

Sismicidad inducida por la manipulación del subsuelo



Antonio Soriano

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Catedrático de Ingeniería del Terreno



Julio Mezcua

Doctor en Ciencias Físicas e ingeniero geógrafo.

Presidente de la Fundación J. García Siñeriz

Resumen

Los terremotos inducidos por la inyección de gas realizadas en la plataforma continental del golfo de Valencia, proyecto El Castor, en septiembre-octubre 2013, han creado cierta alarma social en las poblaciones costeras próximas. Esto, que es novedoso en España, ha ocurrido con cierta frecuencia en otras áreas pobladas en distintos países y por causa de varios tipos de manipulación del subsuelo. Este artículo intenta ilustrar el problema de la sismicidad inducida por la actividad del hombre. Según se describe en el texto, la sismicidad inducida tiene unos límites, máximo terremoto inducido, que pueden ser investigados en cada caso. De esa manera, se pueden establecer protocolos de actuación que impidan que dichas actividades causen daños materiales en las localidades próximas.

Palabras clave

Sismicidad inducida, inyección de gas, geotermia, fracturación hidráulica

Abstract

Earthquakes induced by the gas injection in the continental platform, of the golf of Valencia, Castor Project, last September-October 2013, has motivated some social alarm within the nearby coastal population. That, which is new for Spain, has happened with some frequency at some other populated areas, in different countries and due to various types of subsoil manipulations. This article tries to illustrate the induced seismicity problem due to human activities. As it is described in the text, the induced seismicity has some limits (maximum induced earthquake) that can be investigated for each particular case. By this way, protocols of operation can be established to avoid that theses activities might cause material damage to local population.

Keywords

Induced seismicity, gas injection, geothermic, hydraulic fracturing

La corteza terrestre está sujeta a una serie de tensiones, generadas por la tectónica global, que la rompen cuando en una parte de ella se supera su resistencia. Este proceso tectónico viene ocurriendo de manera natural, sin intervención del hombre, desde hace millones de años. La rotura suele producirse según superficies de debilidad previamente existentes, denominadas fallas. Precisamente, una de las funciones de la sismología es la identificación del terremoto con su superficie de rotura o falla correspondiente. A las fallas que han provocado sismos en los últimos 10.000 años se las denomina fallas activas.

El número de sismos importantes ($M > 4$) que ocurren naturalmente en el mundo es muy alto. Esa cifra no es fácil de acotar por la falta de un registro mundial fehaciente.

Solo en el cinturón circumpacífico se estima que ocurren más de 20.000 sismos/año de magnitud mayor que $M4$. De ellos, superaron la magnitud $M6$ unos 200 sismos/año.

Desde la segunda mitad del siglo XX se ha observado en algunas ocasiones que la acción del hombre ha venido asociada a la ocurrencia de terremotos. Una prueba de ello sería el crecimiento de la sismicidad observada en el centro de Estados Unidos. Según Ellsworth et al. (2012), el número de sismos $M > 3$ en el centro del continente norteamericano crece con cierta aceleración; de unos 20 sismos por año $M > 3$ sentidos en 1950 se ha pasado a cerca de 200 sismos por año $M > 3$ en 2009 y además no se ve que esa velocidad se estabilice. ¿Es eso un crecimiento de la sismicidad natural? Este dato de crecimiento es hoy objeto de estudio. Las circunstancias no quedan

aún claras, pero, en todo caso, es evidente que el hombre puede estar activando una sismicidad que, de otra forma no se habría producido. Es cierto que ninguno de los terremotos inducidos ha causado daños de importancia en USA, pero suponen una incomodidad evidente para los habitantes que la sienten.

En el último siglo se ha experimentado algunos centenares de sismos, achacables a la manipulación del subsuelo. En Fig. 1 se indica un mapa mundial con los epicentros y las magnitudes de los sismos achacables a la sismicidad inducida. Se trata de unos 150 sismos que han quedado catalogados. Hoy parece que la sismicidad inducida a nivel mundial alcanza del orden de 10 sismos/año para sismos de magnitud mayor que M4 y no llega a 0,1 sismo/año de magnitud mayor que M6.

Los grandes sismos, magnitud mayor que M7, solo han ocurrido de manera natural; sin intervención humana.

Descripción del fenómeno sísmico

Como consecuencia de la rotura de la corteza terrestre, se produce una emisión de ondas que transmiten cambios de volumen del material a su paso, las ondas P y con menor velocidad otras ondas que transmiten movimiento de cizalla del material, ondas S. Ambas ondas son denominadas internas. Sin embargo, la presencia de superficies de distintas características elásticas en la tierra hacen aparecer ondas P y S refractadas y reflejadas, así como la aparición de ondas que viajan por las distintas superficies, incluida la superficie terrestre y que se denominan ondas superficiales. Son las conocidas como ondas de Love y de Rayleigh con velocidades de propagación inferiores a la de la onda S.

