

11. *Problemas relacionados con la evaluación de la peligrosidad sísmica en España*

ANTONIO JESÚS MARTÍN MARTÍN

Instituto Geográfico Nacional, Sevilla

1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS

Aunque existen numerosas definiciones en la literatura especializada, podemos definir la peligrosidad sísmica en un punto como la probabilidad, en términos no siempre estrictamente matemáticos, de que en un determinado espacio de tiempo, y como consecuencia de la sismicidad, se supere en dicho punto una intensidad macrosísmica dada o un determinado nivel de movimiento del terreno.

Su evaluación lleva aparejada una serie de problemas, unos ligados al estado del conocimiento sobre los datos de partida y la metodología seguida, y otros inherentes al método empleado, consecuencia de sus hipótesis y limitaciones, así como de las simplificaciones efectuadas. La aplicación de estos métodos a un territorio concreto, en nuestro caso a España, implica tomar una serie de decisiones sobre las diferentes alternativas que para la solución de estos problemas se plantean en cada fase del estudio.

El objetivo de esta comunicación es precisamente ayudar en esta toma de decisiones a los técnicos responsables de la evaluación de la peligrosidad sísmica, mediante el análisis de los problemas, generales y específicos de nuestro país, que se presentan en las evaluaciones que se realizan de acuerdo con la metodología y técnicas más comunes.

El análisis se limitará estrictamente a las fases de los estudios de macrozonación sísmica que conducen a la definición de la peligrosidad (Fig. 1). Se prescindirá por tanto del estudio de los problemas específicos que acarrea la microzonación sísmica, así como de aquellos otros relacionados con los riesgos de deformaciones permanentes o con la transformación, si procede, de los parámetros en que se haya evaluado la peligrosidad

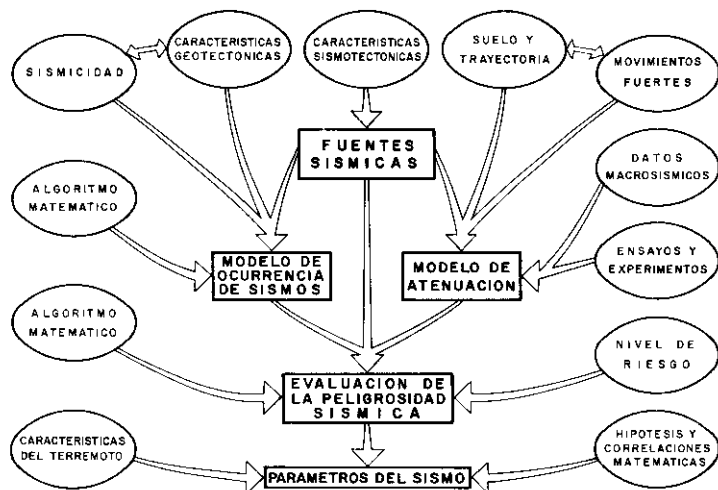


Figura 1.—Esquema de evaluación de la peligrosidad sísmica.

en aquellos a emplear en el cálculo sismoestructural (espectro, acelerograma de diseño, etc.).

2. TIPO DE ANÁLISIS Y PARAMETROS DE CÁLCULO: CONDICIONANTES

Dados los objetivos de los análisis de la peligrosidad sísmica, su parámetro de cálculo debe permitir establecer una correlación entre su valor y el daño que previsiblemente sufrirían las estructuras.

Aunque los usuarios del cálculo sismoestructural demandan cada vez más parámetros, tales como la historia temporal de la aceleración del suelo o velocidades espectrales, la realidad es que, salvo para el proyecto de estructuras de extraordinaria importancia, la peligrosidad sísmica se evalúa en función de la intensidad clásica (en la escala macrosísmica vigente en el país) o en función de un parámetro indicativo del movimiento del terreno, generalmente la aceleración horizontal máxima.

Pero ésta no constituye la única alternativa de cálculo en los estudios de macrozonación sísmica, sino que existen además otros factores como el método de cálculo (determinista o probabilista), la consideración de la existencia o no de zonas, provincias y estructuras sismogénicas o sismotectónicas, la distribución estadístico-matemática (en caso de análisis probabilista), el número y tipo de curvas de atenuación, el período de datos considerado, etc., que multiplican el número de opciones posibles. No obstante, existen también, por otra parte, diversos condicionantes que nos reducen el número de estas opciones. Entre estos condicionantes tenemos:

2.1. Objetivos del trabajo y normas existentes

El objetivo del trabajo condiciona el análisis modificando las exigencias en función de la importancia de la obra y de las consecuencias de la ruina de la misma, aspectos contemplados en las normas sismoresistentes. Así, los estudios paramétricos comparados son bastante frecuentes hoy día en España cuando se evalúa la peligrosidad sísmica en los emplazamientos de las grandes obras de ingeniería (presas, centrales térmicas, instalaciones radioactivas, etc.).

En cualquier caso las normas de construcción establecen unas prescripciones mínimas de sismoresistencia, generalmente susceptibles de modificación por el proyectista, previa justificación y bajo su responsabilidad. En España concretamente disponemos de la Norma de Construcción Sismoresistente PDS-1 (1974) (Comisión Permanente de Normas Sismoresistentes, 1974), de aplicación obligatoria en viviendas y edificaciones similares, y de una Instrucción de Grandes Presas que contienen algunos artículos sobre las exigencias mínimas para el proyecto sismoresistente. No existe en cambio norma específica para centrales nucleares, las cuales se vienen proyectando de acuerdo con las instrucciones del país de origen de la tecnología de la central.

2.2. Datos sísmicos y macrosísmicos disponibles

Desde el punto de vista del cálculo de la peligrosidad nos interesa especialmente la completitud del catálogo y la fiabilidad de sus datos, especialmente los de magnitud e intensidad. Nuestro país, de vieja historia, cuenta con referencias históricas de terremotos que se remontan a unos dos mil años, si bien de fiabilidad decreciente conforme nos remontamos en el tiempo. Esta información está condensada en cuanto a España se refiere en el Banco de Datos Sismológicos del Instituto Geográfico Nacional y en el Catálogo General de Isosistas editado por este mismo Instituto (Mezcua, 1982).

El primero de ellos, es decir, el Banco de Datos Sismológicos, constituye un compendium de los diversos catálogos (Udías y Muñoz, 1983) e investigaciones realizadas sobre sismicidad histórica. Las intensidades en él recogidas abarcan todo el período al que se extiende el catálogo, si bien la información previa al siglo XV es poco fiable e incompleta, incluso para los grandes terremotos.

De acuerdo con la relación de Gutenberg y Richter (Gutenberg y Richter, 1949), las intensidades o magnitudes de los terremotos ocurrido en una zona y el número de éstos que las superan están ligados por una relación lineal:

$$\log N = a - b \cdot I \quad [1]$$

o bien,

$$\log N' = a' - b'm \quad [2]$$

la realidad nos muestra que conforme nos remontamos en el tiempo se va careciendo de información sobre grados de intensidad (o valores de magnitud) cada vez mayores, lo que da lugar a una progresiva curvatura de la alineación de los puntos que definen las relaciones teóricas [1] y [2]. Por esta razón, algunos investigadores ponen en duda la linealidad de estas relaciones, estableciendo otras de tipo cuadrático que se ajustan mejor a la serie de datos. Por otro lado, existe una heterogeneidad en los valores y en la escala inicial de referencia de las intensidades, relacionada con la época y la historia demográfica de la zona. La consecuencia de todo ello es que en los cálculos probabilistas hay que aplicar a los valores de intensidad unos mecanismos de corrección y homogeneización.

