

SISMICIDAD INDUCIDA EN EL YACIMIENTO MARINO DE GAS POSEIDON MEDIANTE EL ESTUDIO DE LA SISMICIDAD A LARGO PLAZO.

Long-term induced seismicity at Poseidon off-shore gas field

R. Pérez-López (1) y J. L. Giner-Robles (2)

(1) IGME – Instituto Geológico y Minero de España – Geological Survey of Spain. C/Ríos Rosas 23, Madrid 28003 – SPAIN. Email: r.perez@igme.es

(2) Departamento de Geología y Geoquímica. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid. Campus Cantoblanco, Madrid. SPAIN. Email: jorge.giner@uam.es

Resumen: El yacimiento de gas de Poseidón constituye uno de los campos de extracción de gas el cual se localiza en el Golfo de Cádiz. Esta zona presenta fallas sismogénicas con capacidad de generar terremotos. Es por ello que un estudio exhaustivo de la potencial sismicidad inducida por operaciones de extracción de gas permitirá avanzar en el estudio de potenciales terremotos que afecten a la zona de Huelva, Cádiz y extremo suroeste de Portugal. La energía sísmica anual liberada en el entorno cercano al almacenamiento (50 km) presenta una correlación positiva con la cantidad de gas producida según datos oficiales del Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital. También se observa que dicha correlación depende de la cantidad producida al año. Con estos datos, es importante hacer un seguimiento al ser una de las zonas de mayor actividad sísmica de la Península Ibérica, con capacidad de disparar terremotos destructivos.

Palabras clave: Sismicidad Inducida, yacimiento gas Poseidón, energía sísmica, Golfo de Cádiz.

Abstract: *The offshore field gas of Poseidon is located within the Gulf of Cadiz. This area is prone to large earthquakes, including the estimated epicentre of the great earthquake of Lisbon of 1755. In this sense, the study of the potential induced seismicity in this area is a key point to be addressed plus the role of induced earthquakes and large tectonic faults. We have found a positive correlation between the annual seismic energy released 50 km away of the gas field with the gas production (data provided by the Spanish Ministry of Energy). The long-term behaviour of the seismic energy and gas production indicates that induced seismicity was present during the period of extraction and reservoir depletion.*

Key words: *Induced Seismicity, Poseidon gas field, seismic energy, Gulf of Cadiz.*

INTRODUCCIÓN:

En líneas generales, la sismicidad inducida se entiende como aquellos terremotos que se han generado debido a la actividad antrópica. Esto es debido a las variaciones que producimos en el estado de esfuerzos de una fractura preexistente en la corteza terrestre. Estas variaciones las producimos mediante minería, construcción e grandes presas hidráulicas, inyección de fluidos, extracción de gas profundo etc. (McGarr 2014; Wilson, 2017; Foulger et al., 2017).

Las fracturas en la corteza terrestre acumulan esfuerzo tectónico debido a la actividad de las grandes placas, y cuando se sobrepasa el límite a la fricción, disparan la energía elástica acumulada en forma de calor y de energía cinética y potencial (desplazamiento 3D). Es lo que conocemos como los terremotos. Pero este no es el único mecanismo de disparo de terremotos. Entre otros mecanismos que aquí no se citan, sabemos que los terremotos también se generan debido al cambio de esfuerzos sobre dichas fracturas. El mecanismo es sencillo. Por ejemplo, variaciones por carga de sedimentos en grandes cuencas, o bien la variación de carga por fusión de glaciares, o bien los cambios de presión de poro por movimiento de fluidos en zonas volcánicas producen sismos que denominamos naturales (Davison, 1921, Artemyev, 1972, Morner, 1978, Fjeldskaar et al., 2000, Hainzl et al., 2006).

En este trabajo, hemos realizado un estudio combinado entre la cantidad de gas obtenido del yacimiento de gas “off-shore” Poseidón (plataforma marina de extracción de gas), operado por REPSOL y

la energía sísmica liberada en el entorno cercano a la plataforma de extracción, situada a 30 km al SW de la costa de Huelva, en el Golfo de Cádiz. De esta forma, reproducimos la metodología que otros autores ya han utilizado (de Waal et al., 2015; Foulger et al., 2017). Los datos de los terremotos los hemos obtenido de la red sísmica nacional del Instituto Geográfico Nacional (www.ign.es), mientras que los datos de producción de gas por año los hemos obtenido de la página CORES (Corporación de Reservas Estratégicas) tutelada por el Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital (<http://www.cores.es/es/estadisticas>).

