

Sismicidad inducida en sistemas geotérmicos estimulados: modelización numérica de la influencia del modelo de fricción

Induced seismicity in enhanced geothermal systems: a numerical modelling of the influence of the friction model

G. Piris¹, A. Griera², E. Gomez-Rivas³, I. Herms¹ y X. Goula¹

1 Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), Parc de Montjuïc, s/n, 08038 Barcelona, Spain. piris_de_casau@hotmail.com; ignasi.herms@icgc.cat; xavier.goula@icgc.cat

2 Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, E-08193 Bellaterra (Cerdanyola del Vallès), Spain. albert.griera@uab.cat

3 School of Geosciences, King's College, University of Aberdeen, AB24 3UE Aberdeen, United Kingdom. e.gomez-rivas@abdn.ac.uk

Resumen: La inyección de fluidos en sistemas geotérmicos estimulados (EGS) produce una sismicidad inducida de baja magnitud que en ocasiones puede generar daños en superficie. Para poder evaluar y pronosticar esta sismicidad inducida, es vital desarrollar modelos numéricos del reservorio, en el que se tenga en cuenta el carácter hidro-mecánico del sistema geotérmico. En este trabajo se evalúa a través del código numérico CFRAC la sismicidad de una falla aislada utilizando dos modelos friccionales diferentes: (i) *rate-and-state* y (ii) *velocity weakening*. Los resultados muestran que ambos modelos predicen una actividad de microsismos similar, con diferente número y magnitud de eventos.

Palabras clave: *Reservorios geotérmicos, sismicidad inducida, modelización, modelo friccional.*

Abstract: Hydraulic stimulation in Enhanced Geothermal Systems (EGS) produces low-magnitude induced seismicity that sometimes can result in damage at the Earth's surface. Numerical simulations taking into account the hydro-thermo-mechanic behaviour of geological reservoirs are an essential tool in order to evaluate and forecast induced seismicity in such systems. In this study, the numerical code CFRAC is used to evaluate the seismicity of an isolated fault during fluid injection using two different frictional models: (i) *rate-and-state* and (ii) *velocity weakening*. The results show that both models predict similar microseismicity, although there are differences in the number of events and their magnitudes between both models.

Key words: *Geothermal reservoirs, induced seismicity, modelling, frictional model.*

INTRODUCCIÓN

La continua demanda de energía, combinada con el incremento de emisiones de gases de efecto invernadero ha impulsado el desarrollo y la búsqueda de nuevas fuentes de energía limpias, como la geotermia. En los últimos años se ha proyectado la explotación de reservorios geotérmicos de alta profundidad. En general, éstos están constituidos por rocas cristalinas de basamento con elevados gradientes térmicos y permeabilidad controlada por el sistema de fracturas preexistente.

Estos sistemas se aprovechan mediante intercambio térmico para la producción de calor y/o electricidad. Entre estos podemos distinguir los hidrotermales (que utilizan un acuífero preexistente) y los petrotermales o estimulados (que requieren de una fase de estimulación).

Los sistemas geotérmicos estimulados (Enhanced Geothermal Systems, EGS) se caracterizan por requerir una fase de estimulación para incrementar el flujo de

explotación entre los pozos. Esta fase consiste en la inyección de fluidos a alta presión (normalmente agua) que producen, en muchos casos, la apertura y/o el deslizamiento de fracturas preexistentes y la generación de nuevas fracturas. Gracias a ello, la permeabilidad del reservorio aumenta y la productividad del pozo puede incrementarse en un orden de magnitud o más (Tester, 2006).

Sin embargo, esta fase de estimulación hidráulica causa una sismicidad inducida, que en general es de baja magnitud (*i.e.*, microsismicidad), pero que a veces puede llegar a percibirse en superficie. El control de esta sismicidad inducida es crucial para la aceptación pública y la viabilidad de los EGS. En los últimos años, se han producido varios casos de sismicidad elevada durante las fases iniciales de estimulación, como por ejemplo, en el EGS de Basilea (Suiza) donde se produjo un evento de magnitud 3.4 en 2005, que causó daños ligeros en edificaciones y obligó a la clausura del proyecto (Majer et al., 2007).

