

La “máquina” o “generador” de terremotos en un laboratorio universitario

The “earthquake machine” or “quake caster” in a University lab

JOSÉ A. PELÁEZ^{1,2}, GEMA DEL POZO¹ Y ANTONIO J. GARCÍA¹

¹Departamento de Física. Universidad de Jaén. Email: japelaez@ujaen.es

²Centro de Estudios Avanzados en Ciencias de la Tierra. Universidad de Jaén.

Resumen La máquina o generador de terremotos es un dispositivo experimental que trata de modelizar el comportamiento de una falla. En la actividad propuesta, se le muestra al alumnado la complejidad de ciertos sistemas, así como la dificultad de predecir su comportamiento. Aunque inicialmente se postuló como un experimento abierto dirigido a estudiantes de enseñanza secundaria y bachillerato, la calidad de los datos que pueden obtenerse permite que pueda plantearse como un experimento en un laboratorio universitario de ciencias de la Tierra. Los datos obtenidos en una experiencia de este tipo pueden ser equiparables, en cierto sentido, a los datos obtenidos por redes sísmicas regionales, en especial, los datos referentes a la sismicidad generada por una falla o sistema de fallas, en términos de magnitud, tiempo y caída de esfuerzos. Eso sí, con la clara ventaja de que en pocos minutos puede reproducirse lo que serían cientos o miles de años de acción de las fuerzas tectónicas. En función del nivel del curso en el que se proponga dicha experiencia, planteándose en este caso como una experiencia cerrada centrada en la obtención de determinados resultados, se pueden utilizar diferentes análisis de datos, fundamentalmente de tipo estadístico. Estos análisis permitirán conocer el nivel de predictibilidad de un modelo de estas características. Este trabajo plantea diferentes métodos y analiza los resultados que pueden obtenerse con este modelo mecánico..

Palabras clave: Ocurrencia de terremotos, física de terremotos, simulación de terremotos, Sismología estadística, modelos en la enseñanza.

Abstract *The earthquake machine or quake caster is an experimental device that attempts to model the behavior of a fault. With it, the student acquires knowledge about the complexity of certain systems, and the difficulty of predicting their behavior. Although initially this activity was proposed as an open-ended experiment for K-12 (secondary-school) students, the quality of the data that can be obtained is such that it could be considered as an experiment in an Earth sciences University lab. The data obtained in this experience are, in a way, comparable to the data obtained in regional seismic networks, particularly the data referring to the seismicity that a certain fault or fault system generate in terms of magnitude, time and stress drop. And then there is the clear advantage that this experience can reproduce in just a few minutes what would be hundreds or thousands of years of action of the tectonic forces. Depending on the level of the class in which this experience is proposed, setting it up, in this case, as a closed experience focused on obtaining certain required results, different data analyses can be performed, above all statistical ones. These analyses will allow to find out the predictability level of a model like this. This work proposes different methods and analyzes the experimental data that this mechanical model provides*

Keywords: *Earthquake occurrence, earthquake physics, earthquake simulation, statistical Seismology, teaching models.*

INTRODUCCIÓN

Hace ahora veinte años, la profesora Michelle K. Hall-Wallace proponía un modelo mecánico simple para alumnado de enseñanza secundaria para estudiar el comportamiento de una falla (Hall-Wallace, 1998). Lo llamó un dispositivo de *stick-slip* (resistencia-deslizamiento), ya que así se denominan en Física e Ingeniería los dispositivos de movimiento con fricción. Hay muchos dispositivos experimentales que se basan y explican con este principio.

El dispositivo propuesto consiste en un bloque de madera o piedra que desliza horizontalmente sobre un papel de lija tirado por una cuerda (Fig. 1). Entre la cuerda y el bloque se coloca una goma o cuerda elástica, y también puede incluirse una pequeña balanza de muelle. La cuerda se acciona con una manivela. Mientras que la fuerza aplicada no supere la fuerza de rozamiento estático del sistema, no habrá movimiento. Cuando sí ocurra, el bloque deslizará. En el caso dinámico, es menor la fuerza de rozamiento, o dicho de otra forma, la fuerza requerida inicialmente para que el cuerpo se mueva es mayor que la necesaria cuando el sistema ya está deslizando. El *slip* del *stick-slip* se refiere pues a la ocurrencia del terremoto (deslizamiento del bloque: deslizamiento cosísmico con caída de esfuerzos), mientras que el *stick* se refiere al tiempo entre sucesos (bloque en reposo: estado intersísmico con acumulación de esfuerzos).

Posteriormente, al dispositivo inicial propuesto por Hall-Wallace se le ha denominado la máquina de terremotos (*earthquake machine*), especialmente en los experimentos propuestos por Ringlein (2005), Hubenthal *et al.* (2008), o por la sección educativa del IRIS (*Incorporated Research Institutions for Seismology*) (<http://www.iris.edu/hq/inclass/>), o también el generador de terremotos (*quake caster*) en las actividades divulgativas propuestas por el USGS (*U.S. Geological Survey*) (Linton y Stein, 2011, 2012). En los experimentos propuestos por Linton y Stein (2011, 2012) se introduce también la variable tiempo, midiendo los tiempos entre un deslizamiento y otro con un cronómetro. Inicialmente, Hall-Wallace (1998) no tiene en cuenta el tiempo en su dispositivo, considerando como variable independiente el número de deslizamientos, como tampoco lo tienen en cuenta los trabajos de Hubenthal *et al.* (2008) o las conocidas experiencias del IRIS, aunque en este

último caso se sustituye por el deslizamiento acumulado (*plate motion*). Recientemente, López Martín *et al.* (2018) han realizado una propuesta didáctica para estudiantes de secundaria y bachillerato.

El principal objetivo de Hall-Wallace era el de interesar y motivar a los alumnos en el estudio del comportamiento del sistema Tierra a través de los terremotos. Además de fomentar el razonamiento y el método científico, pretendía que el alumnado se implicara y tratara de contestar típicas cuestiones, como la de si pueden predecirse o no los terremotos, o qué llega a causarlos. De hecho, éste es un dispositivo muy utilizado a la hora de explicar la teoría del rebote elástico como mecanismo de la generación de terremotos, teoría propuesta por Reid (1910), basada en las observaciones de campo que realizó este investigador tras el conocido terremoto de San Francisco, California, de 1906.

En su trabajo, Hall-Wallace distinguía claramente entre las actividades que realizaba con los profesores encargados de supervisar la experiencia en los institutos, y el diseño de la propia experiencia enfocada a los estudiantes de secundaria y bachillerato. También comenta diversas experiencias que llevó a cabo variando las condiciones del experimento y analizando cómo variaban los resultados obtenidos.

En todos los trabajos publicados sobre este dispositivo se establecen las siguientes relaciones entre el modelo mecánico y el sistema real. Sistematizando y detallándolo, podemos indicar que:

a) El papel de lija, junto con la superficie del bloque en contacto con él (Fig. 1), representa la superficie de contacto entre los dos bloques de la falla (superficie de falla). Cuanta mayor rugosidad tengan, mayor será el coeficiente y la fuerza de rozamiento, tanto estático como dinámico, y mayor ha de ser la fuerza o energía elástica acumulada necesaria para que pueda haber deslizamiento.

b) El bloque de madera o piedra representa la masa total que se desplaza cuando se produce el terremoto. La masa desplazada será tanto mayor cuanto mayor tamaño tenga la falla y los bloques desplazados durante el terremoto. Mayor masa del bloque implica también una mayor fuerza de rozamiento o fricción por contacto. Hay que tener en cuenta que la fuerza de rozamiento es el producto $F_R = \mu N$, en donde μ es el coeficiente de rozamiento (estático o dinámico) y N la fuerza normal (perpendicular) a la superficie de contacto, que en este caso es

