
CAPÍTULO II

Aspectos generales del riesgo sísmico

2 ASPECTOS GENERALES DEL RIESGO SÍSMICO

2.1 Introducción

De acuerdo a la Real Academia Española la palabra **Riesgo** significa, “*Contingencia o proximidad de algún daño*”, mientras que en términos técnicos significa “*la posibilidad de pérdida o daño o exposición al cambio de daño o pérdida*” (Souter, 1996; Dowrick, 1997). La palabra **Peligrosidad**, la Real Academia Española la define como “*calidad de peligro*”, mientras que en términos técnicos se expresa como “*amenaza impuesta por ciertos fenómenos naturales, como son los huracanes, erupciones, riadas, terremotos, etc., que pueden causar consecuencias adversas a la actividad humana, impacto social negativo y pérdidas humanas y económicas severas*” (Souter, 1996; CSSC, 1999). Finalmente, la **vulnerabilidad** la Real Academia la define como “*algo que puede ser herido o recibir lesión, física o moralmente*” y técnicamente “*se utiliza como una escala para expresar las diferentes formas de responder los edificios al ser sometidos a un terremoto*” (Grünthal, 1998). Es evidente que las tres palabras tienen una relación directa entre ellas, por lo que antes de utilizarlas se debe encontrar una definición estándar que permita distinguirlas para su correcto uso. De esta manera algunos comités y trabajos científicos se han encargado de establecer una nomenclatura adecuada dentro del área de la sismología e ingeniería sísmica, que permita aclarar las diferencias existentes. Entre los comités se encuentran el Instituto de Investigaciones en Ingeniería Sísmica (EERI), la Asociación Europea de Ingeniería Sísmica (EAEE), la Comisión de Seguridad Sísmica de California (CSSC), el Servicio Geológico de los E.U. (USGS) y entre los trabajos científicos están por ejemplo, los de Dolce *et al* (1994) y el de Yépez (1996). En base a esto, el Riesgo, la Peligrosidad y la Vulnerabilidad Sísmica se pueden definir de la siguiente manera:

- **Riesgo Sísmico** “son las consecuencias sociales y económicas potenciales provocadas por un terremoto, como resultado de la falla de estructuras cuya capacidad resistente fue excedida por un terremoto”.
- **Peligrosidad Sísmica** “es la probabilidad de que ocurra un fenómeno físico como consecuencia de un terremoto, provocando efectos adversos a la actividad humana. Estos fenómenos además del movimiento de terreno pueden ser, la falla del terreno, la deformación tectónica, la licuefacción, inundaciones, tsunamis, etc.”.
- **Vulnerabilidad Sísmica** “es un valor único que permite clasificar a las estructuras de acuerdo a la calidad estructural intrínseca de las mismas, dentro de un rango de nada vulnerable a muy vulnerable ante la acción de un terremoto”.

Por lo tanto, se puede observar que el Riesgo Sísmico depende directamente de la Peligrosidad y de la Vulnerabilidad, es decir, los elementos de una zona con cierta peligrosidad sísmica pueden verse afectados en menor o mayor medida dependiendo del grado de vulnerabilidad sísmica que tengan, ocasionando un cierto nivel de Riesgo Sísmico del lugar.

Para entender mejor estas definiciones se necesita hacer una descripción más detallada de cada una de ellas, por lo tanto a continuación se muestran los conceptos generales de la Peligrosidad Sísmica, la Vulnerabilidad Sísmica y de qué forma se relacionan para obtener el Riesgo Sísmico. Es importante hacer mención del concepto de Mitigación Sísmica, que servirá como vínculo entre los resultados obtenidos en el estudio de Riesgo y las acciones o medidas que debe de tomar las autoridades correspondientes para reducirlo, mediante planes de emergencia.

2.2 Peligrosidad sísmica

Como se mencionó en la definición anterior, la peligrosidad sísmica es la probabilidad de que ocurra un fenómeno físico como consecuencia de un terremoto, como pueden ser el movimiento mismo del terreno, así como la licuefacción, los deslizamientos de tierra, inundaciones, ruptura de fallas, etc., a los que llamaremos efectos colaterales de un terremoto. El tamaño y localización de estos efectos colaterales dependerán de diversos factores, principalmente de las características geológicas y geotécnicas del lugar, pero indudablemente de las características del terremoto (hipocentro, mecanismo, intensidad, magnitud, duración, contenido frecuencial, etc.).

Por tal motivo, el primer paso en la evaluación de la peligrosidad sísmica es caracterizar las zonas sismo–tectónicas, para posteriormente entender mejor las características de los terremotos. Generalmente, en su evaluación se utilizan métodos o modelos probabilísticos simplificados de cálculo basados en el establecimiento de leyes estadísticas para definir el comportamiento sísmico de una zona, las fuentes sísmicas y la atenuación del movimiento del suelo, expresando los resultados en forma de probabilidad de ocurrencia de los distintos tamaños de los terremotos, la probabilidad de excedencia de distintos niveles de

intensidad del movimiento o a los valores máximos de aceleración esperados en un lugar y en un intervalo de tiempo determinado. Sin embargo, estos modelos involucran una gran cantidad de incertidumbres lo que lleva inevitablemente a ser calculados a partir de la extrapolación de datos, a la adaptación de estudios de otras regiones para que estos modelos sean completamente funcionales y en muchos casos a la simplificación de los mismos (Somerville, 2000).

Desafortunadamente, esta incertidumbre es más grande en áreas con una actividad sísmica esporádica, en donde los catálogos sísmicos y las bases de datos de movimientos fuertes son escasas. En algunos casos, las teorías geofísicas pueden sustituir los datos faltantes, pero las predicciones de la recurrencia de sismos y de la propagación de las ondas sísmicas no son lo suficientemente avanzadas para simulaciones teóricas que sean aceptadas como una norma para la observación de sismos locales, por lo que en muchos casos es necesario considerar el juicio de los expertos en el ajuste de los modelos para evaluar la peligrosidad sísmica, esto hace que el juicio de los expertos se considere una parte integral de la evaluación (Woo, 1992).

En esta situación, una posible estimación de la peligrosidad sísmica se puede obtener a partir del análisis de la historia sísmica del sitio, utilizando los datos macrosísmicos históricos de los que se disponga, particularmente en regiones caracterizadas por largos periodos de retorno. No obstante, esta información puede dar lugar a problemas de interpretación debido a que los datos históricos son cualitativos y fueron obtenidos en épocas completamente diferentes, sin utilizar una escala macrosísmica común. Debido a estos problemas, la caracterización de cada nivel de intensidad en un sitio tiene que ser calculado en términos probabilistas, expresando el nivel de probabilidad asociado a cada grado de intensidad (Mucciarelli y Magri, 1992).

2.2.1 Sismicidad

Actualmente el avance científico ha permitido mejorar el conocimiento acerca del origen, evaluación del tamaño y forma de propagación, entre otras características, de los terremotos dentro de la corteza terrestre. Los terremotos ocurren cuando el esfuerzo en la tierra alcanza un nivel mayor a la resistencia de la roca, causando que los lados opuestos de la misma fallen repentinamente o se deslicen violentamente pasando de un lado a otro. Estos esfuerzos pueden actuar perpendicularmente a la falla empujando las rocas entre ellas, o paralelamente a la falla moviendo las rocas unas contra otras. La resistencia de la falla está relacionada con el tamaño de estos esfuerzos y el coeficiente de fricción del material que la forma, cuando se acumula un esfuerzo suficientemente grande para sobrepasar la resistencia de la falla, puede ocurrir un terremoto produciéndose un chasquido en las rocas perdiendo el equilibrio y liberando la energía almacenada en forma de ondas sísmicas, las cuales mueven las rocas a su alrededor.

Un terremoto empieza en un punto llamado *foco* o *hipocentro* situado en la superficie de ruptura de la falla que se localiza por una latitud, longitud y profundidad (Figura 2.1), y una proyección en la superficie de la tierra, llamada *epicentro* con coordenadas de latitud y longitud únicamente. La ruptura progresa desde el hipocentro a lo largo de la superficie de ruptura a una velocidad finita, hasta que se detiene. El esfuerzo acumulado se libera

completamente al alcanzar una sección más fuerte que la falla o porque se ha llegado al final de la misma. El tiempo total del movimiento causado por un terremoto está relacionado con la longitud del tiempo necesario para que la ruptura progrese a lo largo de la superficie de ruptura completa (Nyffenegger, 1997).

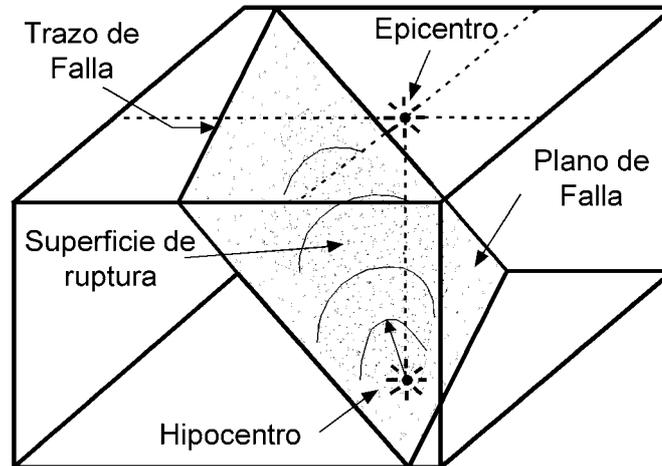


Figura 2.1. Origen de un terremoto, con su proyección en la superficie terrestre, (Nyffenegger, 1997).

Existen tres tipos principales de fallas que pueden ocurrir ya sea en la superficie de la Tierra o dentro de los Océanos (Figura 2.2), estas pueden ser: falla por deslizamiento, que corresponde a un desplazamiento horizontal relativo por los dos lados de la falla que normalmente suele tener un plano de falla vertical; una falla reversible o por compresión, en la cual las fuerzas por compresión causan una falla por cortante forzando que la parte superior continúe elevándose y la falla normal o por extensión, esta falla es la inversa de la anterior, las deformaciones por extensión jalan los bloques superiores hacia abajo del plano de falla inclinado (Dowrick, 1997; Nyffenegger, 1997).

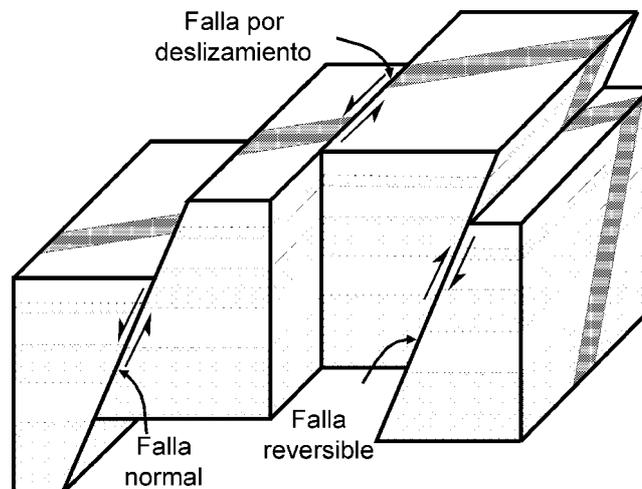


Figura 2.2. Tipos principales de falla, provocados por un terremoto (Bolt, 1999).