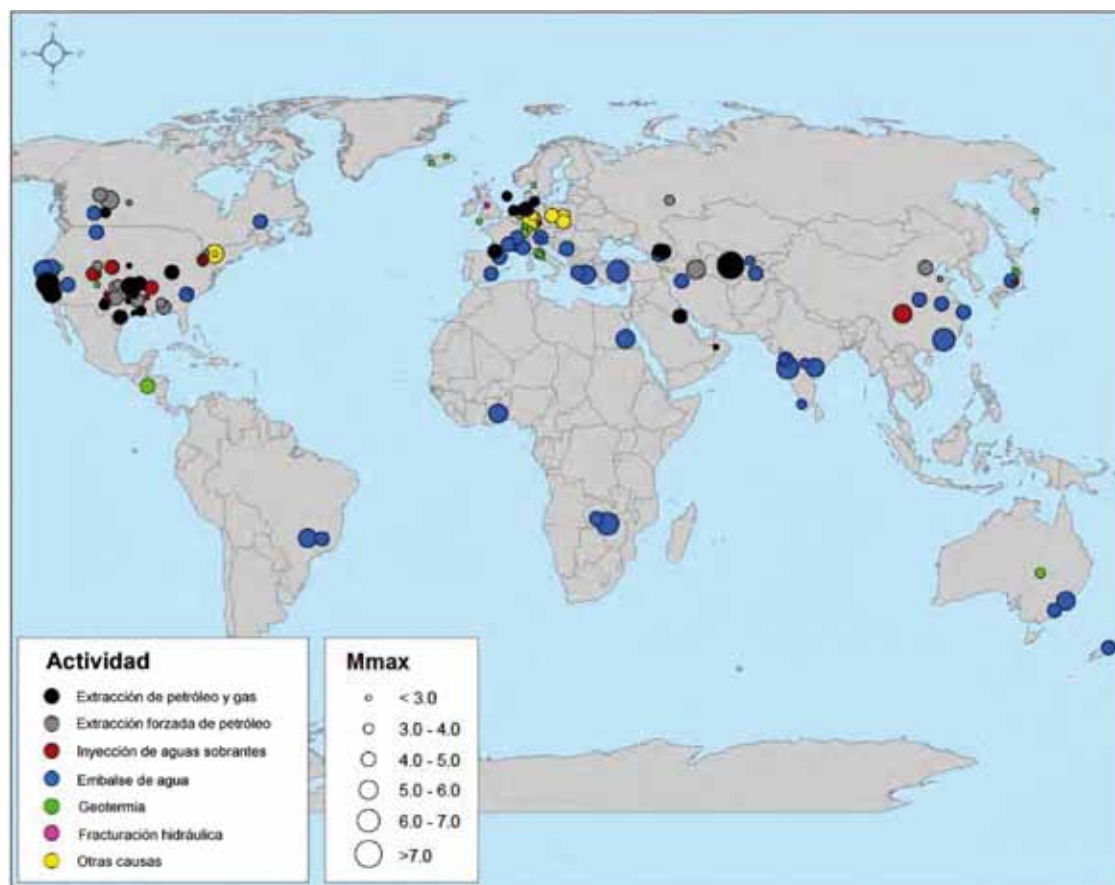


Fig. 1. Distribución espacial de los sismos catalogados como "inducidos" por la manipulación del subsuelo. Fuente: NRC (2012)

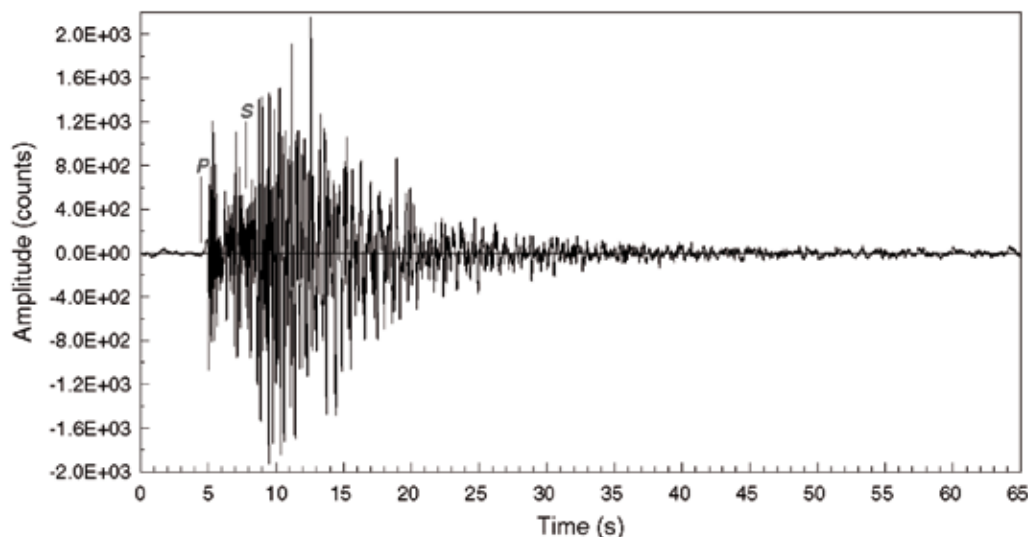


Fig. 2. Sismograma registrado en las inmediaciones del embalse de Tous donde se indican los tiempos de llegada de las ondas P y S (Fuente: Torcal et al., 2005)

En Fig. 2 se recoge un sismograma donde se indican los tiempos de llegada de las ondas internas.

Del estudio de estas ondas, registradas en varias estaciones sísmicas, se pueden deducir, por una parte, las propiedades elásticas de la Tierra y, por otro, la localización del sismo, tamaño del mismo, características geométricas de la falla responsable, estado de tensiones existente en el material, etc.

Magnitud de un sismo

El parámetro denominado magnitud trata de cuantificar el tamaño de los sismos. Hoy en día coexisten varias definiciones de magnitud que obedecen a los distintos procedimientos seguidos para obtenerlas a partir de los sismogramas registrados por distintas estaciones situadas a diversas distancias del epicentro. Cada una de esas definiciones se basa principalmente en la consideración de la amplitud de una determinada onda de las emitidas al producirse el sismo.

