

Métodos avanzados para la obtención de escenarios de riesgo sísmico. Aplicación a Barcelona (España)

Pujades L.G.¹, Barbat A.H.², y N. Lantada³

¹Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. España., e_mail: lluis.pujades@upc.edu

²Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. España.

³Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. España

Resumen

En este artículo se presentan dos métodos de última generación orientados a la evaluación del daño sísmico esperado tanto en edificios individuales como en grandes ciudades. El primer método, al que nos referimos como método del índice de vulnerabilidad, define la acción sísmica en términos de intensidad macrosísmica y caracteriza la vulnerabilidad de los edificios mediante un índice; las funciones que permiten estimar el daño para una intensidad y un índice de vulnerabilidad dados son funciones semiempíricas basadas en datos de daño observados en terremotos pasados. El segundo método es teórico y se fundamenta en modelos de análisis mecánico del edificio que se caracteriza mediante su espectro de capacidad, a partir del que se obtienen las curvas de fragilidad; la acción sísmica se define mediante el espectro de demanda que se obtiene a partir de la reducción, por comportamiento inelástico del edificio, del espectro de respuesta 5% amortiguada del acelerograma que define el terremoto; el cruce entre los espectros de capacidad y de demanda define el punto de máxima respuesta del edificio cuando sufre el terremoto; este punto constituye el input en las curvas de fragilidad para estimar las probabilidades de ocurrencia de los diferentes estados de daño; no referimos a este segundo método como método del espectro de capacidad. El método del índice de vulnerabilidad es muy eficiente en la caracterización de la vulnerabilidad permitiendo incorporar, de forma sencilla, información complementaria de edificios del mismo tipo, pero la definición de la acción sísmica en términos de intensidad es pobre. La caracterización de la acción sísmica es más fina en el método del espectro de capacidad pero la definición de la fragilidad del edificio es computacionalmente costosa ya que requiere sofisticados análisis estructurales. Así pues, en una primera parte se establece el marco teórico de los estudios de riesgo sísmico detallando la definición del terremoto, del edificio y de las funciones de daño para ambos métodos. En una segunda parte se efectúa la aplicación a la ciudad de Barcelona en España, donde se ha podido construir una extensa y depurada base de datos que contiene las características de situación, geométricas, estructurales y constructivas de los edificios de viviendas. Con ambos métodos se analizan dos escenarios sísmicos. El primer escenario



L.G. Pujades, A.H. Barbat, N. Lantada

corresponde a un terremoto histórico ocurrido a 25 km al norte de la ciudad. El segundo corresponde al terremoto con una probabilidad de ocurrencia del 10% en 50 años, es decir, aquel con un período de retorno de 475 años. Nos referimos al primer escenario como escenario determinista y al segundo como escenario probabilista. En el método del índice de vulnerabilidad, ambos escenarios se definen en términos de intensidades macrosísmicas; en el método del espectro de capacidad se definen mediante espectros de respuesta elástica 5% amortiguada. A pesar de las diferencias metodológicas, los escenarios de daño obtenidos son consistentes y ponen de manifiesto la validez y robustez de ambos métodos. Las ciudades que, como Barcelona, están situadas en regiones de peligro sísmico entre bajo y moderado no suelen tener conciencia del peligro sísmico por lo que la ausencia total de precauciones de protección sísmica conduce a una elevada vulnerabilidad de sus edificios y, consecuentemente, a un elevado riesgo.

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios de riesgo sísmico se han convertido en una herramienta excelente para predecir y gestionar los efectos catastróficos de los terremotos en ambientes urbanos. Sin duda alguna, el siglo XX, con sus grandes luces y sombras, ha contemplado el crecimiento de la población mundial y la transformación de la sociedad agrícola y rural en industrial, tecnológica y urbana. Las grandes aglomeraciones humanas y el estilo de vida moderno aumentan el riesgo de la humanidad. En el mundo, durante este siglo XX han ocurrido más de 1100 terremotos fuertes que han causado más de millón y medio de víctimas. Ejemplos de terremotos que produjeron grandes pérdidas, sólo en el último cuarto de siglo, son los de Rumania (1977), Chile (1985), México (1985), Armenia (1988), Estados Unidos (1987, 1989, 1994), Colombia (1983, 1994, 1999), Japón (1995), Turquía y Grecia (1999), India (2001), Irán (2004) y el terremoto de Indonesia (2004), con más de 150000 víctimas producidas por el tsunami generado.

La sociedad actual vive en la cultura del riesgo y conoce relativamente bien cómo predecir, cuantificar y gestionar los riesgos de periodos de recurrencia cortos e, incluso, las sociedades desarrolladas que conviven con los terremotos, como por ejemplo Japón y el oeste de América del Norte, han aprendido a minimizar los efectos dañinos de los terremotos sobre los edificios y la población. Cada vez más, la ocurrencia de terremotos pone de manifiesto la diferencia clara del patrón de daños entre países desarrollados y países en vías de desarrollo. En la primera mitad del siglo XX aproximadamente el 75 % de las víctimas por causa sísmica se producían en países en vías de desarrollo mientras que en la segunda mitad menos del 10 % se producen en países desarrollados. Así pues, las naciones en vías de desarrollo y otras, cuya sismicidad es moderada o con largos periodos de



Métodos avanzados para la obtención de escenarios de riesgo sísmico. Aplicación a Barcelona

recurrencia, siguen siendo víctimas de las catástrofes naturales. En el primer caso, como por ejemplo El Salvador, su ritmo de crecimiento es inferior a las intensas y repetidas pérdidas económicas y humanas producidas por el impacto de fenómenos como huracanes, ciclones y terremotos, lo que, unido a sus escasos recursos, les impide salir de la rueda fatídica del subdesarrollo. En el segundo caso, la baja o moderada sismicidad o los largos periodos de retorno de grandes terremotos producen una nula preocupación por el riesgo sísmico, una ausencia total de memoria histórica y un descuido de cualquier precaución sísmica. En ambos casos, ello induce un importante aumento de la vulnerabilidad del entorno edificado y del riesgo sísmico. Ciertamente la principal causa de pérdidas humanas y económicas que producen los terremotos es el comportamiento sísmico inadecuado de las estructuras. Concretamente, en el siglo XX el colapso de edificios produjo el 75% de las pérdidas humanas por terremotos. El progreso en el diseño de estructuras se aplica a estructuras nuevas y, en menor medida, a la rehabilitación de estructuras existentes; pero existen muchas más estructuras antiguas que edificios de nueva construcción. La única forma de reducir el riesgo es reducir la vulnerabilidad de los edificios. Sin duda el análisis del riesgo debe abordarse desde una perspectiva multidisciplinar. Los aspectos geológicos, sismológicos y de ingeniería permiten estimar el peligro y el daño físico directo esperado. Pero éste no es completo si no se incluyen, además otros aspectos como el número de víctimas y otros factores sociales, de organización e institucionales, relacionados con el desarrollo y la capacidad de respuesta de las comunidades. Pero el primer paso es evaluar el daño físico directo. Este trabajo se refiere a la estimación del daño sísmico directo en edificios. En él se describen y aplican dos modelos avanzados de evaluación de escenarios de daño entendidos como la predicción de la escena creada por la ocurrencia de un determinado terremoto en una población. El primer método describe la acción mediante la intensidad macrosísmica y caracteriza el edificio mediante un índice de vulnerabilidad; las funciones y matrices que permiten estimar el daño esperado ante una acción sísmica se basan en la escala de intensidad EMS'98 (Grünthal, 1998). El segundo método describe la acción sísmica en términos de espectros de respuesta y el edificio en términos de espectros de capacidad. La evaluación del daño esperado se efectúa mediante curvas de fragilidad.

2. EL RIESGO SÍSMICO. MARCO TEÓRICO

McGuire (2004) define el riesgo sísmico como la probabilidad de que una comunidad experimente una pérdida o de que su entorno edificado sea dañado por causa de terremotos. Normalmente estas probabilidades representan el grado de pérdida o daño que es igualado o excedido en un periodo de tiempo. Esta pérdida o daño debe ser cuantificable y cuantificada y puede ser un coste económico

L.G. Pujades, A.H. Barbat, N. Lantada

absoluto, el número de víctimas en una ciudad o región o el coste de reparación de una instalación o servicio. El riesgo sísmico es calculado mediante un conjunto de terremotos, el coste o daño asociado y la correspondiente probabilidad de ocurrencia o de excedencia. Por consiguiente, un estudio de riesgo sísmico requiere la consideración de los siguientes aspectos: 1) el terremoto; 2) el edificio o bien expuesto, 3) las funciones de daño o funciones de pérdida; 4) el análisis de riesgo; 5) la toma de decisiones. Este estudio se refiere a los tres primeros: el terremoto, el edificio y el daño esperado. Los dos restantes requieren estudios multidisciplinares en los que participen los responsables de la protección civil y de la planificación y gestión de emergencias.

2.1 El terremoto: peligrosidad sísmica

El terremoto define la acción sísmica mediante una variable o un conjunto de variables, las cuales pueden ser definidas desde una óptica probabilista o determinista. En el caso *probabilista* se define la frecuencia anual de excedencia de un determinado nivel del movimiento del suelo. También suele darse en términos de probabilidad de excedencia durante un periodo de tiempo o mediante su periodo de retorno. Por ejemplo, las prescripciones de las normas sísmicas suelen usar típicamente la acción esperada con una probabilidad de excedencia del 10 % en 50 años, que corresponde a un periodo de recurrencia de 475 años. Los 50 años corresponden a la vida media de los edificios y el 10% suele ser un nivel de riesgo aceptable. Ambos parámetros pueden variar en función de las características del análisis de riesgo. En el caso *determinista* se establece un terremoto característico que se utiliza para efectuar el análisis. Habitualmente, se utiliza el terremoto más fuerte ocurrido en la región, también llamado máximo terremoto histórico. Los *escenarios sísmicos* definen los niveles de movimiento esperado del suelo en la zona de estudio, es decir, definen la distribución espacial del parámetro o parámetros que definen la acción sísmica. Es obligatorio que los escenarios sísmicos incluyan los efectos locales, por ejemplo de suelo, debidos a las características topográficas o geológicas de la ciudad. Las incertidumbres en la definición de la acción son altas, particularmente en zonas de peligro sísmico moderado debido a los enormes periodos de recurrencia de los terremotos y, en consecuencia, a la pobreza y crudeza de los datos disponibles.

Otro aspecto fundamental y controvertido es la caracterización del movimiento del suelo. Definir la acción mediante un solo parámetro, llámese intensidad macrosísmica o máxima aceleración del suelo, es útil y cómodo pero insuficiente. La ocurrencia de los terremotos y el daño observado han puesto de manifiesto la complejidad de la aceleración sísmica y de la respuesta de los edificios. La tendencia actual es definir la acción mediante espectros de respuesta compatibles con acelerogramas reales. Con todo, especialmente en aquellas regiones donde sólo existen datos macrosísmicos, el amplio periodo histórico cubierto por la intensidad



Métodos avanzados para la obtención de escenarios de riesgo sísmico. Aplicación a Barcelona

macrosísmica puede aconsejar utilizar este parámetro para estudios de riesgo que permiten aproximaciones razonables a la predicción del daño esperado. En zonas con registros de aceleración o con conocimientos de fuente y camino es preferible usar espectros de respuesta observados o sintéticos. McGuire (2004) resume los principales métodos para la estimación probabilista del peligro sísmico. Ejemplos de métodos de análisis de daño y riesgo que utilizan la intensidad son: el método italiano (Angeletti et al., 1988; Benedetti y Petrini, 1984; Bendetti et al., 1988; Barbat et al. 1996, 1998; Barbat 1998) y las instrucciones ATC-13 (1985) y ATC-25 (1996). Hazus'99 (2002) define la acción en términos espectrales y en el proyecto Risk-UE, que ha proporcionado herramientas para el análisis de riesgo sísmico en ciudades europeas, se proponen métodos basados en la intensidad macrosísmica y en valores espectrales (Milutinovic y Trendafiloski, 2003; Giovinazzi y Lagomarsino, 2002; Giovinazzi, 2005; Lagomarsino y Penna, 2003).

Para el análisis del daño esperado se definen 2 escenarios sísmicos. El primero corresponde a un terremoto histórico, ocurrido a 25 km al norte de la ciudad. El segundo es el terremoto con una probabilidad de ocurrencia del 10% en 50 años. Nos referimos al primer escenario como *escenario determinista* y al segundo como *escenario probabilista*. En el *método del índice de vulnerabilidad* las acciones sísmicas se definen en términos de intensidades macrosísmicas EMS'98 (Grünthal 1998); en el *método del espectro de capacidad*, los sismos se definen mediante espectros de respuesta elástica 5% amortiguada, compatibles con el Eurocódigo (EC-8, 2004).