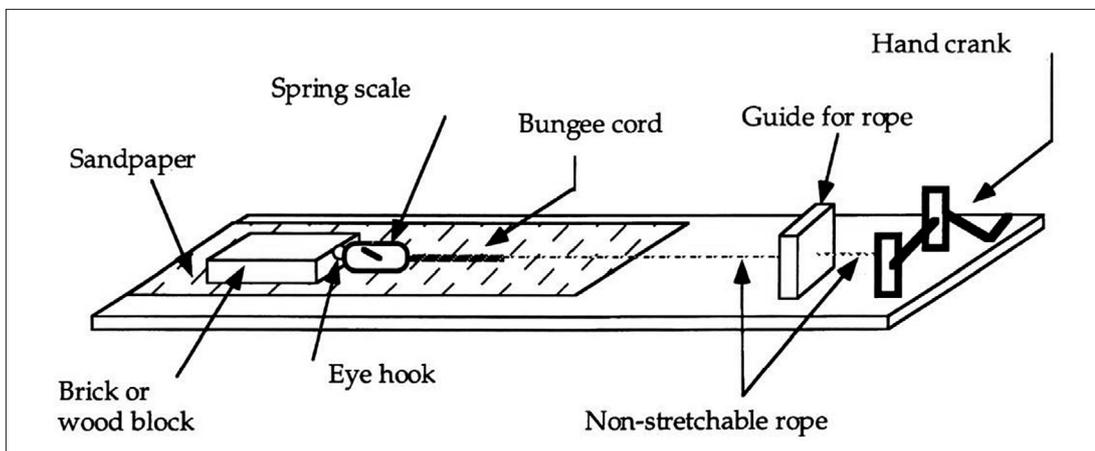


Fig. 1. Dispositivo stick-slip propuesto originalmente por Hall-Wallace (1998).

exclusivamente la fuerza peso del bloque. Es decir, $F_R = \mu P = \mu mg$, en donde m es la masa del bloque y g la aceleración de la gravedad. Podemos cambiar la fuerza de rozamiento cambiando las superficies de deslizamiento y/o del bloque (μ), o simplemente cambiando la masa del bloque (m); ambos cambios tienen el mismo efecto. Es importante notar que la fuerza de rozamiento es independiente del área de las superficies en contacto, lo cual se observa claramente en las anteriores expresiones. Así, F_R no depende del área S de la superficie inferior del bloque, sino sólo del coeficiente de rozamiento (tipología y rugosidad de las superficies en contacto) y su peso.

c) La goma elástica representa el comportamiento elástico de la corteza terrestre, o también, la capacidad de la corteza de almacenar energía elástica o esfuerzos antes de que se produzca la ruptura. El esfuerzo aplicado al bloque en un determinado instante puede conocerse mediante la balanza de muelle. Ya que el esfuerzo es la fuerza por unidad de área, podemos calcularlo directamente como el cociente entre la fuerza aplicada F , cuyo valor puede observarse en todo momento en la balanza de muelle, y la superficie inferior del bloque S , es decir, F/S . Hay que decir que si el coeficiente de rozamiento μ es pequeño, lo que ocurre si las superficies en contacto son suaves, también será pequeña la fuerza de rozamiento. Esto favorece un deslizamiento continuo del bloque (deslizamiento mediante *creep*) cuando se aplica la fuerza, haciendo que el esfuerzo prácticamente no cambie y se mantenga constante. Esto se produce en aquellas fallas en las que no se generan terremotos, pero en cambio hay un lento movimiento entre ambos bloques, de tal forma que el deslizamiento total acumulado al cabo de un cierto tiempo coincide con el movimiento relativo entre placas.

d) El movimiento de la cuerda, bien directamente con la mano o a través de la manivela, representa el movimiento de las placas tectónicas. Cuanto ma-

yor sea la velocidad v con la que tiremos, antes se acumulan la energía elástica o los esfuerzos, y antes se producirá el terremoto o deslizamiento. En principio, la velocidad no es una variable que deba influir en los resultados del experimento, más allá de que el proceso de *stick-slip* se realice con mayor o menor rapidez, es decir, cambie el tiempo entre eventos.

Dicho esto, y como resumen, las condiciones que pueden modificarse en esta experiencia son tres: 1) la fuerza de rozamiento, bien cambiando las superficies en contacto (μ) o el peso del bloque (P), como ya se ha hecho notar, 2) las características elásticas de la corteza, cambiando la goma elástica, y c) la velocidad de las placas, aumentando la velocidad con que se tira del bloque, aunque como se ha indicado antes, esto no influye en los resultados más que en la disminución del tiempo que tardan en acumularse los esfuerzos, y por ende, el tiempo entre terremotos.

EL MODELO MECÁNICO Y EL DISPOSITIVO PROPUESTO

El modelo mecánico que proponemos (Figs. 2a y 2b) no difiere en demasía del utilizado por otros autores y el propuesto (Fig. 1) por Hall-Wallace (1998). Los cambios principales se refieren al sistema de arrastre del bloque y al sistema goma elástica - balanza de muelle.

Con relación al sistema de arrastre, en nuestro modelo utilizamos un motor de laboratorio que nos permitirá un arrastre de la cuerda a velocidad v constante en cada experiencia. Ya que vamos a trabajar con la variable tiempo, esto es importante, ya que el tiempo entre eventos (deslizamientos) no dependerá de que en un determinado momento podamos haber tirado de la cuerda involuntariamente con una mayor o menor velocidad.

Lo segundo es utilizar, en vez de una goma elástica y una balanza de muelle, directamente un dinamómetro de precisión (Fig. 3), el cual nos servirá a la misma vez como sistema elástico y como medidor de fuerzas y/o esfuerzos. Éste es un dispositivo utilizado ampliamente en cualquier laboratorio de Física (Mecánica) para medir fuerzas, el cual se basa en la capacidad de deformarse que tienen los cuerpos elásticos, en este caso, un muelle. Es simplemente un muelle junto a una escala que permite conocer su alargamiento. Permite leer directamente la fuerza F

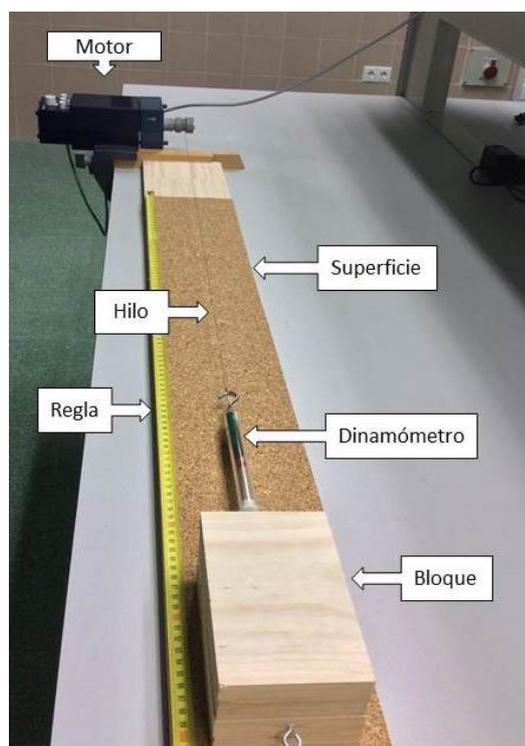


Fig. 2a. Dispositivo utilizado en nuestra experiencia.

Fig. 2b. Dispositivo utilizado en nuestra experiencia. Detalle.



aplicada al bloque, y como se indicó anteriormente, dividiendo ésta entre el área de la superficie inferior S del bloque, podemos conocer el esfuerzo aplicado. También, conocida la fuerza aplicada justo antes de que el bloque deslice (F_i) y la que se observa justo al terminar el deslizamiento (F_f), podemos calcular la llamada caída de esfuerzos ($\Delta\sigma$), *stress drop* o diferencia de esfuerzos durante el terremoto, mediante la expresión

$$\Delta\sigma = \frac{F_i - F_f}{S}$$

En el estudio del proceso de ruptura de una falla, en Ingeniería Sísmica, se acostumbra a utilizar la letra σ para el esfuerzo y $\Delta\sigma$ para la caída de esfuerzos estática, cantidad relacionada con el tamaño de la ruptura o el desplazamiento medio de la ruptura. Se reserva la letra τ para el llamado esfuerzo aparente, producto de la eficiencia sísmica y el esfuerzo medio (Savage y Wood, 1971), cantidad relacionada con la energía radiada mediante ondas sísmicas.