2.2.2 Sismicidad Global

La localización del origen de un terremoto se puede calcular por medio de las ondas sísmicas leídas en los diferentes observatorios sismográficos del mundo. Basándose en esta información se ha podido elaborar mapas con la distribución uniforme de los terremotos alrededor de la Tierra, como muestran las Figuras 2.3 y 2.4, en donde se puede observar claramente un cinturón de actividad sísmica separando grandes regiones oceánicas y continentales, con interesantes excepciones en regiones donde los terremotos son nulos (Bolt, 1999).

Como se puede observar en la Figura 2.3, la distribución geográfica de los terremotos en el planeta muestra zonas de la Tierra con una mayor actividad sísmica, siendo la primera el denominado cinturón Circum – Pacífico, que comprende toda la parte oeste del continente americano, desde Alaska hasta el sur de Chile y desde la parte norte de las islas Aleutianas, siguiendo por todas las islas del Japón hasta Indonesia y Nueva Zelanda. La segunda zona denominada Mediterráneo – Himalaya se extiende desde las islas Azores al sudoeste de la Península Ibérica, pasando por Italia, Grecia, Turquía, Persia llegando hasta el Himalaya y norte de la India y de China. Finalmente, la tercera zona esta formada por cordilleras submarinas que dividen el Atlántico en dos partes, la del Índico y la del Pacífico, frente a las costas occidentales de América del Sur. Los estudios de sismicidad de estas regiones han servido para confirmar la teoría de la tectónica de placas y la formación de los continentes.

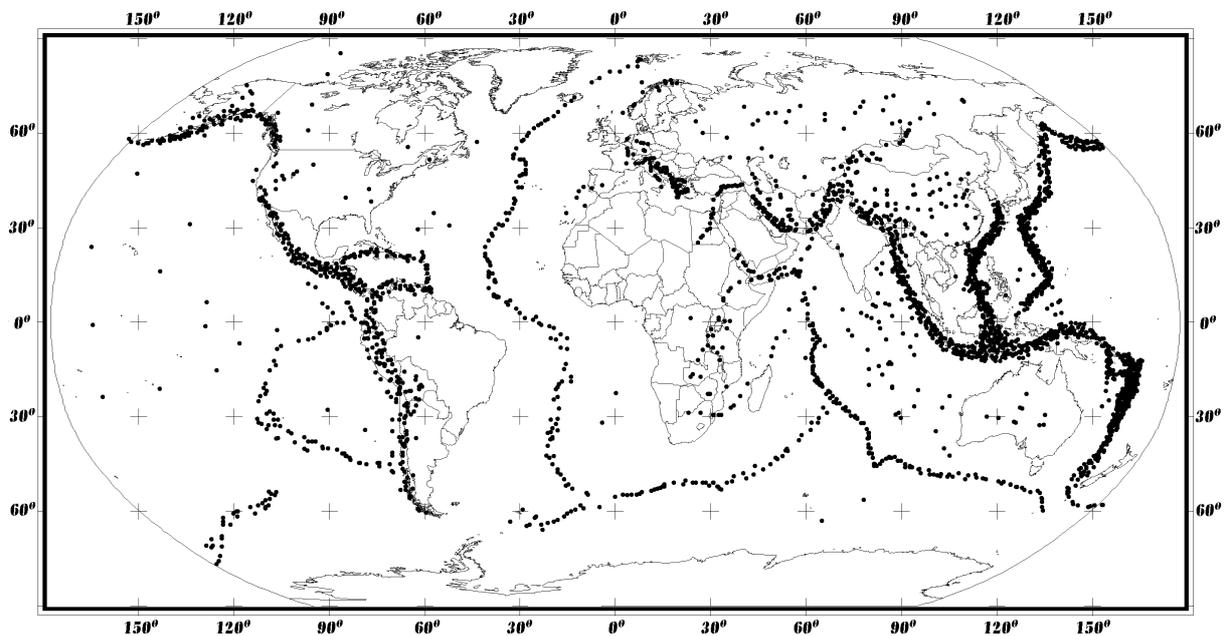


Figura 2.3. Mapa de Sismicidad global. En esta figura se muestran los terremotos ocurridos a partir de 1966, con magnitud superior a 6, en la escala Richter. (Bolt, 1999).

Uno de los trabajos más recientes sobre mapas de peligrosidad sísmica, fue el proyecto piloto desarrollado por el Programa de Evaluación de Peligrosidad Sísmica Global (GSHAP, 1999) en la Década Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales, declarada por la ONU. Este trabajo se desarrolló uniendo mapas parciales elaborados por las diferentes regiones y áreas de prueba (Figura 2.4). El mapa describe la aceleración máxima del terreno (en unidades *pga*, por sus siglas en inglés) con un 10% de probabilidad de

excedencia en 50 años, correspondiente a un periodo de retorno de 475 años. La clasificación del suelo en general se consideró roca a excepción de Canadá y EE.UU., donde se supone que las condiciones del suelo correspondían a un suelo rocoso – firme. El mapa dibuja los niveles probables del movimiento del terreno en una escala de colores de menor probabilidad (blanco) a mayor probabilidad (oscuro).

Los colores del mapa se eligieron para delinear aproximadamente la peligrosidad correspondiente al nivel actual de la misma. El color más claro representa una peligrosidad baja, mientras que el más intenso, representa una alta peligrosidad. Específicamente, el blanco y verde corresponde a valores entre 0 – 8% g (en donde, g es la aceleración de la gravedad); el amarillo y el naranja corresponden a una peligrosidad moderada entre 8 y 24% g ; el color rosa y rojo corresponde a una peligrosidad alta entre 24 y 40% g y el rojo oscuro y café corresponde a una peligrosidad muy alta, con valores superiores al 40% de g . En general, los sitios con peligrosidad alta ocurren en áreas delimitadas por las diferentes placas, como se ha comentado anteriormente.

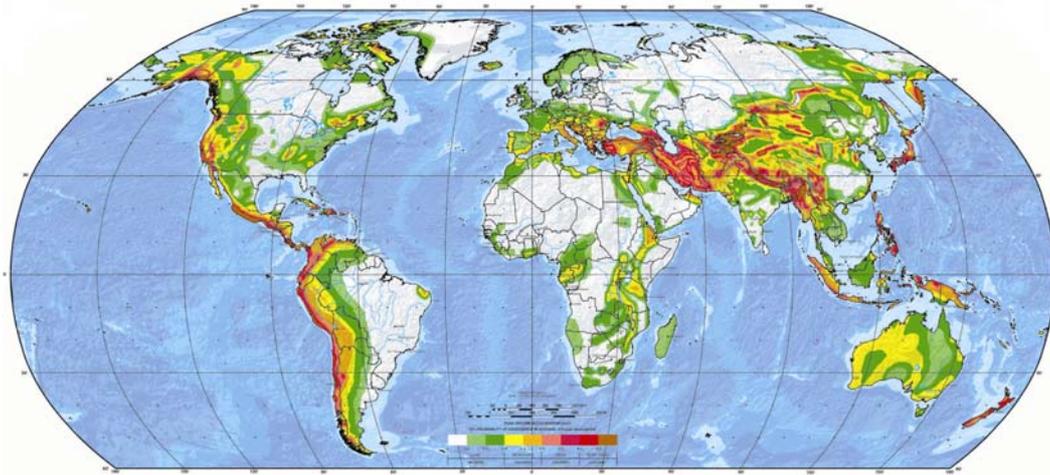


Figura 2.4. Mapa de Peligrosidad Sísmica global (GSHAP, 1999).

2.2.3 Sismicidad en España

En Europa, la actividad sísmica es muy dispersa, por ejemplo en el sur, principalmente en los países como Turquía, Grecia, Yugoslavia, Italia, España y Portugal, han muerto una gran cantidad de personas debido a los terremotos. Históricamente han ocurrido terremotos devastadores, como fue el 1 de Noviembre de 1755, al sudoeste de la Península Ibérica, produciendo grandes olas y cuyo poder destructivo causó entre 50.000 y 70.000 muertos en Lisboa y áreas cercanas, sintiéndose hasta Alemania. El 25 de Diciembre de 1884, un terremoto de intensidad X causó la muerte de 800 personas en Alicante e hirió a 1500, además destruyó unas 4.400 casas y dañó a otras 13.000 (IAG). En Messina Italia, el 28 de Diciembre de 1908 un terremoto causó la muerte de 120.000 personas y daños considerables en la infraestructura de la ciudad.

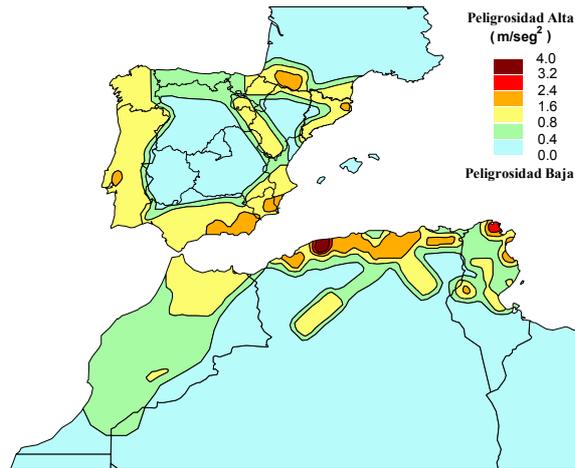


Figura 2.5. Mapa de la peligrosidad sísmica para el área Ibero-Magrebí, (GSHP, 1999).

En España, han ocurrido en los últimos años sismos de magnitud superior a 5 grados (en escala Richter), provocando daños considerables en las edificaciones. Por ejemplo, los sismos ocurridos en Andalucía los días 23 de Diciembre de 1993 y 4 de Enero de 1994 con una magnitud en ambos casos de 5.0 grados y con epicentros en la provincia de Almería, cerca de las poblaciones de San Roque y Berja, y a 20 km de la costa frente a Almerimar, Balerna y Baños respectivamente (Yépez, 1994). En Galicia el día 22 de Mayo de 1997 con magnitud de 5.1 y epicentro cercano a las poblaciones de Sárria y Becerreá y el más reciente ocurrido en Murcia el 2 de Febrero de 1999, con magnitud 5.0 y epicentro a 5 km al Norte de Mula (Mena, *et al*, 1999).

