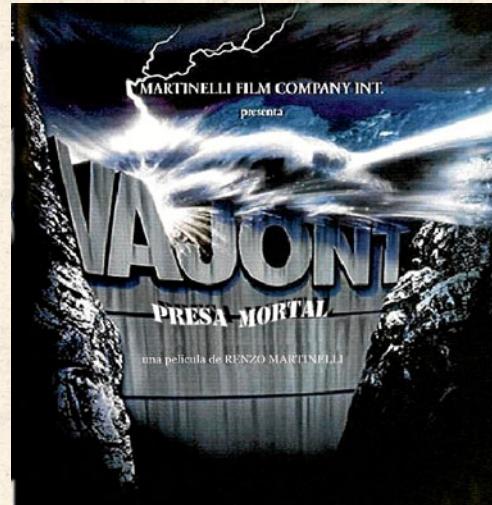


LA GEOLOGÍA ES NOTICIA

50 Años de la tragedia de Vajont (Italia)

Rinaldo Genevois, Salvatore Martino y
Alberto Prestininzi

(pag. 92)



El peligro de impacto de asteroides contra la Tierra: EL SUPERBÓLIDO DE CHELIÁBINSK



Josep M. Trigo Rodríguez, Mar Tapia,
Joan Dergham, Carles E. Moyano-Cambero
y José M. Madiedo

(pag. 95)

A 50 años de la catástrofe de Vajont: RIESGOS DE DESLIZAMIENTO EN EL EMBALSE DE YESA

Antonio M. Casas Sainz



A 50 años de la catástrofe de Vajont: RIESGOS DE DESLIZAMIENTO EN EL EMBALSE DE YESA

ANTONIO M. CASAS SAINZ

Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza. C/Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza.

El embalse de Yesa, cuya construcción terminó en 1959, es la pieza clave de la regulación hidrológica del río Aragón, uno de los principales afluentes de la margen izquierda del Ebro. Con un volumen máximo embalsado cercano a los 500 hm³, es uno de los embalses más importantes del Pirineo y el segundo en volumen de la cuenca del Ebro en Aragón. Su construcción, que impulsó la creación de 60.000 ha de regadío en el polígono, antes de secano, de Bardenas, supuso un descalabro económico y social para las comarcas del norte de la provincia de Zaragoza, con una relación global coste/beneficio sometida a revisión y a importantes controversias (ver por ejemplo, el detallado análisis realizado por Arrojo et al., 1999). Desde su construcción, esta presa de gravedad (con una altura total sobre cimientos próxima a los 80 m, y 400 m de longitud en la zona de coronación) ha estado sometida a problemas de tipo geotécnico, relacionadas con la naturaleza de los materiales en los que se asientan sus estribos: la unidad de turbiditas (conocida como flysch de Yesa) situada en el interior de las margas eocenas de Arguis-Pamplona (que conforman la mayor parte del vaso del embalse) y con transiciones laterales hacia las mismas. Los problemas de estabilidad ligados a deslizamientos en el flysch de Yesa se han agudizado con motivo de las obras destinadas



Fig. 1. Fotografía que muestra la ladera izquierda de la presa de Yesa, con la morfología característica de los deslizamientos de ladera. Obsérvese, a la derecha de la presa en la fotografía (sector oeste) los cambios de orientación de las capas del flysch de Yesa.

al acondicionamiento de laderas para la construcción de una nueva presa (de materiales sueltos con pantalla impermeable de hormigón en el paramento de aguas arriba), que permitiría duplicar la capacidad del embalse, con una elevación de la cota máxima sobre el nivel actual de unos 30 m. El presupuesto inicial de la obra de recrecimiento era de 100x10⁶ €, que, a la fecha de redacción del presente artículo se ha elevado hasta más de 300x10⁶ €, debido a las complicaciones técnicas sobrevenidas durante las obras. La obra proyectada supone un despropósito no sólo en términos económicos, ya que entraña graves riesgos para las poblaciones situadas aguas abajo de la presa. A continuación se exponen de forma resumida

los problemas geotécnicos relacionados con el recrecimiento, así como los análisis que sobre los mismos se han hecho desde la administración y los graves riesgos que supone para las poblaciones situadas aguas abajo del embalse.

