

Peligrosidad Sísmica

BELÉN BENITO y M^a ESTHER JIMÉNEZ

E.U.I.T. de Topografía (UPM)

RESUMEN

Se presenta en este trabajo una visión global de lo que supone toda evaluación de la peligrosidad sísmica, comenzando por la propia definición y la clasificación general de los métodos empleados en su estimación. Se describen a continuación las fases a seguir y la información a considerar en la evaluación, indicando los problemas y las soluciones que se encuentran en cada aspecto del movimiento que contribuye a la definición de la peligrosidad de una zona. Se exponen también, en síntesis, los principales métodos de cálculo, desde los más clásicos hasta los últimos recientemente propuestos. El problema de estimación de incertidumbres es también abordado, indicando las vías que se siguen actualmente para su cuantificación y control. Y se concluye el trabajo exponiendo los resultados que se obtienen en los estudios de peligrosidad tanto a nivel regional, como en los específicos de un emplazamiento dado.

Todos los aspectos inherentes a la evaluación de la peligrosidad son tratados en este trabajo de forma general, pretendiendo esencialmente dar una idea de los fundamentos y establecer los principios básicos de los estudios a realizar con este fin.

ABSTRACT

In this work we present a global view of what any evaluation of seismic hazard represents, starting with the definition itself and with the general classification of the methods employed for its estimation. Next, we describe the steps to be followed and the information to be considered in the evaluation, with an indication of the problems and solutions which are found in each aspect of the ground motion contributing to the hazard assessment of a given site. We also show, in synthesis, the main methods for the calculation of hazard, from the most classical to the latest recently proposed. The problem of uncertainties quantification is also approached, with an indication of the techniques currently used for its estimation and control. The paper concludes with an account of the results obtained in the hazard study, both at the regional level, and specifically at any given site.

All the inherent aspects of the hazard assessment are treated in this work in a general way, essentially with a view to give an idea of its basis and to establish the basic principles of the studies to be carried out with this aim.

1. INTRODUCCIÓN

La peligrosidad sísmica se define como la probabilidad de excedencia de un cierto valor de la intensidad del movimiento del suelo producido por terremotos, en un determinado emplazamiento y durante un periodo de tiempo dado. La definición comúnmente aceptada fue dada por la UNDR0 (1980), según la cual la peligrosidad H (de Hazard) se representa por medio de una función de probabilidad del parámetro indicativo de la intensidad del movimiento, x , en un emplazamiento s , mediante la siguiente expresión:

$$H = P [x(s) \geq x_0; t]$$

P representa entonces la probabilidad de superación de un valor umbral x_0 del parámetro elegido durante un tiempo t .

Dado que los parámetros inherentes al movimiento son el desplazamiento, la velocidad y la aceleración, la peligrosidad es a menudo estimada en función de los valores máximos de estos parámetros, denominados habitualmente PGD , PGV y PGA ¹, pero también es habitual su expresión en términos de Intensidad macrosísmica, relacionada con la destructividad del terremoto. La elección del parámetro depende de los condicionantes propios de la evaluación y de la aplicación a la que ésta vaya dirigida.

Los métodos de evaluación de la peligrosidad se clasifican en dos grandes grupos:

- **Deterministas.**- Asumen la hipótesis de estacionariedad de la sismicidad, considerando que los terremotos en el futuro se producirán de forma análoga a como lo hicieron en el pasado y conducen a la estimación de los límites superiores del movimiento, expresados por los valores máximos del parámetro empleado para su descripción. Éstos concluyen, p.e., con una intensidad esperada en el emplazamiento de VIII, que se interpreta como la mayor intensidad que se va a sentir en el mismo como consecuencia de cualquier terremoto en la zona circundante.
- **Probabilistas.**- Deducen las relaciones de recurrencia de los fenómenos sísmicos de una zona a partir de la información existente en la misma y con ellas obtienen las funciones de probabilidad de los parámetros buscados. Estas funciones asocian a cada valor del parámetro una probabilidad anual de excedencia, o bien un periodo de retorno, que se define como el valor inverso de esa probabilidad. Así un posible resultado sería una intensidad VIII en el emplazamiento con probabilidad anual de ser superada de 0.002, o bien esa misma intensidad con periodo de retorno de 500 años. En contra de lo que intuitivamente cabe suponer, el periodo de retorno no indica el intervalo de tiempo promedio entre dos terremotos que generan esa intensidad, sino el periodo en años en el que se espera que la intensidad del movimiento sobrepase el nivel de referencia (en el ejemplo VIII), con probabilidad del 64 %.

Los resultados del análisis dependen, por tanto, del método elegido, así como de la extensión del estudio.

1.- Peak ground displacement (PGD); Peak ground velocity (PGV); Peak ground acceleration (PGA).

Para estructuras de especial importancia, como centrales nucleares o grandes presas, se requiere conocer la peligrosidad específica del emplazamiento, que se expresará en función de los valores máximos del parámetro que defina la intensidad del movimiento, o bien como una curva de probabilidad del mismo, dependiendo de que el método de cálculo sea determinista o probabilista. Sin embargo para normativas sismorresistentes, se requiere conocer la peligrosidad de áreas extensas, a escala regional, y en este caso los resultados se representan en mapas de isolíneas de los parámetros elegidos, que indican los valores máximos o los valores asociados a un cierto periodo de retorno.

En cualquier caso, la correcta evaluación de la peligrosidad requiere conocer dos características importantes de la zona de estudio: la sismicidad de la región circundante o área de influencia, con identificación de zonas sísmicas en la misma y la atenuación sísmica regional. Combinando los dos aspectos se llega a determinar la intensidad del movimiento en un emplazamiento como consecuencia de los terremotos que puedan afectar al mismo, integrando el efecto de la fuente y la propagación de energía de ésta al emplazamiento. Si no se introduce expresamente el efecto local del suelo en el movimiento, éste se considera caracterizado en roca o suelo duro, siendo así el tratamiento que se sigue generalmente en estudios de peligrosidad regional. Cuando la estimación se realiza en un emplazamiento específico, es necesario cuantificar la amplificación local y aplicarla a los resultados anteriores para obtener intensidades del movimiento que incluyan este efecto. Esta situación se aborda por medio de estudios de microzonación.

2. INFORMACIÓN A CONSIDERAR Y FASES A SEGUIR EN LA EVALUACIÓN

La predicción del movimiento en un emplazamiento dado requiere agregar la contribución de los tres factores que intervienen: *radiación generada en la fuente*, *propagación* a través del medio y *efecto local* del suelo en el emplazamiento en cuestión. El problema, de gran complejidad, es necesariamente simplificado en estudios de peligrosidad, sobre todo cuando éstos se realizan a escala regional.

Así, para tener en cuenta el término *fuentes* se analiza la sismicidad de la región de influencia para un emplazamiento dado, se identifican las fallas activas en la misma y las zonas sismogénicas, y éstas se caracterizan por las leyes de recurrencia de la sismicidad asociada o por los máximos sismos potenciales. De esta forma se contempla la actividad de las fuentes que pueden generar movimiento en un emplazamiento dado: caracterizando tanto el tamaño como la distribución espacio-temporal de los sismos que ocurren en ellas.

El segundo aspecto que contribuye al movimiento es la *propagación* de las ondas a través de la trayectoria, desde la fuente hasta el emplazamiento donde se realiza la predicción. En el trayecto la energía se atenúa, más o menos dependiendo del medio, y por ello es conveniente contemplar este hecho estimando leyes de atenuación específicas para cada zona.

Aplicando las leyes de atenuación con la distancia a los movimientos generados en las zonas fuente de los terremotos, es posible determinar el movimiento esperado en un cierto emplazamiento y a cierta distancia de la fuente; siempre que éste se localice en roca o suelo duro y no se encuentre en una irregularidad topográfica, en cuyo caso el propio emplazamiento no introduce una amplificación local al movimiento.

Si la composición del suelo bajo el emplazamiento es diferente a roca o existe una topografía irregular, para realizar una predicción realista del movimiento hay que considerar el tercer factor integrante de la agitación, es decir *el efecto local*, que puede amplificar o deamplificar notablemente la radiación incidente en la base rocosa.

El tratamiento que reciben los tres términos considerados, para su cuantificación en estudios de peligrosidad, se expone a continuación.

2.1. Sismicidad del Área de Influencia

El conocimiento de la sismicidad de la región donde se quiere predecir el movimiento es el primer paso a seguir en todo estudio de peligrosidad; es necesario conocer bien la ocurrencia de terremotos en el pasado, para poder predecirla en el futuro. Previamente hay que definir la extensión de la zona cuya sismicidad puede afectar a un emplazamiento dado. Casi todas las normativas establecen como área de influencia un círculo de radio 300 km alrededor del punto a estudiar e imponen el análisis de la sismicidad en la región comprendida dentro del mismo. Esta área suele ser suficiente, aunque a veces se presentan excepciones, como es el caso del Sudoeste de la Península Ibérica, cuyo estudio requiere una ampliación de la zona hasta englobar la estructura tectónica de Azores-Gibraltar. Los terremotos originados en ésta han hecho sentir sus efectos en casi toda la Península debido a su baja atenuación y han sido determinantes en la peligrosidad del Sudoeste a distancias superiores, en ocasiones, a los 400 km del epicentro. De ahí la necesidad de ampliar el radio de la zona en los correspondientes estudios.

Una vez definida el área de influencia, es necesario recopilar toda la información existente sobre los terremotos con epicentro en ella: *catálogos instrumentales y macrosísmicos, documentos de sismicidad histórica y mapas de isosistas* esencialmente. De esta información se extraen los datos referentes a parámetros de localización y tamaño, profundidad focal, área de réplicas de los mayores terremotos, y frecuencia de ocurrencia de sismos para distintos niveles de intensidad o magnitud, quedando así caracterizada la sismicidad de la zona, para proceder después, en fases sucesivas, a determinar las características de los movimientos que se pueden generar.

Catálogos instrumentales y macrosísmicos

Los catálogos instrumentales incluyen información bastante completa de los mayores terremotos ocurridos en este siglo y, dada la progresiva mejora en la instrumentación, pocos terremotos recientes han dejado de ser detectados. Sin embargo, la precisión en su determinación, en el establecimiento de su magnitud y en la localización epicentral, puede ser muy variable y es importante comprender las incertidumbres de los datos catalogados y tenerlas en cuenta en estudios de peligrosidad.

Los terremotos anteriores a este siglo disponen sólo de información macrosísmica, esencialmente distribuciones de daños e intensidades. Estos terremotos se han localizado generalmente en el centro del área de mayor daño, siendo por tanto, bastante imprecisa la localización. Los datos tanto de intensidad como de localización figuran en los catálogos macrosísmicos, que incluyen también generalmente, descripciones de los daños referentes a los terremotos catalogados [p.e., Galbis (1932-1940), Fontseré, (1972)].

Por otra parte existen catálogos sísmicos, a nivel nacional y regional (p.e. I.G.N., 1998), que incluyen tanto datos macrosísmicos como instrumentales, y es de destacar la falta de homogeneidad en la precisión de ambos tipos de datos. Además, estos catálogos contienen muchas incertidumbres sobre los sismos históricos, ya que a menudo presentan información de segunda o tercera mano, siendo recomendable acudir a las fuentes primarias de información para revisar los datos, al menos de los mayores terremotos que afectan al emplazamiento de estudio.