2.2 El edificio: matrices tipológicas, vulnerabilidad y capacidad

El concepto de vulnerabilidad sísmica de un edificio se relaciona con su capacidad resistente. Dos edificios tienen la misma vulnerabilidad cuando sometidos a la misma acción sísmica sufren el mismo daño. Un edificio es más vulnerable cuando el daño esperado es mayor. Por lo tanto los conceptos de vulnerabilidad y daño sísmico no son independientes y, frecuentemente, esta relación puede inducir a una cierta confusión conceptual. De hecho las iniciativas americanas como ATC's y Hazus obvian el concepto de vulnerabilidad y, para cada tipo de edificio, definen directamente funciones de daño del tipo:

$$D=f(c|e) \quad (1)$$

donde D indica el grado de daño esperado por un edificio tipo e cuando se halla sometido a una acción sísmica cuantificada mediante el parámetro c .

Este tipo de funciones que, por ejemplo, el ATC-13 y ATC-25 definen para un gran número de edificios e instalaciones, se utiliza para predecir el daño esperado para un escenario sísmico concreto. Algunas iniciativas europeas como, por ejemplo, el método italiano, introducen la vulnerabilidad mediante una variable explícita. Cada

L.G. Pujades, A.H. Barbat, N. Lantada

edificio, estructura, infraestructura o servicio puede calificarse mediante una clase de vulnerabilidad (Grünthal, 1998) o puede cuantificarse mediante un índice que, en general, vale cero para el caso nada vulnerable, es decir, no se espera daño, y vale 1 para el caso más vulnerable, es decir, para intensidades sísmicas relativamente bajas se espera un daño importante o incluso el colapso. En estos casos, en la determinación de funciones de daño, es decir en las funciones del tipo de la ecuación (1), la variable e , que define el edificio, se sustituye por un índice de vulnerabilidad I_v . Sandi (1983), Wilches-Chaux (1989), Cardona y Barbat (2000) y Barbat *et al.* (2006) discuten aspectos conceptuales relacionados con la tipificación de los edificios y su vulnerabilidad. Definimos a continuación las variables y conceptos utilizados en este trabajo, en el que sólo nos referimos a edificios convencionales residenciales.

BTM (Building Typology Matrix) o matriz tipológica

Dada una ciudad o entorno edificado, una BTM o matriz tipológica es una clasificación de los edificios según clases o tipos. Probablemente el ejemplo más sencillo de matriz tipológica es la de la escala MSK, donde los edificios se agrupan de acuerdo a sólo tres clases: A, B y C. En el *método del espectro de capacidad* los edificios se clasifican mediante una BTM. Para cada tipo de edificio se define su capacidad y fragilidad. Los conceptos de capacidad y fragilidad se definen más abajo.

Clases e Índices de Vulnerabilidad

Constituyen una forma alternativa de clasificar los edificios. Por ejemplo la escala macrosísmica europea EMS'98 establece 6 clases de vulnerabilidad: A, B, C, D, E y F. A diferencia de la clasificación de acuerdo a una BTM de tipos constructivos, el concepto, clases e índices de vulnerabilidad hacen referencia, generalmente implícita, al comportamiento sísmico esperado y, por consiguiente, diferentes tipos constructivos pueden estar bien representados por una misma clase o índice de vulnerabilidad. En el *método del índice de vulnerabilidad*, los edificios se caracterizan mediante un índice de vulnerabilidad. La estimación del daño se efectúa a partir de la definición de funciones de daño del tipo definido en la ecuación (1)

Curvas y Espectros de Capacidad

Las curvas y espectros de capacidad permiten caracterizar el comportamiento resistente de los edificios de forma analítica. Aunque un edificio de planta rectangular, cuando es sometido a un movimiento no estacionario tridimensional, tiene diferentes características según las dos direcciones ortogonales en general, para evaluar el daño esperado, el edificio puede ser bien representado mediante un modelo sencillo de un grado de libertad. Los métodos analíticos de estimación de



Métodos avanzados para la obtención de escenarios de riesgo sísmico. Aplicación a Barcelona

daño tienen en cuenta el comportamiento no lineal de una estructura durante movimientos sísmicos fuertes. Una curva fuerza-deformación cuantifica, de forma simplificada, la no linealidad y es característica de la estructura que representa. La curva de capacidad muestra la fuerza lateral que se requiere para causar un determinado desplazamiento. Una forma conveniente y equivalente de representar la curva de capacidad es en el formato (Sd, Sa) , siendo respectivamente Sd y Sa , las aceleraciones y desplazamientos espectrales.

Este tipo de diagramas muestran la aceleración espectral asociada a un rango de desplazamientos espectrales y se llaman *espectros de capacidad*. Es frecuente mostrar el espectro de capacidad de forma bilineal simplificada. En esta forma el espectro de capacidad se aproxima mediante dos tramos de recta definidos por los puntos de plastificación o de cedencia (Sd_y, Sa_y) y de capacidad última (Sd_u, Sa_u) . La Figura 1 muestra un ejemplo de este tipo de espectros de capacidad. El espectro de forma bilineal se muestra en trazo discontinuo y sobre él se indican los puntos de plastificación (“*yielding point*”) y de capacidad última. El primer tramo recto, que pasa por el origen, define el periodo propio inicial del edificio y representa su comportamiento lineal para desplazamientos y aceleraciones espectrales pequeños. El tramo entre los puntos de cedencia y de capacidad última corresponde al comportamiento no lineal. Cuanto mayor sea la aceleración de cedencia y la aceleración de capacidad última, mayor es la resistencia de la estructura. Como veremos más adelante, los espectros de capacidad permiten determinar el desplazamiento espectral esperado cuando el edificio sufre un terremoto caracterizado por su espectro de respuesta, pero además, también permite calcular curvas de fragilidad y, por consiguiente, el daño esperado.

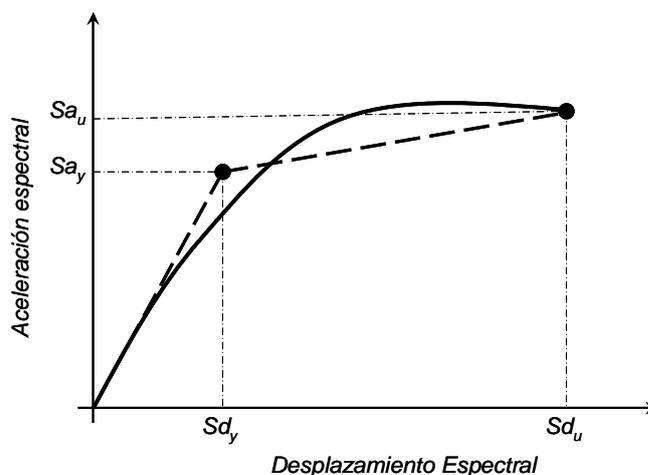


Figura 1. Espectro (trazo continuo) y espectro bilineal (trazo discontinuo) de capacidad. Se muestran también los puntos de cedencia (Sd_y, Sa_y) y de capacidad última (Sd_u, Sa_u) .

L.G. Pujades, A.H. Barbat, N. Lantada

2.3 El daño

Desde mucho antes del desarrollo de la sismología y de la ingeniería sísmica, el daño causado por los terremotos ha sido el observable más usado para describir y cuantificar los terremotos. Jacobo Castaldi y Robert Mallet se consideran precursores de las escalas de intensidad y, en sentido amplio, podemos decir que son también precursores de los escenarios de riesgo sísmico. El primero recogió, en un mapa, los efectos del terremoto de Niza ocurrido el 20 de julio de 1561; el segundo se desplazó con un equipo de expertos para estudiar los efectos del terremoto de Nápoles ocurrido en diciembre de 1857. En esta época ya era conocido que la distribución de los efectos macrosísmicos de un terremoto pueden ser representados mediante líneas que delimitan zonas de igual intensidad o zonas en las que los efectos causados por los terremotos son similares. Con todo, la descripción y cuantificación del daño no ha dejado aún de tener grandes dosis de subjetividad que dificultan su tratamiento científico y preciso. Existen pues diversas formas de describir y cuantificar el daño. Aquí haremos referencia a la forma adoptada en este estudio. En general, las escalas de intensidad y los métodos empíricos de análisis de riesgo basados en el concepto de vulnerabilidad y en observaciones macrosísmicas definen el daño mediante los llamados estados de daño. Los métodos analíticos basados en espectros de capacidad y curvas de fragilidad heredan la consideración del daño mediante grados o niveles de daño. Con todo, en ambos casos, el daño suele también cuantificarse mediante diferentes parámetros o índices de daño cuyo significado es también diverso. Las funciones de daño (ecuación 1) deben permitir predecir, para cada edificio y para cada escenario sísmico, el daño esperado. Describimos a continuación los conceptos y formalismos empleados en nuestro caso de aplicación. Distinguimos el *método del índice de vulnerabilidad* y el *método del espectro de capacidad*. El primero es representativo de los métodos que usan índices de vulnerabilidad y funciones de daño empíricas basadas en escalas macrosísmicas. El segundo es representativo de los que usan espectros de capacidad y curvas de fragilidad.

2.3.1 Estados y distribuciones de daño

La escala de intensidad MSK-64 (Sponheuer y Karnik, 1964) establece cinco clases de daño no nulo. La escala EMS '98, que debe considerarse como una actualización de la MSK-64, confirma estos cinco grados o estados de daño. Así pues, incluyendo el grado de daño nulo o sin daño, cualitativamente y cuantitativamente se postulan los 6 grados de daño siguientes: 0.- sin daño, 1.- Leve, 2.- Moderado, 3.- Severo, 4.- Extensivo y 5.- Completo. Por otra parte, la escala macrosísmica EMS'98 establece que el daño causado por los terremotos sigue una distribución binomial. Es decir:



Métodos avanzados para la obtención de escenarios de riesgo sísmico. Aplicación a Barcelona

$$P_k(N, d) = \frac{(N-1)!}{(N-1-k)!k!} d^k (1-d)^{N-1-k} \quad k = 0 \dots (N-1) \quad (2)$$

donde N es el número de los estados de daño y $P_k(N, d)$ define la probabilidad del estado de daño k . En nuestro caso N vale 6 y k va de 0 a 5. De esta forma, la ecuación (2) se transforma en:

$$P_k(6, d) = \frac{(5)!}{(5-k)!k!} d^k (1-d)^{5-k} \quad k = 0 \dots 5 \quad (3)$$

donde d es un parámetro que define completamente la distribución y toma valores entre 0 y 1. Para $d=0$ la probabilidad del estado de daño nulo es la unidad, mientras que para $d=1$ la probabilidad del estado de daño completo es la unidad. Para valores intermedios de d las probabilidades de los diferentes estados de daño toman valores entre cero y la unidad. Otro parámetro frecuentemente utilizado es el llamado grado de daño medio o estado de daño esperado, que se define como $d^*=d(N-1)$. A partir de la distribución de probabilidad de daño, d^* se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$d^* = \sum_{k=0}^5 k P_k(6, d) \quad (4)$$

d^* toma valores entre 0 y 5 y representa el estado de daño más probable. Así, $d=d^*=0$ representa una probabilidad 1 para el estado de daño Nulo (0) y 0 para los otros estados. Un valor de $d=1$ corresponde a $d^*=5$, a una probabilidad igual a la unidad para el estado de daño de Colapso (5) y a una probabilidad nula para los otros estados de daño. Valores intermedios entre 0 y 1 para d y entre 0 y 5 para d^* indican una distribución de daño. En este caso, d^* es una especie de grado de daño medio o grado de daño más probable. En cualquier caso lo importante es que d^* determina de forma unívoca la distribución de las probabilidades de daño. Esta sencilla hipótesis sobre la distribución del daño permite construir distribuciones de probabilidad de daño a partir de descripciones parciales o incompletas en las escalas de intensidad. Así, por ejemplo, la escala MSK-64 describe de la siguiente manera los daños sufridos por los edificios de tipo A cuando ocurre un terremoto de intensidad VII. “Muchas construcciones del tipo A sufren daños graves (clase 3) y algunas incluso destrucción (clase 4)”. Entendiendo por muchas el 50% y por algunas el 5%, podemos predecir la distribución binomial probable de forma que la suma de las probabilidades de los estados de daño grave y destrucción sumen 55%.

L.G. Pujades, A.H. Barbat, N. Lantada

La Tabla 1 y la Figura 2 muestran un ejemplo de este tipo de construcción de la distribución binomial que corresponde a $d=0.5553$ y $d^*=2.78$.

