

La relación magnitud-frecuencia para los estudios de riesgo sísmico en Andalucía

JOSÉ LUIS DE JUSTO ALPAÑÉS (*); RAUL CARRASCO ROMERO (**); ANTONIO JESÚS MARTÍN MARTÍN (***)

RESUMEN Un procedimiento habitual en los estudios de riesgo sísmico es asociar los epicentros de los terremotos no a fallas concretas, sino a zonas en las que se generan terremotos de características comunes. Estas zonas se denominan zonas sismogénicas, y en ellas el proceso de generación de sismos es espacial y temporalmente homogéneo. Se han considerado diecisiete zonas sismogénicas que pueden afectar a Andalucía, asociadas a las principales estructuras sismotectónicas del área Ibero-Magrebí. La distribución del tamaño de los terremotos en cada zona sismogénica se ha analizado mediante el ajuste estadístico de dos leyes magnitud-frecuencia: una ley log-lineal y otra log-cuadrática. Se observa que, en general, la ley cuadrática se ajusta mejor a los datos, si bien existen zonas en las que la distribución magnitud-frecuencia presenta una tendencia claramente lineal.

THE MAGNITUDE-FREQUENCY RELATIONSHIP OF ANDALUSIAN REGION

ABSTRACT *An usual procedure in seismic hazard studies is to associate the potential sources of earthquakes with relatively broad zones, called seismogenetic zones, with homogeneous seismic and tectonic characteristics. The process of tremors generation is, in each zone, homogeneous in space and time. Seventeen zones are supposed to affect the Andalusian region, associated with the main tectonic structures of the Ibero-Maghrebian region. Both log-linear and log-quadratic magnitude-frequency laws have been considered. This last relationship has usually a better fit with the magnitude data, although in some zones a linear relationship is clearly established.*

Palabras clave: Zona sismogénica; Relación magnitud-frecuencia; Gutenberg-Richter, Riesgo sísmico; Andalucía; Periodo de recuerdo.

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la teoría de la tectónica de placas, los movimientos y deformaciones de la corteza terrestre tienen lugar en los límites entre placas litosféricas, donde se forman dorsales oceánicas, zonas de subducción y fallas de transformación. Los grandes terremotos se generan como consecuencia de los desplazamientos relativos en las zonas de subducción, zonas de colisión de placas y fallas de transformación, por lo que deberían producirse a lo largo de límites entre placas bien definidos.

Sin embargo, la dinámica de la corteza terrestre es más complicada, y está asociada generalmente a zonas de deformación mucho más amplias que los estrictos límites entre placas. Existen además áreas intraplaca con una elevada actividad sísmica, y en las que sin embargo las estructuras tectónicas no son bien conocidas, por lo que resulta difícil co-

relacionar los epicentros de terremotos con las fallas que los han generado.

En el sur de la península Ibérica, se han registrado algunos terremotos recientes cuyos epicentros se conocen con gran precisión, habiéndose identificado también la falla que los originó. Es el caso del terremoto de Lorca de 6 de junio de 1977, asociado a la falla de Alhama de Murcia, que da una solución para el mecanismo focal que corresponde a una falla normal con rumbo NE-SO (Mezcua *et al.*, 1980). En cambio, la localización de los terremotos históricos tiene asociada siempre un alto grado de incertidumbre, pues generalmente se les asigna como epicentro el núcleo de población donde, según las crónicas de la época, se sintió con mayor intensidad. Así, el terremoto de 1 de noviembre de 1755 es conocido como terremoto de Lisboa, ya que fue en esta ciudad donde se produjeron los mayores daños, y donde se ha localizado el epicentro durante mucho tiempo, si bien actualmente no hay duda sobre la localización de este sismo en la falla Azores-Gibraltar, probablemente en su extremo oriental (Udías *et al.*, 1976; Elmrabet *et al.*, 1991). Incluso muchos de los terremotos ocurridos ya en el periodo instrumental tienen en los catálogos sísmicos una localización poco precisa.

Parece claro que si no podemos situar de manera precisa la mayoría de los terremotos catalogados, más difícil resulta

(*) Catedrático del Área de Ingeniería del Terreno.

(**) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Mecánica de Medios Continuos, Teoría de Estructuras e Ingeniería del Terreno. Universidad de Sevilla.