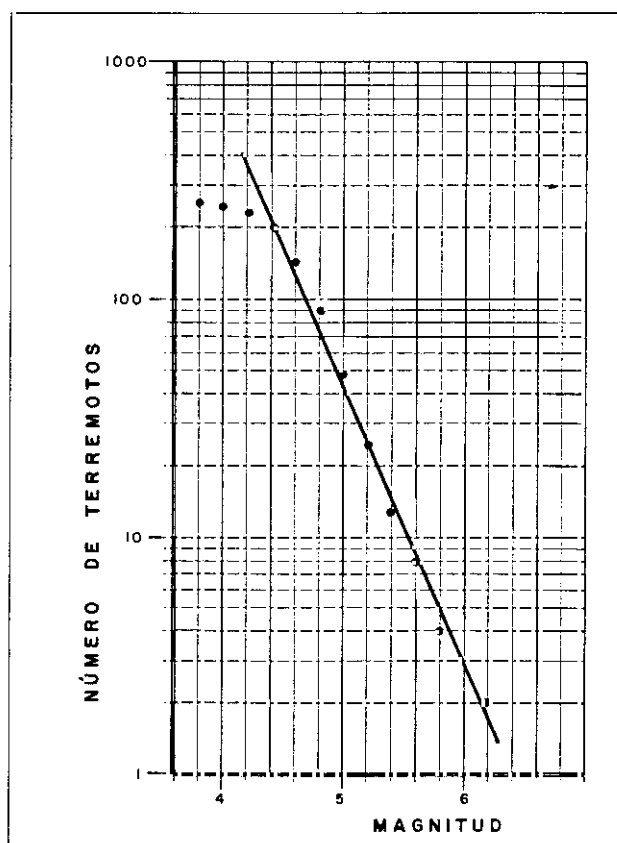


Figura 2.—Relación de Gutenberg y Richter (frecuencias acumuladas).

Los datos de la historia sísmica pueden determinar por otra parte la adopción de más de un terremoto de proyecto cuando quepa esperar la ocurrencia de terremotos significativos para el cálculo, provenientes de distintas fuentes sísmicas y con características muy diferentes (por ejemplo, en el caso de haber ocurrido terremotos destructores con epicentro en el campo próximo al emplazamiento en que evaluamos el riesgo) (Martín Martín y Blázquez, 1981). Es también el caso de lo que ocurre en nuestro país con los terremotos originados en la parte central de la falla Azores-Gibraltar, presumiblemente de atenuación muy lenta (Sierra y Martín Martín, 1983).

En cuanto a magnitudes, el Banco de Datos Sismológicos sólo contiene la información correspondiente a parte de este siglo, ya que se trata de una medida instrumental. De esta información, la de los últimos cincuenta y cinco años está reevaluada con criterios homogéneos. La diversidad de métodos de cálculo y tipos de magnitud (magnitud local o de Richter, M_L ; magnitud determinada a partir de las ondas superficiales, M_s , o a partir de las ondas internas, M_b , etc.), constituye uno de los problemas que plantea este parámetro cuando interviene en el cálculo de la peligrosidad, problema, por otra parte, frecuentemente ignorado.

Por lo que se refiere al Catálogo General de Isosistas, los principales problemas radican, por un lado, en el limitado número de mapas de isosistas (unos 260), y por otro, en la fiabilidad de la transformación a la escala $M. S. K.$ de muchos de estos mapas, elaborados originalmente en las más variadas escalas macrosísmicas. Esto último obliga a veces a recurrir a las fuentes bibliográficas originales de algún terremoto concreto o a investigar otras nuevas, cuando la importancia de la estructura a calcular lo justifica.

Otro problema ligado a los datos de partida es el área geográfica a estudiar, dependiente fundamentalmente de la importancia del cálculo, de la extensión de las zonas y estructuras sismogenéticas y sismotectónicas a considerar en su caso y de la atenuación de los terremotos en ellas generados. Aunque no se debe generalizar, para España (salvo que la obra a proyectar sea una central nuclear para las que está estipulado un radio de estudio de unos 320 km) es suficiente con considerar todos los terremotos originados en un radio de 100 a 150 km, así como los provenientes de la parte central de la falla Azores-Gibraltar.

Consecuentemente con todo lo expuesto y habida cuenta de la práctica carencia de datos de acelerogramas registrados en España, parece preferible para los niveles de riesgo empleados en el cálculo, evaluar la peligrosidad en intensidades, aun siendo conscientes de la limitación que supone el tratarse de un parámetro discreto medido sobre una escala empírica. La alternativa de ampliar el período de datos de magnitudes a partir de los valores de la intensidad mediante una correlación empírica, con objeto de evaluar la peligrosidad en aceleraciones, no parece subsanar a priori los inconvenientes apuntados del cálculo en intensidades.

2.3. Nivel de riesgo

Constituye un problema en el que inciden criterios técnicos, sociales, políticos y económicos, siendo la sociedad, a través generalmente de sus responsables políticos, quien debe adoptar la última decisión. Esta no debe recaer en el proyectista, a quien, sin embargo, le corresponderá la elaboración del informe y juicio técnico, acorde con la importancia y el uso al que se destina la(s) estructura(s) a calcular. Otro tema es que los diferentes colectivos de la sociedad implicados (constructores, usuarios y afectados), convertidos a veces en verdaderos grupos de presión, acepten la decisión adoptada, que en los casos más frecuentes se plasmará en las diversas normas de construcción sismoresistente, tal como ocurre en España.

En cualquier caso, hay que tener mucho cuidado con la aplicación de valores obtenidos para períodos de retorno (sensiblemente el inverso de la probabilidad anual de presentación), superiores al período de datos disponibles. Si así ocurriera, habría que recurrir para evaluar la peligrosidad a otro tipo de información geológica y geofísica, así como a otros métodos. De ahí también la importancia de considerar el período de datos más amplio posible.

2.4. Escala de trabajo

Dada la incertidumbre de los parámetros involucrados, los análisis de macrozonación sísmica se corresponden con una escala pequeña de trabajo, independientemente de que se trate del cálculo de la peligrosidad en un único emplazamiento o en una retícula de puntos recubriendo una región. De esta forma, los trabajos cartográficos se realizan comúnmente sobre mapas a escalas 1/200.000 y menores.

Estudios de detalle de microzonación sísmica exigen una escala de trabajo mucho mayor, e implican una problemática específica cuyo análisis se sale del ámbito de este trabajo.