Una distribución de probabilidad más versátil es la distribución *Beta*, cuya función de densidad viene dada por:

$$p_{\beta}(x) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(q)\Gamma(t-q)} \frac{(x-a)^{q-1}(b-x)^{t-q-1}}{(b-a)^{t-1}} \quad \text{para } a \leq x < b \quad (5)$$

$\Gamma(t)$ es la función gamma, a y b están relacionados con el intervalo de definición de la distribución y, por lo tanto, con el número de estados de daño. t y q permiten modular la forma de la distribución. t está relacionado con la dispersión. La probabilidad de que se dé un nivel de daño x viene dada por la integral entre a y x de la función $p_{\beta}(x)$, es decir:

$$P_{\beta}(x) = \int_a^x p_{\beta}(\varepsilon) d\varepsilon \quad (6)$$

Tabla 1. Completando una distribución de probabilidad de daño. Ver explicación en el texto.

Edificios Tipo A		
Grado de daño	Intensidad	
	VII	VII
Nulo (0)		0.02
Leve (1)		0.11
Moderado (2)		0.27
Severo (3)	0.50	0.34
Extensivo (4)	0.05	0.21
Colapso (5)		0.05
$d=0.5553, d^*=2.78$		

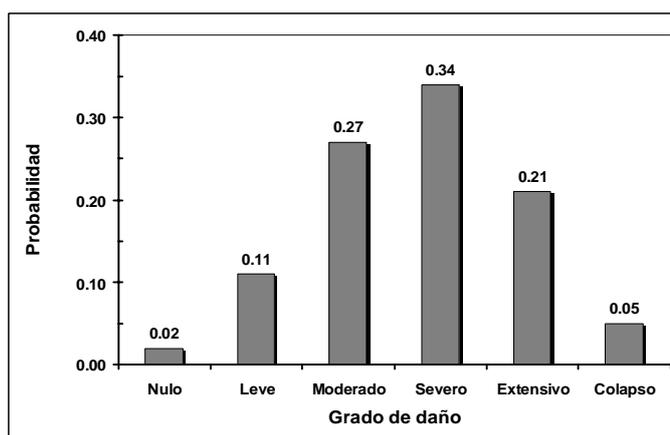


Figura 2. Distribución binomial de probabilidad

En el caso de estados de daño discretos definidos por los niveles de daño k , ($k=0, 1, \dots, 5$), las probabilidades de cada estado de daño se definen mediante:

$$p_k = P_{\beta}(k+1) - P_{\beta}(k) \quad (7)$$



Métodos avanzados para la obtención de escenarios de riesgo sísmico. Aplicación a Barcelona

y la probabilidad de que se iguale o exceda un determinado estado o nivel de daño se define mediante:

$$P(D \geq D_k) = 1 - P_p(k) \quad (8)$$

Tomando $a=0$, $b=6$, $t=8$ se consigue una distribución binomial equivalente que se ajusta imponiendo que el factor de daño medio o nivel de daño esperado sea el mismo. La siguiente ecuación establece la equivalencia entre las distribuciones binomial de la ecuación (3) y la distribución Beta definida en la ecuación (5):

$$q = t \left(0.007d^{*3} - 0.052d^{*2} + 0.2875d^* \right) \quad (9)$$

donde d^* es el factor de daño tal como ha sido definido en la ecuación (4). De esta forma, el daño esperado y la distribución de probabilidad de los diferentes estados puede definirse mediante un sólo parámetro.

2.3.2 Curvas de fragilidad

Una forma equivalente de definir el daño es mediante curvas de fragilidad (Hazu's 99 2002). Para un tipo de edificio y un estado de daño dado, estas curvas definen la probabilidad de que se iguale o exceda el estado de daño considerado en función de la intensidad sísmica. Es decir:

$$F_{D_k,T}(i) = P[GD \geq D_k | i] \quad (10)$$

T indica la tipología considerada, D_k es el grado de daño de la curva de fragilidad correspondiente e i es la variable que define la intensidad sísmica. La curva de fragilidad del estado de daño nulo es trivialmente la unidad. Se supone que para los estados de daño no nulo, las curvas de fragilidad siguen una distribución de probabilidad lognormal:

$$P[ds | S_d] = \Phi \left[\frac{I}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{S_d}{S_{d,ds}} \right) \right] \quad (11)$$

donde ahora S_d es el desplazamiento espectral o parámetro de la acción sísmica, $S_{d,ds}$ es el valor medio del desplazamiento en el que el edificio alcanza un umbral del estado de daño ds , β_{ds} es la desviación estándar del logaritmo natural

L.G. Pujades, A.H. Barbat, N. Lantada

del desplazamiento espectral del estado de daño ds y Φ es la función de distribución acumulativa normal estándar. Por lo tanto, estas curvas quedan definidas mediante sólo dos parámetros: el valor medio $\overline{S_{d,ds}}$ y la desviación típica β_{ds} . El valor medio define el punto en el que la probabilidad de igualar o exceder el estado de daño es igual al 50%; la desviación típica nos da una idea de la dispersión.

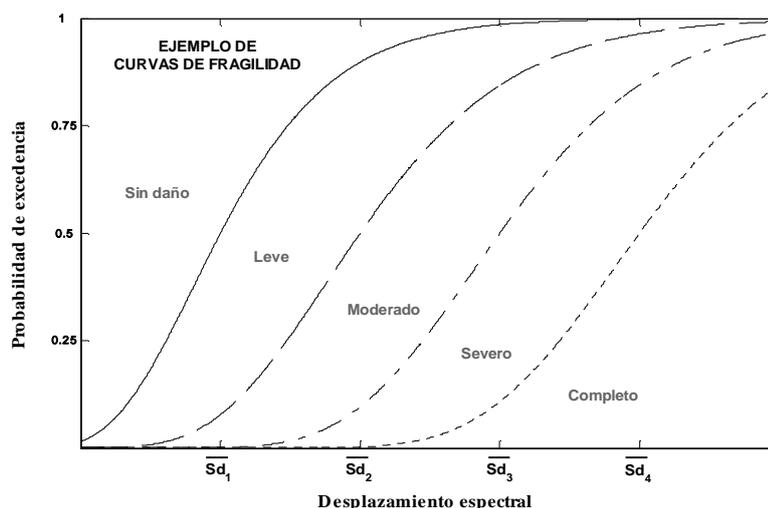


Figura 3. Ejemplo de curvas de fragilidad. Se consideran 4 estados de daño diferentes del grado de daño nulo o sin daño.

La siguiente ecuación muestra la función de densidad de probabilidad correspondiente a las curvas de fragilidad

$$F_{T,Gdt}(Sd) = \frac{1}{\beta Sd \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\beta} \ln \frac{Sd}{\overline{Sd}} \right)^2 \right] \quad (12)$$

Donde Sd es el desplazamiento espectral, \overline{Sd} es el valor medio de la distribución de probabilidad y β es la desviación típica del $\ln Sd$. La curva de fragilidad, es decir, la probabilidad de que un edificio iguale o exceda el estado de daño considerado, viene dada por la integral entre 0 y Sd de la función de densidad de probabilidad dada en la ecuación (12), es decir:



Métodos avanzados para la obtención de escenarios de riesgo sísmico. Aplicación a Barcelona

$$P(Sd) = P_{T,Gdi} [GD \geq Gdi | Sd] = \int_0^{Sd} F_{T,Gdi}(Sd) d(Sd) \quad (13)$$

La Figura 3 muestra un ejemplo de curvas de fragilidad.

Finalmente, conocidas las curvas de fragilidad, es posible calcular la probabilidad de ocurrencia de cada estado de daño mediante la siguiente ecuación:

$$P[GD = D_k | i, T] = P(GD \geq D_k | i, T) - P(GD \geq D_{(k+1)} | i, T) \quad k = 0 \dots (N-1) \quad (14)$$

Para el estado de daño de colapso o $k=N$, la correspondiente curva de fragilidad define su probabilidad de ocurrencia, ya que no hay grados mayores.

2.4 Funciones y matrices de probabilidad de daño

El punto clave para una predicción fiable del daño esperado está en el ajuste de funciones de daño. Estas funciones definen, para cada edificio o servicio, el daño previsible cuando el edificio sufre un determinado terremoto. Pueden referirse a cualquier aspecto relacionado con el daño, como por ejemplo el daño físico directo y las víctimas, los daños inducidos, el daño socio-económico, el volumen de escombros, el número de familias sin hogar o los tiempos de recuperación de un servicio, entre otros. Aquí nos referimos a daño físico directo esperado en edificios destinados a viviendas. Existen varios métodos para calibrar estas funciones de daño. ATC-13 (1985), por ejemplo, utiliza la opinión de expertos. Aquí describimos brevemente el tratamiento de este problema en los dos métodos escogidos para este estudio.

2.4.1 Método del índice de vulnerabilidad

En este método, la acción sísmica se caracteriza mediante la intensidad macrosísmica EMS'98 y el edificio mediante un índice de vulnerabilidad. La información de daños observados en terremotos pasados se ha utilizado para obtener la siguiente función semi-empírica propuesta por Giovinazzi y Lagomarsino (2002):

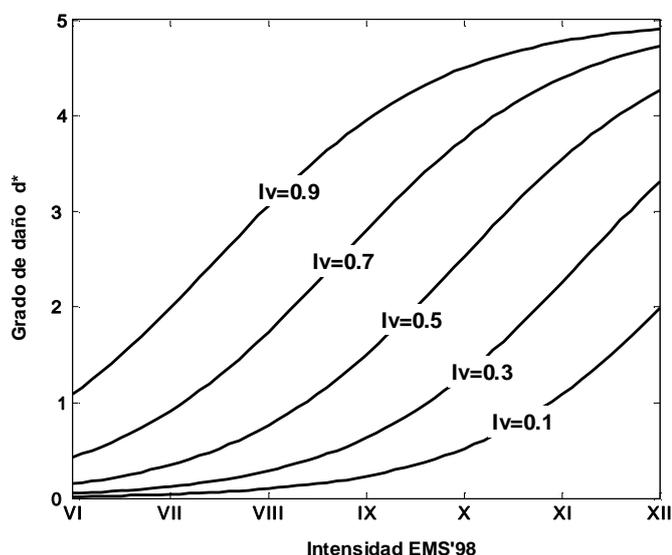
$$d^* = 2.5 \left[1.0 + \tanh \left(\frac{I + 6.25 V_I - 13.1}{2.3} \right) \right] \quad (15)$$

La Figura 4 muestra las funciones de daño para diferentes índices de vulnerabilidad. Obsérvese cómo, dada una intensidad sísmica, el grado de daño aumenta con el índice de vulnerabilidad. Por ejemplo, para una intensidad X el

L.G. Pujades, A.H. Barbat, N. Lantada

grado de daño más probable es 0.52 para un índice de vulnerabilidad de 0.1 mientras que es 4.5 para un índice de vulnerabilidad de 0.9, indicando que, para esta intensidad, los edificios tipificados mediante el primer índice de vulnerabilidad apenas sufrirán daños mientras que los daños serán muy severos en los edificios caracterizados mediante el segundo índice.

Figura 3. Ejemplo de funciones de daño para diferentes índices de vulnerabilidad. d^* se obtiene a partir de la ecuación (15).



Este grado de daño d^* es el grado de daño medio definido en la ecuación (4), que permite recuperar la probabilidad de cada estado de daño, o matriz de probabilidad de daño, a partir de la ecuación (3) o a partir de la distribución Beta definida en la ecuación (5). De esta forma la estimación del grado de daño más probable y de la distribución de probabilidad de los diferentes estados de daño se obtiene de forma directa a partir del índice de vulnerabilidad y de la intensidad. Por lo tanto es crucial el afinar bien en la asignación del índice de vulnerabilidad a los edificios.

2.4.2 Método del espectro de capacidad

El método del espectro de capacidad considera sólo 5 estados de daño, incluyendo el estado de daño nulo. Se considera, en este trabajo, que el grado de daño completo incluye los estados de daño extensivo y completo, por entender que, cuando el daño es extensivo, es muy probable que haya que demoler el edificio, dado que deja de ser reparable. El daño se cuantifica mediante las curvas de fragilidad definidas más arriba. Se usa una forma simplificada de obtención de estas curvas a partir de los espectros bilineales de capacidad. El espectro bilineal de capacidad se define mediante el punto de cedencia (Sd_y , Sa_y) y el punto de última



Métodos avanzados para la obtención de escenarios de riesgo sísmico. Aplicación a Barcelona

capacidad (Sd_u, Sa_u). La definición de la distribución lognormal que define la curva de fragilidad requiere estimar el valor medio o umbral del estado de daño (\bar{Sd}_i) y la desviación típica (β_i). En este trabajo se sigue un procedimiento simplificado propuesto en el proyecto Risk-UE. Los umbrales de los estados de daño se definen mediante las relaciones de la Tabla 2 (véase también la Figura 5). Para calcular las desviaciones típicas se supone que las probabilidades de los estados de daño en los umbrales se distribuyen de acuerdo a una distribución Binomial o Beta equivalente. De esta forma, fijando que la probabilidad de excedencia del umbral considerado sea del 50%, se obtienen las probabilidades de los otros estados mediante la ecuación (6).