Geología y geomorfología de las laderas del embalse. Problemática de las obras de recrecimiento

A pesar de su importancia de cara al análisis de la estabilidad de las laderas, la geología de base de la zona de la cerrada de la presa de Yesa no es bien conocida, especialmente porque su geometría en 3D es relativamente complicada y no existe una única dirección de plegamiento. En los informes realizados o encargados



Fig. 2. Fotografía de la margen derecha de la presa de Yesa donde aparece la urbanización desalojada debido al deslizamiento y los daños en las viviendas.

por la administración¹ la estructura en dirección paralela al eje de presa (perpendicular al río Aragón) aparece alternativamente como un anticlinal o un sinclinal. Este desconocimiento de la realidad geológica (y geomorfológica, como se comentará más adelante) ha contribuido a la incapacidad de prever el desencadenamiento, durante las obras de recrecimiento del embalse, de deslizamientos planares a favor de superficies de estratificación que se han ido produciendo de forma más o menos continuada desde el inicio de las mismas. Las carencias de los estudios geológicos realizados hasta la fecha (la comparación entre los cortes geológicos dispares que aparecen en los distintos informes es un indicador), a pesar de la inversión realizada para dichos estudios, dan idea de la escasa importancia concedida a los estudios geológicos básicos en un proyecto de estas características.

La ladera izquierda del embalse de Yesa en las cercanías de la presa presenta morfologías características

de deslizamientos de ladera (figura 1). El más importante de ellos, el denominado deslizamiento de La Refaya (detectado y estudiado en los distintos informes de la administración), presenta un volumen de unos 12 hm^3 , geometría rotacional y su pie está a la altura de los aliviaderos de la presa actual. Sus movimientos han sido datados mediante C^{14} en unos 12.000 años antes de nuestra era, con reactivaciones posteriores a los 6.000 años (Gutiérrez et al., 2010). Aguas arriba de este deslizamiento, la geometría de la ladera muestra cicatrices antiguas, ya cubiertas por la vegetación, y la zona inestable termina en la punta rocosa, conformada por turbiditas buzando hacia el embalse, conocida como Monte Mélida. En esta zona, con buzamientos de las turbiditas de unos 20°N se produjo un deslizamiento de tipo planar en 2006, activado por la creación de un vertedero de material procedente de las obras de recrecimiento, sobre la zona de su pie, muy próxima al embalse. En conjunto, el volumen potencialmente

inestable de la ladera izquierda está comprendido entre 15 y 60 hm^3 (esta indeterminación también es indicativa de la falta de estudios detallados sobre un tema clave para la seguridad de la presa), en zonas muy próximas a la presa actual.

En la margen derecha no se reconocen morfologías claras de deslizamiento, pero sí estructuras en el flysch en los cortes del antiguo trazado de la carretera N-240, sobre la cual siguen apareciendo grietas, que probablemente se deben a deslizamientos antiguos. Durante las fases de construcción de la presa original² se produjeron inestabilidades menores que llevaron, durante el tiempo de explotación del embalse, a realizar inyecciones de hormigón y, durante las obras del recrecimiento, a realizar apantallamientos en la parte basal del mismo (modificando consecuentemente

¹ Algunos de ellos son públicos y pueden consultarse en la página web de la Confederación Hidrográfica del Ebro, www.chebro.es o en la página web de la Asociación Río Aragón, www.yesano.com

² Probablemente fue este tipo de fenómenos lo que llevó al ingeniero responsable de la construcción de la misma, René Petit, a hacer declaraciones en contra del recrecimiento del embalse de Yesa. Ver recorte de prensa en www.yesano.com



Fig. 3. Daños producidos en la urbanización desalojada, situada en el deslizamiento de la margen derecha de la presa de Yesa.

mente el régimen hidrogeológico de la ladera), por encima del máximo nivel de embalse.

