



Terremotos como sistemas complejos: estudio de la ley de Gutenberg-Richter

Zoraida Amador Carrasco

Los seísmos pueden no parecer objeto de estudio de la física de sistemas complejos a primera vista, pero expondremos las analogías claras que existen entre los terremotos y sistemas complejos típicos como el modelo de percolación o de avalanchas.

Realizaremos también un estudio sobre la aplicabilidad de la ley de distribución potencial de Gutenberg-Richter en diferentes regiones del planeta.

TERREMOTOS vs PERCOLACIÓN

El modelo de percolación supone una cuadrícula formada por cajas. Cada una de ellas tiene una cierta probabilidad de ser permeable (p_0) o impermeable ($1-p_0$). La distribución de cajas permeables o impermeables es aleatoria y la cuadrícula se define como permeable si hay un camino continuo de cajas permeables desde la parte superior de la cuadrícula a la parte inferior. Se define la probabilidad umbral de permeabilidad (o percolación) P .

- Si $p_0 < P$ se puede asumir que la cuadrícula será impermeable.
- Si $p_0 > P$ se puede asumir que es permeable.

Análogamente, en el caso de un terremoto, podemos considerar la placa tectónica como la cuadrícula. Conforme aumenta la presión en la placa aparecen fracturas aleatoriamente (cajas permeables). Eventualmente estas fracturas se agruparán formando una falla que cruce la placa y que la debilita (camino continuo de permeabilidad). Cuando se alcanza la presión crítica que lleva a la fractura (probabilidad crítica de percolación) se produce el desplazamiento de la placa, la deformación y por lo tanto, el terremoto (permeabilidad de la cuadrícula).

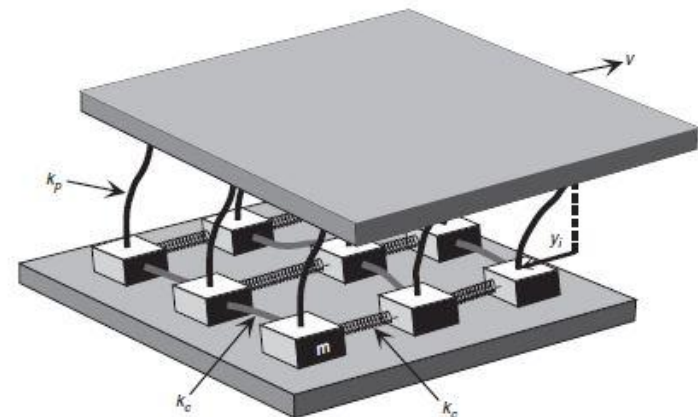
TERREMOTOS vs BLOQUES DESLIZANTES

En el modelo de bloques deslizantes cada bloque de masa m está unido a una placa plana y a los bloques adyacentes por resortes. La placa superior se desplaza con velocidad v . Cualquier bloque permanece estacionario mientras la fuerza neta sobre el bloque sea menor que la fuerza de rozamiento estática.

En el experimento llevado a cabo por Carlson y Langer en 1989, se obtuvo que los eventos de desplazamientos de los bloques respondían a una ley potencial frecuencia-tamaño, donde el tamaño está relacionado con el número de bloques que se desplazan.

La causa de estos eventos es el movimiento de la placa superior, mientras que los eventos de desplazamiento y sacudida brusca son las avalanchas que siguen la ley potencial característica de los sistemas con este comportamiento.

La similitud con la producción de seísmos en este caso sí es evidente.



LEY DE GUTENBERG-RICHTER

Hemos establecido que los seísmos son sistemas complejos y que, como el modelo de placas deslizantes, responden a una ley potencial, la ley de Gutenberg-Richter:

$$\log_{10} N = a + b \cdot M$$

donde N es el número de terremotos de magnitud M . Los parámetros a y b son los parámetros de ajuste de la correspondiente regresión lineal.

El parámetro a representa la actividad sísmica de la región de estudio, mientras que el parámetro b representa la proporción logarítmica de seísmos pequeños frente a los grandes. Su valor está comprendido generalmente en el intervalo $[-1.5, -0.7]$.