Tabla 2. Estados de daño y umbrales a partir de los puntos de cedencia y de capacidad última de un espectro de capacidad.

Umbral del estado de daño	Estado de daño
$\bar{Sd}_1 = 0.7 Sdy$	Leve
$\bar{Sd}_2 = Sdy$	Moderado
$\bar{Sd}_3 = Sdy + 0.25(Sdu - Sdy)$	Severo
$\bar{Sd}_4 = Sdu$	Colapso

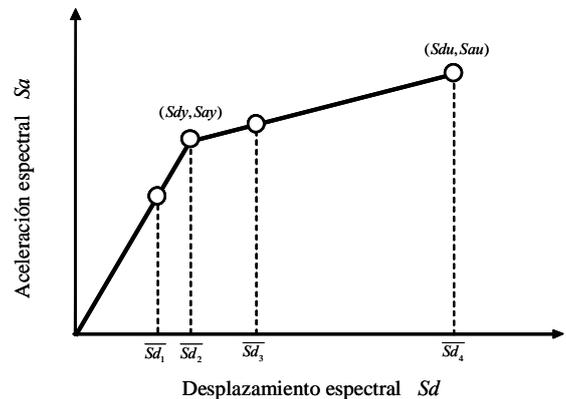


Figura 5.- Umbrales de los estados de daño.

La Tabla 3 muestra los valores obtenidos. Un ajuste por mínimos cuadrados de la ecuación (13) permite estimar las desviaciones típicas. La Figura 6 ilustra este proceso. Los puntos corresponden a los valores de la Tabla 3, las líneas continuas corresponden a los ajustes obtenidos.

De esta forma, para cada edificio definido por su espectro de capacidad, se obtienen las curvas de fragilidad. El problema de la estimación de la matriz de probabilidad de daño correspondiente a un escenario sísmico o terremoto concreto se reduce ahora a obtener el desplazamiento espectral esperado, que permite entrar en las curvas de fragilidad y obtener las probabilidades de cada estado de daño mediante las ecuaciones (13) y (14). El método del espectro de capacidad permite realizar esta estimación mediante la obtención del llamado *punto de desempeño* ("performance point") que proporciona el nivel de desplazamiento espectral

L.G. Pujades, A.H. Barbat, N. Lantada

producido en el edificio por el terremoto del escenario considerado (Fajfar, 2002; Fajfar y Gaspersic 1996). El ATC-40 (1996) proporciona tres métodos para determinar este punto y Milutinovic y Trendafiloski (2003) explican, paso a paso, la aplicación de estos métodos. Todos ellos tienen en cuenta el comportamiento no lineal de los edificios cuando se hallan sometidos a fuerzas severas que producen la incursión en su comportamiento no elástico y, por lo tanto, requieren la reducción del espectro de respuesta lineal 5% amortiguado.

Tabla 3. Distribución de probabilidades de excedencia fijando la probabilidad del umbral en un 50%.

$P_{\beta}(1)$	0.50	0.90	0.99	1.00
$P_{\beta}(2)$	0.12	0.50	0.87	0.99
$P_{\beta}(3)$	0.01	0.14	0.50	0.88
$P_{\beta}(4)$	0.00	0.01	0.10	0.50
d^*	0.63	1.55	2.46	3.37

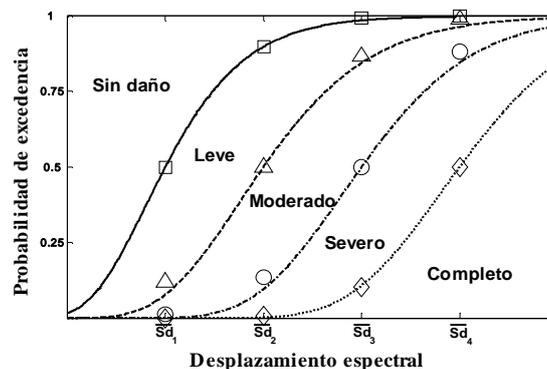


Figura 6.- Curvas de fragilidad ajustadas a los puntos de la Tabla 3.

La Figura 7 muestra un ejemplo del procedimiento. El edificio se representa por el espectro de capacidad mientras que la acción sísmica se representa mediante el espectro de respuesta lineal 5% amortiguada. El cruce entre ambos espectros permite efectuar la reducción del espectro de respuesta para obtener el espectro de respuesta no lineal, llamado también espectro de demanda, y el punto de desempeño. El desplazamiento espectral que define el punto de desempeño representa el desplazamiento producido en el edificio por el terremoto. Este desplazamiento espectral permite entrar en la curva de fragilidad (Figura 3 y Figura 6) para, usando las ecuaciones (13) y (14), determinar las probabilidades de ocurrencia de todos y cada uno de los estados de daño o matrices de probabilidad de daño (Whitman *et al.*, 1973). A partir de estas matrices puede estimarse el grado de daño medio o grado de daño más probable usando la ecuación (4).

En resumen, en el *método del índice de vulnerabilidad*, la acción se cuantifica mediante la intensidad macrosísmica y el edificio mediante un índice de vulnerabilidad; el ajuste de funciones semiempíricas permiten establecer la relación que predice el grado de daño medio esperado en el edificio cuando ocurre el terremoto. La hipótesis de una distribución estadística de las probabilidades de los estados de daño permite determinar las matrices de probabilidad de daño. En el *método del espectro de capacidad*, el edificio se representa por su espectro bilineal



Métodos avanzados para la obtención de escenarios de riesgo sísmico. Aplicación a Barcelona

de capacidad y el terremoto mediante su espectro de respuesta lineal 5% amortiguada. El espectro de capacidad permite obtener las curvas de fragilidad. El cruce de los espectros de capacidad y de respuesta produce el desplazamiento máximo esperado en el edificio sometido a la acción sísmica. Entrando en las curvas de fragilidad se obtienen las matrices de probabilidad de daño. El método del índice de vulnerabilidad pertenece al conjunto de métodos de análisis de daño sísmico llamados empíricos o semiempíricos ya que se basan en daños observados y en consideraciones analíticas sobre los edificios. El método del espectro de capacidad pertenece a otro grupo de métodos denominados analíticos o mecánicos. Estos métodos se fundamentan en el análisis estructural y en la estimación del daño a partir de consideraciones mecánicas (Giovinazzi, 2005). Ambos métodos se aplican, a continuación, al parque de edificios de viviendas de la ciudad de Barcelona.

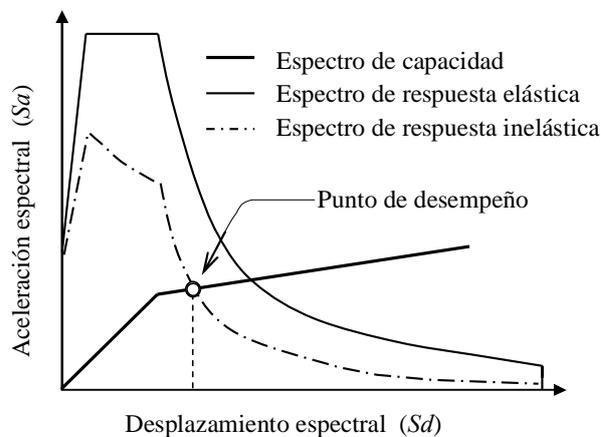


Figura 7. Ejemplo de cálculo del punto de desempeño que define la respuesta máxima del edificio para la acción sísmica mediante el espectro de respuesta. También se obtiene el espectro de demanda o espectro de respuesta inelástica.

3. APLICACIÓN A LA CIUDAD DE BARCELONA

3.1 Un poco de historia

Existen indicios de que hubo habitantes en Barcelona desde el año 2500 a. JC, con un primer poblado datado entre los años 2000 y 1500 a. JC. Entre los siglos III y II a. JC existían dos poblados Ibéricos. Uno, llamado *Barcilo*, en un montículo, conocido como monte *Taber*, donde se halla el núcleo antiguo de la actual ciudad. Otro, llamado *Laye*, en Montjuïc. Los romanos llegaron a Barcelona 218 años a. JC.

L.G. Pujades, A.H. Barbat, N. Lantada

prosperando la colonia del *Mons Taber*, ya en el siglo I a. JC. Tras ser destruida, la ciudad fue reconstruida, probablemente en el año 263, y fortificada antes de finalizar el siglo IV. Sus murallas la convertían en una ciudad segura. La ciudad pasó a manos musulmanas probablemente el año 717 ó 718. La ciudad mantuvo su aspecto durante la época Carolingia desde los inicios del siglo IX y hasta principios de siglo XI. En el año 1000, Barcelona conserva su núcleo fortificado pero nuevos barrios surgen ya en su exterior. En la primera mitad del siglo XIII Barcelona empieza a construir una nueva muralla que contiene estas aldeas. En 1249 Jaime I creó el municipio y las primeras instituciones ciudadanas de gobierno de la ciudad. En el año 1333 la peste se cebó en la ciudad causando más de 10000 muertes. Sucesivas pestes y epidemias azotaron la ciudad de forma intermitente hasta los siglos XV y XVI. En 1359 se construye una tercera muralla. Con todo, la zona izquierda de las Ramblas, conocida como el arrabal (*el Raval*), siguió siendo una zona rural que no se edificó y pobló hasta la expansión industrial de 1780. El siglo XVIII fue un mal siglo para Barcelona que tuvo que afrontar importantes modificaciones políticas y urbanísticas. A este periodo corresponde la creación de *La Barceloneta*. A partir de 1774 se empieza a derribar la muralla interior que separaba la ciudad del *Raval* y se urbaniza y puebla este sector, a la izquierda de *la Rambla*. En la primera mitad del siglo XIX se intensifica la urbanización del interior de la ciudad que, progresivamente, se dota del aspecto e infraestructuras de una ciudad moderna.

Pero lo que da paso al nacimiento de la Barcelona actual es el ensanche por el llano. Entre 1858 y 1868 se derriban las murallas de la ciudad y se inicia el gran proyecto urbanístico para la construcción de la Barcelona moderna, una nueva ciudad abierta e industrial. El *Ensanche* (*“l’Eixample”*) de Barcelona, fue proyectado por el ingeniero Ildefonso Cerdá (Cerdá, 1968). Este proyecto de expansión de la ciudad permitió unir el núcleo de la ciudad con los pueblos del llano que darán nombre a los distritos y barrios de la ciudad actual. El censo de 1900 establece en 553000 el número de habitantes de esta ciudad ampliada. Entre 1909 y 1929 Barcelona experimenta una colosal expansión. De los 587411 habitantes de 1910 se pasa a 1005565 en 1930. Entre 1940 y 1960 se produce un considerable crecimiento sostenido y la ciudad gana medio millón de habitantes. Este incremento de la población es debido principalmente al aumento de la natalidad y al gran número de inmigrantes procedentes del Sur de España. A pesar de que la *Carta Municipal* de 1961 otorga mayor autonomía a la ciudad, durante la alcaldía de Porcioles (1957–1973) se produjo un crecimiento especulativo y desordenado con grandes deficiencias estructurales. En 1975 fallece el general dictador Franco y, en 1978, se restablece la monarquía y la democracia en España iniciándose un mayor control de la sociedad sobre las instituciones y el gobierno de la ciudad. En la actualidad Barcelona está encajada entre *Montjuïc*, *Collserola* y el río *Besós*, que limitan claramente su crecimiento en superficie, dejando, como única alternativa de crecimiento, la reconversión de zonas deprimidas, en desuso o



Métodos avanzados para la obtención de escenarios de riesgo sísmico. Aplicación a Barcelona

industriales. Los últimos ejemplos de transformación urbanística de la ciudad son la *Vila Olímpica* de 1992 y la apertura al mar de la *Avinguda Diagonal* con el *Forum de las Culturas* en el 2004. El distrito del *Eixample* destaca como la principal área de Barcelona donde se acumula una importante población, una notable actividad económica y un importante patrimonio cultural (García Espuche, 1990; Paricio, 2001). Actualmente, el municipio de Barcelona se extiende en una superficie de 9907 Ha con una población de 1,5 millones de habitantes según el censo de 2001. La Figura 8 muestra las principales características de la ciudad junto con los diez distritos que la componen en la actualidad.

