

Método Avanzado para la Evaluación de la Vulnerabilidad y el Riesgo Sísmico. Aplicación a la Ciudad de Barcelona.

A. Roca¹, J. Irizarry¹, N. Lantada², A. Barbat², X. Goula¹,
L.I. Pujades² y T. Susagna¹

¹Instituto Cartográfico de Cataluña
Parc de Monjuïc S/N, 08038 Barcelona, España
jirizarry@icc.es

²Universidad Politécnica de Cataluña
C/ Jordi Girona, 1-3. Módulo D2, 08034 Barcelona, España
Nieves.Lantada@upc.edu

RESUMEN

Este trabajo resume la participación de la ciudad de Barcelona en el proyecto europeo RISK-UE: Un método avanzado para la evaluación de escenarios de riesgo sísmico con aplicación a diferentes ciudades europeas, el cual consiste en definir y aplicar metodologías para la evaluación de la peligrosidad, la vulnerabilidad y el riesgo sísmico en 7 ciudades europeas. La evaluación de la peligrosidad se realiza usando métodos deterministas y probabilistas en términos de intensidades y valores espectrales de aceleración. La vulnerabilidad del parque de edificios de Barcelona se evalúa usando el método del índice de vulnerabilidad y el del espectro de capacidad para así generar varios escenarios de riesgo sísmico para la ciudad.

Palabras clave: vulnerabilidad, riesgo, Barcelona, monumentos, escenarios

**Advanced Approach for Vulnerability
and Seismic Risk Evaluation.
Application to the City of Barcelona.**

ABSTRACT

This work summarizes the participation of the city of Barcelona in the European project «RISK-UE: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns» which consisted on defining and applying methodologies for the seismic hazard, vulnerability and risk assessment in seven European cities. The seismic hazard assessment was evaluated using both deterministic and probabilistic approaches both in terms of intensity and spectral acceleration values. The vulnerability of Barcelona's building stock was evaluated using the vulnerability index method and the capacity spectrum in order to generate various seismic risk scenarios for the city.

Keywords: vulnerability, risk, Barcelona, monuments, scenarios

1. INTRODUCCIÓN

La ciudad de Barcelona tiene aproximadamente 1.500.000 de habitantes. La ciudad está delimitada por las montañas de Collserola y los ríos Besós y Llobregat, y tiene un área de, aproximadamente, 100 km² con una densidad poblacional de 15.176 personas/km². La gran mayoría de sus edificios fueron contruidos cuando no existían los códigos de diseño antisísmico. La combinación de edificios antiguos, sin diseño sismorresistente, con una ciudad activa y densamente poblada puede representar un alto riesgo incluso bajo los efectos de un terremoto moderado.

La sismicidad de la región de Cataluña es moderada en comparación a otras regiones del Mar Mediterráneo. Entre los siglos XIV y XV, la actividad sísmica en la región fue la más alta conocida y varios terremotos causaron daños en la ciudad de Barcelona (Olivera et al., 2006). El 2 de Febrero de 1428, un terremoto en los Pirineos con una magnitud local de 6.5 y una distancia epicentral de 90 km causó daños en algunas iglesias de Barcelona. En 1448 otro terremoto con una magnitud local de 5.5 y un epicentro a 25 km del centro de la ciudad agrietó la pared de un castillo en la ciudad. Durante el siglo XX, algunos terremotos se han sentido en la ciudad con una intensidad máxima de IV grados en la escala MSK.

La evaluación del riesgo sísmico que aquí se presenta formó parte de la participación de la ciudad de Barcelona en el proyecto europeo RISK-UE: Un método avanzado para la evaluación de escenarios de riesgo sísmico con aplicación a diferentes ciudades europeas (Mouroux et al., 2002). El principal propósito del proyecto RISK-UE era desarrollar y aplicar las mismas metodologías para la evaluación de los daños directos e indirectos de un escenario sísmico, y las consecuencias de estos posibles daños para aumentar la conciencia sísmica en las ciudades participantes. De esta manera, las ciudades pueden impulsar los planes de acción necesarios para reducir su riesgo sísmico (Mouroux et al., 2004).

Un total de 10 organizaciones científicas y técnicas y las ciudades de Barcelona, Catania, Bucarest, Niza, Sofía, Vitola y Tesalónica colaboraron en el proyecto RISK-UE para desarrollar y aplicar metodologías para evaluar la peligrosidad, la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de las ciudades participantes. En el proyecto se establecieron metodologías para crear escenarios sísmicos centrándose en las características distintivas de las ciudades con respecto a la peligrosidad sísmica, los edificios normales, esenciales e históricos, líneas vitales y el funcionamiento de su sistema urbano.

Así las metodologías desarrolladas fueron aplicadas a las ciudades para evaluar diferentes escenarios de daño. La peligrosidad sísmica fue definida usando métodos probabilistas y deterministas, y se diseñó una matriz de tipologías estructurales para la ciudad. La vulnerabilidad de los edificios de vivienda y de los principales monumentos fue caracterizada para evaluar los daños correspondientes a diferentes escenarios de riesgo sísmico. Diferentes aspectos de la problemática de la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico en Europa, así como su aplicación, relacionadas al proyecto RISK-UE pueden encontrarse en el

libro recientemente publicado «Assessing and Managing Earthquake Risk» (Oliveira et al., 2006).

2. EVALUACIÓN DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA EN LA CIUDAD DE BARCELONA

La peligrosidad sísmica de la ciudad de Barcelona se evalúa usando métodos deterministas y probabilistas considerando efectos de suelos en ambos casos. La evaluación de la peligrosidad usando métodos deterministas se lleva a cabo en términos de intensidad y valores de aceleración espectral.

La evaluación probabilista de la peligrosidad fue evaluada solamente en términos de aceleración espectral. La peligrosidad determinista se basa en los terremotos históricos que más afectaron la ciudad de Barcelona. Los terremotos históricos seleccionados como terremotos de referencia fueron el de Gerona en 1428 ($I_0 = IX$) y el de Cardedeu en 1448 ($I_0 = VIII$) representados en la Figura 1.

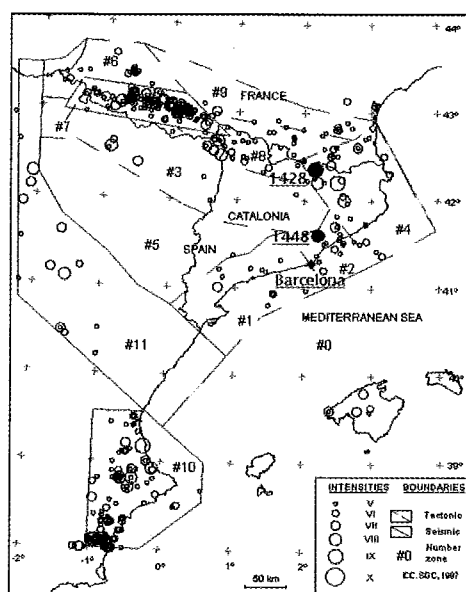


Figura 1. Localización de los terremotos de referencia y zonación sismotectónica.