Desde mediados de 2012 y especialmente durante febrero de 2013, se produjo un movimiento de la ladera derecha, que alcanzó los 20 cm de desplazamiento. El movimiento de ladera afectó significativamente a las viviendas situadas sobre la ladera (figura 2), que tuvieron que ser desalojadas (figura 3). A partir de los datos de los inclinómetros colocados sobre la ladera, se puede deducir que la superficie de deslizamiento está situada a 50 m de profundidad en la parte central del mismo, disminuyendo progresivamente hacia los laterales. La zona de pie del deslizamiento no se conoce, pero probablemente afecte al cuerpo de presa, puesto que éste ha experimentado un ligero levantamiento (Lafuente Dios, 2013). Aunque el punto álgido del movimiento de la ladera tuvo lugar en febrero de 2013, y su velocidad es considerablemente menor a fecha de redacción de este artículo (en el entorno de mm/mes) es importante resaltar que no se ha detenido, tal como puede deducirse de las lecturas de los distintos inclinómetros.

La problemática de los análisis de estabilidad de laderas

El riesgo de inestabilidad de las laderas puede cuantificarse mediante el llamado factor de seguridad, que resulta del cociente entre las fuerzas que mantienen la ladera en situación estable y las fuerzas que tienden a iniciar el deslizamiento. Los factores que determinan dicha estabilidad son la cohesión del material y el rozamiento interno, en el lado de la estabilidad, y la presión de fluidos y la aceleración sísmica como factores que le afectan negativamente. La geometría de la superficie de deslizamiento es importante, ya que en general, a mayor pendiente, más facilidad para deslizar, y las geometrías complejas a contrapendiente tienden a hacer más difícil el movimiento.

En el proyecto de recrecimiento se han realizado diversos informes para analizar la estabilidad de las laderas. En prácticamente todos los informes presentados, se concluye que los factores de seguridad de todos los posibles deslizamientos del entorno de la presa son superiores a 1. Esto resulta especialmente sorprendente dado que algunos de estos informes son posteriores al deslizamiento de Monte Mélida de 2006 que, de acuerdo con el back-

analysis³ no podría haberse producido con unos parámetros de cohesión y ángulo de fricción (entre 23° y 27°) considerados en los informes encargados por la Administración. Lo mismo es aplicable a los deslizamientos de la margen derecha (zona de la urbanización mostrada en la figura 2). De hecho, aplicando valores coherentes con la realidad de los deslizamientos producidos, los factores de seguridad son considerablemente inferiores (figura 4). La cuestión de la interpretación del factor de seguridad es controvertida, ya que en la ecuación intervienen factores de difícil determinación, especialmente en relación con el comportamiento de los materiales en las superficies de deslizamiento. De hecho, taludes con factores de seguridad superiores a 1 han sufrido movimientos (ver Azizi, 2000 y referencias allí citadas). Por ello los manuales que tratan deslizamientos recomiendan (Franklin y Dusseault, 1991) utilizar factores de seguridad mucho mayores para poder garantizar la seguridad de las laderas, uno de los factores clave en la seguridad de las presas (Saxena y Sharma, 2005). En los citados informes utilizados en el proyecto de recrecimiento de Yesa se garantiza la seguridad de los deslizamientos con factores de seguridad en torno a 1,5, y todo ello sin considerar las máximas aceleraciones sísmicas sufridas en la zona (sismos de la Canal de Berdún de 1923; Inglada, 1929⁴).

Mención especial merecen algunos trabajos encargados ad hoc para justificar la seguridad del embalse.

³ En el back-analysis o retroanálisis se trata de calcular de forma inversa los parámetros del material una vez que se ha producido el deslizamiento, y teniendo en cuenta las condiciones reales del sitio en el momento de la rotura. Para el cálculo de parámetros es fundamental la honestidad y competencia de la persona que lo realiza, ya que si las condiciones de contorno impuestas (altura del nivel freático, geometría de la ladera, fuerzas externas) son diferentes de las reales, el cálculo de parámetros puede ser fácilmente manipulado.