Documentos de sismicidad histórica

Dada la imprecisión mencionada de los datos contenidos en los catálogos, es importante recopilar toda la información existente sobre los daños de terremotos históricos, que en zonas de sismicidad moderada, como España, pueden ser los mayores y más determinantes de la peligrosidad. La disponibilidad y fiabilidad de estos documentos depende de la zona y de su patrimonio histórico y son numerosas las fuentes de procedencia. La información a menudo es contradictoria e incompleta y debe ser examinada con ayuda de historiadores que conozcan las particularidades de la época y aporten su experiencia para una correcta interpretación. La revisión cuidadosa de estos documentos permite reevaluar intensidades y localizaciones, así como despejar errores a menudo contenidos en los catálogos, como duplicidad de eventos en fechas distintas que corresponden en realidad a un único terremoto, o incluso eliminación de falsos eventos, si se comprueba que los efectos corresponden a otro fenómeno diferente al sísmico.

La revisión de estos datos es especialmente importante en el caso de evaluaciones de peligrosidad en un emplazamiento específico para instalaciones de especial importancia, que requieran estimaciones muy fiables. No deben considerarse sin más los datos catalogados en estos casos, debiendo elaborarse un catálogo de proyecto que incluya los resultados de la reevaluación de los sismos que más puedan condicionar la peligrosidad.

Mapas de isosistas

Debido a la subjetividad en las evaluaciones de intensidad, ésta puede ser variable entre diferentes fuentes, con diferentes resultados dados por distintos autores. Sin embargo, los mapas de intensidades sentidas de un terremoto o de distribuciones de daños son de particular interés, ya que indican la extensión geográfica de los daños y su variación espacial. Generalmente el nivel más alto de intensidad observado corresponde a la intensidad epicentral I_0 , que refleja la severidad del terremoto y los mapas de I_0 pueden ser usados como una indicación de la localización de fuentes de los sismos más severos. Sin embargo, estos mapas se han construido a partir de datos en un intervalo de tiempo relativamente corto (en el caso de España sólo se dispone de mapas de isosistas para terremotos en los últimos 400 años) y por ello es difícil asegurar que los terremotos en el futuro ocurran dentro de las zonas indicadas, ya que pueden no estar contemplados en ellas los mayores sismos ocurridos.

2.1.1 Identificación de características sismotectónicas

La sismicidad previamente analizada debe ser relacionada con la tectónica de la zona, con el fin de identificar las fallas activas de la región y las zonas sismogénicas, de potencial sísmico uniforme; así como los máximos sismos potenciales asociados a ellas y las leyes de recurrencia que gobiernan la sismicidad. Estos datos caracterizarán el término “fuente” y serán una información de partida en toda evaluación de peligrosidad.

Fallas activas y zonas sismogénicas

En primer lugar se identifican las fallas y otras estructuras tectónicas en la zona, para proceder después a analizar su posible asociación con la sismicidad observada. Si se encuentran evidencias de correlación entre sismos y estructuras, pueden identificarse las fallas activas. La normativa nuclear define también fuentes sismotectónicas capaces, como aquellas que presentan deformación en superficie (o cerca de ella) debido a movimientos en los últimos 500.000 años, o al menos un movimiento en los últimos 50.000 años, según el criterio de la USNRC, 1997 (Apéndice A, RG 1.165). En el caso del trazado de fallas activas es necesario conocer el tamaño, orientación y carácter de las mismas (normal, inversa, de desgarre), las distribuciones de esfuerzos que indican los puntos con mayor probabilidad de ocurrencia de sismos y el terremoto característico, o máximo generado en la falla, cuya determinación más fiable requiere estudios de paleosismicidad.

La identificación de estas estructuras es particularmente importante en la selección de emplazamientos de instalaciones críticas, como centrales nucleares y almacenamientos de residuos radiactivos. Las correspondientes normativas imponen para ello una serie de requisitos en sus estudios de evaluación, tales como efectuar análisis de microsismicidad, geotectónicos, paleosismicidad, etc. (RG 1.165, SRP, rev 3)

Sin embargo, en un ámbito más general, esta fase del estudio se realiza normalmente con menor detalle, partiendo como única fuente de información de la contenida en mapas geológicos, estructurales, geomorfológicos, etc. Contrastando los mismos con los epicentros obtenidos en la fase anterior, se pueden identificar fallas activas, cuando existe evidencia de alineación de epicentros a lo largo de la falla. Pero son pocos los casos en los que la sismicidad observada puede asociarse a una línea o plano de falla, siendo más normal que los terremotos ocurran dentro de sistemas de fallas de mayor extensión; es decir áreas de fallamiento múltiple, donde se agrupa la sismicidad. Estas áreas pueden ser definidas como zonas fuente, dentro de las cuales la sismicidad se asume uniforme. Identificando los límites de estas zonas se definen las “zonas sismogénicas”, capaces de generar terremotos de características similares en cualquier punto de las mismas. En el interior de cada zona se considera que la sismicidad se distribuye de forma uniforme, espacial y temporalmente, ajustándose a un modelo de Poisson. En base a estas hipótesis la identificación de los límites debe hacerse con un cuidadoso estudio sísmico y geológico, y no deja de ser un proceso subjetivo que conlleva gran incertidumbre y que tiene un efecto muy significativo en la peligrosidad de emplazamientos cerca de esas fuentes. Por ello es recomendable considerar un rango de variabilidad en los límites de las zonas, en lugar de delinear contornos exactos, e incorporar las incertidumbres en el estudio completo de peligrosidad (Bender y Perkins, 1987). Un ejemplo de un mapa sismotectónico con las zonas sismogénicas definidas es mostrado en la figura 1.

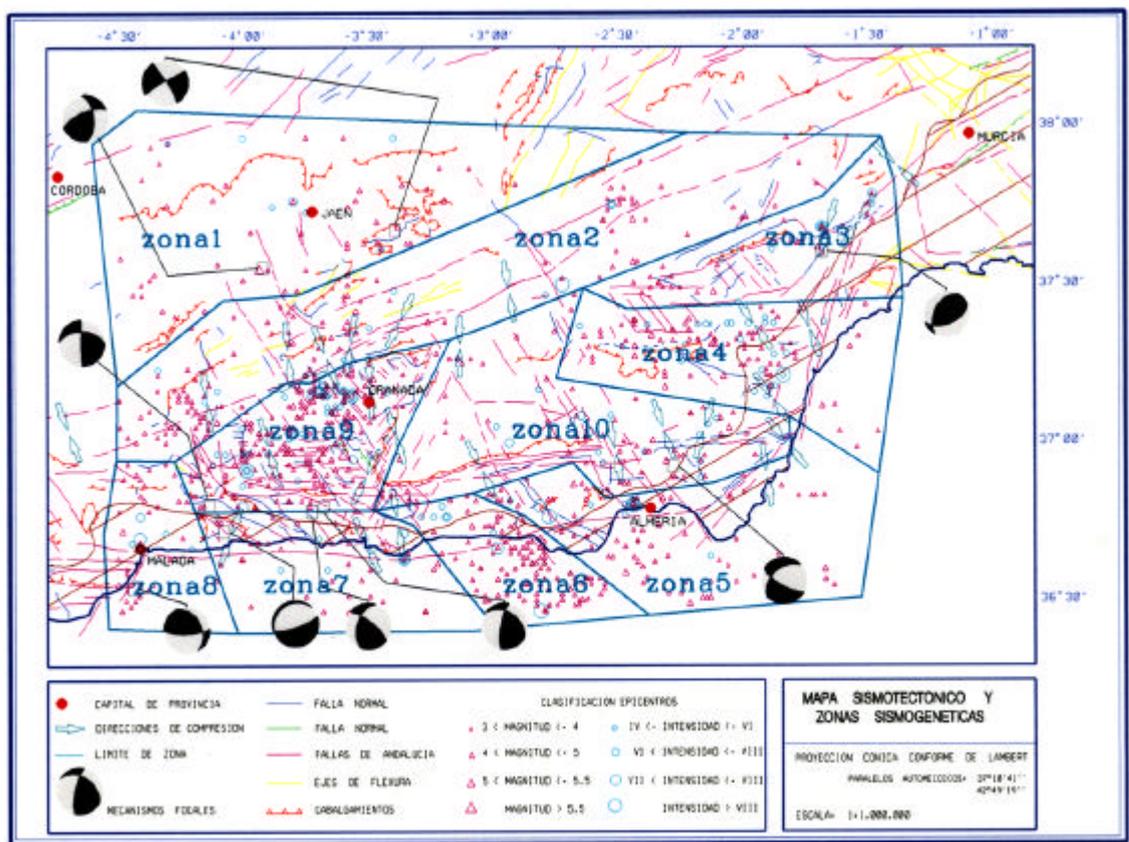


Figura 1.- Mapa sismotectónico y fuentes sismogénicas en el Sureste de la Península Ibérica (de Jiménez Peña et al., 1998a).

Terremotos característicos y leyes de recurrencia

Una vez realizada la compartimentación sismotectónica, la información necesaria de las zonas para continuar el resto del estudio depende del carácter determinista o probabilista del mismo. Los métodos deterministas requieren tan sólo el conocimiento del *máximo sismo potencial o del terremoto característico*, mientras que los probabilistas necesitan la estimación previa de leyes de recurrencia de los sismos en cada falla o zona sismogénica.

El máximo sismo potencial es el mayor que puede esperarse en una estructura o zona y para determinarlo debe conocerse el máximo ocurrido en el pasado. Esto es problemático, porque muchas veces el tiempo del registro histórico es más corto que el intervalo de recurrencia de ese terremoto, y puede no haber sido recogido en los catálogos. Por ello, son importantes los estudios de paleosismicidad en las principales estructuras activas, que permiten conocer los movimientos bruscos que han sido producidos por terremotos en intervalos de miles de años, y determinar a partir de ahí las magnitudes asociadas. (Villamor y Berryman, 1999)

En la práctica, cuando no se tiene suficiente información geológica, el máximo sismo potencial se estima mayorando ligeramente el máximo histórico, aumentando p.e., un grado la intensidad o medio grado su magnitud; aunque esta mayoración depende del potencial sísmico de la zona.

En algunas áreas donde las fallas activas son claramente identificadas, la actividad puede expresarse por medio de un terremoto característico, que representa los eventos de elevada magnitud que se han producido con un intervalo de recurrencia similar (p.e., $I_0 = IX$ cada 200 años).

Estos terremotos máximos no son los únicos que tienen lugar dentro de cada estructura o zona; en un amplio intervalo de tiempo se detectan en ellas terremotos de diferentes tamaños o magnitudes, dentro de un cierto rango. Los terremotos más pequeños son siempre más frecuentes que los grandes, y la frecuencia de ocurrencia de los sismos menores tiende a ser relativa a la de los mayores. Por ello, el gráfico que muestra el número de terremotos frente a su tamaño, tiende a tener una forma fija. Basándose en este hecho Gutenberg y Richter (1944) postularon, en base a la estadística de leyes de recurrencia, que la relación entre $\log N$ y M debía ser lineal; donde M es la magnitud y N el número de sismos con magnitud mayor que M . Se definió así la ley de Gutenberg-Richter,

$$\log N = a - b \cdot M$$

que representa la frecuencia de ocurrencia de sismos en la zona, frente a su magnitud. Esta ley es también a menudo expresada en función de la intensidad, un ejemplo de ajuste de la sismicidad a la citada expresión es mostrada en la figura 2.a.