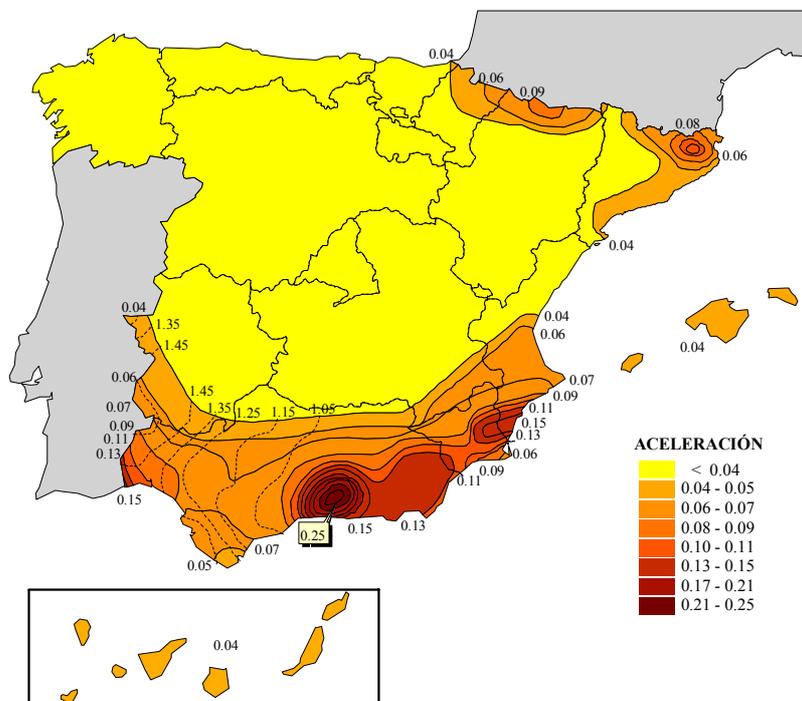


Figura 2.6. Mapa de peligrosidad sísmica de España, para un periodo de retorno de 500 años de acuerdo a la Norma de Construcciones Sismorresistente de España de 1994 (NCSE-94).

Dentro del Programa de Evaluación de la Peligrosidad Sísmica Global también se propuso un mapa de peligrosidad sísmica para el área Ibero–Magrebí (Figura 2.5). Este mapa es el fruto de la cooperación entre los países de Argelia, Marruecos, Portugal, Túnez y España, coordinados por el Instituto de Ciencias de la Tierra, Jaime Almera. El mapa constituye un primer paso hacia una evaluación uniforme de la peligrosidad en el área. Aunque para cuestiones de análisis y diseño de las estructuras se sigue utilizando el mapa de peligrosidad sísmica de la Norma de Construcción Sismorresistente de España (NCSE–94, Figura 2.6). El mapa indica las aceleraciones esperadas para un periodo de retorno de 500 años en términos de a/g .

2.2.4 Sismicidad en Cataluña

Cataluña no es una región con una alta peligrosidad sísmica, sin embargo su historia reciente no es ajena al fenómeno sísmico. Por ejemplo el Servicio Geológico del Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC) ha elaborado un mapa de intensidades máximas percibidas en Cataluña durante el siglo XX (Figura 2.7). La elaboración de este mapa se realizó a partir de datos macrosísmicos, mediante la descripción de los efectos producidos por un terremoto y recopilados en diferentes fondos bibliográficos. En este mapa se puede observar que el sismo más significativo durante el siglo pasado se localiza en la zona del Vall d’Aran con una intensidad máxima epicentral de VIII, en la escala MSK. Basándose en este trabajo y en estudios realizados por Secanell, 1999, el ICC propuso un nuevo mapa de zonas sísmicas para la comunidad de Cataluña para un periodo de retorno de 500 años (Figura 2.8).

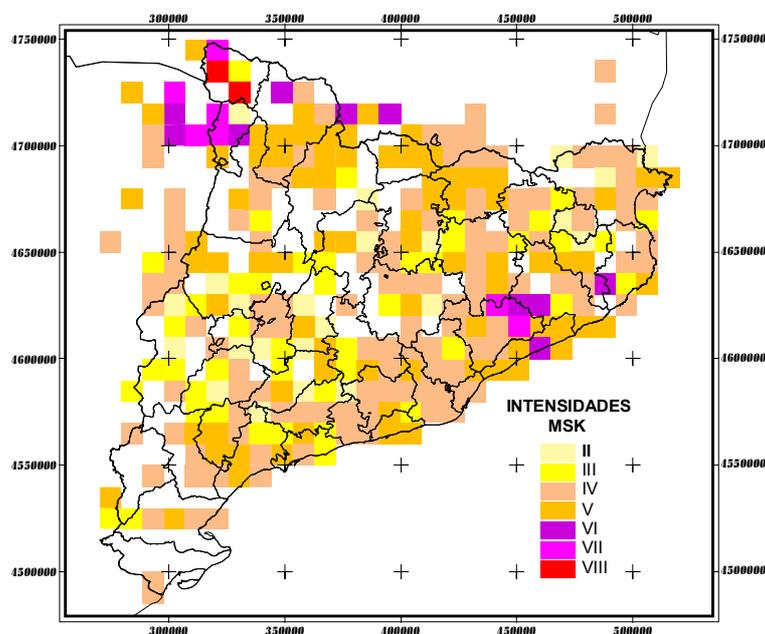


Figura 2.7. Mapa de intensidades máximas percibidas en Cataluña durante el siglo XX (Secanell, 1999; ICC).

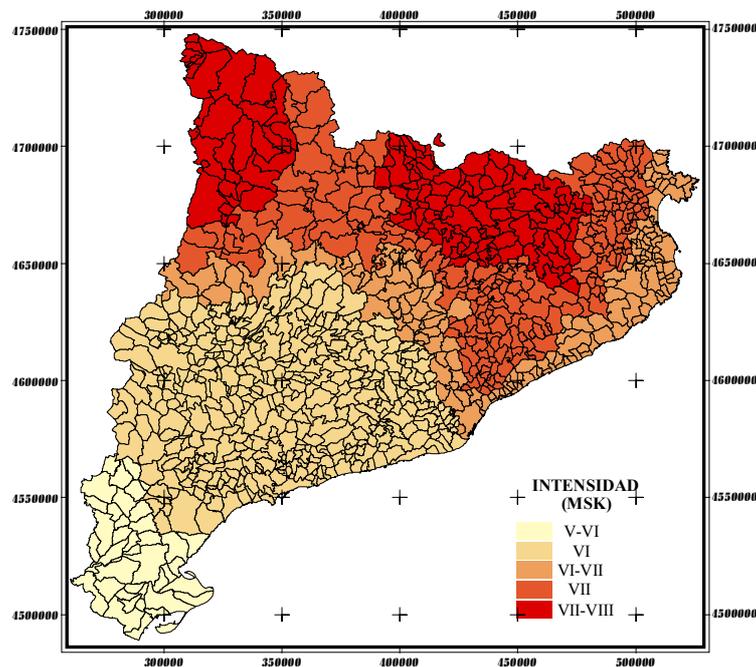


Figura 2.8. Mapa de zonas sísmicas para Cataluña con un periodo de retorno de 500 años (Secanell, 1999; ICC).

En la realización de este mapa no se tuvo en cuenta los posibles efectos de amplificación del suelo. Para considerar estos efectos Fleta, *et al* (1998), clasificó los municipios de Cataluña en 4 grupos de suelo de acuerdo al valor de la velocidad de las ondas de cizalla (V_s), proponiendo en el caso de los suelos más desfavorables incrementar en 1/2 grado la intensidad del mapa del ICC. Comparando estos resultados con los propuestos por la NCSE-94 (Figura 2.9), se puede observar que existen diferencias significativas, principalmente en las zonas de mayor intensidad lo que obliga a tener un especial cuidado cuando se utilicen estos valores en la realización de los estudios de Riesgo Sísmico.

Específicamente, para la ciudad de Barcelona existen diferencias en el valor asignado por ambos mapas, es decir, el mapa de peligrosidad sísmica de la NCSE-94, le asigna un valor de aceleración sísmica básica de 0.04 g, que corresponde a una intensidad de VI en la escala MSK de acuerdo a la ecuación propuesta en la misma norma (ec. 2.1), mientras que el mapa del ICC, le asigna una intensidad de VI – VII, cuyo valor puede llegar a VII, al tomar en cuenta los efectos de amplificación.

$$I = \frac{\left[3.2233 + \log_{10} \left(\frac{a_b}{g} \right) \right]}{0.30103} \quad \text{ec. 2.1}$$

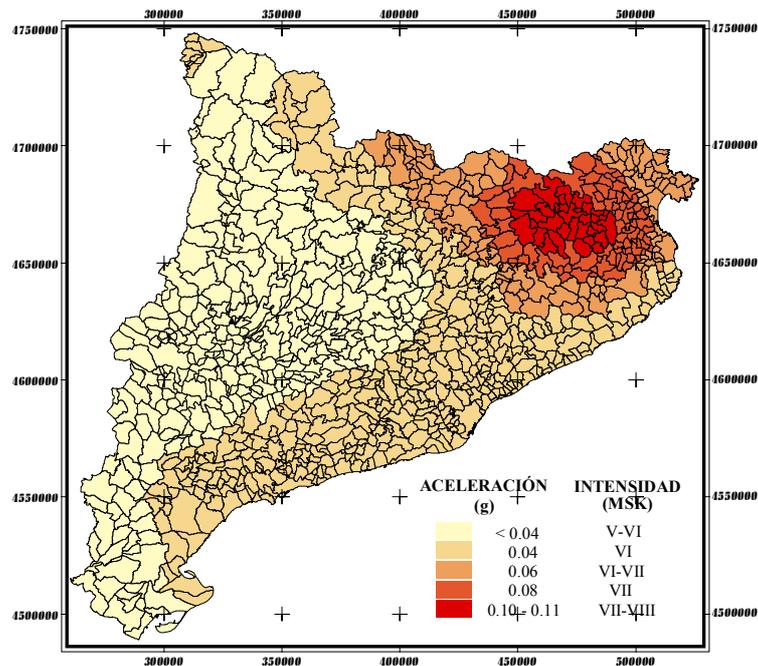


Figura 2.9. Mapa de peligrosidad sísmica según la Norma de Construcciones Sismorresistente de España (NCSE-94).

2.3 Evaluación de la sismicidad

Como se mencionó anteriormente, existen una gran cantidad de incertidumbres en la evaluación del movimiento del terreno o en lo que un terremoto específico puede generar en un sitio en particular y generalmente estas incertidumbres repercuten en la estimación de la peligrosidad sísmica del lugar. Los terremotos varían ampliamente en el tamaño o liberación de la energía, es decir, pueden ser desde pequeñas fracturas a grandes deslizamientos a lo largo de varios kilómetros en una falla. Un terremoto pequeño que ocurre a pocos kilómetros de la superficie, se puede detectar sin necesidad de instrumentos, pero un terremoto grande que ocurra a muchos kilómetros bajo la superficie, a veces sólo puede detectarse con ellos. Afortunadamente en las últimas décadas ha existido un avance en la sismología teórica y computacional que ha permitido reducir esta variabilidad en la evaluación de los movimientos del terreno. El tamaño de un terremoto se puede caracterizar por la intensidad, la magnitud o por el momento sísmico (magnitud sísmica), siendo quizás este último la caracterización más adecuada, debido a que está relacionado directamente con el producto del área de la ruptura de la falla y el desplazamiento promedio de la misma (Somerville, 2000).