El que no se liberen totalmente los esfuerzos acumulados tras un terremoto, es decir, el hecho de que F_f no sea cero, es lo que explica, por ejemplo, la ocurrencia de réplicas tras un terremoto importante o la existencia de series sísmicas.

El uso del dinamómetro también posee la ventaja de que podemos conocer las características elásticas del muelle que lo conforma de una manera muy directa. Partiremos de la conocida expresión de la Mecánica denominada ley de Hooke, que relaciona la fuerza aplicada a un muelle (F) y el alargamiento (Δl) que experimenta, $F = k\Delta l$, en donde k es la llamada constante elástica del muelle, una medida de su rigidez (cuanto mayor valor tenga, más rígido será el muelle). Podemos conocer fácilmente el valor de esta última constante observando la escala de los dinamómetros, en donde se nos indica qué alargamiento se corresponde con qué valor de la fuerza aplicada. Por ejemplo, en el caso de uno de los dinamómetros de precisión que hemos utilizado (Fig. 3), en el cual su fondo de escala es de 10 N y la longitud total de su escala 5,9 cm, el valor de dicha constante es $10 \text{ N} / 0.059 \text{ m} \approx 169 \text{ Nm}^{-1}$.

Conocida esta constante, podemos conocer la energía elástica almacenada en cada instante en el sistema bloque-dinamómetro, la cual se libera parcialmente al producirse el deslizamiento de éste. Vendría dada por la expresión

$$E = \frac{1}{2}k\Delta l^2 = \frac{1}{2} \frac{F^2}{k}$$

A partir de los valores que indique el dinamómetro antes y después del deslizamiento podemos calcular la energía que se ha relajado en éste a partir de la expresión

$$\Delta E = \frac{1}{2k}(F_i^2 - F_f^2)$$

Podremos asociar entonces una magnitud a cada uno de los deslizamientos (terremotos) observados conocida la energía liberada y, utilizando, alguna de las relaciones propuestas entre estas dos variables. Por ejemplo, una de las más utilizadas es la relación $\log E_S = 1.5 M_W + 4.8$, en donde E_S , expresada en J, es la energía radiada mediante ondas sísmicas y M_W la magnitud momento. Inicialmente, esta relación fue obtenida por Kanamori y Anderson

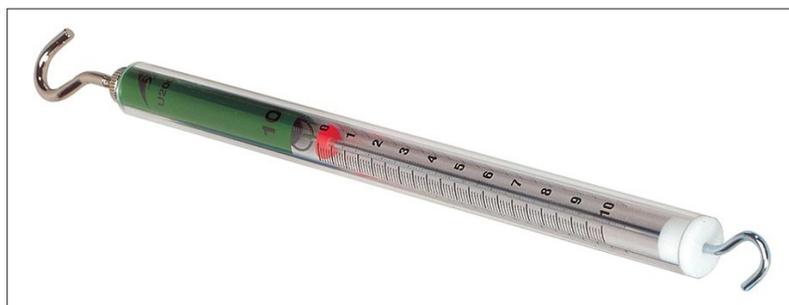


Fig. 3. Dinamómetro de precisión de 10 N de 3B Scientific™.

(1975), pero en donde ahora aparece M_W aparecía M_s , la magnitud de ondas superficiales, y se le llamaba comúnmente la relación “Gutenberg-Richter” energía-magnitud. Posteriormente, Kanamori (1977) sustituyó una magnitud por la otra, considerándolas coincidentes en el rango en el que la magnitud M_s no se satura. Una discusión sobre los diferentes tipos de escalas de magnitud, su cálculo y problemáticas puede consultarse en un artículo previo en esta revista (Peláez, 2011).

Otro método para asociar una magnitud a cada evento, en este caso la propuesta por la sección educativa del IRIS, es el de calcular la energía relajada a partir del valor medio de la fuerza aplicada al bloque durante el deslizamiento (valor medio entre las fuerzas justo antes y después del deslizamiento) y el propio valor del deslizamiento. Después, se calcula la magnitud de nuevo mediante la fórmula de Kanamori y Anderson (1975), como en el caso anterior. Teniendo en cuenta que el trabajo W que realiza una fuerza constante cuyo punto de aplicación se traslada una distancia D es el producto de la fuerza y el desplazamiento, podremos escribir

$$\Delta E = W \approx \frac{F_i - F_f}{2} D$$

También podemos utilizar la conocida relación obtenida por Brune (1970) entre el momento sísmico (M_0), la caída de esfuerzos estática ($\Delta\sigma$) y el radio o dimensión característica de la ruptura (a), también llamado radio de Brune,

$$M_0 = \frac{16}{7} \Delta\sigma a^3$$

para calcular posteriormente la magnitud momento del terremoto a partir de la fórmula de Hanks y Kanamori (1979)

$$M_W = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.7$$

estando M_0 expresado en dyn-cm. Teniendo en cuenta que en la relación de Brune (1970) la ruptura se considera circular, y en nuestro caso es rectangular de área S , podemos obtener a mediante la expresión $a = \sqrt{S/\pi}$. El utilizar esta relación permite introducir al alumnado en el llamado modelo de Brune, aproximación semi-empírica ampliamente utilizada como modelo de ruptura sísmica (Madariaga, 1994), introducirlo en el concepto de momento sísmico, y mostrarle las relaciones entre el momento sísmico y la caída de esfuerzos o entre el momento sísmico y la magnitud momento.

Independientemente de la relación que se utilice para calcular la magnitud, y partiendo de la base de que no vamos a obtener el mismo valor en los tres casos descritos, lo que no se debe hacer nunca es

identificar el desplazamiento medido directamente con la magnitud. Aunque pueda considerarse con fines meramente descriptivos/cualitativos, no puede hacerse cuando buscamos cuantificar el fenómeno, más teniendo en cuenta que el desplazamiento es una variable lineal, y la magnitud, por definición, atiende a una escala logarítmica (Peláez, 2011).

El que los valores de la magnitud no sean iguales al calcularlos con los anteriores tres métodos es debido a diferentes causas. Por un lado, el que se basan en premisas y modelos diferentes. Por otro, el que la energía relacionada con la magnitud es sólo la que se radia mediante ondas sísmicas y no la que se invierte en desplazar los bloques de falla o vencer la resistencia al movimiento (Peláez, 2011), siendo la primera como máximo sólo un 6% de la total (McGarr, 1999). También, el que los terremotos generados por este dispositivo tienen una particularidad, que la superficie de ruptura S es siempre la misma, independientemente de la magnitud, cambiando sólo el valor del deslizamiento del bloque, o lo que es igual, la caída de esfuerzos ($\Delta\sigma$); éste es uno de los condicionantes más importantes de este modelo mecánico. Finalmente, y no menos importante, el que las relaciones entre la energía liberada y la magnitud han sido definidas para rangos de valores muy por encima de los obtenidos en esta experiencia. En todos los casos, los valores de magnitud que se obtienen son muy pequeños, y dado que la escala de magnitudes es logarítmica, negativos.

Además del sistema de arrastre del bloque y del dinamómetro de precisión, planteamos el uso de un cronómetro para incluir en la experiencia la variable tiempo. Cualquier dispositivo que nos permita medir el tiempo con una cierta precisión será válido en principio.

Algo que hemos hecho, y que es cada vez más utilizado en los laboratorios de Física, es el filmar la experiencia, por ejemplo, con un teléfono móvil o cualquier otro dispositivo (cámara de video, Ipad™, etc.). Esto permite al alumnado no estar tan pendiente de la toma de datos, especialmente cuando la variable cambia de valor rápidamente o se han de tomar simultáneamente diferentes medidas, y

estarlo en cambio de que la experiencia se desarrolle correctamente. Tiene el inconveniente de que tiene que visionarse posteriormente para extraer los datos, pero también la ventaja de que la filmación puede reproducirse todas las veces que sea necesario en aras de la fiabilidad de la toma de dichos datos. Para su visionado, tras descargarse el archivo a un ordenador, puede utilizarse cualquier editor de video de acceso gratuito, incluso editores que permiten el visionado fotograma a fotograma (VLC™, Video to Photo™, ...). Así, involucrando a un único observador, es posible observar y tomar medidas simultáneas de tiempo, posición del bloque y fuerza aplicada, que de otra forma plantean una mayor dificultad, involucrando diferentes observadores y sin opción de corregir errores durante la medición.