El parámetro b es la pendiente de la relación, que representa la proporción entre el número de sismos grandes y pequeños en la zona; y a es la ordenada en el origen, a partir de la cuál se puede estimar la tasa anual de terremotos (a) que superan una magnitud o intensidad de referencia.

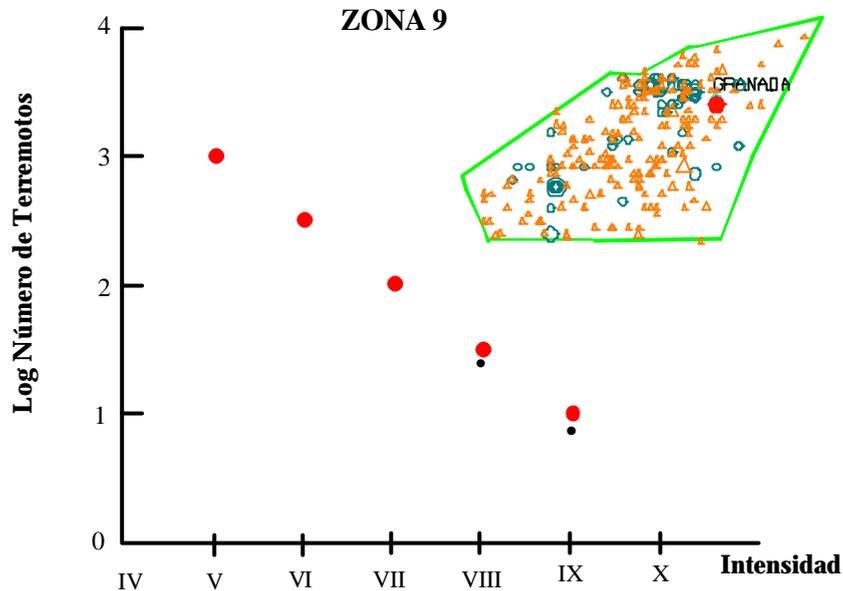
Esta ley es adoptada generalmente para definir la recurrencia de sismos de una zona y su correcta estimación, requiere disponer de observaciones en un amplio intervalo de tiempo. Si la relación se establece para cortos periodos de observación, es improbable que recoja los mayores terremotos habidos en la zona, ya que son menos frecuentes. Podría asumirse para éstos, un periodo de recurrencia basado en extrapolación de relaciones lineales desde terremotos más pequeños, pero los resultados que así se obtendrían serían muy poco fiables, ya que la extrapolación de relaciones lineales puede conducir a valores de magnitud extremadamente grandes y muy poco realistas. Para cada región hay un límite en el tamaño del máximo terremoto que puede ocurrir, dependiendo de las características geológicas y del sistema de fallas. Por esta razón, y para tener en cuenta ese límite superior, se han propuesto distintas modificaciones a la ley de Gutenberg-Richter, tales como relaciones cuadráticas o bilineales. En este último caso, se determinan, junto a los parámetros que definen la ley, a y b , los valores extremos de magnitud para los que ésta se considera válida, M_{min} y M_{max} ; y todos ellos se introducen como parámetros característicos de la zona en la evaluación de la peligrosidad.

Las leyes de recurrencia de la magnitud o la intensidad de la zona son comúnmente usadas como una forma de definir el patrón esperado de sismicidad en un cierto intervalo de tiempo.

En muchos casos de fallas individuales, y en áreas como la zona de subducción del Pacífico, donde se observan terremotos característicos con una cierta frecuencia, la sismicidad no queda reflejada tan claramente por medio de la ley de Gutenberg-Richter. Es decir, los terremotos grandes, de tamaño medio y los pequeños no se distribuyen como contempla dicha ley, sino que los eventos de mayor magnitud que definen el

terremoto característico tienen un intervalo regular de recurrencia, que no corresponde a una relación lineal, hecho que se ilustra en la figura 2.b. Para incluir este terremoto se han propuesto leyes de tipo discontinuo (Schwartz y Coppersmith, 1984).

2.a).-



2.b).-

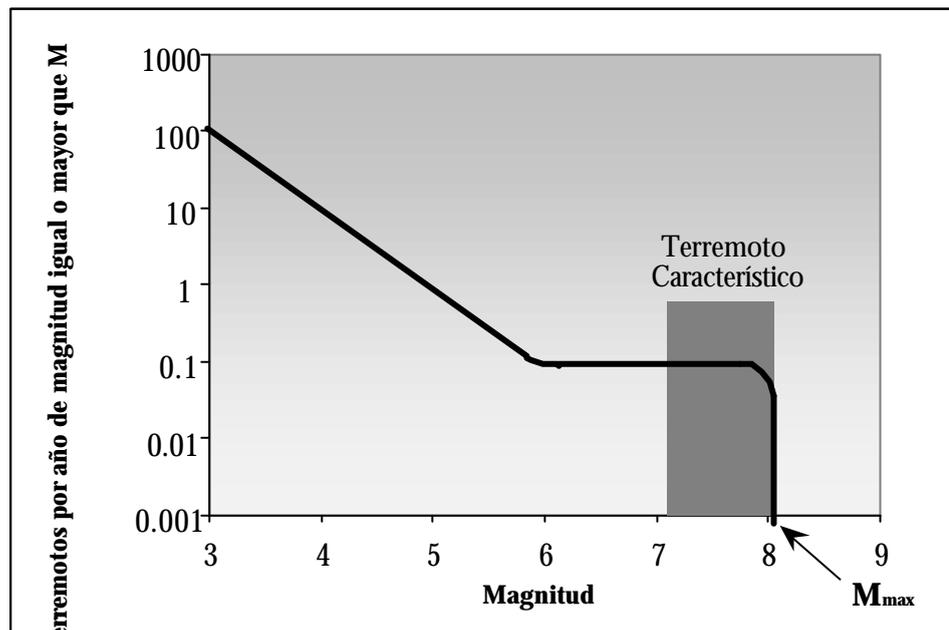


Figura 2.a).- Ejemplo de Ley Gutenberg-Richter (de Jiménez Peña et al., 1998a).

2.b).- Ley de Gutenberg-Richter incluyendo terremoto característico (de Coburn y Spence, 1992).

2.2. Atenuación Sísmica Regional

El segundo factor integrante de la agitación es la *propagación* de ondas a lo largo de la trayectoria desde la fuente hasta el emplazamiento; y éste se aborda en estudios de peligrosidad determinando la atenuación sísmica regional.

La amplitud de las ondas se atenúa en su propagación como consecuencia de la expansión geométrica del frente de ondas y de la anelasticidad del medio. Por ello la estimación de la atenuación precisa, en principio, el conocimiento detallado de la estructura que separa la fuente del emplazamiento donde se predice el movimiento; algo que generalmente no es factible. En la práctica, el problema se resuelve de dos formas posibles:

- Estimando independientemente la atenuación atribuida a cada uno de los factores mencionados, por medio de modelos que representan la disipación de la energía en función de los parámetros influyentes.
- Calculando la atenuación conjunta por formulación de leyes empíricas que relacionen el parámetro representativo del movimiento en un punto con la distancia epicentral o hipocentral y con el parámetro que refleja la energía liberada en el foco.

El segundo procedimiento es más frecuente en estudios de peligrosidad y se plantea ajustando las observaciones disponibles (p.e., datos de intensidad sentida, valores registrados de PGA) a una determinada expresión matemática, y determinando los coeficientes de la misma por análisis de regresión. Si los ajustes se realizan con datos de una determinada zona, queda estimada entonces la ley de atenuación regional de la misma. Algunas expresiones comúnmente empleadas para este fin responden a las ecuaciones:

$$\ln \text{PGA} = c_1 + c_2 \cdot M + c_3 \cdot \ln R$$

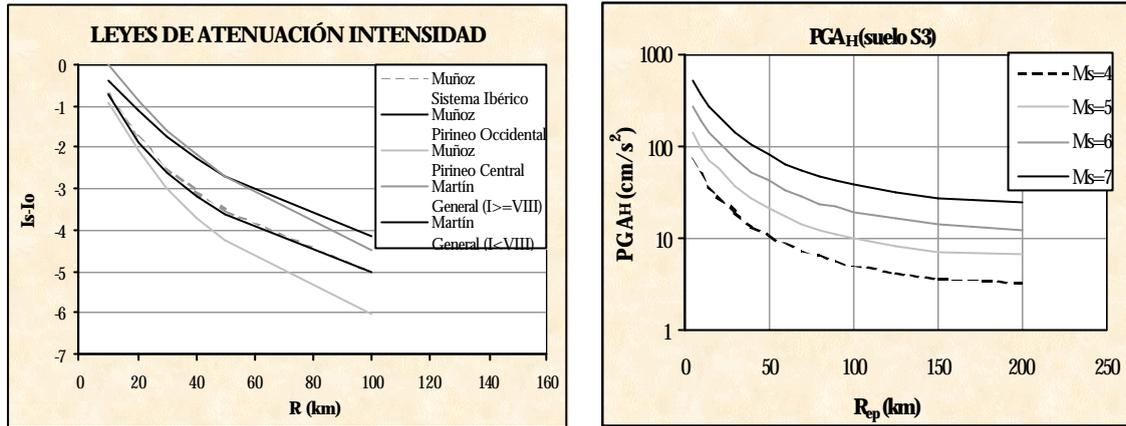
$$\log I_s = c_1 + c_2 \cdot I_0 + c_3 \cdot R + c_4 \cdot \log R$$

$$I_s - I_0 = c_1 + c_2 \cdot R + c_3 \cdot \log R$$

Éstos son tan sólo algunos ejemplos de leyes de atenuación del movimiento, que relacionan la amplitud del mismo en un punto, dada por la aceleración pico, *PGA* o la intensidad sentida I_s , en función de la magnitud del terremoto M , la distancia R y la intensidad epicentral I_0 . En la literatura especializada se han propuesto otras muchas expresiones de este tipo, variando el modelo matemático al que se ajustan los datos, así como los parámetros que caracterizan el movimiento y el tamaño de la fuente.

La figura 3 representa algunos modelos de leyes de atenuación obtenidos para diferentes zonas y con diferentes parámetros.

La estimación de leyes de atenuación conlleva gran incertidumbre, ya que a menudo los datos que se ajustan a una determinada ley presentan una gran dispersión, pudiendo estimarse sólo atenuaciones promedio, que serán más precisas para una cierta región cuanto mayor sea la muestra de datos empleada.



3 a)

3 b)

Figura 3- Ejemplos de leyes de atenuación **a)** en función de la intensidad según distintos autores [Muñoz (1982) y Martín (1984)]; **b)** Leyes de atenuación de PGA_H (comp. horizontal máxima) en función de M_S , R_{ep} y S (tipo de suelo; $s_3 =$ intermedio).

Para regiones de elevada sismicidad estas leyes quedan bien establecidas, conduciendo a estimaciones de parámetros del movimiento en un cierto rango de valores; para los que pueden ser calibradas con los registros disponibles, permitiendo éstos también cuantificar las incertidumbres. Así por ejemplo, en la parte Oeste de Norteamérica, hay buen acuerdo entre las diferentes leyes publicadas y la dispersión está bastante acotada; pero en áreas de más baja sismicidad la incertidumbre aumenta y las atenuaciones resultan muy diferentes a las encontradas en zonas de más alta sismicidad. Una posible explicación a estas diferencias radica en que las ondas sísmicas se transmiten mejor en zonas donde no hay fracturación por frecuentes e intensos procesos de ruptura, es decir en zonas de menor sismicidad.

