

# El desastre de Aznalcóllar: ¿lodos o aguas ácidas?

## *Aznalcóllar disaster: muds or acid waters?*

Marcos Sanz-Ramos<sup>1a1\*</sup>, Ernest Bladé<sup>2a2</sup>, Josep Dolz<sup>3a3</sup> y Martí Sánchez-Juny<sup>4a2</sup>

<sup>1</sup>Institut FLUMEN, Universitat Politècnica de Catalunya – Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria. C/Gran Capità S/N, 08034 Barcelona, España.

E-mail: <sup>a1</sup>marcos.sanz-ramos@upc.edu, <sup>a2</sup>ernest.blade@upc.edu, <sup>a3</sup>j.dolz@upc.edu, <sup>a4</sup>marti.sanchez-juny@upc.edu

\*Autor para correspondencia

Recibido: 17/05/2021

Aceptado: 07/07/2021

Publicado: 31/07/2021

**Citar como:** Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Dolz, J., Sánchez-Juny, M. 2021. Aznalcóllar disaster: muds or acid waters?. *Ingeniería del agua*, 25(3), 229-239. <https://doi.org/10.4995/la.2021.15633>

## RESUMEN

La rotura de la balsa de estériles mineros del complejo de Aznalcóllar acaecida el 25 de abril de 1998 fue una catástrofe sin precedentes. Millones de metros cúbicos de un fluido complejo inundaron los cauces y riberas de los ríos Agrío, Guadiamar y, en menor medida, Guadalquivir. A pesar de ser uno de los eventos más estudiados, desde el punto de vista hidráulico todavía existen incertidumbres. Denominado como un vertido de «lodos» por diversos autores, otros tantos lo tratan como un fluido compuesto por «lodos» y por «aguas ácidas», ambos, según su denominación, con un comportamiento hidráulico distinto. En este trabajo se analiza la naturaleza del fluido vertido a partir de las grabaciones de vídeo realizadas durante el evento. Esto ha permitido establecer una primera clasificación según el comportamiento dinámico y estático observado. Según este análisis, el vertido se comportó más como un fluido hiperconcentrado de partículas en suspensión que como un fluido de lodo.

**Palabras clave** | Aznalcóllar, relaves mineros, fluido Newtoniano, fluido hiperconcentrado, vídeo-análisis.

## ABSTRACT

*The pond-break of the mining tails of the Aznalcóllar complex that occurred on April 25, 1998 was an unprecedented catastrophe. Millions of cubic meters of a complex fluid flooded the riverbeds and riverbanks of the Agrío, Guadiamar and, to a lesser extent, Guadalquivir rivers. Despite being one of the most studied events, from the hydraulic point of view there are still uncertainties. Denominated as a “muds” spill by several authors, many others treat it as a fluid composed of “muds” and “acidic waters”, both, according to their name, with different hydraulic behavior. This work analyzes the nature of the fluid spilled from the video-recordings made during the event. This has made it possible to establish a first classification according to the dynamic and static behavior observed. According to this analysis, the spill reveals that the fluid behaved more like a highly concentrated sediment-laden flow than like a mud flow.*