La evaluación de la peligrosidad determinista en términos de intensidad se basa en el terremoto de Cardedeu de 1448 y la relación de atenuación ajustada por Secanell et al. (2004) para la región Cataluña. El mapa de la peligrosidad determinista en términos de intensidad para un suelo medio se muestra en la Figura 2a, donde se pueden apreciar distintas intensidades debido a la distancia del epicentro.

Los efectos de suelo son incluidos en términos de intensidad, añadiendo 0.5 grados en las zonas de suelos blandos (Secanell et al., 2004). La Figura 2b presenta la zonación de la ciudad de Barcelona desarrollada por Cid et al. (2001) y utilizada para incluir los efectos de suelos en las zonas I, II y III. En la Figura 2c se muestra el mapa de peligrosidad determinista con efectos de suelos en términos de intensidad en el cual las intensidades en Barcelona varían entre VI y VII-VIII grados.

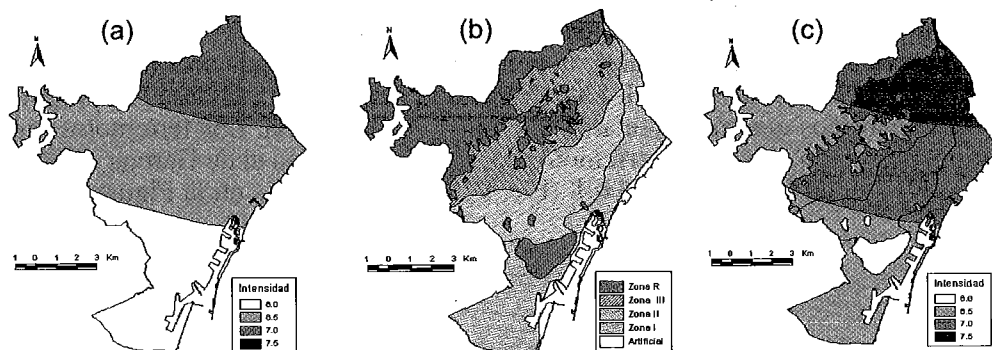


Figura 2. (a) Mapa de peligrosidad determinista para suelo medio en términos de intensidad; (b) Zonación sísmica basada en efectos locales (Cid et al., 2001); (c) Mapa de peligrosidad determinista con efectos locales en términos de intensidad.

La ley de atenuación propuesta por Ambraseys et al. (1996) es utilizada para evaluar la peligrosidad en términos de valores espectrales de aceleración. El espectro de aceleración determinista para un suelo medio refleja el efecto de los dos terremotos históricos de referencia. La peligrosidad sísmica por métodos probabilistas toma en consideración la zonación sismotectónica (Figura 1) y los parámetros sísmicos desarrollados por Secanell et al. (2004).

La Figura 3a muestra los espectros de respuesta de aceleración obtenidos para varios períodos de retorno comparados con el espectro de aceleración determinista en roca. El espectro de respuesta determinista que se obtiene es menor que el espectro probabilista asociado a un período de retorno de 475 años. El espectro de aceleración determinista es similar al espectro probabilista obtenido para un período de retorno de unos 200 años.

Los efectos de suelos se aplican en forma de factores de amplificación espectral calculados a partir de las funciones de transferencia para las zonas de suelos blandos en Barcelona presentadas por Cid et al. (2001). La Figura 3b muestra el espectro de respuesta de aceleración recomendado, S_a , con efectos de suelos obtenido usando el método probabilista y un período de retorno de 475 años.

En la Figura 3c se muestran los espectros de respuesta de aceleración-desplazamiento (ADRS, o, S_a-S_d) o espectros de demanda obtenidos mediante el método probabilista, simplificados usando formulaciones analíticas para las diferentes zonas de suelo. Esta simplificación se llevó a cabo para facilitar su uso al evaluar los escenarios de riesgo sísmico.

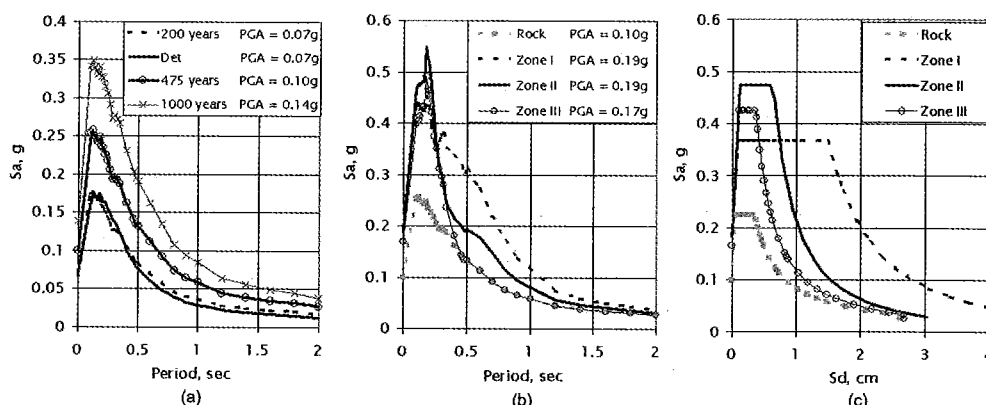


Figura 3. (a) Espectros de respuesta de aceleración probabilistas y determinista para un suelo medio en Barcelona; (b) Espectros de respuesta de aceleración probabilista para las diferentes zonas de suelo y un período de retorno de 475 años; (c) Formas analíticas de los espectros de demanda para las diferentes zonas de suelo y un período de retorno de 475 años.

Durante los terremotos históricos que han afectado la ciudad de Barcelona no se han observado efectos inducidos como deslizamientos, asentamientos, licuefacción o desprendimientos laterales. Además, un mapa de la velocidad máxima del terreno (PGV) determinista elaborado según Boomer et al. (2001) indica que los niveles de velocidad son menores de 0.05 m/s y por lo tanto no son lo suficientemente altos como para causar efectos inducidos en la ciudad.

3. MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

Dentro del proyecto RISK-UE la vulnerabilidad de edificios normales de uso residencial y de monumentos se evalúa en dos niveles de aplicación según los escenarios de peligrosidad sísmica generados. El nivel I del análisis de vulnerabilidad se basa en el método del índice de vulnerabilidad y la evaluación determinista de la peligrosidad en términos de intensidad.

El nivel II utiliza el método del espectro de capacidad y las dos evaluaciones de peligrosidad en términos de aceleraciones espectrales (una determinista y la otra probabilista). Las recomendaciones desarrolladas dentro del proyecto RISK-

UE para la evaluación de la vulnerabilidad de edificios normales de vivienda son expuestas por Milutinovic y Trendafiloski (2003), mientras que Lagomarsino et al. (2003) y Giovinazzi (2005) adaptan estos métodos para su aplicación a edificios monumentales.