EXPERIENCIAS REALIZADAS. RESULTADOS

En las experiencias que hemos realizado hemos utilizado un bloque de madera deslizándose sobre una superficie de corcho (Figs. 2a y 2b). Entre las diferentes pruebas que hemos planteado con diferentes materiales, estos dos nos han proporcionado buenos resultados. El bloque se ha construido pegando cuatro pequeñas tablas idénticas, con unas dimensiones finales de 15 cm x 9.5 cm x 7.2 cm. El área de la superficie del bloque en contacto con el corcho es, por tanto, 15 cm x 9.5 cm = 142.5 cm², y su masa m_1 de 523 g. Para realizar experiencias con un cambio de la masa del bloque (rozamiento), se ha colocado encima del primero otro, de las mismas dimensiones y masa m_2 igual a 554 g. En nuestro dispositivo hemos considerado dos masas diferentes, $m_1 = 523$ g o $m_1 + m_2 = 1077$ g. El utilizar una u otra implica prácticamente duplicar (o dividir por dos) la fuerza de rozamiento. Este segundo bloque también puede servir para utilizar el dispositivo con dos bloques, unidos por otro dinamómetro, representando un sistema de dos fallas acopladas (Fig. 4). Así, podemos observar la transferencia de esfuerzos de Coulomb entre ambas fallas, es decir, cómo interaccionan las

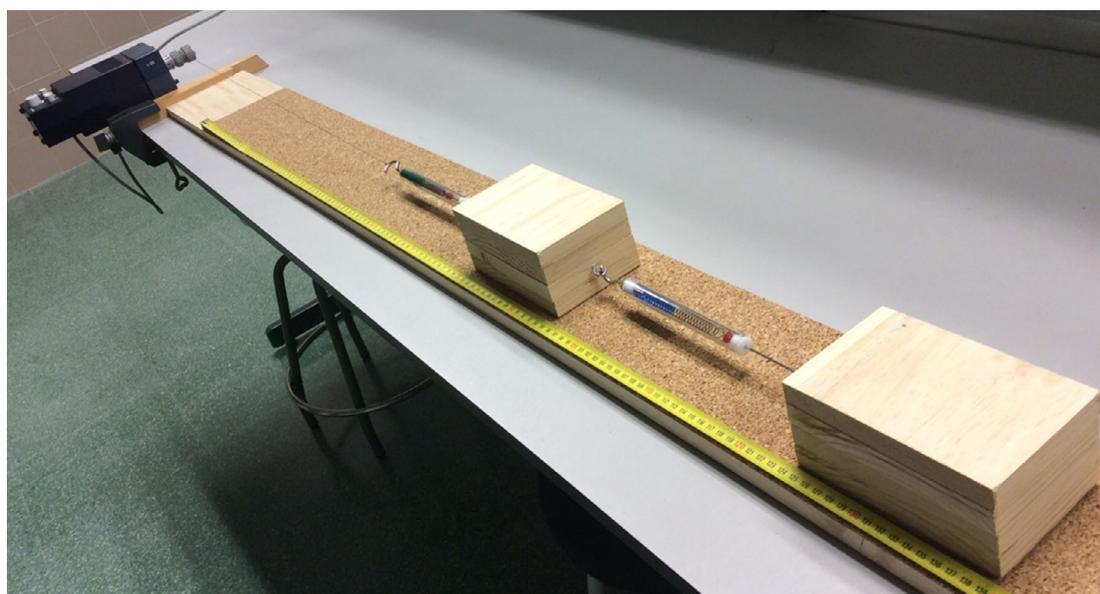


Fig. 4. Dispositivo propuesto con dos bloques.

fallas, a la hora de ver cómo cuando en la primera se relajan esfuerzos, se acumulan en la segunda. Cambiando las masas, dinamómetros, y las superficies de los bloques en contacto con la superficie deslizante, podemos cambiar las características de ambas fallas. Esta experiencia no la hemos considerado en este artículo.

Por otro lado, se han utilizado dos dinamómetros de precisión, uno con fondo de escala 5 N ($k_1 = 86 \text{ Nm}^{-1}$) y otro 10 N ($k_2 = 169 \text{ Nm}^{-1}$), como el que aparece en la figura 3. El utilizar uno u otro implica de hecho duplicar (o dividir por dos) las características elásticas de la corteza.

Finalmente, el motor utilizado en nuestro experimento permite cambiar la velocidad de arrastre. Valores de velocidad v del orden de 1.0 cm/s se han mostrado idóneos. Valores netamente superiores implicaban que el bloque deslizaba en demasía mediante *creep* y no se observaba bien el mecanismo de *stick-slip*.

Aquí planteamos tres experiencias, manteniendo aproximadamente constante la velocidad de arrastre: a) utilizar los valores de masa y constante elástica m_1 y k_1 , b) duplicar la constante elástica de la corteza con relación a la primera experiencia (utilizar m_1 y k_2), y c) duplicar la fuerza de rozamiento con relación a la segunda experiencia ($m_1 + m_2$ y k_2).

Para el primer caso (m_1 y k_1), mostramos algunos de los resultados que pueden obtenerse. Por un lado, podemos representar los típicos gráficos *slip*

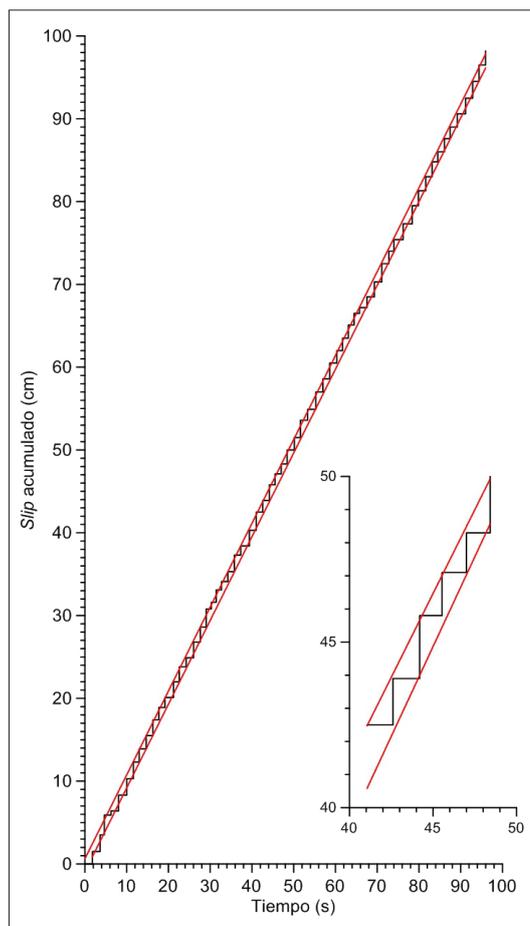


Fig. 5. Slip acumulado frente al tiempo y detalle. Resultados con m_1 y k_1 .

