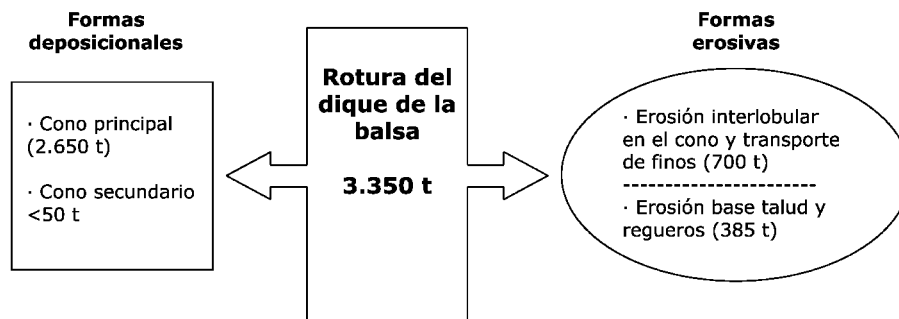


Figura 9. Balance de sedimento con relación a las formas resultantes (la erosión de la base del talud no se computa en el balance ya que los materiales socavados y transportados no proceden de la rotura de la balsa)

Figure 9. Sediment budget in relation to erosional and depositional forms after dam-break (erosion at dam-slope basement is not computed because eroded sediments did not come from the dam-break hole)

La razón principal para el transporte de los grandes bloques fue, sin duda, la formación instantánea de un flujo hiperconcentrado. Este tipo de fluido se parece mucho a los flujos de agua en canales abiertos, aunque difiere esencialmente porque en el fluido circundante se produce un aumento del empuje hacia arriba. Este hecho, unido a una gran viscosidad, le permite mantener en semi-suspensión gran número de bloques durante cierto tiempo y distancia. En el caso de la balsa de San Juan planteamos las siguientes premisas como base de las hipótesis para calcular la densidad media del fluido liberado de la balsa durante los momentos previos a la fase de deposición en el cono de deyección:

1. Un caudal medio entre 100 y 125 m³ s⁻¹ sostenido durante 60 segundos alrededor del pico de la avenida estimado en 172 m³ s⁻¹.
2. El colapso e incorporación al fluido de entre el 60 y el 80% del material de la rotura, que asumiendo una densidad media de 1,75 t m⁻³, supondría aproximadamente entre 2000 y 2700 toneladas de sedimento liberado.

Estas premisas permiten proponer cuatro posibles escenarios para el cálculo de la densidad media del fluido, y establecerla en 1,35 t m⁻³, con un mínimo en 1,26 t m⁻³ y un máximo en 1,45 t m⁻³, tal y como se detalla a continuación:

aporte de sedimento	caudal pico medio		densidad media
	100 m ³ s ⁻¹	125 m ³ s ⁻¹	
2.000 t	1,33 t m ⁻³	1,26 t m ⁻³	
2.700 t	1,45 t m ⁻³	1,36 t m ⁻³	1,35 t m ⁻³

Estos valores se sitúan en la categoría de flujo hiperconcentrado descrito por Costa (1984). Esta alta densidad fue casi instantánea pero suficiente para transportar numerosos bloques métricos y submétricos algunas decenas de metros. El fenómeno fue probablemente favorecido por una fase previa de movimientos en masa producidos al desestabilizarse el dique de la balsa.

3.7 Secuencia hidrodinámica y geomorfológica desde la rotura

A partir de las observaciones de campo de la rotura y de las formas deposicionales y erosivas ocasionadas y de las estimaciones hidrológicas y de balance de sedimento se propone una secuencia interpretativa del suceso en diversas fases temporales (tabla 1). Esta secuencia no pretende, en ningún caso, ser explicativa, ya que para ello debería estar apoyada en ensayos geotécnicos de los materiales de la rotura, sino que se presenta con una idea esencialmente descriptiva del fenómeno:

