

Ocurrencia y predicción de terremotos. Bases físicas

Antoni M. CORREIG

Ton.Correig@am.ub.es

Departament d'Astronomia i Meteorologia

Universitat de Barcelona

c/Martí Franqués, 1. 08028 Barcelona.

RESUMEN

El presente trabajo pretende ser una puesta al día de las tendencias actuales en el estudio de la ocurrencia de terremotos y las posibilidades de su predicción. El marco físico de la ocurrencia de terremotos es el de los sistemas complejos alejados del equilibrio, y las posibilidades de predicción (previsión probabilista) vienen determinadas por una correcta identificación de la actividad precursora y un riguroso análisis de su evolución.

Palabras clave: ocurrencia de terremotos, predicción sísmica, actividad precursora.

Occurrence and prediction of earthquakes. Physical bases

ABSTRACT

This contribution is a presentation of the state of the art of the current tendencies in the study of the earthquake occurrence and the possibilities of its prediction. The physical framework of the earthquake occurrence is that of far from equilibrium systems, and the possibilities of prediction (probabilistic forecasting) rely on the correct identification of the precursory activity and a rigorous analysis of its evolution.

Keywords: Earthquake occurrence, seismic prediction, precursory activity.

1. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo pretendemos dar una visión general del estado actual de nuestros conocimientos sobre la ocurrencia de terremotos (tal como queda reflejada en el catálogo sísmico) y comentar las posibilidades de su previsión. No pretendemos, por tanto, comentar el proceso de ruptura que da origen al terremoto ni valorar el riesgo sísmico, temas tratados en otros trabajos.

Desde el punto de vista de nuestro objetivo, podemos considerar un terremoto como un proceso de relajación de los esfuerzos acumulados en la corteza terrestre, especialmente en los bordes de las placas litosféricas, debidos a las deformaciones provocadas por su movimiento relativo. El esquema de la ocurrencia de un terremoto lo podemos representar mediante el siguiente gráfico:



Figura 1. Escenario físico de la ocurrencia de terremotos.

Mientras que la entrada y la salida del sistema son bien conocidas, el proceso físico es el gran desconocido. En este proceso físico debemos distinguir lo que constituye la dinámica del sistema, el proceso de acumulación de esfuerzos, de la respuesta del medio, que finaliza en rotura. Medio y dinámica no son independientes, sino que interactúan. Solo una mínima parte de los esfuerzos liberados ($\sim 10\%$) se propaga como energía elástica, y el resto se emplea en la formación de la rotura y en redistribuir los esfuerzos restantes en el medio adyacente, lo que se traduce en un cambio en las condiciones iniciales para el próximo terremoto.

La tectónica de placas nos proporciona un mecanismo para explicar la ocurrencia de terremotos como un fenómeno recurrente, definiendo ciclos. A la vista de la Figura 1, y teniendo en cuenta la interacción entre la concentración de esfuerzos y el medio, el escenario físico de la ocurrencia de terremotos es el de un sistema complejo disipativo, con una entrada de energía, definida por un tiempo característico muy largo, que es súbitamente relajada, en un tiempo característico muy corto, cuando la energía acumulada supera un umbral determinado definido por el coeficiente de fricción entre ambos lados de la falla. El marco físico del proceso sísmico es, por consiguiente, el de los sistemas alejados del equilibrio.

Podemos definir el proceso físico como la respuesta del medio a la concentración de esfuerzos. El medio, la litosfera, está constituido por un sistema jerárquico complejo. La estructura jerárquica de la litosfera consiste en bloques, límites entre bloques (fallas) y nodos. El sistema de límites y nodos se conoce como red o sistema de fallas. La escala espacial del sistema de fallas es de varios órdenes de magnitud: la zona límite de las zonas de falla cubre entre 10^4 y 10^2 km, las fallas entre 10^1 y 10^2 , las grietas entre 10^{-3} y 10^{-5} , las micro grietas entre 10^{-6} y 10^{-7} , las interfaces 10^{-8} o menos. Este complejo sistema jerárquico, característica geométrica, convierte a la litosfera en un sistema no lineal. Como característica dinámica la rigidez de la litosfera es altamente inhomogénea y define dominios de distintas longitudes características. Así, mientras los bloques los podemos considerar como relativamente rígidos, las zonas límite de los bloques tienen una anchura entre 10 y 100 veces menor que la longitud característica de los bloques, a la vez que su rigidez es menor. Los nodos constituyen una estructura en forma de mosaico densamente fracturado en la vecindad de intersecciones y diaclasas, siendo su origen la colisión de las esquinas de los bloques. La configuración geométrica juega un papel muy importante, dado que la ocurrencia de un terremoto

viene regida por la diferencia esfuerzo-resistencia y por incompatibilidades geométricas cerca de las diaclasas de fallas, que pueden superar el criterio esfuerzo-resistencia.

El sistema de fallas constituye una «fábrica» de inestabilidades. Dado el carácter complejo del sistema, todas las escalas características, desde los nodos de los granos hasta las mayores placas tectónicas juegan un papel similar en la dinámica de la litosfera. De manera más específica, si bien la energía tectónica se almacena en la globalidad de la litosfera, la relajación de la energía se produce, en su mayor parte, debido a procesos en finas redes de fallas. Por un lado, la resistencia del sistema de fallas es menor que la resistencia de los bloques que separan y son muy permeables a los fluidos, y por el otro, la resistencia del sistema de fallas no solo es menor, sino que además es altamente inestable y muy sensible a una multitud de procesos, todos igualmente importantes. Como consecuencia de la acumulación de esfuerzos, el sistema de fallas alcanza un equilibrio meta estable en el que el criterio de ruptura está definido para un intervalo de valores, no un solo valor, y no es posible conocer, a priori, cual será la fluctuación externa que disparará la rotura. Hay dos grandes mecanismos para alcanzar la meta estabilidad: las inestabilidades físicas y las incompatibilidades geométricas. Entre las inestabilidades físicas cabe destacar la corrosión de esfuerzos y la infiltración de fluidos lubricantes, lo que se traduce en una variación del coeficiente de fricción, tanto en el espacio como en el tiempo. Las incompatibilidades geométricas se refieren a los posibles movimientos que pueden sufrir los bloques en los puntos nodales, los cuales están limitados por lo que en lenguaje llano podemos enunciar como la imposibilidad de generar un vacío («la naturaleza tiene horror al vacío») y la impenetrabilidad de la materia. Para revisión sobre el tema, vease Keilis-Borok (2002).

