

La rotura de la balsa de residuos mineros de Aznalcóllar (España) de 1998 y el desastre ecológico consecuente del río Guadiamar: causas, efectos y lecciones

F.J. Ayala-Carcedo[†]

Instituto Geológico y Minero de España. C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid.

[†] fallecido el 29 de Noviembre de 2004

RESUMEN

En 1998, una gran balsa de residuos mineros metálicos con dique perimetral de cierre de escollera se rompió en Aznalcóllar, cerca de Sevilla, al SO de España, produciendo una gran conmoción en la opinión pública debido al potencial impacto ambiental sobre el Parque Nacional de Doñana, un espacio natural protegido clave para la migración de aves entre Europa y África.

El accidente se trata comparativamente con otros que han tenido lugar en el mundo, analizando las causas de la rotura y su dinámica, el vertido y los impactos ecológicos reales, debidos tanto a los residuos como a las aguas ácidas dispersados por los ríos Agrio y Guadiamar. Se presentan también las lecciones que se desprenden para futuros diseños y ubicación de este tipo de depósitos y presas de agua.

El accidente, muy rápido, fue provocado por el fallo por corte-deslizamiento de la formación sobre la que se asentaba, una arcilla margosa miocena sobreconsolidada, conocida como marga azul del Guadalquivir, a través de una junta vertical y una superficie de estratificación planar, como resultado de un proceso de rotura progresiva bajo altas presiones del agua intersticial. La licuación dinámica de los residuos, debida al movimiento vertical súbito del lodo hacia el vacío creado por la rotura inicial, fue un factor clave para incrementar el movimiento del dique, roto por el movimiento, y el vertido de lodos. La doble rotura de diques (externo e interno), produjo un vertido de lodos con flujo sólido y líquido. Se presentan algunos datos sobre la dinámica de este flujo, así como la combinación de factores de susceptibilidad que condujo a la rotura. El problema de los sucesivos fallos humanos que contribuyeron necesariamente a un diseño que ignoró la posibilidad de rotura progresiva de estas formaciones, conocida desde al menos 1964, es también analizado.

El problema del diseño seguro de estos depósitos y de las presas hidráulicas, especialmente sobre rocas blandas o arcillas sobreconsolidadas, se analiza a la luz de la normativa existente y la realidad científica del actual conocimiento del comportamiento de estas formaciones proclives a la rotura progresiva, que plantea dudas significativas sobre la seguridad a largo plazo de numerosas estructuras.

Palabras clave: análisis del riesgo, balsa de lodos, contaminación ecológica, dinámica del vertido, licuación dinámica caída-impacto, rotura del cimient

The Aznalcollar (Spain) tailings pond failure of 1998 and the ecological disaster of Guadiamar river: causes, effects and lessons

ABSTRACT

On 1998 a large tailings pond confined by a rockfill dyke in the Aznalcóllar metallic mine near Sevilla, at the SW of Spain, failed with a big impact on public opinion due to potential environmental impact on Doñana National Park, a key natural space for birds migration between Europe and Africa.

The accident is placed in a comparative way with others in the world, the causes of failure, its dynamics and the spill are analysed and also the actual ecological impacts related to the tailings and acid waters scattered by the Agrio and Guadiamar rivers. The lessons for future design and location of these type of deposits and water dams are also presented.

The accident, very quick, was caused by shear failure of the foundation formation, a miocene overconsolidated marly clay, known as Guadalquivir blue marl, through a vertical joint and a bedding plane, as a result of a progressive failure process under high pore pressure. Dynamic liquefaction of tailings due to sudden vertical movement towards the void created by the initial movement was a key factor to increase the outwards movement of the dyke, broken by the movement, and the tailings spill. The double dyke failure (main dyke and internal one) produced a tailings spill with solid and liquid flow. The dynamics of these flows is presented and also the combination of factors driving to failure. The problem posed by the successive human and institutional failures, a necessary cause driving to no consideration of the possibility of the progressive failure in these formations, known from 1964, is also analysed.

The problem of gafe design of these deposits and water claros, specially on soft rocks and overconsolidated soils, is analysed in the light of official mles and scientific reality of actual knowledge about the behaviour of formations prone to progressive failure, posing significative doubts about long-term safety of these structures.

Key words: ecological pollution, fall-impact dynamic liquefaction, foundation failure, risk assessment, tailings pond, tailings spill

Introducción. El accidente del 25 de abril de 1998

La fuente principal de aprendizaje en Geotecnia es el análisis de roturas, ya que en estos casos el terreno trabaja en su límite y las hipótesis de cálculo pueden confrontarse de forma más clara; otro tanto sucede en el caso de desastres ecológicos o humanos. El accidente de Aznalcóllar de 1998, que fue noticia en todo el mundo por sus implicaciones ecológicas, ha acabado generando un conjunto de estudios dispersos sobre muchas de sus dimensiones, estudios que abren la posibilidad de un análisis conjunto que está por hacer, y ha dejado sin analizar aspectos fundamentales sobre el propio vertido. Por ello, una revisión general y un análisis de estos aspectos no tratados como los que aquí se plantean están justificados.

La explotación minera a cielo abierto del yacimiento de sulfuros complejos de Aznalcóllar, con antecedentes al menos desde Tartessos en el siglo VII a.C., estaba diseñada para una producción de 4,1 Mt/año (Eriksson y Adamek, 2000), lo cual generó residuos que se fueron almacenando desde 1979 en una balsa exenta (Ayala-Carcedo, 1986; Ayala-Carcedo y Rodríguez Ortiz, 1986), cerrada perimetralmente con un dique que ocupa unas 200 ha. La mena se obtenía de dos cortas al Norte de la balsa, la de Aznalcóllar, más antigua y en proceso de relleno con estériles en el momento de la rotura, (25/04/98), y la de Los Frailes, más moderna. El yacimiento tenía unas reservas de 90 Mt, 43 de mineral complejo y 47 de piroclastos cupríferos, con leyes medias del 5,1% de Cu, 8,5% de Pb, 18% de Zn, 4,8 g/t de Au y 370 g/t de Ag, además de otros elementos. Daba empleo directo a 500 personas (Eriksson y Adamek, 2000), hoy en el paro tras el cierre definitivo en 2001 por parte de la compañía Boliden Apirsa a consecuencia de los problemas originados por la rotura y el vertido consecuente.

La balsa, bajo la competencia en sus aspectos mineros de la Junta de Andalucía, está localizada junto al Río Agrío, afluente del Guadiamar; y éste, a su vez, del río Guadalquivir. En buena parte de su borde este se encuentra a menos de 100 m del cauce como puede verse en el plano de la Figura 2, y por tanto en zona de policía de aguas que requiere autorización administrativa de la Administración Hidráulica, según la legislación vigente.

La capacidad final de la balsa era de 33 hm³ y contenía 15 hm³ en el momento de su rotura, habiendo sido diseñada en 1978 y recomprobada en cuanto a su estabilidad para una nueva capacidad, la final citada, que requería un dique perimetral más alto, en 1996.

La balsa está dividida en dos subbalsas, Norte y Sur, por un dique interior con dirección aproximadamente este-oeste que separa la zona de residuos de

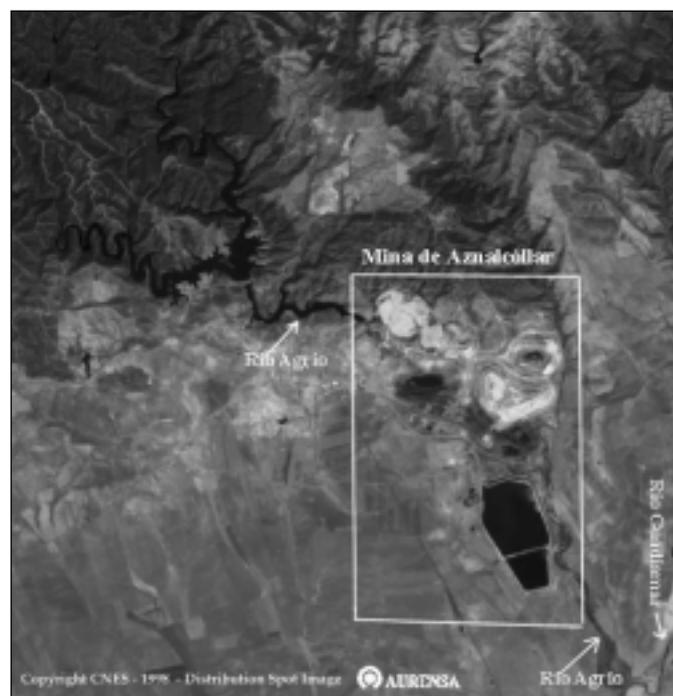


Fig. 1. Vista de la balsa con sus dos sub-balsas, al N la de piroclastos, al S la de piratas, en cuyo borde este se produjo la rotura de las arcillas margosas de la base del dique que desplazaron hacia el río Agrío el dique perimetral externo, abriendo una brecha justo al N de su intersección con el dique interior separador de las dos sub-balsas. Al N de la balsa pueden apreciarse, al O, la antigua corta de Aznalcóllar, en la que se depositaron los lodos tras su retirada y al E, la corta Los Frailes. Los ríos corren de norte a sur (Cortesía de AURENSA)

Fig. 1. View of the pond with its two partial ponds, pyroclastic waste on the N, and pyrite one at S. In the East dyke of the last one the failure of marly clays under the dyke moved it towards the Agrío river opening a breach just in the south of the dyke of the northern pond. See on the North of the pond the old open pit of Aznalcóllar where were deposited the tailings after the cleaning operations, on the East is the Los Frailes open pit. Downstream direction is towards S. (Courtesy of AURENSA)

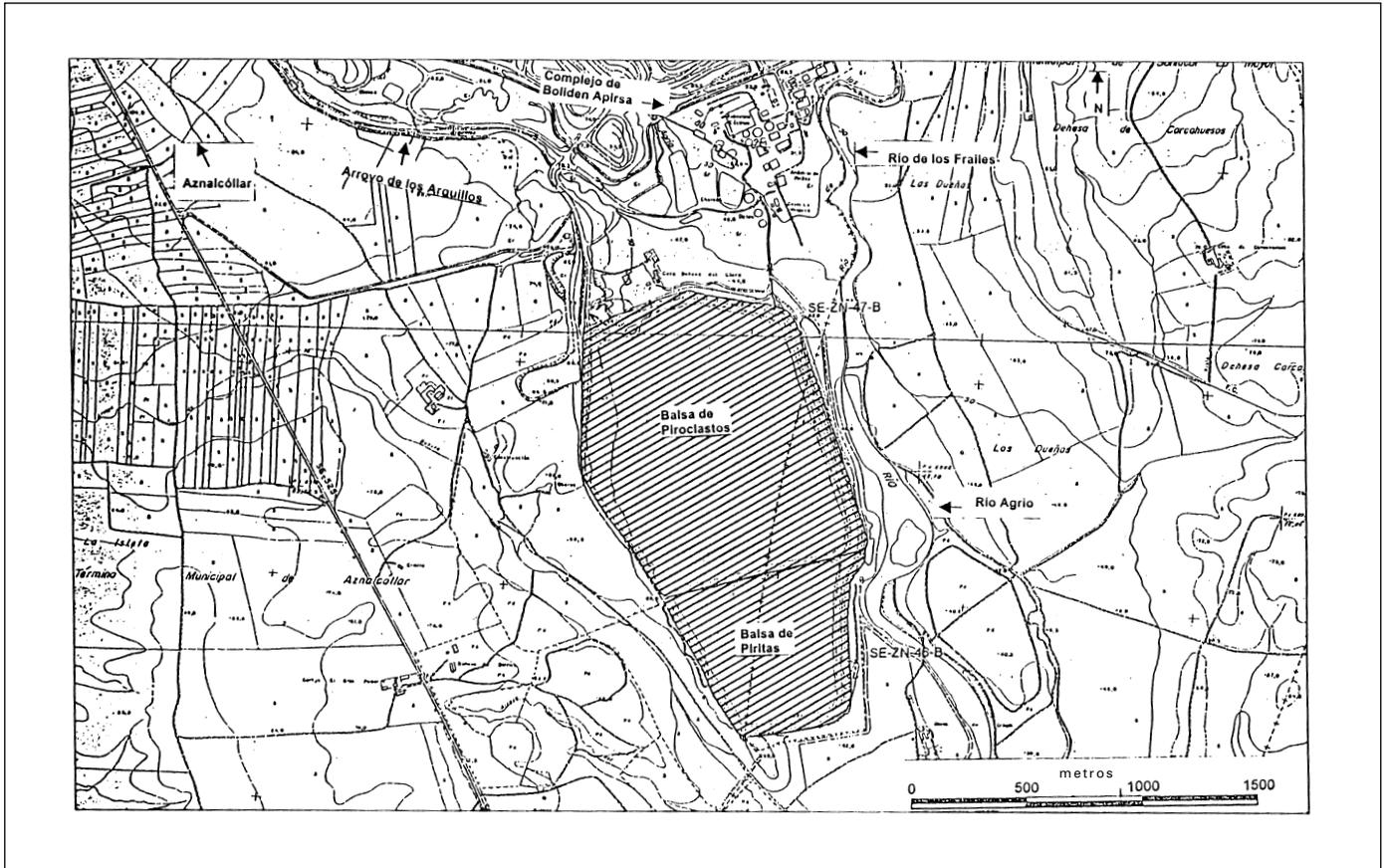


Fig. 2. Plano de la balsa minera de Aznalcóllar. Obsérvese como la distancia a la orilla del río Agrio es menor de 100 m en aproximadamente la mitad de su borde este, quedando por tanto dentro de la acción de policía de la Ley de Aguas de 1985, orientada a la protección ecológica del río (En Gómez de las Heras, 2001)

Fig. 2. Plane of Aznalcollar tailings pond. See how the distance to the river bank is lower than 100 m in around a half of the east edge, being then the tailings pond inside the police zone of the Spanish Water Law of 1985, oriented to the ecological protection of the river (In Gómez de las Heras, 2001)

piroclastos al norte, con unas 150 ha, de la zona de piritas, al sur, de unas 50 ha.

En la madrugada del 25 de abril de 1998, entre las 0:30 y la 1:00 a.m. (Alonso y Gens, 2001 b), se produjo una rotura en el dique perimetral en su borde SE. A consecuencia de la rotura, producida en la zona de la subbalsa de piritas principalmente, y que a la vez, produjo un despegue del espigón divisor de las dos subbalsas que posibilitó la salida de residuos, se produjo un vertido de unos 2 millones de m³ de lodos decantados tras el vertido y unos 4 Mm³ de aguas ácidas (López Pamo *et al.*, 2001; Palancar, 2001). Lodos y aguas ácidas alcanzaron rápidamente el cauce del río Agrio y se desplazaron primero a través de su cauce y después del cauce del Guadiamar. Gracias a la acción de la Junta de Andalucía a requerimiento del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, que construyó un dique el 27 de abril con objeto de proteger el Parque Nacional de Doñana, complementado

después por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir con otro aguas abajo, se consiguió retener una parte de las aguas ácidas (el primer dique fue sobrepasado a las 24 horas) y proteger el Parque Nacional, aunque sí afectó al Preparque de la Junta de Andalucía.

El suceso causó una notable alarma social dada la gran importancia ecológica del Parque de Doñana y llenó páginas y páginas de periódicos, saltando también a la prensa internacional (Elías, 2001) y contribuyendo a un deterioro generalizado de la imagen de la minería a nivel mundial.

Durante los primeros días, las dos Administraciones implicadas, el Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM), competente administrativamente en temas hidrográficos y en el Parque Nacional de Doñana, y la Junta de Andalucía, competente administrativamente en temas mineros y en el Preparque, protagonizaron un desencuentro potenciado probablemente



Fig. 3. Vista de la brecha en el dique por la que se produjo el vertido del lodo en la madrugada del 25 de abril de 1998
 Fig. 3. View of the breach in the dyke where the toxic spill took place in the early morning of 25th April 1998

por estar gobernados por partidos opuestos, que perjudicó el afrontamiento rápido que necesitaba la gravedad de la situación. El MIMAM sostenía que la causa del problema, la rotura de la balsa, no entraba en sus competencias (*vid. p.e.* diario ABC de 12 de junio de 1998), y por tanto, siendo la responsable de este tema la Junta de Andalucía, era a ella a quien le correspondía la responsabilidad. A su vez, la Junta de Andalucía afirmaba también no tener culpa alguna de lo ocurrido “ni por acción ni por omisión” (ABC, 26 de junio de 1998). Sin embargo, la prensa proporcio-

nó la información de que una parte de la balsa, según el estudio geotécnico de recrecimiento de 1996, y tal como se ha expuesto más arriba, se encontraba en “zona de policía” según la Ley de Aguas vigente, es decir, a menos de 100 m de un cauce público, cosa que puede comprobarse fácilmente en la Figura 1. De acuerdo con el Art. 6 del Reglamento entonces vigente, en esa zona la Administración del Agua, en este caso la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, dependiente del MIMAM “condicionará el uso del suelo y las actividades”, para, de acuerdo con el Art. 9 “proteger el dominio público hidráulico”, que de acuerdo con el Art. 2, está constituido por “las aguas continentales, tanto las superficiales como las subterráneas”. Parece, por tanto, que el MIMAM sí tendría alguna competencia en el tema, y es desde luego obvio que el vertido afectó en profundidad al dominio público hidráulico, que, como el accidente demostró cumplidamente, distaba, objetivamente, de estar protegido frente al impacto fundamental: la rotura de la balsa. Según Carranza (2001) la actitud de la Administración Central propició “en gran medida, la percepción magnificada del accidente por parte de la población”. Es obvio, por otra parte, que la Junta de Andalucía, detentadora de la competencia administrativa en minería, tenía también mucho que ver con la rotura, “por acción u omisión”.