ESTUDIO DE LA LEY DE G-R

Una cuestión importante es la selección de las regiones de estudio. Como las zonas que acumulan mayor presión en la interacción entre placas tectónicas son los **bordes de las placas**, éstos serán objeto de estudio. Distinguiremos bordes convergentes, divergentes y transformantes.

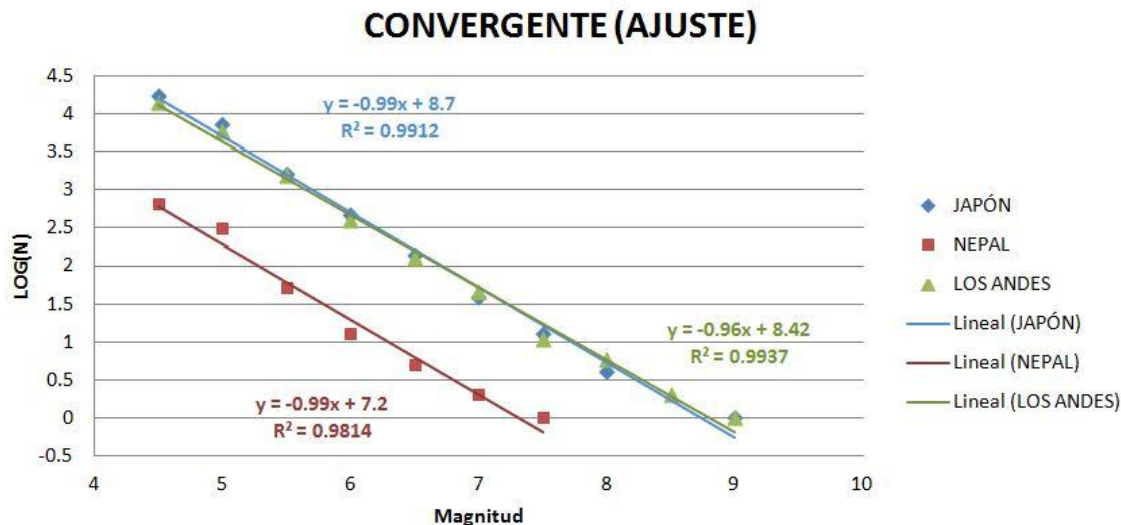
Además, las placas son esencialmente rígidas, por lo que las fuerzas y presiones también se distribuyen y acumulan en su interior, produciendo terremotos **intraplaca** que también estudiaremos.

Por último también cabe preguntarse cuál debe ser el tamaño de la región seleccionada en el que la ley tiene validez, por lo que seleccionaremos **pequeñas regiones** no muy distantes entre sí (~150 km) para estudiar su comportamiento y por último, realizaremos un ajuste de los datos tomados hasta la fecha de todos los terremotos registrados en **todo el planeta**.

Borde de las placas

En todos los casos se representarán primero los datos obtenidos para las diferentes regiones y posteriormente se superpondrán los datos representados en una misma gráfica para hacer un ajuste “global”, cuyos parámetros se recogen en una tabla.

Como se muestra a continuación en las gráficas y tablas, los ajustes son perfectamente lineales y el parámetro b toma valores muy próximos a -1 independientemente de la naturaleza de la falla o colisión de placas que produzca los seísmos.

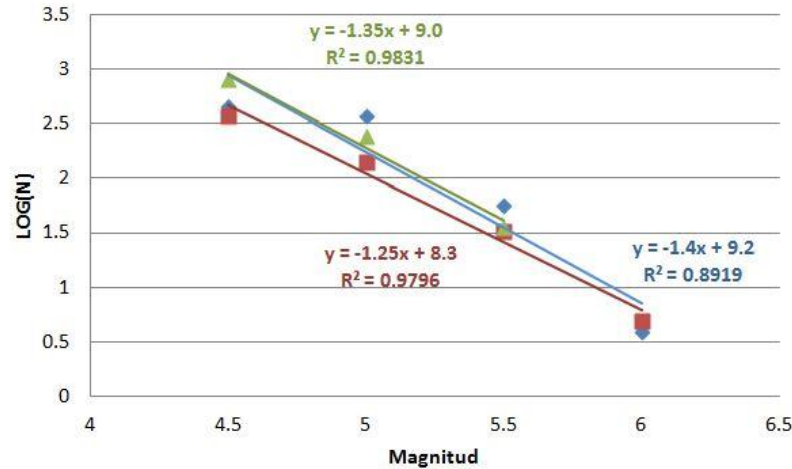


Aj. global (converg.)

