



SISMICIDAD EN LA COMARCA DE VALDEJALÓN Y LA PRESA DE MULARROYA.

NOTA TECNICA ACLARATORIA

1. NUEVAS COMUNICACIONES DE SISMOTECTÓNICA.

En el año 2013 se publicó en la revista Cuaternario y Geomorfología, la comunicación titulada *“La depresión del Río Grío (Cordillera Ibérica, NE España). Graben neotectónico vs. valle fluvial”*, donde figuran como autores D. Francisco Gutiérrez, Pedro Lucha y Luís Jordá. En esta publicación los autores localizan 9 fallas en la depresión del río Grío, de longitud comprendida entre 1,7 y 15,5 km, y para las que asignan una magnitud momento máxima de entre 6,2 y 6,8, mediante las regresiones propuestas por Wells y Coppersmith (1994) para fallas normales y por Stirling et al. (2002), a partir de la longitud de las fallas.

Posteriormente, en diciembre de 2017, la revista de la Sociedad Geológica de España publicaba un artículo titulado *“El embalse de Mularroya (Zaragoza). Problemas geológicos en una obra en avanzado estado de construcción”* cuyos autores son: Antonio Casas, Marcos Aurell, Carlos Revuelto, Pablo Calvín, José Luís Simón, Óscar Pueyo, Andrés Pocoví y Marcos Marcén. En adelante, por simplicidad, se referirá como “revista SGE”.

En la citada publicación se describe *“la falla del río Grío como una de las fallas más importantes del sector central de la Cordillera Ibérica con actividad intermitente a lo largo de los últimos 300 millones de años”*, con *“capacidad de generar terremotos de magnitud entre 6,2 y 6,8”*, y que *“tendría capacidad de generar aceleraciones en el entorno de la presa de prácticamente 1g (es decir la aceleración de la gravedad)”*.

Se concluye finalmente que estas fallas podrían *“producir condiciones para la generación de vibraciones de alta amplitud y longitud de onda, fuerte intensidad y afecciones a las poblaciones situadas en los ejes del río Grío y del río Isuela, y probablemente a otros núcleos localizados ya en la depresión del Ebro (La Almunia, Calatorao...)*. Por otro lado, *la propia presa podría sufrir condiciones dinámicas para las cuales no está diseñada, por lo que podría producirse su vaciado catastrófico, con consecuencias importantes para algunas poblaciones situadas en el valle del río Jalón”*.



Como era previsible, esta última publicación, cuyos autores divulgaron en los medios de prensa, ha causado gran desasosiego en las poblaciones de la Comarca de Valdejalón, y es la principal razón por la que se divulga esta nota técnica aclaratoria.

2. NORMATIVA SOBRE LA VALORACIÓN DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA.

En España la valoración de la Peligrosidad Sísmica de una zona y de las acciones a emprender para la mitigación de sus posibles consecuencias, están reguladas en la **Norma de Construcción Sismorresistente: parte general y edificación (NCSE-02)**, aprobada por Real Decreto 997/2002, de 27 de septiembre.

Esta Norma es propuesta al Consejo de Ministros por la **Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes**, órgano colegiado de carácter interministerial, creado por el Decreto 3209/1974, de 30 de agosto, adscrita al Ministerio de Fomento y radicada en la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional.

La Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes está constituida por 24 especialistas en sismología e ingeniería sísmica de todas las instituciones con responsabilidad y competencias en riesgo sísmico: Instituto Geográfico Nacional, Ministerio de Fomento (Dirección General de Carreteras, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, y Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo), Dirección General de Protección Civil y Emergencias del Ministerio de Interior, Dirección General de Infraestructuras del Ministerio de Defensa, Consejo Superior de Investigaciones Científicas del Ministerio de Economía y Competitividad, Ministerio de Industria, Energía y Turismo, Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña perteneciente a la Comisión Española de Geodesia y Geofísica, Consejo de Seguridad Nuclear y la Asociación Española de Ingeniería Sísmica.

La normativa sismorresistente NCSE-02 actualmente en vigor y de aplicación a todo el Estado, define la Peligrosidad Sísmica en la Comarca de Valdejalón, con el umbral más bajo de España y de la Península Ibérica. En concreto, en la zona asigna una aceleración sísmica básica inferior a 0,04 g y por ejemplo esto implica que no se requiere la consideración del sismo en los cálculos de estabilidad de una presa.



Durante el proceso de actualización y revisión de la norma sísmica, previo a la aprobación oficial de otra nueva norma, se ha publicado la **Actualización de Mapas de Peligrosidad Sísmica de España del año 2012** por la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional. Esta actualización se redacta en colaboración con una Comisión de seguimiento que agrupa a 28 especialistas en sismología y geología de Instituciones con competencias profesionales en esta materia: Universidad Politécnica de Madrid, Universidad Complutense de Madrid, Universidad Politécnica de Barcelona, Universidad de Alicante, Dirección General de Protección Civil y Emergencias, Consejo Superior Investigaciones Científicas, Instituto Geológico y Minero, Instituto Geológico de Cataluña, Consejo de Seguridad Nacional, e Instituto Superior Técnico de Lisboa.

Se ha de aclarar que esta actualización del mapa, aunque actualmente no es de obligado cumplimiento, será el mapa de referencia de la nueva norma sísmica en España. A su vez este mapa se presenta revisado en una versión del año 2015, en la propia página web del Instituto Geográfico Nacional.