2.3.1 Intensidad

En el área de la ingeniería sísmica a menudo se describen los efectos del movimiento del terreno sobre las estructuras construidas por el hombre en términos de intensidad, es decir, de una manera subjetiva ya que no depende de medidas instrumentales, sino de la información que un observador obtenga del daño o del movimiento producido por un

terremoto. Sin embargo, la naturaleza subjetiva de la intensidad sísmica crea problemas para comparar los efectos de los terremotos evaluados durante diferentes épocas de estudio ó por los efectos provocados por el terremoto. Por ejemplo, valores bajos de la intensidad dependen de lo que ha sentido la gente, valores medios dependen de la respuesta de las estructuras y valores altos describen lo que ha ocurrido cuando se produce la ruptura de una falla. Una de las escalas más utilizadas para medir la intensidad sísmica es la Mercalli Modificada, a partir de la cual se han desarrollado otras en el mundo (Anexo A).

Históricamente las escalas de intensidad tienen una importancia especial debido a que no utilizan ningún instrumento para realizar la medición. La primera vez que se utilizó el concepto de intensidad como hoy se conoce se debe a Egen, describiendo lo efectos del sismo de Bélgica en 1828, sin embargo, ya se habían realizado cuantificaciones de daño un siglo antes por Schiantarelli en Italia en 1783, para el sismo de Calabria. Fue en el último cuarto de siglo XIX cuando el uso de la intensidad llegó a ser difundida ampliamente, siendo los precursores el italiano Rossi y el suizo Forel que publicaron escalas de intensidad similares en forma separada en 1874 y 1881, respectivamente. Posteriormente, unieron esfuerzos y elaboraron la primera escala que se utilizó internacionalmente, llamada escala Rossi – Forel con diez grados de intensidad (Arnold; Musson; JMA). Ésta escala fue modificada por Mercalli, quien publicó una nueva versión considerando también diez grados. A pesar de esto, no fueron suficientes para expresar el rango completo de los efectos provocados por un terremoto. Fue entonces Cancani, quien extendió la escala a doce grados, aunque omitió profundizar en cada uno de ellos. Ya en 1912, A. Sieberg, publicó la primera versión de su escala de intensidades con doce grados dando una descripción completa para cada uno de ellos, llegando a ser la base de la mayoría de las escalas modernas de intensidad con doce grados. Posteriormente, Mercalli – Cancani – Sieberg publicaron la escala MCS, realizando ligeras modificaciones respecto a la primera versión de la escala de Sieberg (actualmente esta escala se sigue utilizando en el sur de Europa). En 1931, esta escala fue traducida al Inglés por Wood y Neumann, bajo el nombre de escala de Mercalli Modificada (MM). Fue mejorada completamente en 1956 por C.F. Richter, quien se abstuvo de agregar su nombre a la nueva versión, para evitar confusiones con la escala de magnitud de Richter.

En 1964, Medvedev, Sponheuer y Karnik publicaron la primera versión de la escala MSK agregando nuevos aspectos cuantitativos para hacerla más poderosa. La escala MSK se basó en la escala MCS, en las de Mercalli Modificada (MM-31 y MM-56) y en la de Medvedev elaborada en Rusia en 1953 (llamada GEOFIAN). Fue ligeramente modificada a mediados de los ‘70 y posteriormente en 1981, y paso a ser la escala más utilizada en Europa. En 1988, la Comisión Sismológica Europea acordó iniciar una revisión de la escala MSK, realizando varias reuniones de trabajo, hasta que en 1992, se decidió cambiar el nombre de MSK, por el Escala Macrosísmica Europea o EMS-92 (por sus siglas en Inglés “*European Macroseismic Scale*”). La versión final de la escala EMS se publicó en 1998, junto con las instrucciones textuales y gráficas para su uso (Anexo A).

Otra escala de intensidad sísmica poco conocida en América y Europa, pero no por eso menos importante es la escala Japonesa de la Agencia Meteorológica de Japón, JMA (por sus siglas en Inglés “*Japan Meteorological Agency*”), basada en el trabajo de Omori. Esta escala está formada únicamente por 7 grados, sin embargo, el grado mayor puede representar la misma intensidad de daño que el resto de las escalas.

Daño %	Rossi - Forel	Mercalli Modificada	Geofian	PRC	JMA	MSK	EMS - 98	
0	I	I	I	I	I	I	I	
			II					II
	II	II	III	II		II	III	III
			IV					
	III	III	IV	III	II	IV	IV	
			V					V
	IV	IV	V	V	III	V	V	
			VI					VI
	V	V	VI	VI	IV	VI	VI	
			VII					VII
	10	VIII	VII	VII	VII	V	VII	VII
			VIII					
20	IX	IX	IX	IX	VI	VIII	VIII	
		X						X
30	X	X	X	X	VII	IX	IX	
		XI						XI
40	X	XI	XI	XI	VII	X	X	
		XII						XII
50	X	XII	XII	XII	VII	XI	XI	
		XII						XII
70	X	XII	XII	XII	VII	XII	XII	
		XII						XII
90	X	XII	XII	XII	VII	XII	XII	
		XII						XII

Figura 2.10. Comparación gráfica de las diferentes escalas de intensidad utilizadas en el mundo (NHRC, ATC-13).

En forma gráfica, las escalas mencionadas anteriormente se comparan en la Figura 2.10, y se describen con mayor detalle en el Anexo A. Si se observa esta gráfica, a excepción de las escalas JMA y Rossi-Forel, el resto tienen valores muy similares, lo cual permite pensar que existe un relativo consenso en la evaluación de los efectos máximos causados por un terremoto. También, se puede observar como las escalas JMA y Rossi - Forel, aunque tienen menos grados, los máximos representan la misma intensidad de daño que el resto de las escalas.

El uso de la intensidad como medida de un terremoto, permite identificar zonas con un mismo nivel de daño y efectos similares con lo que se puede formar un mapa de isosistas. Al analizar estos mapas se puede observar que la intensidad decrece con la distancia, por lo que este fenómeno recibe el nombre de atenuación de la intensidad sísmica. Esta atenuación de la intensidad no sólo depende de la distancia o distribución geométrica, depende también de los fenómenos de absorción y dispersión de ondas, de la magnitud, de las condiciones del suelo, etc. En este contexto es posible generar mapas de peligrosidad sísmica calculando una intensidad epicentral y aplicando leyes de atenuación para el sitio en estudio (ec. 2.2), para esto existen varios trabajos realizados específicamente para Cataluña como son los de Canas *et al*, 1988; González, 2000, y el propuesto en este trabajo (Anexo B).

$$I_0 - I = K \cdot \text{Log} \left(\frac{\sqrt{x^2 + h^2}}{h} \right)^b + K \cdot \gamma \cdot \text{Log} \left(\sqrt{x^2 + h^2} - h \right) \quad \text{ec. 2.2}$$

En donde:

- I_o es la intensidad epicentral
- I es la intensidad atenuada con la distancia
- K factor que relaciona la intensidad y el logaritmo de la aceleración pico del sismo, que en este caso es 3
- γ atenuación anelástica (0.001 Km^{-1})
- b coeficiente de extensión geométrica (1)
- h profundidad focal en Km.

2.3.2 Magnitud

El concepto de magnitud lo introdujo por primera vez el Profesor Charles Richter en 1935, en California, definiéndolo como una medida cuantitativa del tamaño de un terremoto. Richter la relacionó indirectamente con la liberación de la energía la cual es independiente del lugar de observación. Actualmente, es la forma más usada para medir el tamaño de los sismos en todo el mundo, aunque no es la única. Se calcula a partir de la medición de la amplitud en un sismógrafo del tipo Wood-Anderson de torsión y se expresa en escala logarítmica en números reales. La escala que más se utiliza es la correspondiente a la magnitud local de Richter, denotada por M ó M_L y que se define de la siguiente manera (Canas *et al*, 1988; Dowrick, 1997):

$$M_L = \log_{10} A - \log_{10} A_o \quad \text{ec. 2.3}$$

En donde:

- M_L es la magnitud local, calculada como la diferencia entre el logaritmo decimal de la amplitud y el logaritmo decimal de la amplitud estándar
- A es la amplitud máxima registrada de un terremoto a cierta distancia
- A_o es un terremoto particular seleccionado como estándar

Para evaluar A_o , se utiliza una curva estándar propuesta por Richter que tiene la siguiente expresión:

$$\text{Log}_{10} A_o = 6.37 - 3 \log_{10} \Delta \quad \text{ec. 2.4}$$

En donde Δ es la distancia epicentral en Kilómetros. Sabiendo que la amplificación de la amplitud registrada era para ese caso 2800 veces la amplitud real de las partículas del terreno α debidas al terremoto, se sustituye en las ecuaciones 2.3 en 2.4 y se obtiene:

$$M_L = \log_{10} \alpha + 3 \log_{10} \Delta - 2.92 \quad \text{ec. 2.5}$$

Es evidente que esta ecuación sólo es válida para la zona donde fue calculada y no

puede aplicarse a otras regiones. Para esto se han desarrollado otras expresiones para calcular la magnitud, entre ellas se encuentran las de magnitud superficial (M_s), la magnitud de ondas internas (m_b), magnitud local (m_τ), etc.

Por otra parte, aunque la magnitud se define como una medida cuantitativa de un terremoto, las diferentes formas de medirla arrojan en algunos casos valores diferentes, esto se debe a que las escalas de magnitud fueron diseñadas en un principio para una clase específica de sismogramas y para un tipo único de ondas. Por ejemplo las ondas de superficie crean grandes alteraciones, pero únicamente en la capa superior de la Tierra, quizás a pocos kilómetros de la superficie. Los terremotos poco profundos excitan especialmente grandes superficies, mientras que los profundos casi no generan ondas en la superficie. Por lo tanto la magnitud superficial (M_s), generalmente subestima el tamaño de los terremotos profundos. Por otra parte, la magnitud basada en las ondas internas se han desarrollado tanto para las terremotos poco profundos como para los profundos.

2.3.3 Momento sísmico

El momento de un terremoto o momento sísmico M_o es quizás el mejor parámetro que puede utilizarse para medir el tamaño de un terremoto. Mientras que la magnitud es una medida conveniente del tamaño de un terremoto determinado directamente de un sismograma, M_o es una medida físicamente significativa del tamaño del terremoto sin estar sujeta a los problemas que se encuentran en la magnitud. De hecho, M_o está directamente relacionada con los parámetros fundamentales del proceso de falla. Esta medida está siendo cada vez más usada por los sismólogos debido a su mayor fiabilidad.

La relación entre el momento sísmico y cualquiera de las diferentes magnitudes no es inmediata, pero algunos autores utilizan un ajuste logarítmico lineal del tipo:

$$\text{Log } M_o = a + b M \quad \text{ec. 2.6}$$

2.3.4 Mecanismos de los terremotos

La radiación de las ondas a partir del foco sísmico depende del tipo de falla que lo originan. Una forma muy conveniente para estudiar los distintos tipos de falla es a partir de la construcción de mecanismos focales. Estos pueden ser simples cuando sólo se estudia un terremoto o compuestos cuando se estudian varios asociados a un mismo tipo de falla. El modelo matemático más aceptado es el que está constituido por un doble par de fuerzas sin momento resultante. La radiación de la energía desde el foco, para los distintos tipos de ondas, depende de la expresión matemática que representa el modelo correspondiente. Por ejemplo, las ondas P dan lugar a compresiones o dilataciones sobre la superficie terrestre. El mecanismo focal basado en las observaciones de compresiones y dilataciones en diversos observatorios se obtienen mediante la aplicación de un método gráfico que permite determinar el tipo de falla correspondiente al terremoto o a los terremotos. Un ejemplo del

tipo de falla con el correspondiente mecanismo focal se muestra en las Figuras 2.11 y 2.12.