Esta situación de tensión, por la propia urgencia que el accidente imponía, y el rechazo de la opinión pública, acabó forzando la cooperación de las dos administraciones implicadas a través de una Comi-

Variable / Parámetro	Valor
• Sección	Raña (zahorra impermeable natural) / filtro / escollera de estériles gruesos de mina (de intradós a extradós). Pantalla impermeabilizante de la terraza bentonita-cemento en pie interno del dique
• Superficie	
a) Total	200 ha
b) Subbalsa N (piroclastos)	150 ha
c) Subbalsa S (piritas)	50 ha
• Volumen de lodos en balsa	
a) Al romperse	15-20 hm ³
b) Final proyectado	32,6 hm ³
• Altura del dique	
a) Al romperse	27 m (media)
• Ancho de coronización del dique	20-30 m
• Taludes del dique (H/V)	
a) Interno	1,9:1
b) Externo	1,2:1

Tabla 1. Datos de la balsa de lodos
 Table 1. Tailings pond data

sión de Coordinación, lo cual, combinado con la constitución de un Comité de Expertos coordinado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas y orientado a la evaluación de daños y su corrección, no al análisis de las causas, favoreció las actuaciones. Estas, han llevado a un nivel de recuperación aceptable el costo de unos 260 millones de euros (237 millones de USD al cambio de 2000), 180 que han adelantado, por el momento, ambas Administraciones, es decir, los contribuyentes, carentes hasta la fecha del menor informe de síntesis sobre la catástrofe que dé razón de las causas y consecuencias y saque las lecciones correspondientes, a la espera de la resolución del juicio donde se dirimirán las responsabilidades civiles.

El accidente ha llevado al cierre de la mina en diciembre de 2001, con la pérdida de un total de unos 2000 empleos directos e indirectos, y al declive tanto de la zona minera como de las vegas del Guadiamar, obligando tras la expropiación de terrenos agrícolas a la reconversión de los agricultores.

Análisis y causas de la rotura

Durante el período 1970-2000, se han roto depósitos de residuos mineros en el mundo a un ritmo mínimo de 1,7 por año (Penman *et al.*, 2001). La rotura de Aznalcóllar, tanto por tamaño del vertido como por el de la balsa, puede clasificarse como se verá entre las grandes roturas.

Aunque en un principio llegó a barajarse la posibilidad de una rotura por erosión del dique a consecuencia de un desbordamiento del agua sobrenadante al lodo por la coronación del dique, era bastante evidente para cualquier geotécnico, tal y como el autor de estas líneas pudo comprobar *in situ* a los dos días de la rotura, que el terreno sobre el que se asentaba el dique perimetral se había roto, extremo que todos los estudios geotécnicos realizados al respecto, en el marco de las diligencias previas a la posible apertura de juicio oral por responsabilidades penales -sobreséidas-, han confirmado. Así lo prueban las siguientes publicaciones: Botín y Ramírez-Oyanguren (1999), realizada a partir del estudio de EPTISA para la concesionaria minera Boliden-APIRSA; Alonso y Gens (2001 a y b), realizada a partir del hecho para la jueza por los peritos judiciales; Estaire *et al.* (2001), realizada a partir del hecho para la Junta de Andalucía por el CEDEX, y Rodríguez Ortiz y Varona (2001), realizada a partir de estudios para GEOCISA, empresa autora del estudio geotécnico para el recrecimiento. Por otra parte, los estudios de estructuras microtectónicas de rotura en el terreno roto bajo el

dique han confirmado la existencia de desplazamientos de corte y cabalgamiento en el frente de salida del movimiento, tal y como eran previsibles para un deslizamiento traslacional por el cimientamiento (Gumiel, 2001; Moya, 2001).

La balsa, cuyo dique alcanzaba los 27 m de altura en el momento de la rotura, se asienta sobre una terraza del río Agrío de unos 4-6 m de potencia media, a la que subyacen unas arcillas margosas del mioceno marino, Tortoniense, las denominadas incorrectamente "margas azules del Guadalquivir", subhorizontales, con buzamientos medios de 3° hacia fuera del dique, 2° transversalmente al mismo (Alonso y Gens, 2001 b); este buzamiento contribuyó al deslizamiento. Estas arcillas sobreconsolidadas, que han sido objeto de un detenido estudio petrográfico por Tsige (1998), con superficies de estratificación con continuidades observadas en campo de hasta 60 m (Moya, 2001), se rompieron por exceder el esfuerzo cortante en la superficie de rotura a su resistencia. En el gráfico de plasticidad de Casagrande se clasifican como MH o CH, tienen una fracción arcillosa $< 2\mu$ del 53% de media, y peso específico unitario natural de 1,9-1,98 t/m³ (Alonso y Gens, 2001 b; Estaire *et al.* 2001).

El lodo piritico (ML), principal protagonista del vertido, tiene un peso específico de los sólidos de 4,3 t/m³ (Estaire *et al.* 2001) y 3,1 de peso específico unitario natural *in situ* (Alonso y Gens, 2001 b).

El proceso de rotura del terreno de cimentación sobre el cual descansaba el dique perimetral correspondió al tipo de "rotura progresiva", característico de las arcillas sobreconsolidadas y de las rocas blandas. Este tipo de proceso había sido analizado en detalle principalmente por Skempton en 1964 y Bjerrum en 1966. La caída de la resistencia de este tipo de terrenos arcillosos a nivel de formación respecto a la deducida de ensayos en laboratorio, que siempre se realizan sobre fragmentos relativamente sanos, se reflejaba bien en un libro publicado en 1970 en la Editorial Dossat de Madrid -"La resistencia al esfuerzo cortante de los suelos"- por los ingenieros de caminos Escario y Justo. En 1975, se organizó en Madrid un Simposio sobre Rocas Blandas en el que se llamó la atención sobre la importancia de las discontinuidades en la resistencia de estos materiales, clave en el caso Aznalcóllar. Los procesos de rotura progresiva en laderas aparecen bien descritos y analizados en un libro clásico de Mecánica de Suelos aparecido en castellano en 1972, el Lambe-Withman. Janbu, en 1973, en un conocido libro sobre diseño de presas de materiales sueltos, habla de la necesidad de contemplar estos procesos en su diseño y Lloret en 1989, describe la fragilidad. Por tanto, este tipo de

Variable / Parámetro	Características
• Tipo	Rotura del terreno de cimentación por deslizamiento a favor de plano de estratificación
• Profundidad bajo rasante	14 m
• Desplazamiento horizontal máximo del cimient-dique	60 m
• Fecha y hora	25 Abril 1998 / 0:30-1:00 a.m.
• Tiempo estimado de rotura	16 s
• Velocidad máxima de traslación dique-terreno	5,5 m/s

Referencias: Alonso y Gens, 2001 a; Botín y Ramírez-Oyanguren, 1999

Tabla 2. Características de la rotura
Table 2. Failure characteristics

proceso era suficientemente conocido tanto en la época de proyecto (1978) como, especialmente, cuando se proyectó el recrecimiento (1996).

El proceso de rotura progresiva está asociado a materiales "frágiles", caracterizados por una caída significativa de la resistencia al corte tras alcanzar el valor máximo, de pico, hasta el valor residual, mínimo. Al descender la resistencia, el esfuerzo soportado aumenta en las zonas no rotas, y más al aumentar la deformación, con lo que éstas se rompen a su vez realimentando el proceso hasta llevar a la rotura generalizada. Al final, cuando se analizan los parámetros resistentes con los que realmente ha funcionado la rotura en su conjunto, se suele constatar que se producen sin cohesión y con fricción intermedia entre los valores de pico y residual. Leonards, en 1962, cuando aún no se conocía en profundidad el proceso, ya recomendó que en este tipo de materiales se prescindiera de la cohesión en los cálculos de estabilidad. El Índice de Fragilidad, que representa el tanto por uno de reducción de la resistencia de pico al caer a la residual, para el nivel de esfuerzos en la superficie de deslizamiento oscilaba entre 0,4 y 0,65 (Alonso y Gens, 2001 b). En la Tabla 3 pueden verse las principales características geotécnicas de los lodos y del terreno arcillo-margoso de cimient.

Un factor que parece haber jugado también un papel importante fue la alta presión intersticial existente en el momento de la rotura en las zonas de rotura (Botín y Ramírez-Oyanguren, 1999; Alonso y Gens, 2001 b; Estaire *et al.* 2001). Los valores del ratio de presión intersticial en la banda de rotura -relación entre la presión intersticial del agua y la presión total- han sido estimados tras medidas piezométricas entre 0,50 y 0,65 (Estaire *et al.*, 2001). Las causas de estas altas presiones en el agua intersticial, que al disminuir el esfuerzo efectivo en la zona rota disminuirían su resistencia por fricción, han debido estar por una

parte en la poca permeabilidad de los lodos y las arcillas margosas. Esta permeabilidad fue evaluada experimentalmente con medidas *in situ* realizadas con un camión especialmente diseñado en $3,25 \times 10^{-6}$ cm/s a nivel de formación de media (Grima, 2001) frente a $2-7 \times 10^{-9}$ cm/s a nivel de probeta, deducida del ensayo edométrico (Alonso y Gens, 2001 a) o $1,4 \times 10^{-9}$ cm/s (Heras *et al.*, 2001), lo que implica que la permeabilidad *in situ* es unas 1000 veces mayor que la determinada en laboratorio, cosa esperable en macizos fracturados donde siempre deben diferenciarse los valores en la matriz y en la formación, cuestionando aspectos importantes de la modelización de Alonso y Gens (2001 a y b) y Heras *et al.* (2001) en que inter venga este parámetro, y algo menos la de Botín y Ramírez-Oyanguren (1999), que indican que los coeficientes de consolidación *in situ* deben ser unas 10 veces mayores que los de laboratorio, algo esperable por la permeabilidad asociada a juntas y superficies de estratificación que las pequeñas muestras edométricas, tan solo representativas de la matriz, no pueden recoger.

Otra de las razones de la alta presión intersticial ha debido ser la pantalla bentonita-cemento construida en el pie interior del dique para evitar filtraciones ácidas al Agrío a través de la terraza infrayacente. Parece obvio que el drenaje subterráneo, lógicamente inviable al tratarse de aguas ácidas que hubieran contaminado el río, hubiera aliviado las presiones intersticiales y aumentado la estabilidad de la estructura. En este sentido, las afirmaciones que se hicieron repetidamente durante la crisis post-rotura de que el hecho de haberse producido filtraciones ecológicamente nocivas antes de la rotura contribuyeron a la misma, es sencillamente falso, ya que en realidad, al reducir presiones intersticiales, contribuyeron a retrasarla.

La rotura, con gran probabilidad, se produjo a tra-

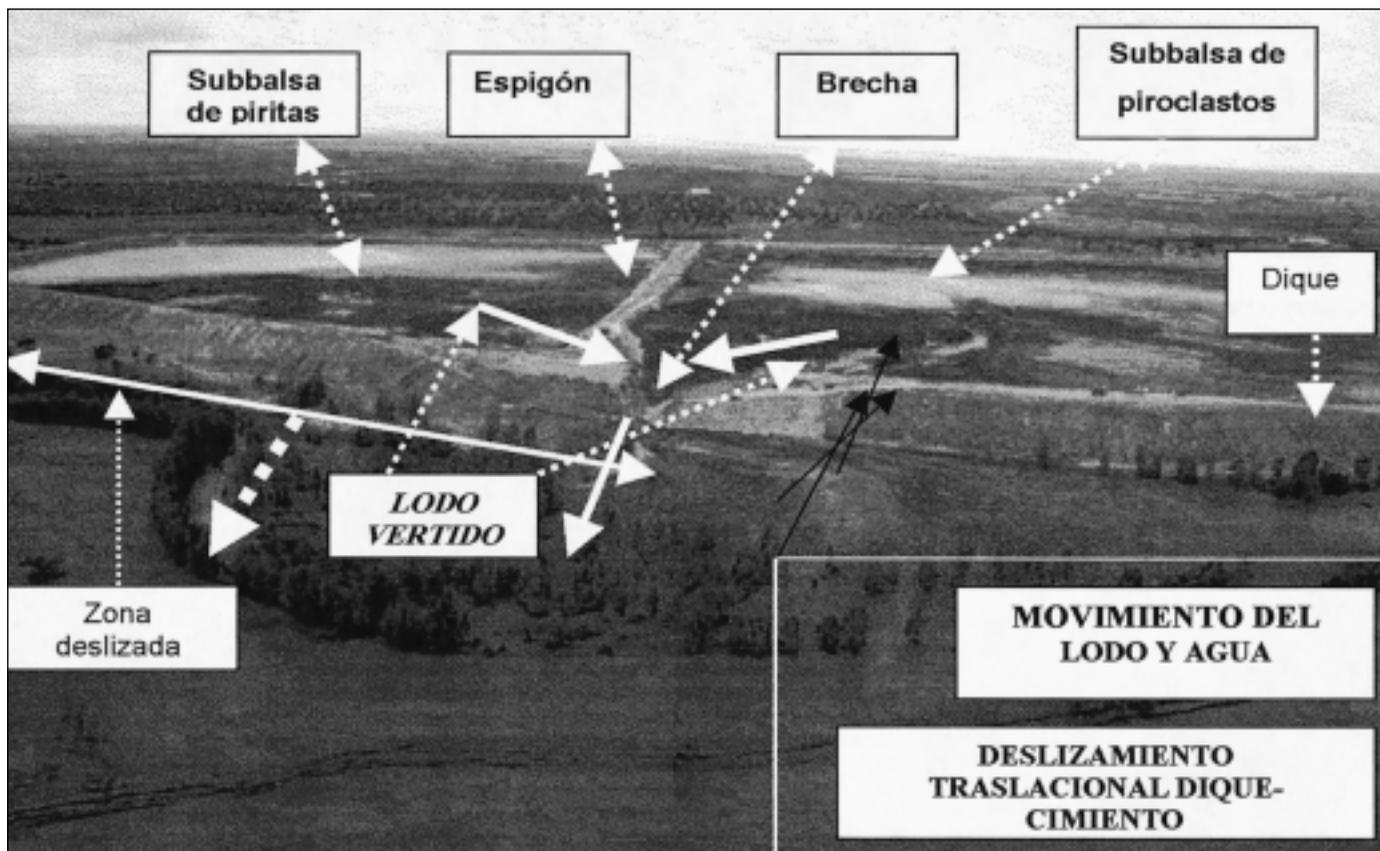


Fig. 4. Otra vista de la balsa desde el río Agrio. Puede apreciarse la brecha en el dique perimetral de 27 m de altura, así como el espigón interno que separa los lodos piroclásticos, a la derecha, de los piríticos, a la izquierda. La zona desplazada del dique por el deslizamiento sobre una superficie de estratificación de las arcillas margosas infrayacentes es la de la izquierda, correspondiente al borde SE de la balsa. El desplazamiento del dique en la parte izquierda fue el que produjo la brecha, que puede apreciarse está parcialmente rellenada

Fig. 4. Other view of the tailings pond from the Agrio river. See the breach in the main dyke 27 m height and the internal dyke between the two ponds, the pyroclastic one on the right and the pyritic one on the left. The zone affected by the traslational movement on a bedding plane is on the left, the SE edge of the pond. This movement produced the breach, partly filled in the picture

vés de una superficie mixta compuesta por una de las juntas subverticales y la de estratificación de las arcillas azules -con continuidades mayores de 30 m y medidas hasta 60 m y espesor medio de las capas de 2,3 m, con bandas de unos 0,5 m con espaciado mucho menor, de 5-15 mm (Moya, 2001)-, produciéndose también a lo largo de partes de la matriz arcillo-margosa, los "puentes de roca", al sobrecargarse con esfuerzos cortantes dada la falta de resistencia de la superficie de estratificación, con resistencia muy próxima a la residual, ya que como constató Gumiel (2001), que ha caracterizado la distribución fractal del espaciado, hay estrías de movimientos de corte en la estratificación fuera de la zona rota. La profundidad de la rotura bajo el dique, en su tramo horizontal, estuvo en unos 14 m, cercana a la profundidad máxima de meteorización de las arcillas margosas, meteorización favorecida por las dos familias de juntas subverticales (Gumiel, 2001); la longitud de la

zona rota fue de unos 600-700 m (Botín y Ramírez-Oyanguren, 1999; Alonso y Gens, 2001 a). Los modelos de elementos finitos revelan en todo caso claras concentraciones de tensiones en una banda subhorizontal bajo el dique (Estaire *et al.* 2001). La resistencia media final realmente movilizada en la superficie de rotura de acuerdo con cálculos de equilibrio límite estuvo entre $\text{tg } 17^\circ$ y $\text{tg } 19^\circ$ (Alonso y Gens, a; Perucho *et al.*, 2001). Esto implica-habida cuenta de que el ϕ' de pico era de unos 25° , que respecto a la resistencia por fricción, solo se movilizó realmente el 70%. Esto implica que, respecto a la fricción, un Factor de Seguridad de 1,43 hubiera debido cubrir el problema; dado que este valor está muy próximo a los que suelen considerarse en los proyectos de este tipo, parece desprenderse que el problema debió venir fundamentalmente de considerar la existencia de una cohesión (en contra de la recomendación de Leonards de 1962).