En este nuevo mapa la peligrosidad sísmica de la Comarca de Valdejalón **sigue teniendo uno de los umbrales más bajos de España**, con una aceleración sísmica de 0,04 g para un periodo de retorno de 475 años.

Por lo tanto, los datos publicados y de referencia para una próxima normativa sismorresistente, tienen un amplio consenso entre la comunidad científica y las instituciones competentes en riesgo sísmico, y como veremos más adelante, son muy distantes de los valores descritos en la "revista SGE" que refería valores de hasta 1,00 g.

En este mapa para un período de retorno 475 años, **el mayor valor de aceleración sísmica de la Península Ibérica es de 0,24 g ubicado en la provincia de Granada. Los autores en la "revista SGE", asignan a la Comarca de Valdejalón una sismicidad definida por una aceleración 1,00 g, sin concretar su periodo de recurrencia.**

Para concluir este apartado, el **Plan Territorial de Protección Civil de Aragón (PLATEAR)** aprobado por decreto 220/2014 de 16 de diciembre, publicó el **Mapa de Riesgo Sísmico**, asignando a la zona de la Comarca de Valdejalón el nivel más bajo, **calificándolo de Riesgo Muy Bajo.**

3. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA

Los autores en la "revista SGE", hacen las siguientes afirmaciones:



- *“Su situación {se entiende la presa y el embalse de Mularroya} en una zona de sismicidad baja, pero en la que existen fallas activas con alta sismicidad potencial...”* (página 52).

Cuando una norma define la sismicidad de una zona, lo hace considerando largos periodos de tiempo, (hasta 2.475 años la Actualización del Mapa de Peligrosidad Sísmica), por lo tanto, la frase anterior es un claro contrasentido, porque una zona de sismicidad baja es conceptualmente aquella que su potencial sísmico es bajo y no tienen cabida fallas de alta sismicidad.

- *“...el área de estudio se sitúa en una zona intraplaca que presenta un registro instrumental de la sismicidad escaso, de modo que el cálculo de la peligrosidad sísmica solo puede abordarse desde el punto de vista determinista, y evaluando las fallas capaces y su potencial sísmico (por ejemplo, longitud aflorante de las fallas activas). En el cálculo determinista (Alfaro et al., 1987) se considera el máximo sismo posible para una determinada falla o zona sismotectónica, y que dicho sismo máximo puede producirse en cualquier punto de la falla o zona sin tener en cuenta el registro instrumental sobre la probabilidad de ocurrencia (distribución probabilística temporal). En este sentido cobran especial importancia los sedimentos recientes (entendiendo como tales los que abarcan el Plioceno y el Cuaternario), aunque las posibilidades de datación precisa de los mismos no sean las óptimas“* (página 52).

El área de estudio presenta un registro instrumental de la sismicidad similar al resto de la península Ibérica, es decir que si consideramos solo el periodo instrumental (desde el año 1920) el registro sería completo para magnitudes superiores a 5,0. Si consideramos también el periodo histórico (no instrumental), el registro sería completo desde el año 1800 para esa magnitud y desde el año 1152 para magnitudes superiores a 6,0 (ver Actualización de Mapas de Peligrosidad Sísmica de España del año 2012). En consecuencia, no existe ausencia de registro sísmico, y el lapso temporal del catálogo de terremotos disponible es lo suficientemente amplio para la aplicación de métodos probabilísticos.

- *“Es cierto que utilizar estos valores {1,00 g} como parámetros de diseño de la presa, aplicando por tanto un criterio determinista, puede resultar excesivamente conservador. Sin embargo, cabría tomar como referencia el cálculo propuesto por Simón et al. (2014) con criterio probabilista para un área con un potencial sísmico similar, como es la de Teruel”.* (Página 58).

Los autores en la “revista SGE” comienzan afirmando que el cálculo de la peligrosidad sísmica solo puede abordarse desde el punto de vista determinista (página 52), para acabar comparándolo con el criterio probabilístico (página 58), lo que constituye un claro contrasentido.



El método determinista no considera el periodo de retorno de los terremotos que generan las fallas, muy elevado en zonas como la Cadena Ibérica. Además, en este caso no se han aplicado leyes de atenuación que tengan en cuenta la distancia, por lo que se trata de un método excesivamente conservador.

Por la trascendencia que las conclusiones de su estudio tendrían, necesitaríamos la caracterización de las fallas sismogénicas, determinando su actividad sísmica a lo largo del tiempo. Para ello, a partir de estudios paleosísmicos (trincheras), se ha de disponer del régimen de desplazamiento episódico, la recurrencia de los terremotos y el tiempo transcurrido desde el último evento (elapsed time). Ninguno de estos datos han sido aportados por los autores en la “revista SGE”, porque como ellos mismos describen en, *“los sedimentos recientes (entendiendo como tales los que abarcan el Plioceno y el Cuaternario),... las posibilidades de datación precisa de los mismos no sean las óptimas”*.

Ni tan siquiera los autores hacen una aproximación a la edad de los eventos de desplazamiento más recientes de las fallas.