Los resultados muestran una correlación positiva entre la actividad sísmica en la zona y la producción de gas. Es por ello que sería interesante estudiar cual es el máximo terremoto que podría disparar dicha actividad gasística, así como la presencia de fallas activas en la zona que pudieran sufrir un proceso de disparo debido a la existencia de sismicidad inducida (Mulargia y Bizzarri, 2014). No olvidemos que la zona que estamos estudiando presenta fallas sismogénicas con capacidad de génesis de terremotos de magnitud M7 (Duarte et al., 2011).

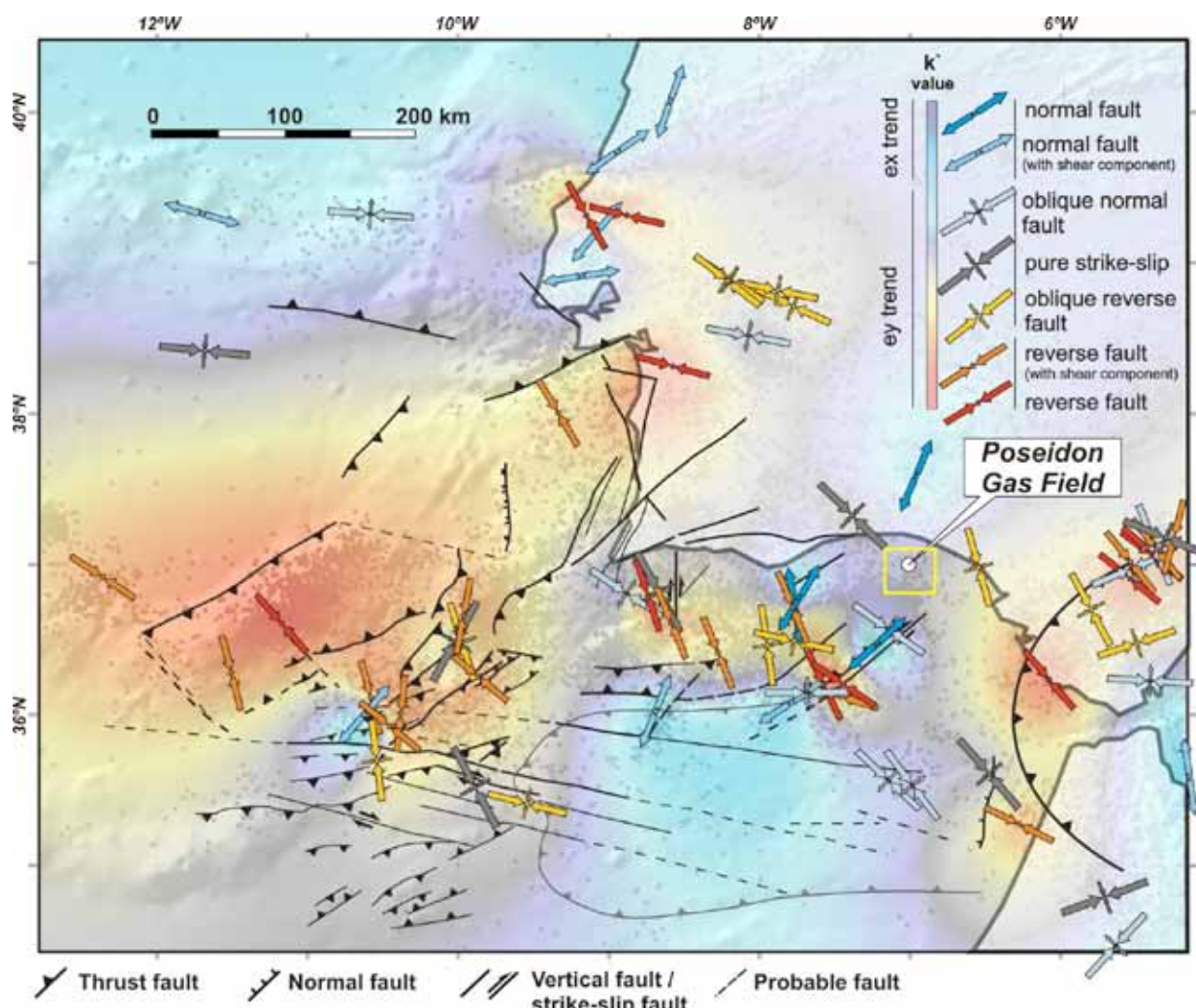


Figura 1: Localización geográfica del yacimiento de Poseidón en el Golfo de Cádiz y contexto tectónico regional, junto con las fallas propuestas por Duarte et al. (2011), así como el estado de la deformación obtenido a partir del análisis de los mecanismo focales de terremotos localizados en el área de estudio (Silva et al., 2017). Según el esquema, la plataforma Poseidón se localiza en una zona de fallas normales con componente en desgarre, lo cual coincide con la interpretación de potenciales fallas sísmicas en el banco del Guadalquivir según Matías et al. (2013) incluso con la posibilidad de afectar a la terminación norte de la Falla de Cádiz según Hernández-Molina et al. (2017).