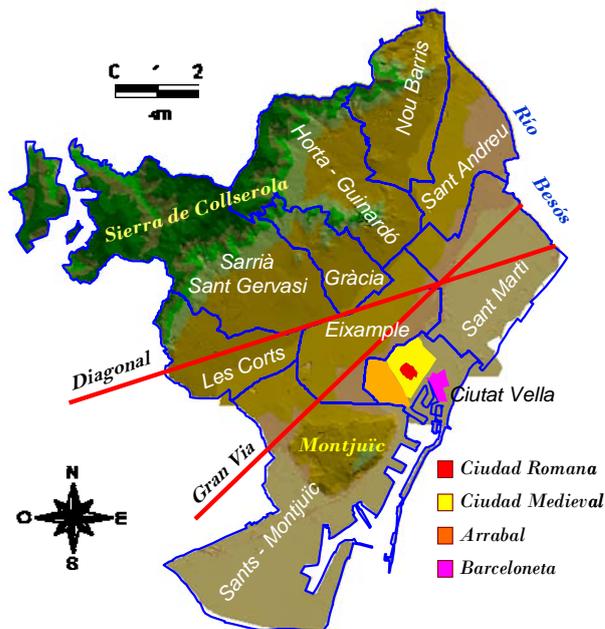


Figura 1. Principales características de la ciudad de Barcelona. Se indican los 10 distritos de la ciudad.

3.2 Los datos

La información utilizada en este estudio ha sido facilitada, en su mayor parte, por el *Institut Municipal d'Informàtica* (IMI) y por el *Departament d'Estadística* del Ayuntamiento de Barcelona (DEAB). Estas dos instituciones se complementan en la gestión y análisis de la información referente a la ciudad. La unidad básica de estudio es la parcela catastral edificada o edificio. Para su caracterización se han usado tres bases de datos que contienen el catastro, las edades y las características

L.G. Pujades, A.H. Barbat, N. Lantada

constructivas. La base de datos del catastro está bien documentada en el informe Infocca (1999) y permite determinar las características geométricas, en planta y en altura de los edificios de cada parcela. A partir de la correlación de la información contenida en estas bases de datos se dispone de información completa de 70.905 edificios que representan el 93,38 % de los edificios del censo del 2001. De estos edificios se conoce su configuración en planta y en altura, su situación dentro de la manzana, formando parte de un agregado o no, así como la información referente a los edificios colaterales; la tipología constructiva de la estructura y de los forjados, el año de construcción y el estado de conservación. La calidad, representatividad y resolución de nuestra base de datos global, permite efectuar los análisis edificio por edificio, pero por claridad, simplicidad, utilidad y, sobre todo, para no perder de vista el sentido probabilista de los análisis y conclusiones, los resultados se van a presentar de acuerdo a las tres grandes divisiones administrativas definidas y utilizadas por el ayuntamiento de la ciudad: Distritos, Barrios y Zonas de Estudio. Nos referiremos a estas Zonas de Estudio con el acrónimo de “*Zones de Recerca Petites*” (ZRP) que corresponde al nombre catalán usado por los administradores de la ciudad. Barcelona consta de 10 distritos (ver Figura 8), 38 barrios y 238 ZRP. Toda la documentación recopilada se usará para caracterizar la vulnerabilidad, capacidad y fragilidad de los edificios de la ciudad.

3.3 Los terremotos: escenarios sísmicos

Para definir el movimiento sísmico esperado de los escenarios considerados se ha tenido en cuenta la zonificación sísmica de los suelos. Cid (1998), clasifica los suelos de la ciudad en 4 zonas. La zona R constituida por afloramientos rocosos paleozoicos y terciarios (ver también Cid *et al.* 2001). La zona I corresponde a suelos blandos caracterizados por un basamento paleozoico a una profundidad inferior a 350 m sobre el que se halla una gruesa capa de materiales terciarios y una capa de materiales deltaicos del holoceno con un espesor de entre 25 y 70 m. La calidad de los suelos aumenta en las zonas II y III, que son de transición entre los suelos blandos de los deltas y los afloramientos rocosos.

Los efectos sobre la acción sísmica en términos de intensidad se han tenido en cuenta incrementando la intensidad esperada en el basamento rocoso en media unidad en las zonas de suelos tipo II y tipo III y en una unidad en la zona I. En términos espectrales se han tenido en cuenta las funciones de transferencia propuestas por Cid (1998) para los suelos de las zonas I, II y III. La Figura 9 muestra el mapa de zonificación sísmica de los suelos de la ciudad y la Figura 10 muestra las funciones de amplificación espectral.



Métodos avanzados para la obtención de escenarios de riesgo sísmico. Aplicación a Barcelona

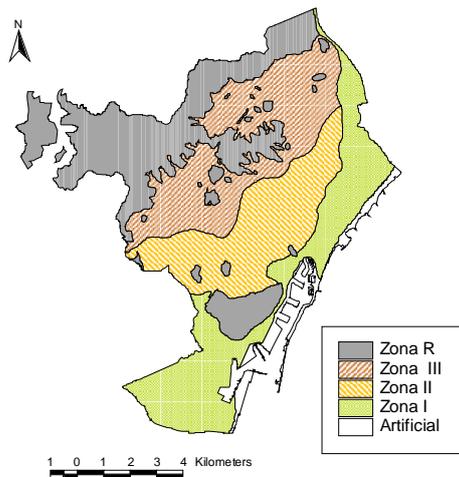


Figura 9. Zonificación sísmica de los suelos de Barcelona (Cid 1998).

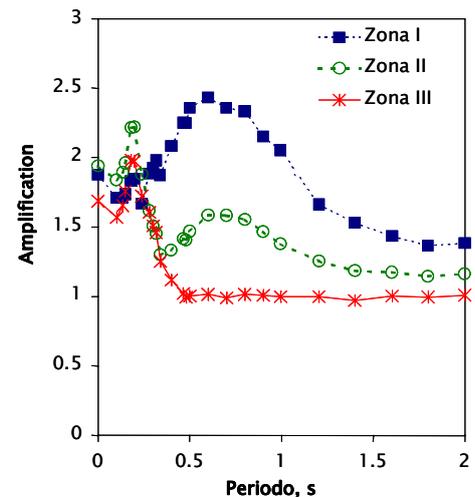


Figura 10. Funciones de amplificación espectral de los suelos de Barcelona (Cid 1998).

El escenario determinista en términos macrosísmicos corresponde a un terremoto histórico ocurrido en 1448 en Cardedeu, a una distancia de 25 km del centro de Barcelona y a una profundidad de 7 km (Olivera *et al.* 2006). Éste es el sismo de mayor intensidad epicentral ocurrido a menor distancia de la ciudad. La Figura 11 muestra la distribución de intensidades esperadas en la ciudad. Se observa el efecto de la atenuación sísmica hacia el Sur y los efectos de suelo que amplifican la señal hacia el Este, en el frente de mar. Las intensidades varían entre VI en el afloramiento rocoso de la montaña de Montjuïc y VIII en el Noreste de la ciudad donde coinciden la zona más cercana al epicentro y los suelos más blandos.

En términos espectrales el terremoto de Cardedeu se ha complementado con otro terremoto ocurrido en 1428 en la provincia de Girona con una intensidad epicentral IX (MSK) que, pese a producirse a mayor distancia, fue percibido en la ciudad (Olivera *et al.* 2006). La idea es unir las características espectrales de un sismo cercano, el de Cardedeu, con las de un sismo lejano, como el de 1428. Para cada periodo del espectro de respuesta, se ha tomado el mayor valor de ambos terremotos para así definir, de forma conservadora, todo el rango de periodos, con especial cuidado en los periodos largos. La Figura 12 muestra los espectros de respuesta zonificados.

L.G. Pujades, A.H. Barbat, N. Lantada

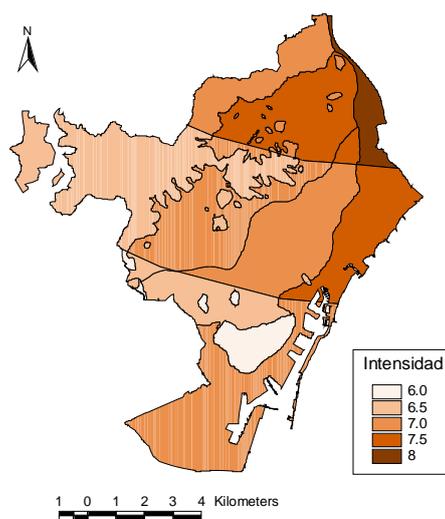


Figura 11. Escenario determinista en términos macrosísmicos.

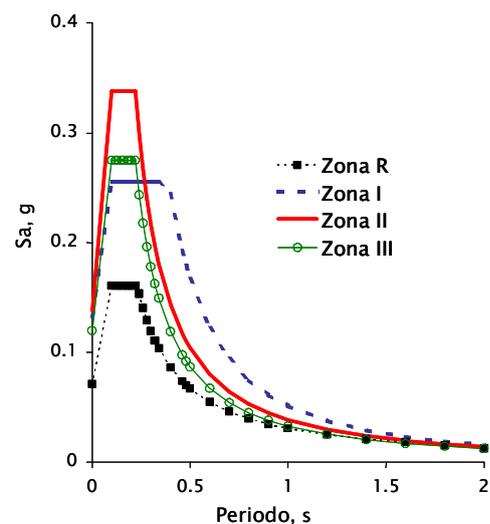


Figura 12. Escenario determinista en términos espectrales.

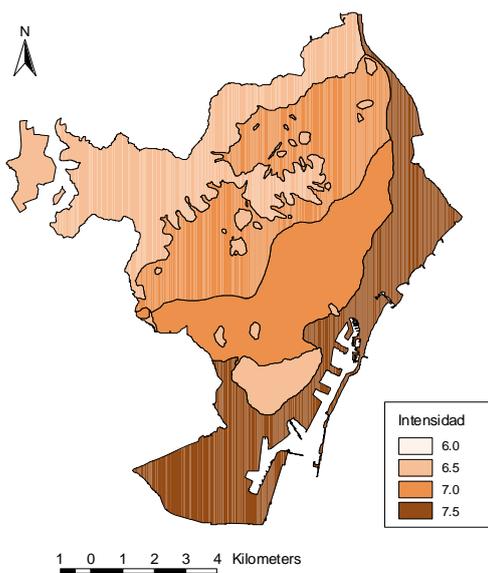


Figura 13. Escenario probabilista en términos macrosísmicos.

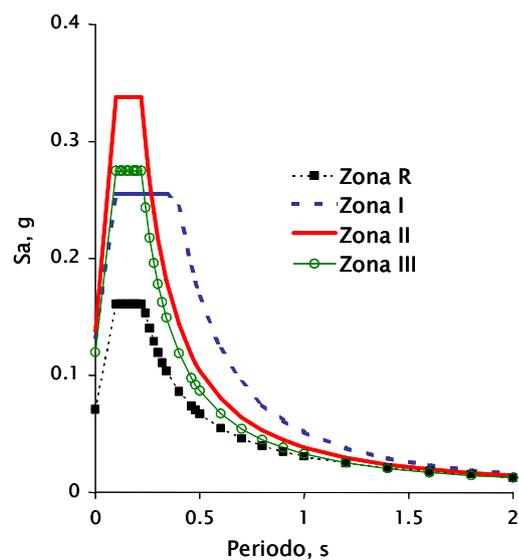


Figura 14. Escenario probabilista en términos espectrales.



Métodos avanzados para la obtención de escenarios de riesgo sísmico. Aplicación a Barcelona

Para el escenario probabilista se ha utilizado el terremoto con una probabilidad del 10% en 50 años que corresponde a una intensidad en el basamento rocoso entre VI y VII (Secanell *et al.* 2004). La Figura 13 muestra el escenario probabilista en términos de intensidad considerando los efectos de suelo. Las intensidades varían entre VI-VII en los afloramientos rocosos y VII-VIII en los terrenos blandos de los deltas y frente de mar. Irizarry (2004) obtiene los escenarios en términos espectrales. La Figura 14 muestra los espectros de respuesta zonificados correspondientes al escenario probabilista. Tanto los espectros de la Figura 12 como los de la Figura 14 son espectros elásticos de respuesta 5% amortiguada, que constituyen el punto de partida para estimar los espectros de demanda y los puntos de desempeño.