- *“la falla del río Grío es una de las fallas más importantes del sector central de la Cordillera Ibérica..., con actividad intermitente a lo largo de los últimos 300 millones de años”* (página 58).
- *“...cobran especial importancia los sedimentos recientes (entendiendo como tales los que abarcan el Plioceno y el Cuaternario), aunque las posibilidades de datación precisa de los mismos no sean las óptimas”* (página 52). Es decir, menos de 5 millones de años y la actualidad.
- *“sistema de fallas de río Grío, que incluye varios segmentos activos durante el Cuaternario”* (página 51). Es decir, menos de 2,5 millones

Habría que añadir que el sistema de fallas que se describen está recogido en la base de datos de fallas activas QAFI (IGME) y la mayor parte de ellas presentan baja fiabilidad en la determinación de la magnitud máxima esperable.

Por explicar la importancia del periodo de recurrencia y la ligereza que supone hablar de peligro sísmico en estas circunstancias, consideremos por ejemplo que los terremotos se producen con una recurrencia media de 20.000 años. En ese caso la probabilidad de que se produzca un sismo en 50 años de existencia de la presa sería de 0,0024, es decir despreciable.



En estas circunstancias, y disponiendo de la Red de Alerta Sísmica del Instituto Geográfico Nacional, lo más adecuado científicamente es la aplicación de Métodos Probabilísticos, tal y como se hace actualmente para la elaboración de las normas de sismorresistentes oficiales.

La utilización del Método Probabilístico en la zona de Teruel, con fallas diferentes y su extrapolación a este emplazamiento situado a 130 km de distancia, como proponen los autores en la “revista SGE”, sin tener en cuenta las leyes de atenuación y distribución, es poco adecuado científicamente.

Por lo tanto, en este caso, los datos que tendrían un mayor rigor científico son los calculados por Métodos Probabilísticos y publicados en la Actualización de Mapas de Peligrosidad Sísmica de España del año 2012 por la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, que asignan a este emplazamiento un valor de aceleración $a=0,04$ g para un periodo de retorno de 475 años.

4. MÉTODOS EMPÍRICOS INDIRECTOS. CORRELACIONES

Los métodos empíricos indirectos que utilizan correlaciones para determinar la magnitud o intensidad de un terremoto a partir de la longitud de la falla y su conversión a aceleración, pueden introducir importantes incertidumbres. Las correlaciones de Wells & Coppersmith (1994) y Stirling et al (2002) deducen, de forma empírica, una relación entre la magnitud de un sismo y la longitud de ruptura que lo ocasiona, que no es necesariamente lo mismo que la longitud de falla.

Por otro lado, dos fallas con igual longitud, pueden generar sismos con recurrencias muy dispares y por lo tanto tener asociada una peligrosidad sísmica muy diferente, de ahí la importancia de datarlas.

De esta forma, los métodos empíricos indirectos, si se desconoce la recurrencia del sismo, serían poco adecuados, en este caso, para valorar la peligrosidad sísmica. No obstante, se evalúa el razonamiento seguido para su correlación:

4.1 RELACIÓN MAGNITUD-ACELERACIÓN

Los autores en la “revista SGE” no utilizan una correlación directa magnitud-aceleración, que sería el método que introduciría menores errores, sino que hacen una correlación indirecta a intensidad. Además, los nuevos modelos que determinan la atenuación del movimiento del suelo con la distancia y calibrados con muchos datos, establecen esa correlación magnitud – aceleración.



Existen varias relaciones empíricas entre la magnitud y la aceleración (Milen y Davenport, 1969), (Bath, 1973), (Donovan 1973), (Helle, 1983), (Akkar y Bummer, 2010), donde partiendo de un valor de magnitud 6,8, el valor máximo de aceleración obtenido en ellas es de 0,30 g, muy lejos del 1,00 g estimado.

4.2 RELACIÓN INTENSIDAD ACELERACIÓN

Como se ha comentado con antelación, existiendo la correlación directa entre magnitud y aceleración, es más impreciso utilizar otra conversión intermedia a la intensidad para volver a correlacionarla con la aceleración, tal y como proponen los autores en la “Revista SGE”; no obstante, se sigue su procedimiento.

Lo primero que deberíamos determinar es la intensidad a partir del dato de magnitud determinado por Gutiérrez et al. (2013). Utilizando las correlaciones oficiales actualizadas del Instituto Geográfico Nacional (Rueda y Mezcuca, 2001) para las magnitudes momento máximas de 6,2-6,8 obtendríamos intensidades por debajo de IX y X, respectivamente.

Deducida la intensidad, pasaremos a determinar la aceleración. Según establece la: NCSE-02 y la Guía técnica de seguridad de presas Nº 3: Estudios Geológico-Geotécnicos y de prospección de Materiales del Comité Nacional Español de Grandes Presas en el territorio español la fórmula de conversión a utilizar es la siguiente: $Lg_{10} a_b = 0,30103 * I - 0,2321$, obteniéndose una $a_b = 0,3 - 0,6$ g, como se ve, valores lejos de 1,00 g.

Las correlaciones utilizadas por los autores en la “revista SGE” no son válidas en territorio peninsular: las de Trifunac y Brady, (1975) han sido propuestas para el oeste de los EEUU y las de Linkimer (2008) para Costa Rica.

5. AFECCIÓN DE GRANDES SISMOS A LAS PRESAS.

Aunque un terremoto puede producir daños en las presas, **no existen referencias modernas de roturas catastróficas de grandes presas motivadas por sismos** (Wieland Martin, 2010, presidente del Comité de Aspectos Sísmicos del Comité Internacional de Grandes Presas).