El método del índice de vulnerabilidad es desarrollado durante los últimos 20 años dentro de las actividades del «Grupo Nazionale per la Difesa dai Terremoti» (GNDT) (Corsanego y Petrini, 1994). En los últimos años este método ha sido aplicado y revisado para verificar resultados y mejorarlo (Benedetti y Petrini, 1984; Bernardini, 1997; Dolce, 1997; Bernardini, 2000).

Este método se basa en el hecho de que ciertas clases de estructuras con configuraciones y patrones de carga similares tienden a experimentar tipos de daños similares cuando son afectadas por un terremoto. Para estas clases de edificios se desarrollan funciones de vulnerabilidad basadas en la observación de daños reales. En estas funciones de vulnerabilidad se usa un índice de vulnerabilidad, V_p , para representar y cuantificar cuán vulnerable es la clase de edificios a las cargas impuestas por un terremoto. Estas funciones de vulnerabilidad permiten calcular el daño esperado según la vulnerabilidad del edificio y de la intensidad del terremoto que lo afecta.

Lagomarsino et al. (2003) desarrollan los índices de vulnerabilidad asociados a las tipologías estructurales más representativas de las ciudades participantes, definidas en el proyecto RISK-UE. La Tabla 1 muestra los índices de vulnerabilidad para las tipologías estructurales representativas de la ciudad de Barcelona. Lagomarsino et al. (2003) también desarrollan los índices de vulnerabilidad que se aplican en la evaluación de vulnerabilidad de los edificios monumentales que se muestran en la Tabla 2.

Después de asignar un índice de vulnerabilidad a un edificio o monumento, este se puede modificar en función de las características específicas de dicho edificio o monumento que contribuyen significativamente a su respuesta sísmica. Milutinovic y Trendafiloski (2003) resumen todos los modificadores propuestos en el proyecto RISK-UE para los edificios normales que incluyen, entre otras características, la altura, calidad del diseño sísmico, estado de conservación, etc. Lagomarsino et al. (2003) definen modificadores similares para las diferentes tipologías de monumentos.

La Ecuación 1 muestra la función de vulnerabilidad propuesta por Sandi y Floricel (1995) para representar las curvas de vulnerabilidad. Esta función de vulnerabilidad depende de dos parámetros. El índice de vulnerabilidad, V_p , y el parámetro, Φ . Este último tiene un valor de 3.0 para los edificios normales, mientras que para los monumentos depende de la tipología, como se puede ver en la Tabla 2.

$$\mu_d = 2.5 \left[1 + \tanh \left(\frac{1 + 6.25V_p - 13.1}{\Phi} \right) \right] \quad (1)$$

Tabla 1. Índices de vulnerabilidad para las clases estructurales de Barcelona

RISK-UE		Descripción	V ₁ Min	V ₁ -	V ₁ Promedio	V ₁ +	V ₁ Max
URM	M3.1	Mampostería no reforzada con forjados de madera	0.460	0.650	0.740	0.830	1.020
	M3.2	Mampostería no reforzada con arcos de mampostería	0.460	0.650	0.776	0.953	1.020
	M3.3	Mampostería no reforzada con forjados de Acero y bovedillas cerámica	0.460	0.527	0.704	0.830	1.020
	M3.4	Mampostería no reforzada con forjados de hormigón armado	0.300	0.490	0.616	0.793	0.860
RC	RC3.2	Pórticos de hormigón armado con muros de relleno de mampostería con irregularidades	0.060	0.127	0.522	0.880	1.020
Acero	S1	Pórticos de acero	-0.020	0.467	0.363	0.640	0.860
	S3	Pórticos de acero con muros de relleno de mampostería	0.140	0.330	0.484	0.640	0.860
	S5	Sistema mixtos de acero y hormigón armado	-0.020	0.257	0.402	0.720	1.020

La función de vulnerabilidad nos define el grado de daño promedio, μ_d , que se puede esperar dada una cierta intensidad. Las curvas de vulnerabilidad para las tipologías de monumentos se muestran en la Figura 4 junto a la condición de daño asociada a los grados de daños. El grado de daño promedio, μ_d , permite obtener la distribución de la probabilidad de daño usando la distribución binomial.

La evaluación de la vulnerabilidad de Nivel II dentro de RISK-UE se basa en el método del espectro de capacidad. El método del espectro de capacidad fue originalmente desarrollado como un método de evaluación rápida del desempeño de estructuras en un área piloto (Freeman et al., 1975). Este método compara la capacidad de una estructura de resistir fuerzas laterales con la demanda de resistencia que un terremoto impone a la estructura para poder evaluar el desempeño de la estructura bajo cargas sísmicas.

Tabla 2. Índices de vulnerabilidad para las tipologías de monumentos.

Tipologías de Monumentos	V_I Inferior	V_I Promedio	V_I Superior	Parámetro Φ
Palacios/ Edificios	0.496	0.616	0.956	2.3
Monasterios	0.616	0.736	1.076	2.3
Castillos	0.356	0.456	0.766	2.3
Iglesias	0.77	0.89	1.26	3.0
Capillas	0.65	0.77	1.14	3.0
Mezquitas	0.67	0.73	0.94	2.65
Teatros	0.616	0.736	1.086	2.65
Torres	0.636	0.776	1.136	2.3
Puentes	0.216	0.296	0.566	2.3
Murallas	0.396	0.496	0.746	2.3
Arcos Triunfales	0.376	0.456	0.706	2.3
Obeliscos	0.396	0.456	0.746	1.95
Estatuas/ Fuentes	0.236	0.296	0.606	1.95

Un diagrama de fuerza lateral contra desplazamiento representa la capacidad de la estructura, mientras que la demanda sísmica se representa con el espectro de demanda del terremoto, un diagrama aceleración espectral, S_a , contra desplazamiento espectral, S_d , como se presenta en la Figura 5. Si los espectros se cruzan en la región elástica de la curva de capacidad, el punto de cruce de los mismos indica la localización del punto de desempeño. El desplazamiento espectral en el punto de desempeño permite determinar el nivel de daño que puede esperarse en la estructura. Si el cruce inicial de ambas curvas ocurre fuera de esa región debe realizarse un proceso iterativo para encontrar el punto de desempeño, pues es necesario reducir el espectro de demanda para reflejar el mismo estado de amortiguamiento de la estructura (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