b	-0.977 ± 0.019
a	8.56 ± 0.13
R^2	0.9909

Borde de las placas

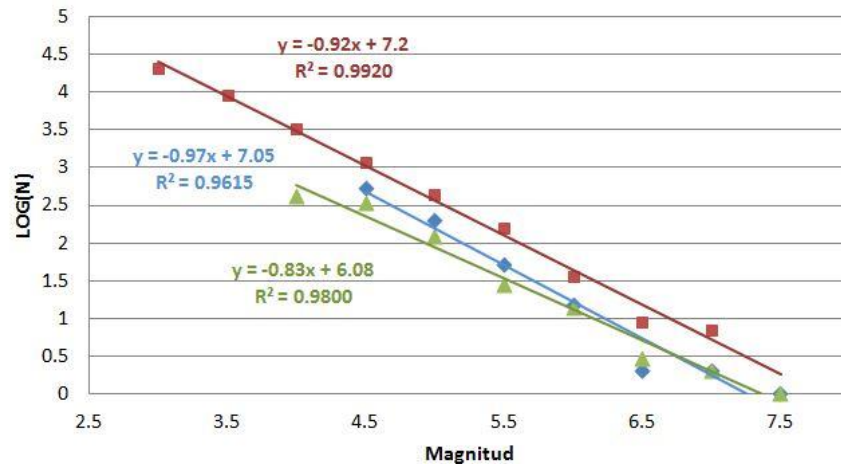
DIVERGENTE (AJUSTE)



Aj. global (diverg.)