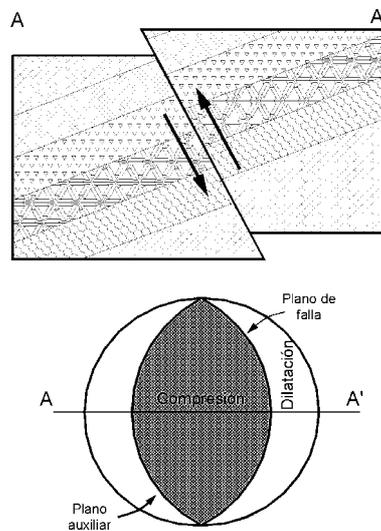


Figura 2.11. Tipo de falla de presión y mecanismo focal correspondiente (Nyffenegger, 1997).

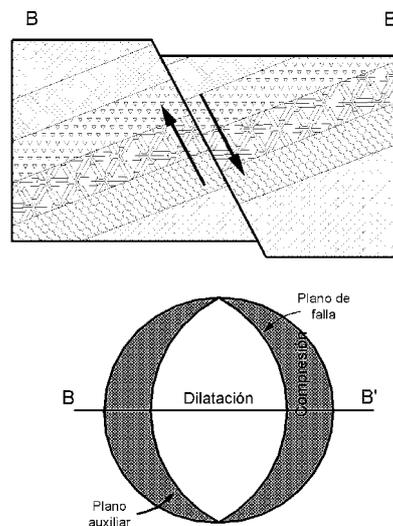


Figura 2.12. Tipo de falla normal y mecanismo focal correspondiente (Nyffenegger, 1997).

2.4 Vulnerabilidad sísmica

La otra parte importante para evaluar el riesgo sísmico de una región es la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras construidas por el ser humano. La experiencia ha enseñado, a través de los terremotos pasados que existen estructuras de una misma tipología que pueden sufrir un mayor grado de daño debido a un terremoto a pesar de localizarse en el mismo sitio (Benedetti, *et al*, 1988; EERI Committee on Seismic Risk 1989;

Yépez, 1996; EMS, 1998). Esto se debe a que existen estructuras con una calidad estructural mejor que otras, o en otras palabras, su vulnerabilidad es menor. Por lo tanto, se puede llegar a plantear que la vulnerabilidad sísmica de una estructura o grupo de estructuras, es la calidad estructural o capacidad de sus elementos estructurales para resistir un terremoto.

El que una estructura sea más o menos vulnerable ante un terremoto de determinadas características, es una propiedad intrínseca de cada estructura, es decir, es independiente de la peligrosidad sísmica del sitio de emplazamiento, por lo tanto, una estructura puede ser vulnerable pero no estar en riesgo, a menos que se encuentre en un sitio con una cierta peligrosidad sísmica. Puede observarse, desde este punto de vista que los estudios de vulnerabilidad sísmica se pueden aplicar a cualquier obra de ingeniería civil, como son edificaciones, presas, carreteras, puentes, taludes, depósitos, centrales nucleares y, en general, a toda obra en la que se requiera conocer su comportamiento ante un posible terremoto y las consecuencias que puedan producir.

Una de las primeras tareas que hay que plantearse en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras, es el alcance que tendrán los estudios de Riesgo Sísmico. Este paso es importante, ya que la vulnerabilidad sísmica se puede evaluar de una manera muy específica realizando un estudio muy exhaustivo de las estructuras o muy general como puede ser un estudio a nivel urbano. El conocimiento del comportamiento de una estructura es generalmente complejo y dependiente de un sin número de parámetros que en su mayoría son difíciles de obtener. Algunos de estos parámetros incluyen, la obtención de las características del movimiento sísmico del lugar, la resistencia de los materiales con los que está construida, la calidad de la construcción, la interacción con los elementos no estructurales, el contenido existente en la estructura en el momento del terremoto, entre otros muchos.

Sin embargo, la realización de estudios a nivel urbano, se puede reducir al conocimiento de algunos parámetros básicos para poder clasificar la estructura, o, en otras palabras al conocimiento de su calidad estructural. Normalmente, al plantear la realización de un estudio de riesgo sísmico lleva implícito la realización del estudio de grandes áreas para lo cual, los estudios a nivel urbano son los más factibles. Por lo tanto, es oportuno aclarar que estos estudios generalmente están englobados dentro de un marco estadístico, por lo que casi todas las estimaciones de la vulnerabilidad tienen niveles significativos de incertidumbres asociados. Gran parte de esto se debe a que las estimaciones se realizan sin considerar estudios detallados en la construcción, condición y comportamiento de la estructura. A menudo, la estimación de la vulnerabilidad se realiza basada en observaciones visuales sin referencia en cálculos del comportamiento estructural.

Aunque no existe una metodología estándar o procedimiento para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las estructuras, algunas instituciones (como la Comisión de Seguridad Sísmica de California, CSSC, 1999) proponen clasificarlas en tres grupos principales, de acuerdo a:

1. ***La experiencia obtenida en sismos pasados*** basada en el hecho de que ciertas clases de construcciones tienden a compartir características comunes y a experimentar tipos

similares de daño debidos a un terremoto. En base a esto se han desarrollado una serie de funciones de vulnerabilidad sísmica de edificios, para las cuales sólo se requiere identificar la clase de edificio para hacer referencia a la función.

2. **La experiencia obtenida en los desarrollos de ingeniería.** En este caso, los cálculos estructurales se utilizan para cuantificar la cantidad de fuerza y deformación inducida en la construcción por el movimiento del terremoto, y compararlas con la capacidad de la estructura. En ingeniería las estimaciones de la vulnerabilidad también tienden a tener incertidumbres asociadas con ellas, debido a que en ocasiones es muy difícil cuantificar la capacidad y resistencia exacta de la estructura y también la predicción de la respuesta.
3. **Una combinación de ambos,** en este caso se utilizan tanto los cálculos estructurales como la experiencia de los datos para estimar la vulnerabilidad, obteniendo menos incertidumbres y permitiendo la calibración de los cálculos estructurales con el comportamiento observado de los edificios.

Una división muy parecida la realizó Dolce *et al*, 1994 y fue adoptada por Yépez en 1996, para el estudio de una muestra de edificios del Eixample de Barcelona, agregando un grupo más y refiriéndose a las metodologías como *técnicas*.

1. **Técnicas directas.** Estas técnicas predicen directamente el daño causado por un terremoto en una estructura y se dividen generalmente dos grupos principales, que son las técnicas estadísticas y los métodos mecánicos. Las técnicas estadísticas se basan en la observación y cuantificación del daño causado por un terremoto, por lo que se les denomina métodos de vulnerabilidad observada. Además estas técnicas, se consideran empíricas, debido a que requieren simples investigaciones de campo y estudios post-terremoto y subjetivas cuando se emplea el conocimiento y la experiencia de expertos en la evaluación del daño (Kappos *et al*, 1995). Estos tipos de técnicas son válidas sólo en un sentido estadístico y no pueden ser aplicados a edificios individuales, pero sí a la hora de evaluar la vulnerabilidad de edificios a gran escala, incluso a toda una región, donde la aplicación de otros métodos puede resultar excesivamente costosa. La desventaja es que la información obtenida mediante estos métodos se aplica únicamente al lugar de donde provienen los datos. Por otra parte, los métodos mecánicos están basados en la modelación matemática o mecánica del comportamiento de los elementos estructurales, por lo que a estos métodos se les puede denominar vulnerabilidad calculada o vulnerabilidad teórica (Singhal y Kiremidjian, 1996; Powell y Allahabadi, 1988; Petrovski, *et al* 1992; Nocevski y Petrovski, 1994; Aktan y Ho, 1990; Miranda, 1996).

El avance de las técnicas tanto del análisis estructural como de laboratorio, ha permitido cuantificar el grado de daño de una forma muy aploximada. Estos tipos de técnicas son muy similares a las utilizadas para la evaluación de la fiabilidad y seguridad en las estructuras y se puede aplicar tanto a edificios individuales como a grupos de edificios. No obstante, su efectividad está limitada a estructuras cuyo comportamiento sísmico se puede describir por modelos teóricos. Una ventaja muy importante, es que suele ser la única alternativa para predecir el comportamiento sísmico de las estructuras en zonas de baja sismicidad, donde la tasa de ocurrencia de terremotos es muy baja y donde las fuentes de datos acerca del daño provocado por los

sismos en diferentes tipologías de estructuras son escasas, incompletas o inexistentes, aunque por otra parte, los inconvenientes de estos métodos es su alto costo, especialmente si se quiere implementar a gran escala..

2. **Técnicas indirectas.** Estas técnicas no proporcionan directamente un daño de los edificios, sino que primero evalúa un índice de vulnerabilidad de la estructura, es decir, se evalúa primero la calidad estructural del edificio ante cargas sísmicas, para relacionarlas posteriormente con los daños, normalmente mediante estudios post-terremotos y estudios estadísticos. Estas técnicas permiten distinguir las diferencias existentes en estructuras de una misma tipología, además pueden usarse en evaluaciones sísmicas a gran escala (Hassan y Sozen, 1997; Gülkan, *et al* 1996; Benedetti y Petrini 1984).
3. **Técnicas convencionales.** Son esencialmente heurísticas y aplicables exclusivamente a estudios de vulnerabilidad a gran escala. Introducen un índice de calidad independiente de la predicción de daño, el cual se utiliza para comparar diferentes edificios en la misma área de estudio (King *et al*, 1996; Rad y McCormack, 1996). Los estudios dan una medida relativa de la vulnerabilidad de una área determinada, pero son difíciles de comparar cuando se evalúan para edificios de diferentes tipologías estructurales, debido a la diferencia en los factores que se consideran en la evaluación.
4. **Técnicas híbridas.** Estas técnicas combinan características de las descritas anteriormente de acuerdo al problema que se este resolviendo. En este trabajo se usará esta técnica, ya que se utilizará la combinación de las técnicas directas e indirectas mediante el índice de vulnerabilidad (Kappos *et al*, 1995; Yépez, 1996).

Algunos trabajos que proponen metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica son la Escala Macrosísmica Europea EMS-98 (Grünthal, 1998); las normas ATC-13, ATC-25; el Método del Índice de Vulnerabilidad (Benedetti y Petrini, 1984); los Planes de Mitigación de Riesgo Sísmico de Queensland (HMC); los Sistema de puntuación del índice de vulnerabilidad sísmica propuesto en el ATC-21 y utilizados por Chang *et al*, (1995); entre otras muchas más. Es importante, aclarar que la elección de alguna metodología dependerá de los objetivos planteados en los estudios de Riesgo Sísmico y fundamentalmente de la información con que se cuente de los elementos de estudio.