Así, considerando la máxima amplitud registrada con un determinado sismógrafo tipo, Richter (1935) definió lo que se denomina Magnitud local M_L o también conocida como magnitud Richter. Por otro lado, considerando la onda Rayleigh de una frecuencia de 1 Hz, registrada en sismógrafos de corto período, se define la magnitud m_b (L_g) para especificar que se trata de una onda superficial atrapada en la capa granítica de la corteza terrestre. Considerando la onda P se puede definir la magnitud

m_b y considerando las ondas superficiales, la magnitud definida es la M_s .

Todas estas magnitudes son fáciles y rápidas de calcular, pero no describen perfectamente el tamaño del sismo porque las ondas que genera pueden ser muy alteradas en su propagación a través de la tierra y proporcionar valores no coincidentes para un mismo sismo observado en sismógrafos diferentes.

Debido a la falta de precisión para determinar la magnitud por observación de amplitudes de diferentes tipos de ondas, Hanks y Kanamori (1979) idearon un nuevo concepto denominado Momento Sísmico, M_0 y que viene dado por:

$$M_0 = S \cdot d \cdot \mu$$

donde S = área de la zona de ruptura, d = desplazamiento relativo de la roca, entre ambos lados de la falla, durante la ruptura y μ = módulo de rigidez transversal de la roca. Con este valor se define la magnitud M_w mediante la expresión siguiente:

$$M_w = 2/3 (\log M_0 - 9,1); M_0 \text{ expresado en N}\cdot\text{m}$$

Generalmente, se acepta que la relación que existe entre la energía, E , que queda liberada por un sismo está relacionada con la magnitud por una expresión del tipo siguiente:

$$\log E = 1,5 M + 4,7; E \text{ expresado en Julios}$$

Con esta definición, un aumento en una unidad en la magnitud supone un incremento del orden de 30 veces en la energía liberada correspondiente.

La determinación de esta magnitud y de otros parámetros básicos del mecanismo focal no es inmediata y requiere el uso de cálculos de simulación que reproduzcan los sismogramas observados durante este terremoto en cuestión. Una descripción de los detalles de ese proceso, realizado en tiempo real por el Instituto Geográfico Nacional para facilitar pronto la información resultante, puede verse en la publicación de Rueda y Mezcuca (2005).

El tamaño de un determinado sismo depende principalmente de las características de la falla y del mecanismo de rotura que lo producen. Esa dependencia ha sido investigada, entre otros por Wells y Coppersmith (1994).

El efecto de los sismos. La intensidad

Los sismos grandes causan graves daños al entorno, son capaces de derribar edificios, destruir infraestructuras vitales e incluso generar tsunamis de consecuencias devastadoras. Esa ‘fuerza destructora local’ es medida por los sismólogos en una escala de intensidades sísmicas que pretende medir el daño local o la percepción de los habitantes, que causa un terremoto en una zona determinada. Estos efectos lógicamente disminuyen con la distancia al epicentro.

Se han utilizado varias ‘escalas’ de intensidad. Quizás la más famosa sea la de Mercalli que con ciertas modificaciones (MM) es utilizada hoy en EE. UU. En Europa se ha utilizado, hasta hace unos años, la escala MSK. Recientemente se ha adoptado, para uso obligatorio en Europa, una nueva escala denominada EMS-99, Grünthal y Martin (2009), que es prácticamente equivalente a la MM y distribuye sus efectos en doce grados desde el grado I (sismo que no es sentido) hasta el grado XII que implica la destrucción masiva de infraestructuras.

La ciudad de Madrid, por ejemplo, ubicada en una zona de sismicidad baja, ha sentido, en el último siglo, una intensidad V causada por un movimiento de la falla de Azores-Gibraltar que tuvo lugar el 28 de febrero de 1969. Esa intensidad (intensidad EMS = V) se define en esta escala con el siguiente texto:

*“Definición del grado de intensidad V.
Calificación: Fuerte.*

a) El temblor es sentido por la mayoría en el interior y por pocos en el exterior de viviendas o edificios. Algunas pocas personas se asustan y corren al exterior. Muchas personas se despiertan. Los observadores sienten una fuerte vibración del edificio, dormitorio o de los muebles.

b) Los objetos colgantes se mecen considerablemente. La porcelana y los vasos entrechocan y repiquetea. Los objetos pequeños que son más pesados en su parte alta o bien los objetos que se sostienen de forma precaria se pueden mover o caer. Las puertas y ventanas se abren o se cierran. En algunos pocos casos los cristales de las ventanas se pueden quebrar. Los líquidos oscilan y se pueden derramar de contenedores llenos hasta el borde. Los animales en el interior se pueden inquietar.

c) Daños de grado 1 en algunos pocos edificios de clase de vulnerabilidad A y B”.

Otras intensidades se describen con el siguiente calificativo inicial:

Intensidad local	Calificativo
VI	Daños leves
VII	Daños
VIII	Daños severos
IX	Destrucción
X	Muy destructivo
XI	Devastador
XII	Totalmente devastador

No deben ser preocupantes, en general, intensidades V o inferiores, pues, salvo elementos muy sensibles, esas intensidades no afectan notablemente ni a la vida ni a las pertenencias públicas o privadas.

Sería conveniente poder relacionar la intensidad con que se siente un sismo, con la magnitud y con la distancia del punto de observación del epicentro. La expresión definida de forma empírica para España por Mezcuca et al. (2004), es la siguiente:

$$I = 1,96 + 1,41 \cdot M_w - 2,93 \cdot \log D \quad (I = \text{Intensidad EMS})$$

donde M_w es la magnitud momento, antes definida y D es la distancia epicentral, expresada en km.