b	-1.35 ± 0.13
a	8.9 ± 0.7
R^2	0.9266

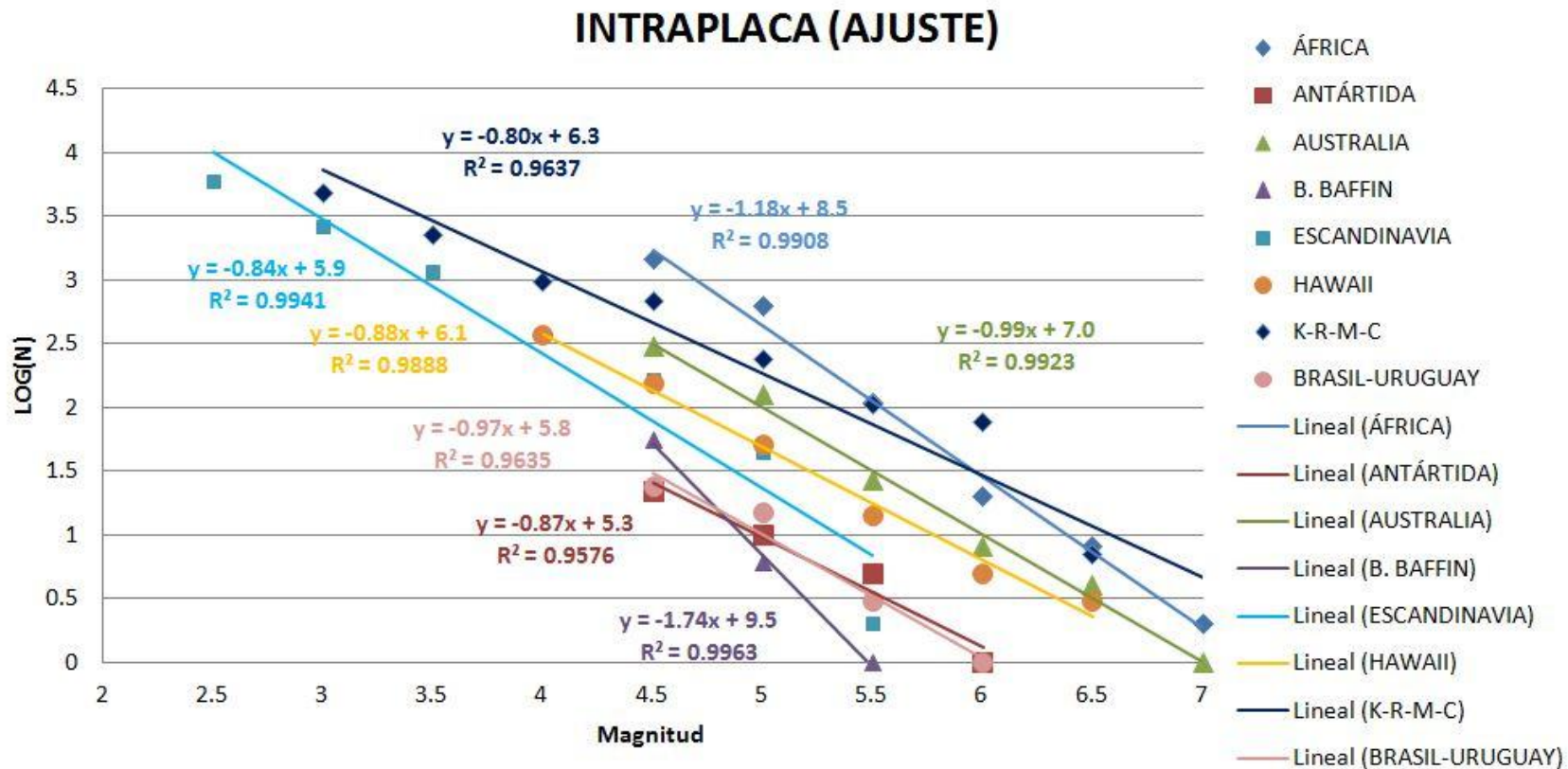
TRANSFORMANTE (AJUSTE)



Aj. global (transfor.)

b	-0.90 ± 0.03
a	6.48 ± 0.16
R^2	0.9792