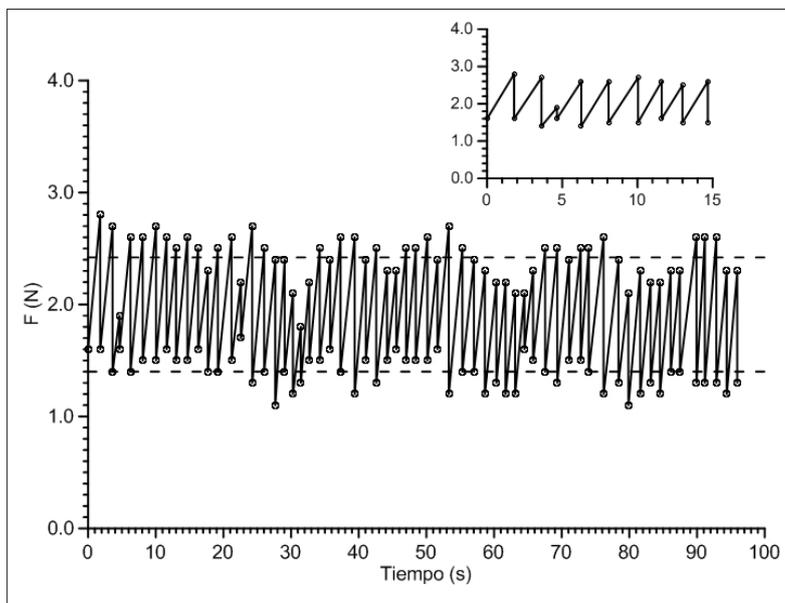


Fig. 6. Esfuerzo frente al tiempo y detalle. Resultados con m_1 y k_1 .

acumulado frente al tiempo (Fig. 5) y esfuerzo frente al tiempo (Fig. 6). En realidad, en vez de representar el esfuerzo, del orden de 10^{-12} - 10^{-11} bar en esta experiencia, y por motivos de simplicidad en el gráfico, se ha preferido representar directamente F , expresada en N, sin dividir entre la superficie. Además de observar el comportamiento del *slip* y del esfuerzo, podemos inferir el comportamiento de nuestro sistema desde el punto de vista del modelo de recurrencia, tratando de asociar su comportamiento a alguno de los modelos de recurrencia (hipótesis de predicción de terremotos) más utilizados y conocidos (Fig. 7). Estos son los modelos de terremotos periódicos en el tiempo (*periodic*), los predecibles en el tiempo (*time-predictable*), predecibles en el deslizamiento (*slip-predictable*) y aleatorios (*random*). También se puede incluir el modelo de deslizamiento mediante *creep*, ya comentado anteriormente, aunque éste no es un modelo de recurrencia real, ya que no genera sismicidad.

En especial, la figura 6 nos indica que en este caso no se observa un claro modelo de recurrencia, aunque si se ha de elegir alguno, el modelo de terremotos periódicos en el tiempo sería el que mejor se ajusta globalmente a los resultados. En esta figura se dibujan las líneas que se corresponden con los valores medios de F_i , de 2.42 N, y F_j , de 1.40

Fig. 7. Modelos de recurrencia de terremotos (tomado de Shimazaki y Nakata, 1980). (a) Periódico en el tiempo. (b) Predecible en el tiempo. (c) Predecible en deslizamiento.

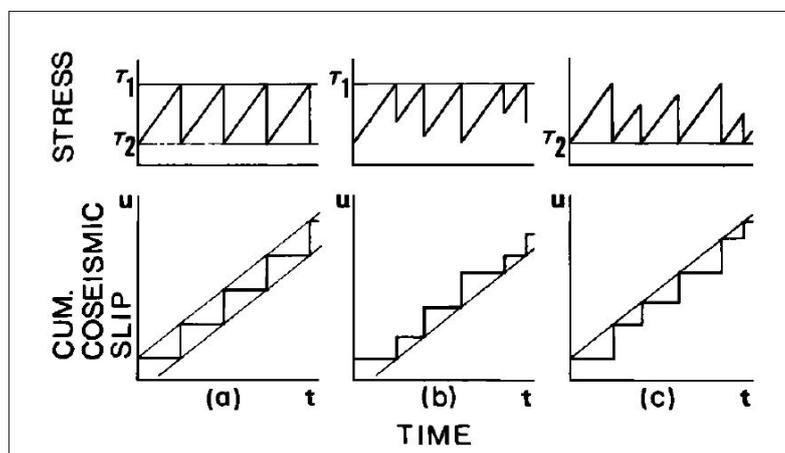
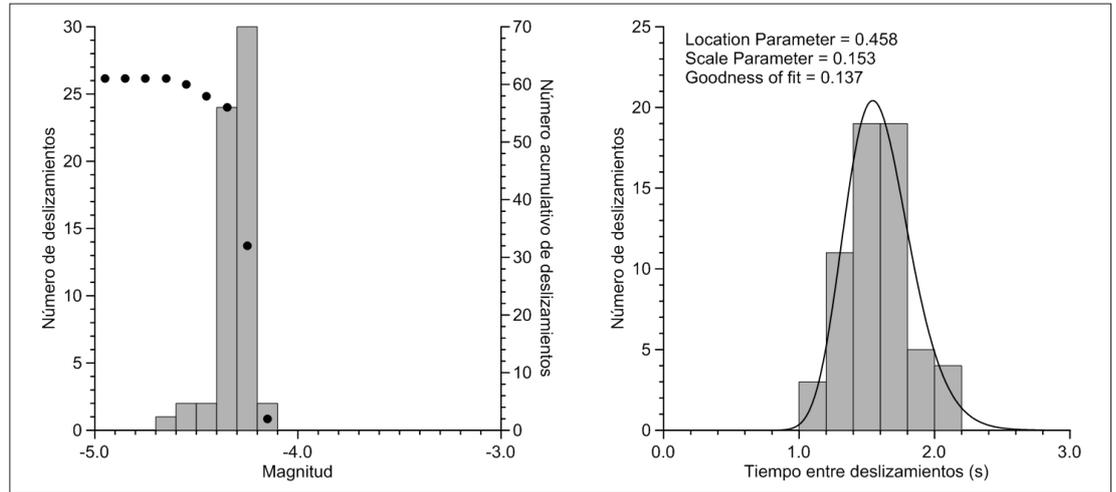


Fig. 8. Izquierda: histograma de magnitudes y número acumulado de terremotos con una cierta magnitud (puntos). Derecha: histograma de tiempo entre eventos y ajuste a una distribución lognormal. Resultados con m_1 y k_1 .



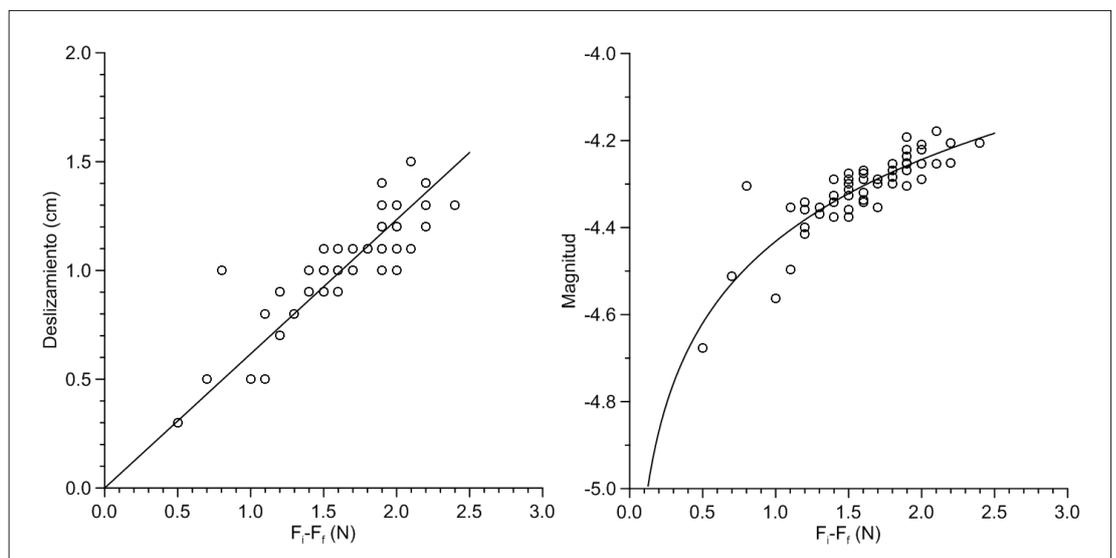
N. Bien es verdad que de manera particular, se observan grupos de terremotos que se corresponden con otros modelos. Es fácil observar dobletes de terremotos (parejas de terremotos consecutivos), e incluso algún triplete, con igual valor de F_i , que se corresponderían con un modelo de terremotos predecibles en el tiempo. También, dobletes de terremotos, e incluso tripletes, con igual valor de F_j , los cuales se corresponderían con un modelo de terremotos predecibles en el deslizamiento, o lo que es igual, predecibles en su magnitud.