⁴ Esta y otras publicaciones sobre la crisis sísmica de la Canal de Berdún pueden consultarse en la página del Instituto Geográfico Nacional http://m.fomento.gob.es/mfom/lang_ castellano/direcciones_generales/instituto_geografico/ geofisica/sismologia/publicacionsimterr.htm

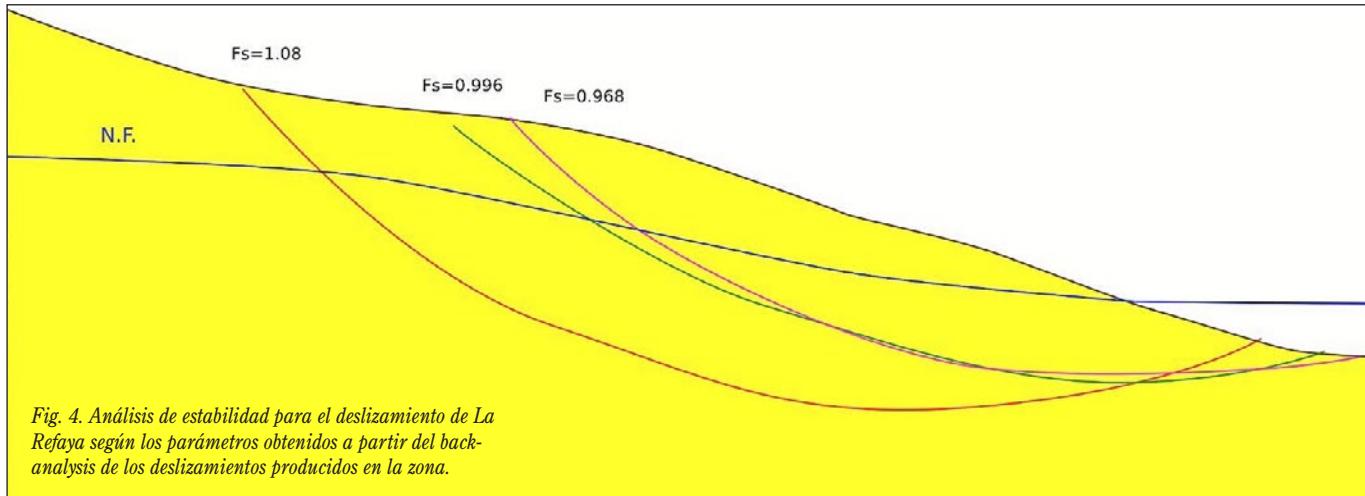


Fig. 4. Análisis de estabilidad para el deslizamiento de La Refaya según los parámetros obtenidos a partir del back-analysis de los deslizamientos producidos en la zona.

Algunos de ellos aseguran la estabilidad de las laderas a partir únicamente de técnicas geomorfológicas, a pesar de no haber utilizado ningún método de análisis basado en el factor de seguridad. Otros, como los realizados para la simulación de las posibles olas causadas por los deslizamientos, utilizan modelos muy sofisticados pero introducen datos de partida preparados para obtener resultados que no comprometan en ningún caso los valores que demuestren la estabilidad de la presa futura (sistema conocido en la jerga geológica como *rubbish in-rubbish out*).

En cualquier caso, hay que tener claro que el factor de seguridad no dice cuándo se va a producir un deslizamiento, ni siquiera si ese deslizamiento va a producirse o no. En el caso de la presa de Yesa, el factor de seguridad para ambas laderas es inadmisible en una obra de este tipo, y deberían tomarse medidas en este sentido, tales como el vaciado parcial o total del embalse, independientemente de que no pueda predecirse si los deslizamientos van a seguir funcionando o no. En el caso de crecimiento la situación sería especialmente crítica, ya que el nuevo tipo de presa proyectado⁵, cuyo elemento fundamental

es la pantalla impermeable en el espaldón de aguas arriba, será especialmente sensible a cualquier movimiento en las laderas que sea capaz de fracturar dicha pantalla y favorecer el movimiento de agua en el interior de la presa.