Por ello, es importante no extrapolar atenuaciones entre diferentes zonas e introducir en el estudio leyes de atenuación regionales, formuladas con datos propios de la zona en cuestión; o bien si esos datos son escasos, emplear leyes de otras zonas sólo con análogas características sismotectónicas. La extrapolación indiscriminada de leyes de atenuación, más allá de su rango de validez o de la zona fuente de los datos, puede conducir a errores muy serios en la predicción, dado que estas leyes presentan gran sensibilidad en la estimación de parámetros del movimiento.

Por la razón expuesta, en áreas de baja sismicidad, donde los datos de movimiento fuerte son escasos, es bastante generalizado el uso de atenuaciones de la intensidad macrosísmica basada en registros históricos, y derivados del análisis de mapas de isosistas de terremotos ocurridos en la región. En estos casos dichas leyes son las únicas que aportan información de la atenuación regional, y éste es uno de los motivos por los que no resulta fácil descartar el uso de la intensidad macrosísmica en estimaciones de peligrosidad, a pesar de los inconvenientes que conlleva la subjetividad en su evaluación.

2.3. Efecto del Suelo

Cuando la predicción se realiza teniendo solamente en cuenta los aspectos anteriores, fuente y propagación, el movimiento queda caracterizado en roca o suelo duro, sin que intervengan efectos locales.

Pero cuando el movimiento se produce en otro tipo de emplazamientos, p.e., suelos con espesor variable de sedimentos o en ciertas irregularidades topográficas, es necesario tener en cuenta la influencia de las condiciones locales —esencialmente geología superficial y topografía— como tercer factor integrante del movimiento. Ha quedado demostrado en muchos terremotos recientes que este efecto local puede introducir un factor de amplificación altamente significativo, llegando a multiplicar por 5 la aceleración pico, respecto a la registrada en roca, o bien a aumentar 3 grados la intensidad macrosísmica. Un ejemplo de este efecto es mostrado en la figura 4.

La influencia de estos factores en la peligrosidad se aborda usualmente por medio de estudios de microzonación. Es de destacar que la amplificación local del suelo no afecta igual a las diferentes amplitudes del movimiento, encontrándose factores de amplificación variables para las distintas frecuencias. Los suelos blandos presentan baja frecuencia propia, y tienden a amplificar más las frecuencias de este orden, filtrando en cambio las altas frecuencias del movimiento. Por ello, los factores de amplificación de estos suelos son mayores para aceleraciones espectrales de baja frecuencia o para el desplazamiento y la velocidad pico, de menor contenido frecuencial que la aceleración pico, *PGA*.

En estudios de peligrosidad, los efectos del emplazamiento son a menudo introducidos en las leyes de atenuación, que se formulan para tres tipos de suelos: roca, aluvión superficial (suelo intermedio) y aluvión profundo (suelo blando). Por las razones expuestas las mayores diferencias entre los tres tipos de suelo se encuentran en las aceleraciones espectrales de baja frecuencia, así como en la velocidad y el desplazamiento pico del movimiento.

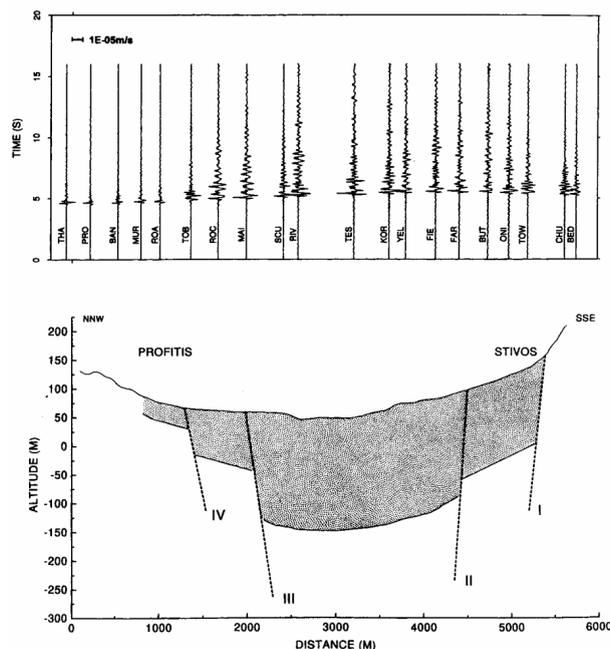


Figura 4.- Ejemplo de amplificación local. Figura extraída de EURO-SEISTEC (Jongmans et al., 1998) perteneciente a un estudio de la cuenca de Volvi.

3. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA PELIGROSIDAD

Como ya se indicó en el apartado 1., los métodos de cálculo de la peligrosidad se clasifican en dos grandes grupos: deterministas y probabilistas.

Los métodos deterministas fueron los primeros desarrollados, y tienen por objetivo obtener la acción sísmica en el emplazamiento, sin proporcionar información sobre su periodo de retorno. Tampoco analizan las incertidumbres introducidas en el proceso de cálculo, ni contienen criterios claros que permitan asegurar que el sismo obtenido sea el máximo esperable, lo que lleva con frecuencia a introducir conservadurismos excesivos. A pesar de esos inconvenientes, su uso ha sido generalizado durante dos décadas, a partir de los años 60, y han sido recomendados por normativas como el Apéndice A de la 10CFR100 para centrales nucleares.

Los métodos probabilistas comenzaron a desarrollarse a finales de los 60, teniendo ya por objetivo estimar las acciones sísmicas en el emplazamiento con una probabilidad asociada, lo que permite diseñar una construcción para cualquier nivel de riesgo aceptable; así como llevar a cabo un análisis de las incertidumbres derivadas de la aplicación de las distintas opciones de cálculo (LLNL, 1989).

Actualmente casi todas las normativas tienden a recomendar una metodología probabilista, sin erradicar completamente los métodos deterministas que en muchos casos se proponen como complementarios para calibrar, con los valores máximos obtenidos, los sismos de control deducidos de forma probabilista (RG 1.165, 1997).

A su vez, los métodos deterministas pueden ser zonificados o no zonificados, dependiendo de cómo consideran distribuida la sismicidad; y los probabilistas se clasifican en paramétricos y no paramétricos. Recientemente se han propuesto también métodos con otras singularidades, y es de destacar la tendencia a definir escenarios de peligrosidad en lugar de integrar la acción de todas las zonas en un mismo resultado. En los siguientes apartados se presenta una visión global de los diferentes métodos existentes.

3.1. Métodos Deterministas

En líneas generales, el proceso de cálculo con estos métodos se realiza en los siguientes pasos:

- 1.- Definición del área de influencia en el emplazamiento e identificación de las fuentes sísmicas o estructuras de fallas englobadas en ellas. Si la sismicidad se puede considerar homogénea en todo el área, se define una única fuente sísmica de influencia global, y el método entonces se denomina no zonificado. Si se identifican zonas con potencial sísmico diferente, se entiende que el método es zonificado.

- 2.- Estimación de los máximos terremotos ocurridos en el área de influencia o en cada una de las zonas fuente. Determinación, si ha lugar, de los sismos característicos y definición del máximo sismo potencial que se puede generar, previsiblemente, en cada zona o estructura delimitada.

3.- Estimación de la acción sísmica en el emplazamiento, causada por los máximos sismos potenciales de cada zona o de toda el área. Por la hipótesis asumida de que la sismicidad es aleatoria en cada zona, el sismo máximo podría tener lugar en cualquier parte de la misma. Por ello, siguiendo un criterio conservador, dicho sismo se sitúa en el punto de la zona más cercano al lugar donde se realiza la predicción. La aplicación de leyes de atenuación con la distancia proporciona entonces valores de la intensidad del movimiento en el emplazamiento, como consecuencia de la actividad de cada zona definida.

4.- Determinación de la peligrosidad en el emplazamiento, tomando el máximo valor de intensidad del movimiento generado por las diferentes zonas, con lo que la peligrosidad queda caracterizada por el límite superior del movimiento en el punto.

Estos métodos presentan la ventaja de sencillez en su aplicación, pero tienen como inconvenientes el desconocimiento de la probabilidad asociada a ese máximo movimiento, así como la caracterización de las fuentes únicamente por el mayor terremoto, sin intervenir su ley de recurrencia. Un esquema general de la metodología seguida con estos métodos es presentado en la figura 5.a.

3.2. Métodos Probabilistas

A diferencia de los métodos deterministas, los probabilistas consideran los efectos de todos los terremotos que pueden afectar a un emplazamiento dado, y tienen en cuenta las leyes de recurrencia de los mismos. Dan como resultado estimaciones de la probabilidad de excedencia para cada valor de la intensidad del movimiento esperado en el emplazamiento, durante un periodo de tiempo dado, quedando así representada la peligrosidad por curvas de probabilidad. Un esquema del método seguido es mostrado en la figura 5.b

A su vez, estos métodos se clasifican en paramétricos y no paramétricos, existiendo también diferentes versiones dependiendo de la distribución estadística adoptada para caracterizar la sismicidad

Métodos no paramétricos

Evalúan la peligrosidad mediante funciones de distribución de valores extremos. Las más utilizadas son distribuciones de Gumbel (1958) a las que se ajustan los valores x del parámetro de movimiento elegido, fijando además valores extremos x_e de dicho parámetro. La metodología a seguir consta de los siguientes pasos:

- 1.- Determinación del área de influencia alrededor del emplazamiento donde se efectúa la predicción.
- 2.- Cálculo de valores del parámetro del movimiento x en el emplazamiento, aplicando leyes de atenuación a los valores de dicho parámetro que reflejan la sismicidad del área durante el periodo de tiempo considerado.
- 3.- Ajuste a una cierta distribución de valores extremos, de la variable aleatoria definida con los valores del parámetro estimados, y estimación de los coeficientes de dicha distribución.
- 4.- Estimación de la probabilidad de excedencia de un cierto valor extremo fijado, x_e , durante un tiempo de exposición t ; representando así la peligrosidad.

Una descripción detallada de estos métodos es dada por Molina (1998). Por otra parte, numerosos programas de cálculo se han desarrollado para llevar a la práctica esta metodología. Entre ellos cabe destacar los llamados HZ y HN (Kijko y Sellevoll, 1989-1990) y SRA (López Casado et al., 1990; Giner, 1996).