(***) Instituto Geográfico Nacional. Sevilla.

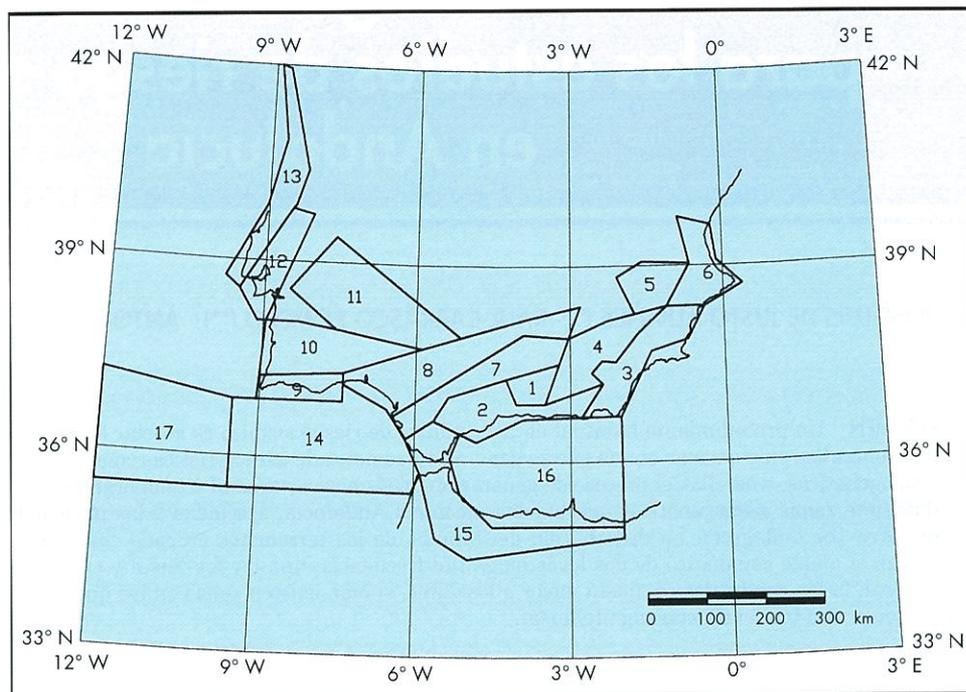


FIGURA 1. Zonas sísmogenéticas de Andalucía (Martín, 1984).

aún asociarlos al movimiento de una falla en concreto, máxime cuando ni éstas son, en la mayoría de los casos, bien conocidas.

Un procedimiento seguido con frecuencia en los estudios de riesgo sísmico es asociar los epicentros no a fallas concretas, sino a zonas más o menos amplias en las que se generan terremotos de características comunes. Estas zonas se denominan zonas sísmogenéticas, y son áreas donde se originan terremotos y que poseen además unas características sísmicas y tectónicas homogéneas; es decir, que el proceso de generación y recurrencia de sismos es en ellas espacial y temporalmente homogéneo. Desde el punto de vista tectónico, las zonas sísmogenéticas pueden estar constituidas por una o varias estructuras tectónicas. Consecuentemente, la determinación de su geometría deberá basarse en las correlaciones entre los datos tectónicos y sísmicos.

2. ZONAS SISMOGENÉTICAS DE ANDALUCÍA

En este estudio, adoptaremos las zonas sísmogenéticas establecidas por Martín (1984). Estas zonas han sido determinadas mediante la consideración sistemática de una serie de datos geológicos y geofísicos: mapas tectónicos, geológicos, sismoestructurales, de epicentros de terremotos, de isosistas máximas sentidas, de dirección de isosistas, de anomalías gravimétricas, etc.

En la zona en estudio, se distinguen un total de 17 zonas sísmogenéticas (figura 1), quedando el resto como zona asísmica, donde no se generan terremotos. Las principales unidades tectónicas englobadas por cada zona sísmogenética se recogen en la tabla 1.

3. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN SÍSMICA

La información sísmica en cuanto a España se refiere está condensada en el Banco de Datos Sismológicos del Instituto Geográfico Nacional y en el Catálogo General de Isosistas, editado por este mismo Instituto (Mezcua, 1982).