Riesgo de inundación en Sangüesa. Planes de evacuación

La rotura o graves daños que los deslizamientos pueden causar a la presa de Yesa tienen repercusión importante, ya que la población de Sangüesa⁶, con más de 5000 habitantes, se encuentra situada aguas abajo de la presa, a unos 10 km siguiendo el curso del río Aragón, y de su confluencia con el río Iratí (represado por el embalse de Itoiz, con importantes problemas geotécnicos y de sismicidad inducida). Los caudales de salida en una eventual rotura catastrófica de la presa alcanzan, según las curvas empíricas de distintos autores, que utilizan el volumen embalsado y la altura de la presa (Costa, 1988, entre otros) más de 15.000 m³/s como mínimo. Estos caudales serían considerablemente mayores en el caso de que finalmente se realizara el crecimiento del embalse. De acuerdo con cálculos hidrológicos (Casas y Rico, 1999), la altura de la cota de inundación para Sangüesa en el caso de rotura

de presa estaría en el entorno de los 410 m (es decir, la mayor parte de la población quedaría inundada por las aguas, figura 5), y el tiempo de llegada de la avenida sería de treinta minutos o quizás inferior. A pesar de la gravedad de las posibles situaciones planteadas por estos datos, de las propias recomendaciones de algunos organismos de la Administración, y de que, dado el tiempo de concentración de la avenida, es posible poner a salvo a casi toda la población en caso de catástrofe, hasta la fecha no se ha realizado ningún simulacro de evacuación ni se han dado instrucciones a la población de cómo desalojar de forma eficaz sus viviendas y alcanzar una cota no inundable.

La evolución de la información que se ha dado a la población de Sangüesa sobre los riesgos que corre con la presa actual (y que se incrementarán considerablemente con el crecimiento) ha cumplido el paradigma de lo ocurrido en Vajont⁷ y en otras catástrofes ligadas a accidentes en presas (y reflejadas de forma magistral en la película “Vajont, presa mortal”, dirigida en 2001 por Renzo Martinelli). Durante el tiempo en que se produjeron los desplazamientos im-

⁵ La nueva presa es una copia de tamaño algo menor de la presa de New Exchequer, en California, diseñada para mantener la explotación del embalse durante las obras de crecimiento del mismo. En mi opinión, la copia de modelos cuyo diseño no contempla condiciones de contorno particulares, en este caso relacionadas con deslizamientos, puede tener consecuencias fatales.

⁶ Sangüesa no es la única población en situación de riesgo, ya que existen polígonos industriales y varios núcleos habitados a escasa altura sobre el cauce del Aragón aguas abajo de Yesa, pero si la más vulnerable en caso de catástrofe.

⁷ La catástrofe de Vajont ha sido la más importante en Europa en número de víctimas y en tiempos recientes, pero es importante tener en cuenta que la rotura de la presa de Puentes, en Lorca, en 1802 tuvo el récord de víctimas mortales hasta el desastre del embalse de South Fork en Estados Unidos, en 1889 (Saxena y Sharma, 2005).