Podemos estudiar la ocurrencia de terremotos desde distintos ángulos, en concreto

1. desde un punto de vista estadístico podemos considerar la ocurrencia de terremotos como un proceso puntual estocástico, es decir, procesos cuyas realizaciones pueden representarse mediante una familia de funciones delta en el espacio, el tiempo o ambos, a la que puede asociarse otro parámetro que nos indique «cuan grande» ha sido el suceso.
2. Desde un punto de vista físico, podemos considerar un terremoto como una catástrofe, un cambio súbito en el valor de algún parámetro del sistema que se origina como respuesta a pequeñas variaciones en las condiciones externas. Estos cambios pueden modelarse como una transición función escalón, una discontinuidad o un punto de bifurcación.
3. Desde un punto de vista social, podemos considerar un terremoto como un suceso catastrófico capaz de generar importantes pérdidas, tanto en vidas humanas como económicas. De aquí la necesidad de profundizar en su previsión.

En la próxima sección trataremos las características estadísticas de la sismicidad y su relación con posibles procesos físicos, y en la siguiente las posibilidades de previsión.

2. OCURRENCIA DE TERREMOTOS

Es un hecho bien establecido que, de manera recurrente, los terremotos se originan en las mismas zonas en fallas preexistentes, definiendo así intervalos medios de recurrencia. Estas dos características, mismas zonas y recurrencia, hacen pensar en la existencia de un ciclo sísmico, a menudo caracterizado por el mayor terremoto y a veces asociado a un terremoto característico. El ciclo sísmico acostumbra a caracterizarse (a posteriori) mediante una serie sísmica consistente en precursores (no siempre presentes), suceso principal y réplicas. Esta clasificación, a veces útil, es un convenio, no un hecho objetivo; de ahí que, a menudo, de cara a estudios de predicción y cálculo de riesgo sísmico se consideren tan solo los terremotos característicos y los intervalos medios de recurrencia.

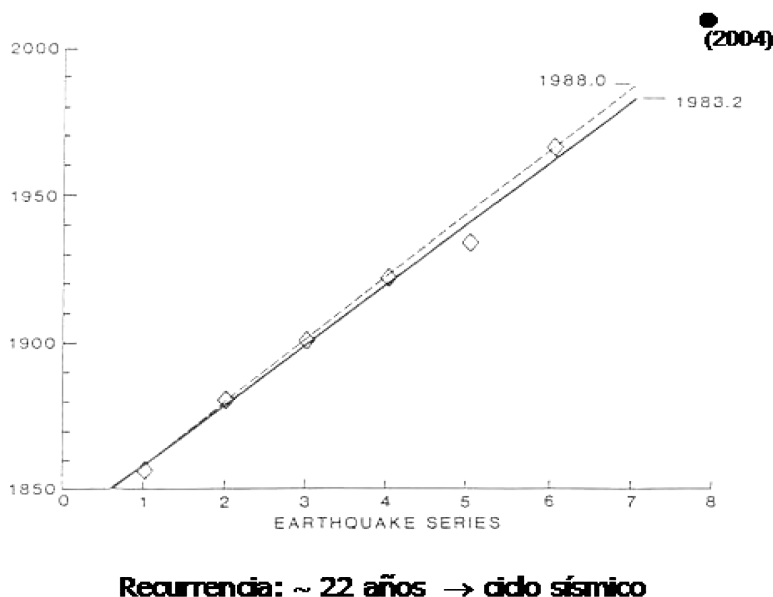


Figura 2. Serie sísmica de Parkfield.

Un ejemplo paradigmático, desde el punto de vista de la predicción, lo constituye la serie sísmica de Parkfield: 6 terremotos bien documentados, con un intervalo medio de recurrencia de 22 años y una magnitud media de 6. Tal como puede apreciarse en la Figura 2, excepto un terremoto, el resto está sobre una recta, lo que hace pensar en una ocurrencia periódica. Extrapolando a la ocurrencia del próximo terremoto, teniendo en cuenta o no el terremoto de 1938 el próximo terremoto debería haber ocurrido en 1983 o en 1988. Ocurrió en 2004. De este hecho se desprende una consecuencia importante: predicciones basadas solamente en distribuciones estadísticas son impracticables, como mínimo debido al escaso

número de observaciones. Esta situación no mejora si añadimos datos históricos u obtenidos a partir de paleosismología, pues el número de datos no aumenta significativamente y los errores en el tiempo origen son demasiado importantes. Cabe señalar que estas observaciones, una serie aparentemente quasi-periódica pero impredecible, puede simularse a partir de cualquier modelo fenomenológico caótico-determinista, lo que implica la necesidad de combinar la información estadística con el conocimiento de modelos físicos. La situación tampoco mejora si acompañamos las observaciones con alguna hipótesis sobre la densidad de probabilidad que obedecerían los datos, tal como propuso Rikitake (1999).

2.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA SISMICIDAD.

Está clara la impropiedad de utilizar una serie de terremotos característicos para la predicción del terremoto siguiente, si bien el análisis tanto de las características de la serie como de las características individuales de cada terremoto es de gran importancia para estudios de peligrosidad y riesgo sísmico. Debemos, pues, utilizar toda la información contenida en el catálogo sísmico.

Podemos definir el catálogo sísmico como un registro de la actividad sísmica ocurrida desde una fecha determinada, conteniendo básicamente las coordenadas hipocentrales, el tiempo origen, la magnitud y para terremotos de magnitud suficientemente grande los elementos del tensor de momento sísmico. De cara a utilizar la información contenida en el catálogo debemos tener en cuenta 1) la detectabilidad del sistema y 2) la posibilidad de utilizar distintos catálogos. La detectabilidad del sistema podemos definirla por su capacidad de discriminar un transitorio, o sea un terremoto, del ruido de fondo, un flujo quasi-estacionario cuya amplitud depende de las variables meteorológicas locales y regionales, así como de la actividad cultural-industrial. La detectabilidad aumenta cuanto mayor es el número de terremotos registrados de magnitud cada vez menor, y depende tanto del diseño del instrumento como de la amplitud del ruido de fondo. Decimos que un catálogo es completo a partir de una cierta magnitud cuando estamos razonablemente seguros que contiene todos los sucesos ocurridos de magnitud superior o igual a la magnitud de referencia.

En la Figura 3 (Correig et al., 1997) mostramos, para una simulación numérica, los terremotos (la sucesión de picos) que quedarían registrados en un catálogo sísmico en función de la detectabilidad, representada por las líneas horizontales. Para una detectabilidad infinita ($N = 0$) registraríamos un solo suceso, igual que para una detectabilidad «muy baja», $N = 75$. Para detectabilidades $N = 25$ y 50 podríamos definir (a posteriori) la clásica sucesión premonitores (sucesos anteriores a $t = 185000$), suceso principal ($t = 185000$) y réplicas (sucesos posteriores a $t = 185000$). Podemos, también, ver la necesidad de construir un catálogo sísmico a partir de una red homogénea de estaciones, a fin de evitar errores sistemáticos. Por otro lado, a fin de poder completar la información en una zona determinada es necesaria la utilización de diversos catálogos. Dependiendo de la respuesta instrumental de una red sísmica, el número de estaciones y las técnicas

de procesado de los sismogramas, la misma serie sísmica podría identificarse en distintos catálogos como un complejo terremoto con sub-eventos, o como una sucesión premonitores-terremoto principal-réplicas con muchos terremotos «individuales», tal como hemos visto en la Figura 3. Este hecho tiene sus repercusiones de cara a los modelos que se utilicen para el análisis de los catálogos. Debemos tener muy en cuenta saber distinguir entre modelos estadísticos empíricos (fenomenológicos) y modelos físicos, de los que desafortunadamente aún no disponemos. En un procesado fenomenológico de la ocurrencia de terremotos, podemos considerar los datos (normalmente catálogos) como series puntuales e intentar aproximarlos mediante modelos estocásticos.