España es un país que cuenta con referencias históricas de terremotos que se remontan a casi dos mil años, si bien los datos de magnitud, base de este estudio, se restringen a la época instrumental, que abarca sólo parte de este siglo.

Desde el punto de vista del cálculo de la peligrosidad en los estudios de riesgo sísmico, tiene especial importancia que el catálogo esté completo, así como la fiabilidad de los datos, pues se comprueba que conforme nos remontamos en el tiempo se va careciendo de información sobre valores de magnitud cada vez mayores. El aumento del número de estaciones sismológicas en las últimas décadas se ha traducido en un aumento del número de terremotos registrados, y en una determinación más fiable de su magnitud y localización.

Dada la heterogeneidad de la información sísmica a lo largo del periodo instrumental, el primer paso realizado es la determinación, para toda el área en estudio, del año de completitud del catálogo sísmico, definido éste como el año a partir del cual se admite que todos los terremotos ocurridos han sido registrados y catalogados con su correspondiente magnitud.

El procedimiento seguido consiste en representar, para cada valor de magnitud, en abscisas el periodo de tiempo en estudio, y en ordenadas la tasa anual acumulada de terremotos. En la figura 2 se representa la curva correspondiente a los terremotos de magnitud mayor o igual a 3.5. Se observa que la pendiente de la curva, que representa la tasa anual de ocurrencia de terremotos, es inicialmente constante, comenzando luego a disminuir hasta hacerse prácticamente nula. Si admitimos la ocurrencia poissoniana de la magnitud, la tasa anual media de ocurrencia de sismos debe ser igual en cualquier periodo de tiempo, por lo que la disminución de dicha tasa durante los primeros años del periodo instrumental significa que el catálogo sísmico no está completo, debido al menor número de estaciones sismológicas que operaban en aquel momento. El

ZONA	PRINCIPALES UNIDADES TECTÓNICAS
1	Abarca ampliamente la depresión de Granada, que es un área de sismicidad muy elevada. En ella hay cartografiadas varias fallas, muy próximas unas de otras, no pudiendo hablarse de que cada una de ellas constituya una única estructura sismogénica.
2	Zona meridional de la región Bética, desde su contacto con la unidad tectónica del Campo de Gibraltar hasta el Campo de Dalías. Incluye también no obstante el área de mayor sismicidad relativa de la citada unidad del Campo de Gibraltar (Sierra de Grazalema) y parte de la unidad subbética.
3	Parte oriental de la unidad Bética, desde su límite meridional con el Mar de Alborán hasta aproximadamente el de las unidades Béticas y Prebética. Es una estrecha franja alargada en el sentido NE-SW, que coincide con el predominante de las estructuras de la zona.
4	Cuenca cuaternaria de Guadix-Baza y resto de la unidad tectónica Bética no incluida en las zonas anteriormente descritas.
5	Zona de transición entre el área de sismicidad relativamente elevada de las Béticas y la de muy baja sismicidad al norte de la zona considerada.
6	Abarca el área más oriental de la unidad Prebética y la mayor parte de la Depresión de Valencia.
7	Práctica totalidad de la unidad Subbética, excepción hecha de las áreas anexas a la zona 2.
8	Cuenca terciaria de la Depresión del Guadalquivir.
9	Orla meridional portuguesa.
10	Tectónicamente se corresponde con la unidad Surportuguesa.
11	Se corresponde en gran parte con la unidad tectónica de Ossa Morena.
12	Se identifica con parte de la Cuenca del Bajo Tajo, incluyendo la falla de Bacía del Tajo.
13	Unidad tectónica de la Orla Occidental Portuguesa.
14	Falla Azores-Gibraltar.
15	Corresponde al área menos sísmica del Campo de Gibraltar, a la zona del Estrecho y al área del Norte de Marruecos.
16	Zona del mar de Alborán, entre el Estrecho y el meridiano 2° W.
17	Falla Azores-Gibraltar.

TABLA 1. Principales unidades tectónicas de las zonas sismogénicas de Andalucía (Martín, 1984).

año hasta el cual la pendiente de la curva se mantiene constante se adopta como año de plenitud del catálogo, y el periodo correspondiente se denomina *periodo de recuerdo*.