Es verdad que en el pasado se produjeron roturas de presas por fenómenos de licuefacción (Calaveras, EEUU, 1918; Sheffield, EEUU, 1925; Lower Van Norman, EEUU, 1971), cuando se utilizaban rellenos hidráulicos en su construcción, técnica que fue abandonada en el pasado,



pero con los materiales y cimiento de la presa de Mularroya este fenómeno es imposible que se produzca.

Incluso un terremoto de magnitud 7,3 puede cortar literalmente una presa, levantando uno de sus labios 9 m y desplazándolo horizontalmente 1,5 m, como ocurrió en la presa de Shih Kang (Taiwan, 1999), pero ni en estas circunstancias tan excepcionales se produjo el colapso de la presa.

Las presas están dimensionadas para trabajar frente a cargas horizontales, como el empuje del agua y la componente principal de los terremotos son las fuerzas horizontales, al contrario que ocurre en otras estructuras como edificaciones y puentes donde trabajan mayoritariamente soportando cargas verticales y no toleran con tanta solvencia las horizontales del sismo. Básicamente por esta razón son tan resistentes frente al sismo.

Existen muchos ejemplos recientes que avalan que las presas son seguras frente a los sismos más extremos:

- Sismo de magnitud 8 en Wenchuan (China, 2008), 1803 presas de hormigón y materiales sueltos y 403 centrales hidroeléctricas tuvieron daños y fueron reparadas, pero ninguna colapsó.
- Sismo de magnitud 8,8 en Maule (Chile, 2010), muchas presas tuvieron daños, pero ninguna colapsó.
- Sismo de Tohok (Japón, 2011), país con 2.675 presas, más del doble que España, padeció un terremoto de magnitud 9, cuarto mayor de la historia, sin colapso de ninguna presa, salvo una pequeña balsa agrícola, no considerada presa y fuera de la regulación sísmica.
- Sismo de Pedernales (Ecuador, 2016) de magnitud 7,8 sin afección a las presas.
- Sismo de Puebla (Méjico, 2017) de magnitud 8,2, en el que no hubo afección grave a ninguna presa a pesar de que este país cuenta con 4.462 grandes presas.

En la Península Ibérica, el sismo más grande del que se tiene noticia es el de Lisboa de 1755 que alcanzó una intensidad X, que corresponde a una magnitud aproximada de 8,5. A poco más de 200 km de distancia están ubicadas dos **presas romanas, Proserpina y Cornalvo** (Badajoz), que siguen en explotación después de más de 2.000 años, resistiendo pertinazmente los terremotos sin daños.

En Aragón podemos disfrutar también de dos presas romanas en perfecto estado de conservación, **la presa de Muel**, situada a tan sólo 24 km de la Almunia de Doña Godina, y **Almonacid de la Cuba** situada a 50 km. Por lo tanto, sabemos por estas dos infraestructuras,



que o bien las fallas propuestas por los autores de la “revista SGE” no se han movido en más de 2.000 años, o bien su actividad sísmica no las afecta.

Los autores en la “revista SGE” citan **el terremoto de magnitud Mw 5,2 ocurrido en Lorca (Murcia) en 2011. Se ha de recordar que existen dos presas, a tan sólo 10 km de la población de Lorca, que no sufrieron el más mínimo incidente** durante el sismo, ratificando lo aquí expuesto.

También los autores exponen: “*Teniendo en cuenta las experiencias de fallos en este tipo de presas (e.g., Seed y Duncan, 1981; Foster et al., 2000; Saxena y Sharma, 2004)*”,... (página 60).

Se ha de informar que la publicación de Seed, H.B., Duncan, J.M., 1981, se refiere al clásico ejemplo de la rotura de la presa de Teton (EEUU, 1976), debido a un proceso de erosión interna en el que no intervino ninguna actividad sísmica y por lo tanto no es una referencia válida para la cuestión que nos ocupa.

El libro citado titulado *Dams: Incidents and accidents* de Saxena, K.R., Sharma, V.M. (2004), hace una descripción del modo de fallo de 6 presas: Tetón (EEUU, 1976), Panshet y Khadakwasla (India, 1961), Balsa de Baldwin Hills (EEUU, 1963), Vaiont (Italia, 1963) y Koyna (India, 1967). La presa de materiales sueltos de Teton como se ha expuesto colapsó por un proceso de erosión interna en el que no intervino el sismo, las presa de fábrica de Panshet y Khadakwasla, colocadas en cadena, colapsaron durante su primer llenado por insuficiencia estructural, sin intervención de ningún sismo, la Balsa de Baldwin Hills falló por erosión interna, la presa bóveda de Vaiont, no rompió y todavía se pueden visitar erguidos sus 261,60 m de altura, donde se produjo un deslizamiento del vaso, sin la intervención de ningún sismo y la presa de hormigón de Koyna padeció un episodio de sismicidad anticipada por embalse sin causar su colapso. Es decir, muchas son presas de tipología estructural diferente a la de Mularroya, sus fallos no tienen relación con la sismicidad, y la única que la tiene, es la presa de Koyna, que como se ha comentado con anterioridad, sufrió daños menores y sigue abasteciendo a 100 millones de personas.