En la figura 8 se representan dos histogramas, uno de magnitudes y otro de tiempo entre eventos. En el histograma de magnitudes se observa que la mayor parte de los eventos tienen magnitudes en el rango entre -4.7 y -4.1. El mayor terremoto es uno de magnitud -4.18, que se corresponde con un evento en el que el deslizamiento fue de 2.1 cm, siendo $F_i - F_j$ igual a 1.5 N, la caída de esfuerzos $\Delta\sigma = 1.05 \cdot 10^{-11}$ bar, y la energía relajada $\Delta E = 0.034$ J. El histograma de magnitudes, así como el acumulado de magnitudes, no muestran el típico comportamiento de una relación de recurrencia de Gutenberg-Richter (Gutenberg y Richter, 1954), en especial, porque como se ha indicado anteriormente, los terremotos se ajustan mejor a un comportamiento de terremotos periódicos en el tiempo, el cual no es Poissoniano.

En el histograma de tiempo entre eventos sí se observa un clásico comportamiento, el cual hemos ajustado, como ejemplo, a una distribución lognormal (v.g., Sornette y Knopoff, 1997), cuyos parámetros se incluyen en la figura 8. Se observan tiempos entre eventos que varían entre 1.0 y 2.2 s, aunque la mayoría lo están entre 1.4 y 1.8 s. Si se desea, pueden ensayarse otras distribuciones clásicas como la de Poisson (exponencial), Gaussiana, semi-Gaussiana, Weibull, Rayleigh, etc.

En la figura 9 representamos tanto los deslizamientos medidos como las magnitudes (M) calculadas frente a la caída de esfuerzos, o más concretamente, de nuevo para simplificar, frente a $F_i - F_j$. En diversos trabajos sobre fallas específicas se han estudiado éstas y otras correlaciones de forma profusa (v.g., Hardebeck y Aron, 2009; Shaw, 2013; Colombelli y Zollo, 2015). Tanto en un caso como en otro observamos de forma clara cómo una mayor caída de esfuerzos implica un mayor deslizamiento de la falla (en una falla real implicaría también una mayor superficie de ruptura) y una mayor magnitud. En el caso del deslizamiento frente a la caída de esfuerzos se ha ajustado un línea recta que pasa por el origen (si no hay caída de esfuerzos el deslizamiento sísmico es nulo, aunque hubiera *creep*), y en el caso de la magnitud frente a

Fig. 9. Izquierda: deslizamiento frente a caída de esfuerzos y regresión lineal simple que pasa por el origen. Derecha: magnitud frente a caída de esfuerzos y ajuste logarítmico. Resultados con m_1 y k_1 .



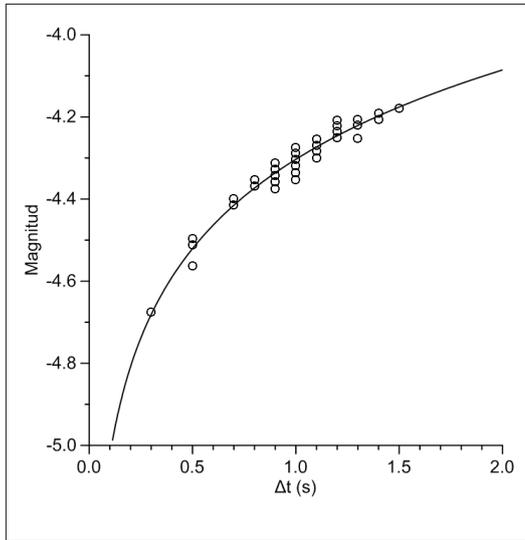


Fig. 10. Magnitud frente a tiempo entre eventos y ajuste logarítmico. Resultados con m_1 y k_1 .

la caída de esfuerzos un ajuste logarítmico del tipo $M = a \cdot \ln(F_i - F_f) + b$.

Este ajuste logarítmico, puesto que la magnitud es proporcional al logaritmo del momento sísmico, es equivalente a un ajuste lineal entre el momento sísmico (M_0) y la caída de esfuerzos ($\Delta\sigma$).

Finalmente, y para esta experiencia, en la figura 10 se representa la magnitud (M) frente al tiempo entre eventos (Δt), junto con un ajuste de tipo logarítmico. El resultado es concluyente, incluso se observa una menor dispersión de los datos que la observada en la figura 9. Claramente, un mayor tiempo entre eventos implica una mayor acumulación de esfuerzos, y al producirse la ruptura en la falla, tendremos una mayor relajación de la energía acumulada, y un mayor momento sísmico y magnitud del evento. Este comportamiento es típico de cualquier modelo de generación de terremotos (periódico, predecible en el tiempo, predecible en el deslizamiento o aleatorio), y es por esto que el ajuste es tan evidente.

Tras esta discusión más detallada de los resultados que se pueden obtener en esta experiencia (m_1 y k_1), mostraremos ahora de forma conjunta la variación de los resultados más importantes cuando duplicamos la constante elástica del dinamómetro manteniendo constante el rozamiento (m_1 y k_2) y cuando duplicamos tanto el rozamiento como la constante elástica ($m_1 + m_2$ y k_2). Duplicar la constante elástica, como se comentó con anterioridad, implica una corteza más rígida y frágil, con menos capacidad de acumular esfuerzos sin romperse.

Los principales resultados se resumen y sistematizan a continuación.

1) Aumentar la constante elástica implica obtener menores deslizamientos por término medio, y por lo tanto menores magnitudes, mientras que el aumento del rozamiento implica lo contrario, mayores desplazamientos y magnitudes. Esto último puede apreciarse claramente en la figura 11. Mientras que en la experiencia con m_1 y k_1 se obtiene un valor máximo de magnitud de -4.18, como se indicó anteriormente, en la experiencia con m_1 y k_1 este va-

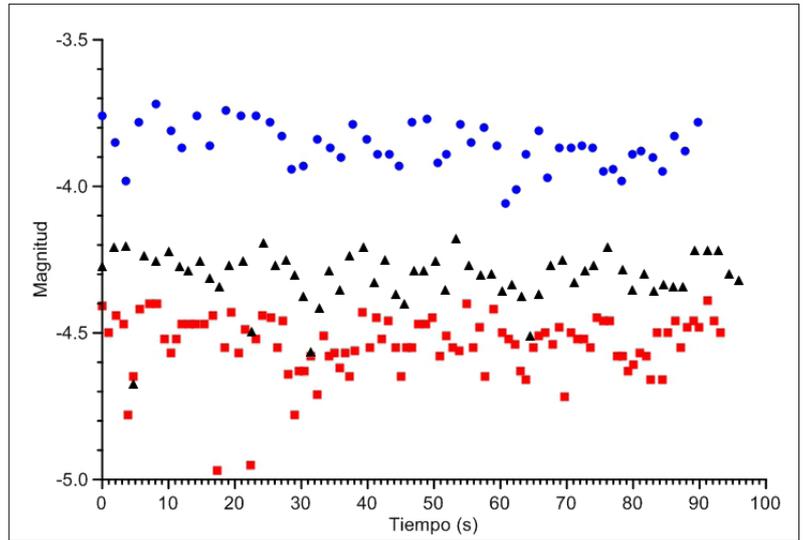


Fig. 11. Magnitudes registradas. En negro y triángulos: resultados con m_1 y k_1 . En rojo y cuadrados: con m_1 y k_2 . En azul y círculos: con $m_1 + m_2$ y k_2 .

lor fue de -4.39, algo menor, y en la experiencia con $m_1 + m_2$ y k_2 este valor aumentó hasta -3.72. Este último valor de magnitud se corresponde con una energía liberada de 0.164 J y una caída de esfuerzos $\Delta\sigma$ de $2.25 \cdot 10^{-11}$ bar. Ésta la podemos comparar con la caída de esfuerzos en un terremoto real que típicamente puede oscilar entre los 10 y 100 bar.

2) El aumento de la constante elástica ha implicado también obtener caídas de esfuerzos ligeramente inferiores, mientras que el aumento del rozamiento supuso, al contrario, aumentos significativos en la caída de esfuerzos, como puede observarse en la figura 12. Las líneas horizontales discontinuas en dicha figura marcan los valores medios de F_i y F_f en cada experimento. Duplicar la constante elástica supuso, como se ha indicado, disminuir ligeramente el valor medio de la caída de esfuerzos ($F_i - F_f$), de 1.02 a 0.88 N, a costa de aumentar en valor medio los valores de F_f , de 1.40 a 1.53 N, mientras que el valor medio de F_i , 2.42 N, se mantuvo. Por otro lado, el aumento de la fuerza de rozamiento en la experiencia con $m_1 + m_2$ y k_2 , ha supuesto incrementar notablemente la caída de esfuerzos ($F_i - F_f$), llegándose a observar un máximo de 3.2 N y un valor medio de 2.24 N, con valores medios de F_i y F_f de 5.12 y 2.88 N, respectivamente (Fig. 12).