Métodos paramétricos

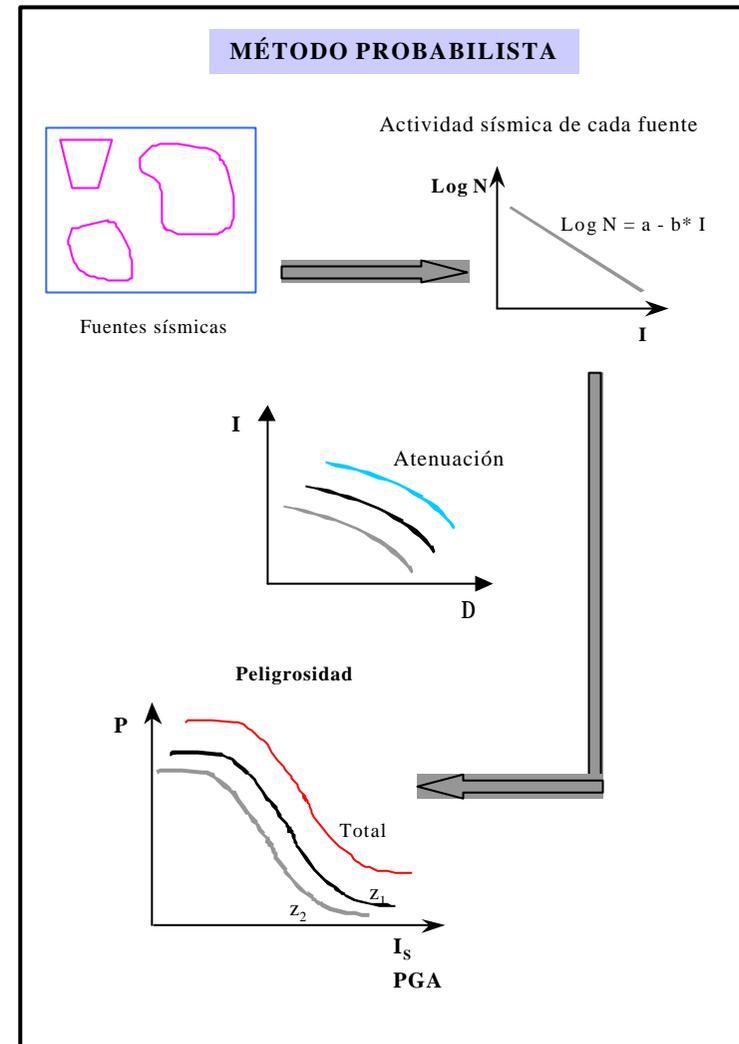
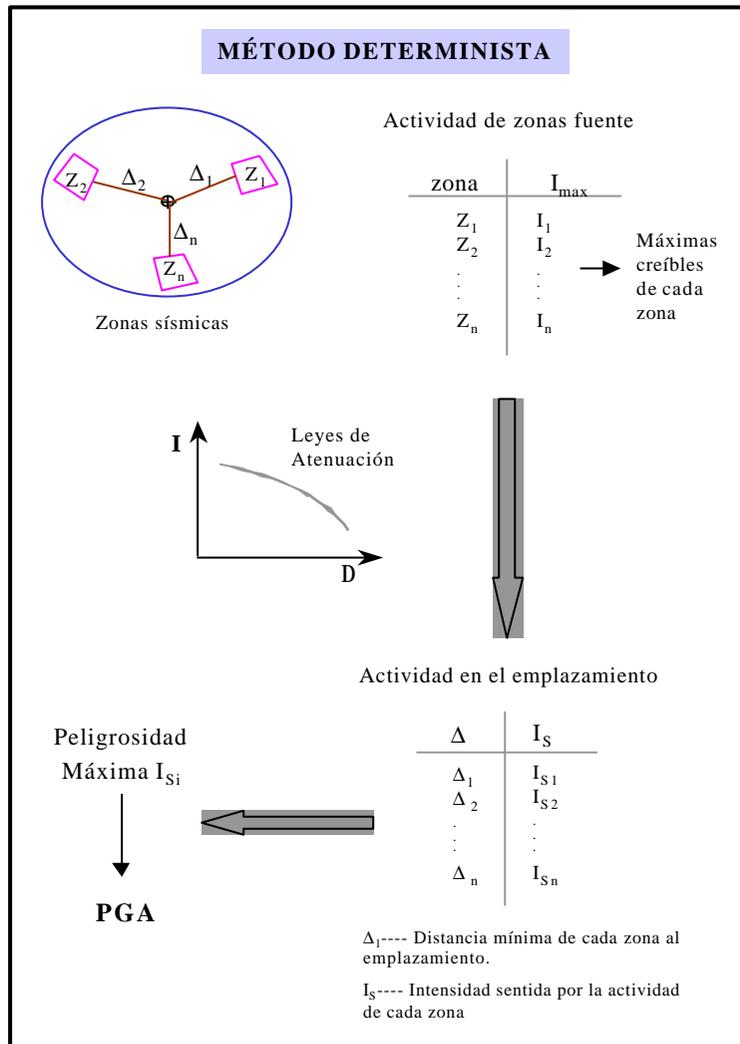
El fundamento matemático de estos métodos fue desarrollado inicialmente por Cornell (1968), y se basa esencialmente en la adopción de un modelo de zonas sismogénicas con las que se realiza una compartimentación del área de influencia, y en el ajuste de la sismicidad de cada zona a un modelo de recurrencia; sumando posteriormente la contribución de todas las fuentes para obtener la función de probabilidad que representa la peligrosidad en el emplazamiento.

Las fases a seguir con esta metodología son las siguientes:

- 1.- Definición de zonas sismogénicas en el área de influencia, con criterios análogos a los mantenidos en el método determinista zonificado.
- 2.- Definición de un modelo de recurrencia en cada fuente sismogénica. Se admite que la sismicidad se distribuye aleatoriamente y se ajusta a la ley de Gutenberg-Richter (truncada con un valor de M_{max} o I_{max}), de manera que los parámetros de dicha ley: a (relacionado con la tasa anual) y b (pendiente de la relación) resulten característicos del modelo. Además para cada zona se definen intensidades o magnitudes máximas y mínimas, que establecen los límites de validez del modelo.
- 3.- Estimación de leyes de atenuación con la distancia aplicables a las diferentes zonas, en términos del parámetro empleado para evaluar la peligrosidad (generalmente I ó PGA). La aplicación de estas leyes sobre la sismicidad de cada zona, representada por su ley de recurrencia, permite obtener la acción de las mismas sobre el emplazamiento en cuestión.
- 4.- Estimación de la peligrosidad total, sumando las probabilidades obtenidas por acción de todas las zonas que influyen en el emplazamiento.

$$H = \sum_{i=1}^n (1 - e^{-a_i}) \quad \text{Distribución temporal de Poisson}$$

siendo a la tasa anual de terremotos ocurridos en cualquier zona que den lugar a una intensidad del movimiento superior a la de referencia en el punto estudiado, y n el número de zonas.



a)

b)

Figura 5.- Esquema de los métodos de cálculo de la peligrosidad a) determinista y b) probabilista.

De esta forma, los efectos de todos los terremotos de diversos tamaños que ocurren de forma aleatoria dentro de cada una de las fuentes se integran dentro de una curva que proporciona probabilidades de excedencia para diferentes valores del parámetro del movimiento en el emplazamiento. Esta curva es una posible expresión de la peligrosidad, que a menudo se representa en términos de periodo de retorno en lugar de probabilidad de excedencia. Un ejemplo de este resultado es mostrado en la figura 6.

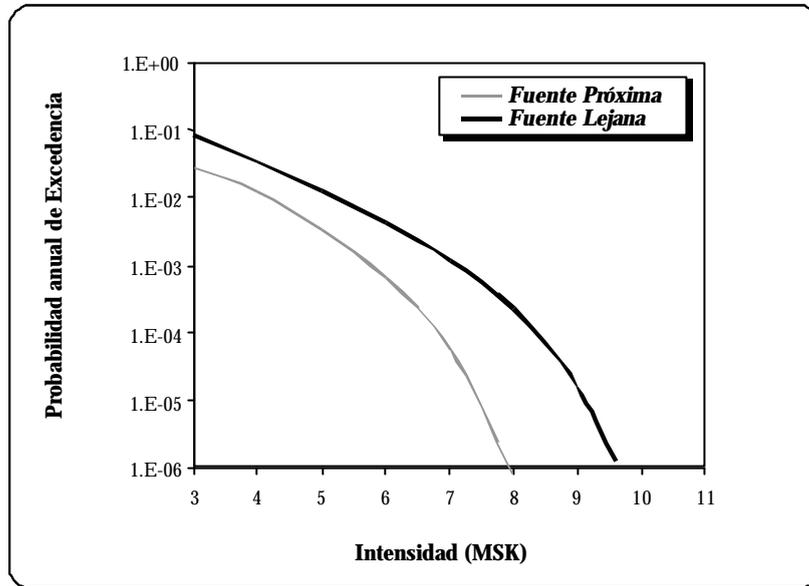


Figura 6.- Ejemplo de un resultado de peligrosidad estimado por un método probabilista zonificado (Cornell, 1968). Aparecen representadas las curvas de probabilidad anual de excedencia frente a la intensidad, separando la contribución de fuente próxima y lejana en el emplazamiento de estudio (Zona del Estrecho, de Jiménez Peña et al., 1998b).

En España, se han realizado numerosos estudios siguiendo esta metodología, entre ellos cabe citar los de Muñoz (1983) y Martín (1984), que fueron los primeros en utilizar estos métodos en emplazamientos españoles, y otros más recientes como los de Molina (1998), para el Sur de la Península Ibérica y Secanell (1999), cubriendo el área de Cataluña.

Basándose en las consideraciones teóricas anteriores se han desarrollado numerosos programas de cálculo, contemplando los aspectos prácticos del problema con ligeras modificaciones. Los más usados en la actualidad son: EQ-RISK (McGuire 1976, 1978), SEISRISK III (Bender y Perkins, 1987) y PRISK (Principia Mechanica, 1985).

Como particularidades más notables del EQ-RISK, cabe destacar el empleo de una ley Gutenberg-Richter truncada para establecer el modelo de recurrencia de cada zona, la posibilidad de introducir leyes de atenuación de diferentes parámetros y modelos matemáticos, la estimación secuencial de la peligrosidad pudiendo obtenerse la contribución de cada fuente sísmica, y el uso de una metodología probabilista zonificada para estimar la probabilidad.

El programa SEISRISK III tiene como antecedente el SEISRISK II (Bender y Perkins, 1982) y es especialmente adecuado para aplicaciones con gran número de fuentes y en un amplio conjunto de puntos. Dentro de cada fuente sísmica los terremotos se consideran eventos puntuales con una distribución normal y las fallas pueden incluirse con relaciones de ruptura de longitud finita.

La principal característica del programa PRISK es la introducción de distintos tipos de incertidumbres y resultados de análisis de sensibilidad, realizados por juicio de expertos o por generación de árboles lógicos. Es descrito con detalle por Molina (1998).

Otros métodos

Un procedimiento alternativo a los anteriores ha sido propuesto por Woo (1996), quien desarrolló un método probabilista prescindiendo de la definición de zonas fuente y caracterizando cada punto del área de influencia por una función que da la razón media de actividad $I(M, x)$. Esta función representa el número anual de eventos de magnitud M , que se esperan en la localización x ; función que se construye considerando cada terremoto como un automodelo de una secuencia de otros terremotos futuros (Kagan and Knopoff, 1980). Teniendo en cuenta el número de eventos N , ocurridos en cada punto x , durante un tiempo de observación t , la función I , se estima estadísticamente realizando un suavizado con una función de Kernel $K(M, x)$; que es una densidad de probabilidad dependiente de la magnitud.

La función es parametrizada y representada en una malla de puntos cubriendo la zona de estudio, dando cada uno su contribución a la peligrosidad en el emplazamiento. Además, todas las razones de la actividad sísmica pueden ser expresadas en términos de escenarios de peligrosidad.