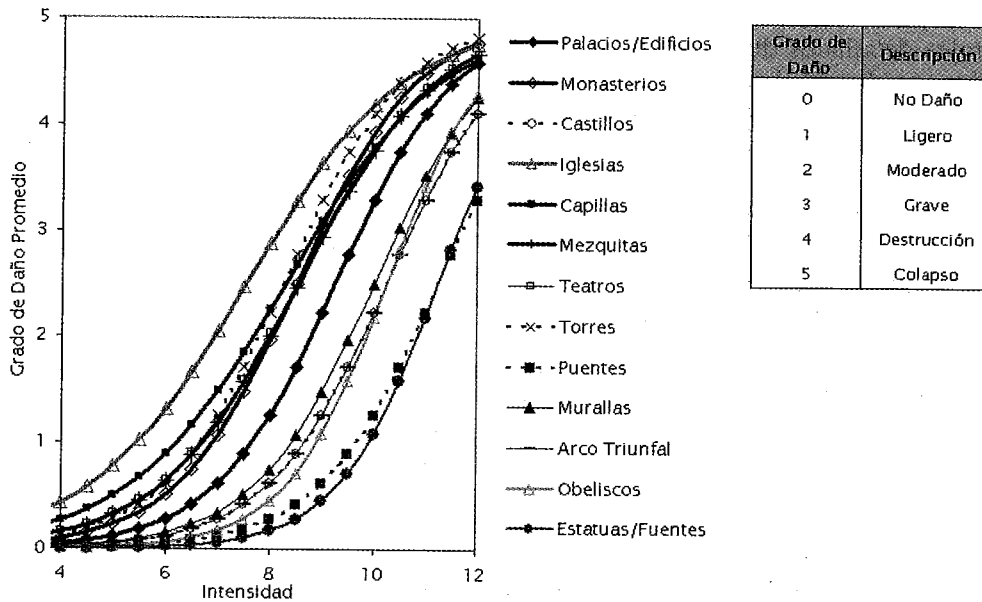


Figura 4. Curvas de Vulnerabilidad promedio para las tipologías de monumentos y su descripción de daños.

Dentro del proyecto RISK-UE se utilizaron varios métodos para calcular la curva de capacidad para las tipologías estructurales. En general las curvas de capacidad de un edificio o clase de edificios, también llamadas «curvas push-over», son diagramas fuerza-desplazamiento que permiten establecer su comportamiento sísmico. Su desarrollo requiere modelar y analizar la estructura mediante programas de cálculo y análisis estructural.

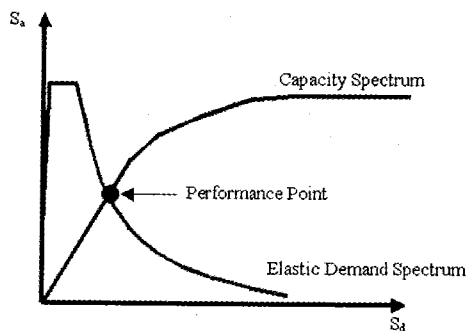


Figura 5. Diagrama del método del espectro de capacidad.

Para los edificios de mampostería no reforzada se obtuvieron planos estructurales detallados de edificios de 2, 4 y 6 plantas, representativos de edificios bajos, medianos y altos respectivamente. Bonett (2003) obtuvo las curvas de capacidad mediante el programa TreMuri (Galasco et al., 2002). De modo similar, con base en planos estructurales detallados, se modelaron tres edificios de hormigón armado, representativos respectivamente de edificios bajos (2 plantas), medianos (5 plantas) y altos (8 plantas) (Moreno et al., 2004). Las estructuras se modelaron como pórticos planos interconectados y se obtuvieron curvas de capacidad, mediante análisis estáticos no lineales, utilizando el programa RUAUMOKO-2D (Carr, 2000).

Los espectros de capacidad son las curvas de capacidad en su representación desplazamiento (S_d), aceleración (S_a) espectrales. Para cada estado de daño, la curva de fragilidad proporciona la probabilidad de alcanzar o superar ese estado de daño en función de un parámetro que representa la acción sísmica. Suponiendo que estas curvas siguen una distribución lognormal, quedan determinadas mediante el valor medio o umbral de daño y la desviación típica de la distribución. Se ha utilizado un método simplificado (Milutinovic y Trendafiloski, 2003) que permite su obtención de forma directa a partir de los espectros de capacidad. De esta forma se han obtenido espectros de capacidad y curvas de fragilidad para los edificios específicos de la ciudad de Barcelona.

En el caso de los monumentos se calcularon curvas de capacidad para dos monumentos representativos usando los métodos del análisis de elementos finitos y el análisis de equilibrio límite aplicado a edificios de mampostería (Irizarry et al., 2002; Irizarry, 2004). Generar curvas de capacidad para cada una de las tipologías monumentales resultaría poco fiable dado que aunque pertenezcan a una misma tipología los monumentos son muy diferentes entre sí y merecen cada uno un análisis estructural particular (Lagomarsino et al., 2003).

El análisis de elementos finitos se realizó usando el programa ANSYS 5.7 (ANSYS Inc., 2001). En el mismo, la estructura se puede modelar a través de elementos con un comportamiento no lineal, el cual toma en consideración una capacidad en tensión limitada y la degradación progresiva de la rigidez después de un nivel predeterminado de esfuerzo. Se pueden considerar diferentes tipos de colapso como por deslizamiento, aplastamiento, fricción, etc. Para aplicar este análisis a las estructuras de mampostería se utiliza el modelo constitutivo no lineal desarrollado por Gambarotta y Lagomarsino (1997).

Para simular el comportamiento sísmico de la estructura se lleva a cabo una simulación estática no lineal en incrementos por medio de elementos finitos, considerando grandes deflexiones. Una aceleración horizontal en aumento representa, desde el punto de vista estático, la acción de la fuerza sísmica. En el análisis de elementos finitos, el modelo continuo de la estructura permite considerar su capacidad de deformación estructural y no-linealidad.

El análisis del equilibrio límite representa un método simplificado para evaluar el factor de carga lateral, λ , que rompe el equilibrio estático activando así la condición de mecanismo en la estructura, la cual puede ser representada por una cadena cinemática de cuerpos rígidos y es incapaz de soportar carga lateral adi-

cional. El factor de carga lateral es la razón entre la fuerza que activa la condición de mecanismo y el peso de la estructura. Para poder aplicar este tipo de análisis a las estructuras de mampostería se asumen los conceptos definidos por Como (1992) y Heyman (1966) para su comportamiento.

Para determinar la curva de capacidad usando el análisis de límite se define un mecanismo de colapso para el cual se determina el valor mínimo del factor de carga asociado al mismo. A continuación se definen otros posibles mecanismos de colapso para la estructura y sus correspondientes factores de carga mínimos. Entonces se estudia la evolución del mecanismo con el mínimo valor del factor de carga hasta conocer el desplazamiento último de la estructura cuando el factor de carga es cero. Con este procedimiento se obtienen dos valores del factor de carga que junto a sus desplazamientos asociados permiten dibujar la curva de capacidad de la estructura (Irizarry et al., 2002).

4. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE LOS EDIFICIOS DE VIVIENDA

La aplicación de los métodos de vulnerabilidad a la ciudad de Barcelona se lleva a cabo mediante la utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG), en el cual se recopiló información de 80.587 parcelas de la ciudad, muchas de las cuales forman manzanas usualmente compuestas por edificios agregados. Esta información es suficientemente detallada como para poder identificar las características individuales de los edificios.