Parámetro / Variable	Arcilla margosa (Terreno de cemento)	Residuo	
		Pirita	Piroclasto
A) Propiedades Índice			
• USCS	MH / CH	ML	SP / ML
• LL (%)	65,3		
• IP (%)	21,8		
• % CO ₂ Ca	21,8		
• w (%)	32,3	saturado	
• γ (kNw/m ²)	1,9-1,98	3,1	2-3,1
• G (kNw/m ²)	2,71-2,74	4,3	
• e		0,5-0,8	0,4-1,05
B) Propiedades mecánicas e hidráulicas			
• Resistencia de pico (c': kPa)	c': 31-61 ϕ' : 25°	c': 17 ϕ' : 41°	Valores similares a los de las piritas
• Resistencia residual (c': kPa)	c': 0 ϕ' : 11-12°	c': 0 ϕ' : 41°	
• Resistencia media movilizada	c': 0 ϕ' : 17-19°		
• c _u (kPa)	(c _u)l: 100-225	(c _u)l: 100-200 / (c _u)s: 131-162	
• Índice de fragilidad	0,4-0,65		
• k (cm/s)	(k)l: 2-7x10 ⁻⁹ / (k)s: 3,25x10 ⁻⁶	(k)l: 10 ⁻⁶ -10 ⁻⁷	
• r _u	0,50-0,65		
• u _{SR}	5,5-7,3 kg/cm ²		
Significado: USCS: Clasificación Unificada del Suelo / LL: Límite Líquido / IP: Índice de Plasticidad / w: Humedad Natural / γ : Peso Específico Natural / G: Peso Específico de Sólidos / e: Índice de Huecos / c _u : Cohesión no drenada / K: Permeabilidad / ()l: en laboratorio / ()s: in situ / r _u : Ratio de Presión Intersticial en rotura (u/σ _v) / u _{SR} : Presión Intersticial en la superficie de rotura			
Referencias: Alonso y Gens, 2001 b; Estaire <i>et al.</i> , 2001; Perucho <i>et al.</i> , 2001; Botín y Ramírez-Oyanguren, 1999; Grima, 2001; Datos propios			

Tabla 3. Propiedades geotécnicas
Table 3. Geotechnical properties

Rodríguez Ortiz y Varona (2001) cuestionan la rotura a favor de una superficie de estratificación a partir de una modelización con el programa FLAC y un trabajo de Bjerrum de 1967 en el que se apunta la importancia de las tensiones horizontales residuales derivadas de procesos erosivos en un caso en arcillas homogéneas con rotura plana. En todo caso las arcillas presentes no eran homogéneas mecánicamente por la presencia de juntas y superficies de estratificación y parece muy difícil que las superficies de estratificación, presentes, no hayan jugado un papel sustancial.

La rotura se produjo en la zona del dique correspondiente a la sub-balsa de lodos piríticos, con pesos específicos unitarios mayores que los de los piroclastos (Ver Tabla 2), lo cual era previsible en formaciones como las arcillas azules, al inducir tensiones cortantes mayores que los piroclastos. Cinemáticamente, el desplazamiento máximo del sistema dique-cimiento fue de 50-60 m (Botín y Ramírez-Oyanguren, 1999; Alonso y Gens, 2001 a) y la velocidad máxima de 20 km/h, alcanzada en unos 8 s, durando el desplazamiento unos 16 s (Alonso y Gens, 2001 b). La rotura se produjo en una zona próxima al borde de

ataque a las arcillas azules de un meandro del río Agrío, lo cual, posiblemente, posibilitó una mayor decompresión de la formación en esta zona, lo que iría en el sentido de lo apuntado por Bjerrum en 1967 y también de lo apuntado en Rodríguez Ortiz y Varona (2001), aun cuando, en mi opinión, solo se trataría de un factor coadyuvante pero no esencial.

La rotura progresiva, tal y como se ha deducido de la modelización con elementos finitos, probablemente comenzó en el pie del espaldón aguas abajo hacia 1985, cuando el dique tenía 17-18 m, y en el pie del espaldón en contacto con el lodo, con altas presiones intersticiales (Alonso y Gens, 2001 a). A medida que el recrecimiento del dique iba progresando hacia el río, la rotura progresiva iría avanzando hacia el nuevo pie; la zona que falló al final, debió ser por tanto la correspondiente a la zona central del dique con la altura antes citada.

No se ha otorgado ningún papel en los principales estudios citados al posible ataque de las aguas ácidas (dada la baja permeabilidad observada en las probetas en laboratorio), ataque a la fracción calcárea de las arcillas margosas, alrededor de un 20%, con baja densidad de la fracción por la abundancia de micro-

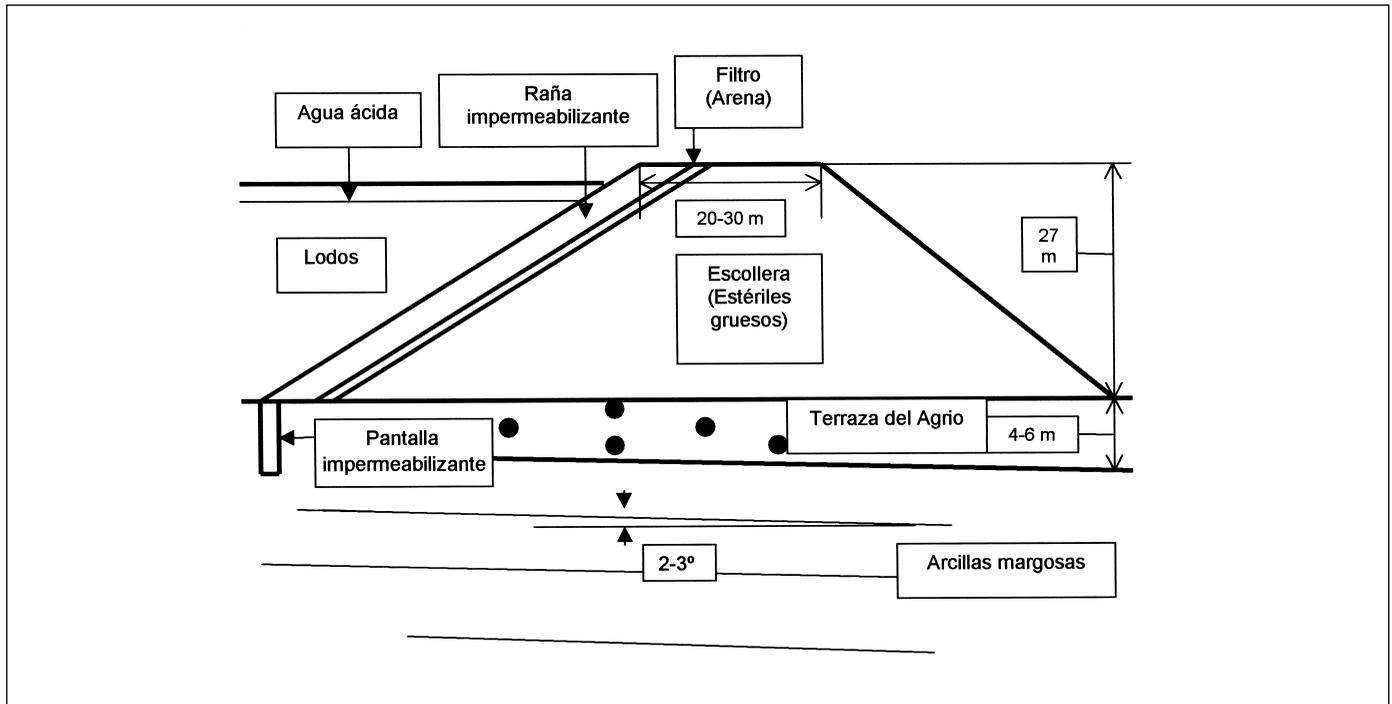


Fig. 5. Sección de la balsa de lodos
 Fig. 5. Cross-section of the tailings pond

fósiles marinos (Tsige, 1998), en la degradación de la resistencia al corte de las arcillas margosas; solamente Berga (1998) hizo una sugerencia pública al respecto. No obstante, dada la mayor permeabilidad en campo debida justamente a la presencia de juntas y estratificación, unas 1000 veces mayor como se dijo que la de laboratorio deducida de pequeñas muestras en ensayos edométricos, este aspecto debería ser reevaluado, ya que con bastante probabilidad ha debido jugar un papel tanto en la formación o extensión de la parte verticalizada de la superficie de rotura en el interior de la balsa como de una parte de la zona de rotura horizontal por corte. El hecho señalado por Golder Associates, en el diario *El Mundo* del 25 de mayo de 1998, de que previamente a la rotura había filtraciones de aguas ácidas hacia fuera del dique, en los aluviones fósiles de la terraza del Agrio sobre el que se asentaba la balsa, por valor de 10 m³/h, filtraciones que sin duda saturarían la arcilla margosa, no hace sino fortalecer esta hipótesis. Aunque la transformación de calcita en yeso se cumple con un aumento de volumen por la menor densidad de éste, la gran porosidad de esta fracción debida a los microfósiles, posibilita volumétricamente la transformación, aunque sea parcialmente. El hecho de que en el lodo aparezca yeso (López Pamo *et al.*, 2001) a diferencia de lo que sucede en las arcillas azu-

les y la facilidad para la circulación vertical dada por las juntas subverticales, podrían avalar esta hipótesis, que actuaría sinérgicamente con el proceso clásico, mecánico, de rotura progresiva.

La dinámica de la rotura fue potenciada por la licuación del lodo, claramente visible e informada por mí a los pocos días de la rotura, licuación que produjo la formación de los característicos volcanes de lodo (Figura 7), ya que el coeficiente de empuje del lodo (σ_v/σ_v'), súbitamente aumentó del valor en reposo ($K_0 = 0,5$) al valor correspondiente a un fluido ($K = 1$). Esta licuación, no alcanzó, afortunadamente, a todo el lodo, sino solo al más cercano al dique roto, con forma aproximada de cuña de sección triangular, lo que abona la propuesta de Alonso y Gens (2001 a) de que la licuación fue producida por el brusco descenso del lodo en el hueco creado por el desplazamiento inicial al romperse el terreno, desplazamiento conjunto dique-terreno que el aumento del empuje sobre el dique producido por la licuación, debió acelerar. Otro factor desencadenante de la licuación, pudo estar en la propia disipación de una parte de la energía de rozamiento a lo largo de la superficie de deslizamiento subhorizontal en forma de ondas mecánicas, de forma similar a lo que sucede en las fallas sísmogénicas. Cuando comenzó a producirse el movimiento traslacional cimiento-dique, la creación de un vacío

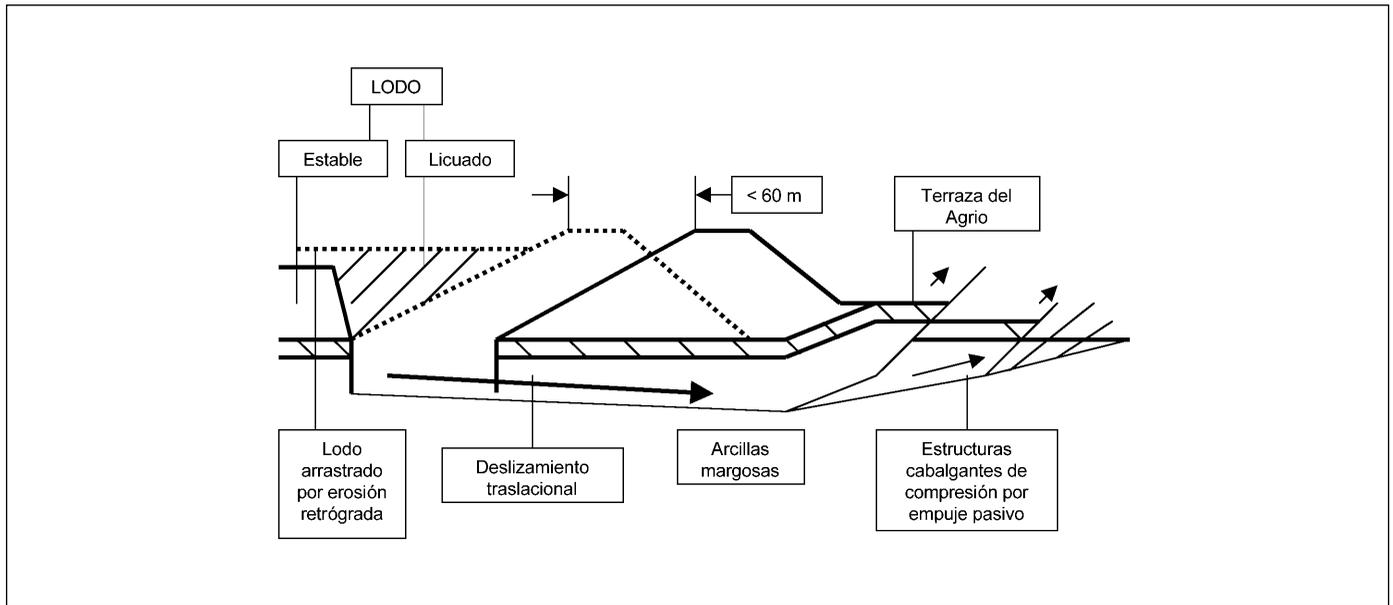


Fig. 6. Esquema de la rotura mediante un deslizamiento traslacional dique-cimiento por las arcillas margosas. Obsérvese el hueco creado en la arcilla margosa por el movimiento, que posibilitó la licuación dinámica del lodo de la cuña por caída-choque, y la estabilidad de los residuos más allá de la zona licuada

Fig. 6. Sketch of the failure through a traslational landslide foundation-dyke in the marly clays. See the hollow created in the marly clay by the movement, the cause of the fall-impact dynamic liquefaction of the wedge tailings, and the stability of tailings beyond the liquefied zone

bajo el lodo debió producir inicialmente una onda de succión hacia arriba, que al chocar el lodo acelerado en su caída semilibre con el fondo del hueco, se transformaría en lo contrario, una onda de presión magnificada respecto al propio peso por la transformación de la energía cinética en una compresión dinámica del lodo que debido a la baja permeabilidad del mismo sería absorbida fundamentalmente por el agua intersticial que licuaría el lodo con la mayor parte de su cohesión perdida en el propio proceso de caída y choque. La existencia de volcanes de lodo en superficie del lodo residual tras el vertido, parece indicar que toda la cuña de lodo que se precipitó en el hueco se licuó.

Los procesos de licuación tienen siempre un mismo mecanismo fundamental: la anulación de la presión efectiva o intergranular -la que proporciona resistencia al corte-, debido al aumento de la presión en el agua intersticial. Este hecho anula la resistencia por fricción y, en terrenos sin cohesión como las arenas o limos arenosos, produce la pérdida de la resistencia al corte y transforma el suelo o el material suelto en un líquido. El fenómeno requiere una densidad que haga que el índice de huecos sea mayor de un valor umbral, el índice de huecos crítico, lo que hace que los procesos de corte se produzcan con disminución del volumen y, por tanto, produzcan una

transferencia de los esfuerzos al agua intersticial (*vid. p.e. Ayala-Carcedo, 2002 para una introducción al tema.*)

El tipo de licuación de Aznalcóllar, dinámica, que yo conozca no descrita en la literatura por lo singular del proceso que tuvo lugar en la rotura de esta balsa, y con una dinámica claramente diferente de la que se produce a consecuencia de terremotos o fenómenos vibratorios diversos, que habitualmente necesitan un número significativo de ciclos vibratorios frente al carácter súbito del que se describe (Seed y Lee, 1966), puede ser caracterizada como licuación dinámica por caída e impacto (de la cuña licuada sobre el hueco) y es probable sea característica de roturas traslacionales y quizá también curvas por la base, en balsas y presas de residuos y, posiblemente, en contenciones como muros o similares o en deslizamientos planares-traslacionales o extensiones laterales (*vid. Ayala-Carcedo, 2002 d, para identificación*). Siendo consecuencia de la rotura, contribuye a magnificar el desplazamiento. Este proceso es diferente tanto en su génesis como en el agente productor de la sacudida, el propio lodo en su caída, así como en el progreso de la licuación, desde el punto más bajo, de las licuaciones dinámicas debidas a voladuras o procesos de golpeo sobre el terreno o pilotes. La licuación, aporta un empuje suplementario -al pasar de la condición

$K_0 = 0,5$ a $K = 1$ - que amplifica notablemente los desplazamientos, posibilitando en el caso de Aznalcóllar la apertura de una brecha en el dique, que sin esa amplificación no se hubiera producido, evitando el desastre ecológico. Una conclusión similar a la que se derivó de la investigación pluridisciplinar de la rotura de la balsa de Merriespruit en Sudáfrica en 1994, que acabó con responsabilidades penales al producir 17 muertos: "La licuación estática (...) puede haber contribuido a la extensión y la movilidad de los lodos vertidos" (Wagener *et al.*, 1998). En el caso Aznalcóllar, de acuerdo con Alonso y Gens (2001 a), el empuje inicial de los lodos sobre el dique, teniendo en cuenta la profundidad del hueco abierto, pasó de 1.403 t/m a 2605 t/m, un aumento de casi el 86%. Por otra parte, las aceleraciones, no muy alejadas del valor de la gravedad, son sustancialmente mayores que las sísmicas y por tanto las energías por unidad de masa, verticales, no horizontales. En el caso de Aznalcóllar, la forma de cuña de sección triangular al caer e impactar contra la arcilla margosa descubierta por la rotura traslacional, debió producir una fuerte concentración de presión en su base.

Según Botín y Ramírez-Oyanguren (1999), hacia 1985, antes del recrecimiento de 1996, la formación estaba ya al borde de la rotura, aspecto que confirman también los peritos judiciales (Alonso y Gens, 2001 a). Resulta obvio que la precaria estabilidad de partida que se encontró el recrecimiento agravaba los problemas derivados de un estudio geotécnico de GEOCISA para el recrecimiento que no impidió la rotura al no tener en cuenta la rotura progresiva.

La rotura del cimientado produjo un movimiento hacia fuera del dique en su borde sureste a lo largo de unos 650 m que posibilitó, gracias al empuje suplementario aportado por la licuación del lodo, la apertura de una brecha en el dique este de la subbalsa de piroclastos, inicialmente de unos 14 m de ancho, por la que se precipitaron el agua sobrenadante y los lodos, tanto de esta subbalsa como, especialmente, de la de lodos piríticos, ya que el propio movimiento hacia fuera del dique, arrastrado por el cimientado deslizante, abrió también una brecha en el espigón separador de las subbalsas por tracción, tal y como puede verse en la Figura 8. Como han señalado correctamente Alonso y Gens (2001 b), un mero movimiento de corte en la junta que delimitó el movimiento en el norte hubiera mantenido en contacto los labios de la rotura en el dique y no se hubiera producido la brecha y, por tanto, el vertido que generó la catástrofe ecológica. La rotura hasta la arcilla margosa por la brecha, posibilitó que parte de ella fuera erosionada por la corriente de lodo licuado.