Esta intensidad corresponde a lugares llanos y en terreno firme. Localmente pueden producirse amplificaciones o atenuaciones debidas a la topografía y a las características geotécnicas particulares del lugar.

Sismicidad inducida

El hombre puede inducir sismos fuertes en zonas donde la estructura geológica del subsuelo reúne ciertas características: está previamente fracturada (falla) y sometida a tensiones que hacen fácil la inducción de una nueva rotura, esto es, presencia de fracturas en situación tensional crítica y además ser la roca de carácter frágil, esto es, capaz de romperse de forma brusca. Además es preciso que la actividad humana induzca tensiones suficientes para provocar el cambio tensional necesario para concluir la rotura. Estas condiciones no son fáciles de encontrar en un lugar cualquiera y por eso las acciones del hombre no suelen inducir sismos importantes; solo lo hacen en ocasiones muy particulares.

Normalmente la acción humana, cara al estudio de la sismicidad inducida, se suele agrupar en distintas actividades. Aquí, siguiendo esa pauta, se consideran a continuación las actividades más frecuentes.

Sismicidad inducida por embalses de agua

La construcción de presas de embalse se viene haciendo desde antiguo y parece evidente que algunos embalses han sido capaces de inducir sismos fuertes.

El caso más extremo de sismicidad inducida por embalses tuvo lugar en la India. La presa de Koyna parece que desencadenó en 1967, durante el primer llenado de su embalse, un sismo de gran magnitud ($M=6,5$) que causó la muerte a unas 200 personas que habitaban en una zona próxima con construcción muy pobre. La presa sufrió agrietamientos importantes y hubo de ser reparada para proseguir su explotación que hasta hoy ha venido haciéndose con normalidad.

Un caso semejante ocurrió antes en China (1962) aunque fuese conocido más tarde. También con un temblor inducido de $M=6,5$.



PRESAS NO ESPAÑOLAS				
Nº	Nombre	Altura (m)	Magnitud del sismo	Año
1	Koyna (India)	103	6,5	1967
2	Hsingfengkiang (China)	105	6,5	1962
3	Kremasta (Grecia)	120	6,3	1966
4	Kariba (Zambia)	128	5,8	1963
5	Oroville (California)	236	5,7	1975
6	Warragamba (Australia)	104	5,5	1973
7	Aswan (Egipto)	111	5,3	1981
8	Monteynar (Francia)	145	5	1963
9	Hoover (EE. UU.)	221	5	1935
10	Nurek (URSS)	317	4,6	1971
11	Mosul (Irak)	100	3,2	1986

PRESAS ESPAÑOLAS			
Nombre	Altura (m)	Magnitud del sismo	Año
Camarillas	44	4,1	1961
Canelles	133	4,7	1962
El Grado	88	M - IV	1966
La Almendra	203	2	1971
Canales	158	4	1989
Tous	135,5	3,8	1999-2000
Itoiz	122	4,6	2004

Fig. 3. Algunos ejemplos de sismicidad inducida por embalses

La recopilación de casos históricos está siendo actualizada por varios organismos. Uno de los catálogos más recientes es el indicado por el National Research Council de EE. UU. (2012) en el que figuran 42 casos documentados. Se sabe, por otros catálogos parciales que son muchos más los casos de embalses que han inducido sismos fuertes; probablemente sean más de cien.

Para ilustrar gráficamente esta cuestión, se ha preparado para esta publicación el diagrama de la Fig. 3 donde se indican solo once casos no españoles y siete casos bien conocidos de embalses españoles. Los estudios de sismicidad inducida realizados por García Yagüe (1979 y 1992) describen la sismicidad inducida por embalses españoles en dos épocas distintas.

Uno de los episodios sísmicos mejor registrado en España ha sido el inducido por el llenado de la presa de Itoiz. Ese caso es el más moderno, el último que ha tenido lugar y ha sido objeto de varios análisis. Por ejemplo, los descritos por Insua et al. (2007), Mezcua y Rueda (2007), Durá-Gómez y Talwani (2010) y Ruiz et al. (2006).

En Fig. 4 puede verse un mapa de epicentros de la serie sísmica de Pamplona del año 2004 que fue desatada por el llenado del embalse de Itoiz en septiembre de 2004 y cuyo evento de mayor magnitud alcanzó $M_w = 4,6$.



Fig. 4. Planta de ubicación de los sismos de la serie de Pamplona. Septiembre 2004. Fuente Instituto Geográfico Nacional