La ciudad de Barcelona está dividida en 10 distritos, que a su vez se subdividen en 38 barrios y 248 zonas censales. La unidad censal se seleccionó como unidad básica para la representación de los resultados de la evaluación de la vulnerabilidad aunque los cálculos se hacen a nivel de edificio individual. Barcelona tiene aproximadamente unas 700.000 viviendas distribuidas en 70.000 edificios, con un promedio de 2,2 habitantes por vivienda.

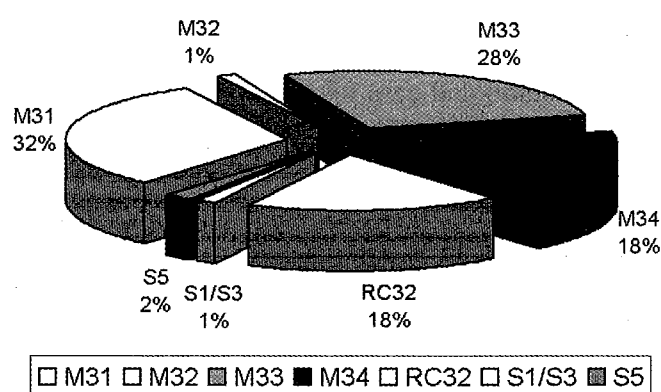


Figura 6. Distribución de las tipologías representativas de Barcelona.

Aproximadamente el 80 % de los edificios de Barcelona fueron construidos antes de que se implantara el primer código sísmico en España (PGS-1, 1968). Un 97 % de los edificios son de mampostería (M) y hormigón armado (RC). La Figura 6 muestra la distribución de las principales tipologías identificadas en la ciudad de Barcelona. Una vez caracterizadas las principales tipologías estructurales de la ciudad se evalúa la vulnerabilidad utilizando las metodologías propuestas por el proyecto RISK-UE.

En la aplicación de este método se asignan índices de vulnerabilidad a los edificios individuales considerando modificadores regionales, para la ciudad de Barcelona, modificadores de comportamiento del edificio, que dependen del número de plantas del edificio, de su regularidad en planta y en altura, la longitud de fachada y estado de conservación, y modificadores de la posición relativa del edificio dentro del agregado (Lantada, 2006). El índice de vulnerabilidad promedio obtenido para los edificios de mampostería es 0.87, mientras que para los edificios de hormigón armado es 0.65. El mínimo índice de vulnerabilidad es de 0.70 para la mampostería y de 0.40 para los edificios de hormigón armado. El máximo valor para el índice de vulnerabilidad es de 0.85 para los edificios de hormigón armado y muy cercano a 1 para los edificios de mampostería.

Para los edificios representativos de la ciudad de Barcelona se desarrollaron tanto curvas de capacidad, como espectros de capacidad y curvas de fragilidad. Los edificios de hormigón armado muestran un mejor desempeño sísmico que los edificios de mampostería. Por ejemplo, en el caso de un desplazamiento espectral de 4 cm, la probabilidad de un estado de daño completo es de aproximadamente el 30% para edificios de hormigón armado mientras que es de más del 60 % para edificios de mampostería. Afortunadamente, Barcelona está localizada en un área de baja peligrosidad sísmica pero estos análisis indican claramente que sus edificios son altamente vulnerables y, en consecuencia, la probabilidad de daño debido a un sismo no muy severo es significativa.

5. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE LOS MONUMENTOS MÁS IMPORTANTES

El análisis de vulnerabilidad para los 68 monumentos con un nivel de protección A en el Catálogo del Patrimonio Histórico y Artístico de Barcelona se llevó a cabo utilizando los índices de vulnerabilidad para las tipologías monumentales desarrolladas por Lagomarsino et al. (2003). El 76% de estos monumentos pertenecen a la tipología de palacios mientras que otros son clasificados como iglesias, monasterios, teatros, estatuas, castillos y capillas. Como se puede observar en la Figura 7a, se espera que la mayoría de los monumentos experimente una intensidad de grado VII.

A cada uno de los monumentos se le asigna un índice de vulnerabilidad que es modificado como es recomendado por Lagomarsino et al. (2003) y Giovinazzi (2005), para obtener un índice de vulnerabilidad adaptado a las características de cada monumento. El grado de daño promedio se calcula para los monumentos

usando los valores inferiores, medios y máximos del índice de vulnerabilidad. La Figura 7b muestra los 3 monumentos con los valores más altos del grado de daño promedio. El grado de daño promedio máximo obtenido considerando los valores medios del índice de vulnerabilidad es muy cercano a 3 indicando la posibilidad de daños moderados en los monumentos. Debido a la naturaleza de muchos de estos monumentos la posibilidad de daños, aunque sean leves, puede implicar la pérdida del valor patrimonial de los mismos.

También se calcularon distribuciones de la probabilidad de daño para cada monumento usando los valores inferiores, medios y superiores de los índices de vulnerabilidad. La distribución de la probabilidad de daño para la iglesia de la Sagrada Familia se muestra en la Figura 7c. Como se puede observar los valores superiores indican que el grado de daño 5, condición de colapso, es el grado de daño más probable. Considerando los valores medios y los inferiores la iglesia de la Sagrada Familia también tiene alguna probabilidad de colapsar pero es muy pequeña comparada con la probabilidad de un grado de daño 2 o 3 que indicaría daños leves a moderados.

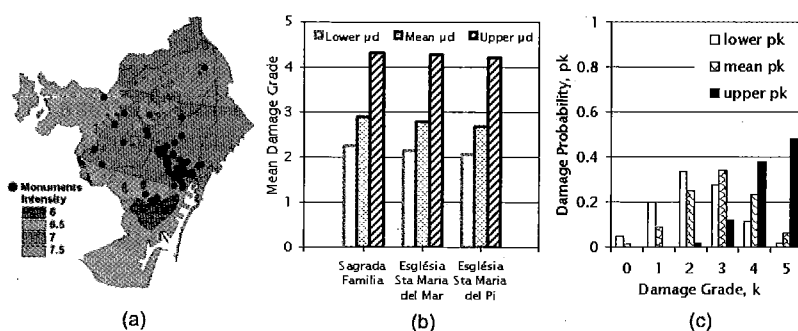


Figura 7. (a) Peligrosidad determinista que afecta a los monumentos analizados; (b) Los 3 monumentos con el mayor grado de daño para el escenario determinista; (c) Distribución de la probabilidad de daño para la Iglesia de Sagrada Familia para el escenario determinista.