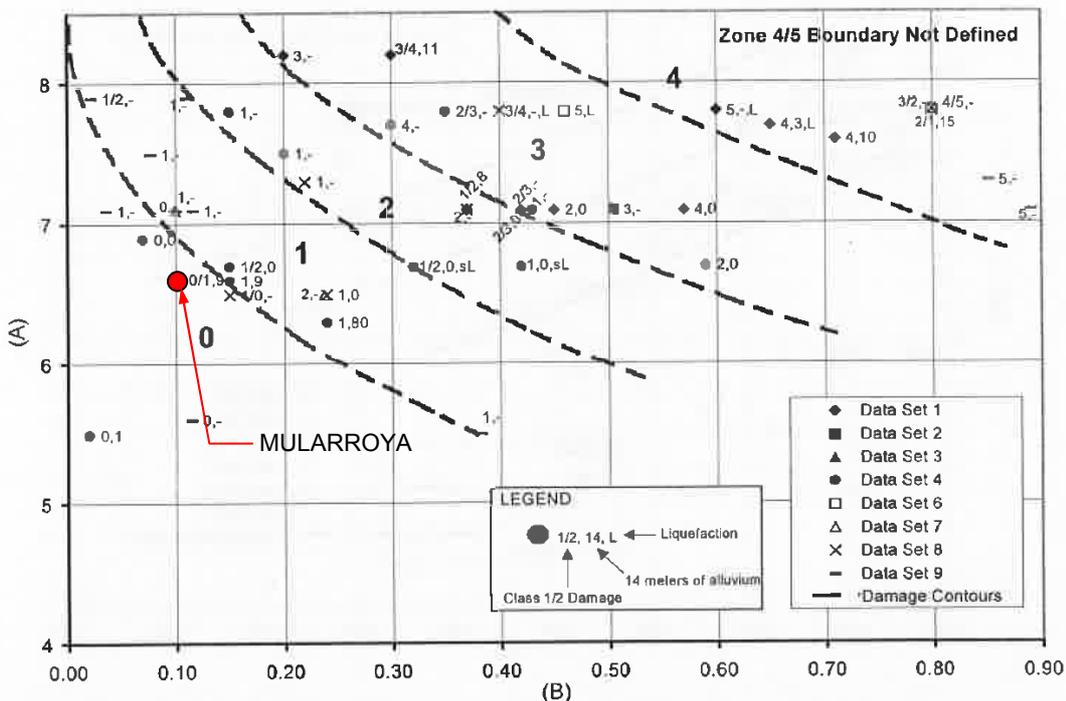
El texto titulado “*The statistics of embankment dam failures and accidents*” de Foster, M., Fell, R. (2000) describe los resultados de un análisis estadístico de fallos y accidentes en presas de materiales sueltos, concentrándose específicamente en aquellos incidentes relacionados con los fenómenos de tubificación (piping) e inestabilidad de las laderas, sin entrar a valorar afecciones sísmicas.

En resumen, que la bibliografía aportada por los autores en la “revista SGE”, viene a ratificar lo expuesto en el primer párrafo de este apartado por Martin Wieland, de que no existen referencias de roturas catastróficas de presas modernas motivadas por sismos.

A continuación, se representa un gráfico que presenta los contornos de daños en presas de materiales sueltos relacionando la aceleración pico: Peak Ground Acceleration (PGA) en cimiento en abscisas y la magnitud en ordenadas, de S. Pells y R Fell (2003). El área 0 simboliza sin daños significativos y el área 5 colapso.

No está claro cuáles son los valores propuestos para el cálculo sísmico por los autores en la “revista SGE”, cuando expresan: “*cabría tomar como referencia el cálculo propuesto por Simón et al. (2014) con criterio probabilista para un área con un potencial sísmico similar, como es la de Teruel. En ese área, teniendo en cuenta los parámetros sismogénicos de la falla de Concu y el registro sísmico histórico e instrumental, se ha estimado para un periodo de recurrencia de 500 años, una $M = 5,4$ y una aceleración de pico mínima de $0,105 g$* ” (página 58).

En cualquier caso, considerando que utilizan el valor máximo expuesto de magnitud 6,8 y la aceleración referida con antelación $0,105 g$, **se puede comprobar en el gráfico que no se producirían daños en la presa de Mularroya**. También se puede observar que el valor $1,00 g$, ni siquiera aparece en el gráfico, por su rareza.



A pesar de no ser preceptivo en la vigente norma de construcción simorresistente NCSE-02 y aplicando el principio de cautela, se ha procedido a realizar el cálculo sísmico de la presa de Mularroya considerando las aceleraciones definidas en la Actualización de Mapas de Peligrosidad Sísmica de España del año 2012, del Instituto Geográfico Nacional, competente en la materia:



Acciones consideradas	Periodo de Retorno (años)	Aceleración
Situación Normal	500	0,04 g
Sismo de Proyecto	1.000	0,06 g
Sismo Extremo	5.000	0,160 g

Utilizando el programa de cálculo comercial SLIDE de la casa RockScience, que emplea el método del equilibrio límite por rebanadas según el procedimiento de Bishop, los resultados obtenidos son los siguientes:

ACCIONES CONSIDERADAS		FS OBTENIDO	FS EXIGIDO
Normal	Final de Construcción	1,45	1,40
	Embalse lleno a NMN	1,45	
Accidental	Final de construcción + TP	1,36	1,30
	Embalse lleno a NMN + TP	1,36	
	Desembalse rápido	1,37	
Extrema	Embalse lleno a NMN + TE	1,23	1,00
	Desembalse rápido + TP	1,20	

Como se puede comprobar de los datos anteriores, **la presa de Mularroya cumple con solvencia las condiciones de seguridad, incluidas las sísmicas.**

Para concluir este apartado, los autores en la "revista SGE" citan que *"el caso de una presa de materiales sueltos, el factor de forma (presa con forma convexa en planta hacia aguas arriba) es favorable para la generación de deslizamientos sobre el cuerpo de la presa"*.