**Key words** | Aznalcóllar, mine tailings, Newtonian fluid, hyperconcentrated fluid, video-analysis.

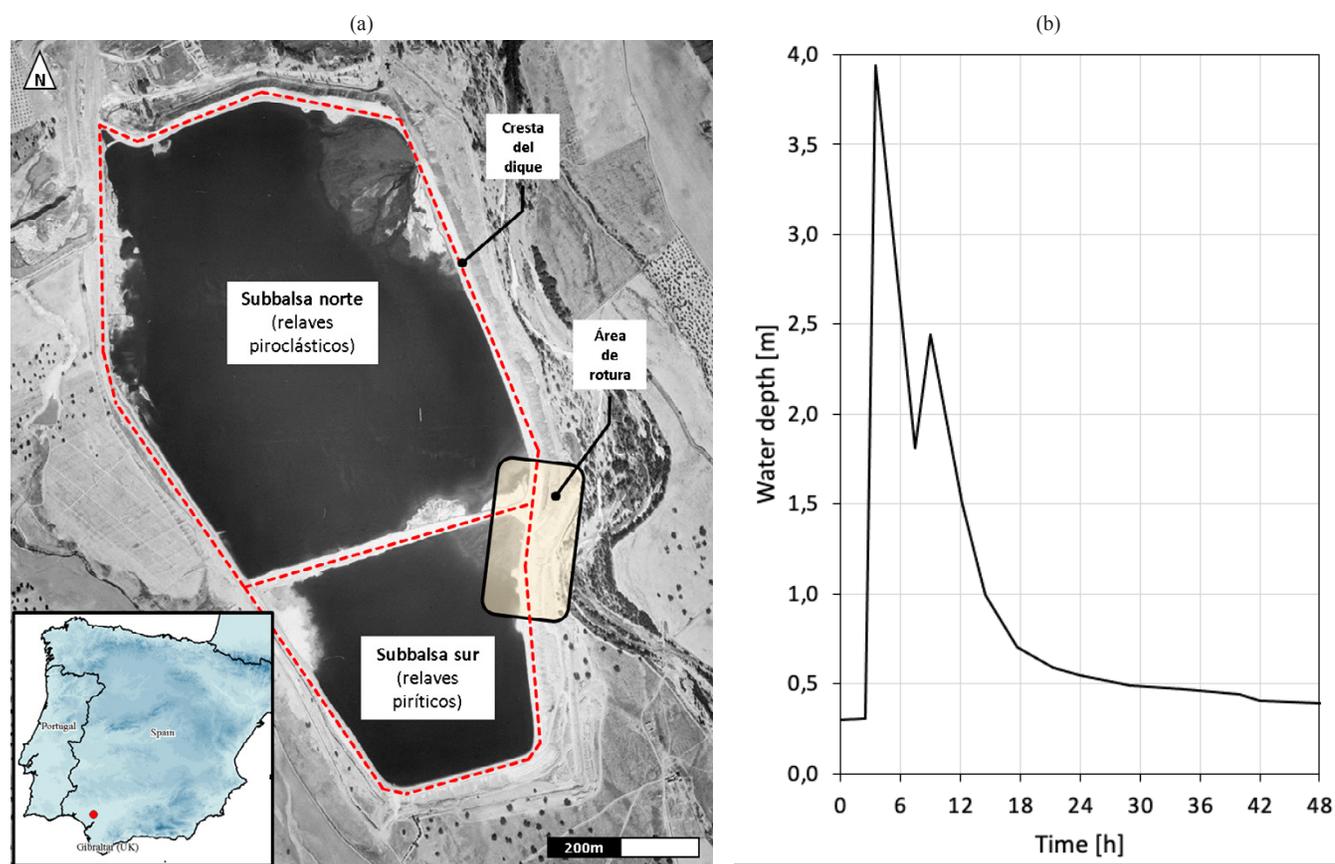
## INTRODUCCIÓN

La madrugada del 25 de abril de 1998, uno de los diques de la balsa que almacenaba los estériles del complejo minero de Aznalcóllar colapsó, abriendo una brecha que permitió la salida de millones de metros cúbicos de un fluido complejo (CMA, 1998). El vertido fluyó inundando a su paso el lecho y las riberas del río Agrio, primero, del río Guadiamar, después, hasta finalmente alcanzar el río Guadalquivir (Grimalt *et al.*, 1999; OAPN, 1998). El vertido llegó incluso a la parte septentrional del Parque Nacional de Doñana (CMA, 1998), y la magnitud de la catástrofe pudo ser peor de no ser por los esfuerzos llevados a cabo para detenerlo (AGE y JA, 1999).

Considerado en aquel entonces uno de los desastres mineros más catastróficos de la Península Ibérica (CSIC, 2008), fue el segundo a nivel mundial por volumen vertido (Turner *et al.*, 2002), y actualmente sigue siendo el más voluminoso en Europa (Nikolic *et al.*, 2011) y el quinto a nivel mundial (WISE, 2020).

En las más de 400 publicaciones científicas sobre el desastre (Madejón *et al.*, 2018), parece existir un consenso general en algunos aspectos hidráulicos (volumen derramado, longitud y área afectada, naturaleza del fluido, etc.), pero todavía quedan algunas incertidumbres. En cuanto a la tipología del fluido liberado desde la balsa, y a su comportamiento a lo largo de los cauces, ha sido generalmente denominada como «lodo». Sin embargo, la rotura del dique afectó a las dos subbalsas de la que estaba compuesta la estructura (Figura 1a), y ambas contenían dos tipos de fluidos de características muy diferentes (Alonso y Gens, 2006a; Ayala-Carcedo, 2004). En la subbalsa norte se hallaban relaves piroclásticos, mientras que en la sur se almacenaban relaves piriticos (Figura 1a).

Es esperable que, al movilizarse, ambos fluidos se comportasen de forma diferente. Puesto que la rotura fue casi instantánea (Alonso y Gens, 2006b) afectando al dique este de la subbalsa sur y al dique central que las separaba (Figura 1a), ambos fluidos



**Figura 1** | Ubicación y características geométricas de la balsa (a). Limnigramma registrado en la estación de aforo EA90 de El Guijo, adaptado de Borja *et al.* (2001).

fueron liberados casi simultáneamente. Por tanto, previsiblemente ambos se mezclaron comportándose como un único fluido, al menos en los primeros instantes.

Diversos autores (Arenas et al., 2008; CSIC, 2008; Grimalt et al., 1999; Hudson-Edwards et al., 2003; entre otros) sustentan la teoría de que el derrame se produjo en dos fases claramente diferenciadas: primero una más fluida, referenciada en la literatura como «aguas ácidas»; y una segunda más viscosa, denominada como «lodos». Esto podría haberse utilizado para justificar el hecho de que se registraron dos picos de avenida en la estación de aforo EA90 de El Guijo (Figura 1b), situada 7,1 km aguas abajo del punto de rotura (Borja et al., 2001). Sin embargo, la escasa estabilidad de las paredes de los materiales todavía retenidos en la balsa (Alonso y Gens, 2006a; Ayala-Carcedo, 2004; Gens y Alonso, 2006), podría justificar también la generación de un segundo frente de avenida con nuevo aporte de material, y no necesariamente formado únicamente por lodos.

Esta distinción entre fluidos es ampliamente utilizada en la bibliografía debido a que los «lodos» quedaron depositados en una extensión determinada, mientras que fueron catalogadas como «aguas ácidas» aquel fluido que, con características sensiblemente diferentes, alcanzaron distancias más lejanas. Sin embargo, esta consideración fue realizada con datos post-evento, asumiendo, en muchos casos, que se trató de un vertido de «lodos», mientras que, en otros tantos, fue un fluido compuesto por «aguas ácidas» y «lodos». Ambos, según su denominación, deberían tener un comportamiento hidráulico distinto.

El presente trabajo tiene por objetivo ahondar en la naturaleza del fluido vertido y establecer una primera clasificación según el comportamiento dinámico y estático observado. Para ello, se han recopilado y analizado diversos vídeos que muestran el fluido, tanto durante el evento como en días posteriores. A pesar de la escasez y calidad de las imágenes, así como la subjetividad en su interpretación, los autores están convencidos del valor documental de las imágenes registradas para poder extraer la mayor información posible y poder determinar la naturaleza del fluido derramado.