Siguiendo el procedimiento descrito, se ha determinado el año de plenitud del catálogo sísmico en el rango de magnitudes comprendido entre 2.5 y 5.0 (tabla 2).

4. RELACIÓN MAGNITUD-FRECUENCIA DE OCURRENCIA DE SISMOS

La ley más ampliamente aceptada para correlacionar la frecuencia de ocurrencia de sismos con su magnitud es la ley logarítmico lineal (Ishimoto *et al.*, 1939; Gutenberg *et al.*, 1954):

$$\log N(M) = a - b M$$

siendo $N(M)$ la tasa anual de terremotos de magnitud mayor o igual que M . Los parámetros a y b se determinan ajustando los datos de cada zona sismogénica mediante mínimos cuadrados.

Otros investigadores han sugerido que la ley lineal debería ser sustituida por una ley cuadrática de la forma:

$$\log N(M) = a + b_1 M + b_2 M^2$$

puesto que la ley lineal, si no es truncada superiormente, tiende a sobrestimar la ocurrencia de grandes terremotos

MAGNITUD	AÑO
$M \geq 2,5$	1977
$M \geq 3,0$	1977
$M \geq 3,5$	1963
$M \geq 4,0$	1951
$M \geq 4,5$	1945
$M \geq 5,0$	1916

TABLA 2. Año de plenitud del catálogo sísmico para cada magnitud.

(Merz *et al.*, 1973). Por otro lado, si se establece un límite superior de magnitud para la ley lineal, la forma discontinua que ésta adopta no refleja la situación real de ocurrencia de sismos.

5. APLICACIÓN A LAS ZONAS SISMOGÉNICAS DE ANDALUCÍA

Para cada zona sismogénica, la tasa anual de ocurrencia de sismos mayores o iguales a cada valor de magnitud se ha calculado considerando únicamente los terremotos ocurri-

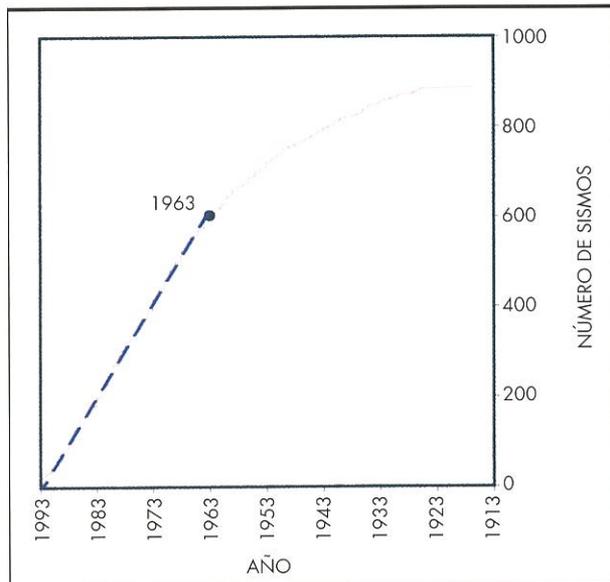


FIGURA 2, Determinación del año de plenitud del catálogo sísmico para magnitudes mayores o iguales a 3,5.

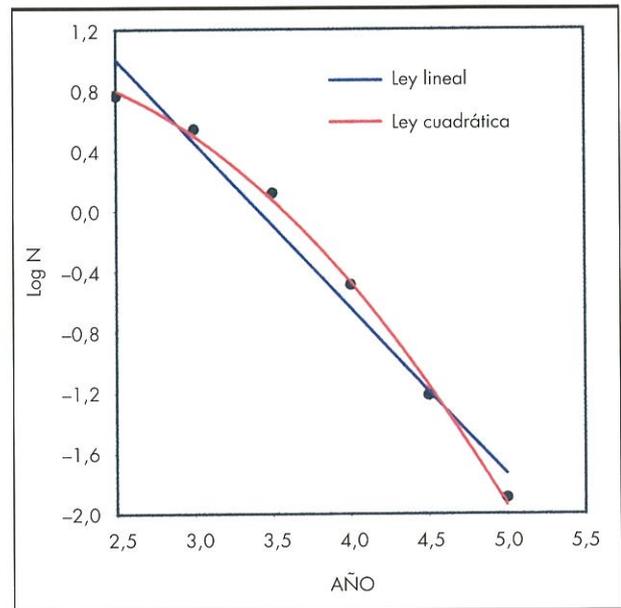


FIGURA 3, Relación Magnitud-Frecuencia en la zona sísmogénica 15.