Figure 1. Geographic location of Poseidon Gas Field offshore within the Gulf of Cadiz. Faults were proposed by Duarte et al., 2011 and the strain field was calculated by Silva et al., 2017. Data exhibits a normal fault zone with strike slip component. Extensional zone is in agreement with the model of tsunamigenic sources proposed by Matias et al. (2013), even affecting the north tip of the Cadiz Fault, according to the model proposed by Hernández-Molina et al. (2017).

CAMPO DE GAS DE POSEIDÓN (GOLFO DE CÁDIZ):

El yacimiento de gas de Poseidón se localiza a 30 km al SW de la costa de Huelva, dentro del Golfo de Cádiz. Está compuesto por dos zonas de extracción, denominadas Poseidón Norte y Poseidón Sur. La zona de estudio de la sismicidad la hemos tomado en un entorno de 50 km alrededor de Poseidón Norte, debido a su mayor proximidad con zonas habitadas.

Si bien es cierto que Poseidón sur está más cerca de grandes fallas activas (Fig. 1), el entorno de 50 km permite en cualquier caso incluir gran parte de la zona de estudio, entendida como donde los terremotos inducidos pueden disparar terremotos naturales en fallas preexistentes (Fig.2).



Figura 2. Serie sísmica de terremotos registrados por el IGN en el entorno de la Plataforma Poseidón (norte y Sur), de 627 terremotos entre el 23 de mayo de 1980 y el 18 de febrero de 2018.

Figure 2. Seismic series of earthquakes recorded by the Geographical Institute of Spain nearby of Poseidon offshore gas platform, 627 earthquakes recorded between 23th, May of 1980 and 18th of February, 2018.

La zona de estudio de la sismicidad se encuentra

entre las coordenadas 37,21°N; 7.53°W y 36,69°N; 6.56W.

Los 50 kilómetros se han escogido para el estudio del potencial efecto puesto que según el trabajo de Matias et al. (2013) mediante el uso de las relaciones empíricas de Wells y Coppersmith (1994), la longitud de las fallas podrían ser de 60 km para fuentes sismogénicas en la zona. El yacimiento de Poseidón está operado por REPSOL, y su comienzo data de 1995, según aparece en el REAL DECRETO 1824/1995 del BOE número 292 del 7 de diciembre de 1995. Los datos disponibles sobre producción datan de 1997, los cuales aparecen ya en diversos informes del ministerio de energía, resumidos en el CORES.

energía sísmica liberada aparece en la figura 3, junto con la producción de Poseidón. Además, en total se han registrado 17 terremotos de magnitud superior a 3,9 siendo el mayor terremoto registrado de magnitud M 4.3, en 2002, 2004 y 2006 (estrella gris en la figura 2). El catálogo es completo desde 1997, para terremotos de magnitud M1.5 en adelante.

RESULTADOS:

(1) Aparece una correlación positiva entre la energía sísmica liberada (Fig. 3, en Julios) y la producción de gas de Poseidón (figura 3, en miles de $m^3(n)$), correlación visible desde el comienzo de las operaciones (1998) y la actualidad (2017).