Regiones intraplaca



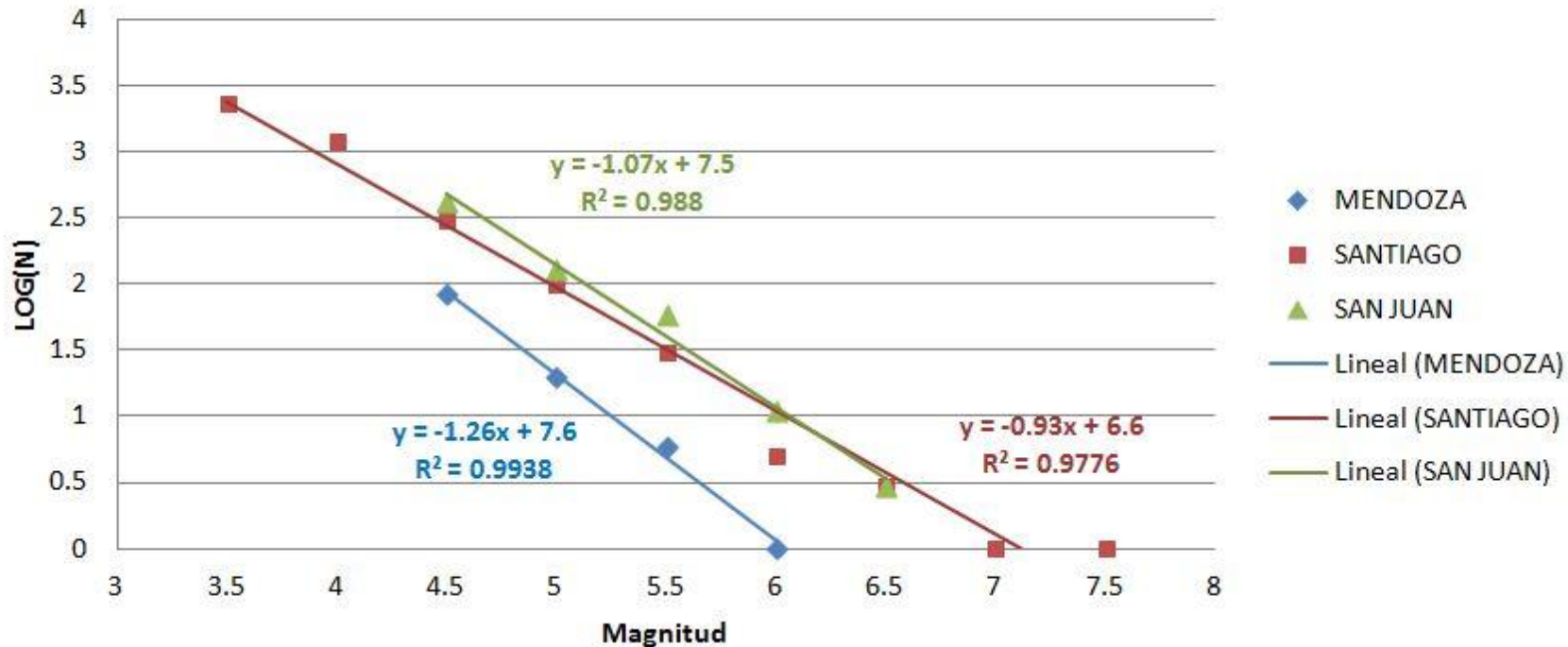
En las regiones intraplaca observamos el mismo comportamiento lineal con pendiente tendiendo a -1.