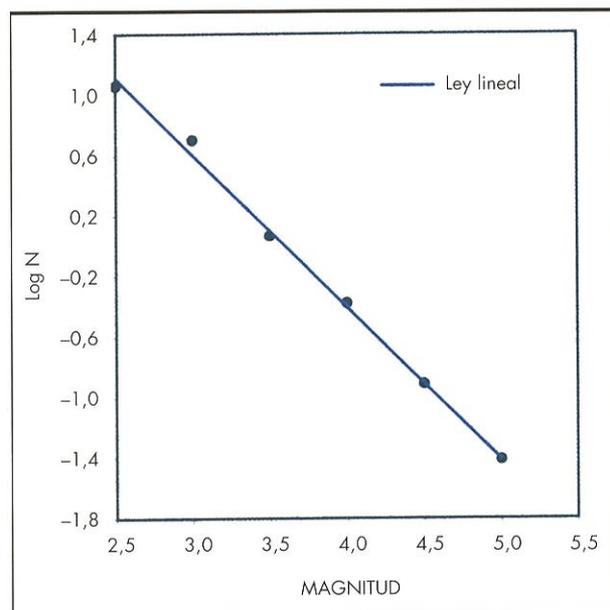


FIGURA 4, Relación Magnitud-Frecuencia en la zona sísmogénica 1.

dos con posterioridad al año de plenitud del catálogo. No se han incluido tampoco los terremotos premonitores ni las réplicas. Se ha tomado como límite inferior de magnitud el valor 2.5.

En la tabla 3 se recogen los resultados obtenidos. La razón entre la tasa anual de ocurrencia de terremotos de magnitud mayor o igual al límite inferior y el área de la zona sísmogénica, da una idea de la mayor o menor actividad sísmica de la misma. La relación así definida representa la tasa anual de terremotos por unidad de superficie, y es por tanto independiente del tamaño de los terremotos.

La mayor sismicidad del área en estudio se concentra en la región Bética. Dentro de ella, son las zonas situadas más al oeste (zonas 1, 2, 7 y 8) las que presentan un mayor número de terremotos por unidad de área. Las zonas más orientales presentan menor actividad sísmica, excepción hecha a la zona 3, donde se localiza el sistema de fallas Carboneras-Palomares-Alhama de Murcia, de gran actividad sísmica. Por contra, son las zonas de la región portuguesa (zonas 9, 10, 11, 12 y 13) las que presentan una menor sismicidad. La falla Azores-Gibraltar, si bien es sabido que ha originado en el pasado terremotos de gran intensidad, no presenta en cambio una elevada tasa de ocurrencia de sismos.

La constante b obtenida del ajuste de ley lineal define la distribución del tamaño de los terremotos. Un valor alto de b indica que la frecuencia de ocurrencia de terremotos en la fuente decrece rápidamente al considerar magnitudes altas, mientras que un valor bajo es indicativo de una menor diferencia en el número relativo de terremotos grandes y pequeños.

Se observa que existe una cierta correlación entre el valor de b y la tasa anual de ocurrencia de sismos por unidad de superficie. En general, las zonas sísmogénicas enmarcadas en la región Bética, de mayor sismicidad relativa, son también las que presentan mayores valores de b , mientras que las zonas inscritas en la región portuguesa, menos activas, presentan valores más bajos. El valor medio es de 0.91; según Kasahara (1981), el valor 0.9 es el más común en todo el mundo.

En la tabla 3 se muestran también los coeficientes b_1 y b_2 obtenidos del ajuste de la ley cuadrática. En las zonas sísmogénicas implicadas en el movimiento relativo de las placas Euroasiática y Africana (zonas 14 y 17 de la falla Azores-Gibraltar, zona 15 del norte de Marruecos y zona 16 del mar de Alborán), la distribución magnitud-frecuencia se ajusta más a la ley cuadrática. En cambio, las zonas situadas en la región Bética presentan normalmente mayor linealidad. Una situación intermedia muestran las zonas de la región portuguesa.