3.4 Los edificios

Aproximadamente el 92% de los edificios de viviendas de Barcelona pueden agruparse en dos grandes clases: edificios de mampostería u obra de fábrica de ladrillo y edificios de hormigón armado. Las bases de datos disponibles de los edificios de la ciudad han permitido caracterizarlos tanto mediante un índice de vulnerabilidad (Lantada 2006) como mediante espectros de capacidad (Bonett 2003; Bonett *et al.* 2004; Moreno *et al.* 2004 a,b, Moreno 2006). Resumimos a continuación los principales resultados obtenidos por estos autores.

3.4.1 Índices de vulnerabilidad

El índice de vulnerabilidad V_I de cada edificio se obtiene como suma de un índice básico V_I^* , un modificador regional ΔM_R y un modificador de comportamiento ΔM_C . Es decir:

$$V_I = V_I^* + \Delta M_R + \Delta M_C \quad (16)$$

El índice básico es diferente para las diferentes tipologías constructivas; los modificadores regionales tienen en cuenta las peculiaridades de la región o período de construcción mientras que los modificadores de comportamiento incorporan otros aspectos como, por ejemplo, características geométricas o de posición del edificio que influyen en su comportamiento sísmico. Lantada (2006) describe, detalladamente, el procedimiento de asignación del índice de vulnerabilidad. El modificador regional se fundamenta en la existencia de normativas de diseño sísmico en la fecha de construcción del edificio, penalizando los edificios antiguos construidos sin ninguna conciencia colectiva del peligro sísmico y bonificando los edificios más modernos que, a pesar de que frecuentemente no existía ninguna obligación de diseño sismorresistente, se beneficiaban de mejoras en las prácticas

L.G. Pujades, A.H. Barbat, N. Lantada

constructivas. Se consideran dos modificadores de comportamiento: modificador de edificio y modificador de posición. El modificador de edificio hace referencia al edificio aislado y cuantifica y puntúa propiedades como el número de plantas, la irregularidad en planta y en altura, la longitud de la fachada y el estado de conservación. El modificador de posición tiene en cuenta otras características del edificio en relación con la manzana o bloque de edificios al que pertenece. Así, por ejemplo, se tiene en cuenta la diferencia de altura entre edificios colindantes y la posición en referencia al conjunto, agregado o manzana a la que pertenece. Concretamente, este modificador penaliza los edificios esquina y los terminales, aumentando su índice de vulnerabilidad respectivamente en 4 y en 6 centésimas, y bonifica los edificios que se hallan en medio de otros dos edificios disminuyendo su índice de vulnerabilidad en 4 centésimas.

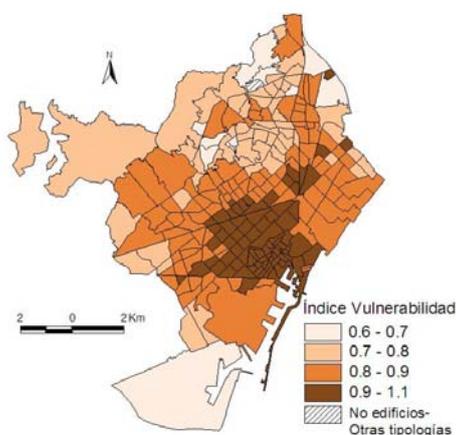


Figura 15. Índices de vulnerabilidad medios para los edificios de mampostería.

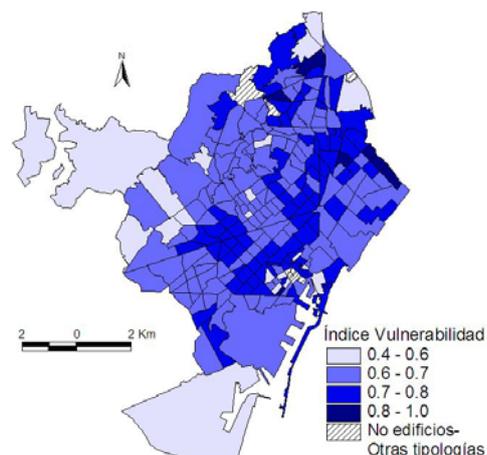


Figura 16. Índices de vulnerabilidad medios para los edificios de hormigón armado.

Los índices de vulnerabilidad de los edificios de mampostería toman valores entre 0,7 y casi la unidad, con un valor medio de 0,87. Los índices de los edificios de hormigón armado son menores, en el rango entre 0,4 y 0,85 y con un valor medio de 0,65. La Figura 15 muestra, por zonas de estudio (ZRP), los índices medios de los edificios de mampostería. Se observa un patrón radial, con los mayores índices de vulnerabilidad en el centro histórico de la ciudad donde existe una importante concentración de edificios antiguos de una calidad sísmica deficiente. La Figura 16 muestra la distribución de los índices de vulnerabilidad medios de las zonas de estudio para los edificios de hormigón armado. Se observa una ligera disminución de la vulnerabilidad y se pierde el patrón radial. Este análisis de vulnerabilidad pone de manifiesto la baja calidad sísmica de los edificios de viviendas de la



Métodos avanzados para la obtención de escenarios de riesgo sísmico. Aplicación a Barcelona

ciudad, lo que es típico de las ciudades situadas en zonas de escasa peligrosidad sísmica y que, en consecuencia, son ajenas a cualquier preocupación por la protección sismorresistente.

3.4.2 Espectros de capacidad y curvas de fragilidad

Para aplicar el método del espectro de capacidad los edificios se clasifican en altos, medianos y bajos y se han usado planos estructurales y constructivos para el modelado y estudio de su comportamiento dinámico mediante programas de análisis estructural no lineal. Bonett (2003) obtiene los espectros de capacidad para las tres categorías de edificios de mampostería usando el programa TreMuri (Galasco *et al.* 2002). La Figura 17 muestra los espectros bilineales de capacidad para los edificios medianos y altos especificando sus características de altura.

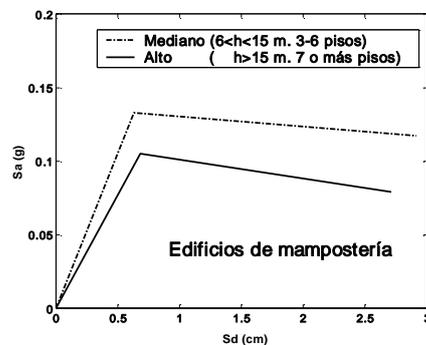


Figura 17. Espectros de capacidad para los edificios de mampostería medianos y altos.

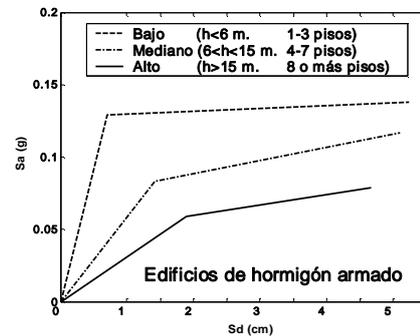


Figura 18. Espectros de capacidad para los edificios de hormigón armado bajos, medianos y altos.

Los edificios bajos son casas unifamiliares de una o dos plantas con una altura inferior a los 6 metros y su espectro bilineal no se muestra en la Figura 17 debido a que su elevada resistencia, comparada con la de los edificios medianos y altos, complica su representación a la misma escala.

Para este edificio, de pequeña altura, los puntos de plastificación y de capacidad última respectivamente son:

$$(S_{dy}, S_{ay}) = (0, 27\text{cm}, 0, 65\text{g}) \text{ y } (S_{du}, S_{au}) = (1, 36\text{cm}, 0, 56\text{g})$$

Se observa cómo la capacidad de los edificios de mampostería disminuye con la altura. La Figura 18 muestra las características en altura y los espectros de capacidad de los edificios de hormigón armado (Moreno *et al.* 2004 a; Moreno, 2006). De nuevo se observa cómo la capacidad disminuye con la altura. A partir

L.G. Pujades, A.H. Barbat, N. Lantada

de los espectros de capacidad se estiman las curvas de fragilidad mediante el procedimiento descrito en el apartado 0 (ver también Tabla 2 y Tabla 3). La Tabla 4 muestra los parámetros de las curvas de fragilidad para los diferentes tipos de edificios considerados.

3.5 El daño físico directo: escenarios

Una vez determinados los índices de vulnerabilidad y los espectros de capacidad los edificios han quedado caracterizados para poder aplicar los métodos descritos en el apartado 0 que permiten evaluar las matrices de probabilidad de daño correspondientes a los escenarios considerados, tanto en términos de intensidad macrosísmica como en términos espectrales. Estas matrices de probabilidad de daño son las que nos van a permitir desarrollar escenarios de daño físico directo.

Tabla 4. Parámetros que definen las curvas de fragilidad para cada tipo de edificio

Tipo de edificio		Parámetros de las curvas de fragilidad							
		\overline{Sd}_1	β_1	\overline{Sd}_2	β_2	\overline{Sd}_3	β_3	\overline{Sd}_4	β_4
Mampostería	Bajo	0.19	0.28	0.27	0.37	0.54	0.54	1.36	0.72
	Mediano	0.44	0.40	0.63	0.50	1.20	0.75	2.91	0.70
	Alto	0.46	0.30	0.68	0.65	1.68	0.65	2.61	0.65
Hormigón	Bajo	0.49	0.28	0.70	0.37	1.84	0.82	5.24	0.83
	mediano	0.99	0.28	1.42	0.36	2.34	0.50	5.11	0.61
	Alto	1.33	0.28	1.89	0.29	2.59	0.34	4.68	0.45

3.5.1 Método del índice de vulnerabilidad

Para cada edificio se conoce su índice de vulnerabilidad y la intensidad sísmica esperada en el emplazamiento. La ecuación (15) permite estimar el estado de daño medio o más probable d^* que, a su vez, permite estimar las matrices de probabilidad de daño mediante las ecuaciones (9), (5), (6) y (7). El índice de vulnerabilidad mínimo de 0,4 se obtiene para un edificio de hormigón, mientras que el máximo de 1,24 se obtiene para un edificio de mampostería. Las intensidades de los escenarios determinista y probabilista varían entre VI y VIII. La Tabla 5 muestra las matrices de probabilidad de daño para un edificio con un índice de vulnerabilidad 0,4.



Métodos avanzados para la obtención de escenarios de riesgo sísmico. Aplicación a Barcelona

Tabla 5. Matriz de probabilidad de daño para un índice de vulnerabilidad de 0.4.
D* es el factor central de daño normalizado a 4.

Intensidad	d*	D*	Probabilidad del estado de daño					
			Nulo (0)	Leve (1)	Moderado (2)	Severo (3)	Extensivo (4)	Completo (5)
VI	0.0899	0.0719	0.9680	0.0282	0.0035	0.0003	0.0000	0.0000
VI-VII	0.1376	0.1101	0.9459	0.0473	0.0063	0.0006	0.0000	0.0000
VII	0.2093	0.1674	0.9063	0.0803	0.0121	0.0012	0.0001	0.0000
VII-VIII	0.3162	0.2530	0.8365	0.1360	0.0245	0.0029	0.0001	0.0000
VIII	0.4721	0.3777	0.7199	0.2212	0.0510	0.0074	0.0005	0.0000

La Tabla 6 es análoga a la anterior para un índice de vulnerabilidad de 1,24. La Figura 19 muestra el factor de daño medio para las zonas de estudio (ZRP) de la ciudad para el escenario determinista. La Figura 20 es análoga a la anterior para el escenario probabilista. Para facilitar la comparación con los escenarios correspondientes al espectro de capacidad el factor central de daño se ha normalizado a 4 en lugar de a 5.

3.5.2 Método del espectro de capacidad

Cruzando los espectros de respuesta que definen los escenarios y los espectros de capacidad que definen los edificios se obtienen los puntos de desempeño. Entrando en las curvas de fragilidad con el correspondiente desplazamiento espectral, se obtienen las probabilidades de cada estado de daño. Bonett (2003) obtuvo los puntos de desempeño y las matrices de probabilidad de daño para los edificios de mampostería. Tabla 7 muestra la matriz de probabilidad de daño correspondiente a los edificios de mampostería.

Tabla 6. Matriz de probabilidad de daño para un índice de vulnerabilidad de 1.24.
D* es el factor central de daño normalizado a 4.