---

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Fuentes audiovisuales

Las fuentes audiovisuales que registraron el desastre fueron escasas. Los posibles motivos fueron que: el incidente ocurrió a altas horas de la madrugada; los medios técnicos de la época eran limitados; existía un déficit de recursos tecnológicos (p.ej. grabaciones de vídeo-aficionados o el uso de teléfonos móviles); la escasa cobertura en algunos de los medios nacionales; la falta de personal cualificado para abordar la temática en los medios; y el desconocimiento del lugar donde se realizó la grabación. Además, la cobertura del desastre se centró mayoritariamente en los daños causados, mostrando por ejemplo imágenes de los lodos depositados en campos o entrevistas a los afectados, y no tanto en registrar el movimiento de la avenida.

Por un lado, se contactó con Canal Sur Radio y Televisión (Radiotelevisión Pública de Andalucía, RTVA) y con el Fondo Documental de Radiotelevisión Española (RTVE), que fueron principalmente los medios televisivos de dieron cobertura del desastre. Por otro lado, se hicieron diversas búsquedas online (mayoritariamente en YouTube) basadas en una serie de palabras clave aisladas o combinación de ellas, como por ejemplo Aznalcóllar, desastre, lodos, rotura, mina, relaves, etc.

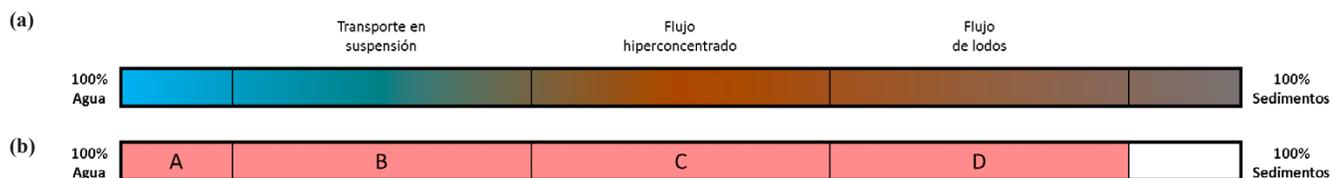
En total se han documentado 17 vídeos con una duración total superior a las 2 horas, y cuya publicación corresponde mayoritariamente a noticieros y reportajes especiales de RTVA y RTVE. La calidad de los vídeos varía significativamente entre las diversas fuentes ya que, por un lado, muchos vídeos fueron registrados con cámaras sin un pie fijo, variaciones de zoom, movimientos de cámara e incluso desde un helicóptero. Por otro lado, los vídeos han sido digitalizados para su almacenaje en los fondos documentales revisados, siendo todos ellos de escasa resolución ya que provenían de formatos magnéticos.

El visionado de vídeos se llevó a cabo, en primera instancia, para determinar el momento en el vídeo en el que aparecía el fluido en las imágenes. En aquellos momentos en los que se indicó el lugar de grabación, o era posible reconocer el mismo mediante aplicaciones como Google Maps®, Google Street View® y/u ortofotos de PNOA (IGN, 2021), se geolocalizó su posición. Asimismo, si el instante en el que se realizó la grabación fue indicado, se dató temporalmente. Finalmente, se clasificó según el comportamiento observado.

## Clasificación del fluido vertido

El comportamiento dinámico y estático de un fluido es función, entre otras propiedades y componentes, de su relación agua-sedimento (Hungry et al., 2001; Pierson y Costa, 1987). En el campo de la ingeniería de ríos, se suele emplear un criterio basado en la concentración de partículas de manera que, hasta 100-200 g/L se considera que el fluido mantiene las propiedades del agua (fluido Newtoniano). Para concentraciones superiores a 500 g/L, el fluido se comporta como un lodo o *debris* (fluido no-Newtoniano). Por tanto, estados intermedios corresponderían a fluidos hiperconcentrados, siendo dicho estado función de la composición del propio fluido (Beverage y Culbertson, 1964; Costa, 1998; Nemeč, 2009).

La Figura 2a muestra una propuesta de diagrama en el que se clasifica el fluido en función del contenido de agua y partículas, considerando este último una única componente. Puesto que el tamaño de las partículas de los relaves mineros retenidos en la balsa no era superior a las 200  $\mu\text{m}$  (CMA, 1998), siendo este valor reajustado posteriormente a valores entre 4,5 y 13  $\mu\text{m}$  (Antón-Pacheco et al., 2001; Gallart et al., 1999; López-Pamo et al., 1999; Madejón et al., 2018; Manzano et al., 2000; Vidal et al., 1999), el transporte de partículas fue principalmente por suspensión. Según lo observado en los vídeos, la caracterización del fluido pudo restringirse hasta flujo de lodos (Figura 2b). Aunque los límites entre los diferentes tipos de fluido son cualitativos, ilustran la composición relativa de la mezcla agua-sedimento.



**Figura 2** | Diagrama de partículas en suspensión-agua (a). Tipos de fluidos identificados en los vídeos (coloreado en rojo) y analizados en este trabajo según la clasificación indicada (letras A, B, C y D) (b).

El criterio empleado para clasificar el fluido vertido desde la balsa se ha basado en las características reológicas, en particular, en la preservación, o no, de las propiedades Newtonianas. Aunque en la naturaleza resulta difícil, casi imposible, encontrar fluidos puramente Newtonianos, en los que su viscosidad puede considerarse constante, está ampliamente aceptado en el campo de la ingeniería fluvial que el agua, en su estado natural, se comporta como un fluido Newtoniano. Este mismo criterio ha sido empleado en este trabajo.

De este modo, los tres tipos principales de fluidos considerados son: «agua», correspondiente a un comportamiento tipo Newtoniano; «lodos», considerados como fluidos no-Newtonianos; y, finalmente, «fluido hiperconcentrado» como un estado intermedio entre los dos anteriores (Beverage y Culbertson, 1964; Costa, 1998; Nemeč, 2009).