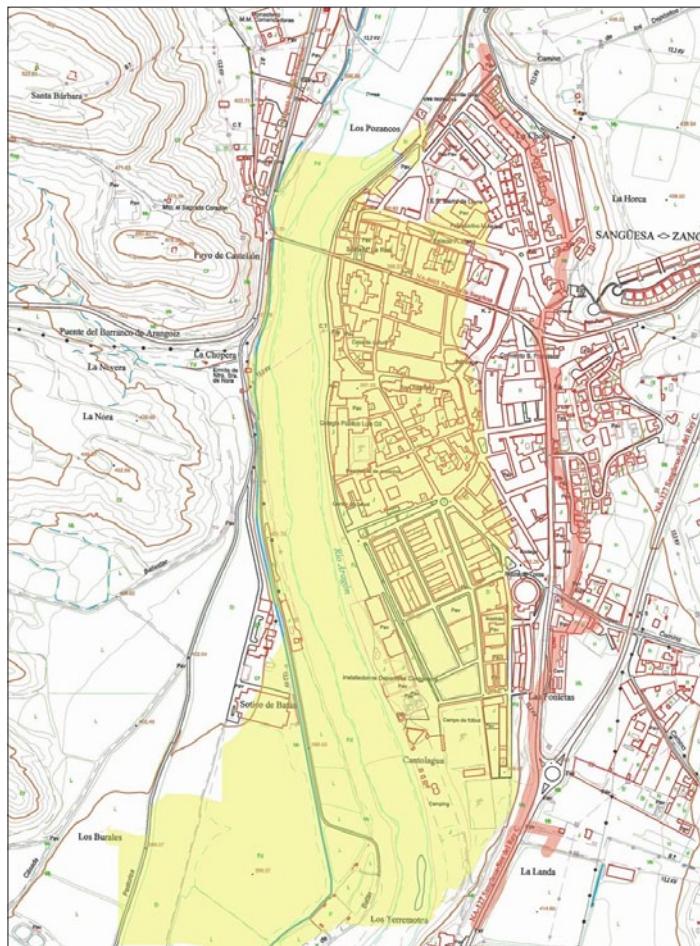


Fig. 5. Zonas inundables de Sangüesa en caso de rotura de la presa de Yesa y cotas seguras según distintos escenarios posibles. La zona sombreada en amarillo corresponde al sector inundable para un caudal de 15.000 m³/s y la línea gruesa (roja) al sector inundable para un caudal de 50.000 m³/s.

ladera deslizada, en el municipio de Yesa, permitió conocer *gross modo* la situación en que se encontraba. La información detallada, con los informes de la Confederación Hidrográfica del Ebro (Lafuente Dios, 2013) apareció más tarde, a petición de grupos parlamentarios en el Parlamento de Navarra, provocando una considerable y justificada alarma entre los colectivos y vecinos que han seguido de cerca la evolución de las obras del recrecimiento. Es importante tener en cuenta que la actitud de la administración (en este caso de la Confederación Hidrográfica del Ebro) ha ido más bien enfocada a justificar las obras de recrecimiento (se ha llegado a postular que el recrecimiento estabilizará las laderas del embalse, en clara contradicción con la repercusión de los ascensos del nivel piezométrico sobre la estabilidad y el reflejo manifiesto que las obras están teniendo en la estabilidad de las laderas) que a actuar en consecuencia a las enormes dimensiones de la catástrofe que durante el mes de Febrero de 2013 estuvo amenazando a la población de Sangüesa. ●

portantes de la ladera derecha no hubo ningún tipo de alerta ni información a la población o al

Ayuntamiento de Sangüesa. Sólo la necesidad de desalojar las viviendas situadas sobre la

Referencias

- Arrojo, P., Gracia, J.J., Martínez Gil, F.J., Nicolau, J.M. y Solana, M. (1999). *Recrecimiento de Yesa: el abastecimiento a Zaragoza como excusa para los trasvases*. Serie informes. Nueva Cultura del Agua, 40 p.
- Azizi, F. (2000). *Applied analyses in geotechnics*. Spon Press, 753 p.
- Casas, A.M. y Rico, M. (1999). *Estabilidad de laderas y riesgo de deslizamientos e inundación en el embalse de Yesa*. Informe inédito. 20 p.
- Costa, J.E. (1988). *Floods from dam failures*. En: *Flood Geomorphology* (Eds.: V.R. Backer, R.C. Kochel y P.C. Patton), 439-463.
- Franklin, J.A. y Dusseault, M.B. (1991). *Rock engineering applications*. McGraw-Hill, Inc, New York, 431 p.
- Gutiérrez, F., Lucha, P. y Galve, J.P. (2010). *Reconstructing the geochronological evolution of large landslides by means of the trenching technique in the Yesa Reservoir (Spanish Pyrenees)*. *Geomorphology*, 124, 124-136
- Ingla, V. (1929). *Contribución al estudio del sismo pirenaico (Canal de Berdún) de 10 de Julio de 1923*. Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid, Tomo XXIV, 9º de la 2ª serie, 48 p.
- Lafuente Dios, R.J. (2013). *Proyecto 12/08 modificación nº3 de las obras del recrecimiento del embalse de Yesa sobre el río Aragón, adenda con medidas correctoras del impacto ambiental y plan de restitución territorial de su entorno (Navarra y Zaragoza)*. Informe sobre los movimientos detectados en la margen derecha de la cerrada y propuesta de actuación. Confederación Hidrográfica del Ebro, 10 p.
- Saxena, K.R. y Sharma, V.M. (2005). *Dams, incidents and accidents*. Balkema, 228 p.