Fig. 12. Esfuerzo frente al tiempo. En negro y triángulos: resultados con m_1 y k_1 . En rojo y cuadrados: con m_1 y k_2 . En azul y círculos: con $m_1 + m_2$ y k_2 .

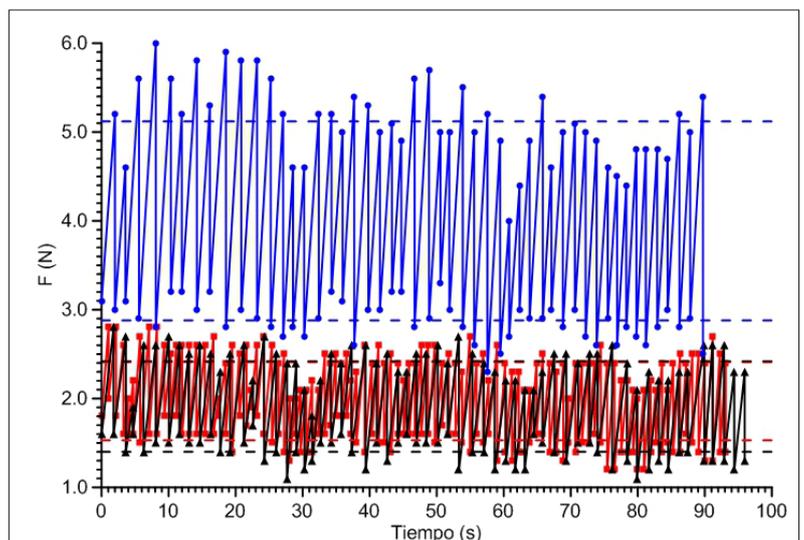
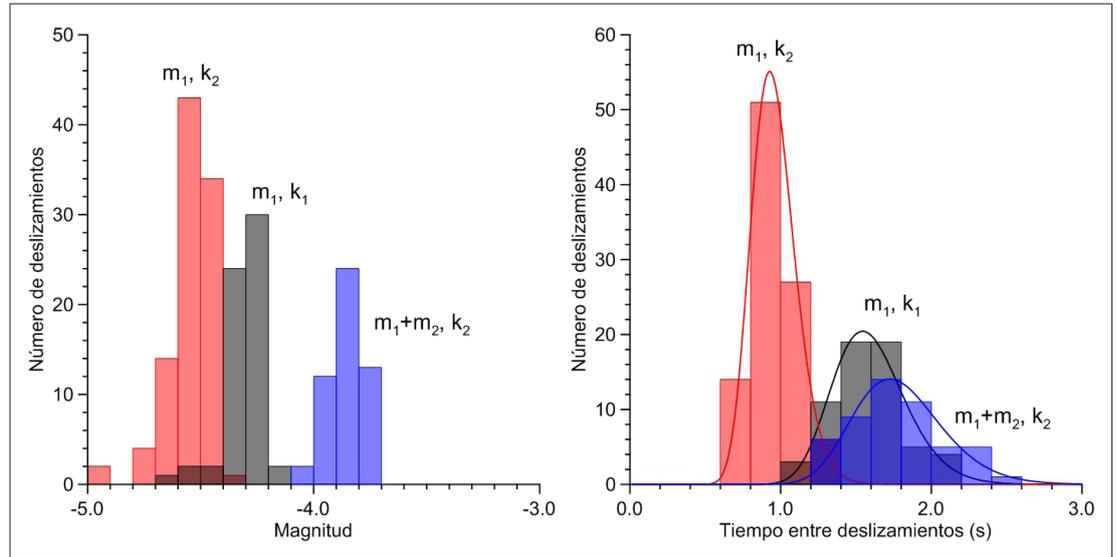


Fig. 13. Izquierda: histograma de magnitudes. Derecha: histograma de tiempo entre eventos y ajuste a una distribución lognormal. En negro: resultados con m_1 y k_1 . En rojo: con m_1 y k_2 . En azul: con $m_1 + m_2$ y k_2 .



3) El comportamiento en las magnitudes registradas, que además de en la figura 11 se puede observar en el histograma de magnitudes de la figura 13, se observa también en el tiempo entre deslizamientos. El aumento de la constante elástica implica una disminución del tiempo entre eventos, mientras que el aumento del rozamiento implica, por el contrario, un aumento en esta cantidad. Mientras que en la experiencia con m_1 y k_1 el tiempo medio entre eventos es de 1.60 s, en la experiencia con m_1 y k_2 disminuye a 0.96 s, y en la experiencia con $m_1 + m_2$ y k_2 aumenta hasta los 1.80 s. En los tres casos, podemos ajustar de forma fiable una distribución lognormal al histograma de esta variable (Fig. 13).

4) La variación de la magnitud de los eventos frente a la caída de esfuerzos tiene un comportamiento interesante (Fig. 14). Una misma magnitud necesita de una mayor o menor caída de esfuerzos en función del rozamiento y la constante elástica del dinamómetro. A través de los datos obtenidos y el ajuste realizado a dichos datos podemos ver, por ejemplo, que una magnitud -4.5 necesita de una caída de esfuerzos ($F_i - F_f$) del orden de 0.3 N en el experimento con $m_1 + m_2$ y k_2 , de 0.8 N en el experimento con m_1 y k_1 , y de 1.0 N en el experimento con m_1 y k_2 . Al contrario, podemos decir que una caída de esfuerzos de 1 N genera un terremoto de mag-

nitud -4.1 en el experimento con $m_1 + m_2$ y k_2 , de -4.4 en el experimento con m_1 y k_1 , y de -4.5 N en el experimento con m_1 y k_2 (Fig. 14).

5) Muy parecido al comportamiento de la magnitud de los eventos frente a la caída de esfuerzos, es el comportamiento frente al tiempo entre eventos (Fig. 15). Una misma magnitud puede generarse tras un tiempo de acumulación de esfuerzos mayor o menor dependiendo del rozamiento y la constante elástica. De la figura 15 podemos ver cómo, por ejemplo, un tiempo entre eventos de 1.3 s puede generar una magnitud -4.0 en el experimento con $m_1 + m_2$ y k_2 , -4.2 en el experimento con m_1 y k_1 , y -4.4 en el experimento con m_1 y k_2 . Es decir, se generan mayores terremotos para igual constante elástica si aumentamos el rozamiento, o a igualdad de rozamiento, si disminuimos la constante elástica. Otra cuestión interesante que se observa claramente en esta figura es el hecho de que los valores bajos de rozamiento (cuando se utiliza sólo la masa m_1) implican menores tiempos entre eventos. Tiempos entre eventos comparativamente “altos” sólo se obtienen al aumentar (duplicar) el rozamiento.

Fig. 14. Magnitud frente a caída de esfuerzos y ajuste logarítmico. Triángulos: resultados con m_1 y k_1 . Cuadrados: con m_1 y k_2 y. Círculos: con $m_1 + m_2$ y k_2 .