La iglesia de Santa María del Mar y el Salón del Tinell fueron seleccionados de entre todos los monumentos para ser analizados con el método del espectro de capacidad. La Figura 8 muestra algunas vistas de estos monumentos, ambas estructuras góticas construidas en el siglo XIV. La curva de capacidad de Santa María del Mar se obtuvo usando análisis de elementos finitos y el análisis del equilibrio límite (Irizarry et al., 2002), mientras que la curva de capacidad del Salón del Tinell se evaluó usando únicamente el análisis del equilibrio límite. Ambas curvas de capacidad se muestran en la Figura 9a. Los límites de los estados de daño fueron definidos según lo indicado por Lagomarsino et al. (2003). El Salón del Tinell presenta una mayor resistencia a carga lateral que la iglesia de Santa Maria del Mar, mientras que esta última posee una mayor capacidad de deformación (Irizarry et al., 2004).

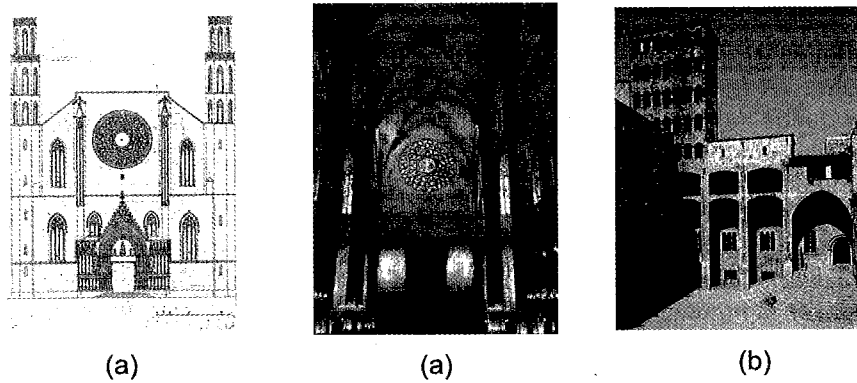


Figura 8 – (a) Santa María del Mar y (b) Salón del Tinell.

El procedimiento recomendado por Milutinovic y Trendafiloski (2003) fue usado para determinar el punto de desempeño de ambas estructuras ante el escenario probabilista. La Figura 9b muestra la comparación entre el espectro de capacidad para Santa María del Mar y el espectro de demanda probabilista para la zona I donde se encuentra localizada. El punto de desempeño obtenido para la iglesia se indica con un punto negro. Tanto para el espectro determinista como para el probabilista, los resultados obtenidos indican que ambos monumentos sufrirían daños ligeros. En el caso de estructuras monumentales aun daños ligeros pueden ocasionar pérdidas importantes en el contenido histórico y/o cultural del monumento.

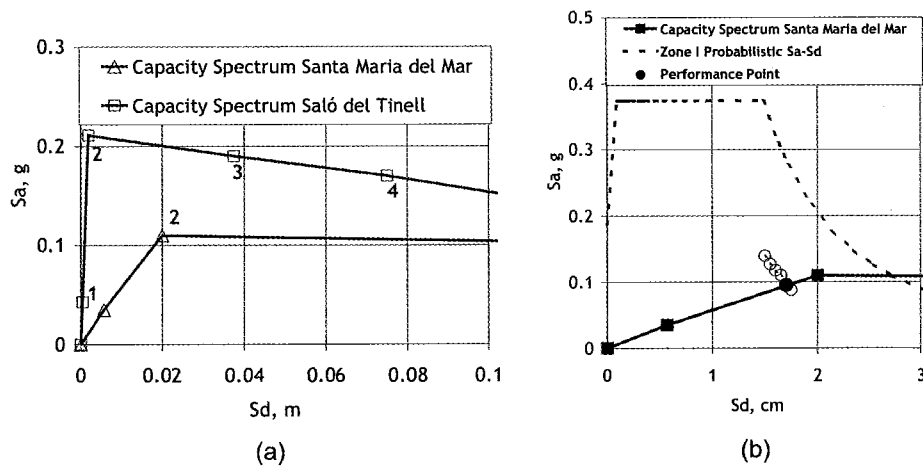


Figura 9. (a) Curvas de capacidad obtenidas para la iglesia de Santa María del Mar y el Salón del Tinell; (b) Punto de desempeño para la iglesia de Santa María del Mar en el escenario probabilista.

6. ESCENARIOS DE RIESGO SÍSMICO

Los análisis de peligrosidad y vulnerabilidad sísmica presentados se utilizaron para generar escenarios de riesgo para la ciudad de Barcelona. Se presentan a continuación los resultados obtenidos utilizando el método del espectro de capacidad tanto para los espectros deterministas como probabilistas. Estos resultados demuestran el impacto que un terremoto creíble puede causar en la población de Barcelona y sus consecuencias económicas.

Los espectros de respuesta determinista y probabilista juntamente con los espectros de capacidad, descritos anteriormente, se utilizan para determinar el punto de desempeño que permite obtener el valor de desplazamiento espectral máximo, correspondiente a la demanda específica. Las matrices de probabilidad de daño se obtienen a partir de este valor de desplazamiento, usando las curvas de fragilidad. La probabilidad de ocurrencia de cada estado de daño sigue una distribución binomial o Beta equivalente. Este tipo de distribuciones se caracteriza mediante un solo parámetro que suele llamarse estado o grado de daño medio, DS_m . Suele definirse mediante la siguiente expresión:

$$DS_m = \sum_{i=0}^N i P[DS_i] \quad (2)$$

donde N es el número de estados de daño considerados, i es el número correspondiente al estado de daño DS_i , es decir toma valores de 0 a N para cada estado de daño considerado en el análisis, es decir de 0 a 5 en el método del índice de vulnerabilidad y de 0 a 4 en el método del espectro de capacidad. $P[DS_i]$ es la probabilidad de ocurrencia del estado de daño i. La Figura 10 muestra los escenarios de daño de Nivel II para los casos determinista y probabilista, en función del grado de daño medio para cada zona censal.



Figura 10. Nivel II: escenarios de daño determinista (izquierda) y probabilista (derecha).

Se observa una distribución del daño medio en forma radial con el daño mayor en el centro de la ciudad (Ciutat Vella), descendiendo hacia el extra radio. Esta constatación puede ser debida a la evolución histórica de la ciudad, con viejos edificios de mampostería concentrados en el centro antiguo y en la primera zona de expansión de la ciudad representada por el distrito de *El Eixample*. El escenario probabilista da lugar a mayores daños que el determinista. Ello ocurre frecuentemente en zonas donde la peligrosidad sísmica es de nivel bajo a moderado, como es el caso de la zona costera catalana, ya que en estos casos el sismo evaluado con técnicas deterministas suele ser menor que el evaluado con técnicas probabilistas. Lo contrario ocurre en zonas de gran peligro sísmico. Se dispone también de la información detallada de la distribución de daños, no sólo del daño medio como se muestra en la Figura 10, y por tanto se han representado también mapas con las probabilidades de alcanzar los diversos grados de daño, para toda la ciudad, utilizando como unidad de base el distrito, el barrio o las zonas censales.