El pronóstico de la sismicidad inducida y la elaboración de estrategias para su reducción requieren el desarrollo de herramientas que sean capaces de simular el comportamiento termo-hidro-mecánico de reservorios geológicos fracturados. Un factor crítico es el tratamiento realista del comportamiento friccional y los esfuerzos inducidos en fracturas durante la estimulación hidráulica. Esta comunicación tiene como objetivo presentar los resultados de simulaciones bidimensionales (2D) de sismicidad inducida durante procesos de inyección hidráulica en una única fractura aislada. Se utilizan dos modelos friccionales de fractura: (i) un modelo *rate-and-state* (modelo R-S) basado en las observaciones de experimentos de fricción en rocas y (ii) un modelo de debilitamiento friccional instantáneo (*instantaneous velocity weakening friction*, modelo V-W).

MÉTODOS

Los modelos numéricos se han realizado con el código de elementos discontinuos CFRAC (McClure, 2012). El programa está diseñado para resolver el problema termo-hidro-mecánico asociado a la inyección de fluidos en sistemas fracturados y calcular la sismicidad inducida resultante. Para condiciones isotermales, la ecuación de balance de masas del flujo transiente de un fluido en una fractura puede expresarse como:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} = \nabla q + s \quad (1)$$

donde q es el flujo másico, s es un término de almacenamiento, ρ corresponde a la densidad del fluido, E es la apertura mecánica de la fractura y t es el tiempo. La **ecuación (1)** se combina con la ley de Darcy suponiendo una relación cúbica para el flujo en la fractura:

$$q = \frac{\rho h e^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

donde p es la presión de fluido, μ es la viscosidad del fluido, e la apertura hidráulica de la fractura y h la extensión del modelo en la dirección perpendicular al plano. Tanto E como e son función de la tensión normal efectiva σ'_n que actúa sobre la fractura y de la distancia de deslizamiento acumulativo D que se produce en la fractura. La apertura mecánica de la fractura puede expresarse como:

$$E = \frac{E_0}{1 + 9\sigma'_n / \sigma_{Enref}} + D \tan \frac{\phi_{Edil1}}{1 + 9\sigma'_n / \sigma_{Enref}} + E_{res} \quad (3)$$

donde E_0 , σ_{Enref} , E_{res} , y ϕ_{Edil1} son propiedades de la fractura.

La condición de equilibrio en una fractura requiere que la tracción por cizalla sea igual a la resistencia

friccional al deslizamiento. Esta relación se expresa a partir de la ecuación de Coulomb:

$$|\tau - \eta v| = \mu(\sigma_n - p) + S_0 \quad (4)$$

donde τ es la tensión tangencial, μ es el coeficiente de fricción, σ_n es la tensión normal, p es la presión de fluido y S_0 es la cohesión. El término adicional ηv , llamado de amortiguación de radiación, se incluye para aproximar el efecto inercial del deslizamiento para elevadas velocidades v (Rice, 1993; Segall, 2010). La variable η es el coeficiente de amortiguación se define como $G/2v_s$, donde G es el módulo de cizalla y v_s es la velocidad de la onda de cizalla (Rice, 1993; Segall, 2010).

El modelo de fricción conocido como *rate and state* es el más usado para describir la evolución de la fricción en una falla, y se usa de forma muy extendida en modelización de terremotos (Dieterich, 2007). En el modelo *rate and state*, el coeficiente de fricción cambia en cada incremento de tiempo en función de la velocidad de deslizamiento y de la historia de deslizamientos de la fractura. De acuerdo con esta aproximación, el coeficiente de fricción se expresa (Segall, 2010):

$$\mu(v, \theta) = f_0 + a \cdot \ln\left(\frac{v}{v_0}\right) + b \cdot \ln\left(\frac{\theta v_0}{d_c}\right) \quad (5)$$

donde f_0 es el coeficiente de fricción para una velocidad v_0 , que es una velocidad de referencia, d_c es la distancia crítica que tiene relación con la escala de rugosidad de la fractura, a y b son parámetros materiales de la fractura y, finalmente, θ es la variable de estado que evoluciona en función de:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = 1 - \frac{\theta v}{d_c} \quad (6)$$