Una vez disponemos de una base de datos homogénea de la actividad sísmica en una zona determinada, podemos constatar las siguientes características comunes para las distintas zonas tectónicas:

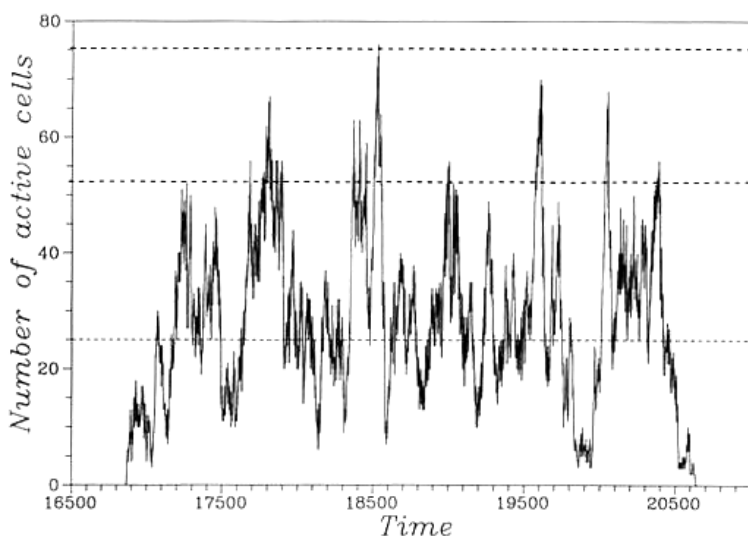


Figura 3. Ocurrencia de terremotos en función de la magnitud (que podemos considerar como proporcional al número de celdas activas) en función de la detectabilidad del sismógrafo (líneas horizontales).

- La población de terremotos de las diversas zonas tectónicas manifiesta variabilidad espacial, arracimamiento e intermitencia.
- La estadística de la frecuencia en función de la magnitud obedece una ley potencial, la ley de Gutenberg-Richter: el número acumulado de terremotos por unidad de tiempo, N_{CE} de magnitud superior a m se expresa

$$\log N_{CE} = -bm + a$$

- Los terremotos tienen series de réplicas (y algunas veces de precursores) que decaen (crecen) en el tiempo según la ley de Omori

$$R(t) = \frac{R_0}{(t + t_0)^p}$$

donde p es el índice potencial y R_0 y t_0 son constantes.

- La caída de esfuerzos que acompaña la ocurrencia de terremotos es relativamente constante (del orden de ~ 3 MPa) en un amplio intervalo de magnitudes, y menor que los esfuerzos tectónicos (del orden de $\sim 10 - 100$ MPa).
- La sismicidad puede ser inducida por perturbaciones de esfuerzos menores que la caída de esfuerzos de los sucesos individuales. En otras palabras, los terremotos pueden ser disparados.

Vemos pues 1) que la distribución de casi todas las características de los terremotos es auto similar, o sea, sigue una ley potencial, y 2) que existe acción a distancia. Estas son precisamente las características de los fenómenos críticos que aparecen en las transiciones de fase continuas orden/desorden. Notemos, sin embargo, que esta similitud es formal y que en ningún caso podemos identificar la ocurrencia de terremotos como un cambio de fase tal como se define en mecánica estadística, definida en términos de Hamiltonianos y funciones de equipartición de energía. La equivalencia es pues fenomenológica desde el punto de vista observacional (al menos en la actualidad). Sin embargo, debido precisamente a esta similitud podemos diseñar un método de análisis basado en las herramientas de la mecánica estadística cerca del punto crítico. Esto nos lleva a considerar de nuevo la ocurrencia de terremotos, tal como comentamos en la introducción, como un sistema complejo abierto, disipativo, alejado del equilibrio. Este tipo de sistemas está bien estudiado en materia condensada.

2.2. MODELOS FENOMENOLÓGICOS

Una de las propiedades de los sistemas alejados del equilibrio es la posibilidad de autoorganización, la aparición de estructuras emergentes una vez un parámetro determinado ha superado un umbral crítico. Un ejemplo paradigmático de autoorganización es la convección de Rayleigh-Benard, según la cual un fluido calentado por debajo y sometido a una temperatura constante por encima, una vez alcanzado un gradiente crítico de temperatura pasa de un régimen conductivo a un régimen convectivo desarrollando células convectivas. En este contexto, Bak y Tang (1989) desarrollaron la hipótesis para la ocurrencia de terremotos (posteriormente extendida a los fenómenos naturales en general) de la criticalidad autoorganizada, según la cual un sistema alejado del equilibrio, sometido a un constante y lento aporte de energía, evoluciona a un estado estadístico que exhibe inva-

rianza de escala (i.e., obedece una ley potencial) de manera espontánea, sin necesidad de sintonizar ningún parámetro, y fluctúa alrededor de un estado de quasi-equilibrio. En este sistema la entrada de energía es estacionaria, los sucesos menores pueden disparar reacciones en cadena que pueden afectar a cualquier número de elementos del sistema y la salida es una sucesión de avalanchas que obedecen una distribución estadística (frecuencia-tamaño) según una ley potencial. El punto crítico de este intervalo autosimilar es un cambio de fase orden/desorden, o sea, la ocurrencia de un terremoto. En resumen, en un régimen de criticalidad auto-organizada el sistema evoluciona de manera espontánea a un estado crítico definido por una estadística ley potencial de sus parámetros característicos.

Como ejemplo paradigmático de criticalidad autoorganizada, Bak y Tang (1989) presentaron el modelo de una pila de arena. Consideremos una mesa circular sobre la que, de manera lenta y continuada, tiramos aleatoriamente granos de arena. Al principio se irá formando una pirámide de arena que irá creciendo excepto por lo que se refiere a avalanchas esporádicas; si la arena llega al borde de la mesa, se pierde. Alcanzado un punto crítico, la pendiente crítica, el proceso vuelve a empezar hasta llegar de nuevo a la pendiente crítica. Tenemos, por tanto, que el sistema fluctúa alrededor del punto crítico. Este sistema es capaz de capturar una de las características básicas de la sismicidad: la distribución estadística frecuencia-tamaño es una ley potencial, la ley de Gutenberg-Richter. En la tabla siguiente comparamos las características de la pila de arena y la ocurrencia de terremotos.