- a) *Fase inicial* o de preparación (apartado 3.2). Se inicia con la filtración del agua de la balsa a nivel de los materiales permeables cuaternarios, sigue con la creación de flujo preferente y jerarquizado concentrado y acaba con fenómenos de tubificación, erosión interna de la base del dique y posterior rotura y colapso del mismo. Esta es la hipótesis más plausible para los autores, ya que si la desestabilización del dique de la balsa y su posterior rotura se hubieran

Tabla 1. Secuencia hidrodinámica y geomorfológica desde la rotura de la balsa de San Juan
 Table 1. Hydrodynamic and geomorphological sequence following the San Juan Dam break

	<i>Fase inicial</i>	<i>Fase de rotura</i>	<i>Fase de «alta densidad»</i>	<i>Fase de «agua limpia»</i>
Duración estimada	Días/Horas	Minutos/segundos	Minutos	Horas
Fenómenos hidro-sedimentológicos	Escorrentía hipodérmica	Flujo hiperconcentrado	Flujo menos denso	Caudal de agua
Fenómenos geomorfológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Tubificación en depósitos cuaternarios • Erosión interna del dique 	<ul style="list-style-type: none"> • Colapso de materiales • Inicio de la deposición del cono principal 	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de las partes centrales y distales del cono • Formación de canales entre los lóbulos del cono 	<ul style="list-style-type: none"> • Formación del cono secundario • Erosión de la base de la balsa • Formación de regueros distales

producido por los materiales superpuestos compactados y, teniendo en cuenta la poca duración del desagüe, la brecha sobre los materiales duros cuaternarios hubiera sido mucho menos profunda que la observada (3 m). Una mayor profundidad del nivel de base en el inicio de los procesos descritos estaría de acuerdo con las hipótesis expuestas.

- b) *Fase de rotura del dique y de flujo hiperconcentrado.* Se iniciaría, probablemente, con el colapso de los materiales cuaternarios que comporta simultáneamente la caída de los materiales superpuestos en la construcción. El empuje del agua arrastra el material desestabilizado, creándose un flujo hiperconcentrado que fluye por los campos vecinos al pie del talud. En esta fase se transportan los grandes bloques de la formación cuaternaria desde algunas decenas de metros hasta casi un centenar. Al mismo tiempo se añaden al transporte los fragmentos de tierra y las losas de hormigón del revestimiento interior del vaso. La disposición de este sistema es la de un cono de deyección (Figura 8). Los viñedos han quedado parcialmente enterrados en materiales más finos entre los grandes bloques arrastrados.
- c) *Fase intermedia de alta densidad.* Se trata de una fase de lavado del cono con aguas menos densas. El agua ya ha arrastrado la mayor parte de los materiales de la rotura pero todavía tiene altura suficiente para circular por encima del cono. Durante este proceso el flujo redistribuye sedimentos más finos y modela unos canales entre los bloques más grandes (Figura 8). El final de esta fase viene marcado por la pérdida de energía del flujo por disminución de la altura de agua en la balsa, y por la obstrucción del ápex del cono por la deposición del material grueso erosionado.
- d) *Fase final o de erosión por agua limpia.* El obstáculo producido por los materiales depositados en la salida de la rotura de la balsa provoca la distribución de las aguas limpias, que continúan vertiéndose hacia los dos laterales del cono principal siguiendo el

contorno de la base del talud. El flujo izquierdo erosiona levemente los materiales de la base del talud y forma un pequeño cono de deyección con materiales más finos: gravas, arenas y finos, sobre un campo de cultivo (Figura 8). El ramal de la derecha encuentra más pendiente y erosiona fuertemente la base del talud (Figura 5) y forma regueros de profundidad métrica a lo largo de un camino lateral, antes de trasladar los materiales erosionados a otro campo de cultivo situado a una cota inferior de 10 m al pie de la vertiente meridional de la balsa.