Intensidad	d*	D*	Probabilidad del estado de daño					
			Nulo (0)	Leve (1)	Moderado (2)	Severo (3)	Extensivo (4)	Completo (5)
VI	3.1883	2.5506	0.0016	0.0380	0.1685	0.3372	0.3468	0.1078
VI-VII	3.6553	2.9242	0.0002	0.0104	0.0747	0.2366	0.4115	0.2666
VII	4.0382	3.2306	0.0000	0.0023	0.0255	0.1232	0.3511	0.4979
VII-VIII	4.3320	3.4656	0.0000	0.0004	0.0072	0.0497	0.2179	0.7248
VIII	4.5462	3.6370	0.0000	0.0001	0.0018	0.0162	0.1004	0.8816

Se observa cómo el daño esperado para un terremoto relativamente pequeño es relativamente alto. Por ejemplo, para el escenario determinista, aproximadamente un 45% de los edificios altos y medianos de mampostería no reforzada localizados en la Zona II sufrirían un estado de daño entre moderado y severo. Para el escenario probabilista los edificios dañados estarían alrededor del 75%. Este hecho

L.G. Pujades, A.H. Barbat, N. Lantada

confirma la alta vulnerabilidad de este tipo de edificios. Moreno (2006) efectúa un estudio análogo para los edificios de hormigón armado, obteniendo las matrices de probabilidad de daño correspondientes. A partir de estas matrices de probabilidad de daño, se han construido los escenarios de daño físico directo. La Figura 21 muestra el escenario de daño determinista. La Figura 22 muestra el caso probabilista.

El detalle y calidad de la base de datos de los edificios de la ciudad nos ha permitido realizar el análisis de vulnerabilidad y de daño edificio por edificio. Por lo tanto, el sistema de información geográfica utilizado permite obtener mapas detallados de cualquier distrito, barrio o división administrativa a nivel de edificio. Una forma también útil de representar el daño es mediante mapas de probabilidad de ocurrencia de un determinado estado de daño. La Figura 23 y la Figura 24 muestran respectivamente las probabilidades del estado de daño moderado y severo para el escenario determinista y para el distrito más antiguo de la ciudad (*Ciutat Vella*). La Figura 25 y la Figura 26 muestran las probabilidades de los mismos estados de daño para el distrito más emblemático de Barcelona (*L'Eixample*) donde se acumula una importante actividad económica y una elevada densidad de población.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se han expuesto dos metodologías de generación y análisis de escenarios de daño sísmico entendidos como la predicción de la situación esperable en caso de ocurrir un terremoto. Ambos métodos se han aplicado a una ciudad situada en una región donde el peligro sísmico es bajo.

El método del índice de vulnerabilidad considera la acción en términos de intensidad macrosísmica y caracteriza la vulnerabilidad del edificio mediante un índice. La predicción del daño esperado se efectúa a partir del ajuste de funciones semiempíricas que permiten estimar, de forma completa, tanto el daño esperado o estado de daño más probable, como las probabilidades de ocurrencia de cada uno de los estados de daño. El método es extremadamente versátil para caracterizar el comportamiento sísmico de los edificios, dado que permite modular el índice de vulnerabilidad, representativo de la clase, mediante modificadores regionales y de edificio. De esta forma, un mismo tipo de edificio puede recorrer un amplio rango de índices y, por lo tanto, de acuerdo a la escala macrosísmica EMS'98, un amplio rango de vulnerabilidades. La aplicación a grandes núcleos urbanos es rápida y sencilla y permite obtener escenarios robustos cuando se interpretan desde la óptica probabilista.



Métodos avanzados para la obtención de escenarios de riesgo sísmico. Aplicación a Barcelona

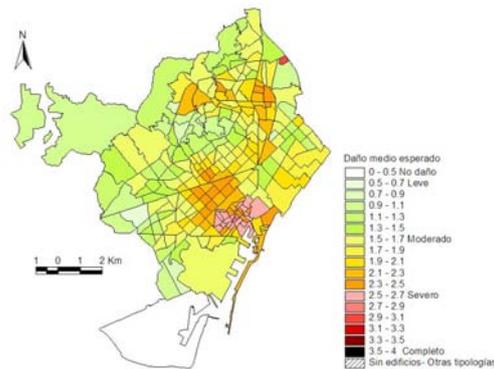


Figura 19. Distribución del grado de daño medio esperado por ZRP para el escenario determinista. Método del índice de vulnerabilidad.

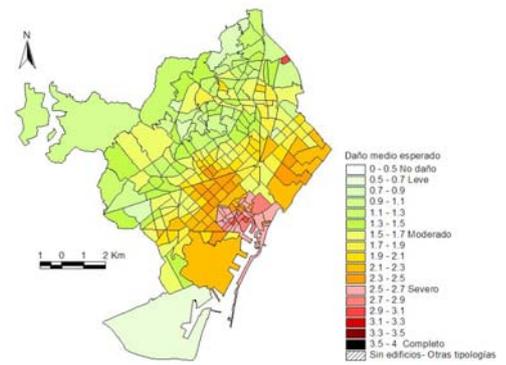


Figura 20. Distribución del grado de daño medio esperado por ZRP para el escenario probabilista. Método del índice de vulnerabilidad.

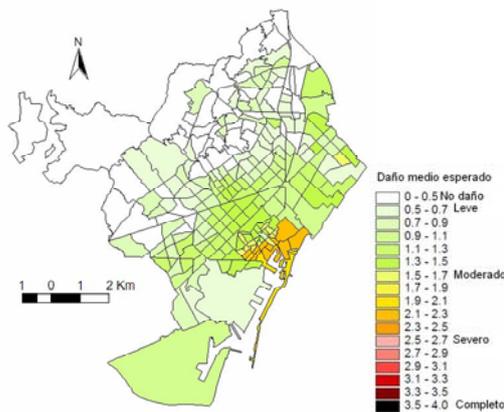


Figura 21. Distribución del grado de daño medio esperado por ZRP para el escenario determinista. Método del espectro de capacidad.

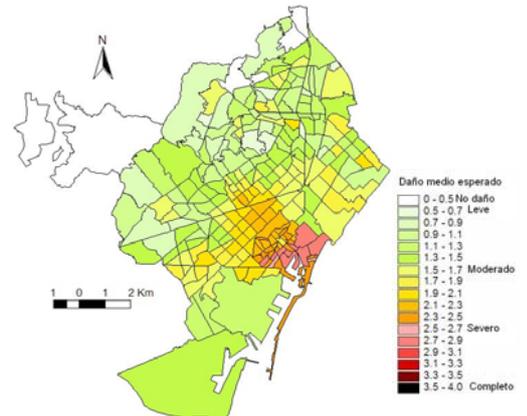


Figura 22. Distribución del grado de daño medio esperado por ZRP para el escenario probabilista. Método del espectro de capacidad.

L.G. Pujades, A.H. Barbat, N. Lantada

El método del espectro de capacidad parte del análisis del comportamiento sísmico de los edificios mediante modelos que consideran el comportamiento no lineal de las estructuras. Este método avanzado de análisis estructural ha sido incorporado por las nuevas metodologías de predicción de daño y de riesgo sísmico en grandes aglomeraciones urbanas.

Tabla 7. Matrices de probabilidad de daño para los edificios de mampostería de Barcelona obtenidas mediante el método del espectro de capacidad. d^* es el factor central de daño considerando 4 estados de daño diferentes del estado de daño nulo.

		Escenario determinista					Escenario probabilista						
		Probabilidades de los estados de daño					d^*	Probabilidades de los estados de daños					d^*
Zona		0	1	2	3	4		0	1	2	3	4	
Edificios bajos	I	0,950	0,037	0,011	0,002	0,000	0,066	0,632	0,257	0,095	0,014	0,002	0,498
	II	0,737	0,189	0,063	0,009	0,001	0,349	0,287	0,416	0,249	0,042	0,006	1,065
	III	0,917	0,061	0,018	0,003	0,001	0,109	0,431	0,365	0,173	0,027	0,004	0,807
	R	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,981	0,013	0,004	0,002	0,000	0,025
Edificios medianos	I	0,003	0,166	0,399	0,353	0,079	2,339	0,000	0,032	0,322	0,453	0,193	2,807
	II	0,121	0,384	0,289	0,189	0,017	1,598	0,007	0,160	0,419	0,347	0,067	2,306
	III	0,273	0,364	0,215	0,139	0,009	1,247	0,029	0,270	0,395	0,271	0,035	2,012
	R	0,623	0,193	0,105	0,076	0,003	0,642	0,109	0,391	0,305	0,181	0,014	1,600
Edificios altos	I	0,003	0,145	0,389	0,371	0,092	2,404	0,000	0,019	0,248	0,464	0,269	2,983
	II	0,135	0,388	0,281	0,178	0,018	1,556	0,002	0,133	0,385	0,381	0,099	2,441
	III	0,307	0,369	0,195	0,120	0,009	1,155	0,014	0,23	0,386	0,307	0,056	2,154
	R	0,647	0,205	0,086	0,059	0,003	0,566	0,632	0,257	0,095	0,014	0,002	0,498

Zonas correspondientes a la Microzonificación sísmica de la ciudad:

R – Afloramiento rocoso. I – Suelos blandos. II y III – Suelos intermedios.

Estados de daño: 0-Nulo, 1-Leve, 2-moderado, 3-Severo, 4-Completo.

d^* es el estado de daño medio o factor central de daño.

Con todo, requiere una mayor cantidad y calidad de información, tanto en lo que se refiere a la acción sísmica como en lo que se refiere a la caracterización de la fragilidad de los edificios. Para lo primero se requieren datos de aceleración sísmica; para lo segundo se requiere analizar modelos mecánicos de los edificios mediante programas de análisis no lineal de estructuras, para lo que se requieren también importantes simplificaciones. Se trata pues de un método potente pero costoso en tiempo de cálculo y en cantidad y calidad de datos.



Métodos avanzados para la obtención de escenarios de riesgo sísmico. Aplicación a Barcelona

La aplicación de ambos métodos a la ciudad de Barcelona ha proporcionado resultados consistentes. El análisis de un escenario determinista y de un escenario probabilista ha permitido predecir, con un importante nivel de detalle, la situación que la ocurrencia de estos terremotos produciría en la ciudad. A pesar de que en el ámbito de la ingeniería sísmica el método del espectro de capacidad puede considerarse más puntero y adecuado que el método del índice de vulnerabilidad, su aplicación a la ciudad se basa sólo en la modelización y caracterización de 6 tipos de edificios. Todos los edificios de la ciudad se suponen bien representados por alguna de estas 6 clases estructurales. El método del índice de vulnerabilidad permite afinar más y, de forma más sencilla, permite representar una amplia gama de tipos de edificios así como discriminar, dentro de cada tipología, las características geométricas y de posición dentro de agregados de los edificios individuales. Así pues, consideramos que el método del índice de vulnerabilidad en el caso de Barcelona proporciona una imagen más detallada y realista de los escenarios de daño. Los principales motivos de esta afirmación residen, por una parte, en la definición de la acción sísmica y, por otra, en la versatilidad y facilidad en la caracterización de los edificios. Barcelona no dispone de ningún dato de aceleración y sí de intensidad. La caracterización de los edificios es más fina en el método del índice de vulnerabilidad que en el método del espectro de capacidad. Con todo, el método del espectro de capacidad también permite obtener excelentes resultados, afina más en la definición de la acción sísmica y en el comportamiento dinámico de los edificios.

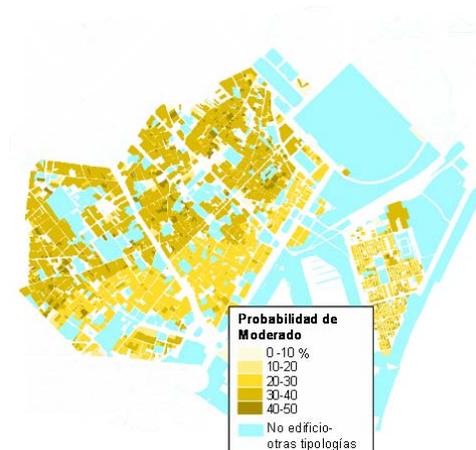


Figura 23. Probabilidad del estado de daño Moderado en el distrito de Ciutat Vella para el escenario determinista y el método del espectro de capacidad.

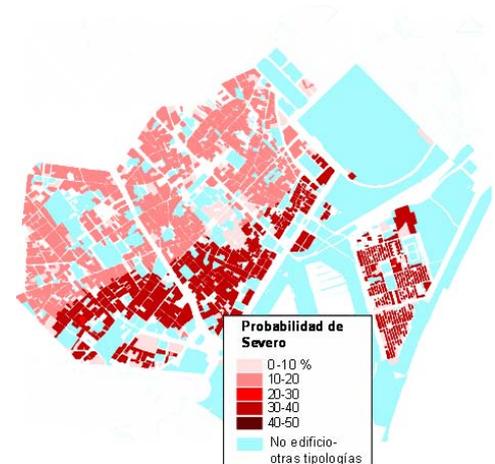


Figura 24. Probabilidad del estado de daño Severo en el distrito de Ciutat Vella para el escenario determinista y el método del espectro de capacidad.