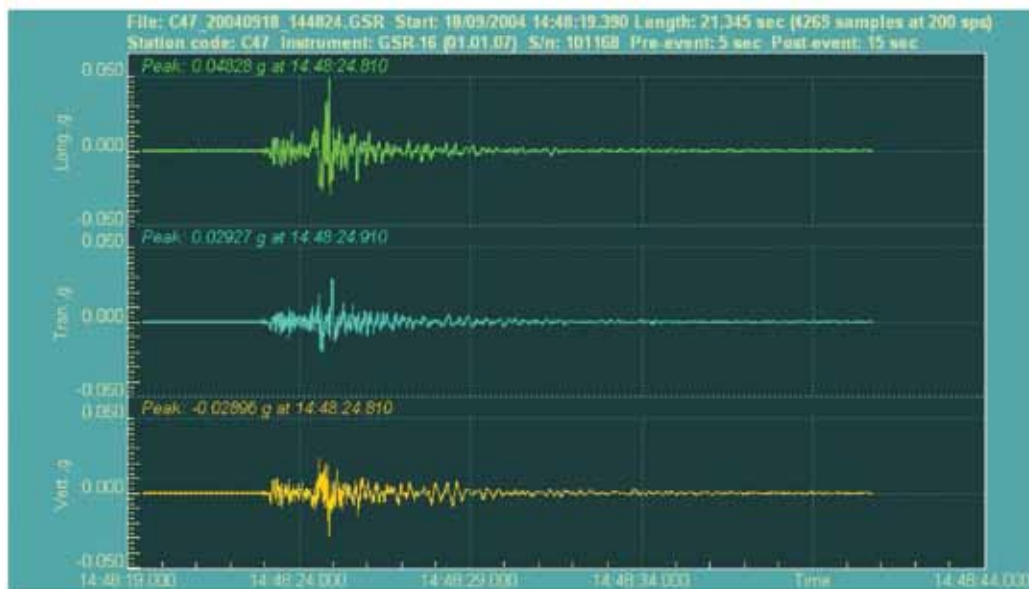


Fig. 5. Acelerogramas registrados en la presa de Itoiz. 18 de septiembre de 2004. (Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro)

Uno de los múltiples acelerogramas registrados en la presa se presenta en la Fig. 5.

Otros sismos inducidos por presas quedan descritos en numerosas publicaciones entre las que destacan la de Chen y Talwani (1998) sobre los embalses de China, la de Buforn y Udías (1981) sobre los embalses españoles, las de René Gómez (2009) y Mezcuá y Rueda (2007) sobre datos mundiales y españoles y el trabajo de Torcal et al. (2005) sobre la eventual sismicidad inducida por el embalse de Tous, la de Simpson y Negmatullaev (1981) sobre la sismicidad inducida por la presa de Nurek, la más alta del mundo.

Algunos autores insinúan que el gran terremoto, de magnitud M7,8, 15 de mayo de 2008, que provocó decenas de miles de muertos en la provincia de Sichuan (China), fue inducido por el embalse de Zipingpu. Otro terremoto, de magnitud M7,1, sentido en la misma área recientemente, el 15 de abril de 2013 sería una réplica tardía. En todo caso, la zona es de una sismicidad elevada y queda lejos de probarse que se trate realmente de sismicidad inducida.

Extracción de gas y petróleo. Convencional y forzada

El número de campos petrolíferos y de gas que se están explotando actualmente es muy elevado. Son centenares de miles los pozos de extracción que hoy están en explo-

tación y son relativamente escasos el número de campos de extracción de gas y petróleo que han generado sismos. En EE. UU. por ejemplo, según el National Research Council (2012) se contabilizan 38 campos de extracción donde se ha registrado sismicidad inducida y ésta además no ha superado la magnitud M4.

Existen casos históricos con mayor sismicidad como es el caso de Gazli en Uzbekistán donde la sismicidad natural se estima baja y, sin embargo, la extracción de gas y petróleo indujo temblores de tierra con elevadísima magnitud, M7 en tres ocasiones: abril 1976, mayo 1976 y marzo 1984. Las grandes dimensiones de esta explotación, la gran distancia de los epicentros al borde del campo, unos 30 km y la profundidad focal observada, unos 10-15 km, hacen sospechar que la sismicidad 'natural' no estuviera bien evaluada previamente. Aunque lógicamente esto es hoy difícil de comprobar.

Normalmente, la extracción convencional de petróleo no permite obtener más que una pequeña fracción (10 % a 20 %) del recurso total y por eso se suele recurrir a la explotación forzada aumentando la presión del yacimiento mediante la inyección de fluidos. Solo en Texas existían en 2012 (NRC, 2012) 108.000 licencias de pozos de explotación forzada. Con este procedimiento se ha llegado a inducir un sismo de magnitud M=4,6.

El examen de estos datos permite concluir que el mayor número de campos con extracción de gas o petróleo que han originado sismicidad inducida lo hacen por el desequilibrio de presiones que genera. Se tiene la intuición de que un sistema con compensación de presiones podría causar menor sismicidad.

Geotermia

La explotación del calor de la tierra, extrayéndolo de zonas profundas es un procedimiento novedoso y de gran potencial.

Una de las explotaciones de mayor envergadura es la que viene operándose desde 1965 en el Norte de California y que es conocida con el nombre de The Geysers. Actualmente su capacidad de generación de electricidad, con el vapor de agua extraído a gran temperatura y alta presión, asciende a 735 Mw. La energía se extrae por medio de 420 pozos.

La extracción del vapor de agua en este caso genera sismicidad inducida. Como consecuencia de esta explotación se han inducido sismos de magnitud $M > 4$. En los últimos cinco años se han sentido temblores de tierra generados por terremotos de esa gran magnitud. El terremoto mayor ocurrió en mayo de 2008 y alcanzó $M = 4,67$. Las zonas habitadas próximas, que son solo dos comunidades de vecinos, vienen sintiendo intensidades VI de la escala MM con cierta frecuencia; por término medio, una vez cada mes. La situación es admisible gracias a un acuerdo con los vecinos que garantiza todas las reparaciones de los posibles daños causados por los sismos.

Un ejemplo de fracaso, por falta de aceptación pública, es el de explotación geotérmica de la ciudad de Basilea (Suiza). Esta zona tiene una sismicidad natural notable. Se sabe que en 1356 se produjo un sismo natural muy fuerte; $M = 6,2$. La instalación geotérmica se inició en mayo de 2006. Poco después de comenzar la producción, el 8 de diciembre de 2008, se sintió un sismo de magnitud $M = 3,4$. Esto fue suficiente para que las quejas de los habitantes de la ciudad motivaran el cierre de la instalación.

Inyección de aguas sobrantes

Igual que la inyección de otros fluidos, las aguas residuales procedentes de las operaciones de extracción de gas o petróleo que se inyectan en el subsuelo pueden inducir

sismos, cuya magnitud es similar a las de otras operaciones de inyección.