Una pregunta pertinente es en qué medida era

previsible que la rotura se produjera por dónde se produjo y con la magnitud que se produjo. El factor favorable a que la rotura del cimientado se produjera por el borde E de la balsa era la existencia de un buzamiento de 2°-3° que facilitaba el deslizamiento traslacional. Los factores favorables a que, en concreto, fuera la zona SE la que se rompiera, eran dos: la mayor densidad de los lodos piríticos situados en la sub-balsa sur y la existencia de un borde de ataque en el meandro del Agrio que favorecía la decompresión. Así que el dónde era en buena medida previsible. No sucede lo mismo con el cuánto. ¿Por qué no fue más pequeño, o más grande, el deslizamiento traslacional? La pregunta carece de elementos suficientes para ser contestada. Quizá la junta vertical del borde norte del deslizamiento favoreció con una gran continuidad el hecho; quizá en la zona rota eran más continuas las superficies de estratificación.

Una consecuencia que se deduce de los diversos estudios realizados, y muy especialmente de los de Alonso y Gens (2001 a y b), es que los métodos de equilibrio límite para análisis de estabilidad, reproducen adecuadamente la realidad observada, tanto en sus aspectos estáticos como dinámicos, permitiendo ver el nivel de reducción de la resistencia al corte inducido por la rotura progresiva y la consideración de la anisotropía geotécnica de origen estructural introducida por las superficies de estratificación.

De los 221 casos de incidentes en depósitos de residuos activos y abandonados recogidos en Penman *et al.* (2001), tan solo 24, el 10,9%, han tenido como causa un fallo del terreno de cimentación, cuarta causa tras los deslizamientos del talud, terremotos y desbordamientos. El 33,3% de estos fallos, lo han sido en depósitos con dique construido especialmente para retención de lodos y agua, correspondiendo también a esta tipología los dos mayores vertidos conocidos, correspondientes a Sipelay (8/11/1982) y Padcal (1/1992), ambos en Filipinas, lo que sugiere que este tipo de fallos son especialmente graves a nivel de daños ecológicos. La altura media de los diques de estos depósitos fue de 19,66 m, con un coeficiente de variación muestral de 0,92.

Por todo lo que se ha ido sabiendo, es obvio que la posibilidad de una rotura progresiva de las arcillas azules, lo cual hubiera conllevado la utilización de parámetros de resistencia al corte residuales o cercanos a ellos, no fue considerada ni en el estudio geotécnico de 1978 ni en el del recrecimiento de 1996, encargados por las empresas mineras concesionarias a consultoras externas. Tampoco pudo ser considerada en los estudios de estabilidad la hipótesis de rotura a través de planos de estratificación de la arcilla



Fig. 7. La licuación del lodo debida a la propia rotura produjo, en la subbalsa de pirritas, los característicos volcanes de lodo. Obsérvese la pared vertical de los lodos no licuados

Fig. 7. The tailings liquefaction induced by the failure produced the typical mud volcanoes. See the vertical slope of no liquefied tailings

azul, ya que ello hubiera conllevado la utilización de parámetros residuales o cercanos a ellos que hubieran impedido la rotura.

La jueza de instrucción encargada de las diligencias previas en la causa por presuntas responsabilidades penales, imputó a veinticinco profesionales, 7 de Boliden, 14 de GEOCISA, 2 de la Junta de Andalucía, 1 del IGME y el autor del primer estudio geotécnico. Tras el informe pericial y ante la evidencia del desconocimiento por parte de los imputados de la posibilidad de una rotura progresiva, lo cual implicaba la ausencia de voluntariedad en la comisión de actos técnicos o administrativos necesarios para la rotura y el vertido, la jueza decidió el archivo en 2000 del sumario ante la ausencia de responsabilidades penales. Actualmente, se encuentra en marcha el proceso por presuntas responsabilidades civiles, especialmente económicas, que resarzan a las arcas públicas de los cuantiosos gastos pagados por los contribuyentes.

Obviamente, la causa física del vertido fue la rotura del dique de contención de los lodos, y la de éste, la rotura de las arcillas margosas bajo el mismo. Ahora bien, parece evidente que la causa última, social, la "causa de la causa" de la rotura de las mismas fue la no consideración, tanto en el proyecto como en su recrecimiento, de la hipótesis de rotura progresiva, fenómeno conocido en aquellos momentos, ni de la anisotropía estructural y resistente del terreno de cimiento debida a juntas y estratificación, lo cual conllevó la sobreestimación de la resistencia de la formación a esfuerzos cortantes. Estos fallos

humanos sucesivos de los proyectistas geotécnicos no serían advertidos en el proceso de aprobación o evaluación técnica de la idoneidad de los proyectos; el autor ignora el papel de la Administración Hidráulica -por omisión o acción- en la aprobación de la balsa, preceptivo según la legislación vigente, ya que en toda la documentación periodística o parlamentaria generada por la catástrofe, no figura por parte alguna en lo relativo a lo contemplado en el Reglamento de Aguas desde el punto de vista de la posible amenaza que una rotura de la balsa podía significar para la protección del dominio público hidráulico, que experimentó por la rotura la mayor catástrofe. En definitiva, la causa última y necesaria de este desastre, tecnológico que no natural, técnicamente predecible y previsible ("previsible y evitable" según el Colegio de Geólogos) con el nivel de conocimiento existente en las fechas en que proyectos y dictámenes fueron realizados (en contra de lo afirmado desde el CEDEX a la prensa el 30/12/99), debe ser caracterizada como fallo humano involuntario por desconocimiento, fallo reiterado de proyecto, ya que el terreno, sometido a esfuerzos superiores a los que podía resistir no hizo sino lo único que podía hacer, rom-

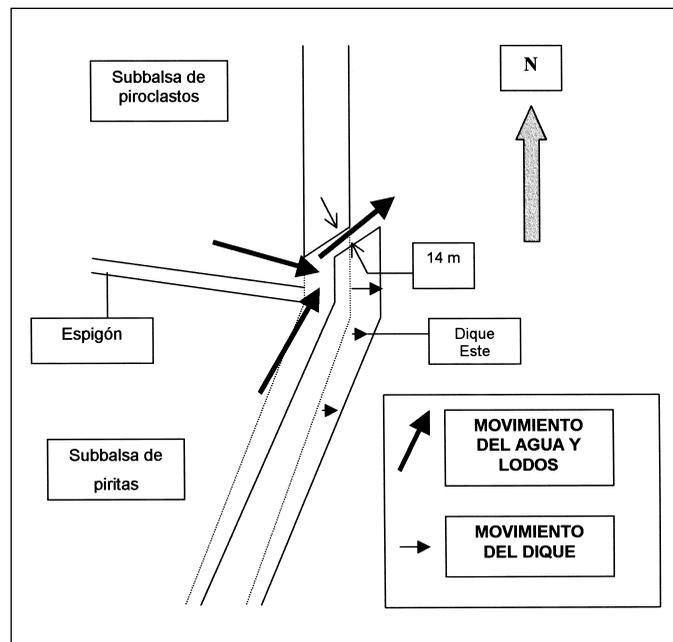


Fig. 8. La rotura produjo la apertura de dos vías de flujo para el agua y el lodo licuado, sin las cuales no se hubiera producido el vertido: una entre el espigón y el dique y otra, una brecha, en el dique perimetral

Fig. 8. The failure produced two ways for the water and the liquefied tailings flow, necessary for the spilt: the first one between the internal and the main dyke, the second one a breach in the main dyke

perse, y fallo múltiple en la evaluación de su idoneidad tanto en la empresa como en las diversas administraciones administrativamente competentes -por comisión u omisión- que informaron o debieron informar en los procedimientos administrativos de aprobación (Ayala-Carcedo, 2002). Los fallos de diseño tanto en el proyecto original como en el recrecimiento fueron ambos condición necesaria pero no suficiente, constituyendo los fallos de la empresa minera y las administraciones encargadas del control de idoneidad -las poseedoras de competencias administrativas- la condición suficiente.

El vertido

Así como el proceso de rotura ha sido objeto de análisis minuciosos al ser clave en la delimitación judicial de responsabilidades, el de vertido y flujo por la red fluvial ha recibido comparativamente poca atención.

Como antes se ha expuesto, por la brecha que abrió el deslizamiento por el terreno de base del dique de contención de lodos, se precipitaron agua ácida y lodo. López Pamo *et al.* (2001) estiman unos 2 Millones de m³ de lodo, cifra que corresponde al volumen determinado por el IGME mediante medidas en campo del lodo decantado, y unos 4 Mm³ de aguas ácidas que acabarían confinadas en parte por dos diques en la zona de Entremuros. Debe hacerse notar que las densidades del lodo -cifra inexistente en ninguno de los trabajos publicados- en las zonas donde

se depositó por decantación tras el vertido, fundamentalmente las zonas inundables y los cauces, debido a su limitado espesor, que no aportó presión de consolidación, son significativamente menores que las densidades en la balsa, por lo que la cuantificación del volumen vertido medido en balsa y en las zonas contaminadas debe diferir.

De hecho, el cálculo del volumen de la cuña de sección triangular licuada de la Figura 6, correspondiente sobre todo a la subbalsa de piratas, con 650 m de longitud, base de la sección de 43,7 m y altura del lodo de 23 m, arroja 0,327 Mm³, muy inferior a los 2 Mm³ dados por López Pamo *et al.* (2001), representando en toneladas, con densidad de 3,1 t/m³, 1,01 Mt. Citando a la Junta de Andalucía, Gallart *et al.* (1999) dan 0,88 Mm³ y 2,97 Mt; la diferencia con el volumen de la cuña estriba probablemente en los lodos poco consolidados de la parte superior de las sub-balsas que fueron arrastrados por el flujo de agua; esta es la cifra que nos parece más razonable. No obstante, de esos 0,327 Mm³, solo pudieron salir por la brecha los lodos situados por encima de la cota del terreno, quedando en la balsa, en el hueco producido por el desplazamiento (ver Figura 6), supuesto un desplazamiento medio de 25 m, unos 0,227 Mm³, saliendo por tanto por la brecha solo unos 0,1 Mm³. Esto indicaría que solo el 11% del lodo vertido lo fue por licuación, siendo movilizado el 89% restante por arrastre erosivo retrógrado del lodo superior subconsolidado debido al flujo del agua sobrenadante. El proceso de erosión remontante o retrógrada de los lodos subconsolidados de la parte superior de la masa, quizá en algún caso deslizamientos, fue debido con gran probabilidad al hecho de que la rotura produjo una caída de lodo en el hueco creado por el movimiento traslacional cimientodique, generando este hueco una caída brusca del agua sobrenadante en forma de cascada a lo largo de unos 650 m, lo que desató procesos de erosión retrógrada que afectaron preferentemente a los lodos subconsolidados. Este proceso generó pequeñas cuencas similares a las que se observan en zonas marismales con acción mareal durante la marea baja a consecuencia de las corrientes de marea. Por tanto, el arrastre de estos lodos con la magnitud habida tuvo directamente que ver con el tipo de rotura, que creó un gradiente de gran extensión longitudinal en ambas sub-balsas, que hizo posible el proceso con la magnitud observada. Dermott y Sibley (2000) dan un volumen de lodo de 1,3 hm³ y 5,5 hm³ de agua ácida.

Solo ha habido 7 casos entre los 221 recopilados por Penman *et al.* (2001) con mayor volumen de lodo vertido: El Cobre, en Chile (28/03/65) con 1,9 Mm³;



Fig. 9. El deslizamiento traslacional del conjunto dique-cimiento produjo, en la zona de salida fuera de la balsa, la característica elevación del terreno debida al empuje pasivo que puede verse en esta fotografía

Fig. 9. The traslational landslide of the whole dyke-foundation produced, in the leaving zone outside of the pond, the typical ground elevation by passive thrust that may be seen in this picture

Cities Service, en Florida (3/12/71) con 9 Mm³; Bafokeng, en Sudáfrica (11/11/74) con 3 Mm³; Sipelay, en Filipinas (8/11/1982) con 27 Mt; Padcal, también en Filipinas (1/1992) con 80 Mt; Omai, en Guyana (19/08/95) con 4,2 Mm³ e Inez, en EE.UU. (11/10/2000) con 0,95 Mm³. En los dos casos filipinos, fue también la cimentación lo que falló, produciéndose la rotura en el caso de Sipelay por deslizamiento del dique sobre materiales arcillosos, tal y como ha sucedido en Aznalcóllar. Por tanto, el vertido de Aznalcóllar, con 0,88 Mm³, en cuanto al volumen de lodos, ha sido el mayor registrado de la historia minera en Europa en al menos los últimos treinta años. Sin embargo, no ha sido el que mayor alcance de los lodos ha registrado a igual volumen.

En términos probabilísticos, la probabilidad de vertido de lodos, P_V, puede expresarse así:

$$P_V = P_R \cdot P_{L+A/R}$$

P_R: probabilidad de rotura y formación de brecha en la contención del depósito (función de la licuabilidad de los lodos y el tipo de rotura); P_{L+A/R}: probabilidad de licuación y arrastre del lodo dada la rotura.

La probabilidad de contaminación de un punto por un vertido, P_C, por tanto, sería:

$$P_C = P_V \cdot P_{AV} = P_R \cdot P_{L+A/R} \cdot P_{AV}$$

P_{AV}: probabilidad de alcance del punto por el vertido dado éste.

Esta última probabilidad es función tanto del tipo de lodo -que influye en la viscosidad y el coeficiente de rugosidad de Manning- como del volumen de vertido, los caudales del mismo y las características geomorfológicas de la red fluvial, teniendo un valor significativo solamente en los cauces de la red y en las llanuras de inundación y terraza más baja; depende fundamentalmente del caudal punta en relación tanto con el caudal de desbordamiento del cauce como del de cobertura de la llanura de inundación (*vid.* Tablas 4 y 5) y del volumen de vertido. En ríos encajados no lejanos al mar, tal y como sucedió en 1983 con varias balsas mineras en el río Urumea, en Navarra-Guipúzcoa, en las graves inundaciones del País Vasco de agosto de 1983, los lodos acaban en buena medida en el mar, en ese caso el Cantábrico (Ayala-Carcedo y del Valle, 1984). Esto es lo que probablemente ha sucedido con buena parte del lodo depositado en los cauces que no haya sido retirado, que habrá acabado en la plataforma continental del Golfo de Cádiz.

El volumen de lodo vertido fue el arrastrado por el flujo del agua -un 89%- más el licuado sobre el nivel del terreno -un 11%-, así que el hecho de que la licuación, dinámica, debida a la caída del lodo en el hueco abierto progresivamente por el deslizamiento del terreno de cimienta (ya que en los ensayos no se detectó ningún proceso de licuación estática bajo cargas monotónicas (Alonso y Gens, 2001 b) fuera limitada, es de gran importancia a nivel de los impactos ecológicos y económicos previsibles en este tipo de accidentes. La observación ha mostrado como se ha expuesto que la zona licuada fue básicamente un prismaoide de sección triangular delimitado entre el dique deslizado y la pared subvertical (70°-90°), con que quedaron los estériles tras la licuación y vertido. Un análisis de estabilidad retrospectivo sencillo muestra que en estas condiciones no drenadas de estabilidad post-rotura, la cohesión no drenada, C_u, varía entre 131 y 162 kPa, valores coherentes con los obtenidos en laboratorio a partir de los ensayos de

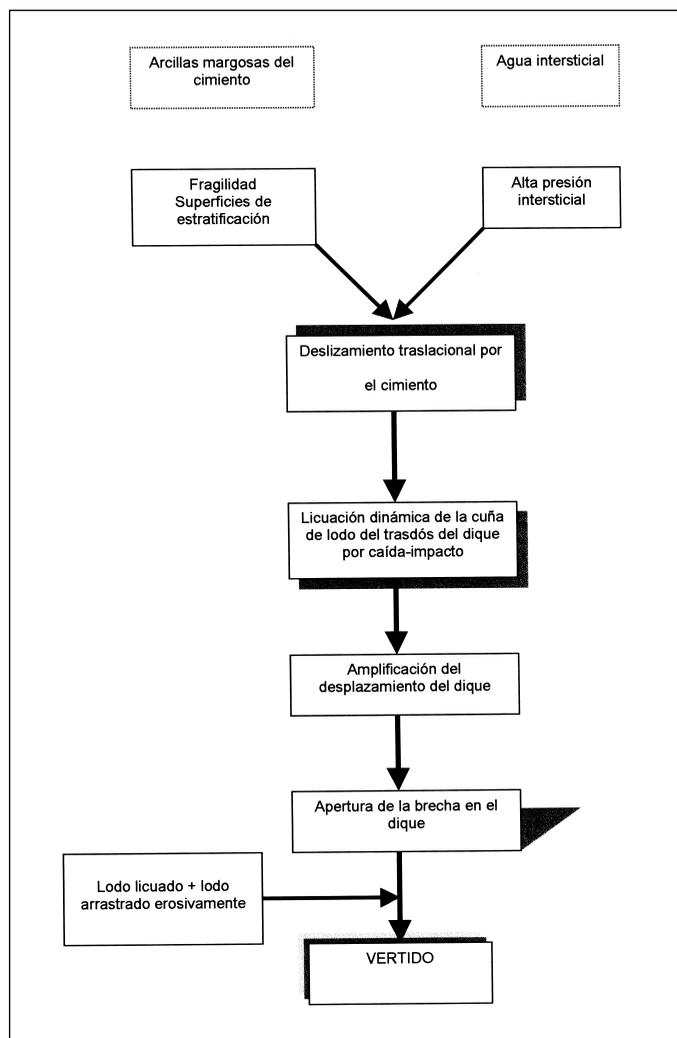


Fig. 10. Secuencia de procesos causales que condujeron al vertido
 Fig. 10. Sequence of causal processes from failure to spill

Parámetro / Variable	Características
• Lodo vertido	
a) Peso	2,97 Mt
b) Volumen en balsa	0,88 hm ³
c) Volumen decantado fuera de la balsa	1,98 hm ³
• Zona afectada	
a) Longitud	41 km
b) Superficie	26,16 km ²
• Agua ácida vertida	
a) Volumen en balsa	4-5,5 hm ³
b) pH en balsa	5,5
• Granulometría (media)	6-13 μ
• Velocidad media de desplazamiento	0-23 km: 1,9 m/s 23-33 km: 0,7 m/s
• Caudal punta acuoso (11 km aguas abajo)	811 m ³ /s
Referencias: López Pamo <i>et al.</i> , 2001; Galache, 2001; Moreno y Silgado, 2001; Dermott y Sibley, 2000; Gallart <i>et al.</i> , 1999; Datos propios	

Tabla 4. Características del vertido
Table 4. Spill characteristics

compresión simple (Alonso y Gens, 2001 b). La existencia de esta cohesión relativamente alta, fruto del desarrollo de procesos de cementación, fue la causa principal de que el desarrollo de la licuación quedara limitado a la cuña adyacente al dique y por tanto de la limitación de daños. Cabe pensar que otro tipo de rotura -fuera rotura curva por el cimientto, fuera rotura del dique- hubiera producido, ante la probable ausencia de licuación de entidad, y por tanto, debido a lo limitado del desplazamiento, de apertura de brecha, daños ecológicos mucho menores. Esto, subraya la importancia del tipo de rotura y la existencia de licuación que aporte un desplazamiento suplementario, y apunta en el sentido de que los medios estratificados con superficies de estratificación muy desarrolladas, continuas y subhorizontales, generan licuaciones dinámicas por caída-impacto mucho más voluminosas y, por tanto, daños ecológicos superiores.

