

# APROXIMACIÓN A LA CARACTERIZACIÓN DE LAS SERIES SÍSMICAS UTILIZANDO MÉTODOS NO PARAMÉTRICOS

Enrique Carmona<sup>1</sup>, José A. Esquivel<sup>1</sup>, Graciela Estévez<sup>2</sup>, Jesús M. Ibáñez<sup>1</sup>

1 Instituto andaluz de Geofísica, Universidad de Granada.

2 Dpto. de Informática. Universidad de A Coruña.

## ABSTRACT

*The study of seismic series for the searching of some parameter that characterizes them, constitutes a field of great difficulty. In this work three series of different seismic zones from Andalusia are analyzed, the series of Agrón (1988-1989), the series of Antequera (1989) and the series of Iznajar (1998). The time dependent data used for each earthquake has been the arrival time to a determined station of the network. The analysis of the earthquake occurrence has been carried out by means of the nonparametric determination of the intensity function, obtaining a characteristic parameter for each one of the series. The temporal analysis from the difference in the arrival times of each earthquake with its predecessor converges to a bidimensional attractor, which has a similar form but different characteristics in each one of the series and thus constitutes a differential element among them. Finally, the power analysis has been carried out choosing, the interval of magnitudes that includes most of the earthquakes, determining in this form the existing power accumulation in each series. These analyses allow to characterize well enough the seismic series on the basis of their power-time dependent characteristics.*

**Keywords:** análisis no paramétrico de curvas, atractor extraño, serie sísmica.

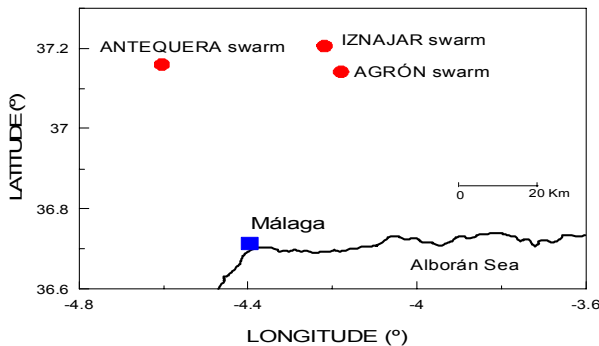
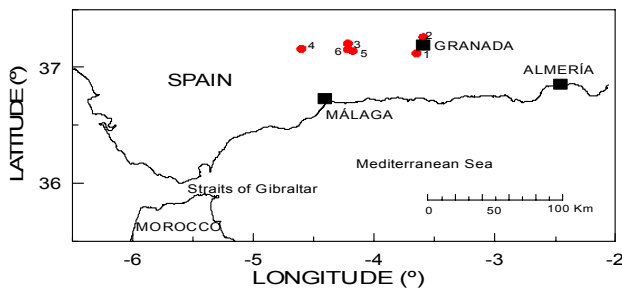
## INTRODUCCIÓN

La cuenca de Granada está dentro de un marco contacto entre las placas litosféricas de Euro-Asia y África (Buforn,..1998, Galindo,..1999), formada por un conjunto de rocas sedimentarias de Neogeno al Cuaternario, por encima del contacto entre las zonas internas y externas de las Cordilleras Béticas, que tienen una dirección NE-SW. Éste hecho convierte a la cuenca de Granada en una de las zonas sismotectónicas más importantes de la Península Ibérica, con altos porcentajes de actividad microsísmica

Dentro de la microsismicidad diaria de ésta parte del Béticas, aparecen serie sísmicas sin que éstas estén asociadas con un terremoto principal, como por ejemplo la serie de 1979 (Vidal, 1986) la cual afectó a toda la cuenca y áreas vecinas y duró casi un año. La serie se caracterizó por tener el mayor “shock” con una magnitud  $m_d = 4.8$ , y más de 55 terremotos sentidos por la población. También aparecen enjambres sísmicos, con un gran número de micro-terremotos (más de 1000) concentrándose en un corto periodo (días o meses) y en unas áreas muy específicas de unos pocos kilómetros cuadrados como fue durante el mes de Febrero de 1985, con más de 1500 terremotos. La serie que tuvo lugar muy próxima a la ciudad de Loja, con magnitudes locales de más de 3.9. Desde finales de 1988 y comienzos de 1989, un enjambre sísmico