El número estimado de víctimas mortales y de heridos se obtiene al aplicar el modelo propuesto por Coburn y Spence (2002), quienes cuantifican estos números críticos mediante la siguiente expresión:

$$K_s = C [M1 M2 M3 (M4 + M5 (1 - M4))] \quad (3)$$

donde, para cada tipo de edificio y clase de víctimas, K_s es el número de víctimas. C es el número de edificios colapsados, que se calcula como el número de edificios de la tipología considerada por la probabilidad de colapso. $M1$ es el número de personas que viven en el edificio. Este número puede estimarse a partir de la superficie total del edificio, considerando todas las plantas con viviendas, y del número de personas por m^2 edificado. $M2$ es el porcentaje de ocupación del edificio en el momento del terremoto (estimado en el 80%). Este número depende del día y de la hora en que se produce el terremoto; se suele suponer máxima la ocupación en horario nocturno de días laborables. $M3$ representa el porcentaje de ocupantes afectados por el colapso. $M4$ depende del tipo de edificio y define la distribución porcentual de los afectados en las diferentes clases de víctimas, es decir en muertos, heridos leves, heridos graves y heridos que requieren hospitalización. $M5$ cuantifica la mortalidad post-colapso entre las víctimas supervivientes.

Para el escenario probabilista de Nivel II el número de víctimas mortales y de heridos graves se estima en 5200 y 5800, respectivamente. Estos valores tan altos se deben principalmente a la alta vulnerabilidad de los edificios y la gran densidad de población. Respecto a los escombros que produciría este escenario, se ha seguido la aproximación de Hazus'99 (FEMA, 1999), que propone distintos factores de escombros según las tipologías constructivas y los diversos grados de daño. Para el escenario probabilista de Nivel II se estima un total de 9.500 millones de toneladas.

El coste económico se ha estimado a partir del precio de reposición de los edificios. Teniendo en cuenta el aumento rápido de esta cantidad se han realizado dos estimaciones. La primera da el coste absoluto en millones de € mientras que la segunda da la superficie de construcción equivalente que se estima será destruida por el terremoto. Se han utilizado los valores propuestos por las guías americanas ATC-13 (1985) para la estimación de porcentajes de superficie destruida para cada grado de daño junto con un valor de 706.5€/m^2 , para un edificio de hormigón tomado del Boletín Económico de la Construcción, (2004).

Pérdidas económicas adicionales se deducen de la pérdida del contenido, que se estima igual a un 50% del precio de reposición del edificio. El coste total del escenario probabilista de Nivel II sería superior a los 13.000 millones de €, correspondiendo 8.700 millones al daño físico de los edificios y la mitad, 4.350 millones a las pérdidas del contenido. Los resultados del escenario probabilista de Nivel II en forma de número de víctimas, de escombros generados y de pérdidas económicas se han representado, por unidades censales, en los mapas de la Figura 11.

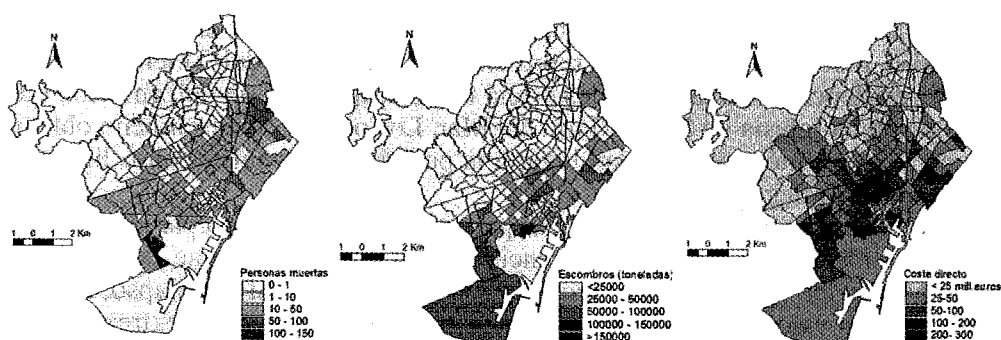


Figura 11. Mapas con la estimación del número de víctimas mortales, de toneladas de escombros generados y de pérdidas económicas correspondiente al escenario probabilista de Nivel II.

7. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La evaluación determinista de la peligrosidad sísmica en términos de Intensidad macrosísmica da lugares a valores parecidos a los obtenidos por estudios anteriores (Secanell et al., 2004). La evaluación determinista en términos de valores espectrales de aceleración ha dado lugar a estimaciones más bajas que las correspondientes al análisis probabilista para un período de retorno de 475 años. Los factores de amplificación espectral correspondientes a los distintos suelos presentes en la ciudad son comparables a los propuestos en el Eurocódigo 8 (CEN, 2004). Por otro lado no se esperan efectos inducidos, como fenómenos de

licuefacción, debido a los bajos valores de las velocidades del suelo calculados, confirmado por la ausencia de registros históricos de tales fenómenos en la ciudad.

El parque de edificios de Barcelona está principalmente compuesto por edificios de mampostería y de hormigón, que constituyen un 79% y 18% respectivamente del total de edificios existentes. La evaluación de la vulnerabilidad de los edificios de vivienda ha mostrado que los edificios de mampostería son más antiguos y más vulnerables que los de hormigón. Se han generado curvas de capacidad y de fragilidad, específicas para ambas tipologías, propias de la ciudad de Barcelona.

La evaluación del daño sísmico para un escenario de tipo determinista para los monumentos más emblemáticos de la ciudad, usando el método del índice de vulnerabilidad, ha revelado que pueden esperarse grados máximos de daño medio de tipo ligero a moderado. Si se considera la incertidumbre en la definición del índice de vulnerabilidad, algunos monumentos tienen una probabilidad considerable de sufrir colapso.

Si se aplica el método del espectro de capacidad (Nivel II) a dos de los más emblemáticos monumentos de la ciudad, es posible determinar los escenarios de daño tanto determinista como probabilista. La comparación de las curvas de capacidad muestra que la curva representativa del Salón del Tinell tiene una mayor resistencia a cargas laterales y una menor capacidad de deformación que la propia de la Iglesia de Santa María del Mar. Los puntos de desempeño obtenidos para ambos monumentos dan lugar a la posibilidad de sufrir daños ligeros a moderados, sin llegar a graves.

Las condiciones de daño obtenidas para ambos edificios son parecidos usando ambos métodos. La mayor diferencia estriba en el hecho que la Iglesia de Santa María del Mar tiene una pequeña probabilidad de sufrir colapso, incluso utilizando los valores medios del índice de vulnerabilidad, no los extremos. Los daños estimados son de la misma naturaleza que los que la Iglesia experimentó durante el terremoto de la Edad Media (Olivera et al., 2006) que ocurrió en el Pirineo Oriental.

Resumiendo, los escenarios considerados dan las estimaciones de daño siguientes:

- entre 1.500 y 6.500 víctimas mortales si el terremoto ocurre de noche, según los dos escenarios considerados,
- unos 10.000 millones de toneladas de escombros,
- alrededor de 13.000 M€ de pérdidas totales

8. REFERENCIAS

AMBRASEYS, N. N. ; K. A. SIMPSON & J.J. BOMMER (1996). Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 25, 371-400.