Características de la criticalidad autoorganizada

<i>Propiedad</i>	<i>Pila de arena</i>	<i>Terremotos</i>
Condición de contorno	Ritmo (constante) de caída de granos	Ritmo (constante) de deformación
Parámetro crítico	Ángulo de reposo θ_c	Esfuerzo tectónico σ_c
Fluctuación dinámica	Fluctuación (pequeña) en el ángulo $\Delta\theta_c \ll \theta_c$	Caída de esfuerzos (pequeña) $\Delta\sigma_c \ll \sigma_c$
Distribución potencial	Volumen de la avalancha o de la energía	Longitud de la falla, momento sísmico, ley de Gutenberg-Richter

El trabajo pionero de Bak abrió el camino a la introducción de los sistemas complejos en sismología y a la simulación mediante autómatas celulares. Cabe decir que el modelo de Bak es estocástico. Años antes, fuera del contexto de los sistemas complejos, Burridge y Knopoff (1967) presentaron un modelo de ocurrencia de sismicidad a base de bloques y muelles, totalmente determinista, cuyas predicciones para un catálogo sísmico coinciden con las de Bak y Tang (1989).

Dentro de estos dos modelos extremos, el aleatorio y el determinista, se ha desarrollado un amplio abanico de metodologías para explicar las características estadísticas de la sismicidad, cada una poniendo el énfasis en aspectos distintos.

Cabe remarcar que el mismo concepto de criticalidad auto-organizada está bien establecido, si bien está claro que el proceso de auto-organización es espontáneo. Sin embargo, en la gran mayoría de modelos la criticalidad auto-organizada se alcanza para unos valores dados de algún parámetro del modelo o, dicho de otro modo, una vez el modelo se ha sintonizado; no es, por tanto una auto-organización espontánea.

Otro aspecto actualmente en debate es si los fenómenos naturales realmente obedecen leyes potenciales. En la naturaleza encontramos siempre un valor mínimo, en nuestro caso la detectabilidad de la red sísmica s_{min} . Una solución consiste en adoptar una distribución de Pareto, para la cual la distribución es aún potencial para valores $s > s_{min}$, con lo cual este límite inferior no afecta el análisis. Sin embargo las cosas cambian en el extremo superior. Dado que la resistencia del material es finita, hay un límite superior, s_{max} , para la magnitud de un terremoto. En el caso más simple esta limitación puede ser del mismo tipo que la debida al límite inferior: un corte para valores de $s > s_{max}$, en este caso la distribución es aún potencial para valores de $s < s_{max}$, lo que nos lleva a una distribución de Pareto truncada superiormente. Para una revisión del tema vease, por ejemplo, Kagan (2002). Cabe destacar que han aparecido trabajos señalando la aparición de dos escalas distintas en la ley de Gutenberg-Richter, vease por ejemplo Knopoff (2000). Remarquemos de nuevo que, de cara al cálculo de peligrosidad sísmica o predicción probabilista, no tiene consecuencias el hecho de utilizar una distribución truncada de Pareto en vez de una distribución potencial, antes al contrario: Mientras que una función densidad de probabilidad no es normalizable, una función de Pareto sí lo es. Los problemas podrían surgir en el estudio de la física subyacente a la ocurrencia de los terremotos, pues dejaría de ser válida la interpretación en términos de fenómenos críticos que exigen un comportamiento autosimilar (ley potencial) en un entorno del punto crítico. (Una posible solución podríamos obtenerla en términos de fenómenos de relajación con distintos tiempos característicos, definidos en intervalos de comportamiento tipo $1/f^\alpha$, con distintos valores de α para los distintos intervalos.)

En otro trabajo pionero, Bak et al. (2002) introdujeron una nueva ley de escala para los tiempos inter-evento (sucesos sísmicos), una generalización de la ley de Gutenberg-Richter, en el espacio de fase localización-tiempo origen-magnitud que superaba la clásica distinción entre precursores/suceso principal/réplicas. La filosofía es muy simple: 1) prescindamos del ambiente tectónico, 2) prescindamos de la distinción entre precursores y réplicas y 3) prescindamos de las heterogeneidades temporales. La densidad de distribución para los tiempos t entre eventos consecutivos de magnitud $m > m_c$ tiene la forma

$$p_\tau(t) = \lambda f(\lambda t),$$

en donde λ es el ritmo de ocurrencia de sucesos con $m > m_c$ en un área estipulada G , mientras que f es una función universal independiente de G y el límite de magnitud inferior m_c . Esta relación es extraordinaria, satisfaciéndose para un amplio intervalo de m_c (entre 2 y 7.5), para regiones sísmicas G de tamaño lineal L muy distinto (entre 20 km y el tamaño de la Tierra) al igual que para catálogos sísmicos distintos, tanto regionales como globales y para distintos períodos de tiempo. El ritmo de ocurrencia λ se acostumbra a parametrizar como

$$\lambda L = a 10^{-bm} L^c,$$

en donde b es la pendiente de la ley de Gutenberg-Richter y el exponente c está asociado con una dimensión fractal de la distribución de epicentros, o sea, $0 \leq c \leq 2$. No está aún bien establecida la parametrización de f , si bien está ampliamente utilizada la siguiente ley de distribución para $\tau\lambda$

$$f(x) = cx^{\gamma-1} \exp(-x/a)$$

para $x = \tau\lambda \geq 0.05$. El parámetro $1/a$ puede ser considerado como la fracción de eventos principales respecto a la totalidad de eventos. Remarquemos, finalmente, que en la actualidad esta ley universal es fenomenológica, sin una firme base teórica que la sustente, y está en debate su comportamiento en los extremos. De todas formas, el descubrimiento de esta ley global ha significado un gran avance.

3. PREDICCIÓN DE TERREMOTOS

Son bien conocidas las pérdidas causadas por los terremotos, tanto en vidas humanas como económicas, por lo que no vamos a insistir en ellas. Está clara, pues, la necesidad de su previsión, a fin de poder mitigar sus consecuencias. No vamos a entrar tampoco en el problema político de la toma de decisiones (como por ejemplo decretar la evacuación de una zona determinada). Desde el punto de vista de la ocurrencia de desastres naturales, lo que nos interesa es poder avanzar su predicción (previsión probabilista), y para ello nos es imprescindible conocer los procesos físicos subyacentes a la ocurrencia de terremotos. En la sección anterior hemos comentado las características estadísticas de los catálogos sísmicos, así como de dos modelos fenomenológicos extremos, uno aleatorio y otro determinista, que capturan algunas de estas características estadísticas básicas, en concreto la ley de Gutenberg-Richter. Sin embargo, el conocimiento del proceso físico es escurridizo. Conocemos el *cómo*, pero no el *porqué*. Tal como relata Cinna Lomnitz, «*la predicción de fenómenos naturales se asemeja al juego de croquet en el libro Alicia en el país de las maravillas, en donde la pelota era un erizo vivo, imposible de estarse quieto o ir donde querían los jugadores. Podemos hacer todo tipo de estadísticas relativas a los hábitos de los erizos, pero*

no entenderemos nada sobre las reglas de juego». Nuestro objetivo es, pues, entender las reglas de juego y prever cual será la reacción del erizo.