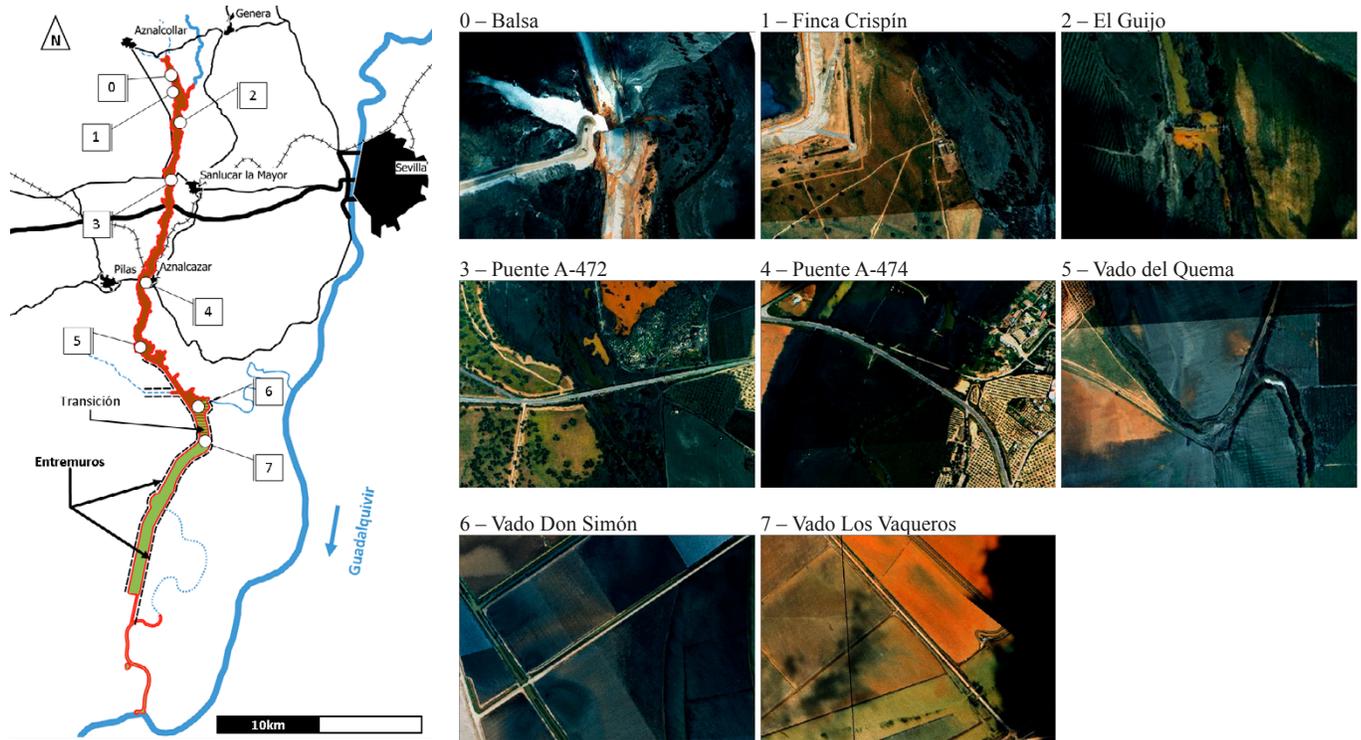
El comportamiento del fluido registrado en los vídeos ha sido analizado desde un punto de vista cualitativo. Para *fluido Newtoniano* se distinguieron dos tipologías: A, o *agua clara*, cuando el fluido observado parece agua sin o con poca carga de partículas en suspensión; y B, o *agua no-clara*, para el fluido tipo agua con cierta concentración de partículas en suspensión, como en los ríos naturales. La clase C, o *fluido hiperconcentrado*, se utilizó para flujos cargados de partículas altamente concentrados, es decir, un estado de transición entre fluido Newtoniano y no-Newtoniano (Beverage y Culbertson, 1964). Finalmente, la clase D, o *fluido no-Newtoniano*, se refiere a un fluido que parece comportarse como un lodo tanto en una situación dinámica como estática. De este modo, en función de la imagen registrada, pudo clasificarse el comportamiento del fluido como uno de las tipologías previas (por ejemplo, A, B, etc.) o como combinación de diferentes tipos de comportamiento (por ejemplo, B/C, B/C/D, etc.).

## RESULTADOS

### Análisis de los vídeos

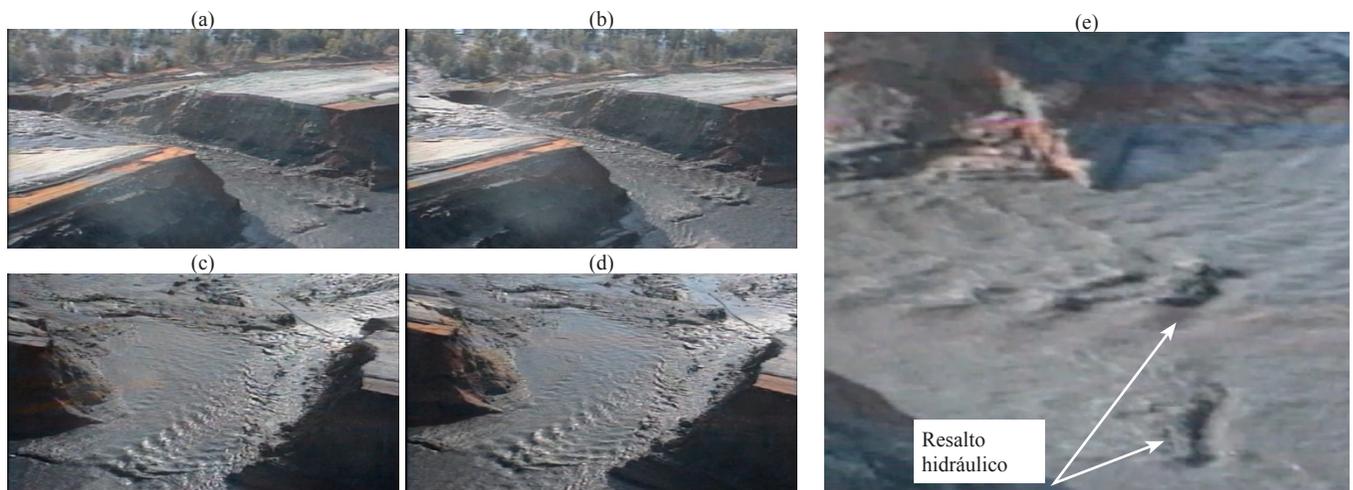
Por cuestiones de derechos de autor, la fuente documental de RTVE tan solo pudo ser consultada pero no puede ser reproducida íntegra o parcialmente. Las imágenes que se muestran a continuación provienen del resto de fuentes consultadas y, a pesar de ser solo 6 de los 17 vídeos analizados, son igualmente válidas para ilustrar el comportamiento del fluido.