En EE. UU. existen más de 10.000 pozos con licencia para inyectar aguas sobrantes de la industria petrolífera. El número de sismos generados con $M3$ es elevado y la magnitud del sismo mayor atribuido a esta causa alcanzó $M4,3$.

Fracturación hidráulica

La fracturación de la roca interesa para extraer los últimos recursos de gas, almacenados en pizarras impermeables, y también para favorecer la extracción de calor en instalaciones geotérmicas.

Las rocas se pueden fracturar en profundidad mediante inyecciones localizadas de agua a presión. Esto, que puede parecer una técnica muy agresiva, genera sin embargo sismos moderados, normalmente de magnitud negativa, $M < 0$, que es la acorde con la escasa energía necesaria para inducir fracturas de unas decenas de metros en cualquier dirección.

Existen, solo en EE. UU., más de 35.000 pozos donde se ha practicado esta técnica denominada abreviadamente *fracking* y nunca se han registrado sismos inducidos relevantes en los cincuenta años que lleva aplicándose.

En Inglaterra, sin embargo, ha sido muy notorio el caso de la fracturación hidráulica realizado en Blackpool. En abril de 2011 y como consecuencia de esta actividad, se indujo un sismo de magnitud $M2,3$ que obligó a paralizar temporalmente la planta de extracción de gas de pizarras. El estudio de la situación queda recogido en el informe para Cuadrilla Resources, concesionario de la instalación, firmado por Eisner et al. (2011). Aparentemente la sismicidad inducida por el *fracking*, en este caso particular, es extraordinaria cuando se compara con otros casos homólogos. Allí se indica que la elevada magnitud del sismo inducido se debió a la excesiva propagación de la presión del agua utilizada para la fracturación de la roca. Dicha presión se propagó a lo largo de los planos de estratificación y llegó a interesar una falla próxima, probablemente inestable, provocando el sismo mencionado. Los informes realizados y el plan de vigilancia posteriormente impuesto, permitieron reanudar la actividad de extracción de gas mediante fracturación de la roca madre.

Resumen

La sismicidad inducida, a juzgar por los casos históricos conocidos, parece generar sismos de menor tamaño que la sismicidad natural. Si la naturaleza ha mostrado la capacidad de generar sismos de extraordinaria magnitud (hasta M9), el hombre con sus intervenciones, manipulando la zona superficial de la corteza terrestre, no parece que haya inducido o adelantado, hasta hoy, sismos de magnitud mayor que M7,3, esto es, con energía liberada varios cientos de veces menor que la del máximo sismo natural observado.

Para magnitudes menores, M4, por ejemplo, la sismicidad inducida por el hombre ha venido a aumentar el número de sismos que naturalmente ocurrían cada año. Puede que en la época actual el incremento de la tasa anual de sismos con magnitud mayor que M4 se haya aumentado del orden del 0,1 % al 0,2 %.

Los terremotos históricos de magnitud M3 probablemente solo se hayan catalogado recientemente, en la época

denominada 'instrumental'. Hace un siglo se estudiaban únicamente sismos de mayor tamaño. De hecho, la definición de magnitud de Richter ($M_L = \log A + 3$, donde A = amplitud del trazo del sismograma tipo, expresada en mm) utilizada en las primeras etapas de la sismología instrumental, al principio del siglo pasado, implica que para un trazado de 1 mm la magnitud sería M3. No interesaban entonces sismos menores.

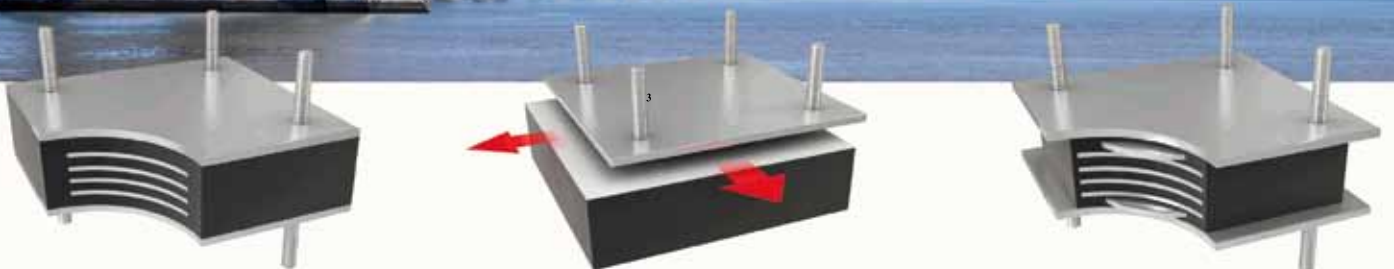
El registro actual de sismos menores que M3 es habitual y recientemente se contabilizan en los países industrializados. La reciente catalogación de estos sismos pequeños podría inducir a pensar en un repunte aparente de la tasa de sismicidad de pequeña magnitud.

Los datos históricos de sismicidad inducida están siendo objeto de estudio. Una de las recopilaciones más recientes es la que figura en el informe NRC (2012). Las distribuciones estadísticas de las magnitudes de los sismos generados en cada uno de los aproximadamente 150 casos



APOYOS ELASTOMÉRICOS

Más info: bit.ly/verdurop



Proveedores de grandes proyectos como la circunvalación de Amsterdam, tranvía de Orán, circunvalación de Hernani y la central de Cofrentes.