El primer problema que se plantea es el de qué entendemos por predicción. Podemos hacernos las siguientes preguntas:

- **¿Cuándo se producirá el próximo eclipse solar, visible en Barcelona?** (El próximo día 3 de octubre de 2005. Será parcial y empezará a las 7 h 41 m 07 s, TU)
- **¿Que tiempo hará el día de Navidad?** (El día puede ser apacible o borrasco. No lo podremos precisar hasta unos pocos días antes)
- **¿Tendré suerte en el trabajo?** (Las condiciones te son favorables, pero si te cruzas con un gato negro y lo ves por encima del hombro izquierdo puede estropearlo todo)

las cuales se corresponden a los siguientes tipos de predicción:

- **Predicción determinista** (predicción de sucesos individuales, basada en modelos físicos lineales)
- **Predicción probabilista o previsión** (previsión de la evolución de un sistema físico, basada en modelos físicos no lineales)
- **Oráculos** (videntes, horóscopos, cartas, etc., sin ningún fundamento científico).

Obviamente, con los conocimientos actuales, la predicción sísmica debe ser probabilista, y utilizamos la palabra *predicción* como sinónimo de *previsión*.

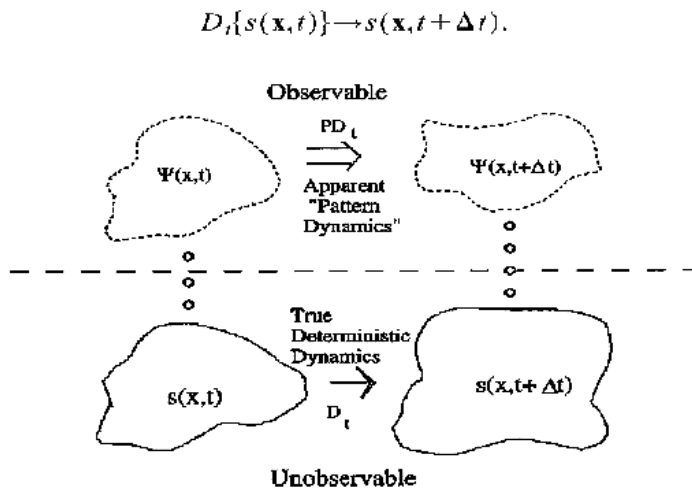


Figura 4. Proceso dinámico de la ocurrencia de terremotos (desconocido) y su proyección como observables (actividad precursora)

En la Figura 4 presentamos un esquema (Rundle *et al.*, 2000) en el que se muestra que la única información disponible de la actividad sísmica consiste en la proyección en superficie, PD_t , (la evolución de la sismicidad y posiblemente otros fenómenos) de la verdadera dinámica sismogénica, D_t , la gran desconocida en la actualidad. Esta proyección en superficie, los *observables*, conocidos también como patrones dinámicos aparentes, es lo que podemos considerar como *actividad precursora*, y los parámetros que la definen como *precursores*.

3.1. NATURALEZA DE LOS PRECURSORES

Hemos comentado ya que los precursores son aquellos fenómenos que pueden generarse en la litosfera durante el proceso de acumulación de esfuerzos. Normalmente las señales propuestas como precursores se han descrito a posteriori, y la mayoría de ellos no resisten un análisis riguroso (Wyss, 1991). Las señales propuestas se basan en el análisis de los siguientes fenómenos:

- Variación de la actividad sísmica
- Cambios en la velocidad y en el contenido espectral de las ondas y fuentes sísmicas
- Deformaciones y variaciones en el contenido de esfuerzos en la corteza.
- Variaciones en los campos gravitatorio, geomagnético y geoelectrico
- Cambios anómalos en el nivel de las aguas subterráneas y su composición química
- Anomalías en la presión atmosférica, temperatura y flujo térmico.

La IASPEI definió los siguientes criterios para la validación de los candidatos a precursores:

- Las anomalías observadas deben relacionarse con algún mecanismo sismogénico
- La anomalía debe observarse simultáneamente en más de un emplazamiento o instrumento
- La definición de la anomalía y de las reglas para su asociación con la ocurrencia sísmica deben ser precisas
- Tanto las anomalías como las reglas deben poder derivarse de un conjunto de datos independiente del utilizado para su establecimiento.

De todos los precursores propuestos, la IASPEI seleccionó tan sólo cinco como posibles precursores (Wyss, 1997):

- Uno basado en la química del agua subterránea
- Uno basado en la deformación de la corteza
- Tres basados en pautas de sismicidad.

La determinación de la actividad precursora es muy elusiva, pues no es tarea fácil distinguir los precursores propiamente dichos de las fluctuaciones naturales. Como dificultades observacionales podemos destacar:

- el intervalo temporal de registros sísmicos es muy corto comparado con los tiempos característicos de los procesos sismogénicos

- las series temporales asociadas a los fenómenos naturales son no-estacionarias y/o intermitentes
- o, desde un punto de vista negativo,
 - los hay, pero aún no los hemos encontrado
 - los hay, pero no en los datos disponibles
 - no los hay.

Dado que los procesos sismogénicos son intrínsecamente no lineales, debemos desechar la idea precursor-terremoto como causa-efecto. Tal como hemos comentado, existen diversos mecanismos que pueden llevar el sistema a un estado inestable que puede resolverse en un terremoto, y el mecanismo seleccionado dependerá de las condiciones iniciales, desconocidas.

Debemos, pues, cambiar el marco de referencia y recordar que la actividad sismogénica se enmarca dentro de los sistemas complejos, una de cuyas características es que, para algunas escalas espacio-temporales, los fenómenos naturales están altamente organizados. Como ejemplos tenemos los huracanes, los tornados, las galaxias, los hongos desarrollados en las explosiones naturales, etc. Son precisamente estas estructuras organizadas las que podemos considerar como precursores.

De manera genérica, podemos considerar los precursores como estructuras (geométricas y/o dinámicas) autoorganizadas en los observables, que se generan cuando el sistema se aproxima a un estado crítico (la concentración de esfuerzos está próxima al coeficiente de fricción entre ambos lados de la falla).

3.2. PAUTAS SÍSMICAS PRECURSORAS

Antes de la ocurrencia de un gran terremoto, con frecuencia se observan los cambios siguientes en el flujo de sismicidad, propios de los síntomas generales de inestabilidad previos a una catástrofe. En particular, la respuesta del sistema a una perturbación:

- se incrementa
- se vuelve más irregular
- actúa a distancia

Trasladado a la actividad sísmica, antes de la ocurrencia de un gran terremoto la respuesta a perturbaciones (como por ejemplo la ocurrencia de terremotos de pequeña magnitud) se traduce en

- un incremento de la actividad sísmica, arracimamiento (clustering) de terremotos en el espacio y el tiempo y concentración espacial de hipocentros. En otros términos, incremento de la respuesta a una perturbación
- incremento del ritmo de ocurrencia de sismicidad y arracimamiento
- interacción de terremotos a distancias crecientes (incremento del intervalo de influencia de la perturbación).