2.5. Posibilidad de obtener los parámetros intermedios necesarios para el cálculo

Condicionan sin duda el tipo de análisis y el parámetro de cálculo. Una solución, ampliamente adoptada, muchas veces necesaria, pero que exige las debidas precauciones, consiste en asumir parámetros (curvas de atenuación, espectros, etc.) obtenidos para regiones o países diferentes a aquellos en que evaluamos la peligrosidad, España en nuestro caso.

En los apartados siguientes se analizarán los problemas que lleva aparejados en el caso español la obtención de estos parámetros.

2.6. Otros condicionantes

Podemos citar entre ellos el método de cálculo estructural y las limitaciones económicas, importantes pero sobre los que no se hará hincapié por no corresponder exactamente al proceso de evaluación de la peligrosidad.

En los apartados siguientes se analizan los problemas más comunes que ocasiona la evaluación de la peligrosidad sísmica diferenciando separadamente los relacionados con el modelo de ocurrencia de terremotos, con la atenuación y con la zonificación en su caso.

3. PROBLEMAS RELACIONADOS CON EL METODO DE EVALUACION Y EL MODELO DE OCURRENCIA DE LOS TERREMOTOS

Existen dos grandes métodos de evaluación de la peligrosidad sísmica: el probabilista y el determinista, ligados respectivamente a la consideración del fenómeno sísmico como un proceso, probabilista o determinista. A su vez, tanto en la evaluación por el método probabilista como el determinista puede considerarse la existencia o no de zonas (o estructuras) sismogénicas o provincias (o estructuras) sismotectónicas, respectivamente. Tal como veremos, lo común es considerar los procesos estacionarios.

La aplicación a cualquier región del Globo, y a España en particular, de cada uno de estos métodos implica una serie de problemas derivados de la adecuación de los datos disponibles a sus hipótesis básicas. Así, el primer problema que surge, común a ambos métodos, es el de la estacionariedad de la sismicidad.

La sismicidad, consecuencia del juego de los procesos de la tectónica global, obviamente no es estacionaria. Aunque la tendencia es hacia la adopción de modelos dependientes del tiempo que parten del proceso físico, se acepta no obstante dicha estacionariedad cuando se trata de terremotos de tamaño relativamente grande generados en áreas y períodos de tiempo no muy extensos. La duda surge cuando se extrapolan los resultados obtenidos a períodos de tiempo muy grandes, como ocurre por ejemplo cuando se pretende asegurar la sismoresistencia de instalaciones como las radioactivas que almacenan isótopos de larga vida media.

El problema en España no difiere del existente en el resto del mundo. Tan sólo cabría reseñar que, por tratarse de un país de sismicidad moderadamente alta, los umbrales mínimos de tamaño de terremotos a considerar en algunos cálculos probabilistas han de ser a la fuerza relativamente bajos con objeto de que el tamaño de la muestra sea el adecuado. Este mismo problema incide en la extensión de las zonas sismogénicas, cuestión que se analizará más adelante.

3.1. Problemas específicos del método determinista

La hipótesis del método determinista implica que la ocurrencia de terremotos en el futuro será similar a la historia de lo ocurrido hasta hoy, es decir, que en el futuro no se van a producir terremotos cuyo efecto en el emplazamiento sobrepase el de los ya observados. Implícitamente se supone también que la sismicidad es estacionaria en el tiempo.

Para su aplicación, será pues esencial que el intervalo de datos catalogados sea «completo», en cuanto que incluya los terremotos más grandes esperables en la zona de influencia sobre el emplazamiento, y que la asignación de los correspondientes parámetros, en particular la intensidad máxima, sea correcta. Por ello, la aplicación de los métodos deterministas a la evaluación del riesgo sísmico se ha ceñido casi exclusivamente al cálculo en intensidades. Cualquier otro parámetro que se considere (magnitud, aceleración, etc.), e incluso la propia intensidad en los países de corta historia sísmica, nos llevará a la consideración de periodos de datos muy cortos, lo que invalidaría la hipótesis fundamental del método.

Si no consideramos la existencia de provincias y/o estructuras sismotectónicas, la peligrosidad sísmica en cada punto vendrá definida por la intensidad máxima sentida en el mismo. Si cartografiamos los valores obtenidos para una región, obtendremos un mapa de intensidades máximas observadas (Fig. 3). No obstante, lo normal es considerar la existencia de provincias y estructuras sismotectónicas, aplicándose el método determinista zonificado casi exclusivamente, al cálculo de la peligrosidad en emplazamientos singulares, ubicación de grandes obras de ingeniería civil, sobre todo centrales nucleares.

En efecto, para el cálculo de la peligrosidad sísmica en estas centrales se ha desarrollado una metodología específica, fundamentada en la filosofía del «riesgo cero», que conduce mediante un análisis determinista zonificado a la obtención de un valor muy conservador, que se asocia al máximo terremoto previsible en el emplazamiento.

En España se han realizado diferentes estudios deterministas, tanto zonificados (véase referencias en Martín Martín, 1983) como no zonificados, que conjuntamente recubren en cuanto a área estudiada toda la Península. Los principales problemas planteados han sido: por un lado, los ya apuntados sobre la necesidad de investigar la sismicidad histórica y reevaluar la intensidad de los sismos más significativos con objeto de que se cumpla la hipótesis fundamental del método, y por otro, los derivados del proceso de cálculo seguido, en especial los relacionados con la definición de la geometría de las provincias y estructuras sismotectónicas, con la asignación de los terremotos a éstas y con la determinación de la curva de atenuación, problemas todos ellos que se analizarán en los próximos apartados.

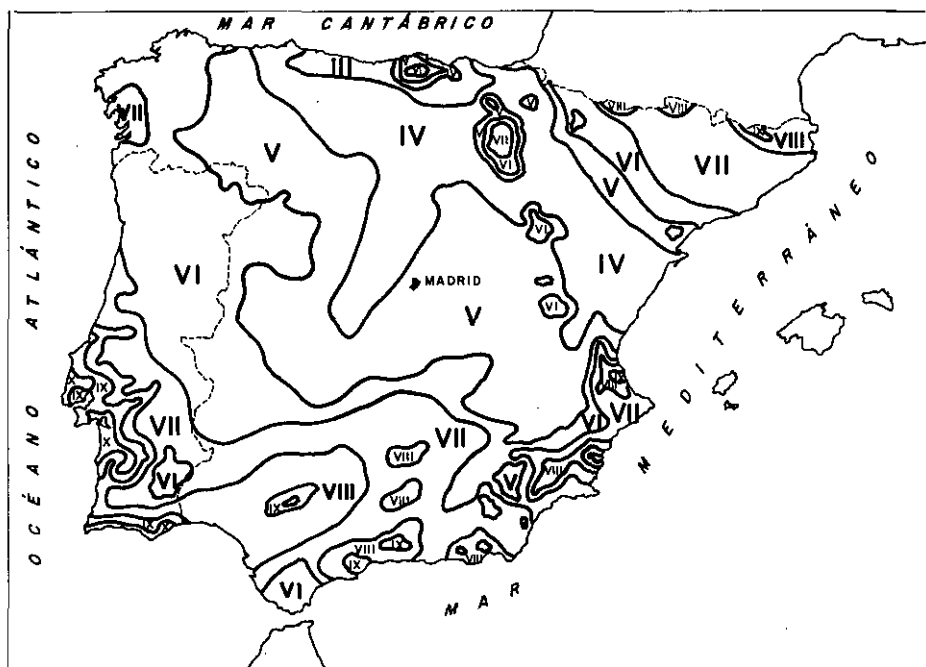


Figura 3. Intensidades máximas sentidas, 1380-1980 (Martin Martin, 1983).