Para un estado estacionario, el coeficiente de fricción se expresa como:

$$\mu_f = f_0 + (a - b) \ln \frac{v}{v_0} \quad (7)$$

Para poder entender un poco más el significado físico de los diferentes parámetros de la ecuación anterior (a , b y d_c), en la Fig. 1 se muestra la evolución del coeficiente de fricción para diferentes velocidades. Una alternativa más simple al método de *rate-and-state* es la aproximación conocida como debilitamiento friccional instantáneo (o *velocity weakening*), también denominado estático/dinámico. En esta aproximación, la evolución del coeficiente está definida a partir de un coeficiente de fricción estático (μ_s) y otro dinámico (μ_d), siendo el dinámico de menor valor que el estático (ver Fig. 1). Este método se implementa de la siguiente manera: cuando un elemento de la fractura empieza a deslizar se evalúa

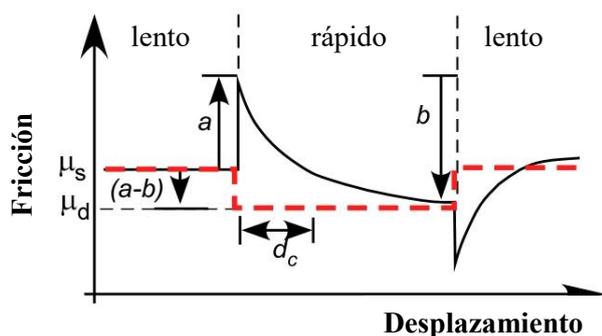


FIGURA 1. Evolución del coeficiente de fricción con la variación de la velocidad de deslizamiento. Definición de los parámetros de la ecuación de *rate-and-state* (curva negra continua) y del *velocity weakening* (curva roja discontinua). Modificado de Scholz (2002).

la ecuación de Coulomb en él (Eq. 4). Si el elemento evaluado excede el criterio de rotura, entonces se considera que está deslizándose y su coeficiente de fricción pasa a reducirse de forma instantánea al coeficiente dinámico. La bajada brusca de fricción produce un deslizamiento rápido que puede inducir el mismo fenómeno en elementos vecinos. El resultado es un proceso que imita la nucleación y propagación de eventos sísmicos. Cuando la velocidad de deslizamiento alcanza un valor mínimo establecido, el coeficiente de fricción se restablece nuevamente al valor estático.

Finalmente, se considera que empieza un evento microsísmico cuando la velocidad de deslizamiento excede el valor crítico de 5 mm/s, y que finaliza cuando la máxima velocidad de deslizamiento en la fractura se encuentra por debajo de 2.5 mm/s (McClure y Horne, 2011). Los hipocentros se localizan en el elemento que primero excede la velocidad crítica. Se ha definido el momento sísmico (M_0) como la integral del desplazamiento (D) a lo largo del área de la fractura (A) multiplicada por el módulo de cizalla (G):

$$M_0 = G \int D \cdot dA \quad (8)$$

y la magnitud momento (M_w) se ha definido a partir de Hanks and Kanamori (1979) como:

$$M_w = \frac{\log_{10} M_0}{1.5} - 6.06 \quad (9)$$

donde M_0 se define en $N \cdot m$. Se puede encontrar una descripción más detallada del método numérico utilizado por CFRAC en Mc Clure (2012).