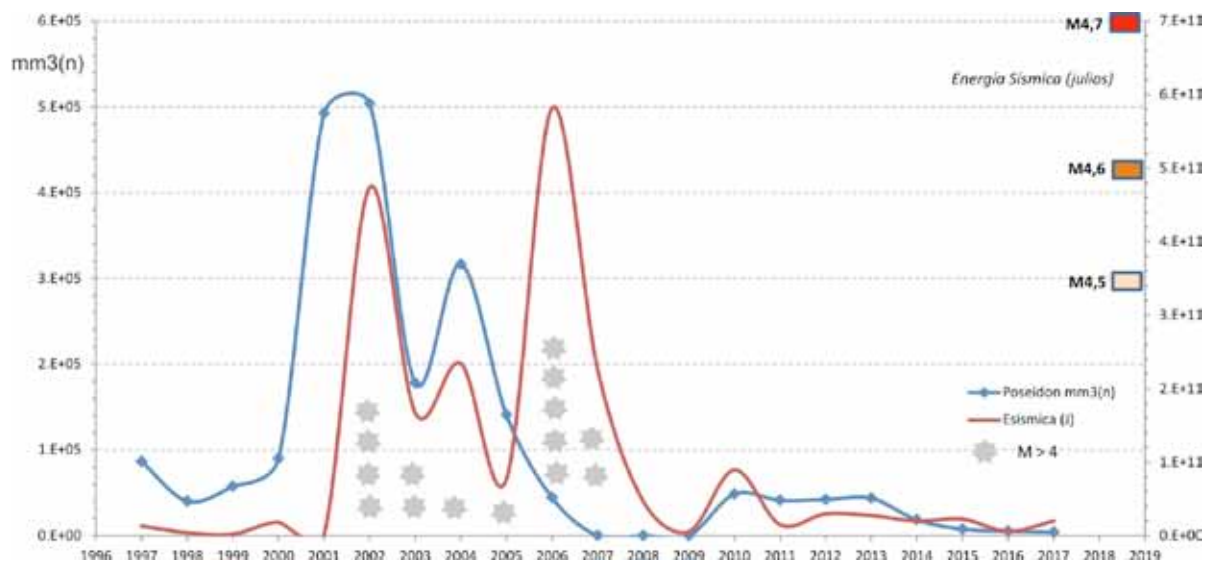


Figura 3: Diagrama de liberación de energía sísmica año en Julios, en el entorno de 50 km de Poseidón Norte (rojo) frente a la producción de gas (azul, en miles de $m^3(n)$). Las estrellas grises equivalen a sismos de tamaño superior a M 3.9, registrados en la zona. Ver texto sobre el origen de los datos. A la derecha aparece la equivalencia en magnitud

Figure 3: Annual seismic energy released in 50 km around the Poseidon Norte Platform (red line, in Joules). The blue line is the annual gas production according to public data provided by the Energy Ministry of Spain. Grey stars indicate the earthquakes with magnitude greater than M3.9. Equivalence of earthquake magnitude is also indicated to the right axis.

La figura 3 muestra la producción de gas anual en la curva azul, a partir de los datos de dicho portal ministerial, en miles de $m^3(n)$. Los datos originales están en GWh, utilizando la conversión de REPSOL sobre 1 mWh equivale a 96,62 m^3 . El año de máxima producción fue 2002 con un total aproximado de $503 \cdot 10^6 m^3(n)$ (Fig. 3). Es interesante destacar que entre finales del 2007 y mayo del 2009, se paralizó la extracción de gas del yacimiento. Actualmente, los valores oscilan en una media de $50 \cdot 10^6 m^3(n)$, lo que equivale al 10% de extracción de su máximo año. Los valores que se muestran son hasta 2017 (Fig. 3).

SERIE SÍSMICA EN EL ENTORNO POSEIDÓN:

Se ha utilizado los servicios de datos online de la web del Instituto Geográfico Nacional (www.ign.es) para la obtención de la información sísmica. Los terremotos registrados se han filtrado por localización según las coordenadas a 50 km alrededor de Poseidón Norte y se han obtenido un total de 627 terremotos entre el 23 de mayo de 1980 y el 18 de febrero de 2018. La

(2) El mayor incremento de energía sísmica liberada en relación a las operaciones Poseidón, aparece entre el año 2002 y 2004, cuando la producción cercana a 500 millones de $m^3(n)$, dispararon la energía sísmica de $4.7 \cdot 10^7$ Julios (equivalente a un sismo de magnitud M 4.6). También aparece un incremento en el número de terremotos de magnitud M3.9 durante ese periodo. Finalmente, se observa que durante el cese de actividades Poseidón aparece un decrecimiento bastante evidente en la energía sísmica liberada entre 2007 y 2009.

(3) Si bien ya se habían registrado terremotos de magnitud M4 en la zona, antes de las actividades de Poseidón, solo habían ocurrido dos sismos en 1980 y 1985. No hay que olvidar que la serie sísmica durante ese periodo no es completa, lo que significa que podrían haber ocurrido sismos que no fuesen detectados. Los otros 15 terremotos registrados han ocurrido durante el periodo de operaciones de Repsol, aunque en 2006 se observa correlación negativa entre

la energía sísmica y las operaciones de gas. Esto sugiere la ocurrencia de un terremoto tectónico.