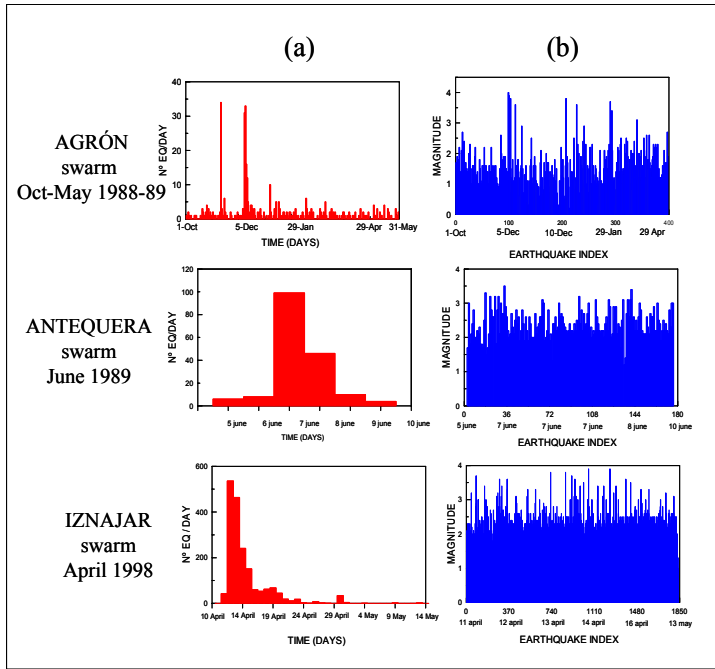
compuesto por aproximadamente 400 terremotos con magnitudes entre 0.4 y 4.0 ocurrieron cerca del pueblo de Agrón. Por otro lado, también son otros ejemplos los enjambres de Antequera (junio 1989) compuesto de 158 terremotos con magnitudes entre 2.5 y 3.4 (Posadas, 1993), y la serie de Iznajar, con más de 2500 terremotos registrados durante un periodo de 17 días en Abril de 1998.

En este trabajo se analizan tres de estas series: la serie de Agrón 1988-1989, la serie de Antequera de 1989 y la serie de Iznajar de 1998 de las que se disponen los datos digitales obtenidos de la Red Sísmica de Andalucía del Instituto Andaluz de Geofísica. El dato del tiempo que se ha utilizado para cada terremoto es el tiempo origen del terremoto para las series de Agrón y Antequera, y el tiempo de llegada a una estación determinada de la red para la serie de Iznajar, donde de esta forma se incluyen prácticamente todos los sismos de la serie (la utilización del tiempo origen del terremoto exige disponer de los datos de varias estaciones, bastante difícil de conseguir en bastantes series).



Mapa de sur de España con la localización de las series que han tenido lugar en los últimos años. Con (1) y (2) serie de Granada 1979, (3) serie de Loja 1985, (4) serie de Agrón 1989, (5) Serie de Antequera 1989, (6) serie de Iznajar 1998. Zona más detallada con las series estudiadas en éste trabajo.

Para el siguiente trabajo, y debido a la escasez de datos localizados sobre todo para las series de Agrón y Antequera, decidimos trabajar con umbrales de magnitud para cada una de las series. Antequera ( $2.0 < \text{mag} < 2.8$ ); Agrón ( $0.7 < \text{mag} < 2.8$ ); Iznajar ( $1.3 < \text{mag} < 2.4$ )