Un aspecto importante en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras es definir el daño que pueda sufrir una estructura debido a un terremoto. En realidad, el daño va asociado a la vulnerabilidad, ya que una estructura es más o menos vulnerable dependiendo del daño que pueda sufrir ante un terremoto. La palabra daño se utiliza ampliamente para describir distintos fenómenos que puedan ocasionar los movimientos sísmicos a las estructuras, refiriéndose principalmente el deterioro físico.

2.4.1 Daño en las edificaciones

El daño en términos generales es un concepto complejo en su interpretación y en su evaluación, o de acuerdo a la literatura el daño estructural es un fenómeno que es muy difícil modelar analíticamente o reproducir en laboratorios. El daño como se comentó antes es un

fenómeno que afecta a cualquier tipo de estructura, sin embargo, a partir de ahora se hará referencia únicamente al daño que pueden sufrir las edificaciones, por ser parte del objetivo de este trabajo. Para esto se clasificará el daño en tres grupos principales:

Daño estructural. Es evidente que el daño estructural es el de mayor importancia, ya que éste puede ocasionar que una estructura colapse o, en el mejor de los casos, que su reparación pueda ser muy costosa. El daño estructural depende del comportamiento de los elementos resistentes de una estructura como son las vigas, columnas, muros de carga, sistemas de piso, y esto tiene que ver con la calidad de los materiales que componen dichos elementos, su configuración y tipo de sistema resistente y, obviamente, de las características de las cargas actuantes (Dolce, *et al* 1994).

La evaluación del daño se puede realizar de diferentes maneras. Una de ellas es en forma cualitativa, en la cual se establecen diferentes niveles de daño o a través de la definición de localización probable de un daño específico en una estructura. Esta forma se basa fundamentalmente en la observación e identificación de daños ocasionados por la ocurrencia de alguna acción como por ejemplo un terremoto de determinadas características. Este procedimiento se empezó a usar hace algunos años y sigue siendo una forma viable de obtener datos reales de daño para los estudios de la vulnerabilidad en zonas urbanas. Con el desarrollo significativo de modelos de daño de los elementos estructurales, se ha podido evaluar el daño en forma cuantitativa, basándose en algunos parámetros de respuesta estructural como por ejemplo, las distorsiones de piso, las deformaciones de los elementos a nivel de sección transversal y de miembro, demandas de ductilidad, de rigidez, cantidad de energía disipada, cortante de entrepiso, etc. Para medir estos parámetros se utilizan funcionales, como una medida representativa de la degradación estructural denominados indicadores de daño. Estos indicadores pueden ser a nivel de cada elemento (indicador de daño local), o a nivel de la estructura (indicador de daño global) (Park *et al*, 1985; Powell y Allahabadi, 1988; Bracci *et al*, 1989; Kunnath, *et al*, 1990; Hwang y Huo, 1994; Williams y Sexsmith, 1995, Singhal y Kiremidjian, 1996).

Una forma de generalizar la medida de daño, es mediante la normalización del indicador de daño respecto a un estado de fallo específico del elemento, tal que dicho estado se alcance cuando el indicador sea igual a la unidad, denominándose índice de daño. A pesar de todos los estudios de los métodos de daño, se debe notar que la cuantificación del mismo sigue siendo complejo y por lo tanto, no existe un criterio unificado para la definición de los modelos de daño.

Daño no estructural. Este tipo de daño esta asociado principalmente a elementos que no forman parte del sistema resistente, como pueden ser muros divisorios, ventanales, revestimientos, etc. (Villaverde, 1997). Sin embargo, a pesar de que este tipo de daño no pone en peligro el comportamiento de la estructura, sí es causa de un incremento considerable en las pérdidas económicas, como se ha podido comprobar en los sismos de Loma Prieta (1989) y Northridge (1994). El daño no estructural se evalúa generalmente mediante un índice de daño, el cual utiliza parámetros de la respuesta estructural tales como deformaciones y distorsiones que sufren los pisos de las estructuras y en ocasiones, a partir de la aceleración que experimentan los mismos.

Daño económico. Es una forma de relacionar el índice de daño estructural con las pérdidas económicas de un edificio debido a un sismo. Para esto se necesita evaluar el índice

de daño global en términos de costes financieros, es decir, se requiere conocer un índice de daño económico global de la estructura, que agrupe los índices anteriores. Generalmente se define de la siguiente manera:

$$\text{Índice de daño económico} = \frac{\text{coste de reparación del daño}}{\text{coste de reposición}} \quad \text{ec. 2.7}$$

En donde, el coste de reparación es una suma ponderada de los costes parciales de reparación, tanto de los elementos estructurales como no estructurales, por lo que se deben relacionar los costes con los indicadores de daño. Existen muchos investigadores que utilizan esta definición de daño económico como son: Tatsumi *et al*, (1992); Kappos *et al*, (1996) y Yépez, (1996).

En el anexo C se hace una recopilación de algunas clasificaciones de daño propuestas para estructuras, basadas en su mayoría en indicadores de daño. Estas clasificaciones se utilizarán como base para proponer los estados de daño que se utilizarán en el cálculo de los escenarios de daño de este trabajo.

2.5 Riesgo sísmico

Una vez revisados los conceptos de Peligrosidad Sísmica y Vulnerabilidad Sísmica se puede observar que existe una relación directa entre ellos, es decir, para que exista verdaderamente riesgo sísmico en un lugar, ambos conceptos deben producirse y existir respectivamente, es decir, el riesgo sísmico evalúa y cuantifica las consecuencias sociales y económicas potenciales provocadas por un terremoto, como resultado de la falla de las estructuras cuya capacidad resistente fue excedida.

Matemáticamente se desarrolló un marco conceptual para relacionar estos parámetros (Sandi, H., 1986), definiendo primero un Riesgo Sísmico Específico S representado como la convolución entre las probabilidades de ocurrencia de todas las intensidades posibles de los terremotos ó peligrosidad sísmica H y la vulnerabilidad sísmica de las estructuras V (ec. 2.8). Y el riesgo sísmico expresado como la convolución entre el valor de Riesgo Sísmico Específico S y el valor económico de los elementos en riesgo E , (ec. 2.9).

$$S = H \otimes V \quad \text{ec. 2.8}$$

$$R = S \otimes E \quad \text{ec. 2.9}$$

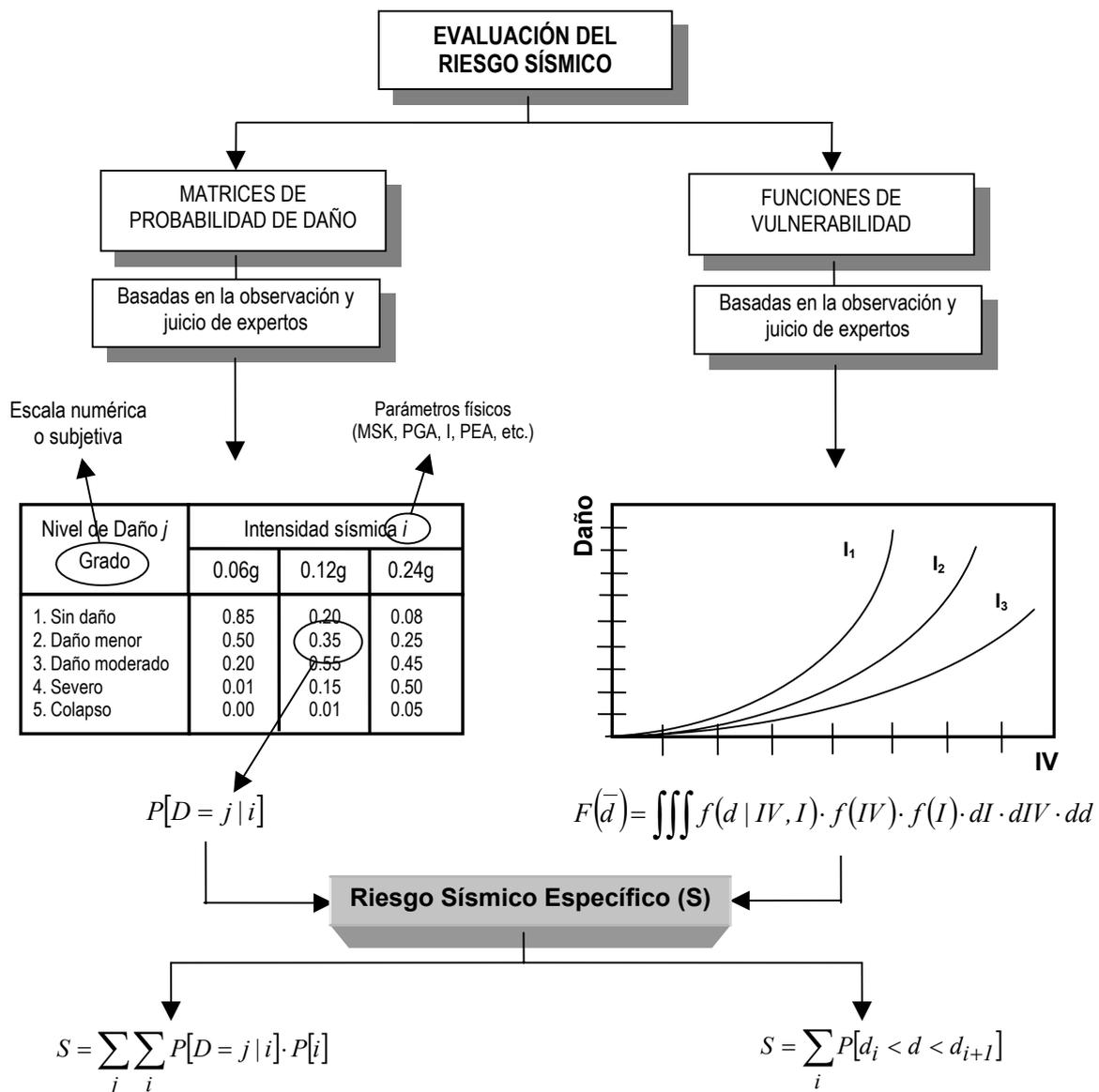


Figura 2.13. Metodologías utilizadas para la evaluación del Riesgo Sísmico Específico a nivel Urbano.

La mayoría de los estudios de riesgo sísmico a nivel urbano utilizan como parámetro del terremoto, la intensidad macrosísmica, la aceleración máxima o la aceleración máxima de manera indirecta, obtenida a partir de parámetros focales, como magnitud, distancia epicentral, etc., y para evaluar el riesgo sísmico, se utilizan las matrices de probabilidad o las funciones de vulnerabilidad, obtenidas a partir de las experiencias con terremotos pasados, ó en el caso de que la actividad sísmica sea baja, mediante técnicas de simulación (Yépez, 1996). En forma esquemática, este procedimiento se muestra en la Figura 2.13, en donde las matrices de probabilidad de daño y las funciones de vulnerabilidad, se representadas matemáticamente de la siguiente manera:

- *Matrices de probabilidad de daño*

$$S = \sum_j \sum_i P[D = j | i] \cdot P[i] \quad \text{ec. 2.10}$$

Donde S se expresa como la probabilidad condicional de que se produzca un nivel de daño j dado un sismo de intensidad i , multiplicado por la probabilidad de obtener dicho sismo para un periodo dado y todo esto para cada nivel de daño asociado a cada intensidad. De esta manera el riesgo específico S queda asociado al mismo periodo de retorno que el proporcionando por la peligrosidad sísmica.