(4) El sismo tectónico de octubre del 2006, posiblemente sea un sismo disparado (*triggering*), a falta de identificar potenciales fuentes sismogénicas en la zona. Por tanto, la capacidad de disparar terremotos en una zona con la presencia de fallas activas con capacidad de disparar terremotos mayores, indica una necesidad de hacer un seguimiento exhaustivo en la zona, así como una cartografía en detalle de posibles fallas activas en el área de estudio.

CONCLUSIONES

Se evidencia un incremento en la actividad sísmica en el entorno de la plataforma marina de extracción de gas POSEIDON, actividad sísmica directamente relacionada con la actividad de producción de gas de dicha plataforma.

La presencia de fallas con potencial sismogénico de génesis de terremotos de magnitud igual o superior a M6 evidencia la necesidad de estudiar la sismicidad inducida en la zona, la presencia de fallas sismogénicas dentro del almacenamiento y el desarrollo de protocolo de actuación ante un incremento de la magnitud de sismos en la zona.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el proyecto 3GEO CGL2017-83931-C3-2-P, del MINECO-FEDER, Plan Nacional de I+D+i, convocatoria de EXCELENCIA.

Referencias bibliográficas

- Artemyev, M. E., V. I. Bune, V. A. Dubrovsky y N. Sh. Kambarov. (1972). Seismicity and Isostasy. *Phys. Earth Planet. Interiors* 6, 256-262.
- Davison, Ch. (1921). Volcanic earthquakes. *The Journal of Geology*, XXIX (2), 97- 124.
- de Waal, J.A A. G. Muntendam-Bos, and J. P. A. Roest. (2015). Production induced subsidence and seismicity in the Groningen gas field – can it be managed? *Proc. IAHS*, 372, 129–139.
- Duarte, J., F. Rosas, P. Terrinha, M.-A. Gutscher, J. Malavielle, S. Silva, L. Matias. (2011). Thrust-wrench interference tectonics in the Gulf of Cadiz (Africa-Iberia plate boundary in the North-East Atlantic): Insights from analog models. *Marine Geology* 289 (1-4), 135-149.
- Fjeldskaar, W, Fjeldskaar, Conrad Lindholm, John F. Dehls, Ingrid Fjeldskaar. (2000). Postglacial uplift, neotectonics and seismicity in Fennoscandia. *Quaternary Science Reviews* 19, 1413-1422.
- Foulger, G. R., Wilson, M., Gluyas J., Julian, B. R., & Davies, R. (2017). Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews* <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.008>.
- Hainzl, S., T. Kraft, J. Wassermann, H. Igel, and E. Schmedes. (2006). Evidence for rainfall-triggered earthquake activity. *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L19303, doi:10.1029/2006GL027642.
- Hernández-Molina F.J., F.J. Sierro, E. Llave, C. Roque, D.A.V. Stow, T. Williams, J. Lofi, M. Van der Schee, A. Arnáiz, S. Ledesma, C. Rosales, F.J. Rodríguez-Tovar, E. Pardo-Igúzquiza, R.E. Brackenridge. (2017). Evolution of the gulf of Cadiz margin and southwest Portugal contourite depositional system: Tectonic, sedimentary and paleoceanographic implications from IODP expedition 339. *Marine Geology*, 377, 7-39.
- Matias, L.M., T. Cunha, A. Annunziato, M. A. Baptista, and F. Carrilho. (2013). Tsunamigenic earthquakes in the Gulf of Cadiz: fault model and recurrence. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 1–13.
- McGarr, A. (2014). Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 1008–1019.
- Morner, N.-A. (1978). Faulting, fracturing, and seismicity as functions of glacio-isostasy in Fennoscandia. *Geology*, 6, 41-45.
- Mulargia, F.A., & Andrea Bizzarri. (2014). Anthropogenic Triggering of Large Earthquakes. *Sci. Rep.* 4, 6100; DOI:10.1038/srep06100.
- Silva, P.G., Elez, J., Giner-Robles, J.L., Gómez-Diego, P.V., Rodríguez-Pascua, M.A., Roquero, E., Martínez-Graña, A. & Bardají, T. (2017). The AD 1755 Lisbon Earthquake-Tsunami: Modelling the seismic source from the analysis of environmental and building macroseismic data. *Proceedings 8th International INQUA Meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archeoseismology*, New Zealand, 358-361.
- Wells, D. L. and Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 84, 974–1002.
- Wilson, M.P., G. R. Foulger, J. G. Gluyas, R. J. Davies, B.R. Julian. (2017). HiQuake: The Human-Induced Earthquake Database. *Seismol. Res. Letters* 88(6): 1560-1565.