L.G. Pujades, A.H. Barbat, N. Lantada

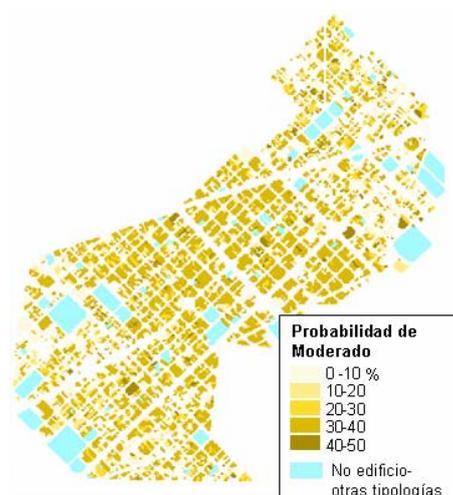


Figura 25. Probabilidad del estado de daño moderado en el distrito de l'Eixample para el escenario probabilista y el método del espectro de capacidad.

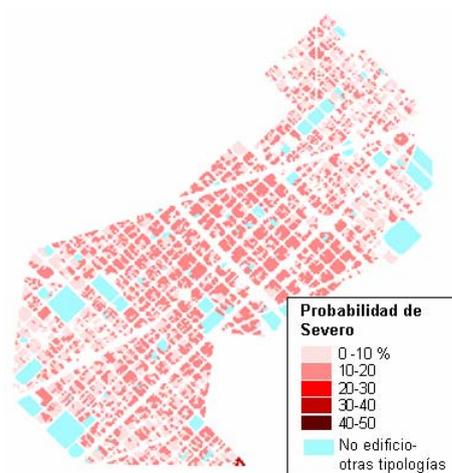


Figura 26. Probabilidad del estado de daño Severo en el distrito de l'Eixample para el escenario probabilista y el método del espectro de capacidad.

A pesar de la dificultad de comparar de forma directa los resultados obtenidos mediante ambos métodos, comparación que se complica al considerar diferentes estados de daño, ambos métodos han dado resultados consistentes, poniendo de manifiesto la alta vulnerabilidad y fragilidad de los edificios de Barcelona donde, el relativamente bajo peligro sísmico y el rápido crecimiento de la población han producido un entorno urbano altamente vulnerable a la acción de los terremotos haciendo predecibles daños importantes para terremotos relativamente pequeños.

El daño físico directo es el punto de partida para la consideración del riesgo que incluye daños a la población, a las instituciones y servicios así como al funcionamiento del sistema económico y social que sobrepasa el ámbito definido por la división territorial de una ciudad. Existen estudios (ver por ejemplo ATC-13 1985; Coburn y Spence 1992; 2002) que proporcionan herramientas para incorporar al análisis del daño otros aspectos como, por ejemplo, el número de heridos y muertos, el número de personas sin hogar, el volumen de escombros y el costo económico entre otros. Estas herramientas, en general, suelen ser fórmulas empíricas compatibles con datos de terremotos ocurridos en el pasado y suelen basarse en el conocimiento de las probabilidades de ocurrencia de los estados de daño físico. Por lo tanto, tanto los métodos expuestos, como el caso de aplicación aquí presentado constituyen una herramienta importante previa a otros análisis más sofisticados de riesgo sísmico.



Métodos avanzados para la obtención de escenarios de riesgo sísmico. Aplicación a Barcelona

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia de España y con fondos FEDER en los proyectos con números de referencia REN2002-03365/RIES, REN2003-07170 RIES, GLC2004-22325-E y CGL-2005-04541-C03-02/BTE y por la Comisión Europea mediante el proyecto RISK-UE, contrato No. EVK4-CT-2000-00014.

Referencias

1. Grünthal, G. (editor) (1998). *European Macroseismic Scale 1998*, Centre Européen de Géodynamique et Séismologie, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Volume 15, Luxemburg.
2. Angeletti, P., Bellina, A., Grandori, E., Moretti, A. y Petrini, V. (1988). *Comparison between vulnerability assessment and damage index, some results*, Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, 7, 181-186.
3. ATC-13 (1985). *Earthquake Damage Evaluation Data for California, ATC-13*, (FEMA), Applied Technology Council . Redwood City, CA.
4. ATC-25 (1991) *Seismic vulnerability and impact of disruption of lifelines in the conterminous United States*. ATC-25, (FEMA), Applied Technology Council (1991). Redwood City, CA.
5. ATC-40 (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, Applied Technology Council, Report: SSC 96-01, Volume 1, Seismic Safety Commission, Redwood City, California.
6. Barbat, A. H. (1998). *El riesgo sísmico en el diseño de edificios*, Calidad Siderúrgica, Madrid.
7. Barbat, A. H., Yépez, F. y Canas, J. A. (1996). Damage scenarios simulation for seismic risk assessment in urban zones, *Earthquake Spectra*, 12(3), 371-394.
8. Barbat, A. H., Mena, U. y Yépez, F. (1998). Evaluación probabilista del riesgo sísmico en zonas urbanas, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 14(2), 247-268.
9. Barbat, A. H., Lagomarsino, S. and Pujades, L. G. (2006). Vulnerability assessment of dwelling buildings, in *Assessing an Managing Earthquake Risk*, Sousa, C., Roca, A. and Goula, X., editors, Springer, Dordrecht, The Netherlands.
10. Benedetti, D. y Petrini, V. (1984). Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: Proposte di un metodo di valutazione, *L'industria delle Costruzioni*, 149, 66-78.
11. Benedetti, D., Benzoni, G. and Parisi, M. A. (1988). Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16, 183-201.
12. Bonett, R.L., Barbat, A. H., Pujades, L. G., Lagomarsino, S. and Penna, A. (2004). *Performance assessment for unreinforced masonry buildings in low seismic hazard areas*. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver B.C (Canadá), CD.
13. Bonett, R.L. (2003). *Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada*. Tesis doctoral. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 474 pp.
14. Cardona O. D. y Barbat, A. H. (2000). *El riesgo sísmico y su prevención*, Calidad Siderúrgica, Madrid.
15. Carr, A. (2000) Inelastic Dynamic Analysis Program: RUAUMOKO and Post-processor for RUAUMOKO, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Nueva Zelanda.
16. Cerdà, I. (1968) *Teoría General de la Urbanización. Reforma y Ensanche de Barcelona*. Reedición: Instituto de estudios fiscales. Barcelona, 1968.
17. Cid, J. (1998). *Zonificación sísmica de la ciudad de Barcelona basada en métodos de simulación numérica de efectos locales*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

L.G. Pujades, A.H. Barbat, N. Lantada

18. Cid, J., Susagna, T., Goula, X., Chavarria, L., Figueras, S., Fleta, J., Casas, A. y A. Roca, (2001). Seismic Zonation of Barcelona Based on Numerical Simulation of Site Effects. *Pure Applied Geophysics*. Vol. 158.
19. Coburn, A. and R. Spence (2002). *Earthquake Protection*. Second edition. Jonh Wiley & Sons, Chichester (England).
20. Coburn, A. and R. Spence (1992). *Earthquake Protection*. Jonh Wiley & Sons, Chichester (England).
21. EC-8 (2004) Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Comité Européen de Normalisation., CEN Brussels.
22. Fajfar, P. (2002). Structural analysis in earthquake engineering - A breakthrough of simplified non-linear methods. *12th European Conference on Earthquake Engineering*, London.
23. Fajfar, P. y Gaspersic, P. (1996). The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, 23-67.
24. HAZUS 99-SR2 (2002). *HAZUS Technical Manual*, Federal Emergency Management Agency, FEMA & National Institute of Building Sciences, NIBS, Washington D.C., Vol. 1, 2, 3.
25. Galasco, M., Lagomarsino, S. y Penna, A. (2002). *TREMURI Program: Seismic Analyser of 3D Masonry Buildings*, Universidad de Genoa.
26. García Espuche, A. (1990). *El quadrat d'or. Centre de la Barcelona modernista. La formació d'un espai urbà privilegiat*. Olimpiada cultural Barcelona'92. Lunwerg Editores. 315 pp.
27. Giovinazzi, S. y Lagomarsino, S. (2002). *WP04: Guidelines for the implementation of the I level methodology for the vulnerability assessment of current buildings*. Genoa.
28. Giovinazzi S. (2005). *The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis*. Ph D. Dissertation. 20 may 2005. Faculty of Engineering Department of Civil Engineering of the University of Florence. Italy. Electronic version online available at: <http://bib11p1.rz.tu-bs.de/docportal/content/below/index.xml>(fecha de la última consulta 16 mayo 2006).
29. Giovinazzi S. and Lagomarsino S. (2004). *A Macroseismic Model for the vulnerability assessment of buildings*. 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, Canada.
30. Infocca (1999). *Funcions d'informació de Barcelona i Cartografia*, Informe interno. Institut Municipal d'Informàtica.IMI, Ajuntament de Barcelona.
31. Irizarry J., Goula X. y Susagna, T. (2003). *Analytical formulation for the elastic acceleration-displacement response spectra adapted to Barcelona soil conditions*. Technical Report, Instituto Cartográfico de Cataluña, Barcelona.
32. Lagomarsino, S. and Penna, A. (2003). *Guidelines for the implementation of the II level vulnerability methodology*. An advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different European towns (RISK-UE).
33. Lantada N. (2006). *Escenarios de riesgo sísmico en la ciudad de Barcelona*. Tesis Doctoral. Universidad Politècnica de Catalunya. Barcelona. (en curso).
34. Mc-Guirre R.K. (2004). *Seismic hazard and risk analysis*.EERI Publication No. MNO-10. Earthquake Engineering Research Institute. Oakland, California.
35. Milutinovic Z. V. and Trendafiloski G. S. (2003). *Vulnerability of current buildings*, WP-4. report. Work Package 4 of RISK_UE Project, European Commission, EVK4-CT-2000-00014.
36. Moreno, R.; Bairán, J.M., Pujades, L.G., Aparicio A.C. y A. Barbat (2004a). Evaluación probabilista del comportamiento de edificios porticados de hormigón armado. *Hormigon y Acero*. N. 232, 2º trimestre 2004. pp. 125-136.
37. Moreno, R., Pujades, L.G., Barbat, A.H. and A. C. Aparicio (2004b). Influence of masonry infills walls on the seismic behaviour of multi-storeys waffle slabs RC buildings. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver B.C (Canadá).
38. Moreno, R. (2006). *Análisis no lineal estático y dinámico para la evaluación del riesgo sísmico en edificios: aplicación a diversos escenarios sísmicos de Barcelona*.Tesis doctoral. Universidad Politècnica de Catalunya. Barcelona. (En curso).



Métodos avanzados para la obtención de escenarios de riesgo sísmico. Aplicación a Barcelona

39. Olivera C., Redondo E., Lambert J., Riera Melis A. i A. Roca (2006). *Els terratrèmols dels segles XIV i XV a Catalunya*. Ed. Institut Cartogràfic de Catalunya. Barcelona.
40. Paricio, A. (2001). *Secrets d'un sistema constructiu: l'Eixample*. Universidad Politécnica de Cataluña. Ediciones UPC. Barcelona.
41. Sandi, H. (1983). Earthquake risk and earthquake preparedness: some qualitative aspects and quantification possibilities, *Proceedings of the Seminar on Earthquake Preparedness*. UNDP/UNESCO/UNDRO Project for Earthquake Risk Reduction in the Balkan Region, Athens, 79-93.
42. Secanell, R. (1999). *Avaluació de la perillositat sísmica a Catalunya: anàlisi de sensibilitat per a diferents models d'ocurrència i paràmetres sísmics*. Tesis doctoral. Universidad de Barcelona. 335 pp.
43. Secanell, R., Goula, X., Susagna, T., Fleta, J. y Roca, A. (2004). Seismic hazard zonation of Catalonia, Spain integrating uncertainties. *Journal of Seismology* 8(1): 24-40.
44. Sponheuer, W. and Karnik, V., (1964). Neue seismische Skala, in Sponheuer, W., (ed), *Proc. 7th Symposium of the ESC*, Jena, 24-30 Sept. 1962, Veröff. Inst. f. Bodendyn. u. Erdbebenforsch. Jena d. Deutschen Akad. d. Wiss., No 77, pp 69-76.
45. Wilches-Chaux G. (1989). *Desastres, ecologismo y formación profesional*, SENA, Popayán, Colombia.
46. Whitman, R. V., Reed, J. W. y Hong, S. T. (1973). Earthquake damage probability matrices, *Proceedings of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering*, Roma.