GEOMETRÍA Y PARÁMETROS DEL MODELO

El modelo pretende representar un reservorio geotérmico a 4.500 metros de profundidad con un gradiente inicial de presión hidrostático, con tensiones principales σ_1 y σ_3 horizontales y σ_2 vertical (es decir, un régimen tectónico de desgarre). La tensión

intermedia se define a partir de la presión litoestática de una columna de material con densidad media de 2.500 Kg/m³. Para los parámetros materiales de las ecuaciones de apertura hidráulica y *rate-and-state* friccional, se han escogido los valores utilizados por Gischig (2015) para simular las propiedades mecánicas del reservorio cristalino de Basilea (ver Tabla I). Para el modelo de debilitamiento friccional instantáneo, se han escogido como coeficientes de fricción estático 0.85 (equivalente al f_0 del caso de *rate-and-state*) y de fricción dinámico 0.7, que es el coeficiente de fricción mínimo (obtenido para v máxima) a partir de la ecuación de *rate-and-state*.

El modelo consiste en una fractura única y aislada de 600 m de longitud y orientación vertical. El pozo de inyección se sitúa en el punto central de la fractura, a partir del cual se inyecta un fluido a presión constante de 75MPa en la cabeza del pozo durante tres días.

RESULTADOS

La evolución del caudal de inyección y las distribuciones de magnitud frecuencia se muestran en la Fig. 2 para cada modelo friccional. Se puede observar como las puntas de caudal máximo de inyección se correlacionan con los eventos sísmicos. Al producirse un deslizamiento, la permeabilidad aumenta y el caudal de inyección tiende a incrementarse. Una recopilación del número total de microsismos y su momento sísmico acumulado, junto con la velocidad y magnitud máximas se muestran en la Tabla II.

E_0	Apertura mecánica	1200 μm
σ_{Enref}	Tensión normal de referencia	25 MPa
E_{res}	Apertura mecánica residual	2 μm
ϕ_{Edil}	Ángulo de dilatación (apertura mecánica)	0°
e_0	Apertura hidráulica	120 μm
σ_{enref}	Tensión normal de referencia	25 MPa
e_{res}	Apertura hidráulica residual	0.2 μm
ϕ_{edil}	Ángulo de dilatación (apertura hidráulica)	2.5°
ρ	Densidad del fluido	1000 kg/m ³
μ	Viscosidad del fluido	0.001 Pa s
h	Anchura de la fractura	100 m
η	Coefficiente de amortiguación	3 MPa/(m/s)
S_0	Cohesión	0 MPa
G	Módulo de cizalla	15 GPa
ν	Coefficiente de Poisson	0.25
f_0	Coefficiente de fricción nominal	0.85
d_c	Distancia crítica	100 μm
a	Parámetro del rate-and-state	0.01
b	Parámetro del rate-and-state	0.02
v_0	Velocidad de referencia	10 ⁻⁶ m/s
θ	Estado	2.6 · 10 ⁶ s
μ_s	Coefficiente de fricción estático	0.85
μ_d	Coefficiente de fricción dinámico	0.7

TABLA I. Parámetros de modelización utilizados en CFRAC.

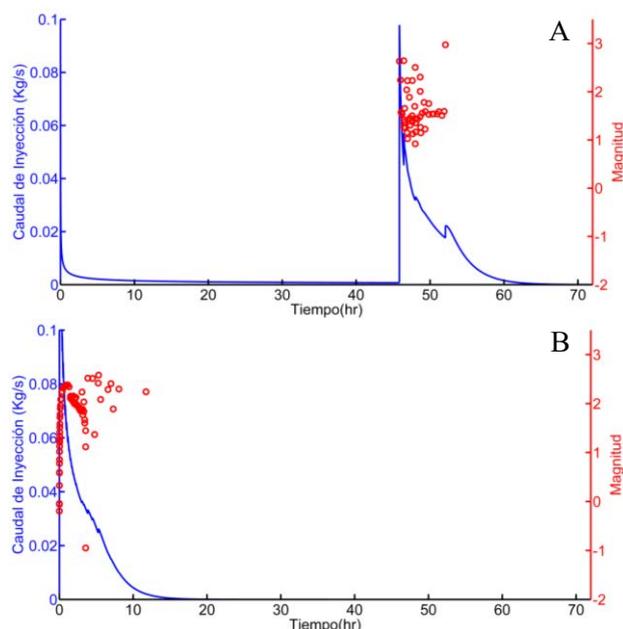


FIGURA 2. Evolución del caudal de inyección (curva azul) y la frecuencia y magnitud de los eventos sísmicos para el modelo friccional *rate-and-state* (A) *velocity weakening* (B).