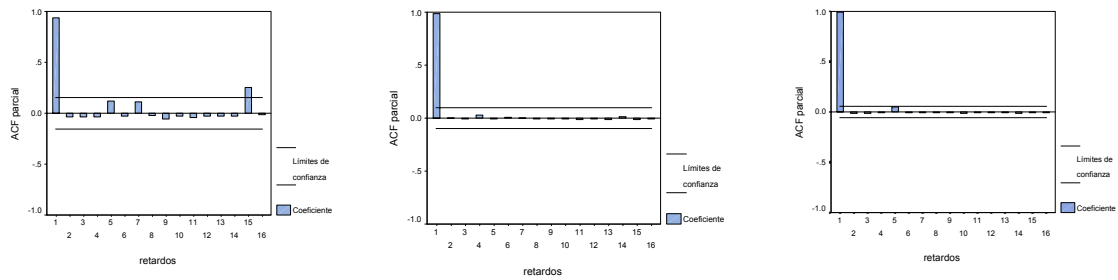
En las gráficas donde se muestran (a) la evolución temporal de las series del número de terremotos por día y (b) la evolución de las magnitudes a lo largo de las series. Se puede observar como cada serie responde a una forma en la evolución temporal tanto en magnitudes como en nº de terremotos diferente. Ninguna de ellas responde al típico “mainshock-aftershock”.

## EL PARÁMETRO TEMPORAL

Aunque la caracterización de un serie es un problema que se mantiene bastante difuso debido a las características específicas de la zona sísmica de que se trate, la distribución temporal y energética, etc., en este trabajo se establece que la variable clave para caracterizar la series es la diferencia temporal entre un terremoto y el siguiente de la serie, es decir, la diferencia entre los tiempos de un sismo y el anterior

$$T_i = t_i - t_{i-1} , T_1 = 0 , \quad i = 2, \dots, n$$

expresión que está inducida por la autocorrelación de la variable tiempo origen (o el tiempo de la primera llegada) de los sismos: la autocorrelación global indica que la serie temporal de tiempos necesita ser diferenciada, y la máxima autocorrelación parcial muestra que el único retardo a tomar en cuenta es el de valor 1. Por otra parte, la autocorrelación utilizando los parámetros energéticos es inexistente en prácticamente todos los niveles de retardo; así, la magnitud muestra un valor máximo para la autocorrelación (global o parcial) de 0.2 (Box & Jenkins, 1976; Wandaele, 1983).



Aquí se muestran las autocorrelaciones parciales de los tiempos origen de los sismos de las series de Antequera, Agrón e Iznájar, respectivamente.

La diferencia de tiempos  $T_i$  determina bastante bien las características básicas de la serie puesto que:

- muestra la cronología en que ocurren los sismos.
- establece el núcleo de la serie (la aglomeración de terremotos) y el momento de ruptura de las mismas (el momento en que los terremotos comienzan a ser más espaciados hasta la finalización de la serie).
- muestra los intervalos en que decrece la ocurrencia de terremotos.
- aunque las características propias de las series son distintas,  $T_i$  permite inducir la existencia de algún patrón común a las series.

## COMPORTAMIENTO CAÓTICO DE LAS SERIES

Una forma muy eficaz de analizar una serie temporal consiste en llevar a cabo un análisis espectral, que se basa en considerar que una variable o una serie temporal puede ser representada significativamente mediante ondas sinusoidales puras sumadas sobre diferentes frecuencias, con diferentes amplitud y fase en cada frecuencia. El algoritmo de análisis utiliza la transformación de Fourier de los datos para:

- obtener los coeficientes de las sinusoides en un conjunto discreto de frecuencias.
- agrupar frecuencias cercanas entre sí en bandas de frecuencias.
- estimar distintos parámetros a partir de los datos transformados en una banda de frecuencia cada vez.

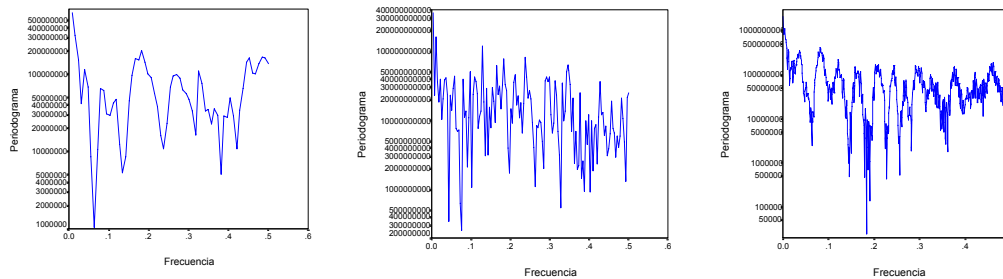
De esta forma, en lugar de analizar la variación desde un punto temporal al siguiente, analiza la variación de las series como un todo en componentes periódicos de frecuencia diferente. Y el gráfico más usual es el espectro de potencia, esto es, la representación no suavizada de la amplitud espectral (representada en escala logarítmica) respecto a la frecuencia o respecto al periodo (la variación de baja frecuencia es característica de series suaves, mientras que la variación dispersada de forma equilibrada en todas las frecuencias indica "ruido blanco").