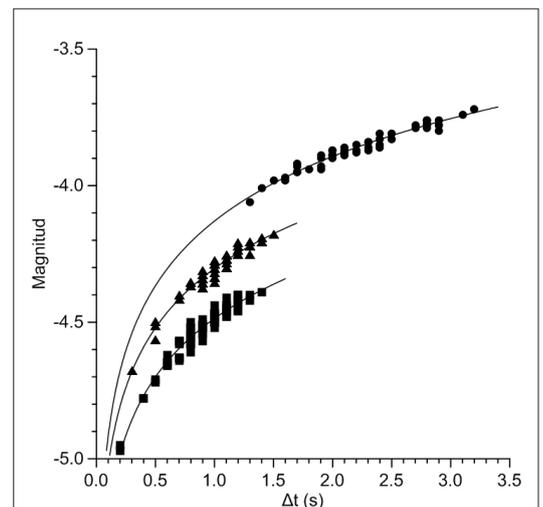
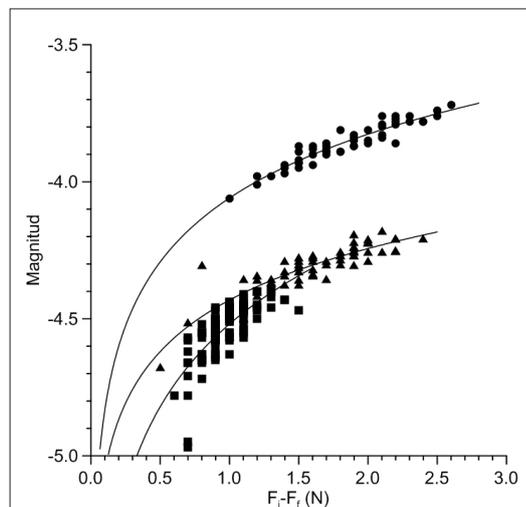


Fig. 15. Magnitud frente a tiempo entre eventos y ajuste logarítmico. Triángulos: resultados con m_1 y k_1 . Cuadrados: con m_1 y k_2 . Círculos: con $m_1 + m_2$ y k_2 .

A continuación se adjuntan links a cinco vídeos, en donde se muestra el dispositivo durante el experimento y se recrean las tres experiencias realizadas.

- a) Vista general del experimento:
<https://youtu.be/gcrPMRQmB4I>
- b) Propuesta del experimento usando dos masas:
<https://youtu.be/1lgPzNyw648>
- c) Experimento con m_1 y k_1 :
<https://youtu.be/8EgtZ17Bg5k>
- d) Experimento con m_1 y k_2 :
<https://youtu.be/kU9R3lltCas>
- e) Experimento con $m_1 + m_2$ y k_2 :
<https://youtu.be/kHn5iU8miko>

CONCLUSIONES

Este modelo mecánico permite, no sólo describir de forma cualitativa el proceso de generación de terremotos, sino la obtención de datos de calidad que permiten cuantificar este fenómeno. Así, se convierte en una experiencia muy valiosa e interesante en un laboratorio universitario de ciencias de la Tierra.

Aquí se han mostrado datos estadísticos, gráficos y ciertas inferencias que pueden hacerse con los resultados, pero pueden encontrarse más. De lo que se persiga con esta experiencia, y del nivel y tipo de curso en el que se realice, dependerá el nivel de exigencia. Mientras que simples estadísticas sobre magnitudes, deslizamientos o tiempo entre eventos pueden ser suficientes para cursos de Geofísica, Geología o Tectónica activa de nivel de grado en diversas titulaciones, otros análisis más elaborados que incluyan modelos y distribuciones pueden utilizarse incluso en cursos de máster. Va a depender de los objetivos y las competencias asociadas al curso en que se utilice.

Entre los diferentes resultados que pueden destacarse, está el que dos de las características del modelo, rozamiento y coeficiente elástico del dinamómetro, determinan claramente los datos a obtener. Como se indicó en la introducción, el rozamiento y el coeficiente elástico se traducen en la naturaleza y en el tipo y elasticidad de los materiales que conforman los bloques de falla, es decir, de la corteza terrestre.

Como hemos visto en los resultados presentados, tras duplicar la masa empleada (duplicar la fuerza de rozamiento) y duplicar la constante elástica del dinamómetro, la variación de estas cantidades tiene consecuencias importantes que se resumen a continuación.

Un aumento de la rigidez de la corteza (mayor valor de k en el dinamómetro utilizado) implica que: a) los eventos generados tienen menor magnitud (Fig. 11) y generan menores deslizamientos (Fig. 13), b) hay una pequeña disminución de la caída de esfuerzos en cada evento a costa de aumentar ligeramente el valor del esfuerzo F_f tras el evento (Fig. 12), c) disminuye de forma importante el tiempo entre eventos (Fig. 13), d) a igual caída de esfuerzos se generan terremotos de menor magnitud (Fig. 14), y e) a igual tiempo entre eventos se generan terremotos de menor magnitud (Fig. 15).

Por el contrario, un aumento del rozamiento (en nuestra experiencia, un aumento de la masa del bloque) implica que: a) los eventos generados tienen una mayor magnitud (Fig. 11) y mayores deslizamientos (Fig. 13), b) hay un neto incremento en la caída de esfuerzos observada en cada evento (Fig. 12), c) aumenta el tiempo entre deslizamientos (Fig. 13), d) a igual caída de esfuerzos se generan terremotos de mayor magnitud (Fig. 14), observándose valores de caída de esfuerzos superiores en relación a los observados en las otras dos experiencias, y e) a igual tiempo entre eventos se generan terremotos de mayor magnitud (Fig. 15), observándose también valores de tiempo entre eventos superiores a los obtenidos en las otras dos experiencias.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través de los proyectos CGL2015-65602-R y CGL2016-80687-R. La coautora G. del Pozo ha disfrutado de un contrato como personal laboral técnico de apoyo y de gestión de la I+D+i, en el marco del Sistema Nacional de Garantía Juvenil y del Programa Operativo de Empleo Juvenil.

BIBLIOGRAFÍA

- Brune, J.N. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 75, 4997-5009.
- Colombelli, S., y Zollo, A. (2015). Fast determination of earthquake magnitude and fault extent from real-time P-wave recordings. *Geophysical Journal International*, 202, 1158-1163.
- Gutenberg, B., y Richter, C.F. (1954). *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*. Princeton University Press, Princeton, NJ, USA.
- Hall-Wallace, M.K. (1998). Can earthquakes be predicted? *Journal of Geoscience Education*, 46, 439-449.
- Hanks, T.C., y Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*, 84, 23480-23500.
- Hardebeck, J.L., y Aron, A. (2009). Earthquake stress drops and inferred fault strength on the Hayward Fault, East San Francisco Bay, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99, 1801-1814.
- Hubenthal, M., Taber, J., y Braile, L. (2008). Redefining earthquakes and the earthquake machine. *The Science Teacher*, 75, 32-36.
- Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 82, 2981-2987.
- Kanamori, H., y Anderson, D.L. (1975). Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65, 1073-1095.
- Linton, K., y Stein, R.S. (2011). How to build and teach with QuakeCaster-An earthquake demonstration and exploration tool. *USGS Open-File Report 2011-1158*.
- Linton, K., y Stein, R.S. (2012). QuakeCaster, an earthquake physics demonstration and exploration tool. *Seismological Research Letters*, 83, 150-155.
- López Martín, J.A., González Herrero, M., Alfaro, P., y

- Andreu Rodes, J.M. (2018). Actividad “La máquina del terremoto” para ESO y Bachillerato. Libro de actas del XX Simposio Para la Enseñanza de la Geología. Menorca, julio de 2018.
- Madariaga, R. (1994). Dinámica de la fuente sísmica. *Física de la Tierra*, 6, 29-72.
- McGarr, A. (1999). On relating apparent stress to the stress causing earthquake fault slip. *Journal of Geophysical Research*, 104, 3003-3011.
- Peláez, J.A. (2011). Sobre las escalas de magnitud. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 19, 267-275.
- Reid, H.F. (1910). The California earthquake of April 19, 1906. *Report of the State Earthquake Investigation Commission. Volume II. The Mechanics of the Earthquake*. Washington DC, US.
- Ringlein, J. (2005). Connecting earthquakes and violins. *The Science Teacher*, 72, 24-29.
- Savage, J.C., y Wood, M.D. (1971). The relation between apparent stress and stress drop. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 61, 1381-1388.
- Shaw, B.E. (2013). Earthquake surface slip-length data is fit by constant stress drop and is useful for seismic hazard analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103, 876-893.
- Shimazaki, K., y Nakata, T. (1980). Time-predictable recurrence model for large earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 7, 279-282.
- Sornette, D., y Knopoff, L. (1997). The paradox of the expected time until the next earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87, 789-798. ■

Este artículo fue recibido el día 3 de febrero y aceptado definitivamente para su publicación el 4 de abril de 2018.