Son conocidas las ventajas potenciales de las presas de materiales sueltos frente a las de hormigón para soportar las acciones dinámicas de un sismo, dado que sus materiales presentan una resistencia dinámica al esfuerzo cortante similar o ligeramente superior a la resistencia estática. La disposición en planta con curva convexa en el talud de aguas arriba de una presa de materiales sueltos, tiene un efecto beneficioso, en contra de lo expresado por los autores. Las posibles tracciones que pudiera generar un terremoto, induciendo posibles vías de filtración de agua y arrastre de partículas, tenderían a cerrarse como consecuencia del empuje del agua.

6. SISMICIDAD INDUCIDA

Lo primero que habría que señalar es que en el pasado se utilizó la expresión “sismicidad inducida por embalses” (reservoir-induced seismicity). Sin embargo, en la actualidad el Comité Internacional de Grandes Presas en su Boletín 137 del año 2011, considera que la denominación más adecuada es **Sismicidad Anticipada por Embalses** (reservoir-triggered seismicity) porque refleja mejor la naturaleza de este fenómeno. Otros la traducen como Desencadenada, Disparada, Activada, etc.

Los autores en la revista “SGE” hacen las siguientes afirmaciones:

- *“la permeabilidad y existencia de sistemas de fallas en los materiales del vaso y la cercanía a una de las fallas con actividad reciente más importantes de la Cordillera Ibérica central, la falla del río Grío... hace que esta presa ... presente altas probabilidades de provocar sismicidad inducida (triggered seismicity o ‘sismicidad anticipada’). (página 56).*
- *“Los ejemplos de sismicidad inducida provocados por el llenado y explotación de embalses son numerosos en todo el mundo”. (página 56).*
- *“El caso reciente más conocido en España es el del embalse de Itoiz, que causó una crisis sísmica sin precedentes recientes” (página 56).*

Los autores citan los 20 casos siguientes: Charvak, Nurek, Sriramsagar, Osmansagar, Bhatsa, Thien, Koyna, Kotmale, Oroville, Monticello, Zhelin, Takase, Nagawado, Ogohci, Kuzuryu, Iwaya, Kawamata, Tsuruta, Ikaria y Makio. Teniendo en cuenta esos datos y que el número de presas en el mundo se estima en más de 40.000, los casos de sismicidad serían del 0,05 %



En realidad, se han registrado unos 107 casos en el mundo, lo que supone que **tan solo el 0,3 % de las presas mundiales han registrado algún caso de sismicidad anticipada y de ellos, sólo 4 casos (0,01%) han registrado magnitudes superiores a 6, únicas susceptibles de causar algún daño a una presa**

En España con 1.200 grandes presas, se habrían registrado, como máximo, 9 casos (0,7%), con una magnitud máxima de 4,6 en el caso de la discutida sismicidad anticipada por el embalse de Itoiz, sin daños para la presa, sin heridos y que coincide con la sismicidad natural de la zona, que se reproduce periódicamente en Navarra, sin acertar a entender el alcance de la crisis sísmica sin precedentes citada. En España no se han producido daños o afecciones a ninguna presa por fenómenos de sismicidad natural o anticipada.

Ninguna presa en el mundo ha colapsado por fenómenos de sismicidad anticipada, y por lo tanto, en ninguna se ha abandonado su explotación por esta causa. La presa de Koyna (India) citada, que tuvo un episodio de sismicidad anticipada en 1967, continúa en la actualidad siendo imprescindible para 100 millones de personas para su abastecimiento, regadío y energía en el estado de Maharashtra.

En general, los científicos opinan que para que se produzca el fenómeno de sismicidad anticipada por un embalse, se han de superar dos condiciones: que **la presa tenga más de 100 m de altura y que el embalse almacene más de 1.000 hm³ (Simpson, 1988).** En el caso del **embalse de Mularroya no se cumple ninguna de ellas**, la presa tiene 82,58 m de altura y el embalse almacena 103 hm³.

La presa de La Tranquera, de altura y volumen similares a Mularroya, lleva 60 años sin presentar problemas de sismicidad anticipada, a pesar de estar ubicada junto a la falla de Munébrega que citan los autores, y hay que recordar que todos los años la Confederación Hidrográfica del Ebro, llena y vacía 55 presas sin incidentes.

A pesar de todo lo dicho, debemos ser prudentes, la sismicidad anticipada por embalse es un fenómeno complejo, todavía no bien conocido. El llenado de un embalse podría llegar a modificar la distribución de esfuerzos en la corteza terrestre a través de dos mecanismos; el efecto de la carga de la columna de agua (Rajendran y Talwani, 1992) o el incremento de la presión intersticial (Talwani y Acree, 1985).

De esta forma, una falla, que se encuentra sometida a esfuerzos tectónicos y próxima a la rotura, como consecuencia del aumento de la presión de fluidos por el llenado del embalse, puede liberar de forma brusca la energía acumulada mediante un sismo.