Aj. global (intraplaca)

b	-0.93 ± 0.04
a	6.22 ± 0.19
R^2	0.9350

Proximidad geográfica

LOS ANDES (AJUSTE)



Al seleccionar pequeñas regiones no se registra ninguna anomalía. Observamos comportamiento lineal con pendiente tendiendo a -1.

Aj. global (proximidad)

b -0.97 ± 0.04

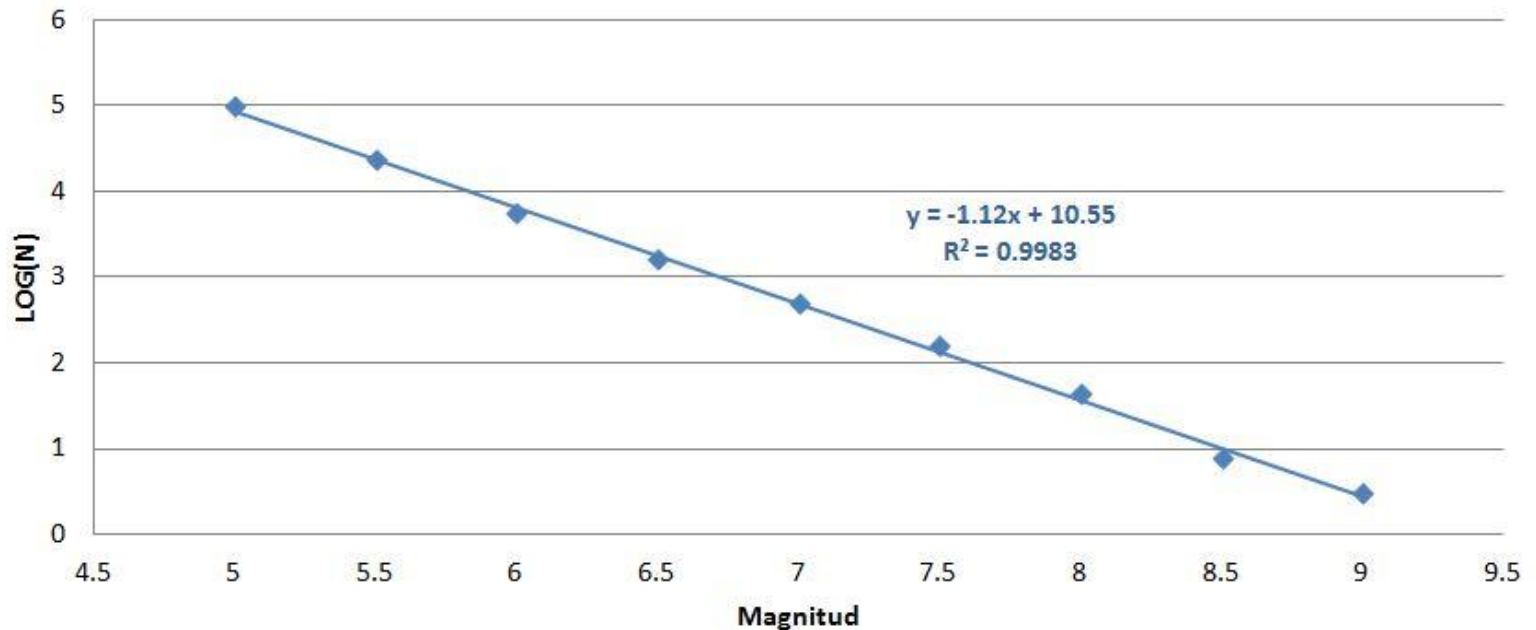
a 6.9 ± 0.2

R^2 0.9701

Análisis mundial

¡¡Datos de más de 3.3 millones de seísmos!!

MUNDIAL (AJUSTE)



Con la mayor superficie de estudio posible (todo el planeta) también se obtiene un comportamiento lineal cuya pendiente tiende a -1.

Análisis mundial

b -1.12 ± 0.02

a 10.55 ± 0.12

R^2 0.9983

Conclusiones

- Los terremotos SÍ son sistemas complejos
- Cumplen una ley potencial: Gutenberg- Richter
- La ley G-R se cumple independientemente de:
 - Tipo de interacción entre las placas tectónicas
 - Tamaño de la región de estudio (aunque cada región presenta sus propias peculiaridades)

APLICACIONES

- Información y datos:

Los estudios sismológicos aportan información sobre el interior de la tierra y las placas tectónicas, ya que el estudio “in situ” es imposible.

- Actualización de los modelos de peligrosidad sísmica.

Las leyes de recurrencia de magnitud son comúnmente usadas como una forma de definir el patrón esperado de sismicidad.

Para cada región hay un límite en el tamaño del máximo terremoto que puede ocurrir, dependiendo de las características geológicas de la región. Se determinan entonces los valores de ajuste de la regresión lineal obtenida a partir de la ley de Gutenberg-Richter (b , a y R^2) y los valores extremos de magnitud para los que ésta se considera válida. Todos ellos se introducen como parámetros característicos de la zona en evaluación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Turcotte D. L. and Malamud B. D. (2002), *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*. London, UK: Academic Press.
- [2] Mulargia F., Main I., Ciccotti M., Castellaro S. and Kertész J. (2003), *Earthquake Science And Seismic Risk Reduction*. Kluwer Academic Publishers.
- [3] Kanamori H. and Brodsky E. E. (2001), The Physics of Earthquakes. *Physics Today*, Volume 67, Number 8.
- [4] Stein S., Liu M., Calais E. and Li Q. (2009), Mid-Continent Earthquakes as a Complex System. *Seismological Research Letters*, Volume 80, Number 4.
- [5] Bak P., Tang C.J. and Wiesenfeld K. (1988). Self-organized criticality. *Physics Review Letters*. A38, 364-374
- [6] Carlson, J. M. and Langer J.S. (1989). Mechanical model of earthquake fault. *Physics Review Letters*. A40, 6470-6484.
- [7] Benito B. and Jiménez M. E. (1999). Peligrosidad sísmica. *Física de la Tierra*. 11, 13-47.
- [8] Incorporated Research Institutions for Sismology: *IRIS Earthquake Browser*: <http://ds.iris.edu/ieb/>
- [9] Don Turcotte - *Natural Hazards as Self-Organizing Complex Systems*: <https://www.youtube.com/watch?v=EWNZBnfyztY>