Una monitorización continuada de la sismicidad ha detectado las siguientes pautas individuales de sismicidad, formalmente definidas como candidatas a actividad precursora

- estallido de réplicas, asociado a la ocurrencia de terremotos de magnitud moderada
- quiescencia sísmica
- incremento relativo del valor b (en la ley de Gutenberg-Richter) en sucesos moderados respecto a sucesos menores
- incremento en la correlación del flujo de terremotos.

El problema que se presenta es que estas pautas, descritas individualmente, no son independientes, sino que interactúan entre ellas. Ello es debido a que los terremotos se originan en un sistema jerárquico de fallas compuesto por fallas, nodos y diaclasas, no en fallas aisladas, en donde todos los elementos interactúan debido a las variaciones espaciales y temporales del coeficiente de fricción. De ahí que es irrealista intentar sacar conclusiones a partir de las pautas de manera aislada. Es necesario pasar de la concepción reduccionista (determinista, de las partes al todo) a una concepción holística (del todo a las partes: el todo es más que la suma de las partes).

3.3. SIMILITUD CON LA CONVECCIÓN DE RAYLEIGH-BENARD.

La detección y correcta interpretación de la actividad precursora necesita de un modelo teórico de sismogénesis, modelo que en la actualidad no existe. En la sección 2 hemos comentado el simple modelo fenomenológico de la pila de arena, capaz de explicar la ley de Gutenberg-Richter como ley potencial. Sin embargo, este modelo no es capaz de explicar la formación de estructuras. En el marco de los sistemas alejados del equilibrio el modelo paradigmático de formación y evolución de estructuras lo constituye la convección térmica turbulenta.

Partimos de un recipiente que contiene un fluido calentado por debajo ($T = T_0 + \Delta T$) y a una temperatura constante T_0 por encima. Cuando ΔT es pequeña, el transporte de calor se realiza por conducción. Cuando ΔT alcanza un valor crítico (alcanza un umbral), pasamos de un régimen de transporte conductivo a un régimen convectivo, dando lugar a la aparición de células convectivas, las células de Rayleigh-Benard: el sistema se ha autoorganizado originando unas estructuras imposibles de predecir a partir del régimen conductivo. Estas estructuras son conocidas como estructuras emergentes y son debidas a la competición entre la fuerza gravitatoria, la fuerza arquimédiana de empuje y las fuerzas viscosas. En el régimen conductivo el sistema es lineal y determinista, en el que se aplica el principio de superposición. En el régimen convectivo, el sistema es no lineal, impredecible (caótico) y el principio de superposición deja de ser aplicable, actuando en su lugar la competición entre los distintos elementos del sistema. Si continuamos calentando el recipiente, la estructura de celdas conductivas se va destruyendo, generando nuevas estructuras que van evolucionando en el tiempo (convección turbulenta) hasta llegar a la turbulencia. En la Figura 5 presentamos un ejemplo (Kadanof, 2001) de un estado intermedio de convección turbulenta, en el que las celdas convectivas de Rayleigh-Benard van dando paso a nuevas estructuras, cada vez más complicadas, hasta llegar a la turbulencia propiamente

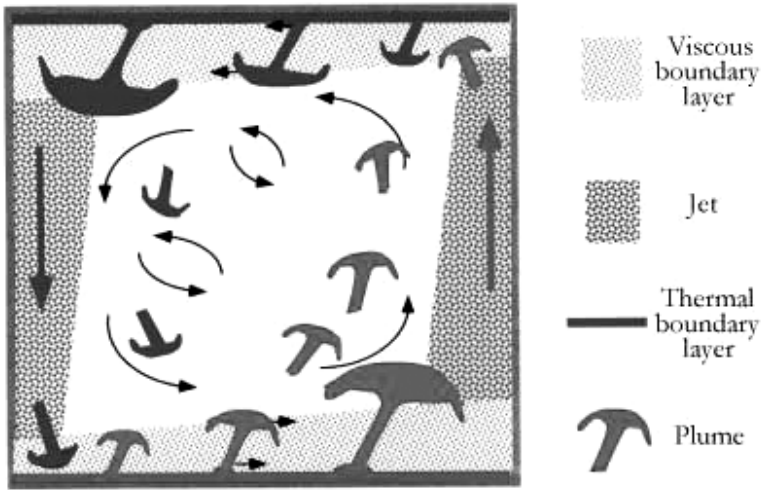


Figura 5. Ejemplo de convección turbulenta.

dicha. Es precisamente en este intervalo de convección turbulenta definida entre el paso de conducción a convección (dos cambios de fase orden/desorden) en el que se forman y evolucionan las estructuras, el equivalente a la aparición de pautas de sismicidad en la ocurrencia de terremotos. En la tabla siguiente resumimos el intervalo de autoorganización definido entre dos transformaciones de fase en el caso convectivo y su equivalente en el proceso de sismogénesis.

Características de la dinámica de autoorganización

PROCESO FÍSICO	CONVECCIÓN	SISMOGÉNESIS
Transición de fase	Inicio de la convección (punto de bifurcación)	Inicio de actividad sísmica intermitente
Autoorganización	Desarrollo de celdas convectivas y convección turbulenta	Emergencia de pautas de sismicidad espacio-temporales
Transición de fase	Inicio de la turbulencia	Ocurrencia de un terremoto

En analogía con la convección, las pautas de sismicidad espacio-temporales debemos buscarlas entre los dos cambios de fase, no observable el primero y catastrófico el segundo.

3.4. PAUTAS PRECURSORAS DE SISMICIDAD

Tal como hemos comentado, la IASPEI ha aceptado como posibles precursores las pautas de sismicidad y sus variaciones. Hasta el presente se han detectado las siguientes pautas, utilizadas en el programa de predicción (probabilista) de grandes terremotos (Keilis-Borok y Soloviev, 2002):

- a) Incremento de la actividad sísmica
- b) Incremento de la irregularidad en su distribución espacio-temporal
- c) Inversión en la distribución territorial de la sismicidad
- d) Variación en la distribución estadística de la magnitud
- e) Incremento del arracimamiento en el espacio y el tiempo
- f) Incremento en la longitud de correlación
- g) Aceleración en la liberación de esfuerzos

Estas pautas constituyen los observables conocidos como «pautas dinámicas aparentes» de la Fig. 4, y constituyen la base para la previsión de ocurrencia de grandes terremotos. Las dos líneas más importantes de previsión sísmica las constituyen el *incremento temporal de la probabilidad* (Time of Increased Probability, TIP) desarrollado por Keilis-Borok y colaboradores desde los años 60 (Keilis-Borok y Soloviev, 2002) y más recientemente el conocido como *pautas dinámicas*, desarrollado por Rundle y colaboradores (Rundle et al., 2000). No es el objetivo del presente trabajo profundizar en los detalles de las distintas metodologías, refiriéndonos a las referencias citadas.