Durante el visionado se realizó un filtrado de imágenes recurrentes para evitar duplicidades en la contabilización y análisis de datos. Cada vídeo contiene entre 1 y 34 referencias al fluido derramado con imágenes en distintas ubicaciones e instantes de tiempo. En total existen 136 instantes en los que el fluido fue registrado, 38 de las cuales pudieron ser georreferenciados según las ubicaciones de la Figura 3. Debido a que el número de instantes analizados es considerable, a continuación se muestran los más representativos.



**Figura 3** | Mapa esquemático de la máxima área inundada (línea roja) distinguiendo el tipo de fluido observado tras el evento: «lodos» (color marrón) y «aguas ácidas» (color verde) (adaptación de: Junta de Andalucía, JA, 2003). Imágenes aéreas de las 8 ubicaciones que pudieron ser identificadas en los vídeos (fuente: Junta de Andalucía, JA, 2003).

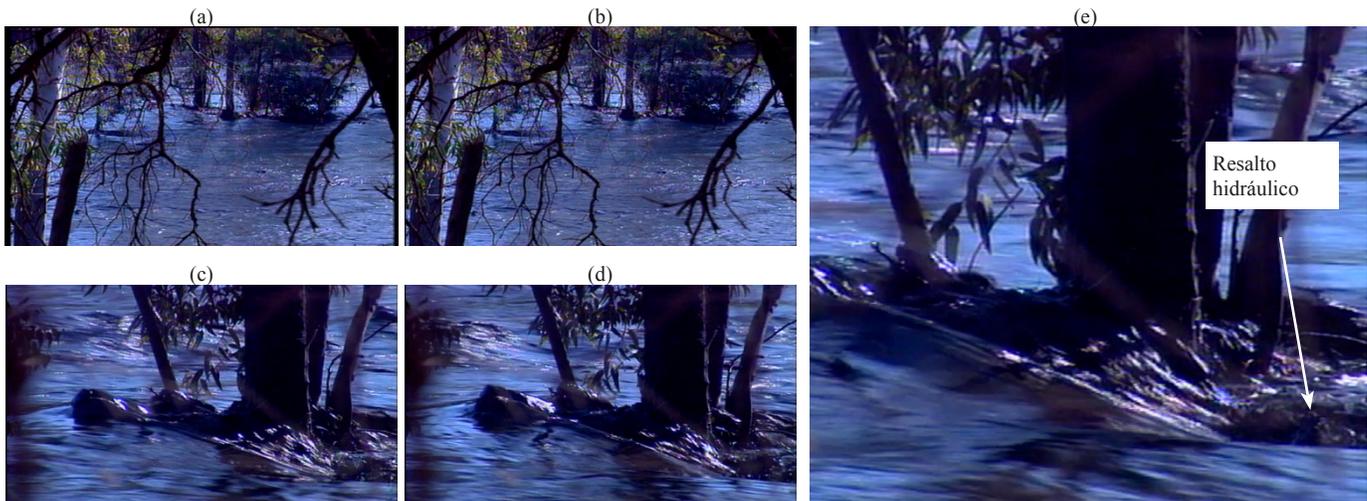
En la secuencia de imágenes de la Figura 4 se puede observar cómo el fluido continuaba saliendo de la balsa. Su aspecto oscuro denota una alta presencia de partículas en suspensión (*fluido hiperconcentrado*), pero se aprecian estructuras hidráulicas en el flujo que indican una viscosidad relativamente baja. Las imágenes, extraídas del noticiero de las 14:30 h de RTVA del 25 abril,



**Figura 4** | Comportamiento del fluido (ubicación #0): presencia de régimen rápidamente variado en la brecha de la balsa.

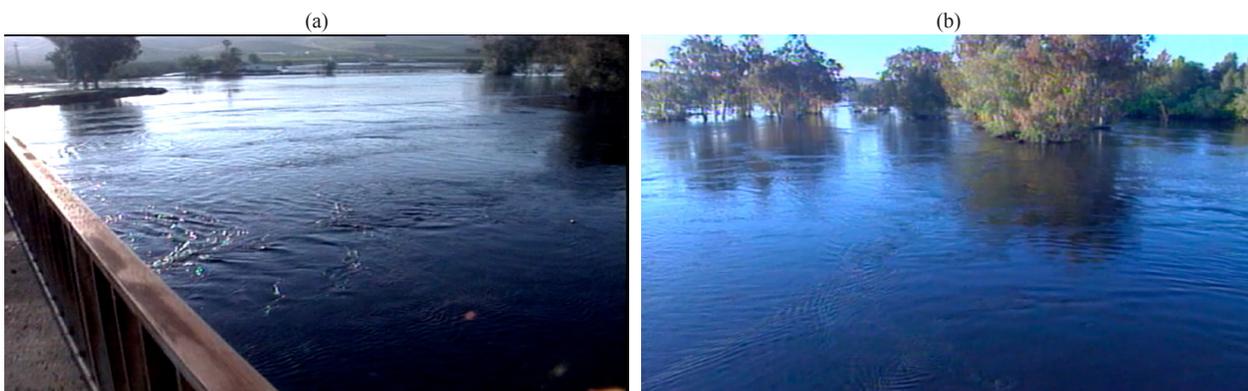
corresponden al vídeo grabado desde un helicóptero horas después del incidente. Tomando como referencia la incidencia solar en los diques de la balsa (aproximadamente proveniente de dirección  $90^\circ$  E según la proyección de las sombras), y teniendo en cuenta que el azimut y la hora aproximada de salida del Sol fueron aproximadamente  $72^\circ$  ENE y las 7:20 h, respectivamente, el vídeo plausiblemente se grabó entre las 8:00 y las 10:00 h.