3.2. Problemas específicos del método probabilista

Los métodos probabilistas consideran la sismicidad como un proceso estocástico cuyo tratamiento requiere la utilización de técnicas estadísticas. Dado que no conocemos todos los terremotos acaecidos, habremos de modelar la ocurrencia de sismos en el tiempo y el espacio. Lo usual, salvo en algunos estudios singulares muy complejos, es recurrir a modelos paramétricos, en los que la sismicidad se representa por un pequeño número de parámetros comparado con el número de terremotos.

La hipótesis fundamental de los métodos probabilistas consiste en que la información sísmica manejada es suficiente para deducir las leyes estadísticas a las que se ajusta el fenómeno sísmico. No obstante, hay que tener en cuenta que los modelos probabilísticos, por sí mismos, no incrementan nuestra información, como mucho nos ayudan a organizar de forma útil nuestro conocimiento (Cornell, 1986). En cualquier caso, presentan la ventaja sobre los deterministas de poder obtener la probabilidad asociada a cada nivel de riesgo (Fig. 4), pudiéndose aplicar fácilmente, además, a la evaluación de la peligrosidad sísmica en áreas más o menos extensas, cuyos resultados son posteriormente cartografiados (Fig. 5).

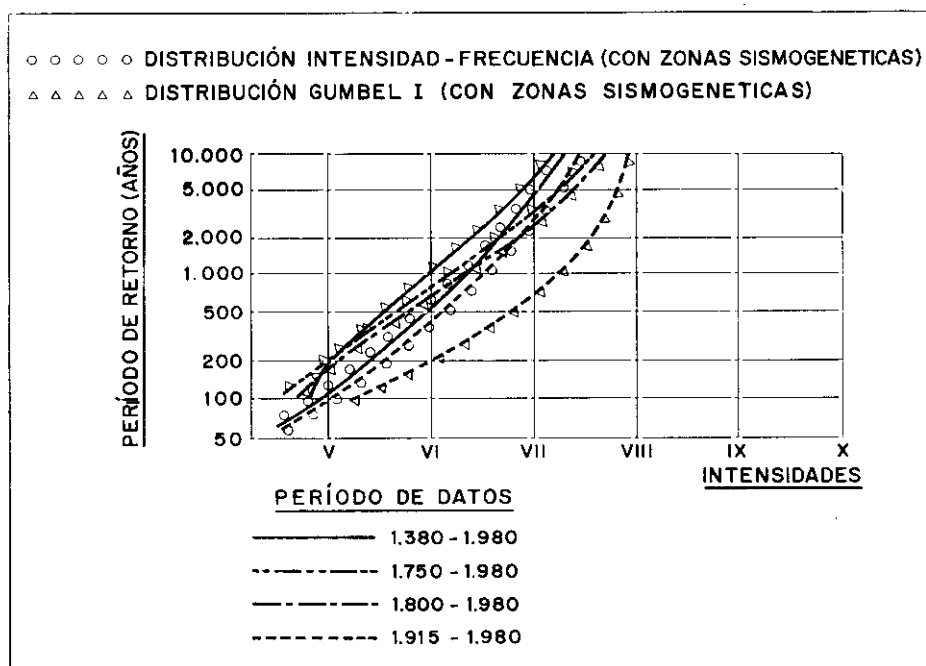


Figura 4. Riesgo sísmico en Barcelona (Martín Martín, 1983).

En general, habremos de establecer unas relaciones de recurrencia entre las localizaciones, el tamaño y la frecuencia de ocurrencia de los terremotos. Aunque existen numerosos tipos de modelos probabilistas, dependientes o independientes del tiempo, estas relaciones son de tipo exponencial en la práctica totalidad de los modelos que se emplean con generalidad, los cuales adoptan además la hipótesis de la ocurrencia poissoniana de los terremotos y por ende, la de sus estacionariedad en el tiempo.

Cuando se acepta la existencia de zonas o estructuras sísmogenéticas, el modelo más utilizado se basa en una distribución del tamaño (intensidad o magnitud) de los terremotos definida por la relación [1] o [2] de Gutenberg y Richter, modificadas por truncamiento al adoptarse para cada zona o estructura un límite máximo de intensidad o magnitud, dato este último de gran importancia, pero no de tanta como el análogo del método determinista.

En cambio, cuando en la evaluación de la peligrosidad se prescinde de la existencia de zonas y estructuras sísmogenéticas se emplean sobre todo los modelos basados en la distribución de valores extremos que, además de presuponer pocas hipótesis, presentan la ventaja de que los valores extremos (máximos en este caso) de una variable estadística son más homogéneos, mejor conocidos y de determinación más precisa que el suceso

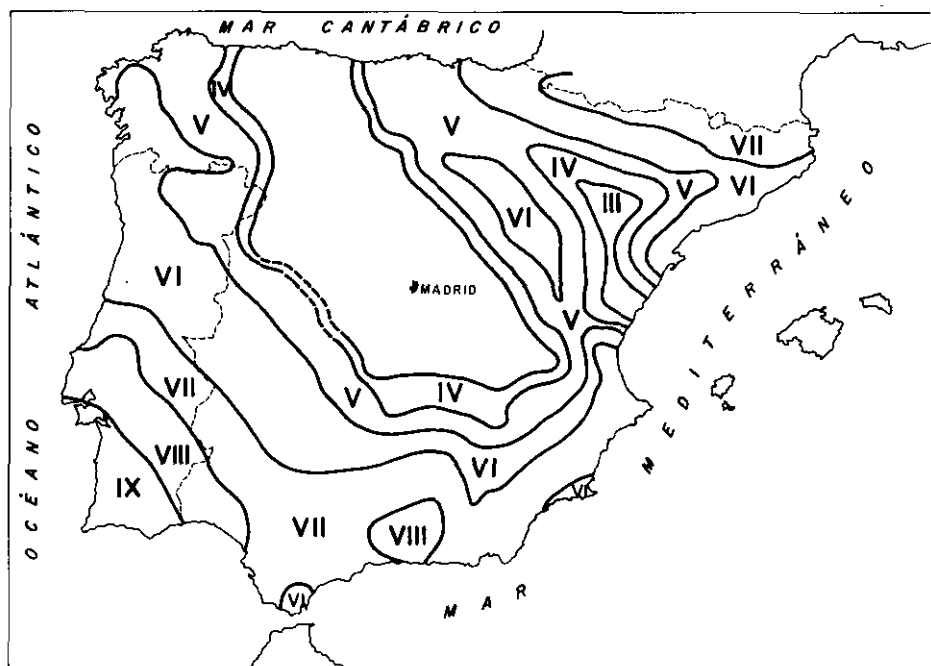


Figura 5.—Intensidades con probabilidad $P \geq 0,001$. Basada en la distribución intensidad-frecuencia; período de datos 1380-1980 (Martín Martín, 1983).

medio de una serie de datos. Además, no es necesario el conocimiento detallado de la función de probabilidad de la variable, sino tan sólo el comportamiento de la distribución en su cola superior (Lomnitz, 1974). Comparado con el modelo basado en la relación de Gutenberg y Richter presenta en cambio el inconveniente de ignorar mucha información.