No todos los grandes terremotos van precedidos de todas las pautas ni siguen un orden preestablecido. Por ejemplo, para declarar una alarma en la metodología TIP, seis de las siete funciones definidas para cada una de las pautas tienen que superar un cierto umbral. Dado el desconocimiento actual de los procesos dinámicos subyacentes (parte inferior de la Fig. 4) el único método posible de análisis es a través del reconocimiento de pautas, una metodología empírica si bien la única disponible en el presente.

3.5. UNA POSIBLE CUANTIFICACIÓN DE LAS PAUTAS DE SISMICIDAD

Hemos comentado ya que el marco físico en el que se engloba la ocurrencia de terremotos es el de los sistemas alejados del equilibrio, y que de manera genérica podemos considerar la ocurrencia de un terremoto como un cambio de fase orden/desorden. Aceptado este enfoque, estamos en condiciones de utilizar toda la potencialidad de la mecánica estadística aplicada al estudio de los fenómenos complejos. Sin embargo, debemos tener en cuenta que no podemos hacer una interpretación mecanicista y trasladar las propiedades de los sistemas termodinámicos a los sistemas sísmicos: en la preparación de la ocurrencia de un terremoto no disponemos de funciones hamiltonianas ni funciones de equipartición.

Hemos comentado también que un modelo paradigmático de los sistemas alejados del equilibrio lo constituye la convección térmica. En este contexto, una ecuación ampliamente utilizada para el estudio de la evolución del sistema y la

generación de pautas es la ecuación de Ginzburg-Landau (Landau y Lifshitz, 1987). La ecuación cúbica de Ginzburg-Landau es una de las ecuaciones no lineales más ampliamente estudiadas, pues describe de manera cualitativa, y a menudo también de manera cuantitativa, una gran variedad de fenómenos, desde ondas no lineales a transiciones de fase de segundo orden, desde la convección de Rayleigh-Benard a la formación de pautas, y está especialmente dirigida al estudio de fenómenos alejados del equilibrio en sistemas espaciales extensos.

La ecuación de Ginzburg-Landau es

$$\partial_t A = A + (1 + ib)\Delta A - (1 + ic)|A|^2 A$$

donde A es una función compleja del tiempo re-escalado t y el espacio x , y los parámetros reales b y c caracterizan la dispersión lineal y no-lineal. Esta ecuación se presenta como una ecuación «modulacional» (o «envolvente» o «amplitud»). Por analogía con las transiciones de fase, a menudo el parámetro A es conocido como **parámetro de orden**.

Los parámetros físicos observables $\mathbf{u}(t, r)$ (temperatura, velocidad, densidad, etc.) vienen dados por

$$\vec{u} = A' \exp[i(q_c \cdot x - \omega_c t)] U_l(z) + c.c. + h.o.t.$$

donde U_l es un vector propio de la aproximación lineal y ω_c y \mathbf{q}_c son los correspondientes valores propios, que podemos asociar, en analogía a la propagación de ondas planas, a la frecuencia angular y al número de onda. La solución de esta ecuación tiene regímenes en los que su comportamiento es intrínsecamente caótico, y a menudo se estudia como un prototipo de ecuación para caos espacio-temporal y formación de pautas. Esta ecuación puede generar una gran variedad de estructuras coherentes, entre las que destacan **frentes, pulsos, fuentes y sumideros**. La actividad sísmica precursora estará asociada con la generación y evolución de estas estructuras, o sea, con el proceso de **auto-organización**.

En la ecuación anterior podemos distinguir tres casos de interés para la evolución de las pautas de sismicidad:

- I. $\omega_c = 0, \mathbf{q}_c = 0$. Define inestabilidades periódicas estacionarias. La ecuación compleja de Ginzburg-Landau se reduce a la ecuación real, conocida también como ecuación de difusión compleja; este es el caso de la convección de Rayleigh-Benard.
- II. $\omega_c \neq 0, \mathbf{q}_c = 0$, que representa inestabilidades oscilatorias uniformes.
- III. $\omega_c \neq 0, \mathbf{q}_c \neq 0$, que representa la propagación de inestabilidades en general.

Estas tres posibilidades dan cuenta de las distintas pautas observadas de sismicidad, si bien aún no han sido exploradas en profundidad desde el punto de vista de las simulaciones numéricas.

Teniendo en cuenta estas tres posibilidades, y dentro de la referencia de los fenómenos críticos, podemos situar las distintas pautas de sismicidad en el siguiente marco de la convección turbulenta:

- a) Incremento de la actividad sísmica
desarrollo de celdas convectivas ($\omega_c = 0, \mathbf{q}_c = 0$)
- b) Incremento de la irregularidad en su distribución espacio-temporal
- c) Inversión en la distribución territorial de la sismicidad
convección turbulenta ($\omega_c \neq 0, \mathbf{q}_c = 0$)
- d) Variación en la distribución estadística de la magnitud
aproximación al punto crítico
- e) Incremento del arracimamiento en el espacio y el tiempo
- f) Incremento en la longitud de correlación
- g) Aceleración en la liberación de esfuerzos
en el entorno del punto crítico ($\omega_c \neq 0, \mathbf{q}_c \neq 0$)

Desde el punto de vista observacional, no se ha detectado una evolución secuencial de las distintas pautas, y en la metodología TIP de reconocimiento de pautas se analizan como independientes: se declara una alarma cuando seis de las siete pautas sobrepasan unos umbrales predeterminados. Tampoco podemos pretender que la ecuación de Ginzburg-Landau nos pueda predecir la evolución de todas ellas simultáneamente, debido a nuestro desconocimiento de las condiciones iniciales. Hemos comentado ya que el medio, el sistema jerárquico de fallas, es una fábrica de inestabilidades en la que juega un papel determinante el movimiento de los fluidos y la transferencia de esfuerzos, que pueden modificar las condiciones iniciales. Podemos hablar, pues, de condiciones iniciales variables. En consecuencia debemos limitarnos a aplicar la ecuación de Ginzburg-Landau a las distintas pautas individuales, excepto quizás a las tres últimas.