El riesgo, R, daño esperable para un determinado suceso, medible tanto en términos económicos como ecológicos, puede expresarse en principio para un vertido en una cuenca fluvial como:

$$R = K_1 \cdot L_c + K_2 \cdot A_{LL}$$

K₁, K₂: parámetros función de la exposición y vulnerabilidad; L_c: Longitud de cauce contaminado; A_{LL}: área de llanura de inundación cubierta por el lodo vertido.

Obviamente, para que exista contaminación de las zonas inundables, debe cumplirse la condición de que los caudales punta del vertido superen el caudal de desbordamiento del cauce, condición que generalmente se dará en roturas de depósitos de una cierta entidad pero que puede no darse en roturas de pequeños depósitos.

A su vez:

$$A_{LL} = b \cdot L_c$$

Por tanto:

$$R = K_1 \cdot L_c + K_2 \cdot b \cdot L_c = K \cdot L_c$$

pero como, de acuerdo con la regresión expuesta en la Figura 12 para 23 casos de rotura en el mundo, existe una relación lineal de L_c con el volumen V del lodo vertido medido en el depósito, también:

$$R = k' \cdot V$$

Por tanto, el riesgo para un suceso catastrófico de esta naturaleza, que es tanto como decir el daño esperable, es proporcional tanto al volumen del vertido como a la longitud de cauce contaminado.

El daño en los cauces es ante todo faunístico, mientras que el derivado de la contaminación de las zonas inundables, es ante todo edáfico, botánico y a los cultivos.

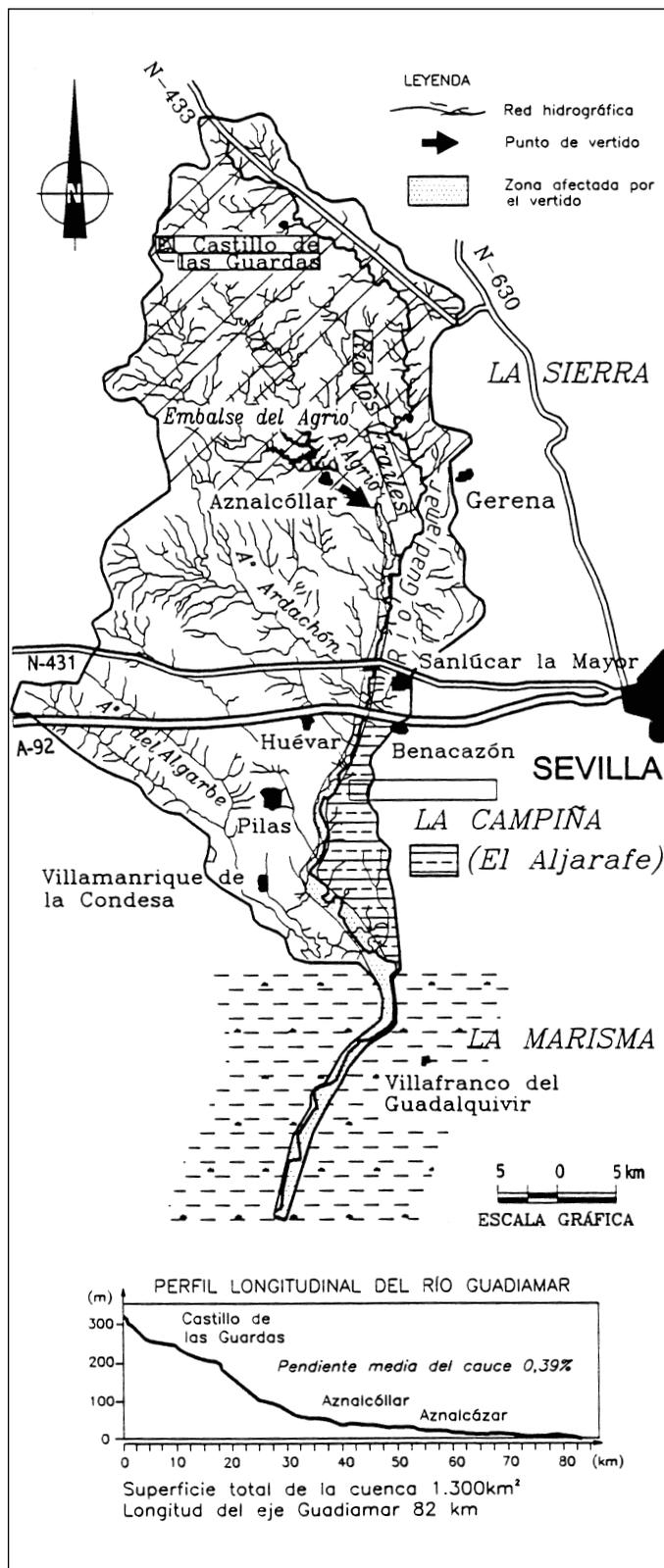


Fig. 11. La cuenca del Guadiamar jugó un importante papel en el alcance del vertido (Borja y Vives, 2001)

Fig. 11. The Guadiamar watershed played a key role in the spill reach (Borja y Vives, 2001)

El valor de estas constantes de proporcionalidad es diferente en cada caso. En Aznalcóllar, contando exclusivamente los costos derivados de la recuperación de la contaminación, 177 M euros (200 M USD), sus valores han sido:

$$k = 4,32 \text{ M euros/km (4,88 M USD/km), y}$$

$$k' = 201 \text{ M euros/Mm}^3 \text{ (227 M USD/Mm}^3\text{)}$$

El potencial de licuación disminuye sustancialmente, como se ve en este caso, con el desarrollo de procesos de cementación en los lodos que elevan la cohesión no drenada, y también con los procesos de consolidación. Por tanto, la investigación en ambos campos, muy especialmente el segundo, ya que los procesos de cementación son relativamente frecuentes (*vid. p.e. McGrath y Lambe, 1998 para residuos de fosfato*) es clave para estimar cual es realmente el potencial de daño que poseen las múltiples depósitos de lodos existentes en los países con historia minera. Este potencial puede reducirse recurriendo a una de las técnicas más recientes en minería a cielo abierto, derivada del relleno hidráulico más antiguo que se viene practicando en interior hace muchos años: la disposición en pasta lodo-cemento, a veces con cenizas volantes en porcentajes ponderales que no suelen exceder el 5% (Lord y Liu, 1998).

Se ha argumentado recientemente a través de la prensa por parte del representante del grupo empresarial de ingeniería civil que realizó la construcción y recrecimiento así como los diseños que "lo irrelevante es por qué se rompió la balsa", así como que "lo más relevante es que una balsa proyectada para almacenar lodos espesos lo que estaba almacenando era agua contaminada" (Europa Press, 2002). Tal y como se ha expuesto, sin el tipo de rotura que se produjo, causado por errores de proyecto, no se hubiera producido licuación del lodo, los desplazamientos diferenciales del dique hubieran sido mucho menores y muy probablemente no hubieran llegado a generar una verdadera brecha que posibilitara el vertido. Además, el arrastre de lodo por el flujo del agua sobrenadante por erosión retrógrada con la magnitud que alcanzó, tuvo relación directa con el tipo de rotura como se mostró más arriba. Por otra parte, como se comentó, estos depósitos tienen siempre una doble funcionalidad durante la etapa operativa de la mina: almacenar lodo y almacenar agua en circuito cerrado. Por tanto, el por qué se rompió la balsa fue un aspecto crucial del desastre, una condición necesaria para el mismo y su magnitud.

Una rotura por el dique no hubiera producido licuación del lodo y la erosión retrógrada del lodo por

el agua sobrenadante hubiera estado mucho más concentrada (la limitada cantidad de agua en estas estructuras hace que las brechas en diques de escollera, cuando no hay licuación, ensanchen comparativamente poco) y no distribuida a lo largo de un frente de unos 650 m, la longitud de prisma caído para rellenar el hueco abierto; por tanto, en contra de lo que se argumentó en las diligencias previas, hubiera tenido unos impactos ecológicos sustancialmente menores.

El limnógrafo de la estación de aforos de El Guijo (EA-90) en Sanlúcar la Mayor, situada en el río Guadiamar a unos 11 km de la balsa, registró una avenida cuyo comienzo se sitúa a las 2:30 de la madrugada del 25 de abril, presenta un primer máximo a las 3:30 h con calado de 3,94 m, otro menor a las 9:00 h con calado de 2,44 m y vuelve prácticamente a la normalidad el régimen de caudales a las 24:00 h del mismo 25 de abril (Palancar, 2001). En términos de caudal, y de acuerdo con la curva de gasto de la estación, ello supone que hubo dos puntas en el hidrograma conjunto agua-lodo, que corresponderían respectivamente a caudales de 811 m³/s (la primera punta) y 294 m³/s la segunda, caudales procedentes de la curva de gasto, que probablemente sobreestiman el verdadero valor del caudal que debió ser menor debido a la mayor viscosidad del fluido (ver Figura 13). Si la rotura se produjo hacia la 1:00 a.m. del día 25, el primer fluido, el agua sobrenadante principalmente, tardó 1,5 horas en recorrer los 11 km, lo que implica una velocidad media de 7,3 km/h ó 2 m/s, muy cercana a los 1,9 m/s dados por Gallart *et al.* (1999) que puede verse en la Tabla 4. El hecho de que el hidrosolidograma tuviera tanta duración indica que el proceso de vertido se dilató en el tiempo durante prácticamente dos días, el 25 y 26 de abril, liberándose el lodo, mucho más viscoso que el agua, con velocidades sustancialmente menores cada vez debido al descenso paulatino de la altura de la lámina vertiente, proceso compensado en parte por el aumento de la sección de la brecha debido a la propia erosión del vertido.

Ambos caudales, 811 y 294 m³/s, fueron suficientes para desbordar el cauce al superar los 175 m³/s calculados por Benito Calvo *et al.* (2001), pero el segundo es menor del necesario para cubrir toda la llanura de inundación, 500 m³/s. Debe tenerse en cuenta, no obstante, que los caudales punta en el punto de vertido, antes de que la acción de laminación del almacenamiento en cauce y llanura de inundación entrara en acción, debieron ser sustancialmente mayores.

Dada la práctica simultaneidad de la apertura de la grieta perimetral y la del espigón de separación de las

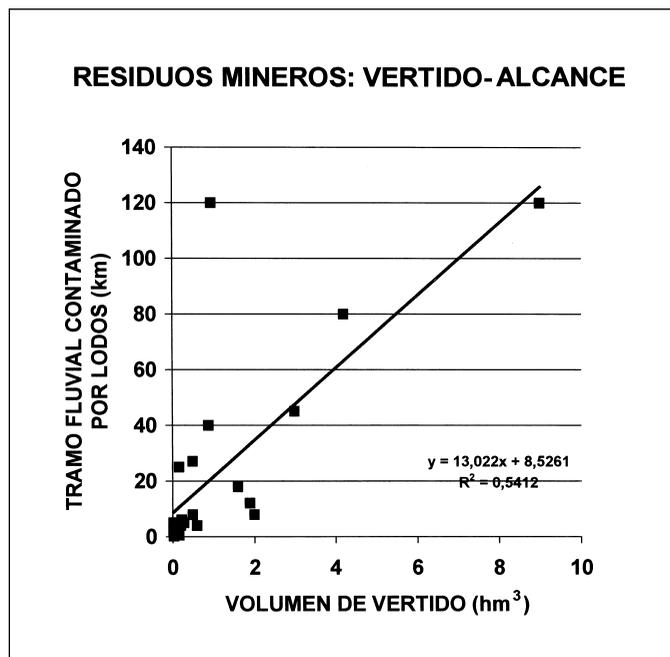


Fig. 12. El alcance de los lodos mineros en los valles fluviales, directamente relacionado con los impactos ecológicos, está relacionado linealmente con el volumen de lodo vertido (con datos de Penman *et al.*, 2001 y datos propios)

Fig. 12. The reach of tailings in the fluvial valleys, directly related with the ecological impacts, is linear related with the spill volume (with data of Penman *et al.*, 2001 and own data)

sub-balsas al ser fruto del mismo movimiento traslacional del conjunto cimiento-dique, la velocidad resultante -vectorialmente- de la composición de las velocidades de los dos flujos de agua y lodo procedentes de ambas sub-balsas tuvo una componente hacia el norte que conllevaba la erosión de la grieta perimetral inicial por parte tanto del flujo de agua como del de lodo ensanchándola en su borde septentrional. Probablemente, como se ha apuntado, el hidrograma se adelantó al solidograma como sucede también en las crecidas de los ríos (Martín Vide, 1997), pudiendo ser ésta la clave explicativa de las dos puntas del registro limnográfico: la primera, mayor, correspondiente principalmente a agua sobrenadante -con mayor velocidad de tránsito que los lodos-, la segunda, menor, correspondiente a un fluido con más lodos. Esta hipótesis viene avalada por las observaciones respecto al flujo que se contienen en el trabajo del Organismo Autónomo Parques Nacionales (1998), en el que se indica que al principio el flujo tenía colores pardos -probablemente correspondientes al arrastre de sedimentos del propio cauce por el agua sobrenadante, que por su menor viscosidad y estar en la parte más alta se precipitaría más rápidamente por la brecha-, colores que fueron

Tramo	L	s	B _{LI}	Q _{DC}	Q _{CLI}
• Superior	15 km	0,146%	200-300 m	175 m ³ /s	500 m ³ /s
• Medio	16 km	0,06%	450-800 m	140 m ³ /s	200-250 m ³ /s
• Inferior	16 km	0,015%	>2000 m	175 m ³ /s	825-940 m ³ /s

Significado: L: Longitud del tramo (el superior es el más próximo a la balsa) / s: pendiente media / B_{LI}: Anchura de la llanura de Inundación o Aluvial / Q_{DC}: Caudal de desbordamiento del cauce / Q_{CLI}: Caudal mínimo de cobertura de la llanura de inundación

Referencias: Benito Calvo *et al.*, (2001)

Tabla 5. Geomorfología fluvial e hidrogeología de la cuenca del Guadiamar receptora del vertido
 Table 5. Fluvial geomorphology and hydrology of the Guadiamar watershed, recipient of the spill

pasando a negruzcos debido a la presencia progresivamente creciente de lodo. A medida que la grieta fue agrandándose y el nivel del fluido rebajándose, fueron variando la velocidad y el caudal de vertido. Es probable que los lodos piroclásticos, más próximos y mejor orientados respecto a la grieta perimetral, fueran mayoritarios en las primeras fases del vertido.

Resulta de interés, con finalidades predictivas para futuros diseños, ver el grado de acuerdo de los caudales punta registrados con los estudios existentes al respecto. Costa (1987) ha realizado un amplio estudio sobre este aspecto, tanto para presas hidráulicas como para las resultantes de deslizamientos y las glaciares. Las correlaciones dadas por este autor entre el caudal pico (m³/s) tras la rotura y la altura H de la presa (m), son las siguientes:

Presas construidas:

$$Q = 10,5 H^{1,87} \quad (r^2 = 0,80)$$

Presas creadas por deslizamientos:

$$Q = 6,3 H^{1,59} \quad (r^2 = 0,74)$$

Aplicadas al caso que nos ocupa proporcionan, respectivamente, caudales punta de 4.987 y 1.189 m³/s. El caudal punta que se deduce de los datos limnigráficos en la estación de aforos de El Guijo, 11 km aguas debajo de la balsa, fue de 811 m³/s, que concuerda razonablemente con el ajuste de Costa para rotura de presas -de materiales sueltos como en la balsa- creadas por deslizamientos. Por tanto, parece razonable, especialmente habida cuenta del mayor caudal en el punto de vertido, para los caudales acuosos que forman las primeras puntas del hidrograma, correspondientes a la salida del agua sobrenadante con poco lodo, que la segunda fórmula es la más aproximada. Los caudales correspondientes al segundo pico del hidrograma, con mayores contenidos de lodo, 294 m³/s, probablemente sobrevalorados, y los más relevantes para evaluar la contaminación, no son predichos adecuadamente.