Parámetro	Modelo R-S	Modelo V-W
V_{max} (m/s)	6.72	4.15
M_{max}	2.97	2.58
Nº Eventos	48	71
M_0 Total (N·m)	$8.8 \cdot 10^7$	$1.2 \cdot 10^8$

TABLA II. Resumen de resultados característicos. V_{max} es la velocidad máxima de deslizamiento, M_{max} es la magnitud máxima y M_0 Total es el momento sísmico acumulado.

Para ambos modelos los resultados específicos son bastante parecidos, aunque el modelo que utiliza el método friccional de V-W presenta una mayor cantidad de eventos sísmicos y magnitud acumulada que el R-S.

DISCUSIÓN/CONCLUSIONES

El análisis de los resultados muestra que, en general, ambos modelos friccionales generan respuestas parecidas, aunque la escala temporal en el que se producen los deslizamientos y la cantidad de eventos son diferentes en ambos modelos. Para el método V-W, la generación de microsismicidad se produce en los estadios iniciales, ya que el debilitamiento instantáneo del modelo facilita la propagación de la fractura y el aumento total del deslizamiento. Ambos factores favorecen una mayor producción de eventos sísmicos que en el observado en el método R-S. Esto se debe a que este último método tiene un coeficiente de endurecimiento con el incremento de la velocidad (*i.e.*, término a de la ecuación 5), un parámetro que tiene en cuenta el tiempo que la fractura lleva inactiva (θ) y que la disminución del coeficiente de fricción se produce de

forma gradual. Por otro lado en el método V-W el cambio de coeficiente de fricción se produce de forma brusca favoreciendo la inestabilidad dinámica y la producción de eventos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece especialmente a Mark W. McClure por facilitarnos el software CFRAC utilizado en las simulaciones y al revisor anónimo por sus comentarios para mejorar el trabajo. También al ICGC por su apoyo y contribución a la difusión y investigación de los recursos geotérmicos.

REFERENCIAS

- Dieterich, J. (2007): Applications of rate- and state-dependent friction to models of fault slip and earthquake occurrence. En: *Treatise on Geophysics* (H. Kanamori, ed.), vol. 4, Elsevier, 107–129.
- Gischig, V. S. (2015): Rupture propagation behavior and the largest possible earthquake induced by fluid injection into deep reservoirs. *Geophysics Research Letters*, 42, 7420–7428..
- Hanks, T. y Kanamori, H. (1979): A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*, 84, 2348–2350.
- Majer, E., Baria, R., Stark, M., Oates, S., Bommer, J., Smith, B. y Asanuma, H. (2007): Induced seismicity associated with enhanced geothermal systems. *Geothermics*, 36, 185–222.
- McClure, M. W. (2012): *Modeling and Characterization of Hydraulic Stimulation and Induced Seismicity in Geothermal and Shale Gas Reservoirs*, PhD dissertation, Stanford University, Stanford, California, 349 p.
- McClure, M. W. y Horne, R.N. (2011): Investigation of injection-induced seismicity using a coupled fluid flow and rate/state friction model. *Geophysics*, 76, WC181–WC198.
- Rice, J. (1993): Spatio-temporal complexity of slip on a fault: *Journal of Geophysical Research*, 98, 9885–9907.
- Scholz, C. H. (2002): *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*, Cambridge University Press, Cambridge, 471p.
- Segall, P. (2010): *Earthquake and Volcano Deformation*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 456p.
- Tester, J., ed. (2006): *The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century*. Report, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (Massachusetts), 372 p. http://geothermal.inel.gov/publications/future_of_geothermal_enrgy.pdf, accedido el 17 Marzo 2016.