La aplicación de los modelos probabilistas de la sismicidad presenta los problemas generales inherentes a las hipótesis específicas del método, relacionados fundamentalmente con datos disponibles, que para nuestro país se particularizan en el contenido en cuanto a completitud y calidad del Catálogo Sísmico (Mezcua y Martínez Solares, 1983).

De acuerdo con el proceso físico de la generación de los terremotos, éstos no son independientes, y por consiguiente su ocurrencia no es poissoniana. Sin embargo, la hipótesis es aceptable en el caso de España si consideramos únicamente los terremotos de tamaño superior a un umbral dado (modelos del gran terremoto) y se adopta un período de datos en función del parámetro de cálculo elegido que permita «completar» los datos obtenidos directamente del catálogo. A nuestro juicio, este período máximo asciende a unos seiscientos años para los datos de intensidades y a unos cincuenta y cinco para las magnitudes.

La primera corrección a aplicar, común en todos los casos, consiste en prescindir en los cálculos de todos los terremotos catalogados como réplicas o premonitores. La duda que surge es si efectivamente se trata de réplicas y premonitores y si están todas las que son.

Cuando la distribución es de valores extremos, lo que se hace es calcular los máximos correspondientes a intervalos de tiempo más o menos amplios (un año, cinco, veinte, etc.) en función del período de datos considerado; además, pueden aplicarse otras correcciones tales como:

- Prescindir sin más de los intervalos sin datos.
- Asignar a los intervalos sin datos valores en función de la distribución del resto de la serie.
- Asignar a estos intervalos los máximos valores rechazados por haber sido superados dentro de su intervalo.
- Tomar los n máximos valores de toda la serie, lo cual no se adecúa a las hipótesis de la distribución.
- Cuando se calculan los valores de los parámetros de la distribución de acuerdo con el método de los momentos, establecer un valor mínimo para cada intervalo función de los datos del período instrumental (Martín Martín y Sierra, 1984; Martín Martín, 1983).

Problema adicional en el caso de estas distribuciones de valores extremos es la elección de ésta. Las más utilizadas son la de Gumbel, tipos I y III (Gumbel, 1958), cuya diferencia fundamental estriba en que la primera es ilimitada y la segunda limitada, lo que implica la necesidad de determinar el límite superior o tamaño máximo de los terremotos (intensidad o magnitud).

Al estudiar las zonas sismogénicas y sus parámetros, se analizarán los problemas relacionados con el catálogo y las correcciones a aplicar en su caso, cuando se considera la distribución definida por la relación de Gutenberg y Richter.

4. PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA DETERMINACION DE LAS CURVAS DE ATENUACION

Tratándose de modelos, la atenuación se define por una función matemática que relaciona un parámetro representativo de los efectos del terremoto (intensidad clásica o aceleración máxima del terreno, sobre todo) con otros que caracterizan los parámetros focales del terremoto, el medio de propagación y los efectos locales del terreno.

En los análisis de macrozonación sísmica se prescinde muchas veces de los efectos locales del terreno o bien se consideran conjuntamente con los del medio de propagación. Este viene representado casi siempre por la distancia (epicentral o hipocentral) a la fuente de liberación de energía. En cuanto a los parámetros focales lo usual es considerar solamente los de

localización y tamaño, definido éste por la intensidad epicentral o por la magnitud según se trate de curvas de atenuación en intensidades o en aceleraciones. La consideración adicional de otros parámetros focales tales como el modelo de rotura no es frecuente, salvo en estudios de investigación o para el análisis de estructuras de extraordinaria importancia.

La adopción de un foco puntual y de un medio de propagación homogéneo e isótropo, hipótesis no siempre aceptable, origina atenuaciones independientes del azimut. En este caso, la atenuación de la energía elástica liberada por el terremoto será exclusivamente función de la distancia y obedecerá a la variación geométrica del frente de onda y a la absorción anelástica o por rozamiento del material de la trayectoria.

En la práctica, las leyes de la atenuación se deducen a partir de los datos observados, englobando por tanto, salvo que se realicen correcciones específicas, todos los parámetros relativos a la generación del sismo, trayectoria y efecto local del suelo. Los cálculos se reducen a un ajuste mínimo-cuadrático, ponderado o no, de los datos, puntuales o de áreas de isointensidad, obtenidos de una selección de los terremotos sentidos o registrados en la región. De acuerdo con el grado de conservadurismo que se desee en los cálculos posteriores, se adoptará la curva media obtenida, la media más una desviación típica u otra.

El principal problema que se presenta en España para la determinación de las curvas de atenuación es la escasez de datos disponibles, que en el caso de registros de acelerogramas es prácticamente nulo. Tan sólo cabe, pues, obtener curvas de atenuación de intensidades o de aceleraciones indirectamente a partir de la magnitud e intensidad observada. Para ello no se dispone en la práctica de más de una treintena de terremotos en cada caso, seleccionados del Catálogo General de Isosistas. Tratándose de curvas de atenuación de aceleraciones se presenta además el problema de la elección de la correlación empírica entre intensidades y aceleraciones a utilizar (Fig. 6), tema de gran incidencia en los cálculos (Martín Martín, 1983). El problema de la escasez de datos se agrava cuando pretendemos obtener determinísticamente curvas, direccionales o no, de atenuación de intensidades, utilizadas a veces en los proyectos de centrales nucleares o de instalaciones en el campo próximo. En estos casos no se dispone de datos suficientes que avalen la fiabilidad de los supuestos efectos direccionales o en el campo próximo, respectivamente.

Análogamente ocurre cuando a partir del limitado número de mapas de isosistas aprovechables se pretenden obtener numerosas curvas de atenuación válidas para zonas muy concretas. No obstante, los terremotos originados de una determinada zona sismogénica poseen a veces una atenuación muy diferente a los generados en las restantes zonas, lo que a su vez da lugar a un contenido frecuencial distinto, al actuar el terreno de la trayectoria como un filtro paso baja. Es el caso de los grandes terremotos que originados en la falla Azores-Gibraltar afectan a la Península Ibérica y de los que sólo disponemos de dos mapas de isosistas, correspondiente