Otras imágenes del mismo noticiero muestran, cerca de la Finca Crispín (ubicación #1), cómo el fluido se propagaba con una lámina relativamente horizontal (Figura 5). El fluido se veía alterado por la presencia de árboles y otra vegetación de ribera, donde se pueden apreciar nuevamente estructuras hidráulicas características de fluidos con una alta carga de partículas, pero sin llegar a ser tipo lodo. Estas imágenes, tomadas a pie de campo, se grabaron alrededor de las 9:00 h según el informante.



**Figura 5** | Comportamiento del fluido (ubicación #1): presencia de régimen rápidamente variado en los alrededores de la Finca Crispín, en el río Agrio.

En la edición del programa “Los Reporteros” de RTVA del 3 de mayo de 1998 se muestran imágenes desde el puente de la carretera A-472 (Figura 6), situado en las cercanías de la localidad de Sanlúcar la Mayor (ubicación #3). Se aprecia cómo la avenida era menos energética, siendo la lámina de agua prácticamente horizontal y ocupando todo el ancho del cauce y parte de sus riberas, pero el fluido seguía estando muy cargado de partículas en suspensión (*fluido hiperconcentrado*). Las imágenes fueron plausiblemente grabadas el mismo día del incidente, sin embargo la hora se desconoce.



**Figura 6** | Comportamiento del fluido (ubicación #3): laminación de la avenida, puente de la carretera A-472 sobre el río Guadiamar.

Aproximadamente 12,7 km aguas abajo del punto anterior, bajo el puente de la carretera A-474 situado entre las localidades de Aznalcázar y Pilas, se ubicaba la estación de aforo EA76 de Aznalcázar (ubicación #4). Esta infraestructura se encontraba en construcción en aquel momento y no pudo registrar la avenida, pero el aspecto que mostraba tras el paso de la misma era el de un fluido menos cargado de partículas en suspensión fluyendo por el vertedero para caudales bajos (Figura 7a), mientras que había acumulaciones de sedimentos en forma de lodos en los márgenes (Figura 7b).



**Figura 7** | Comportamiento del fluido (ubicación #4): situación del cauce tras el paso de la avenida, puente de la carretera A-474 sobre el río Guadiamar.

Continuando hacia aguas abajo, en el Vado del Quema (ubicación #5), las imágenes post-avenida muestran zonas encharcadas de un fluido oscuro (Figura 8a) y grandes extensiones de sedimentos depositados (Figura 8b), la mayoría en forma de lodos. Las roderas de vehículos en la zona demuestran que el fluido depositado sobre el terreno natural tenía poca consistencia y una viscosidad elevada, es decir, se comportaba como un *fluido no-Newtoniano*.



**Figura 8** | Comportamiento del fluido (ubicación #5): situación del cauce y las llanuras aluviales tras el paso de la avenida, Vado del Quema en el río Guadiamar.

Finalmente, como ejemplo del fluido retenido en la parte de Entremuros (ubicaciones #6 y #7), en la Figura 9 se muestran imágenes del Vado Los Vaqueros (ubicación #7). Allí el fluido había perdido el color oscuro, pero seguía estando cargado de partículas en suspensión. La reducción de la pendiente del cauce, así como la imposibilidad de seguir fluyendo por el muro de contención construido *ad hoc*, seguramente provocó que la mayor parte de la carga de material sólido en suspensión se fuese sedimentando.

En este sentido, tal como se muestra en la Figura 3, existe una amplia zona de transición entre los «lodos» (color marrón) y las «aguas ácidas» (color verde). Se trata, por tanto, también de una transición entre un fluido hiperconcentrado de partículas en

suspensión y un fluido en el que predomina el transporte en suspensión, pero con una carga sólida relativamente baja. A medida que el vertido fue avanzando a lo largo del río, perdió energía y las partículas que transportaba se depositaron en las zonas donde el flujo era menos intenso (Sanz-Ramos *et al.*, 2020), dejando como resultado un manto lodoso.



**Figura 9** | Comportamiento del fluido (ubicación #7): situación del cauce tras el paso de la avenida, Vado Los Vaqueros en el río Guadiamar.

## Clasificación del fluido vertido

El resultado del análisis de los vídeos y la clasificación cualitativa del tipo de fluido apreciado en las imágenes se resume en la Tabla 1, en la que se detalla la contabilización de visualizaciones de fluido tipo A, B, C o D, o combinación de ellos. Los autores son conscientes de la subjetividad de la clasificación propuesta, potenciada por la reducida calidad de las imágenes analizadas, las incertidumbres en el lugar y el momento en que fueron grabadas, así como en la dificultad para distinguir algunas de las tipologías de fluido propuestas. Sin embargo, los autores están convencidos del valor documental de estas imágenes y han tratado de extraer la mayor cantidad de información de la forma más objetiva posible.

**Tabla 1** | Clasificación del comportamiento del fluido en base al criterio descrito. Número de veces que se apreció cada tipo de fluido, o combinación de ellos.

A	B	C	D	A/B	A/B/C	A/B/C/D	B/C	B/D	B/C/D	C/D
0	21	19	19	2	0	0	10	5	59	28

La ausencia de observaciones de *agua clara* (A), como se esperaba, contrasta con el elevado número de observaciones de *fluido hiperconcentrado* (C), con más de 106 observaciones (aisladas o en combinación con otros tipos de comportamiento de fluidos). En general, cuando el fluido estaba fluyendo, el tipo de comportamiento era B o C, además de su combinación (B/C); mientras que cuando el fluido estaba retenido y/o depositado, parecía ser C y / o D, y en menor medida B.