Existen contradicciones entre los datos de las publicaciones realizadas sobre la extensión del lodo a lo largo de los ríos. Así, Baretino (2001 a) da una longitud de 45 km y un área cubierta de 27 km², hasta la zona de Entremuros, mientras en López Pamo *et al.* (2001), sobre una base cartográfica minuciosa, se da una longitud afectada de unos 40 km y se deduce un área cubierta más próxima al primer valor, 27 km². Estos últimos valores son coincidentes con los de Moreno y Silgado (2001), de 41 km y 26,16 km², de ellos 20,99 correspondientes a tierras agrícolas y el

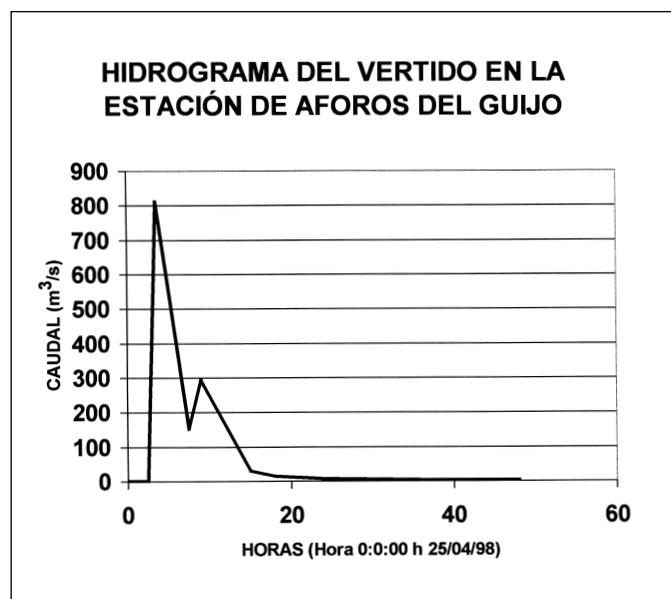


Fig. 13. Hidrosolidograma del vertido en la estación de aforo de El Guijo, 11 km aguas debajo de la balsa, en el río Guadiamar. Obsérvense las dos puntas sucesivas del hidrosolidograma, probablemente correspondientes a agua y lodo. Los caudales para el lodo están sobrevalorados. A partir de los datos de calado de Palancar (2001)

Fig. 13. Hydrosedimentgraph of the spill in the El Guijo gauge station, 11 km downstream of the tailings pond, in the Guadiamar river. See the two successive peaks of the hydrosedimentgraph, probably due to water and tailings flow respectively. The tailings flows are overestimated. From water depth data of Palancar (2001)

resto al cauce. Por tanto, cada millón de m³ de lodo decantado fue capaz de cubrir un tramo de unos 20 km. Debe hacerse notar que en los primeros 12 km se decantaron 1,228 Mm³, más del 60% del volumen total, con un ratio volumen/superficie cubierta de 1.560 m³/ha -15,6 cm de espesor de media-, ratio que en los tramos más bajos desciende a unos 425 m³/ha de media, 4,25 cm de espesor medio (López Pamo *et al.*, 2001). Probablemente, la causa de la decantación preferente del lodo en los tramos más altos está en relación con la presencia de caudales mayores que el de desbordamiento, que al ir siendo laminados por la inundación de las llanuras aluviales seguida de la deposición inmediata del lodo tanto por su bajo calado como por el progresivo descenso de la pendiente aguas abajo, fueron amortiguando progresivamente los volúmenes desbordados.

Impactos ecológicos del vertido

Feasby *et al.* (1999) y Carranza (2001) han hecho una descripción global de los impactos ambientales generados, aspectos contemplados también en Eriksson y Adamek (2000). En Carrera y Mediavilla (2001), pueden verse los relativos a aguas y suelos.

Los valores medios de los principales elementos del lodo, con un 75-80% de pirita y alrededor de un 5% en total de galena y esfalerita, eran: Fe: 36,92%, Zn: 8832 ppm, Pb: 8091 ppm, As: 4692 ppm, Cu: 1323 ppm, Sb: 363 ppm, Cd: 33 ppm, Cr: 30 ppm, Hg: 15 ppm; hay también yeso (López Pamo *et al.*, 2001), lo que sugiere un ataque ácido a las arcillas margosas.

Las operaciones de retirada del lodo, llevadas a cabo contrarreloj para evitar el efecto de arrastre y difusión de las lluvias otoñales, aspecto que fue estudiado por Gallart *et al.* (1999) y Benito Calvo *et al.* (2001), se realizó principalmente con medios mecánicos, una técnica a la que se opuso el CSIC, llegando a utilizarse en las puntas hasta 500 camiones, repartiéndose el trabajo, por tramos, entre Boliden, la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y la Junta de Andalucía. La limpieza manual en zonas delicadas fue llevada a cabo con el concurso de 1.600 trabajadores. Comenzadas las operaciones el 3 de mayo, se finalizaron el 23 de septiembre en el cauce y el 16 de diciembre en las tierras agrícolas (Moreno y Silgado, 2001).

Una vez realizada la retirada del lodo, depositado en la antigua corta, se evaluó la contaminación residual del terreno y se restauró edáfica y morfológicamente la zona (Carrero y Vázquez, 2001). Se constataron altos niveles de contaminación residual en los

suelos en el tramo más alto, debida principalmente al As (186 ppm de media), así como en la zona de Entremuros. La corrección de la acidez se realizó mediante espumas de carbonatación de azucarera, residuos alcalinos a razón de 20-50 t/ha en una primera fase y una dosis suplementaria en el tramo norte, más contaminado, de hasta 60 t/ha (Moreno y Silgado, 2001). El As se inmovilizó mediante tierras rojas a razón de 500-900 t/ha en aquellas zonas, como la norte, que presentaban valores altos. También se han aplicado técnicas de fitorremediación y bioextracción y correctivos orgánicos para favorecer la restauración vegetal.

La calidad de las aguas del sistema fluvial fue objeto de seguimiento sistemático (Mora y Serrano, 2001). En la zona más cercana a la rotura, tras el vertido, se registraron valores del pH en torno a 4 (prueba de que el pH de 5,5 que se suponía en las aguas de la balsa sobrenadantes era en realidad superior, o bien de que el agua de saturación de los lodos lo era) y los sólidos en suspensión alcanzaron valores cercanos a 30 g/L. El O₂ disuelto en los tramos afectados, que era antes del vertido superior a 5 mg/L, bajó a menos de 1 tras el vertido. En los primeros días el Mn pasó de 0,4 mg/L a 90, y el Zn, de 0,6 mg/L a 450 (Mora y Serrano, 2001). Los valores del pH se restablecieron prácticamente al día siguiente al vertido debido a que éste fue en definitiva un pulso transitorio de agua y lodo que las propias aguas naturales se encargaron de restaurar por dilución, muy especialmente cuando al cabo de dos días había pasado ya el hidrosolidograma de crecida del vertido.

El agua ácida retenida con los diques en la zona de Entremuros en el tramo inferior del río a lo largo de 15 km, unos 4 Mm³ con pH ácido como se dijo, tras los oportunos ensayos, fue depurada y devuelta al río (Galache y Mediavilla, 2001; Guijarro y Sánchez, 2001). El IGME, con colaboraciones técnicas externas, diseñó y construyó una Planta Depuradora Móvil de Emergencia entre el 1 y 9 de julio de 1998, que llegó a tratar 3.000 m³/h. Utilizó hidróxido sódico para alcalinizar el agua, ya que resultó más favorable que el hidróxido cálcico o el carbonato sódico. Costó 227 M de pesetas (1,36 M de euros de 2000), depurando 1,64 hm³ hasta que el 21 de agosto se decidió que parara para dar ocasión de depurar a la Depuradora convencional de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, de 2.000 m³/h, con costo estimado de 1.200 M ptas. (7,2 M de euros), que depuró 1,15 hm³ con resultados similares a la planta móvil.

El impacto del vertido sobre el acuífero y los pozos del Guadiamar, acuífero aluvial, ha sido estudiado por Manzano *et al.* (2001). Aparte de los pozos de gran diámetro, cuya contaminación por llenado de lodo

fue neutralizada con cal viva, los pozos no inundados no recibieron impactos hidroquímicos significativos. Para neutralizar las aguas subterráneas ácidas y contaminadas, se construyó una barrera geoquímica transversal al cauce constituida por piedra caliza y compost vegetal (Carrera *et al.*, 2001). El emplazamiento de los lodos retirados en la antigua corta, planteó el problema de la posible contaminación del acuífero profundo Niebla-Posadas, por filtración a través del paleozoico en el que se sitúa la corta de Aznalcóllar. Este acuífero mioceno, confinado y alimentado vía lluvia y escorrentía superficial por la banda de afloramiento pegada al borde Sur de Sierra Morena, está constituido por un nivel inferior de conglomerados poligénicos y otro superior, marino de calizas conglomeráticas, a menudo lumaquelas, con potencia de 10-20 m. La presencia de un nivel de pizarras negras de muy baja permeabilidad, al Sur de la Corta de Aznalcóllar, "parecen representar una barrera hidráulica que impediría el flujo" (Mediavilla, 2001).

A nivel biológico, la vida en el río hasta Entremuros, flora y fauna, fue prácticamente destruida por el vertido (Eriksson y Adamek, 2000). Sin embargo, medio año después se había establecido una comunidad de macrofauna relativamente diversa, probablemente por migraciones desde los tramos más altos, no contaminados. La pesca, mágil, gambusia, carpa o barbo ha retornado con rapidez, e incluso una familia de nutrias se había establecido en el invierno 1998/99 (Eriksson y Adamek, 2000; Geenpeace, 2001). Podían verse martines pescadores, lo cual indica que debían existir comunidades de peces. De acuerdo con los estudios del CSIC casi el 6% de los 389 pollos de cigüeña blanca nacidos tras el accidente en Doñana presentan malformaciones en el pico con altos niveles de As, y el Zn bioconcentrado en aves parece mostrar una tendencia creciente, existiendo impactos importantes en el cangrejo rojo (Greenpeace, 2001). En enero de 2001, el Grupo de Expertos creado *ad hoc* constataba todavía una gran toxicidad en el agua procedente del río Agrío a través de su acción sobre larvas utilizadas como bioindicadores; las comunidades de nematodos en el suelo se habían recuperado espectacularmente, pasando de 79 individuos/kg de suelo en febrero de 1999 a 800 en junio de 2000, "apreciándose una recuperación biológica de los suelos". El mismo Grupo concluía que "en la actualidad, las poblaciones de aves de Doñana no parecen haberse visto afectadas de forma importante por la contaminación procedente del vertido tóxico", aunque la afección genética en cigüeña (*Ciconia ciconia*) era real.

En el estuario del Guadalquivir y las zonas adyacentes (Greenpeace, 2001), se detectaron niveles de

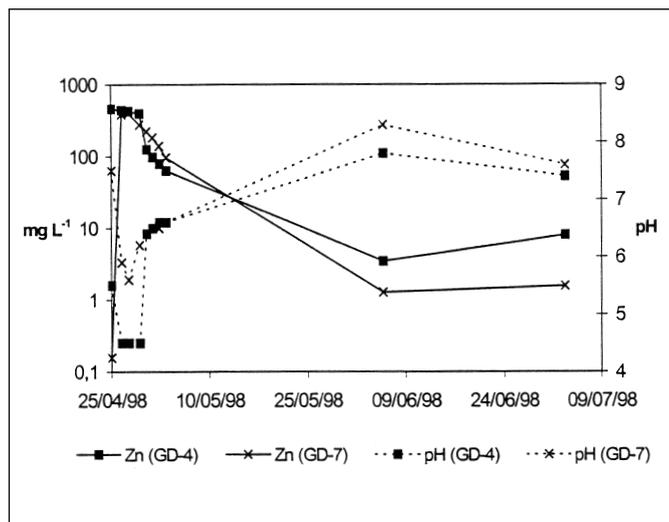


Fig. 14. Evolución del pH y Zn en las aguas del Guadiamar en semanas posteriores al vertido. Obsérvese como los valores del pH y Zn se recuperan a partir del tercer día del vertido. GD-4: 24 km aguas abajo de la balsa; GD-7: 42 km aguas abajo. (Mora y Serrano, 2001)
Fig. 14. Evolution of pH and Zn in the Guadiamar waters the following weeks after the spill. See how pH and Zn recovers the natural values from the third day after the spill. GD4: 24 km downstream of the spill; GD-7: 42 km downstream. (Mora y Serrano, 2001)

metales atribuibles al accidente superiores al límite legal en Cu en el camarón (*Palaemon longirostris*); los niveles de Cu y Cd excesivos en el ostión (*Crassostrea angulata*) y de Cu, Cd y Pb en la galera (*Squilla mantis*), son endémicos desde antes del vertido y deben tener que ver con el propio fondo geoquímico de la zona relacionado con la hidroquímica natural propia de este tipo de yacimientos mineros de sulfuros complejos.

En el 20% de la zona más contaminada, se ha restablecido espontáneamente la vegetación, aunque por el momento con menor biodiversidad (13 especies en 1100 m², frente a 37 en áreas de referencia (Eriksson y Adamek, 2000). Estas especies tienen contenidos en metal de 2 a 30 veces mayores que las de las áreas de referencia. Ensayos realizados por el Departamento de Agronomía de la Universidad de Córdoba con plantas útiles, han mostrado una bioconcentración de 2 a 8 veces mayor de metales en zonas contaminadas que en zonas de control para colza, cebada y mostaza etiópica (*Brassica carinata*) en cuanto a biomasa total; sin embargo, la bioconcentración en las partes comestibles es irrelevante salvo para la colza y mostaza (x30). La mostaza etiópica ha demostrado ser un bioconcentrador eficiente para el talio (x200) y el As (x20).

Toda la zona afectada, una vez expropiada, probablemente por el temor a la futura contaminación de

productos agrarios debido a la contaminación residual, ha sido convertida en el Corredor Verde del Guadiamar por la Junta de Andalucía, que ha gastado en la zona 152 M euros de 2000. La reforestación de terrenos inundables con pinos y encinas, especies extrañas a los ecosistemas de ribera, ha sido justamente criticada por organizaciones ecologistas como Ecologistas en Acción.

De acuerdo con los datos de Eriksson y Adamek (2000), los costos de la recuperación del accidente han sido los siguientes:

- a) limpieza de la zona norte: 25 M USD (22,1 M euros a mediados de 2003, cambio: 1 euro = 1,13 USD) (pagado por Boliden-APIRSA).
- b) limpieza, expropiación y realización del Corredor Verde del Guadiamar: 165 M USD (146 M euros, pagados por la Junta de Andalucía, que reclama a Boliden 90 millones).
- c) clausura y sellado de la balsa: 37 M USD (32,7 M euros) (pagado por Boliden-APIRSA).
- d) compra de la cosecha de 1998 en la vega del Guadiamar: 9,9 M USD (8,76 M euros).

En total casi 210 M euros, lo cual implica, habida cuenta de que se vertieron unos 0,88 Mm³ de lodo, un coste de 239 M euros (270 M USD)/Mm³ vertido. Estos costes han ido variando en el tiempo de acuerdo con la variación de la paridad USD-euro. El Gobierno español impuso a Boliden el 2/08/02 la mayor multa medioambiental en España, 45 M euros, que la empresa cree debe pagar el grupo Dragados por el mal diseño de la balsa.

La empresa no pudo superar los costes derivados del accidente, que obligó a una larga parada, y acabó cerrando la mina, dejando en el paro a 500 mineros y una cantidad de empleos indirectos perdidos estimada en tres veces más.

Conclusiones: lecciones de Aznalcóllar para la mitigación de desastres de depósitos de residuos y presas hidráulicas

El accidente de Aznalcóllar, que sería seguido por el del depósito de residuos rumano de Baia Mare, que produjo vertidos al Danubio procedentes de la cianuración de Au, ha producido una clara degradación de la imagen de la minería, un sector necesario para el desarrollo, a nivel mundial. En lo sucesivo, la apertura de cualquier mina que genere lodos o aguas tóxicos o peligrosos va a contar con una oposición creciente. Solo una revisión en profundidad tanto de las reglas y normas de diseño como de los mecanismos de cobertura y recuperación de daños, aunados a una completa transparencia y sinceridad de las empresas

minero-metalúrgicas en sus relaciones con la opinión pública y las organizaciones civiles y administraciones públicas, posibilitará un desarrollo sostenible de este sector en el cual las empresas mineras están vitalmente interesadas (Ayala-Carcedo, 2001 a).

En este sentido, debería constatar y asumirse que, a igualdad de volúmenes de vertido, el daño ecológico -no el humano, sustancialmente menor- de este tipo de accidentes en las zonas afectadas, es mayor que el producido por los accidentes en presas hidráulicas (con daños mayores a nivel humano por la mayor movilidad del agua, fruto de su menor viscosidad), especialmente cuando almacenan aguas o lodos tóxicos o peligrosos. La razón estriba en la permanencia de los lodos contaminantes en el terreno y cadenas tróficas. Por ello, las exigencias y garantías por parte de la sociedad sobre los daños ecológicos deben ser también mayores. Nada se ganará, en mi opinión, con no asumir en profundidad en el sector, empresarios, profesionales y obreros, los hechos y las lecciones que nos transmiten estas catástrofes, refugiándose en un victimismo estéril e injusto hacia

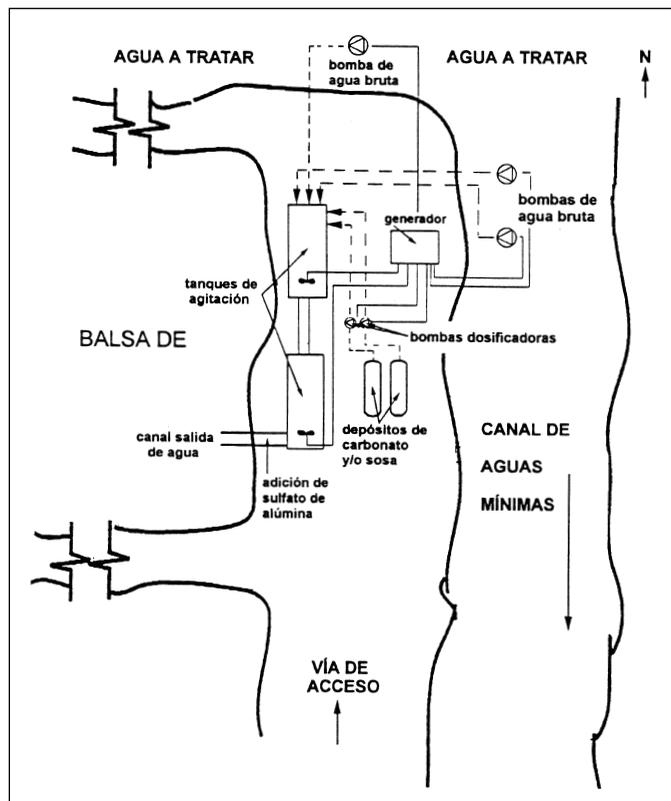


Fig. 15. Esquema de la depuradora diseñada por el IGME para tratar las aguas ácidas embalsadas en Entremuros (Guijarro y Sánchez, 2001)

Fig. 15. Sketch of the water treatment plant designed by the IGME to purify the acid waters of Entremuros (Guijarro y Sánchez, 2001)

exigencias sociales legítimas. El contexto mundial en el que la minería y metalurgia deben desenvolverse en el siglo XXI es muy distinto, y mucho más exigente, que el de hace tan solo tres décadas.