□ *Funciones de vulnerabilidad*

$$F(\bar{d}) = \int_0^{\bar{d}} \int_0^{I_{max}} f(d | I) \cdot f(I) \cdot dI \cdot dd \quad \text{ec. 2.11}$$

$$S = F(d_{max}) \quad \text{ec. 2.12}$$

Donde $F(d)$ es la función de distribución de probabilidades de daño acumulado para $d = \bar{d}$, siempre que las variables señaladas se pueden considerar como variables aleatorias, independientes y continuas en su rango de definición. La expresión $f(d|I)$ es la función de densidad de probabilidad de daño condicionada a la intensidad I del sismo y $f(I)$ es la función de densidad de probabilidad de la intensidad del terremoto. Por consiguiente, el riesgo específico S vendrá dado por el valor máximo de la función de distribución de daño acumulado.

La realización de las operaciones de convolución requeridas para la evaluación del riesgo sísmico pueden ser simplificadas y optimizadas mediante la utilización de ordenadores, llegándose a poder abarcar estudios de grandes extensiones de territorios, incluyendo un manejo adecuado de las bases de datos y una sofisticada presentación de resultados, en este caso los Sistemas de Información Geográfica (SIG) juegan un papel fundamental.

2.6 Estudios sobre Riesgo Sísmico

Las catástrofes recientes han obligado a los gobiernos y el sector privado de todo el mundo a desarrollar estudios de riesgo sísmico para reducir los daños provocados por los terremotos. Estos estudios deben elaborarse basándose en el desarrollo del país o en la peligrosidad existente en él (Berz y Smolka, 1995). En la actualidad, existe una gran cantidad de trabajos que tratan de evaluar el riesgo sísmico en zonas urbanas, auspiciados por organismos internacionales y gobiernos, con el fin de implementarlos dentro de sus programas de protección civil, algunos de ellos se han desarrollado como normas o recomendaciones como son:

Los de la *Comisión de Seguridad Sísmica de California* (CSSC, 1999). Este trabajo hace un repaso de los conceptos básicos de los terremotos, sus efectos típicos, las causas del

daño y pérdidas debidos a ellos, la evaluación del potencial del daño en las estructuras y sistemas de equipos de la comunidad, así como aproximaciones apropiadas para la reducción del riesgo a niveles aceptables y su implementación en los planes de mitigación.

Los informes del “*Consejo de Tecnología Aplicada (ATC-13 y ATC-25)*”. Ambos trabajos fueron financiados por la *Federal Emergency Management Agency (FEMA)*, y tienen una amplia difusión y aceptación internacional, coherencia metodológica y facilidad de uso y, por lo tanto, constituyen una excelente referencia para orientar este tipo de estudios. El informe ATC-13 titulado “*Earthquake Damage evaluation data for California*”, forma parte de un proyecto para la evaluación de daño sísmico causado por los terremotos en California. En ellos se presenta información relacionada con el tema: descripciones detalladas de la metodología empleada para clasificar la información y evaluar los daños y pérdidas por causa de los terremotos en 78 tipos de estructuras, así como evaluaciones de los tiempos estimados para restablecer los servicios, interrumpidos por los terremotos, al nivel de la capacidad anterior del sismo. En cuanto al informe ATC-25 titulado “*Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifelines in the Conterminous United States*” forma parte de un proyecto con el objetivo de obtener un mejor conocimiento del impacto de la interrupción de las líneas vitales durante y por causa de los terremotos y ayudar a la identificación y priorización de las medidas y estrategias para disminuir el riesgo sísmico

El *Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado* (OEA, 1993). Este manual hace una introducción a la planificación para el desarrollo integrado y el manejo de los peligros naturales, mostrando cómo el impacto de los peligros naturales se puede reducir, además se describen las técnicas que se usan para la evaluación del peligro, incluyendo los sistemas de información geográfica, percepción remota y técnicas especiales de cartografía. Finalmente, muestra nuevos enfoques para la evaluación y mitigación en el contexto de la planificación para el desarrollo integrado.

Directrices para la mitigación del daño sísmico en Queensland (HMC, 1997). El objetivo de estas directrices es asegurar que los edificios o estructuras las cuales son responsabilidad del gobierno de Queensland, tengan un comportamiento adecuado ante la ocurrencia de un terremoto, además de dar la máxima protección a las personas después de una crisis sísmica. En otras palabras, las directrices tratan de minimizar el riesgo de los edificios existentes, así como los de reciente construcción, utilizando métodos y estrategias de diseños sismorresistentes y de mitigación, apoyados en especialistas del área.

Fundamentos para la mitigación de desastres en establecimientos de salud (OPS/OMS, 1999). Este documento trata específicamente la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los hospitales y de metodologías para la mitigación del riesgo. Además hace referencia a las medidas que se deben tomar para la mitigación, poniendo especial énfasis en los requisitos necesarios para que los establecimientos puedan mantener su función durante y después de un evento.

Además algunas ciudades ya cuentan con estudios de Riesgo Sísmico como son las de Memphis y el condado de Shelby (Chang *et al*, 1995) , los de la Ciudad de Salt Lake (King *et al*, 1994), el Distrito Urbano de Niza (Thibault y Velkiv, 1995), la Bahía de San Francisco (Anagnos *et al*, 1996), la Ciudad de Lisboa (Lopes, 1996), la Ciudad de México (Nassar *et al*, 1996), la Ciudad de Portland (Rand y McCormack, 1996), la Ciudad de Barcelona (Yépez, 1996; Mena, 1997a; SERGISAI, 1998; Chávez, 1998; Pujades, *et al*, 2000); entre otras

muchas más.

El desarrollo de otras herramientas informáticas, tales como los sistemas expertos (Knowledge Based Expert Systems) o una combinación entre SIG y sistemas expertos, se están aplicando con buenos resultados al estudio de riesgo sísmico a nivel urbano (Tatsumi *et al*, 1992; OEA, 1993; King *et al*, 1994; Polovinchik *et al* 1995; Xie *et al*, 1996; Anagnos, *et al*, 1996; Mena, 1997a; SERGISAI, 1998; Mena, *et al*, 2001).

En general todos estos trabajos coinciden en la necesidad de realizar los estudios de riesgo sísmico, para poder reducir los daños causados por los terremotos debido a la falla de las estructuras. Tratan la peligrosidad sísmica como un problema difícil de predecir y aun más de reducir, sin embargo, tratan de aclarar los conceptos básicos de los terremotos y de las medidas que se tienen que tomar para hacer frente a ellos. En cuanto a la evaluación de la vulnerabilidad, en general, todos los trabajos proponen metodologías simplificadas, basadas en índices de vulnerabilidad o en la clasificación de las estructuras en grupos predeterminados.

Los estudios de riesgo demuestran su potencialidad, analizando incluso otros elementos en riesgo, diferentes a las estructuras de edificación, como son líneas vitales, puentes, depósitos, instalaciones industriales, redes eléctricas, etc. Trabajos más recientes han construido un ambiente informático que es capaz de estimar las pérdidas probables de toda una zona urbana, inmediatamente después de ocurrir un terremoto fuerte. Esta información permite a las instituciones gubernamentales tomar las respectivas medidas de mitigación, para organizar y coordinar las actividades de emergencia, inmediatamente después de una crisis sísmica.

2.7 Mitigación del Riesgo Sísmico

Por *Mitigación del Riesgo Sísmico* se entiende “cualquier acción preventiva que se toma antes de la ocurrencia de un fenómeno natural destructivo intentando reducir sus consecuencias”. Es decir, son todas las medidas tomadas para incrementar la resistencia y mejorar el comportamiento de los edificios y líneas vitales para la seguridad de las personas y para la reducción de las pérdidas económicas y su impacto social (Sauter, 1996)

Como se estudió anteriormente, el cálculo del riesgo sísmico depende tanto de la peligrosidad sísmica del sitio como de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras. Evidentemente se puede observar que la peligrosidad sísmica no se puede modificar ya que es un factor que depende de la naturaleza. Sin embargo, sí se puede decidir edificar las estructuras en zonas lo suficientemente alejadas de las fallas, de rellenos, de zonas sismogénicas en general y de lugares de posibles asentamientos, deslizamientos, avalanchas o de un alto potencial de licuefacción y, de ser necesario, se estudiaría la posibilidad de utilizar técnicas de mejoramiento de las condiciones del suelo, siempre buscando disminuir la posible amplificación de la acción del terremoto.

En cuanto a la vulnerabilidad sísmica de las estructuras como se ha visto anteriormente, es un factor que se encuentra más al alcance de hombre, ya que corresponde a la calidad estructural de los edificios y en este caso sí se puede modificar utilizando algún

método de refuerzo, cambio de uso del edificio, entre otras acciones y, en el caso de edificios nuevos, aplicando correctamente las normas sismorresistentes y utilizando materiales de buena calidad. Para el caso de los edificios construidos se necesita realizar un estudio económico coste – beneficio, para decidir la factibilidad de su reforzamiento, readecuación, cambio de uso o destino, mejoramiento o demolición futura.

Otras estrategias para la Mitigación del Riesgo que se pueden aplicar a las zonas Urbanas es evitar las grandes concentraciones en zonas cuya peligrosidad sísmica sea alta. Para esto los Institutos de Estadística proporcionan datos de las zonas con una mayor densidad y de la evolución del crecimiento de la población, lo cual permitirá hacer planes a largo plazo, mientras que los estudios de movilidad (Martí, 2000), permitirán hacer planes a corto plazo. Además, los resultados de los estudios de riesgo sísmico, proporcionarán las zonas donde se requiera construir centros de atención y socorro frente a catástrofes, espacios abiertos que sirvan como zonas de refugio, rutas de evacuación, rutas por donde puedan entrar los equipos de rescate, etc.

El problema en la elaboración de los programas de mitigación de desastres es sin duda la realización formal de la evaluación de los estudios de Riesgo Sísmico a pesar de saber que los terremotos son una causa real de desastres. Las razones se atribuyen a la ignorancia de la existencia del riesgo o al miedo correspondiente al conocer el nivel de riesgo y la obligación que tienen para reducirlo o eliminarlo. Sin embargo, el problema fundamental del manejo de riesgo sísmico no es encontrar una solución, sino encontrar la mejor solución dependiendo de las circunstancias, valores y prioridades de cada lugar de estudio y en esto la toma de decisiones es fundamental. Un ejemplo completo de un proceso de mitigación es el desarrollado por el Comité de Seguridad Sísmica de California (Figura 2.14), en el se describen los pasos principales desde la evaluación del Riesgo sísmico, su prevención y en el caso de la ocurrencia de un terremoto del manejo de la situación (CSSC, 1999).