El sismo más grande generado por sismicidad anticipada por embalse, ha sido de magnitud 6,3 en Koyna (India, 1967) y puesto que el rango de sismicidad natural descrito por los autores en la "revista SGE" ha sido de entre 6,2 y 6,8, coincidirían la máxima sismicidad natural de la zona y la máxima sismicidad anticipada registrada.



El Comité Internacional de Grandes Presas en su Boletín 137 (2011) establece que la magnitud máxima de la sismicidad anticipada no puede superar a la natural (se limitaría a adelantarla temporalmente) y desde este punto de vista, si la presa se calcula para soportar la sismicidad natural, siempre va a soportar la anticipada. No constituye por lo tanto, un problema adicional.

Incluso hay autores que opinan que la sismicidad anticipada genera mayor número de sismos, pero con menor magnitud, y por lo tanto, pudiera ser incluso beneficiosa en algunos casos, al liberar la energía acumulada tectónicamente, en pequeñas dosis.

En cualquiera de los casos, durante el proceso de puesta en carga de un embalse y en su fase de explotación, se pueden establecer los controles de auscultación adecuados para inspeccionar el inicio de la actividad sísmica en fases preliminares, y actuar en consecuencia.

7. PERMEABILIDAD DEL VASO DEL EMBALSE

El Proyecto del Embalse de Mularroya, que estuvo en información pública, dispone del Anejo 13 titulado "Filtraciones. Influencia en el embalse". En él se describe que existen cuatro zonas con problemas potenciales desde el punto de vista de la permeabilidad. Para su estudio se realizaron los siguientes trabajos:

- a) Cartografía Geológica. Se cartografiaron con detalle las formaciones permeables, contratando a un especialista de reconocida solvencia en plataformas carbonatadas mesozoicas.
- b) Marco Hidrogeológico. Se realizó la caracterización de los parámetros hidrogeológicos de las formaciones permeables utilizando estudios anteriores y realizando 5 ensayos de bombeo de larga duración.
- c) Realización de pruebas de bombeo en un pozo de 200 m de profundidad y 2 piezómetros de 350 y 500 m atravesando todas las formaciones permeables del vaso.
- d) Realización de un modelo matemático para simular las pérdidas por filtración
- e) Realización del mismo análisis, pero por el método de los elementos finitos.
- f) Análisis químicos de muestras de agua.



A partir de todos estos datos, se llegó a la conclusión de que las filtraciones no eran obstáculo para la viabilidad del embalse.

Por otra parte, el método científico exige que para verificar nuestras afirmaciones las apoyemos en evidencias demostrables, y no simplemente en opiniones.

8. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En esta nota técnica aclaratoria se ha analizado el contenido del artículo publicado en diciembre de 2017, en la revista de la Sociedad Geológica de España titulado "*El embalse de Mularroya (Zaragoza). Problemas geológicos en una obra en avanzado estado de construcción*" cuyos autores son: Antonio Casas, Marcos Aurell, Carlos Revuelto, Pablo Calvín, José Luís Simón, Óscar Pueyo, Andrés Pocoví y Marcos Marcén, con la intención de aclarar las modificaciones introducidas por los autores en la peligrosidad sísmica de la Comarca de Valdejalón.

Se ha recordado que la **normativa sismorresistente NCSE-02 actualmente en vigor y de aplicación a todo el Estado, define la Peligrosidad Sísmica en la Comarca de Valdejalón, con el umbral más bajo de España y de la Península Ibérica**. En concreto, en la zona asigna una aceleración sísmica básica inferior a 0,04 g y por ejemplo esto significa que no se requiere la consideración del sismo en los cálculos de estabilidad de una presa.

También se han repasado los datos de la **Actualización de Mapas de Peligrosidad Sísmica de España del año 2012** elaborada por la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, donde la Comarca de Valdejalón **sigue teniendo uno de los umbrales más bajos de España**, con una aceleración sísmica de 0,04 g para un periodo de retorno de 475 años.

En este mapa, **el mayor valor de aceleración sísmica de la Península Ibérica es de 0,24 g ubicado en la provincia de Granada**. Los autores en la "revista SGE", asignan a la Comarca de Valdejalón una sismicidad definida por una aceleración 1,00 g, sin concretar su periodo de recurrencia.

El **Plan Territorial de Protección Civil de Aragón (PLATEAR)** aprobado por decreto 220/2014 de 16 de diciembre, publicó el **Mapa de Riesgo Sísmico, según el cual** la zona de la Comarca de Valdejalón tiene también el nivel más bajo, **calificándolo de Riesgo Muy Bajo**.

La metodología empleada por los autores en la "revista SGE" para determinar la peligrosidad sísmica de la zona, no queda aclarada. Unas veces proponen métodos deterministas con aceleraciones sísmicas de valor 1,00 g, donde no es necesario considerar el



periodo de retorno de las fallas, ni las incertidumbres introducidas en el proceso de cálculo, y que es claramente conservador, y otras veces métodos probabilísticos con valores de aceleración 0,10 g, extrapolándolos de otras fallas y zonas situadas a 130 km y sin tener en cuenta las leyes de atenuación y la distribución de los sismos con respecto al emplazamiento.

La sugerida escasez de registro instrumental de sismicidad de la zona, no es cierta. El área de estudio presenta un registro de sismicidad similar al del resto de la península Ibérica.