El problema no solo afecta a la propia viabilidad de un sector, especialmente la minería metálica, sino a la credibilidad de las instituciones ambientales como antes se mostró, que por interés propio deberían tratar de aprender también las lecciones que transmiten los desastres y no cerrarles apresuradamente, en falso, tan pronto dejan de interesar a la opinión pública. En este sentido, parece necesario subrayar una vez más, en la vía de la prevención, siempre el aspecto clave, la necesidad tanto de articular un Procedimiento Técnico-Administrativo de Evaluación de Riesgos para la Población similar al de Evaluación de Impacto Ambiental, como la de articular una cultura de Comisiones Científico-Técnicas Pluridisciplinares de Investigación tras los desastres de entidad (Ayala-Carcedo, 2001 b, c). Siete son los campos en que Aznalcóllar transmite lecciones y este será el hilo estructurador de las reflexiones siguientes.

Desde el punto de vista geotécnico, se impone subrayar una vez más que en formaciones susceptibles de rotura progresiva y en rocas blandas, debe proyectarse con parámetros resistentes residuales.

Por otra parte, parece claro que en estructuras e instalaciones que puedan liberar contaminantes, el mayor Impacto Ambiental es el que puede producir la rotura. En este sentido, la Evaluación de Impacto Ambiental necesita del Análisis de Riesgos.

Por otra parte están las referentes a la reducción del riesgo de fallo humano, múltiple en este caso, la causa social central de la rotura, la "causa de la causa" y, por tanto, del desastre, cuya causa física fue la rotura del terreno de cimientado por ignorar el proceso de rotura progresiva y la anisotropía estructural y mecánica presente a través de juntas y estratificación con resistencias al corte sustancialmente menores que las de la matriz arcillo-margosa.

Resulta pasmoso y gravemente preocupante que entre veinticinco profesionales inicialmente imputados, una parte sustancial con experiencia geotécnica, siendo como eran conocidos científicamente tanto el proceso que generó la rotura progresiva (al menos trece años antes del diseño inicial y treinta del recrecimiento), como la anisotropía estructural ante la resistencia al corte debida a la estratificación de las arcillas margosas sobreconsolidadas miocenas que fallaron, ninguno se diera cuenta del problema tanto en las empresas consultoras como en la propia empresa y administraciones inspectoras. Como resulta gravemente preocupante la información que se transmitió desde el CEDEX -un organismo científico-técni-

co ligado a la ingeniería civil- a diversos periódicos nacionales el 30/12/99 de que la balsa fue diseñada de acuerdo con el estado del arte. Si así fuera, es evidente que el nivel geotécnico de muchos de nuestros ingenieros, y el estado de seguridad de las presas hidráulicas especialmente, debería ser objeto de grave preocupación. No hay fallo humano objetivamente más peligroso que el derivado del desconocimiento, ya que impide tomar medidas ante las señales de alerta que el propio terreno a menudo lanza. En el caso que nos ocupa, si se hubiera conocido la naturaleza del problema, las filtraciones tóxicas desde la balsa al río que fueron reiteradamente denunciadas por los ecologistas, que sugerían probables fisuras en la pantalla impermeabilizante debidas a la deformación creciente e irreversible del terreno de cimientado del dique hacia la rotura completa, habrían podido ser interpretadas en esta clave. El desconocimiento lo impidió.

Es obvio que estos hechos remiten ante todo a un grave déficit de formación científico-técnica. Según Penman *et al.* (2001) "si las recomendaciones dadas en estas guías (las de ICOLD, International Commission of Large Dams, desde 1982, FJAC) fueran seguidas puntualmente, el riesgo de fallo o grave ocurrencia (...) disminuiría grandemente"; Davis (2002) ha sugerido que no se están aprendiendo las lecciones que transmiten las roturas de estas estructuras. Por tanto, las escuelas técnicas, de caminos y minas, de las que han salido los ingenieros que tuvieron que ver con el diseño o la evaluación del mismo, deberían revisar sus programas formativos para dar formación básica más consistente -tanto en Mecánica de Suelos como de Rocas- e incorporar con el rango adecuado o reforzar en su caso las materias *ad hoc*, y empresas e instituciones deberían posibilitar la formación permanente de sus cuadros, que es algo más que asistir a cursos de reciclaje, e integrarla en la valoración de los *currículos* a la hora de cubrir puestos. En el caso Aznalcóllar se aprecia bien como el enfoque adoptado a la hora tanto de evaluar los parámetros resistentes como de los modelos de rotura y todo lo relacionado con procesos donde interviene la permeabilidad, ha sido un típico enfoque de "mecánica de suelos" que no ha considerado la clara anisotropía estructural de las arcillas margosas del cimientado, una roca blanda, con consecuencias claves sobre resistencia y flujo; por tanto, debe hacerse un énfasis especial en que las rocas blandas carecen de la isotropía mecánica e hidráulica que tienen los suelos propiamente dicho.

Probablemente, como ya he señalado recientemente, la sobrevaloración de la gestión frente a la excelencia científico-técnica en la promoción

profesional, la carrera, algo demasiado habitual por doquier en el mundo ingenieril, tenga algo que ver, ya que acaba impidiendo la acumulación y formación de masa crítica de conocimiento experto profundo y de nivel en las organizaciones (Ayala-Carcedo, 2002 a). El principal activo de una empresa consultora o una institución científico-técnica no es otro que el capital humano, medido en este caso por su nivel científico-técnico y prestigio profesional.

La cultura existente en el mundo de la investigación, tanto a nivel de concesión de ayudas como de admisión de publicaciones científico-técnicas en revistas a través del proceso de *referees*, ha asimilado hace mucho tiempo las segundas opiniones expertas anónimas. Resulta asombroso que para la concesión de ayudas relativamente insignificantes a la investigación en España las propuestas sean evaluadas minuciosamente por equipos de evaluadores de alto nivel y sin embargo proyectos costosísimos, privados y públicos, carezcan de revisiones expertas externas. La incorporación de estas segundas opiniones expertas externas por las empresas o administraciones, con garantía de confidencialidad a través de paneles pluridisciplinarios anónimos de alto nivel, sería altamente positiva en muchos aspectos, tanto para los promotores como para la ciudadanía, y, por el mero hecho de existir, mejoraría sustancialmente la calidad de los proyectos e incluso sus costos.

Esta segunda opinión, anónima y de alto nivel, debería ser incorporada también por los colegios profesionales, vitalmente interesados en la excelencia de los proyectos y en evitar desastres, colegios que hoy por hoy se limitan simplemente a visar proyectos al margen de su idoneidad. Con ello lograrían dar una imagen de utilidad social basada en su compromiso con la sociedad y el buen hacer bien diferente que la que hoy por hoy transmiten, la de una defensa a ultranza de posiciones corporativas por encima del interés social si es necesario.

La conjunción de estas medidas apuntadas, sin duda mitigaría el riesgo de fallo humano.

La segunda gran lección que transmite Aznalcóllar, con daños elevadísimos y hoy por hoy asumidos en buena parte por los contribuyentes, es la de que toda instalación u obra que suponga un riesgo para las personas o el medio ambiente, depósito de residuos o presa hidráulica, debería cubrir estos posibles daños a través de la correspondiente póliza de seguro. Este es uno de los aspectos más positivos de la nueva Instrucción Técnica de 2000 que tras Aznalcóllar se ha aprobado en España. El interés de esta medida, ausente en las presas hidráulicas españolas, muchas de ellas privadas, no solo radica en la más elemental racionalidad social o ecológica ("quien

contamina paga"), sino en el hecho de que las propias aseguradoras, para fijar la póliza, deberían analizar el riesgo, con lo cual se incorporaría una salvaguarda más para los ciudadanos y el medio ambiente.

La tercera gran lección de Aznalcóllar es la relativa a la necesidad de revisión de los criterios de ubicación y diseño tanto en depósitos de residuos como en presas hidráulicas.

La minería tiene a menudo una rigidez notable a la hora de seleccionar emplazamientos alternativos, muy especialmente de las operaciones de arranque, ya que los yacimientos están donde los procesos geológicos los han puesto. Sin embargo, la posibilidad de emplazamientos para los depósitos de lodos es algo mayor, ya que admiten el transporte por soliductos; en Chile, p.e., los residuos de Minera Andina están a varias decenas de km de la mina. Es obvio que una parte importante de la notable alarma social generada por este accidente se debió a la ubicación de la balsa:

- a) Aguas arriba del Parque Nacional de Doñana, de importancia internacional por la riqueza y biodiversidad de su avifauna.

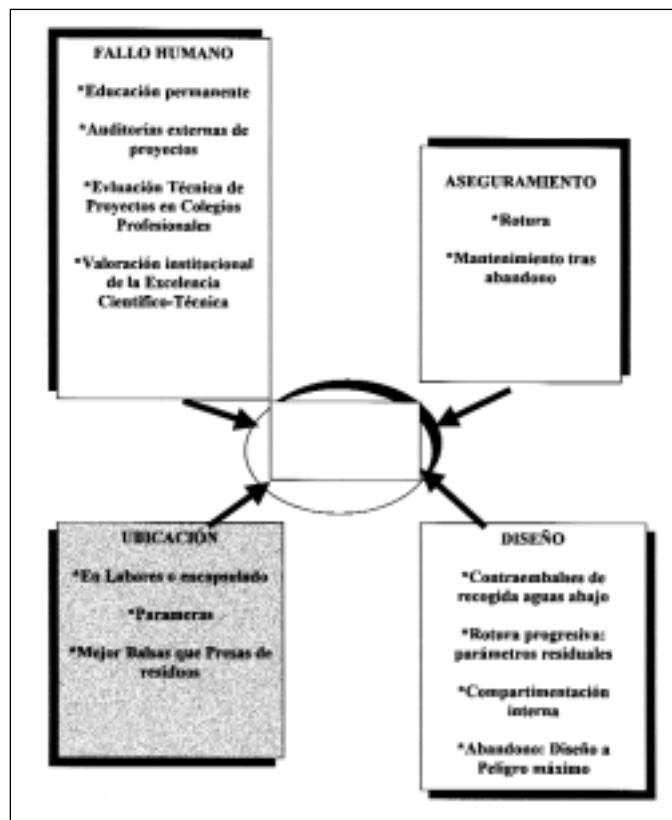


Fig. 16. Principales lecciones del accidente de Aznalcóllar
 Fig. 16. Main lessons coming from the Aznalcóllar accident

b) Junto a un río, el Agrío, inevitablemente alcanzado por el vertido y vector de transporte de la contaminación hacia el Parque.

Por tanto, el tema de la ubicación es central para el riesgo, ya que una parte sustancial de éste se debe a la propia ubicación, tanto como a la seguridad del propio depósito. En este sentido, las presas hidráulicas, condenadas a situarse en los cauces, carecen de margen de maniobra, razón por la cual, históricamente, la preocupación por la seguridad ha sido un tema central que ha originado una copiosa normativa que coordina a nivel internacional la ICOLD. Por tanto, la construcción de presas de residuos en los cauces, es intrínsecamente un emplazamiento de mayor riesgo que la de las balsas mineras. No obstante, en éstas, deberían priorizarse emplazamientos en parameras o zonas llanas desconectadas de la red fluvial, algo a menudo difícil. Por ello y lo antes comentado sobre los mayores impactos de estas roturas, una medida de minimización de los daños que probablemente se irá imponiendo puede ser la construcción en la red fluvial de presas de decantación tipo vertedero y/o desagüe abierto inmediatamente aguas abajo similares a las *check-dams* para retención de sedimentos, cuya función sería retener los vertidos accidentales de lodo (para ser después dispuestos de forma segura), e incluso los de agua contaminada en su caso si se proveen de mecanismos de alerta y cierre adecuados. Otra medida para minimizar el riesgo, que como antes se vio es proporcional al volumen vertido, puede ser la compartimentación interna de las balsas con espigones, que limitaría el vertido de aguas ácidas y el arrastre de los lodos de la parte alta de las balsas, que tal y como se ha mostrado, fue mayoritario en este caso.

Sin embargo, la mejor alternativa, y la que inicialmente debería evaluarse, es la colocación de los lodos en los propios huecos de explotación sincronizadamente con el avance de la misma en una variante de la minería de transferencia que puede utilizar los estériles gruesos para represar el lodo y drenar el agua, que una vez depurada debería ser reciclada al proceso.

Otra alternativa es la de encapsular los lodos en formaciones de muy baja permeabilidad como las arcillosas o pizarrosas. En cualquier caso, la adición de estabilizantes-cementantes a los lodos, siempre disminuirá su licuabilidad, y por tanto el riesgo de vertido por lo que se expuso.

Posiblemente, después de Aznalcóllar los proyectistas tengan en cuenta la rotura progresiva y la rotura en formaciones sedimentarias por superficies de estratificación y que no debería contarse con la cohesión en este tipo de terrenos, así como la probable

degradación de la resistencia de las formaciones por ataque ácido y la deficiente disipación de las presiones intersticiales que generan pantallas impermeabilizantes para evitar filtraciones tóxicas y sustratos de baja permeabilidad, algo que deberían considerar las reglamentaciones técnicas nacionales, inexistentes en no pocos casos. Pero no hay garantía alguna de que esto suceda así ni de que los proyectistas futuros conozcan los procesos involucrados en la estabilidad suficientemente. Y en cualquier caso está la seguridad de las estructuras ya construidas. En este sentido, cara a los residuos mineros, debería investigarse la licuabilidad en función del tiempo, el tipo de residuo y el tipo de rotura. Cara a las presas hidráulicas, debe subrayarse que en lo tocante a la rotura progresiva, fenómeno desconocido cuando se elaboró en 1964 la Instrucción Técnica de Presas con la que se han diseñado la mayor parte de las presas existentes en España sobre estas formaciones, estas presas carecen de un diseño seguro frente a estos aspectos y dada la importante población aguas abajo de las mismas, debería procederse a la revisión urgente de su seguridad.

Aunque indirectamente, el caso Aznalcóllar plantea con crudeza un problema pendiente en este tipo de estructuras y en las presas hidráulicas, el del diseño teniendo en cuenta la permanencia a muy largo plazo de estas estructuras terminada su vida útil, el problema del abandono (Ayala-Carcedo, 1999). ¿Puede garantizarse indefinidamente su seguridad y estabilidad con diseños de seguridad hidrológica a 500 años como contemplan las legislaciones, o a 100 como era habitual hasta la década de 1980? La respuesta es no, especialmente en las estructuras de materiales sueltos donde el desbordamiento supone la ruina de la estructura. Por tanto, salvo que se contemple en el propio proyecto, con su dotación económica correspondiente, la demolición de la estructura (¿a dónde se llevarían sus desechos, lodos de planta en las balsas, sedimentos en las presas hidráulicas?), el diseño de todas estas estructuras, singularmente las que comportan mayor riesgo, las de Clases A y B, debe hacerse a peligro máximo posible, incluido el sísmico, y preverse en el propio proyecto las grandes reparaciones post-abandono para garantizar la seguridad tras el mismo. En este sentido, ni la nueva legislación minera de 2000 en España ni la hidráulica existente en 2003, garantizan adecuadamente a muy largo plazo la seguridad humana o ecológica. En el caso de las presas hidráulicas en países semiáridos con altas tasas de erosión-sedimentación como es el caso de España, es incluso muy probable -en contra de lo que en principio podría suponerse- que el efecto debido a los lodos sedimentados tras una rotura,

lodos mucho menos consolidados que en los depósitos mineros, sea significativamente peor que en éstos, con cementaciones a menudo crecientes con el tiempo y por tanto menos licuables, y con lámina de agua con mucho menor poder de erosión y arrastre por su altura mucho menor.

El CEDEX (30/12/99) sugirió a consecuencia de su análisis geotécnico de Aznalcóllar que debería considerarse para estas estructuras la elevación del Factor de Seguridad de 1,4 a 1,6-1,8, algo que podría cubrir en muchos casos el diseño a peligro máximo sugerido y que en esta lógica debería aplicarse también a las presas hidráulicas, mucho más peligrosas desde el punto de vista del riesgo humano al producir caudales punta mucho mayores, que quedarían automáticamente fuera de condiciones de seguridad en su práctica totalidad, y España tiene más de 1.200 grandes presas. El análisis de este caso, pone de relieve que la utilización del criterio geotécnico habitual en este tipo de formaciones calculando con parámetros residuales ($C = 0, \phi'_R$), junto a los Factores de Seguridad habituales, basta para asegurar la estabilidad de forma suficiente, siempre y cuando las sollicitaciones contempladas correspondan a criterios en relación con el riesgo aguas abajo. La evolución hacia criterios de diseño según el riesgo aguas abajo en presas hidráulicas, que incorpora en los casos de alto riesgo el diseño a peligro máximo (Berga, 1998), en cualquier caso, debería ir siendo recogido en la legislación minero-metalúrgica e industrial específica en todo el mundo, algo que solo en parte ha recogido la nueva Instrucción Técnica de 2000 en España, como antes lo hizo la legislación hidráulica en 1996, al clasificarlas con este criterio. En cualquier caso, la problemática ligada a procesos de rotura progresiva y en formaciones sedimentarias que ha puesto de manifiesto el caso Aznalcóllar no debería ser olvidada en las administraciones hidráulicas de todo el mundo, que probablemente recuerden la rotura de la presa hidráulica de Carsington en el Reino Unido por esta causa (Skempton y Vaughan, 1993). En realidad, lo razonable sería proceder a nivel mundial a la revisión de la seguridad de las estructuras mineras e hidráulicas situadas sobre formaciones susceptibles de rotura progresiva y/o en formaciones sedimentarias tipo roca blanda.