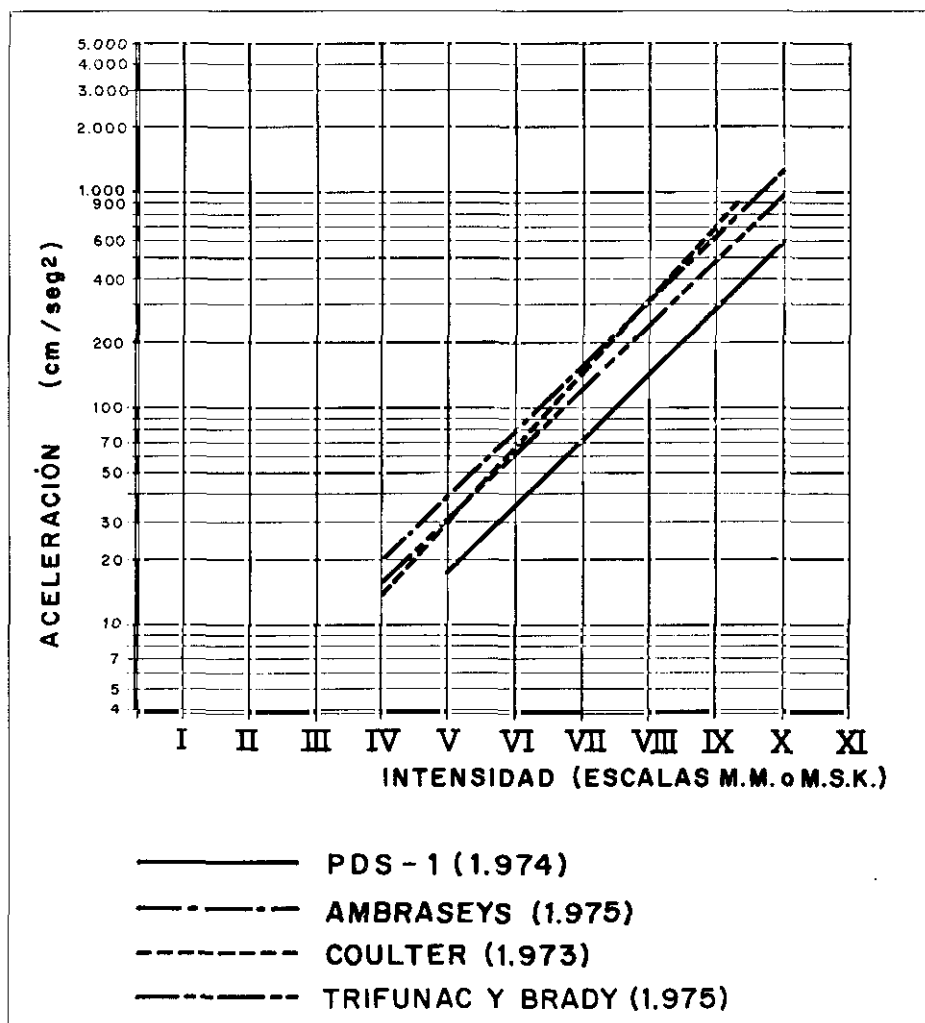


Figura 6.—Correlaciones intensidad-aceleración horizontal.

uno de ellos (Martínez Solares *et al.*, 1979) a la época preinstrumental, careciendo por tanto este terremoto de magnitud calculada.

Sin embargo, las investigaciones realizadas hasta la fecha (Muñoz, 1974; Martín Martín, 1983) permiten contar con varias curvas medias de atenuación de intensidades y aceleraciones, válidas para distintas regiones de nuestro país (Fig. 7).

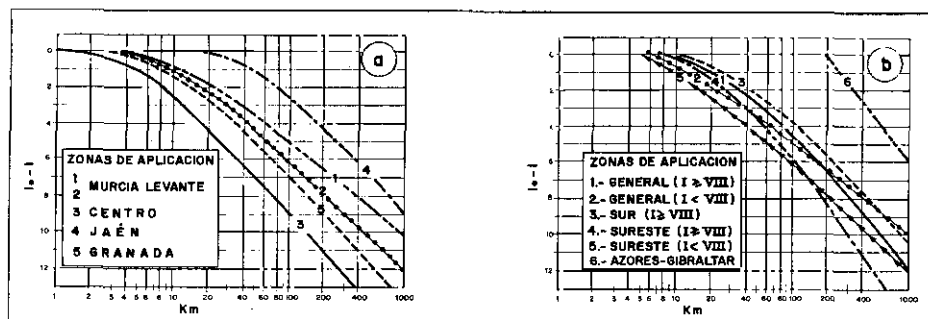


Fig. 7.—Curvas medias de atenuación de intensidades (a: Muñoz, 1974; b: Martín Martín, 1983).

5. PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA ZONIFICACION

Aunque no hay unanimidad en cuanto a su definición, denominamos zonas (o estructuras) *sismogenéticas* a aquellas que son fuente de terremotos y que poseen además unas características sísmicas y tectónicas homogéneas, es decir, el proceso de generación y de recurrencia de sismos es en ellas espacial y temporalmente homogéneo. Desde el punto de vista tectónico pueden estar constituidas por una o varias estructuras tectónicas.

De acuerdo con la definición anterior, el concepto de zona (o estructura) *sismogenética* es más restrictivo que el de provincia (o estructura) *sismotectónica*; pero hay matices, y de ahí, de la propia definición, arranca el primer problema: ¿Qué se entiende por homogeneidad sísmica y tectónica? ¿Qué criterios han de seguirse para la definición de la geometría de unas y otras?

La identificación de las fuentes y la determinación de su geometría constituye un problema muy importante de los métodos zonificados por su gran repercusión en los resultados, como consecuencia del reparto o extrapolación de la sismicidad, y en gran medida también de la peligrosidad, que se realiza a todo el área de la zona. No obstante, los métodos zonificados son más congruentes con el fenómeno sísmico que los no zonificados.

Desde el punto de vista de la aplicación al cálculo de la peligrosidad, la homogeneidad sísmica que nos interesa es la de los parámetros de las zonas, provincias y estructuras que intervienen en dicho cálculo. Esta condición es menos restrictiva para las provincias y estructuras *sismotectónicas* que para las *sismogenéticas*, ya que aquéllas quedan caracterizadas únicamente (además de por su geometría), por el máximo valor del parámetro de cálculo de la peligrosidad, generalmente la intensidad. Por el contrario, las características tectónicas son consideradas con criterios más estrictos a la hora de definir las provincias y estructuras *sismotectónicas*,

hasta el punto de que algunos proyectistas deducen la geometría de éstas a partir, casi exclusivamente, de los datos tectónicos.

En cualquier caso, la determinación de la geometría de las zonas, provincias y estructuras habrá de basarse en la correlación de datos geológicos (fundamentalmente tectónicos) y geofísicos (fundamentalmente sísmicos), admitiéndose que no tiene una solución única y exacta. Cualquier investigador o proyectista se verá obligado a introducir su punto de vista subjetivo, de forma que unos han dado mayor peso a los datos tectónicos y otros por el contrario a los sísmicos, pretendiendo la mayor parte de las veces equilibrar ambos. El problema se ha resuelto generalmente en función de los datos disponibles, aunque hoy día existen modelos basados en los procesos tectónicos y de relajación de energía, o en la opinión de diferentes expertos, a las que se incorporan además las incertidumbres mediante técnicas de simulación de Monte Carlo.

El conocimiento sobre la Geología de superficie en general y de la Tectónica en particular de la Península y áreas colindantes es bastante completo. Se dispone de mapas geológicos y tectónicos a pequeña escala (1/1.000.000 a 1/200.000) que cubren todo el territorio nacional, así como de análisis más detallados a mayor escala de amplias zonas del país, entre los que destacan por su interés para la zonificación numerosos estudios de Neotectónica. Por otro lado, además de los datos sísmicos ya citados, se dispone de información sobre estructura de la corteza, mecanismo de terremotos recientes, gravimetría y otros datos geofísicos de interés para la zonificación.