P.I. Santiago Payá. c/ F. Benimerins, 32. 03802 Alcoy (Alicante). T.: +34 965 520 950. info@cauchoverdu.com

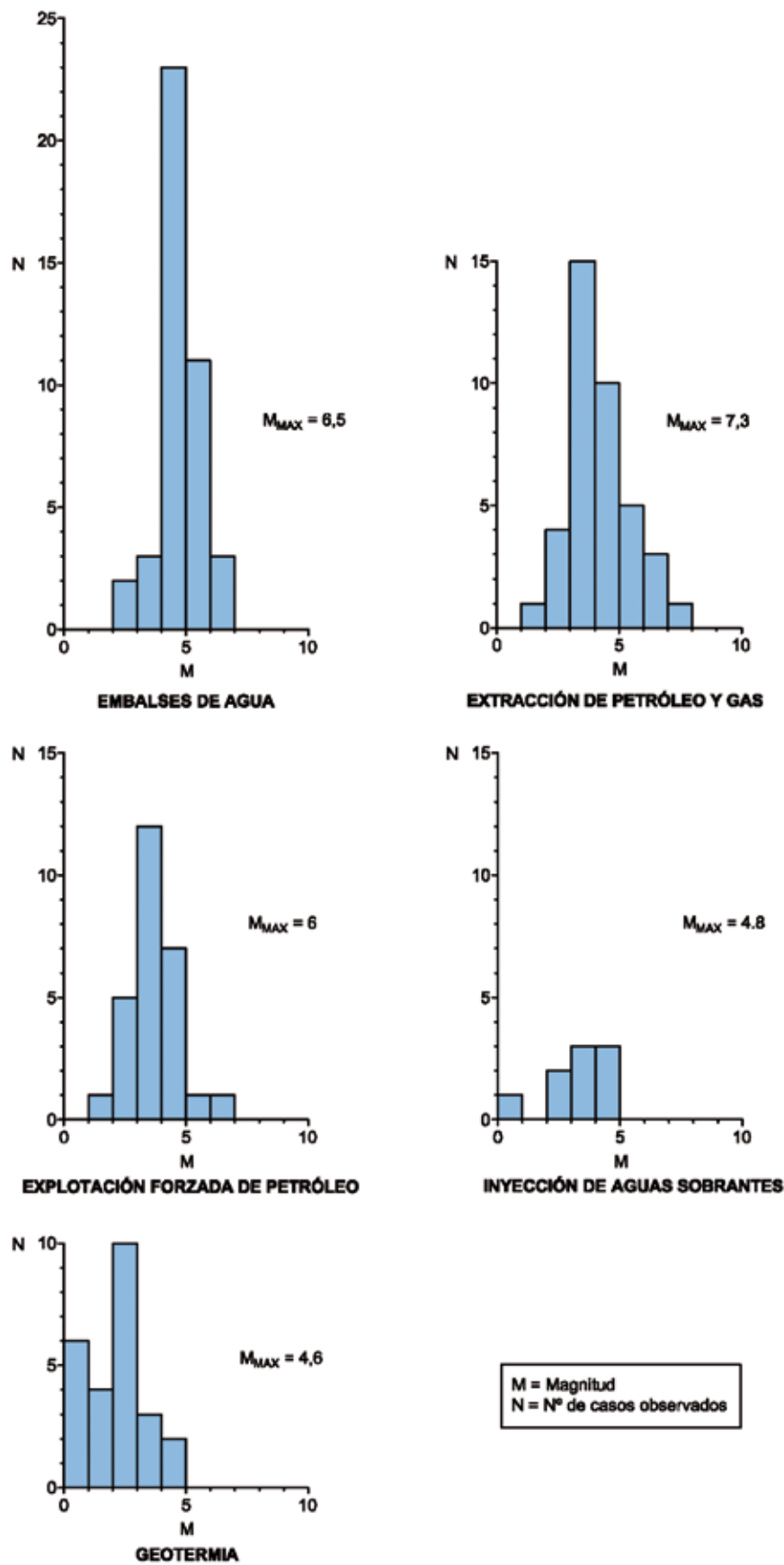


Fig. 6. Histogramas de las magnitudes de los terremotos inducidos por la manipulación del subsuelo

históricos publicados de sismicidad inducida se recogen gráficamente en la Fig. 6.

En España la sismicidad inducida ha estado restringida, hasta hace poco, a la generada por los embalses de agua. El máximo exponente de esta sismicidad ha sido el sismo de Itoiz, M4,6, que alarmó a los habitantes de Pamplona y otras localidades próximas al embalse. Pero eso ocurrió en el episodio sísmico de septiembre 2004 y no ha vuelto a ocurrir.

Es nuevo, para nosotros en España, la sismicidad inducida por otras actividades industriales. La quinta instalación de almacenamiento de gas, como reserva estratégica de este elemento, es la plataforma continental próxima a la costa del Levante. Es el denominado Proyecto Castor. Otros depósitos, ya en operación, son los de Gaviota, Serrablo, Yela y Marismas. El inicio de la inyección de gas en el Castor ha inducido un sismo importante M4,2 el 1 de octubre de 2013 precedido de sismos con $M_{\text{máx}} 3,6$ (20 de septiembre) y seguido por una secuencia de sismos con $M_{\text{máx}} 4,1$ (el 3 de octubre). Parece probado que la inyección de gas, si bien a baja presión, ha sido suficiente para reactivar parcialmente el sistema de fallas que quedan muy próximas a la zona de inyección. Esto, que es excepcional en España, no lo es a nivel mundial pues, tal como se ha dicho, los procesos de inyección de los fluidos en el terreno, han llegado a generar sismos de hasta M6 en otras zonas del planeta.