Las siete pautas bien conocidas y observadas podemos clasificarlas en tres grandes apartados:

1. Las pautas a) - d) podemos considerarlas como originadas durante la preparación del proceso, alejados aún del punto crítico pero habiendo superado ya la sismicidad de fondo. Las distintas pautas constituirían un reflejo de la interacción entre los distintos elementos del sistema de fallas, regida por una posible variación temporal del coeficiente de fricción. En este régimen las pautas pueden considerarse como independientes.
2. Las pautas e) - f) nos alertarían de la proximidad del sistema al punto crítico en el que se produciría un cambio de fase, la ocurrencia del terremoto. En este régimen las pautas dejan ya de ser independientes y son manifestaciones directas de la evolución del sistema cerca del punto crítico en el que la longitud de correlación tiende a infinito, observación f), y la liberación de esfuerzos se auto-organiza según una ley potencial acelerada, observaciones e) y g).
3. Desde este punto de vista la pauta d) estaría a caballo entre los dos regímenes. En el régimen 1. obedecería la ley de Gutenberg-Richter (u otra ley universal generalizada) con unos valores dados del parámetro b, valor que variaría al acercarse al régimen 2.

4. DISCUSIÓN

En el presente trabajo hemos presentado, de manera muy resumida, el marco en el que se encuadran los modelos de ocurrencia de terremotos y las posibilidades de su predicción. Este marco no es otro que el de los sistemas alejados del equilibrio, y las posibilidades de predicción, las propias de los sistemas complejos.

Desde el punto de vista observacional disponemos, básicamente, del catálogo sísmico. Un primer análisis de la estadística de ocurrencia de terremotos nos revela que la distribución acumulada de terremotos en función de la magnitud obedece una ley potencial, la ley de Gutenberg-Richter, y la distribución de tiempos entre sucesos de las réplicas obedece la ley de Omori, otra ley potencial. Un punto débil en el análisis del catálogo sísmico lo constituye la distinción entre precursoros —terremoto principal— réplicas, un convenio que se aplica a posteriori. Esta inconsistencia puede solucionarse definiendo una ley (que ha demostrado ser universal) que integra la ley de Gutenberg-Richter, la ley de Omori y la distribución espacial de epicentros. Esta nueva ley, inicialmente fenomenológica, es extraordinariamente robusta.

Desconocemos, en la actualidad, la dinámica real de la ocurrencia de terremotos, debiéndonos apoyar en modelos fenomenológicos. Dado que las observaciones obedecen leyes potenciales, parece adecuado considerar un terremoto como un cambio de fase que se produce en un punto crítico definido por la relación entre el esfuerzo acumulado y el coeficiente de fricción, que puede variar en el espacio y el tiempo.

La predicción sísmica, necesariamente probabilista, constituye el gran desafío actual. Los únicos observables de los que disponemos son la actividad sísmica, acompañada de las deformaciones del terreno y la química de las aguas subterráneas, las cuales pueden considerarse como una proyección de la dinámica real del sistema y es la que conocemos como actividad precursora. A diferencia del sistema dinámico meteorológico, no disponemos de los valores iniciales del sistema sísmico y debemos basarnos, para la previsión de ocurrencia de terremotos, en dicha actividad precursora.

Dado que la dinámica de la ocurrencia de terremotos se enmarca en la dinámica de los sistemas complejos, intrínsecamente no lineales, no podemos pretender que se cumpla una relación causa-efecto, propia de los sistemas lineales: una causa puede provocar distintos efectos y un mismo efecto puede ser debido a distintas causas.

No existe un conjunto de precursoros individuales que nos anuncie la inminencia de un gran terremoto. A falta de modelos teóricos adecuados, lo que sí podemos hacer es monitorizar la evolución del sistema físico y analizar la variación del conjunto de pautas de comportamiento reconocidas hasta el presente e integrarlas en un modelo probabilista capaz de detectar un aumento significativo de la posibilidad de ocurrencia. Superado un umbral predeterminado, puede cursarse una alarma a las autoridades pertinentes notificando el área de ocurrencia, un intervalo de tiempo de ocurrencia y el intervalo de la magnitud, naturalmente

previo a la ocurrencia del terremoto: este proceso es el que se conoce como **predicción**. Un análisis estadístico a posteriori de las alarmas pronosticadas, que podemos clasificar como ciertas, falsas y alarmas no detectadas, así como su contraste con una hipótesis nula, tal como una predicción poissoniana, nos darán cuenta de la bondad del método.

Podemos decir que, hasta el presente (Keilis-Borok y Soloviev, 2002), las técnicas de predicción desarrolladas han sido exitosas en más del 80% de las veces, y presentan una mejora respecto a una estimación poissoniana del orden de 3:1.

5. AGRADECIMIENTOS

A principios de los años 70, en Barcelona, Agustín Udías me introdujo en el fascinante mundo de la sismología. Es un placer agradecer el estímulo y apoyo recibido de Volodya Keilis-Borok, Volodya Kossobokov, Bill Newman y Antonella Peresan.

6. REFERENCIAS

- BAK, P.; K. CHRISTENSEN ; L. DANNON & T. SCANLON (2002). Unified scaling law for earthquakes, *Phys. Rev. Lett*, 88, 178,501.
- BAK, P. & TANG (1989). Earthquakes as a self-organized critical phenomena, *J. Geophys. Res.*, 94, 15,635-15,638.
- BURRIDGE, R. & L. KNOPOFF (1967). Model and theoretical seismology, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 57, 341-371.
- CORREIG, A.M.; M. URQUIZÚ; J. VILA & S. MANRUBIA (1997). Aftershock time series of event February 18, 1996: an interpretation in terms of self-organized criticality, *J. Geophys. Res.*, 102, 27,407-27420.
- KADANOFF, L. (2001). Turbulent heat flow: structures and scaling, *Physics Today*, August 2001, p. 34.
- KAGAN, Y.Y. (2002). Seismic moment distribution revisited: I. Statistical results, *Geophys. J. Int.*, 148, 520-541.
- KEILIS-BOROK, V.I. (2002). *Fundamentals of earthquake prediction: four paradigms*. In Keilis-Borok, V.I. & Soloviev, A.A. (eds.), *Nonlinear dynamics of the lithosphere and earthquake prediction*, Springer.
- KEILIS-BOROK, V. I. & SOLOVIEV, A. A. (Eds.) (2002). *Nonlinear dynamics of the lithosphere and earthquake prediction*, Springer.
- KNOPOFF, L. (2000). *The magnitude distribution of declustered earthquakes in Southern California*, PNAS, 97, 11880-11884.
- LANDAU, L.D. & E. M. LIFSHITZ (1987). *Fluid Mechanics*, 2nd edition, Pergamon Press, Oxford.
- RIKITAKE, T. (1999). Probability of a great earthquake to recur in the Tokai district, Japan: reevaluation based on newly-developed paleoseismology, plate

- tectonics, tsunami study, microseismicity and geodetic measurements, *Earth Planets Space*, 51, 147-157.
- RUNDLE, J.B.; W. KLEIN; K. TIAMPO & S. GROSS (2000). Linear pattern dynamics in nonlinear threshold systems, *Phys. Rev. E*, 61, 2418-2431.
- WYSS, M. (1991). *Evaluation of proposed earthquake precursors*, Am. Geophys. Union, Washington, DC, 94 pp.
- WYSS, M. (1997). Second round of evaluation of proposed earthquake precursors, *Pure appl. Geophys.*, 149, 3-16.