Con el fundamento expuesto se han desarrollado otras versiones, basadas todas ellas en la estimación de tasas de actividad en cada celda de una cierta superficie, siendo ésta una técnica relativamente sencilla cada vez más generalizada (Frankel, 1995)

3.3. Definición de Escenarios de Peligrosidad

Para cuestiones de diseño antisísmico se requiere con frecuencia representar la peligrosidad de un emplazamiento dado en forma de historias temporales de la aceleración. Para ello, una posibilidad es seleccionar acelerogramas de terremotos reales, que puedan representar el movimiento esperado y esto requiere definir escenarios de peligrosidad. Cada escenario se caracteriza por un evento de una magnitud particular y una cierta localización, y se representa generalmente por un par magnitud-distancia. Cuando se expresa así la peligrosidad, no se integra la acción de todas las fuentes en un mismo emplazamiento, sino que se separa la contribución de las zonas más influyentes y se representa el movimiento generado por cada una de ellas.

Esta nueva solución alternativa al cálculo de la peligrosidad total, resulta más realista (Boomer et al., 1998) para aplicaciones de diseño sismorresistente. De hecho el efecto de incluir varias fuentes hace crecer la tasa asociada al movimiento para un cierto nivel de peligrosidad, pero una estructura es diseñada para resistir únicamente un terremoto, no para una serie de terremotos originados en varias fuentes que se produzcan simultáneamente.

Recientemente se han propuesto numerosos métodos de desagregación de la peligrosidad, en términos de pares (M, R) compatibles con el nivel asumido. Si la peligrosidad se estima por un método determinista, los sismos máximos potenciales o los sismos característicos de las zonas de mayor contribución, representan cada escenario de peligrosidad. La magnitud y distancia de esos sismos es empleada después para seleccionar registros reales en análogas condiciones, o para generar sintéticamente historias temporales (Joyner y Boore, 1988). Si se establece más de un escenario, debe determinarse cuál resulta más crítico para la estructura a diseñar.

Si la estimación de peligrosidad es probabilista, cada escenario ya no viene representado por un único sismo, sino que cada nivel de peligrosidad es resuelto por la tasa anual de ocurrencia de terremotos que combinen distintas magnitudes y distancias. Para un cierto valor del parámetro característico, es necesario encontrar pares (M, R) compatibles, que representen posibles movimientos para ese nivel de probabilidad fijado. Por ejemplo, un cierto valor de *PGA* asociado a determinado periodo de retorno, puede ser causado por un terremoto de elevada magnitud a gran distancia, o por otro de magnitud menor a distancia también menor. Los acelerogramas de ámbos serán diferentes, pero pueden tener la misma *PGA* y ser ámbos compatibles con el nivel de peligrosidad fijado.

Diferentes métodos han sido propuestos para identificar movimientos consistentes con el nivel de peligrosidad asumida, y efectuar una desagregación de ésta en términos de magnitud y distancia (M, R). Cabe citar los propuestos por Ishikawa y Kameda (1988), Chapman (1995), McGuire (1995) y Boomer et al., (1998). Este último hace uso de las leyes de atenuación del parámetro elegido, aplicadas en sentido inverso, para acotar los límites de magnitud y distancia de éstos pares, y para determinar el par más probable. Los métodos de desagregación cobran cada vez más importancia y son recomendados por algunas normativas, especialmente en el entorno nuclear (RG 1.165).

4. CUANTIFICACIÓN DE INCERTIDUMBRES

El proceso de estimación de la peligrosidad conlleva numerosas incertidumbres de diferente naturaleza, que hacen que los resultados finales se vean afectados de mayor o menor grado de desviación. La cuantificación de estas incertidumbres es importante para dar, como resultado de la predicción del movimiento, un valor del parámetro característico junto con el error en su estimación.

Existen esencialmente dos tipos de incertidumbres:

- Epistemológicas, inherentes al modelo asumido para la predicción del movimiento, que sólo podrían estimarse si se conociera el modelo real.
- Aleatorias, asociadas a errores en la estimación de parámetros de un determinado modelo. Pueden reducirse aumentando la cantidad y calidad de los datos existentes para estimar con mayor precisión dichos parámetros.

Ambos tipos de incertidumbres se presentan en las diferentes fases de cálculo de la peligrosidad:

- Definición de zonas sismogénicas y relaciones de recurrencia.
- Leyes de atenuación.
- Efecto de las condiciones locales del emplazamiento.

Así por ejemplo, en lo que se refiere a las leyes de atenuación, la incertidumbre epistemológica es debida a la diferencia entre el modelo funcional adoptado para representar la atenuación (reflejado por una cierta expresión matemática) y el modelo real que explica todos los procesos que tienen lugar en la propagación, por los que la energía se atenúa. Conocer el modelo real requeriría un conocimiento detallado del medio de propagación, algo poco factible, por lo que la incertidumbre inherente al

modelo siempre se presenta. La incertidumbre aleatoria es debida a los errores en el proceso de ajuste de los datos a una determinada expresión matemática que representa el modelo asumido. Cuanto mayor sea la dispersión de los datos mayor será esta incertidumbre, que disminuirá a medida que éstos ajusten mejor al modelo.

La cuantificación de las incertidumbres ha sido objeto de numerosos estudios (Toro et al., 1997) y es cada vez más generalizado el tratamiento conjunto de incertidumbres sistemáticas y aleatorias, existiendo actualmente numerosos algoritmos para su estimación junto con los resultados de peligrosidad (p.e., Woo, 1992).

Para estimar cómo influye cada aspecto del movimiento en los resultados finales de la peligrosidad, se realizan análisis de sensibilidad. Como resultado de estos análisis, parece que las mayores incertidumbres se encuentran asociadas a las leyes de atenuación. Cabe citar a este respecto el estudio realizado por Joyner y Boore (1981) que, comparando distintas leyes de atenuación, dieron desviaciones estándar en el logaritmo de la aceleración y en el logaritmo de la velocidad pico de ± 0.25 .

Joyner y Boore (1981), cuantificaron también la incertidumbre asociada al efecto fuente, englobando la caracterización sismotectónica y las leyes de recurrencia, y encontraron una desviación para el logaritmo de *PGA* de 0.13, menor que la asociada a las leyes de atenuación.

Un estudio de sensibilidad realizado en el Sur de España (Molina, 1998) ha llevado a establecer que las incertidumbres asociadas al tamaño del terremoto máximo no deben separarse de las asociadas al modelo de recurrencia, especialmente al parámetro *b* de la ley de Gutenberg-Richter.

Finalmente, la incertidumbre en el efecto de las condiciones del suelo en el movimiento, puede llegar a ser muy significativa, aunque esto ya depende de las características particulares de cada emplazamiento y cobra interés en estudios de peligrosidad específica del mismo.

Para cuantificar y calibrar las incertidumbres que conlleva todo análisis de peligrosidad y estimar la incertidumbre total se emplea actualmente la metodología de árbol lógico. Así mismo, para suplir la falta de información en la evaluación es cada vez más generalizado el procedimiento de juicio de expertos.

4.1. Método del Árbol Lógico

Un método práctico para cuantificar las incertidumbres en estudios de peligrosidad, muy utilizado en la actualidad es el denominado del árbol lógico. Su formulación ha sido hecha por Coppersmith y Young (1986), EPRI (1987) y National Research Council (1988). El método ordena la serie de estimaciones a realizar en el análisis de peligrosidad, y dirige la incertidumbre de cada estimación de una manera secuencial hasta obtener la incertidumbre de los resultados finales.

La estructura de árbol lógico es mostrada en la figura 7, donde se presenta un ejemplo de aplicación de esta metodología.

El árbol está compuesto por una serie de nodos y ramas. Cada nodo representa la estimación de un parámetro o un estado del proceso que debe ser realizado en el análisis, como son, por ejemplo, el cálculo de la magnitud máxima de una zona o la definición de una ley de atenuación.

Cada rama que parte de un nodo representa una posible alternativa discreta para el parámetro o estado del proceso en cuestión, y lleva asignada una probabilidad que indica el grado de credibilidad de que la rama represente el valor correcto. Estas probabilidades son condicionales, y se asume que todas las ramas que conducen a un nodo representan el estado verdadero de los parámetros precedentes, siendo la suma de todas ellas la unidad.

Hay diversas formas de asignar las probabilidades de las distintas ramas. La más común consiste en asumir hipótesis alternativas e indicar, mediante un factor peso, el grado de preferencia de cada una de ellas. Por ejemplo, si el sentido de desplazamiento en una falla es indeterminado, dos posibles alternativas serían considerarla normal o inversa. Una fuerte preferencia de una sobre la otra se reflejaría en pesos de 0.9 y 0.1, mientras que la igualdad de pesos significa que no hay preferencia.

Así sucesivamente se van trazando las ramas y nodos correspondientes a las distintas opciones en el cálculo de la peligrosidad -zonificación sísmica, modelo de atenuación, relaciones intensidad-magnitud, leyes de recurrencia, etc.-. Como resultado, el árbol lógico puede tener multitud de ramas, cada una de las cuales aporta una estimación de la probabilidad de excedencia del valor del parámetro elegido para representar el movimiento, con una probabilidad asociada de que ese valor sea verdadero.

De esta forma el resultado final de peligrosidad se presenta asociado a una medida de la incertidumbre de su estimación, si bien en ésta intervienen juicios subjetivos por parte de expertos, necesarios para cubrir las lagunas del conocimiento en las sucesivas fases de cálculo. La fiabilidad de la estimación es juzgada en función de la credibilidad de los expertos.