Finalmente, la relación entre la Geotectónica y la Sismicidad ha sido también objeto de estudio en nuestro país desde hace años. Hay publicados mapas sismotectónicos y sismoestructurales a pequeña y mediana escala, disponiéndose además de tesis, trabajos de investigación y estudios sismotectónicos (muchos de estos fruto del análisis de los emplazamientos nucleares) que recubren toda la Península y áreas marítimas colindantes, aunque la información sobre estas últimas es lógicamente menor.

Ahora bien, en general no es posible asociar la sismicidad histórica peninsular con accidentes tectónicos específicos. Consecuentemente, los terremotos se han asociado con generalidad a provincias sismotectónicas (ligadas con demasiada frecuencia a la tectónica superficial) mediante una simple superposición de epicentros de los que se ha ignorado incluso el posible error de localización.

Por lo que se refiere a la geometría de las zonas sismogenéticas, ésta se ha definido fundamentalmente a partir de los datos sísmicos y tectónicos, dependiendo respectivamente de la mayor o menor sismicidad del área (Fig. 8). El problema subsiguiente radica en la determinación de los parámetros de las zonas que han de intervenir en el cálculo. Para ello, los datos sísmicos de la zona han de responder a una muestra representativa, lo que puede conseguirse aumentando el periodo de datos y/o el tamaño de las zonas. Lo primero implica tener que aplicar correcciones de completi-

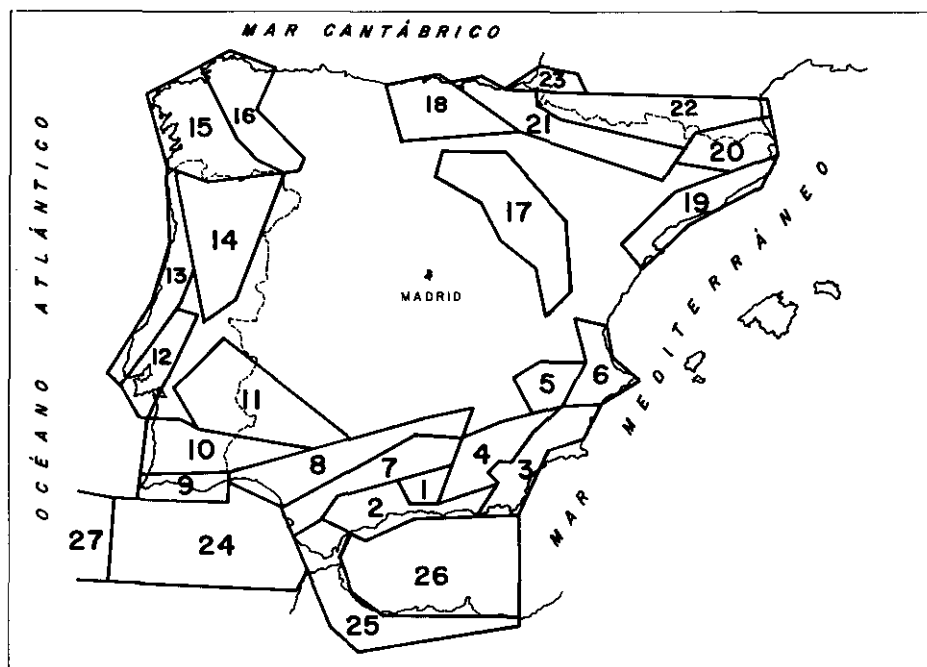


Figura 8.—Mapa de zonas sísmicas (Martín Martín, 1983).

tud y lo segundo plantea el problema del tamaño óptimo de la zona.

Los parámetros a determinar para cada zona son la magnitud o intensidad máxima de la misma, el valor umbral mínimo de estos parámetros a considerar en los cálculos y los coeficientes de las relaciones [1] o [2] de Gutenberg y Richter o, lo que es lo mismo, la pendiente de la recta que define dicha relación y la tasa de terremotos de la zona.

La corrección de completitud se limita a estos dos últimos parámetros. Un criterio utilizado para el cálculo del riesgo sísmico en la Península (Martín Martín, 1983) consiste en calcular dichos parámetros partiendo de la hipótesis de que para cada valor de intensidad, existe un período de datos diferente (que puede ser idéntico para varias zonas), en el que el catálogo puede considerarse completo.

Para la determinación de la intensidad (o magnitud) máxima suelen considerarse diversos criterios (historia sísmica, longitud de las fallas, analogías con otras zonas sísmicas, modelos mecánicos y geodinámicos, etc.). El valor obtenido influye sobre todo en los resultados correspondientes a probabilidades de excedencia pequeñas.

Básicamente, son estos mismos criterios los adoptados cuando se trata de calcular en los análisis deterministas la intensidad máxima de las provincias o estructuras sismotectónicas. Ahora bien, en este caso predomi-

nan los criterios geotectónicos, siendo el valor obtenido crítico en los cálculos de la peligrosidad.

Finalmente, hay que tener presente que los límites entre zonas son áreas de transición pese al fuerte gradiente a que puede dar lugar la adopción de parámetros muy diferentes en zonas sismogenéticas contiguas.

6. OTROS PROBLEMAS

6.1. Tratamiento de las zonas marinas

Existe un tratamiento específico, aunque similar a las terrestres (continentales o insulares), debido a que la información es muy diferente de la que de éstas se posee. El mayor problema estriba en que se carece de datos de intensidad, salvo de aquellos terremotos sentidos en tierra firme, cuyas intensidades no serán por otra parte las epicentrales. Habrá de recurrirse, por tanto, cuando el análisis se haga en intensidades, a deducir éstas a partir de las magnitudes, con los problemas que lleva aparejados la limitación del periodo de datos instrumental y la correlación entre la magnitud y la intensidad, además de los inherentes a la heterogeneidad de tratamiento entre todas las zonas.

6.2. Expresión de los resultados

A veces, tal como ocurrirá por ejemplo en el nuevo mapa de la Norma española de construcción sismoresistente, el parámetro de cálculo de la peligrosidad no es el mismo que el de expresión de los resultados, lo que nos conduce una vez más al problema de la correlación entre ambos parámetros.

Por otro lado, cuando los resultados se expresan cartografiados con isolíneas que delimitan áreas de valores discretos, el aspecto del mapa y los valores puntuales que de él se deducen dependen de las isolíneas trazadas. Tal es el caso, por ejemplo, cuando se adoptan como áreas de valor I de intensidad las delimitadas por las isolíneas I e $(I+1)$ ó $(I-0,5)$ e $(I+0,5)$ (Fig. 9). La solución: reducir la equidistancia entre isolíneas.