Los métodos empíricos indirectos utilizados, que se valen de correlaciones para determinar la magnitud o intensidad de un terremoto a partir de la longitud de la falla y su conversión a aceleración, pueden introducir incertidumbre para la determinación de la peligrosidad sísmica, si se desconoce el periodo de recurrencia, como es el caso.

Tal y como expresa Martin Wieland (2010), presidente del Comité de Aspectos Sísmicos del Comité Internacional de Grandes Presas, aunque un terremoto puede producir daños en las presas, **no existen referencias de roturas catastróficas de grandes presas modernas motivadas por sismos.**

Se han expuesto los ejemplos de los últimos sismos de elevada magnitud en países con gran presencia de presas, sin registrarse fallos de las mismas. Sabemos por la presencia de las presas romanas de Muel y Almonacid de la Cuba, que o bien las fallas propuestas por los autores de la “revista SGE” no se han movido en más de 2.000 años, o bien su actividad sísmica no las afecta.

También se han presentado los trabajos de S. Pells y R Fell (2003), donde para las magnitudes y aceleraciones manejadas en Mularroya se está en la franja más baja, considerándolos **daños insignificantes.**

A pesar de no ser preceptivo en la vigente norma de construcción sísmorresistente NCSE-02 y aplicando el principio de cautela, se ha procedido a realizar el cálculo sísmico de la presa con una aceleración de hasta 0,16 g, demostrando que **la presa de Mularroya cumple con solvencia las condiciones de seguridad, incluidas las sísmicas.**

En cuanto a la sismicidad anticipada por embalses, se han registrado unos 107 casos en el mundo, lo que supone que **tan solo el 0,3 % de las presas mundiales han registrado algún caso de sismicidad anticipada y de ellos, sólo 4 casos (0,01%) han registrado magnitudes superiores a 6, (nunca superiores a 6,3) únicas susceptibles de causar algún daño a una presa.**



Ninguna presa en el mundo ha colapsado por fenómenos de sismicidad anticipada y, por lo tanto, en ninguna se ha abandonado su explotación por esta causa.

La presa de La Tranquera, de altura y volumen similares a Mularroya, lleva 60 años sin presentar problemas de sismicidad, a pesar de estar ubicada junto a la falla de Munébrega que citan los autores, y hay que recordar que todos los años la Confederación Hidrográfica del Ebro, llena y vacía 55 presas sin incidentes.

Los científicos opinan que para que se produzca el fenómeno de sismicidad anticipada por embalse, se han de superar dos condiciones: **que la presa tenga más de 100 m de altura y que el embalse almacene más de 1.000 hm³ (Simpson, 1988). En el caso del embalse de Mularroya no se cumple ninguna de ellas.**

En cualquiera de los casos, durante el proceso de puesta en carga de un embalse y en su fase de explotación, se pueden establecer los controles de auscultación adecuados para inspeccionar el inicio de la actividad sísmica en fases preliminares, y actuar en consecuencia.

Los autores en la "revista SGE", no han presentado ninguna evidencia científica de la existencia de una falla con actividad sísmica durante al menos, los últimos 10.000 años.

La permeabilidad del vaso se ha evaluado mediante cartografía geológica de detalle, caracterización de los parámetros hidrogeológicos, ensayos de bombeo, modelos matemáticos y de elementos finitos, verificándose la viabilidad del embalse. Los autores en la "revista SGE", no han presentado ningún dato científico que apoye sus argumentos.

Una de las claves para el avance de una sociedad es precisamente su desarrollo científico y los trabajos que aportan la localización de nuevas fallas neotectónicas (Gutierrez et al, 2013), son sin duda una importante contribución. Todas las propuestas de investigación que favorezcan ese desarrollo, requieren de un análisis juicioso y sosegado en un ámbito científico-técnico. Cualquier divulgación o exposición pública de una teoría sin que haya sido suficientemente debatida, planteando hipótesis sin confirmar, sin pruebas que la avalen y especialmente sin que los organismos técnico-científicos especializados y competentes en la materia hayan podido opinar, puede conllevar **una innecesaria alarma social** que provoca desasosiego en la opinión pública, **que no puede ser obviada** por aquellos que remiten a los medios de comunicación la teoría objeto de estudio.

Hay que preguntarse también, cuando se afirma que la peligrosidad sísmica de toda una comarca aumenta comprometidamente con la construcción de una presa, por qué razón se está poniendo el foco de atención exclusivamente sobre las presas que, como se ha explicado, son



muy resistentes frente a un sismo. Con las aceleraciones sísmicas propuestas, ninguna edificación de la zona podría resistir en pie, donde la NCSE-02, actualmente en vigor, no es de aplicación, otro tanto ocurriría con las afecciones a las numerosas infraestructuras lineales de la zona (autovía A-2, ferrocarril convencional, Alta velocidad).

También se debería explicar por qué es crítica esa aceleración sísmica para una presa en construcción, pero no lo es para las presas ya construidas que existen en la zona (La Tranquera, Maidevera, etc).

Este no es el único caso, donde se observa este comportamiento poco responsable, algunos de los autores han utilizado los mismos argumentos para oponerse a la construcción de las presas de Santa Liestra (1997), Itoiz (1999), Yesa (1999), Biscarrués (2000), Rialb (2001), Enciso (2005), Montearagón (2006), Loteta (2015), Soto-Terroba (2016), Mularroya (2016), es decir todas aquellas que inician su construcción.