ZSG	Tasa $M \geq 2,5$	Área (km ²)	Tasa	log N = a - b M		log N = a - b ₁ M + b ₂ M ²		
			Área (km ²)	a	b	a	b ₁	b ₂
1	11,471	3.856	2,97E-03	3,639	1,009	3,338	-0,840	-0,023
2	9,588	13.882	6,91E-04	3,873	1,109	3,002	-0,62	-0,065
3	10,529	13.219	7,97E-04	3,750	1,064	3,017	-0,651	-0,055
4	3,118	12.009	2,60E-04	2,925	0,936	0,863	0,292	-0,176
5	1,471	7.058	2,08E-04	2,007	0,745	0,905	-0,008	-0,113
6	3,118	9.711	3,21E-04	2,915	0,951	2,825	-0,898	-0,008
7	8,059	13.996	5,76E-04	3,509	1,015	2,861	-0,650	-0,049
8	18,294	22.158	8,26E-04	4,207	1,087	0,983	0,727	-0,242
9	0,706	6.467	1,09E-04	1,949	0,767	0,286	0,168	-0,125
10	0,588	16.800	3,50E-05	1,218	0,564	-0,460	0,436	-0,143
11	2,294	25.635	8,95E-05	2,775	0,936	1,982	-0,433	-0,077
12	0,588	9.810	5,99E-05	1,745	0,724	-5,414	3,816	0,698
13	1,118	13.141	8,51E-05	1,834	0,657	-0,933	0,992	-0,236
14	10,000	46.490	2,15E-04	3,549	0,928	-0,176	1,168	-0,279
15	3,471	24.575	1,41E-04	3,738	1,093	0,386	0,793	-0,251
16	13,000	48.809	2,66E-04	3,547	0,898	1,178	0,435	-0,178
17	6,471	39.079	1,66E-04	3,346	0,904	0,425	1,217	-0,283

TABLA 3. Tasa de ocurrencia de sismos y leyes Magnitud-Frecuencia.

En la figura 3 se representa la distribución magnitud-frecuencia correspondiente a la zona 15, situada sobre la falla Azores-Gibraltar. Se observa que la ley cuadrática proporciona un mejor ajuste en todo el rango de magnitudes. La figura 4 corresponde a la depresión de Granada (zona 1), donde la ley magnitud-frecuencia es ahora marcadamente lineal.

En general, la ley cuadrática consigue un mejor ajuste a los datos, si bien existen zonas sismogénicas en las que la distribución magnitud-frecuencia muestra una tendencia claramente lineal.

REFERENCIAS

ELMRABET, T.; A. LEVRET; M. RAMDANI y B. TADILI (1991). "Historical Seismicity in Morocco: Methodological Aspects and Cases of Multidisciplinary Evaluation". Seismicity, Seismotectonics and Seismic Risk of the Ibero-Maghrebian Region. I.G.N. Madrid. Monografía nº 8.

GUTENBERG, B. y C. F. RICHTER (1944). "Frequency of earthquake in California". Bull. Seism. Soc. Am., 34:185-188.

ISHIMOTO, M. y K. IIDA (1939). "Observation sur les séismes enregistrés par le microsismographe construit dernièrement (1)". Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ., 17:443-478.

KASAHARA, K. (1981). "Earthquake Mechanics". Cambridge University Press.

MARTIN, A. J. (1984). "Riesgo Sísmico en la Península Ibérica". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.

MERZ, H. A. y CORNELL, C. A. (1973). "Seismic Risk Analysis Based on a Quadratic Magnitud-Frequency Law". Bull. Seism. Soc. Am., vol. 63, nº 6, pp 1999-2006.

MEZCUA, J.; A. UDIAS y A. LOPEZ ARROYO (1980). "Seismotectonics results relative to the Iberian Peninsula". Evolution and tectonics of the Western Mediterranean and surrounding areas. Viena. Publicación Especial I.O.N. nº 201.

MEZCUA, J. (1982). "Catálogo General de Isosistas de la Península Ibérica". I.G.N. Madrid. Publicación nº 202.

UDIAS, A.; A. LOPEZ ARROYO y J. MEZCUA (1976). "Seismotectonic of the Azores-Alboran Region". Tectonophysics, 31:259-289.