7. CONCLUSION

El examen de lo anteriormente expuesto puede llevar equívocamente a la conclusión de que dadas las incertidumbres existentes (unas por ignorancia y otras por aleatoriedad), la fiabilidad de las evaluaciones de la peligrosidad es muy reducida. Nada más lejos de la realidad, la existencia de múltiples alternativas no implica la idoneidad y precisión de todas ellas

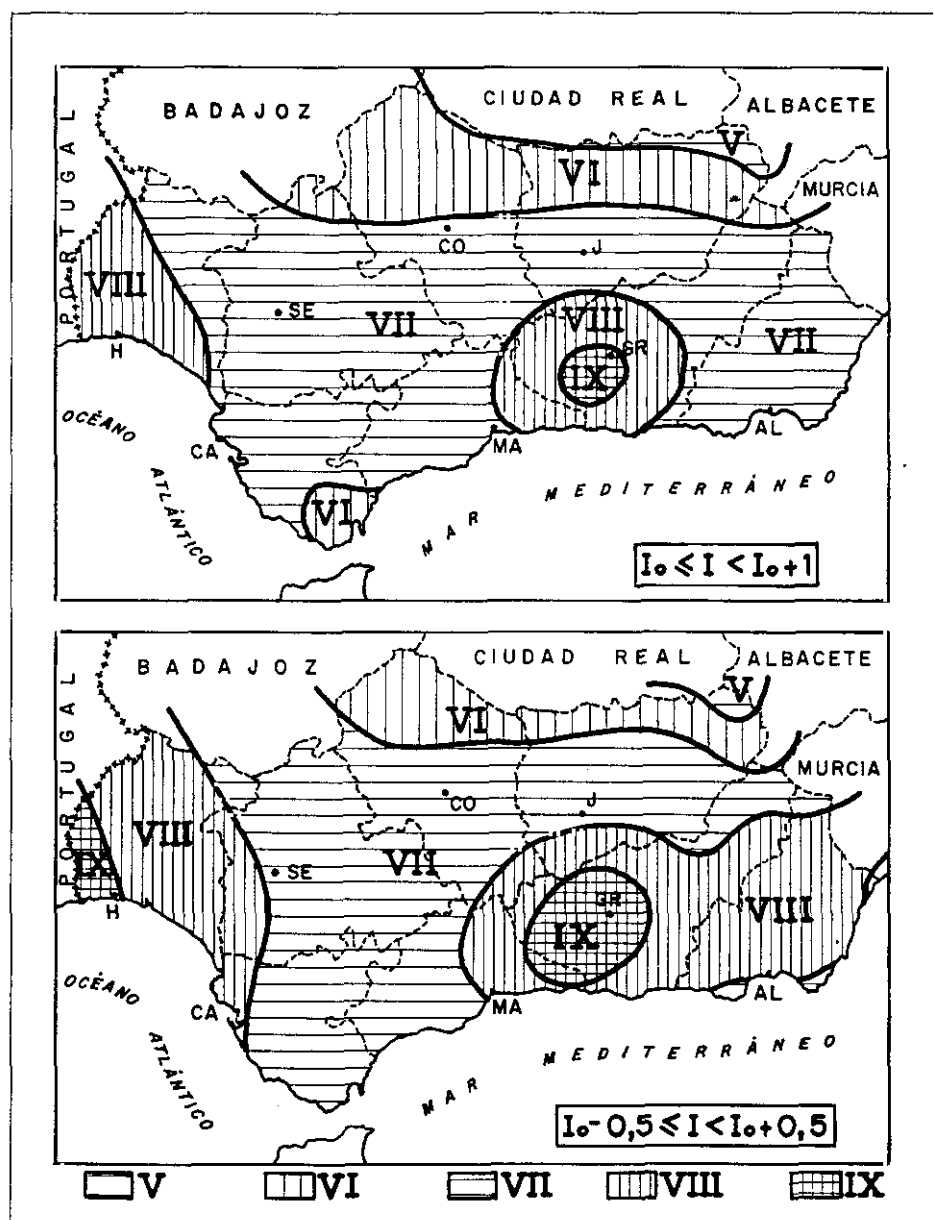


Figura 9.—Expresión de un mismo resultado, variando los intervalos asignados a cada grado de intensidad.

en todos los casos. Como en todo problema ingenieril, corresponde al proyectista analizar los datos disponibles, así como las incertidumbres existentes en cada paso de la evaluación, a fin de adoptar, de acuerdo con su experiencia y juicio subjetivo, los métodos e hipótesis más adecuados para obtener unos resultados fiables y precisos.

REFERENCIAS

- Comisión Permanente de Normas Sismoresistentes (1974): «Norma Sismoresistentes PDS-1 (1974)», *BOE* núm. 279, 21 noviembre 1974.
- Cornell, C. A. (1986): «Where do we go from here to increase the state of knowledge? - Proc. of Workshop on Probab. Earthq. Hazards Assessm.», S. Francisco, noviembre 25-29, 1985. Geological Survey. Open File Report 86-185, pp. 19-35.
- Gumbel, E. J. (1958): *Statistics of Extremes*. Columbia Univ. Press, Nueva York, 379 págs.
- Gutenberg, B., y Richter, C. F. (1949): *Seismicity of the Earth*. Princeton Univ. Press, 310 páginas.
- Lomnitz, C. (1974): «Global Tectonics and Earthquake Risk», *Developments in Geotectonics* 5, Elsevier Sc. Pub. Co., New York, 320 págs.
- Martínez Solares, J. M.; López Arroyo, A., y Mezcua, J. (1979): «Isosismal Map of the 1755 Lisbon Earthquake obtained from Spanish Data», *Tectonophysics* 55, pp. 301-313.
- Martín Martín, A. J., y Blázquez, R. (1981): *Evaluación del riesgo sísmico en la presa de El Limonero (Málaga)*. Control y Geología, S. A. Madrid.
- Martín Martín, A. J. (1983): *Riesgo sísmico en la Península Ibérica*. Tesis doct. Univ. Politécnica, Madrid, 452 págs.
- Martín Martín, A. J., y Sierra, J. (1984): «A New Seismic Hazard Map of Spain, based on Gumbel Distribution». Proc. 18 th E.G.S. Meeting. Leeds. Ag. 23-28/1982. Engineering Geology, 20, pp. 187-191.
- Mezcua, J. (1982): «Catálogo General de Isosistas de la Península Ibérica». I.G.N. Publicación núm. 202. Madrid, 62 págs. + 261 mapas.
- Mezcua, J., y Martínez Solares, J. M. (1983): «Sismicidad del área Iberomogrebi». I.G.N. Publicación núm. 203, 301 págs.
- Muñoz, D. (1974): «Curvas medias de variación de la intensidad sísmica con la distancia epicentral». Tesis Licenc. Fac. Cienc. Físicas. Univ. Complutense, Madrid.
- Sierra, J., y Martín Martín, A. J. (1983): «Algunos aspectos de la influencia de los terremotos lejanos de la zona Azores-Gibraltar en el riesgo sísmico de la Península Ibérica». Proc. V Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica, Madrid, 1983.
- Udías, A., y Muñoz, D. (1983): «Estudios de la sismicidad histórica de España». Proc. Seminario sobre Sismicidad y Riesgo Sísmico del Área Iberomogrebi, Córdoba. I.G.N. Comunicaciones y Ponencias, núm. 1, pp. 35-41.