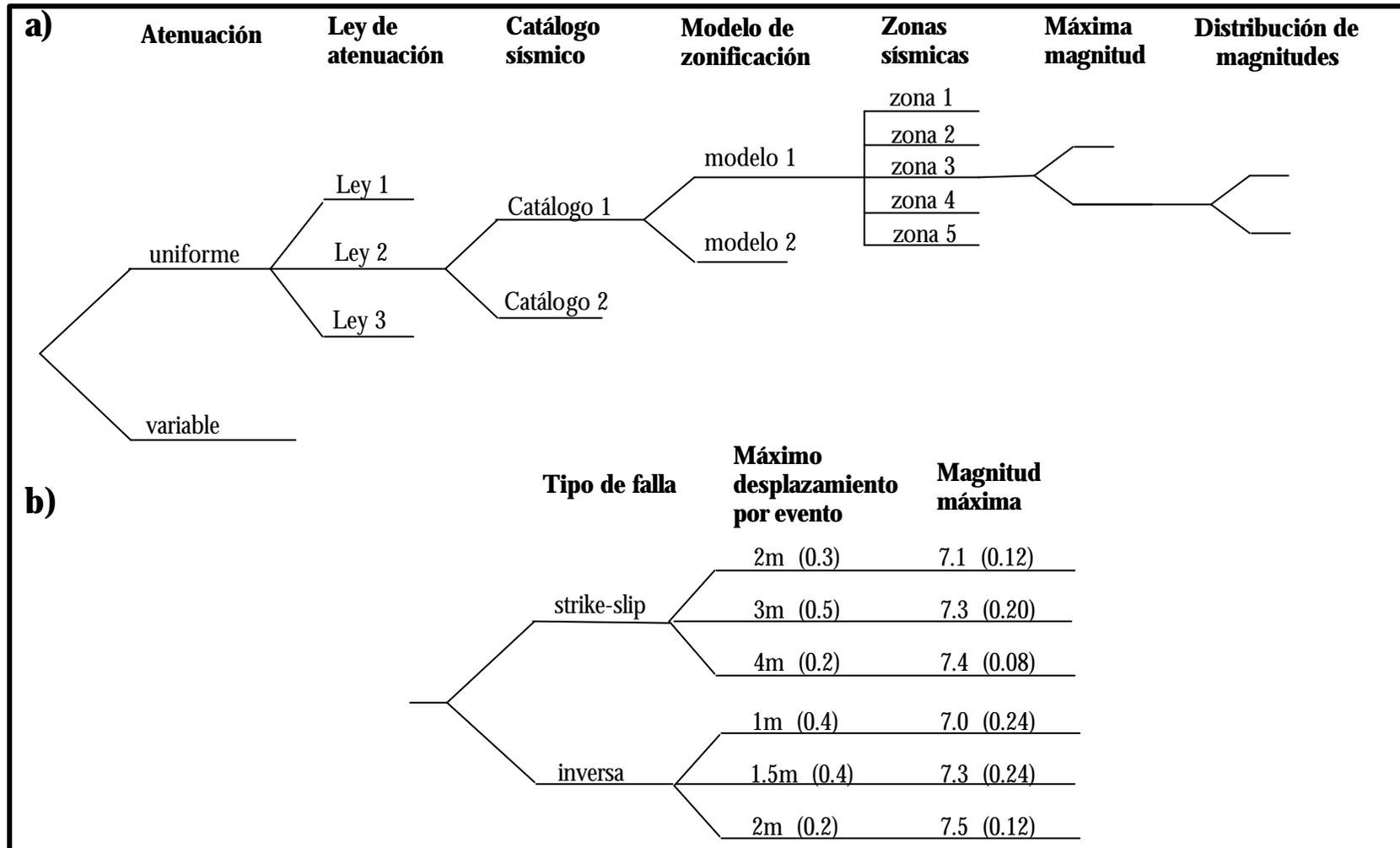


Figura 7.- a) Estructura general de árbol lógico para la estimación probabilista de la peligrosidad sísmica.

b) Ejemplo de una parte de árbol lógico, correspondiente a la estimación de la magnitud máxima. Los n^{os} entre paréntesis son los pesos asociados a cada opción.

4.2. El Juicio de Expertos

La aplicación formal del juicio de expertos (J.E.) está siendo cada día más frecuente para evaluar fenómenos relacionados con la seguridad, en los que la base del conocimiento no resulta suficientemente amplia. Éste es el caso de la peligrosidad sísmica, donde se tiene una importante laguna del conocimiento y donde además se requiere un control de incertidumbres que no puede resolverse por métodos clásicos.

El juicio estructurado de expertos es un proceso formal en el que la opinión de éstos es obtenida y calibrada en un protocolo que sigue las siguientes fases:

- Selección del equipo de expertos a opinar sobre distintas cuestiones relativas al problema, ingenieros, sismólogos, geólogos, etc.
- Descomposición del problema en sus diferentes aspectos. En el caso de la peligrosidad se discuten la zonificación sismogénica, la parametrización de modelos de recurrencia y la estimación de leyes de atenuación, fundamentalmente.
- Identificación de las fuentes de información, considerando la documentación y datos relevantes sobre la cuestión a tratar.
- Entrenamiento, familiarizando a los expertos con los procesos de objetivización de este protocolo.
- Obtención de la opinión de expertos, que deberá ser emitida finalmente de manera pre-establecida por medio de cuestionarios.
- Cambio de opiniones: se agregarán las evaluaciones individuales y tras una serie de discursos se emitirá una opinión global, que caracterice de forma adecuada la incertidumbre existente en el tema.
- Documentación del proceso, obteniendo un informe que recoja todos los aspectos en la ejecución del mismo y los resultados.

El Juicio de Expertos fue practicado por primera vez en estimaciones de peligrosidad sísmica por el Electric Power Research Institute, en 1986, (EPRI, 1986). Se encargaron a seis grupos de investigación la obtención de interpretaciones tectónicas de modelos de fuente y parámetros de caracterización de la peligrosidad.

Los equipos se constituyeron con profesionales en las diferentes disciplinas del problema (sismólogos, geólogos, ingenieros) y cada grupo estableció sus sesiones de discusión e intercambio de información, llegando cada uno a su propia interpretación y conclusiones.

Se propuso entonces, una distribución lognormal para las soluciones de los diferentes grupos y se eliminaron los valores anómalos fuera de una desviación. Una vez eliminados estos valores, se asignaba un peso a la solución de cada grupo, en función de la varianza y de la covarianza de estimaciones entre grupos. Siguiendo entonces la misma metodología de distribución lognormal se obtenía el valor esperado de la misma junto con los niveles de confianza y éstos se consideraban resultados finales del cálculo de la peligrosidad.

La opinión de expertos tiende a suplir las lagunas del conocimiento, pero en contraposición la diversidad de opiniones puede causar gran dispersión entre las curvas de peligrosidad para un mismo emplazamiento. Esto convierte en un problema crítico la forma de introducir dicha opinión, que debe ser uniformizada y calibrada (Reiter, 1990).

El juicio de expertos es requerido, fundamentalmente, en estudios de seguridad destinados al diseño de instalaciones críticas, donde el nivel de riesgo aceptable es muy pequeño y se requiere un buen conocimiento de la incertidumbre.

5. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE PELIGROSIDAD

Los resultados de toda evaluación de peligrosidad dependen del parámetro que representa el movimiento, de la extensión del estudio y de la aplicación a la que vaya dirigida. Para fines de diseño antisísmico, la peligrosidad debe ser expresada en términos de parámetros que definan las cargas sísmicas. El más comúnmente usado para ello es la aceleración pico, PGA , que presenta cierta correlación con el daño causado. Sin embargo, la PGA no tiene en cuenta el contenido frecuencial del movimiento y es independiente de la duración de la sacudida, que puede ser determinante de la respuesta dinámica de la estructura. Por ello, cobran cada vez más importancia los estudios de peligrosidad en términos de ordenadas espectrales de aceleración, $SA(\omega)$, velocidad, $SV(\omega)$, y desplazamiento, $SD(\omega)$, para diferentes frecuencias del movimiento. En cualquier caso, la estimación de la peligrosidad en función de estos parámetros es problemática cuando no se tienen suficientes registros de movimiento fuerte del suelo.

En zonas de moderada sismicidad, es generalizado el uso de intensidad macrosísmica, I , como medida de la peligrosidad, siendo además un parámetro adecuado para aplicaciones dirigidas a estimaciones de pérdidas. La intensidad es el único parámetro estimativo del tamaño de terremotos históricos, y además permite establecer la atenuación sísmica regional, a partir de mapas de isosistas. Por ello, a pesar de la subjetividad en su estimación no ha podido ser descartado como parámetro de cálculo de la peligrosidad, si bien, los resultados finales tienden a expresarse en términos de PGA , obtenida por medio de correlaciones $PGA-I$.

Una tendencia actual, es la expresión de la peligrosidad por medio de pares magnitud-distancia, característicos de los mayores movimientos que pueden registrarse en un emplazamiento dado, definiendo así escenarios de peligrosidad.

Por otra parte, si el estudio se realiza en un emplazamiento específico, los resultados serán los valores máximos de los parámetros empleados, p.e., I_{max} , o PGA_{max} , o bien, las curvas de probabilidad de superación de diferentes valores de ese parámetro, en términos de probabilidad anual de excedencia o de periodo de retorno.

Cuando la peligrosidad se evalúa en un área extensa, los valores del parámetro elegido se representan en mapas de isolíneas, que muestran la variación regional de la peligrosidad para un periodo de retorno dado, sin tener explícitamente en cuenta las condiciones locales. La peligrosidad en estos mapas puede representarse de muy diversas formas, combinando probabilidades y valores de los parámetros de cálculo, p.e., intensidades máximas esperadas en la zona, aceleraciones pico asociadas a un periodo de retorno de 100 años, probabilidades anuales de excedencia para una aceleración pico de 0.15 g, aceleraciones pico para una probabilidad de superación del 64% en 50 años, etc. Algunos ejemplos de mapas representativos de la peligrosidad en un cierto área son mostrados en la figura 8.

Los valores resultantes del cálculo tienden a expresarse con sus incertidumbres asociadas. La cuantificación de las mismas permite definir intervalos de confianza en torno a los valores medios del parámetro elegido para representar la peligrosidad. De esta forma, un parámetro como la *PGA*, puede expresarse en función de su valor medio más/menos una desviación ($PGA \pm s$), lo que implica establecer los límites del intervalo de confianza del 84%; o bien en función del valor medio más/menos dos desviaciones ($PGA \pm 2s$), definiendo el intervalo del 95%.

La cuantificación de la incertidumbre lleva a establecer así, el intervalo en el cuál se encontrará el valor real del parámetro de medida de la peligrosidad, con una cierta probabilidad, que es fijada en función del nivel de riesgo que se requiere asumir dependiendo de la aplicación a la que vaya dirigida la estimación.

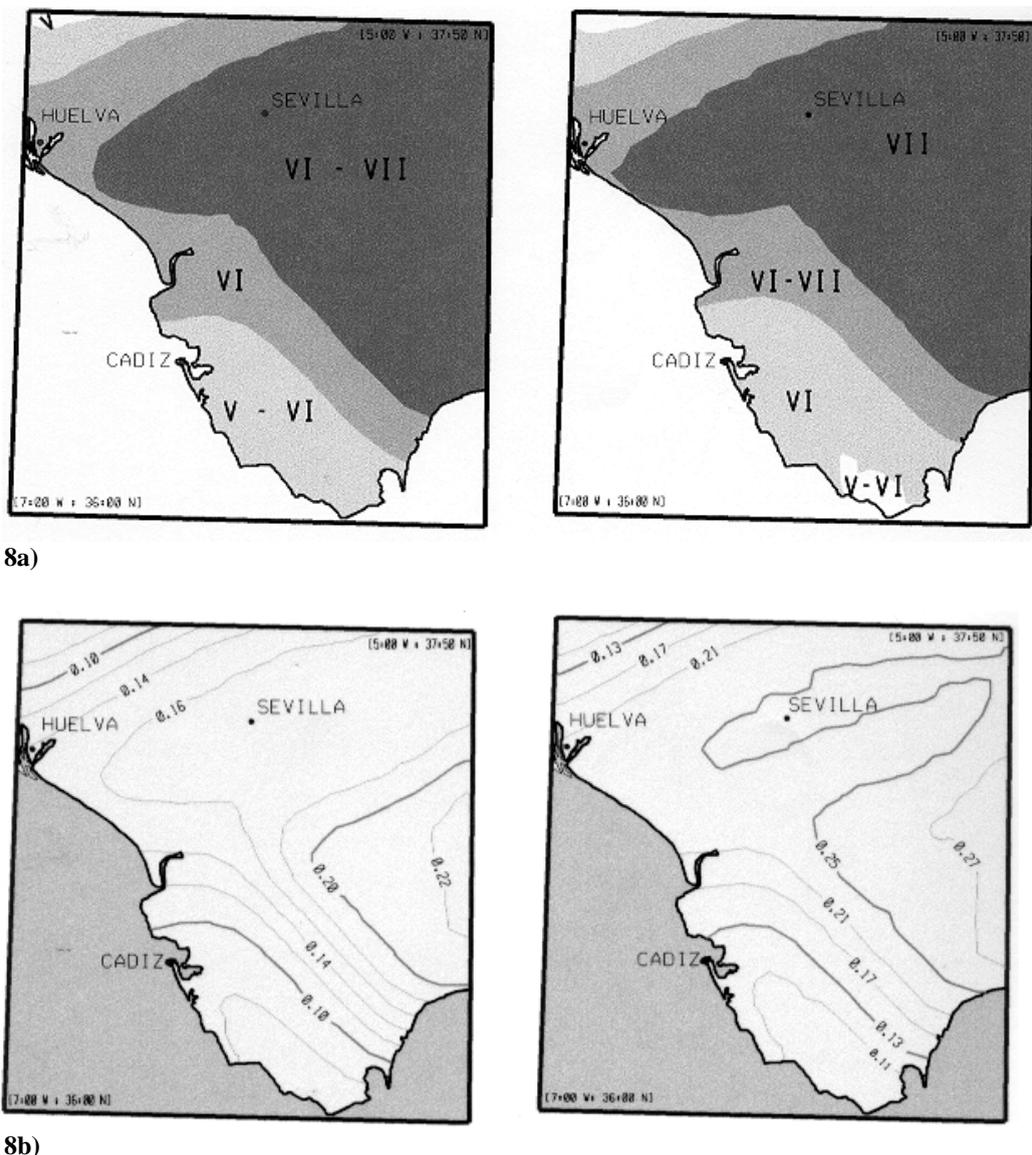


Figura 8. Ejemplos de distintos mapas representativos de la peligrosidad en la zona del Estrecho para periodos de retorno de 500 y 1.000 años