El conocimiento de la ubicación donde se grabó el video no solo permite confirmar que la concentración de partículas transportadas por el fluido disminuyó a lo largo del río, sino que también explica cómo gran parte de estas partículas alcanzaron y sobrepasaron el vado Don Simón (Figura 3, ubicación #6), quedando en forma de lodos cuando se depositaron.

Es importante resaltar que, pocas horas después de la rotura de la balsa, el fluido que aún se derramaba por la balsa parecía más un *fluido hiperconcentrado* (C) que un *fluido no-Newtoniano* o tipo «lodo» (D). Este hecho sugiere que el núcleo de la inundación se comportó más como un flujo cargado de partículas altamente concentrado que como un flujo de lodo, probablemente debido a la fluidificación de las colas de minas inicialmente sedimentadas y consolidadas en el estanque (Ayala-Carcedo, 2004).

## CONCLUSIONES

El presente trabajo propone una primera clasificación para determinar la naturaleza del fluido vertido durante la rotura de la balsa de estériles mineros del complejo de Aznalcóllar en base al análisis de imágenes registradas. Este análisis, de carácter cualitativo, ha permitido clasificar el fluido en función del comportamiento dinámico y estático observado en diversas ubicaciones e instantes de tiempo. Para ello, se ha diferenciado entre *fluido Newtoniano*, *fluido no-Newtoniano* y una situación intermedia entre ambos, denominada *fluido hiperconcentrado*.

El resultado del análisis de imágenes demuestra que el vertido se comportó, de forma general, como un *fluido hiperconcentrado* de partículas en suspensión en los primeros kilómetros, manteniendo características propias tanto de fluidos Newtonianos como no-Newtonianos. La alta concentración de partículas durante la avenida, así como las características de las mismas, compuestas principalmente por partículas muy finas de metales pesados, podrían haber favorecido los procesos de sedimentación. Cuando la concentración de sedimentos disminuyó por la laminación de la avenida, el fluido adquirió un comportamiento más propio de un *fluido Newtoniano* (agua cargada con partículas en suspensión).

Esto habría generado, por un lado, las enormes extensiones de fluido fangoso (lodos) observadas en los primeros kilómetros y, por otro lado, la acumulación de agua con menor concentración de partículas en suspensión en la zona de Entremuros. Todo ello pudo, en su día, llevar a la conclusión de que el vertido fue de lodos y/o aguas ácidas, cuando posiblemente se trató de un fluido con un comportamiento más complejo que fue evolucionando a medida que avanzaba por el cauce.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a Canal Sur Radio y Televisión (Radiotelevisión Pública de Andalucía, RTVA) y al Fondo Documental RTVE (Radiotelevisión Española, RTVE) por facilitar los vídeos de los informativos emitidos tras el evento, gracias a lo cual el análisis del comportamiento del fluido ha sido posible para contrastar la precisión de fuentes de terceros. Asimismo, los autores muestran su agradecimiento al Sr. Benigno Bayán, ingeniero retirado de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, que ha aportado información muy valiosa para la comprensión de la física del vertido.

## REFERENCIAS

- AGE y JA. 1999. Comisión de coordinación para la recuperación de la Cuenca del Guadiamar. *Memoria de actuaciones* - Abril 1999. Administración General del Estado y Junta de Andalucía. Sevilla, España.
- Alonso, E.E, Gens, A.2006a. Aznalcóllar dam failure. Part 1: Field observations and material properties, *Géotechnique*, 56(3), 165–183. <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.3.165>
- Alonso, E.E, Gens, A. 2006b. Aznalcóllar dam failure. Part 3: Dynamics of the motion, *Géotechnique*, 56(3), 203–210. <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.3.203>
- Antón-Pacheco, C., Arranz, J.C., Baretino, D., Carrero, G., Giménez, M., Gómez, J.A., Gumiel, J.C., López-Pamo, E., Martín Rubí, J.A., Martínez-Pledel, B., de Miguel, E., Moreno, J., Ortiz, G., Rejas, J.G., Silgado, A., Vázquez, E.M. 2001. Actuaciones para el reconocimiento y retirada de los lodos depositados sobre el terreno, y su restauración edáfica y morfológica, *Boletín geológico y Minero, V. Especial*, 93–122 [online] Disponible en <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=135572>
- Arenas, J.M., Carrascal, F., Gil, A., Montes, C. 2008. Breve historia de la construcción del Corredor Verde del Guadiamar, en *La restauración ecológica del río Guadiamar y el proyecto del corredor verde. La historia de un paisaje emergente*, pp. 29–64, Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía. Sevilla, España. [online] Disponible en [http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques\\_Tematicos/Patrimonio\\_Natural.\\_Uso\\_Y\\_Gestion/Espacios\\_Protegidos/publicaciones\\_renpa/restauracion\\_ecologica\\_rio\\_guadiamar/02\\_breve\\_historia\\_de\\_la\\_construccion.pdf](http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Patrimonio_Natural._Uso_Y_Gestion/Espacios_Protegidos/publicaciones_renpa/restauracion_ecologica_rio_guadiamar/02_breve_historia_de_la_construccion.pdf)