Otra lección que transmite el caso Aznalcóllar es la relativa a la inexistencia, tanto en España como en la UE, de una Normativa para la Gestión de Desastres -tecnológicos y ecológicos- e Investigación de los mismos. En este sentido, la gestión de Planes de Emergencia contemplada en la vigente legislación de presas últimamente, es ampliamente insuficiente ante desastres de cierta envergadura y no contempla

la investigación de los mismos con garantías de objetividad y pluridisciplinariedad suficientes. Igual sucede con la creación de Comités Científicos de seguimiento coordinados por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas de los desastres que se crearon en este caso y en el del petrolero Prestige; siendo útiles y convenientes, su labor se focaliza sobre los efectos, pero deja las causas sin investigar.

Una de las consecuencias de este hecho, es que no se aprende institucionalmente de los desastres; el resultado es que se está condenado a repetirlos, y en este sentido España, donde parece aplicarse el viejo refrán de que "no hay mayor ciego que el que no quiere ver", es un caso paradigmático, ya que el accidente de Aznalcóllar de 1998, considerado unánimemente como el mayor desastre ecológico de la historia de España en su momento, ha sido seguido en noviembre de 2002, tan solo cuatro años después, por otro accidente mayor, el naufragio del petrolero Prestige, que ha contaminado todo el litoral atlántico septentrional español y parte del francés. Tanto Aznalcóllar como el Prestige, han provocado, objetivamente, una grave erosión del crédito institucional en la opinión pública -el Ministerio de Medio Ambiente español creado en 1996 ha sido impotente para evitar los dos mayores desastres ecológicos en España- y monumentales polémicas políticas y sociales que volverán a repetirse la próxima vez si no se articulan mecanismos institucionales.

Debería ser motivo de reflexión, institucional y social, que desastres que han conmocionado la opinión pública y han costado a los contribuyentes cientos de millones de euros no hayan generado no ya informes de síntesis globales desde la Administración sino ni tan siquiera la mera intención de realizados. Que se sigan barajando tres cifras distintas para datos clave como el volumen de lodo o el de agua, es un dato suficientemente significativo. A este respecto, baste recordar que el accidente del Titanic en 1912, generó dos informes globales, elaborados por sendas Comisiones de Investigación, que cambiaron las reglas de diseño de buques (Ayala-Carcedo, 2002 b). ¿Hemos progresado a este nivel, o más bien, hemos retrocedido?

Ahora que estas polémicas han ido apagándose es el momento de articular legalmente estos procedimientos, que si en lo relativo a la gestión deberían pivotar sobre los gobiernos nacionales y autonómicos (y en su caso la Comisión Europea cuando el desastre sea transfronterizo), en lo relativo a la creación de Comisiones Técnicas de Investigación necesariamente pluridisciplinarias para impedir la acción de los corporativismos profesionales e institucionales que tratan de sesgar interesadamente las conclusio-

nes deberían ser gestionadas por el Parlamento, quizá a través de la creación de un instituto *ad hoc* de forma similar a lo que pasa con la energía nuclear-instituto que también podría coordinar los Comités Científico-Técnicos de seguimiento aprovechando todo el capital humano existente en España y el mundo- y una Ley de Desastres. La mera existencia de estos procedimientos, ayudaría sustancialmente a los procedimientos judiciales que todos estos casos suelen provocar.

Referencias

- Alonso, E. y Gens, A. 2001 a. Dinámica de una rotura en arcillas sobreconsolidadas. *V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, CEDEX, 1353-1370.
- Alonso, E. y Gens, A. 2001 b. Rotura en arcillas sobreconsolidadas. *V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, CEDEX, 1169-1230.
- Ayala-Carcedo, F.I. 2002 a. Lecciones de Aznalcóllar. *Diario El Mundo*, Madrid, sábado 27 de abril.
- Ayala-Carcedo, F.I. 2002 b. El hundimiento del Titanic. En Ayala-Carcedo y Oleina Cantos eds., *Riesgos Naturales*, Ariel, Barcelona, 1121-1128.
- Ayala-Carcedo, F.J. 2002 c. Sifonamiento y licuación de suelos. En Ayala-Carcedo y Oleina Cantos eds., *Riesgos Naturales*, Ariel, Barcelona, 465-473.
- Ayala-Carcedo, F.I. 2002 d. Análisis de riesgos por movimientos de ladera. En Ayala-Carcedo y Oleina Cantos eds., *Riesgos Naturales*, Ariel, Barcelona, 379-410.
- Ayala-Carcedo, F.J. 2001 a. La Excelencia Corporativa Industrial en la Era de la Globalización y el Desarrollo Sostenible, *Industria y Minería*, Asoc. Nac. Ingen. Minas, 345, 23-29.
- Ayala-Carcedo, F.I. 2001 b. La Ordenación del Territorio en la prevención de catástrofes naturales y tecnológicas. Bases para un procedimiento técnicoadministrativo de evaluación de riesgos para la población. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 30, 37-50.
- Ayala-Carcedo, F.I. 2001 c. Natural Disasters Mitigation and Sustainable Development: a Risk Analysis Approach. *Boletín Geológico y Minero*, 112(4), 4364.
- Ayala-Carcedo, F.J. 1999. La Evaluación de Impacto Ambiental de embalses, diez años después, *Tecnoambiente*, 87.
- Ayala-Carcedo, F.I. y Rodríguez Ortiz, I. 1986. Manual para el Diseño y Construcción de Escombreras y Presas de residuos Mineros, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 82 pp.
- Ayala-Carcedo, F.I. 1986. Técnicas actuales de diseño y construcción de presas de residuos mineros, metalúrgicos y energéticos. *Industria Minera*, Asoc. Nac. Ingen. Minas, 5-24.
- Ayala-Carcedo, F.J. y del Valle, I. 1984. Análisis de la rotura de un depósito de residuos de minería de plomo abandonada y de la contaminación producida en el río Urumea, *VII Congr. Inter. de Minería y Metalurgia*, Asoc. Nac. de Ingen. Minas, Barcelona, Vol. 8, 77-87.
- Barettino, D. 2001 a. Introducción. Las aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcóllar. En Carrera y Mediavilla eds., *Las aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcóllar*. *Boletín Geológico y Minero*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 112, 94-95.
- Barettino, D. 2001 b. Introducción. Los suelos del Guadiamar: estudios de caracterización y de la evolución de los suelos contaminados por el lodo. En Carrera y Mediavilla eds., *Las aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcóllar*. *Boletín Geológico y Minero*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 112, 164-166.
- Benito Calvo, A., Benito Fernández, G., Gallart, F., Martín-Vide, I.P., Regües, D. y Bladé, E. 2001. Análisis del riesgo del transporte fluvial de los lodos mineros residuales del vertido de Aznalcóllar en el valle medio-bajo del río Guadiamar. *Rev. Soco Geol. España*, 14(1-2), 89-100.
- Berga, L. 1998. Declaraciones a La Vanguardia, Barcelona, el 20 de junio.
- Berga, L. (Ed.). 1998. *Dam Safety*. Balkema, Rotterdam, 2 Vols.
- Bjerrum, L. 1966. *Mechanism of progressive failure in slopes of overconsolidated plastic clays and clay shales*. Third Terzaghi Lecture, ASCE, Feb. 1.
- Bjerrum, L. 1966. *Mechanism of progressive failure in slopes of overconsolidated plastic clays and clay shales*. Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, 67 pp.
- Borja, F. y Vives, R. 2001. Marco geográfico. En Carrera y Mediavilla eds., *Las aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcóllar*. *Boletín Geológico y Minero*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 111, 14-19.
- Botín, I.A. y Ramírez-Oyanguren. 1999. Mecanismos de rotura del depósito de estériles de Aznalcóllar. *Industria y Minería*, Consejo Superior de Colegios de Ingenieros de Minas de España, Madrid, 335, 25-32.
- Carranza, F. 2001. El accidente minero de Aznalcóllar. *Rocas y Minerales*, Madrid, agosto, 157-165.
- Carrera y Mediavilla. (Eds.). 2001. *Las aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcóllar*. *Boletín Geológico y Minero*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 111.
- Carrera, I., Ayora, C. y Alcolea, A. 2001. Barrera Geoquímica. Introducción. En Carrera y Mediavilla eds., *Las aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcóllar*. *Boletín Geológico y Minero*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 111, 229-230.
- Carrero, G. y Vázquez, E.M. 2001. Restauración edáfica y morfológica de la llanura aluvial y ribera. En Carrera y Mediavilla eds., *Las aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcóllar*. *Boletín Geológico y Minero*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 112, 114-121.
- Costa, I.E. 1987. Floods from dam failures. En Baker, Kochel & Patton eds., *Flood Geomorphology*, Wiley, NY, 439-465.
- Davis, M.P. 2002. Tailings Impoundments Failures: Are Geotechnical Engineers Listening? *Waste Geotechnics*, University of British Columbia, Vancouver, September.
- Departamento de Agronomía, UCO. 1999. *Experimentación para el diagnóstico y recuperación de los suelos afectados en la cuenca del río Guadiamar*. Informe de resultados.

- Dermott, R.K. y Sibley, I.M. 2000. The Aznalcóllar tailings dam accident -A case study. *Mineral Resources Engineering*, Vol. 9, 1, 101-108.
- Elías, C. 2001. Periodismo especializado en medio ambiente: el caso Doñana como paradigma de manipulación informativa. *Ambitos*, 6, 10 trimestre, 279-303.
- Eriksson, N. y Adamek, P. 2000. The tailings pond failure at the Aznalcóllar mine, Spain. *Sixth Intern. Symposium in Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production*, Calgary, Canada.
- Estaire, I., Olalla, C. y Cuéllar, V. 2001. Análisis de la rotura progresiva mediante la técnica de elementos finitos. V *Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, CEDEX, 1385-1398.
- Europa Press. 2002. Declaraciones de José Azpelicueta, responsable de Relaciones Institucionales del Grupo Dragados. 6 de agosto de 2002.
- Feasby, G., Chambers, D., Fernández Rubio, R. y Gascó, I. 1999. Environmental impact and reclamation planning following the April 25, 1988 accidental tailings release at Boliden Apirsa mine at Aznalcóllar, Spain. *Proceed. of Mine, Water & Environment*, Sevilla, Spain, 279-290.
- Galache, I. y Mediavilla, C. 2001. Actuaciones para el tratamiento y eliminación de aguas en Entremuros. En Carrera y Mediavilla eds., Las aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcóllar. *Boletín Geológico y Minero*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 112, 39-45.
- Gallart, F., Benito, G., Martín-Vide, I.P., Benito, A., Frió, I.M.^a y Regües, D. 1999. Fluvial geomorphology and hydrology in the dispersal and fate of pyrite mud particles released by the Aznalcóllar mine tailings spill. *The Science of the Total Environment* 242, 13-26.
- Gómez de las Heras, I. 2001. El depósito de lodos de Aznalcóllar. En Carrera y Mediavilla eds., Las aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcóllar. *Boletín Geológico y Minero*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 112, 284-286.
- Greenpeace. 2001. *Doñana, 2 años después del vertido de Aznalcóllar*. 17 pp.
- Grima, I. 2001. Ensayos de permeabilidad en sondeos en la balsa de Aznalcóllar. En Carrera y Mediavilla eds., Las aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcóllar. *Boletín Geológico y Minero*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 112, 292-294.
- Grupo de expertos del CSIC y otros organismos. 2001. 130 Informe.
- Guijarro, A. y Sánchez, M. 2001. Depuración y eliminación del agua retenida en Entremuros. En Carrera y Mediavilla eds., Las aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcóllar. *Boletín Geológico y Minero*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 112, 124-128.
- Gumiel, P. 2001. Aspectos geométricos y cinemáticos de las estructuras de deformación observadas en las calicatas en el área de la rotura de la balsa de lodos de Aznalcóllar. En Carrera y Mediavilla eds., Las aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcóllar. *Boletín Geológico y Minero*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 112, 286-292.
- Heras, C. de las, Olalla, C. y Cuéllar, V. 2001. Estudio sobre las presiones intersticiales en arcillas preconsolidadas en la cuenca del Guadalquivir. V *Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, CEDEX, 1371-1384.
- ICOLD, International Commission of Large Dams.
- Janbu, N. 1973. Slope Stability Computations. En Hirschfield & Poulos eds., *Embankment Dam Engineering*. Casa grande Volume, John Wiley & Sons, NY, 4786.
- Lambe, T.W. y Withman, Rv. 1972. Mecánica de suelos. Limusa-Wiley, México, 582 pp.
- Leonards, G.A. 1962. *Foundation Engineering*. McGraw-Hill, 1136 pp.
- Lloret, A. 1989. Propiedades y ensayos de suelos y rocas. En Corominas ed. *Estabilidad de taludes y laderas naturales*. Sociedad Española de Geomorfología, monografía N° 3, 31-80.
- López Pamo, E., Baretino, D., Ortiz, G., Arranz, I.C., Martínez Pledel, B. y Martín Rubí, J.A. 2001. Cartografía y cubicación de los lodos mineros vertidos en la cuenca del río Guadiamar y su caracterización química y mineralógica. En Carrera y Mediavilla eds., Las aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcóllar. *Boletín Geológico y Minero*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 112, 95-102.
- Lord, E.R.F. y Liu, Y. 1998. Depositional and geotechnical characteristics of paste produced Tom oil sands tailings. En *Tailings and Mine Waste*, Balkema, Rotterdam, 147-157.
- McGrath, F.S. y Lambe, P.C. 1998. True cohesion of recently deposited phosphogypsum. En *Tailings and Mine Waste*, Balkema, Rotterdam, 329-338.
- Martín Vide, I.P. 1997. *Ingeniería fluvial*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Manzano, M., Custodio, E., Ayora, C. y Navarrete, P. 2001. Contamination of the Guadiamar river aquifer after the Aznalcóllar mine accident, SW Spain. *Boletín Geológico y Minero*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 111, 6, 93-106.
- Mediavilla, C. 2001. El acuífero Niebla-Posadas en el entorno del Guadiamar. En Carrera y Mediavilla eds. Las aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcóllar. *Boletín Geológico y Minero*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 111, 269-276.
- Ministerio de Industria y Energía. 2000. Orden de 26 de abril de 2000 por la que se aprueba la Instrucción Técnica Complementaria 08.02.01 del capítulo XII del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera "Depósitos de lodos en procesos de tratamiento de industrias extractivas". *Boletín Oficial del Estado*, 111, 17235-17244.
- Mora, A. y Serrano, I. 2001. Seguimiento y evolución de la calidad del agua de los ríos Agrío y Guadiamar. En Carrera y Mediavilla eds. Las aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcóllar. *Boletín Geológico y Minero*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 112, 131-136.
- Moreno, I. y Silgado, A. 2001. Retirada de los lodos en la zona afectada. En Carrera y Mediavilla eds. Las aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcóllar. *Boletín Geológico y Minero*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 112, 102107.

- Moya, I. 2001. Determinación de la geometría de la superficie de rotura en deslizamientos instantáneos: el caso de la balsa minera de Aznalcóllar. *V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, CEDEX, 1341-1352.
- Organismo Autónomo Parques Nacionales. 1998. La catástrofe del río Guadiamar: La rotura de las balsas de lodos de la explotación minera de piritas de Aznalcóllar arrasa los cultivos de la vega del río y amenaza al Parque Nacional de Doñana. *Montes*, 53, 21-32.
- Palancar, M. 2001. Marco Hidrológico. En Carrera y Mediavilla eds. Las aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcóllar. *Boletín Geológico y Minero*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 112, 24-28.
- Penman, A.D.M., Brook, D., Martin, P.L. y Routh, D. 2001. *Tailings Dams-Risk 01 Dangerous Occurrences, Lessons learnt from practical experiences*. UNEP/ICOLD, Paris, Bull. 121 of ICOLD, Paris, 144 pp.
- Perucho, A., Olala, C. y Cuéllar, V. 2001. Aplicación de las teorías de equilibrio límite al cálculo de estabilidad de taludes en materiales frágiles. *V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, CEDEX, 1399-1408.
- Rodríguez Ortiz, I. y Varona, P. 2001. Sobre el determinismo en Geotecnia. *V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, CEDEX, 1409-1420.
- Seed, H.B. y Lee, K.L. 1966. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. *Journ. of Soil Mechanics and Found. Divis. of the ASCE*, 92 (SM 6), 105-134.
- Skempton, A.W. 1964. Long-term stability of clay slopes. *Géotechnique*, 14,2, 77-101.
- Skempton, A.W. y Vaughan, P.R. 1993. The failure of Carsington Dam. *Géotechnique*, 43.
- Tsige, M. 1998. *Microlábrica y mineralogía de las arcillas azules del Guadalquivir: influencia en su comportamiento geotécnico*. Tesis Doctoral, Fac. de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 344 pp.
- Wagener, E.M., Craig, H.I., Blight, G., McPhail, G., Williams, A.A.B. y Strydom, I.H. 1998. The Merriespruit tailings dam failure-A review. En *Tailings and Mine Waste*, Balkema, Rotterdam, 925-952.

Recibido: septiembre 2003

Aceptado: diciembre 2004