- ANSYS, Inc. (2001). ANSYS Release 5.7 computer program, ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, www.ansys.com
- ATC-13, (1985). *Earthquake Damage Evaluation Data for California*. ATC Applied Technology Council. Redwood City, California.
- BERNARDINI, A. (1997). Coherence between observations and forecasts of seismic vulnerability of masonry typologies. *Acts of the 8th ANIDIS National Congress: Seismic Engineering in Italy, Taormina*, 177-183.
- BERNARDINI, A. (2000). *The vulnerability of buildings - Evaluation on the national scale of the seismic vulnerability of ordinary buildings*. CNR-GNDT. Rome.
- BENEDETTI, D. & V., PETRINI (1984). On seismic vulnerability of masonry buildings: proposal of an evaluation procedure. *The industry of constructions* 18, 66-78.
- BONETT, R. L. (2003). *Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos de amenaza alta y moderada*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 474 pp.
- BOOMER, J.J; B. BORZI; G. CHLIMINTZAS; D. LEE ELNASHAI; E. FACCIOLI & S. TOLIS (2001). Definition of displacement response spectra for design. Seismic Actions, ICONS, Innovative Seismic Design Concepts for New and existing Structures. Contract No. FMRX-CT96-0022 (DG XII – RSRF), November.
- BOLETÍN ECONÓMICO DE LA CONSTRUCCIÓN (2004). Año 65 trimestre 1-3 No.257-259 feb.-agosto 2004, 206-211. Barcelona: publicaciones técnicas.
- CARR, A. (2000). «Inelastic Dynamic Analysis Program: RUAUMOKO and Post-processor for RUAUMOKO: DYNAPLOT», Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand.
- CEN, Comité Européen de Normalisation (2004). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance Part 1. CEN Management Centre. Bruselas. 229 pp.
- CID, J.; T. SUSAGNA; X. GOULA; L. CHAVARRIA; S. FIGUERAS; J. FLETA; A. CASAS & A. ROCA (2001). Seismic Zonation of Barcelona Based on Numerical Simulation of Site Effects. *Pure Applied Geophysics*, 158, No 12, 2559-2577.
- COBURN A. & R. SPENCE (2002). *Earthquake Protection. Second edition*. Wiley & Sons., LTD. 420 pp.
- COMO, M. (1992). Equilibrium and collapse analysis of masonry bodies. *Meccanica*, 27, 185-194.
- CORSANEGO, A. & V. PETRINI (1994). Evaluation of criteria of seismic vulnerability of the existing building patrimony on the national territory. *Seismic Engineering*, Vol. 1 Patron Ed., 76-106.
- DOLCE, M. (1997). Evaluation of vulnerability for risk analysis and damage scenarios. *Acts of the 8th ANIDIS National Congress: Seismic Engineering in Italy, Taormina*, 217-226.

- FEMA (1999). *HAZUS 99: Earthquake Loss Estimation Methodology*. Federal Emergency Management Agency, Technical Manual.
- FREEMAN, S.A.; J.P. NICOLETTI & J.V. TYRELL (1975). Evaluations of existing buildings for seismic risk – A case study of Puget Sound Naval Shipyard, Bremerton, Washington. *Proceedings of the U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, EERI, 113-122, Berkeley.
- GALASCO, A.; S. LAGOMARSINO & A. PENNA (2002). «TREMURI Program: Seismic Analysis of 3D Masonry Buildings», University of Genoa, Italy.
- GAMBAROTTA, L. & S. LAGOMARSINO (1997). Damage models for the seismic response of brick masonry shear walls, Part II: the continuum model and its applications, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26, 441-462.
- GIOVINAZZI, S. (2005). *The vulnerability assessment and damage scenario in seismic risk analysis*. Tesis Doctoral. Technical University of Braunschweig. Alemania. 300 pp.
- HEYMAN, J. (1966). The stone skeleton. *International Journal of Solids Structures*, 2, 249-279.
- IRIZARRY, J. (2004). *An Advanced Approach to Seismic Risk Assessment. Application to the Cultural Heritage and the Urban System of Barcelona*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. España. 406 pp.
- IRIZARRY, J.; S. PODESTÀ & S. RESEMINI (2002). Capacity curves of monumental-heritage elements: the Santa Maria del Mar Church in Barcelona. *Proc. International Conference on «Earthquake loss estimation and risk reduction»*, Bucharest, October 2002.
- IRIZARRY, J.; X. GOULA; T. SUSAGNA; A. ROCA & F. MAÑÁ (2004). Earthquake risk scenarios for monuments in Barcelona, Spain, *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004.
- LAGOMARSINO, S.; S. GIOVINAZZI; S. PODESTÀ & S. RESEMINI (2003). Wp5: *Vulnerability of historical and monumental buildings Handbook (draft October 2003)*. RISK-UE: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contract No. EVK4-CT-2000-00014. 90 pp.
- LANTADA, N. (2006). *Aplicación de técnicas GIS a estimación de riesgos naturales. Riesgo sísmico*. Tesis Doctoral en realización. Universidad Politécnica de Cataluña. España.
- MILUTINOVIC, Z. & G. TRENDAFILOSKI (2003). WP4 *Vulnerability of current buildings*. RISK-UE: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contract No. EVK4-CT-2000-00014. 108 pp.
- MOUROUX, P.; M. BOUR & RISK-UE TEAM (2002). Risk-UE: an advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different European cities. *Proceedings of 12th European Conference of Earthquake Engineering*, Elsevier Science Ltd., London.

- MOUROUX, P. ; E. BERTRAND ; M. BOUR ; B. LE BRUN ; S. DEPINOS ; P. MASURE & RISK-UE TEAM (2004). The European Risk-UE project: and advanced approach to earthquake risk scenarios. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004.
- OLIVERA, C.; E. REDONDO; J. LAMBERT; A. RIERA-MELIS & A. ROCA (2006). «Els terratrèmols dels segles XIV I XV a Catalunya». Institut Cartogràfic de Catalunya. Generalitat de Catalunya. 407pp.
- OLIVEIRA, C. S.; A. ROCA & X. GOULA (eds) (2006). *Assessing And Managing Earthquake Risk: Geo-scientific and Engineering Knowledge for Earthquake Risk Mitigation: developments, tools, techniques*. Springer. 543 pp
- PGS-1 (1968). *Norma Sismorresistente P.G.S.-I*, Comisión Interministerial de la Presidencia del Gobierno, Decreto 106/1969 de 16 de enero de 1969.
- SANDI H. & I. FLORICEL (1995). Analysis of seismic risk affecting the existing building stock. *Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering*, 3, 1105-1110.
- SECANELL, R.; X. GOULA; T. SUSAGNA; J. FLETA & A. ROCA (2004). Seismic hazard zonation of Catalonia, Spain, integrating random uncertainties. *Journal of Seismology*, 8, 25-40.