Calculando la transformada de Fourier de la señal original  $x(t)$  según la expresión:

$$X(t) = \sum_{i=1}^n x(i) \cdot e^{\frac{-j \cdot 2\pi \cdot (k-1) \cdot (i-1)}{n}}$$

siendo  $n$  la dimensión del vector  $x$ , y  $1 \leq k \leq n$  (MATLAB User's Manual); entonces, si prácticamente todos los armónicos de la señal están presentes, entonces la señal es no

periódica, es decir, es una señal caótica (Ruelle, 1989). Los periodogramas de las series en estudio muestran que no existen periodos en las componentes sinusoidales sino que aparece una banda ancha cuyas componentes de frecuencia están dispersas, lo que indica la existencia de un comportamiento caótico (RUELLE, 1989; RUELLE & ISOLA, 1990; STEWART, 1991), tal y como se muestra en la Figura



Los periodogramas de las series de Antequera, Agrón e Iznájar, respectivamente mostrando la existencia de una banda ancha que indica un comportamiento caótico.

Los métodos de la teoría del caos permiten llevar a cabo el análisis de una serie temporal  $x(t)$  obtenida de una situación experimental, en un intento de extraer el sentido físico a los datos sin conocer detalladamente la dinámica subyacente y las ecuaciones que la rigen. La idea general de esta aproximación consiste en generar varias señales escalares a partir de la señal original para reconstruir un espacio N-dimensional en el que se pueda obtener una buena representación del atractor extraño de los datos. Un atractor extraño es una estructura asintótica hacia la que evolucionan las órbitas de ciertos sistemas dinámicos definido según:

un conjunto  $A$  es un atractor de un sistema dinámico  $f(x)$  si existe un conjunto abierto  $C \supset A$  tal que para  $x \in C$ , las órbitas  $\{x_k = f_{k-1}(x)\}$  convergen al conjunto  $A$ , y  $A$  es invariante ( $f(A)=A$ )

y si la dinámica de los puntos del atractor es caótica (es decir, es sensible a las condiciones iniciales, etc.), el atractor se denomina “atractor extraño” (RUELLE, 1989, MARTÍN, MORÁN y REYES, 1995).

Al desconocerse la dinámica subyacente del proceso, la mejor aproximación consiste en utilizar retrasos temporales para obtener las órbitas del sistema según la expresión  $x_k(t) = x(t + (k - 1)\tau)$ ,  $k = 1, \dots, N$ . Así se obtiene una señal N-dimensional representada por el vector

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ x(t + \tau) \\ \vdots \\ x(t + (N - 1)\tau) \end{pmatrix}$$

y que proporciona la información geométrica del atractor independientemente del conjunto de variables que puede construirse a partir de  $x(t)$  (PACKARD, et al. (1980); STEWART, 1991; MARTÍN, MORÁN y REYES, 1995) El método es el siguiente:

Ruelle y Packard determinaron que la nube de puntos definida por las tríadas  $(x_i, x_{i+1}, x_{i+2})$  a partir de los observables ficticios