Según la ley de atenuación indicada en este texto, la magnitud de sismo necesario para que la intensidad local, sentida a 20 km de distancia del epicentro, sea claramente advertida por el hombre (intensidad local de grado V de la escala EMS) resulta ser $M_w=5,2$. Aunque estas leyes tienen una notable dispersión, esto explica que, hasta hoy, la sismicidad inducida por los embalses españoles ($M_{\text{máx}}=4,7$) y la primera sismicidad notable inducida por la primera actividad de inyección de gas en el Castor ($M_{\text{máx}}=4,2$), aunque hayan motivado cierta alarma social no hayan causado daños.

Las técnicas actuales, principalmente las mediciones geofísicas, permiten definir el sistema de fallas en un determinado emplazamiento. La sismología permitirá, además, discernir las fallas que son activas. La técnica actual permite estimar la capacidad de una determinada falla para generar terremotos, en función de su extensión, acotando así la magnitud del máximo terremoto esperable.

Por ello, hoy en día, el riesgo inducido por las actividades del hombre, puede ser evaluado.

En todo caso, en nuestro país, se necesita prestar atención especial a la sismicidad inducida, ampliando la red de observación local y estableciendo protocolos de actuación, en aquellos casos donde se sospeche que pueda inducirse algún eventual sismo importante. **ROP**



Referencias

- Buforn, E. A. Udías (1982). "Sismicidad inducida por grandes presas en España". *Revista de Geofísica*, 38, 43-52.
- Chen, L. and P. Talwani (1998). "Reservoir-induced Seismicity in China". *Pure appl. geophys.* 153 (1998) 133-149.
- Durá-Gómez, I. and P. Talwani (2010). "Reservoir-induced seismicity associated with the Itoiz Reservoir, Spain: a case study". *Geophys. J. Int.* 181, 343-356.
- Eisner, L., E. Janská, I. Opršal, and P. Matoušek (2011). "Seismic analysis of the events in the vicinity of the Preese Hall well". Report from Seismik to Cuadrilla Resources Ltd. Prague, Czech Republic. Available at www.cuadrillaresources.com/wp-content/uploads/2011/12/Seismik_SeismicReport_final3009111.pdf.
- Ellsworth, W.L., S.H. Hickman, A.L. Llenos, A. McGarr, A.J. Michael, and J.L. Rubinstein (2012). "Are Seismicity Rate Changes in the Midcontinent Natural or Manmade?". 2012 Seismological Society of America Annual Meeting abstracts.
- García Yagüe, A. (1979). "Spanish experiences on earthquakes induced by reservoirs". *Transactions of the 30th congress on large dams, New Delhi (India)*. Vol. II, Q51, R.36, pp. 1461-1473.
- García Yagüe, A. (1992). Sismicidad inducida por los embalses. Estudios realizados por el Servicio Geológico: Camarillas, Almendra, Canales". *Boletín nº 54*. Octubre 1992. Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
- Gómez López de Munain, R. (2009). "Sismicidad inducida por embalses (SIE)". Ministerio de Medio Ambiente. Confederación Hidrográfica del Ebro. Noviembre 2009.
- Grünthal, G., Lorenzo Martín, F. (Editors) (2009). "Escala Macrosísmica Europea 1998. European Macroseismic Scale 1998". Conseil De L'Europe. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie; 27. Luxembourg 2009.
- Hanks, T.C. and H. Kanamori (1979). "A moment magnitude scale". *Journal of Geophysical Research* 84 (B5):2348-2350.
- Insua Arévalo, J.M., J. García Mayordomo, L.I. González de Vallejo y A. Rodríguez Franco. (2007) "Análisis de la sismicidad registrada en el entorno del embalse de Itoiz (Navarra)". *Jornadas técnicas de estabilidad de laderas en embalses*. Zaragoza. Ministerio de Medio Ambiente.
- Mezcua, J., J. Rueda, y R.M. García Blanco. (2004), "Reevaluation of Historic Earthquakes in Spain". *Seismol. Res. Lett.*, 75, 75-81.
- Mezcua, J. y J. Rueda (2007). "Sismicidad inducida por embalses". *Jornadas técnicas de estabilidad de laderas en embalses*. Zaragoza. Ministerio de Medio Ambiente.
- NRC. National Research Council of the National Academies (2012). "Induced seismicity Potential in Energy Technologies". The National Academies Press. Washington, D.C. USA. www.nap.edu.
- Richter, C.F., (1935). "An Instrumental Earthquake-Magnitude Scale". *Bulletin of the Seismological Society of America* 25: 1-32.
- Rueda, J. y J. Mezcua (2005). "Near-real-time seismic moment-tensor determination in Spain". *Seismol. Res. Lett.*, 76, 455-465.
- Ruiz, M., O. Gaspà, J. Gallart, J. Díaz, J.A. Pulgar, J. García-Sansegundo, C. López-Fernández y J.M. González-Cortina. (2006). "Aftershocks series monitoring of the September 18, 2004 M = 4,6 earthquake at the western Pyrenees: a case of reservoir-triggered seismicity". *Tectonophysics*, 424, 223 - 243.
- Simpson, D.W. and S.K. Negmatullaev (1981). "Induced seismicity at Nurek reservoir". *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71, 1561-1586.
- Torcal, F., I. Serrano, J. Havskov, J.L. Utrillas y J. Valero (2005). "Induced seismicity around the Tous New Dam (Spain)". *Geophys J. Int.* 2005, 160, 144-160.
- Wells, D.F. and K.J. Coppersmith (1994). "New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and fault displacement". *Bulletin of the Seismological Society of America* 84(4):974-1002.