- a) En función de la Intensidad macrosísmica
- b) En función de la aceleración pico [de Jiménez Peña et al., 1998b]

6. BIBLIOGRAFIA

- BENDER, B. y PERKINS, D., 1982. SEISRISK II. A computer program for seismic hazard estimation. *USGS Open file report*, pp 82-293.
- BENDER, B. y PERKINS, D., 1987. SEISRISK III. A computer program for seismic hazard estimation. *USGS Bulletin* 1772.
- BOOMER, J.J. y MARTÍNEZ-PEREIRA, A., 1998. The prediction of strong-motion duration for engineering design. *11th World Conference on Earthquake Engineerin*, No 84, pp 8.
- CHAPMAN, M.C., 1995. A probabilistic approach to ground-motion selection for engineering design. *BSSA*, Vol 85, No 3, pp 937-942.
- COBURN, A. y SPENCE, R., 1992. Site selection and seismic hazard assessment. *Earthquake Protection*, pp 187-213.
- COPPERSMITH, K.J. y YOUNG, R.R., 1986. Capturing uncertainty in probabilistic seismic hazard assessments within intraplate environment. *Proceedings of the 3rd National Conference on Earthquake Engineering*, Charleston, South Carolina, August 24-28, Vol, 1, pp 301-312.
- CORNELL, C.A., 1968. Engineering seismic risk analisis. *BSSA*, Vol 58, pp 1583-1606.
- EPRI, 1986. QHAZARD: Seismic hazard methodology for the central and eastern United States. *Electric Power Research Institute*, Palo Alto. Vol 1-3.
- EPRI, 1987. Seismic hazard methodology for the central and eastern United States. *Seismicity Owners Group and Electric Power Research Institute*, P101-38-45-46, 2256-14, Report NP-472.
- FONTSERÉ, E., 1917. Catálogo provisional de terremotos catalanes ocurridos en los siglos XVIII y XIX. *Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona*, Vol XIII, No 18, pp 255-260.
- FONTSERÉ, E., e IGLÉSIES, J., 1971. Recopilació de dades sísmiques de les terres catalanes entre 1.100 i 1906. *Fundació Salvador Vives Casajuana*, Barcelona pp 546.
- FRANKEL, 1995. Mapping seismic hazard in the Central and Eastern United States. *Seismological Research letters*, Vol 66, No 4, pp 8-21.
- GALBIS, J., 1932-1940. Catálogo sísmico de la zona comprendida entre los meridianos 5° E y 20° W de Greenwich y los paralelos 45° y 25° N. *Instituto Geográfico, catastral y de Estadística*, Madrid, Tomo I y II, pp 1.084.
- GINER, J.J., 1996. Sismicidad y peligrosidad sísmica en la comunidad autónoma de Valencia. Análisis de incertidumbres. Tesis doctoral. *Universidad de Granada*. Vol I, II, III.
- GUMBEL, E.J., 1958. Statistics of extremes. *Columbia University Press*, New York, pp 375.
- GUTENBERG, B. y RICHTER, C.F., 1944. Frequency of earthquakes in California, *BSSA*, Vol 34, pp 185-188.
- IGN, 1998. Catálogo sísmico del IGN, 1998. *Instituto Geográfico Nacional*.
- ISHIKAWA, Y. y KAMEDA, H., 1988. Hazard-consistent magnitude and distance for extended seismic risk analysis. *Proceedings 9th World Conference on Earthquake Engineerin*, Tokyo, Vol 2, pp 89-94.
- JIMÉNEZ PEÑA, M.E.; CARRERA, E.; TERRASA, L.; BENITO, B. y GARCÍA LÁZARO, F.J., 1998a. Estimación de la peligrosidad sísmica utilizando un S.I.G. Aplicación al Sureste de la Península Ibérica. *IX Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica*, Aguadulce (Almería), 1998.

- JIMÉNEZ PEÑA, M.E., BENITO, B. y CABAÑAS, L., 1998b. Desarrollo de un sistema de información geográfica para estudios de peligrosidad en la zona del Estrecho. 100 Años de Observaciones Sismológicas en San Fernando, 1898-1998. *Jornadas Científicas, San Fernando* (Cádiz), 1998.
- JOYNER, W.B. y BOORE, D.M., 1981. Peak acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California Earthquake, *BSSA*, Vol 71, pp 2011-2038.
- JOYNER, W.B. y BOORE, D.M., 1988. Measurement, characterization and prediction of strong ground motion. Proceedings of *Earthquake Engineering and Soil Dynamics II*, GT Div/ASCE, Park city, Utah, pp 43-102.
- JONGMANS, D.; PITILAKIS, K.; DEMANET, D.; RAPTAKIS, D.; RIELP, J.; HORRENT, C.; TSOKAS, G.; LONTZETIDIS, K. y BARD, P.Y., 1998. EURO-SEISTEST: Determination of the Geological Structure of the Volvi Basin and Validation of the Basin Response. *BSSA*, Vol 88, No 2, pp 473-487.
- KIJKO, A. y SELLEVOLL, A., 1989-1990. Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files. Part I. Utilization of extreme and complete catalogs with different threshold magnitudes. *BSSA*, Vol 79, 3, pp 645-654.
- KAGAN, Y. y KNOPOFF, L., 1980. Spatial distribution of earthquakes: the two point correlation function. *Geophys. J.R. Astr. Soc.* 62, pp 303-320.
- LLNL, 1989. BERNREUTER, D.L.; SAVY, J.B.; MENSING, R.W. y CHEN, J.J., 1989. Seismic hazard characterization of 69 nuclear plant sites East of the Rocky Mountains. Report NUREG/CR-5250, *Lawrence Livermore National Laboratory and US Nuclear Regulatory Commission*.
- LÓPEZ CASADO, C.; GINER CATURLA, J.J. y PELÁEZ MONTILLA, J.A., 1990. SRA. A program for the analysis of seismic risk. In applications of personal computers in seismology. Proceedings of the *XXII General Assembly of the European Seismological Commission*, 17-22 September 1990, pp 55-58.
- MCGUIRE, R.K., 1976. EQRISK. Evaluation of earthquake risk to site. *USGS Open file report 76-67*, 90pp.
- MCGUIRE, R.K., 1978. FRISK. Computer program for seismic risk analysis using faults as earthquakes sources. *USGS Open file report 78-1007*.
- MCGUIRE, R.K., 1995. Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop. *BSSA*, Vol 85, No 5, pp 1275-1284.
- MARTÍN, A.J., 1984. Riesgo sísmico en la Península Ibérica. Tesis Doctoral. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. *Universidad Politécnica de Madrid*.
- MOLINA, S., 1998. Sismotectónica y peligrosidad sísmica del área de contacto entre Iberia y África. Tesis Doctoral. F.F.C.C., Dpto. de Física Teórica y del Cosmos, *Universidad de Granada*.
- MUÑOZ, D., 1982. Curvas de atenuación de la intensidad sísmica en Cataluña. Capítulo III de "La sismicidad en la zona comprendida entre 40° N-44° N y 3° W-5° E. NE Península Ibérica". Publicación No 190 Cátedra de Geofísica, *Universidad Complutense Madrid*.
- MUÑOZ, D., 1983. Estudio del riesgo sísmico en el Sur y Sureste de la Península Ibérica. Tesis Doctoral. *Universidad Complutense de Madrid*
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1988. Probabilistic seismic hazard analysis. *National Academy Press*, Washintong D.C., 97 pp.
- PRINCIPIA MECHANICA, LTD, 1985. PRISK Manual. Report prepared for the *Central Electricity Generating Board*, London.

REITER, L., 1991. Earthquake hazard analysis. Issues and insights. *Columbia University Press*, New York, 253 pp.

SCHWARTZ, D.P. y COPPERSMITH, K.J., 1984. Fault Behavior and characteristic earthquakes: examples from Wasatch and San Andreas fault zones. *Journal of Geophys. Res.*, 89, B7, pp 5681-5698

SECANELL, R., 1999. Evaluació de la perillositat sísmica a Catalunya: Anàlisi de sensibilitat per a diferents models d'ocurrència i paràmetres sísmics. Tesis Doctoral. Dpto. de Geologia Dinàmica, Geofísica i Paleontologia. *Universitat de Barcelona*.

TORO, G.; ABRAHAMSON, N. y SCHNEIDER, J., (1997). Model of strong motions from earthquakes in Central and Eastern North America: Best estimates and uncertainties, *Seismological Research Letters*, Vol 68, No 1, pp 41-57.

UNDRO, 1980. Natural disasters and vulnerability analysis. *Report Expert Group Meeting*, Geneva, 49pp.

U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION 10CFR100, 1973. Seismic and geology siting criteria for nuclear power plants. APÉNDICE A. *Code of Federal Regulation*, Reactor Site Criteria.

U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION 10CFR100, 1997. Seismic and geology siting criteria for nuclear power plants. Subparte B (Epígrafe 100.23). *Code of Federal Regulation*, Reactor Site Criteria.

U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Regulatory Guide 1.165 (RG 1.165), 1997. Identification and characterization of seismic sources and determination of safe shutdown earthquake ground motion. *Nuclear Regulatory Commission* March 1997.

U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (US NRC, 1997), 1997. Standard Review Plan. *Office of Nuclear Reactor Regulation*, NUREG – 0800 Rev. 3, March 1997.

VILLAMOR, P. y BERRYMAN, K.R., 1999. La tasa de desplazamiento de una falla como aproximación de primer orden en las estimaciones de peligrosidad sísmica. *Memorias 1^{er} Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Murcia, 12-16 de Abril 1999, Tomo Ia, pp 153-163.

WOO, G., 1992. Calibrated expert judgement in seismic hazard analysis. Proc. *10th World Conference on Earthquake Engineering*, July 19-24, Madrid, Vol 1, pp 333-338.

WOO, G., 1996. Kernel estimation methods for seismic hazard area source modeling, *BSSA*, Vol 86, No 2, pp 353-362.