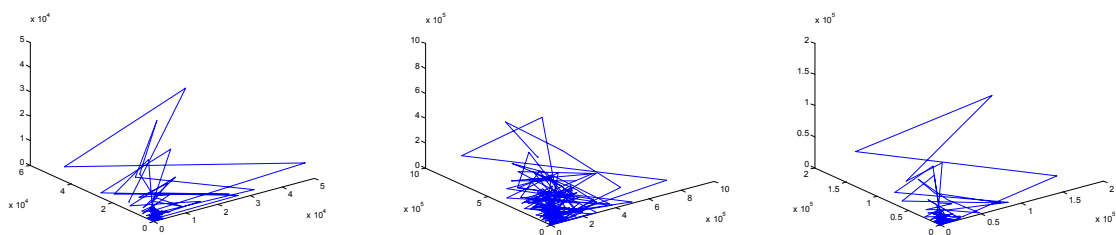
$$x_1, x_2, x_3, \dots$$

$$x_2, x_3, x_4, \dots$$

$$x_3, x_4, x_5, \dots$$

que constituye una reconstrucción fiel desde el punto de vista topológico del atractor extraño de  $x(t)$ . Y puesto que la reconstrucción del “verdadero atractor”  $A$  tiene lugar usualmente en un espacio infinito-dimensional, este método permite obtener una proyección  $N$ -dimensional  $zA$  de dicho atractor, cuya forma depende del número de  $N$  de variables y del retraso  $\tau$ ; por tanto, la dimensión del atractor  $A$  debe ser lo bastante pequeña para ser tratable (RUELLE & ISOLA, 1990; RUELLE, 1995).

La aplicación de estas ideas a las series estudiadas en este trabajo, utilizando la variable  $T_i$  que cuantifica la diferencia temporal existente entre cada terremoto y el siguiente, permite determinar que las series tienen dos partes claramente definidas: un atractor extraño bidimensional que caracteriza a la serie y que la determina hasta el comienzo de la finalización de la serie, es decir, hasta que los sismos comienzan a espaciarse temporalmente y la serie decae hasta su finalización. Y la estructura espacial del atractor de cada serie mantiene esta regularidad: un atractor extraño que modeliza el núcleo de la serie junto a una línea casi recta que caracteriza la parte residual.



Atractores en 3-D para las series de Antequera, Agrón e Iznajar respectivamente.

## CONCLUSIONES

En las series temporales estudiadas, una variable fundamental es la primera diferencia entre los tiempos origen. Las series tienen una estructura caótica y muestran un núcleo compuesto por un atractor extraño con tres dimensiones. Las distintas formas geométricas de los atractores indica que las series tienen características diferentes aunque comparten el núcleo en forma triangular en las mismas. Con estos elementos se

ha podido caracterizar cada serie aun cuando su comprobación definitiva tendrá lugar cuando ocurra otra serie en la misma zona sismogénica, y poder así compararla con estos resultados.

## REFERENCIAS

- BOX, G.E.P. & JENKINS, G.M. (1976): *Time series analysis: Forecasting and control*, Holden Day Inc., Oakland.
- CHOI, E. & HALL, P. (1999): Nonparametric approach to analysis of space-time data on earthquake occurrences, *Journal of Computational and Graphics Statistics*, **8, 4**, pp. 733-738.
- ESTÉVEZ, G. (2001): Estimación Tipo Núcleo de la Función de Razón de Fallo bajo Condiciones de Dependencia, Tesis Doctoral, Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Santiago de Compostela.
- MARTÍN, M.A., MORÁN, M. y REYES, M. (1995): *Iniciación al caos*, Síntesis, Madrid.
- PACKARD, N.H., CRUTCHFIELD, J.P., FARMER, J.D. & SHAW, R.S. (1980):\*\*\*\*\*, *Physic Review Letters*, **45**.
- RUELLE, D. (1989): *Chaotic Evolution and Strange Attractors*, Cambridge University Press, Cambridge.
- RUELLE, D. & ISOLA, S. (1990): *Chaotic evolution and strange attractors: the statistical analysis of time series for deterministic nonlinear systems*, Cambridge University Press, Cambridge.
- RUELLE, D. (ed.) (1995): *Turbulence, strange attractors and chaos*, World Scientific, Singapore.
- STEWART, I. (1991): *¿Juega Dios a los dados?*, Grijalbo Mondadori, Barcelona.
- WAND, M.P. & JONES, M.C. (1995): *Kernel Smoothing*, Chapman & Hall.
- WANDAELE, W. (1983): *Applied time series and Box-Jenkins models*, Academic Press, New York.