El proceso de la toma de decisiones que se ilustra en la Figura 2.14, esta dividido en tres pasos principales:

1. *La estimación del Riesgo.* En esta etapa se define el problema, es decir, los bienes que son propensos a sufrir daño, así como un comportamiento mínimo aceptable de las estructuras, para proteger la vida humana, y conservar la capacidad de la infraestructura para proveer servicios mínimos y minimizar las pérdidas económicas. Se cuantifica el Riesgo Base con el apoyo de técnicos, economistas, consultores para determinar el potencial de daño de vidas, heridos, pérdidas económicas o infraestructura, dependiendo de las condiciones actuales del lugar.

2. *Revisión de las alternativas de Mitigación.* Se seleccionan las bases del análisis, para determinar las restricciones bajo las cuales las instituciones podrán actuar. Una vez realizado esto se identifican las alternativas de mitigación (reforzamiento de las estructuras, cambio de uso, etc.) Analizando la disponibilidad de recursos y restricciones se pueden descartar las alternativas que no se puedan aplicar o sean poco fiables, utilizando métodos de decisión, esto se hace apoyándose en métodos de calificación, análisis de costo – beneficios y algunas teorías de multi-atributos. Una vez elegida la alternativa se describe para implementarla y después calcularla.

3. *La toma de decisiones.* En esta etapa se reúnen y organizan los datos y se estudia el

costo de la implementación sobre el Riesgo Base de cada alternativa. Se aplica el método de decisión y se comunican los resultados, explicando la forma de obtención a las partes que deben aprobar la decisión. Normalmente la toma de decisiones no es sencilla y se necesita repetir el proceso para varias alternativas, para obtener finalmente la mejor.

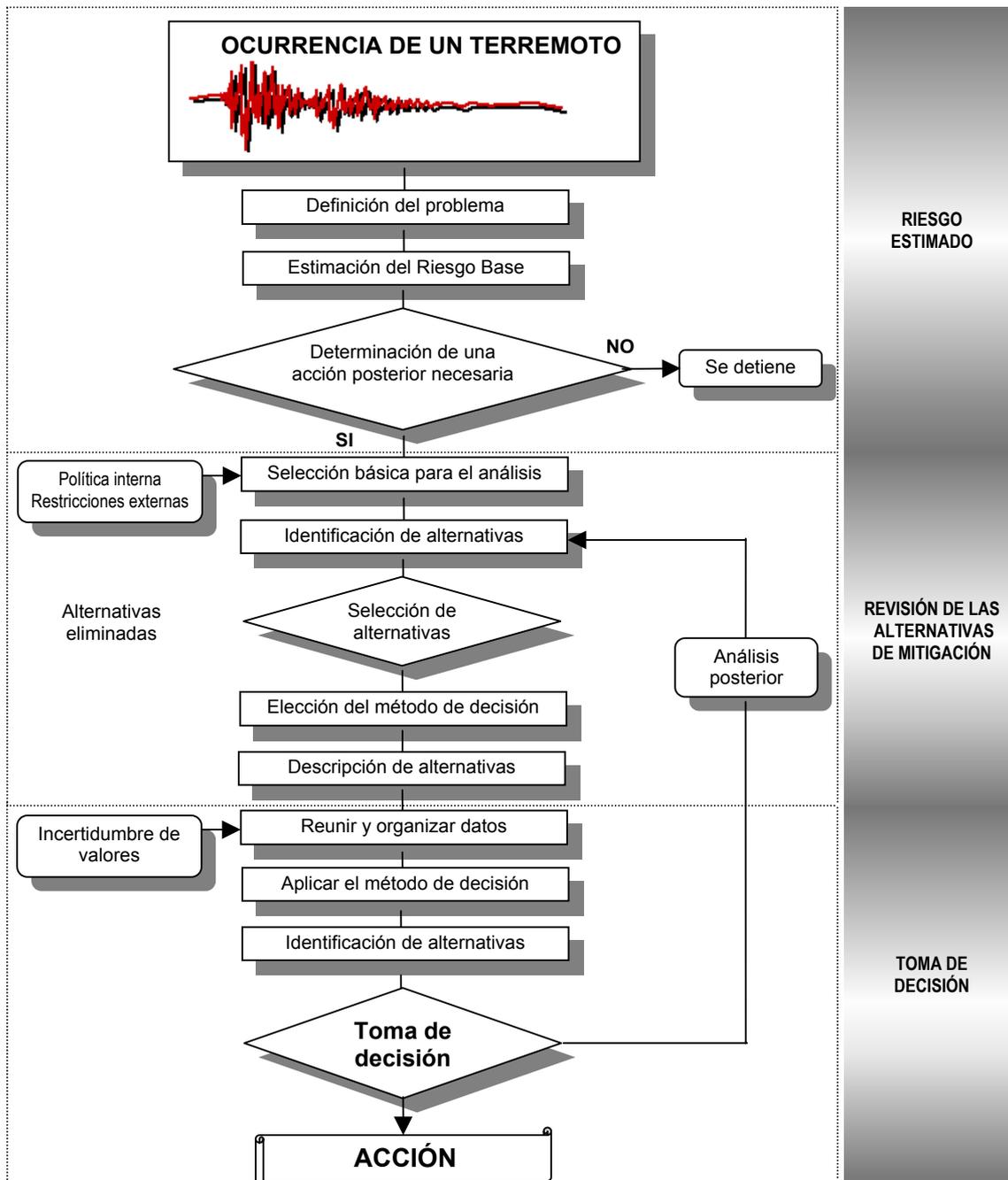


Figura 2.14. Proceso de decisión del manejo del riesgo sísmico (CSSC, 1999).

Una vez seleccionada la mejor alternativa para la mitigación del Riesgo, se necesita hacer efectivo el proceso, sin embargo, para esto se requieren fondos, estrategias, recursos humanos asignados al programa que los lleve a cabo (Figura 2.15).

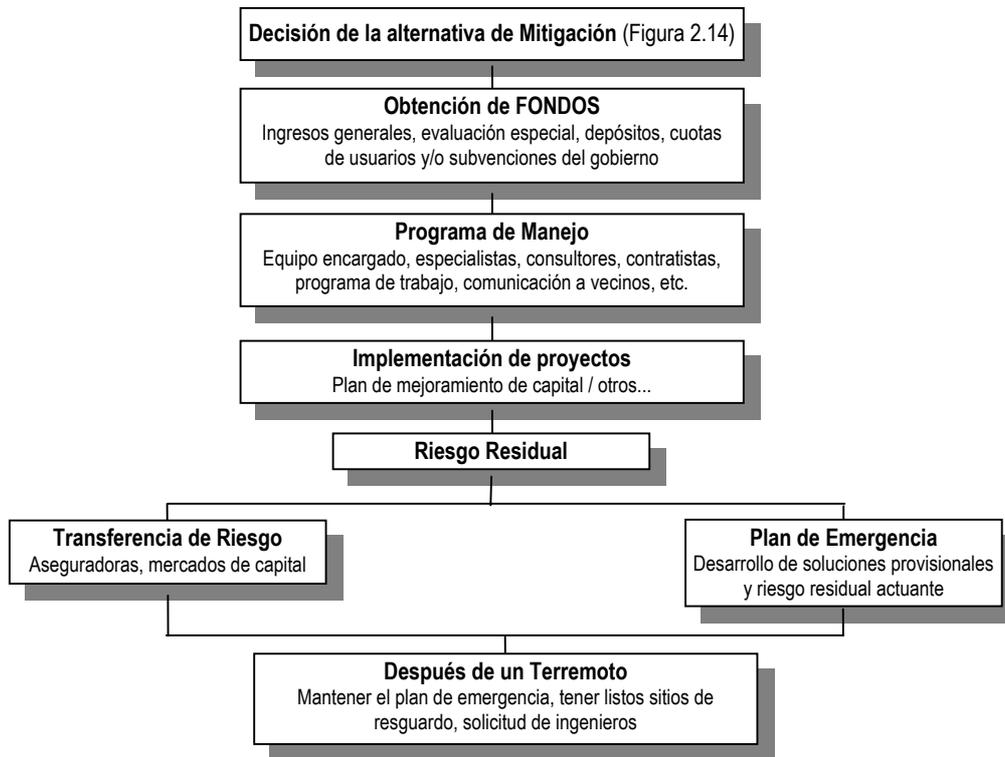


Figura 2.15. Programa de Mitigación del Riesgo Sísmico (CSSC, 1999).

2.8 Resumen

En este capítulo se realizó una revisión del estado de arte de los aspectos generales del Riesgo Sísmico, comenzando con el concepto de peligrosidad sísmica. Para esto se revisó la actividad sísmica en el mundo, junto con los mapas propuestos de peligrosidad tratando de unificar los valores de aceleración, como es el Programa de Evaluación de Peligrosidad Sísmica Global (GSHAP). Además, se revisaron a nivel regional los mapas propuestos por la Norma Sismorresistente de España (NCSE-94) y los del Instituto Cartográfica de Cataluña (ICC), para determinar el nivel de peligrosidad sísmica de la comunidad de Cataluña y sobre todo el de la ciudad de Barcelona. En estos mapas se ha comprobado que existen claras diferencias en los valores asignados a los municipios, siendo menores en general los propuestos por la NCSE-94. Por ejemplo, para la ciudad de Barcelona le asigna un valor de intensidad de VI, mientras que el mapa del ICC le asigna una intensidad de VI – VII, llegado inclusive hasta VII, al considerar los efectos del suelo.

Una de las tareas realizadas en este capítulo ha consistido en construir las coberturas en ARCINFO de los mapas de peligrosidad sísmica de la NCSE-94 y del ICC (en este último se agrega una opción para incluir los efectos de suelo), así como la elaboración de un programa que permite generar mapas de peligrosidad sísmica basados en una ley de

atenuación calculada para Cataluña. Todo esto para poder aplicarse en los estudios de Riesgo Sísmico que se llevarán a cabo en la ciudad de Barcelona.

Dentro del concepto de la peligrosidad sísmica, se revisó además la forma de caracterizar el tamaño de un terremoto mediante la intensidad, la magnitud o el momento sísmico. Se hace una comparación de algunas de las escalas de intensidad más usadas en el mundo con la escala MSK, que se utiliza en este trabajo.

El siguiente concepto que se revisó en este trabajo es el de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras y de las técnicas principales que se utilizan para evaluarla. Se hace además un pequeño resumen del concepto de daño, necesario para poder relacionar la peligrosidad sísmica y la vulnerabilidad de las estructuras por medio de matrices de vulnerabilidad sísmica o de funciones de vulnerabilidad, enmarcados dentro del concepto de Riesgo Sísmico y se comentaron algunos ejemplos de estudios de Riesgo Sísmico realizados en el mundo, cuyos resultados han servido para elaborar planes de mitigación de desastres y en algunos casos inclusive han pasado a formar parte de las normativas sismorresistentes.

Este capítulo se complementó con los siguientes tres anexos: en el Anexo A, se transcriben las principales escalas de intensidad usadas en el mundo; en el Anexo B, se propone y explica la metodología para la predicción de mapas de peligrosidad sísmica regionales quasi-instantáneas con aplicación inmediata en alertas sísmicas y activación de planes de emergencia y finalmente en el Anexo C, se recopilan diversas propuestas de cuantificación de los estados de daño y su descripción de los efectos en los edificios.