- Ayala-Carcedo, J. 2004. 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, *Boletín geológico y Minero*, 115(4), 711–738.
- Beverage, J.P., Culbertson, K. 1964. Hyperconcentrations of Suspended Sediment, *Journal of the Hydraulics Division*, 90(6), 117–128. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001128>
- Borja, F., López-Geta, J.A., Martín-Machuca, M., Mantecón, R., Mediavilla, C., del Olmo, P., Palancar, M., Vives, R. 2001. Marco geográfico, geológico e hidrológico regional de la cuenca del Guadiamar, *Boletín geológico y Minero, V. Especial*, 13–34 [online] Available from: [http://www.igme.es/boletin/2001/112\\_esp\\_2-2001/1-MARCO.pdf](http://www.igme.es/boletin/2001/112_esp_2-2001/1-MARCO.pdf), 2001.
- CMA. 1998. Informe al Parlamento de Andalucía sobre Las consecuencias de la rotura de la balsa de estériles de las minas de Aznalcóllar.
- Costa, J.E. 1998. Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flows. En *Flood geomorphology* P.C. Baker, V.R., Kochel, R.C., and Patton (eds.), pp. 113–122, New York, John Wiley & Sons. [online] Disponible en <https://dggs.alaska.gov/pubs/id/29798>, 1998.
- CSIC. 2008. *Guadiamar. Ciencia, técnica y restauración - El accidente minero diez años después*, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid, España., 2008.
- Gallart, F., Benito, G., Martín-Vide, J.P., Benito, A., Prió, J.M., Regüés, D. 1999. Fluvial geomorphology and hydrology in the dispersal and fate of pyrite mud particles released by the Aznalcollar mine tailings spill, *Sci. Total Environ.*, 242(1–3), 13–26, [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00373-3](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00373-3)
- Gens, A., Alonso, E.E. 2006. Aznalcóllar dam failure. Part 2: Stability conditions and failure mechanism, *Géotechnique*, 56(3), 185–201. <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.3.185>
- Grimalt, J.O., Ferrer, M., MacPherson, E. 1999. The mine tailing accident in Aznalcollar. *Sci. Total Environ.*, 242(1–3), 3–11, [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00372-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00372-1)
- Hudson-Edwards, K.A., Macklin, M.G., Jamieson, H.E., Brewer, P.A., Coulthard, T.J., Howard, A.J, Turner, J.N. 2003. The impact of tailings dam spills and clean-up operations on sediment and water quality in river systems: Rios Agrió–Guadiamar, Aznalcollar, Spain, *Appl. Geochemistry*, 18, 221–239. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00122-1](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00122-1)
- Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J, Hutchinson, J.N. 2001. A review of the classification of landslides of the flow type. *Environ. Eng. Geosci.*, 7(3), 221–238. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.7.3.221>
- Instituto Geográfico Nacional (IGN). 2021. Ortofotos e imágenes satélite, Cent. Descargas [online] Disponible en <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=PNOAH> (Acceso el 6 de abril, 2021).
- Junta de Andalucía (JA). 2003. Información Ambiental de la Cuenca del Río Guadiamar, [online] Disponible en <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam/menuitem.04dc44281e5d53cf8ca78ca731525ea0>
- López-Pamo, E., Baretino, D., Antón-Pacheco, C., Ortiz, G., Arránz, J.C., Gumiel, J.C., Martínez-Pledel, B., Aparicio, M., Montouto, O. 1999. The extent of the Aznalcollar pyritic sludge spill and its effects on soils, *Science of The Total Environment*, 242(1–3), 57–88, [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00376-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00376-9)
- Madejón, P., Domínguez, M.T., Madejón, E., Cabrera, F., Marañón, T., Murillo, J.M. 2018. Soil-plant relationships and contamination by trace elements: A review of twenty years of experimentation and monitoring after the Aznalcóllar (SW Spain) mine accident. *Science of The Total Environment*, 625, 50–63. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.277>
- Manzano, M., Custodio, E., Ayora, C., Navarrete, P. 2000. Contamination of the Guadiamar river aquifer after the Aznalcóllar mine accident, SW Spain, *Boletín Geológico y Minero*, 111(6), 93–106 [online] Disponible en [https://www.igme.es/Boletin/2000/111\\_6-2000/5-contamination.pdf](https://www.igme.es/Boletin/2000/111_6-2000/5-contamination.pdf)
- Nemec, W. 2009. What is a hyperconcentrated flow?, in *IAS Annual Meeting*, Alghero (Sardinia), 20–23, September, 2009.

- Nikolic, N., Kostic, L., Djordjevic, A., Nikolic, M. 2011. Phosphorus deficiency is the major limiting factor for wheat on alluvium polluted by the copper mine pyrite tailings: a black box approach, *Plant Soil*, 339(1–2), 485–498. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0605-x>
- Organismo Autónomo Parques Nacionales (OAPN). 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, Rev. ámbito For.*, 53(21–32) [online] Disponible en <http://www.revistamontes.net/Buscador.aspx?id=165>
- Pierson, T.C., Costa, J.E. 1987. *Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation*. edited by G.F.W. John E. Costa y Gerald F. Wieczorek, Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/REG7>
- Sanz-Ramos, M., Bladé, E., Escolano, E. 2020. Optimización del cálculo de la Vía de Intenso Desagüe con criterios hidráulicos, *Ingeniería del agua*, 24(3), 203-218. <https://doi.org/10.4995/ia.2020.13364>
- Turner, J.N., Brewer, P.A., Macklin, M.G., Hudson-Edwards, K.A., Coulthard, T.J., Howard, A.J., Jamieson, H.E. 2002. Heavy metals and as transport under low and high flows in the River Guadiamar three years after the Aznalcóllar tailings dam failure: implications for river recovery and management, *Cuad. Investig. Geográfica*, 28, 31–47. <https://doi.org/10.18172/cig.1126>
- Vidal, M., López-Sánchez, J.F., Sastre, J., Jiménez, G., Dagnac, T., Rubio, R., Rauret, G. 1999. Prediction of the impact of the Aznalcóllar toxic spill on the trace element contamination of agricultural soils, *SScience of The Total Environment*, 242(1–3), 131–148. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00380-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00380-0)
- WISE. 2020. Chronology of major tailings dam failures, WISE Uranium Proj. World Inf. Serv. Energy [online] Available from: <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html> (Acceso el 27 de octubre, 2020).