4. Conclusiones

Las principales conclusiones que se derivan de este estudio se resumen a continuación:

1. Las observaciones de la zona de rotura del pantano de riego de San Juan (Altorricón) y de las formas deposicionales y erosivas asociadas a la misma, han permitido la reconstrucción hidrodinámica y sedimentaria del evento, separando cuatro fases bien diferenciadas, correspondientes a otros tantos flujos de características contrastadas: a) fase inicial de tubificación y erosión interna del talud, b) fase de rotura y de flujo hiperconcentrado, c) fase intermedia de flujo de alta densidad, y d) fase final o de erosión por agua limpia.
2. El análisis de la brecha abierta en el muro y de los depósitos al pie de la misma, mediante técnicas granulométricas y geomorfológicas de campo ha posibilitado la elaboración del balance de sedimento movilizado, cerrado al 80% entre el área fuente (3.350 t) y el material depositado en forma de cono de deyección frente a la brecha (2.650 t).
3. La densidad media del flujo en los momentos posteriores a la rotura del dique de la balsa alcanzó, probablemente, valores próximos a $1,35 \text{ t m}^{-3}$, situándose en la categoría de flujo hiperconcentrado.
4. La rotura de la balsa de Altorricón es más profunda y estrecha que la media resultan-

te de aplicar las relaciones geométricas empíricas de Singh (1996). Esta evidencia se ve reforzada por el elevado ángulo de los taludes resultantes de la rotura (65°-70°).

5. El hidrograma de vaciado a partir de la rotura de la balsa ofrece un caudal pico de 172 m³ s⁻¹, estimado a partir de las relaciones hidrológicas empíricas de Singh (1996), de cálculos sobre una sección y pendiente conocidas, y asignando un tiempo de recepción de seis horas.
6. Los procesos inductores de la rotura y el colapso del dique de la balsa son las fugas hipodérmicas de las aguas de la balsa relacionadas, muy probablemente, con un sellado incorrecto del fondo del vaso de la balsa y con un emplazamiento inadecuado sobre materiales cuaternarios altamente permeables.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a Jose M. García Ruíz y a otro revisor anónimo por los comentarios y correcciones que han mejorado el trabajo. Asimismo, agradecen la bibliografía específica sobre rotura de presas facilitada por Raúl López y los datos sobre densidad de sedimentos proporcionada por Rafael Rodríguez, ambos de la Universitat de Lleida.

Referencias bibliográficas

- Baker, V.R. y Ritter, D.F. (1975). Competence of rivers to transport coarse bedload material. *Bulletin of the Geological Society of America*, 86, 975-978.
- Calvet, J. (1980). *Relaciones entre la evolución geomorfológica cuaternaria de la Depresión Central Catalana (Segarra y el Pla d'Urgell) y del valle del Segre*. Fundación J. March, Madrid, Inédito, 102 pp.
- Costa, J.E. (1984). Physical geomorphology of debris flow. En: *Development and applications of Geomorphology* (J.E. Costa y P.J. Fliescher, eds.). Springer-Verlag, Berlin, 268-317.
- Giménez Salas, J. & De Justo, J.L. (1975): *Geotecnia y cimientos. Propiedades de los suelos y de las rocas*. Madrid, Rueda, 466 pp.
- Jansen, R.B. (1988): *Advanced dam engineering for design, construction and rehabilitation*. New York, Van Nostrand Reinhold, 811 pp.
- Jerez, F. y Gil, C. (1998). *Mapa Geológico de España escala 1:50.000. 2ª Serie, Almacelles (358)*. IGME, Serv. Pub. Mº Industria, Madrid.
- Julien, P.Y. (1998): *Erosion and sedimentation*. Cambridge, Cambridge University Press, 280 pp.
- Sancho Marcén, C. (1991): *Geomorfología de la Cuenca Baja del río Cinca*. Instituto de Estudios Altoaragoneses, Diputación de Huesca, Serie de Investigación Científica, 161 pp. (microfichas) y 14 mapas.
- Singh, V.P. (1996). *Dam Break Modelling Technology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 242 pp.
- Vischer, D.L & Hager, W.H. (1999). *Dam hydraulics*. John Wiley and Sons, Chichester, 316 pp.

Enviado el 19 de mayo de 2001

Aceptado el 15 de octubre de 2001