



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DEL TERRENO, CARTOGRÁFICA Y GEOFÍSICA

**EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO MEDIANTE
MÉTODOS AVANZADOS Y TÉCNICAS GIS.
APLICACIÓN A LA CIUDAD DE BARCELONA.**

TESIS DOCTORAL
(Volumen I)

Autora:

M^a Nieves Lantada Zarzosa

Directores:

Dr. Luis G. Pujades Beneit

Dr. José A. Gili Ripoll

Barcelona, 2007

CAPÍTULO 3

MODELADO DEL RIESGO SÍSMICO

3.1 Introducción

En el capítulo anterior se han expuesto los términos y conceptos relacionados con el riesgo sísmico y se ha comentado el alcance de este estudio, cuyos objetivos se ciñen al análisis del daño físico producido por los terremotos en edificios de viviendas y en la evaluación de diversos aspectos relacionados con su impacto. Se destacan los efectos sobre la población, la valoración del coste económico y la evaluación del volumen de escombros, aspectos todos ellos de vital importancia en la prevención y planificación de la atención a la emergencia. Este capítulo tercero es metodológico y en él se describen los diferentes enfoques, métodos y técnicas usados en la literatura para abordar el problema de la predicción del daño esperado como doble herramienta de predicción de escenarios sísmicos y de análisis del riesgo. Se hace un especial énfasis en los métodos y técnicas usados en la obtención de escenarios de daño sísmico en Barcelona. Probablemente, los lectores conocedores del riesgo sísmico,

pueden obviar la lectura de este capítulo, que se ha incluido por completitud y para revisar los diferentes métodos de análisis de riesgo.

El riesgo sísmico de un lugar, para un elemento expuesto y para un periodo de tiempo, se define mediante probabilidad de pérdida, generalmente económica, por causa sísmica en este lugar y para este elemento y periodo de tiempo concreto. En general, cuando se habla simplemente del riesgo de un lugar se suele entender la tasa de pérdida probable en un tiempo unitario, que suele tomarse el año, integrando o sumando para todos los elementos expuestos. Así, por ejemplo, cuando decimos el riesgo sísmico de una ciudad es de un millón de euros, hay que entender que, en promedio, cada año, la ciudad deberá afrontar un coste de este valor por causa sísmica. Suele usarse con frecuencia el concepto de *convolución*¹ para modelar el riesgo de cada elemento expuesto y se dice que el riesgo es la *convolución* de tres funciones temporales: la peligrosidad, la vulnerabilidad y el coste; es decir:

$$r(e, x, t) = p(e, x, t) \otimes v(e, x, t) \otimes c(e, x, t) \quad [3.1]$$

donde $r(e, x, t)$ define el riesgo del elemento e , expuesto en el lugar x en el instante t ; $p(e, x, t)$ es la función que define la peligrosidad sísmica que es independiente del elemento; $v(e, x, t)$ es la función que define la vulnerabilidad del elemento expuesto e y $c(e, x, t)$ es la función de costo o valor económico del elemento expuesto.

La ecuación [3.1] es conceptualmente potente y sencilla y toma del análisis de sistemas lineales el concepto de *convolución*. Con todo, su aplicación no es sencilla dado que la definición de las tres funciones involucradas es compleja.

¹ El concepto de *convolución* procede del análisis de sistemas de ecuaciones diferenciales lineales y permite su caracterización. En efecto, se establece que la salida s o respuesta del sistema a cualquier entrada es la convolución \otimes de la función de entrada i por una función característica del sistema que se llama función de respuesta o de transferencia del sistema r . Se define mediante la siguiente integral:

$$s(t) = i(t) \otimes r(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} i(\tau) r(t - \tau) d\tau$$

La propiedad más importante de la operación de convolución es que en el dominio frecuencial se convierte en un producto de las funciones involucradas; es decir: $S(\omega) = I(\omega) \cdot R(\omega)$. Dado que en el dominio frecuencial, la transformada de un impulso $\delta(t)$, es la identidad, se concluye que la función de transferencia del sistema lineal queda completamente definida mediante la respuesta a un impulso o función delta. En el análisis de riesgo probablemente las cosas no son tan sencillas pero se mantiene el concepto debido a su potencial conceptual de contribución de diversas funciones y al paralelismo con el producto de frecuencias o probabilidades.

En cualquier caso, el análisis de riesgo de una ciudad se suele efectuar en el dominio de las probabilidades y requiere la integración o suma de los resultados de la ecuación [3.1] para todos los elementos expuestos en todos los lugares que definen el área de estudio. Suele ser más útil y frecuente realizar estudios parciales del riesgo sísmico evaluando sólo determinados elementos (los llamamos escenarios) que son realizaciones parciales o incompletas de la ecuación [3.1]. Un escenario se define como la situación generada por la ocurrencia de un evento cuyo significado puede ser el de un terremoto histórico (*escenario determinista*) o un terremoto con una probabilidad determinada. En el diseño sismorresistente se ha hecho paradigmático el terremoto con una probabilidad de ocurrencia del 10% en 50 años, que corresponde al periodo de retorno de 475 años o a una probabilidad anual aproximada del 0.21 %. Nos solemos referir a este escenario como el *escenario probabilista*. Este tipo de estudios permite efectuar una aproximación al análisis del riesgo enfocando o focalizando aspectos de especial importancia cuyo conocimiento es particularmente conveniente y útil para predecir y prevenir el impacto de la catástrofe; y, en consecuencia, establecer estrategias para su mitigación así como para la planificación y gestión de la emergencia creada. Desafortunadamente, hoy en día aún este tipo de estudios cuesta que trasciendan los ambientes académicos, y las administraciones y autoridades con responsabilidad en la protección civil suelen desentenderse de los mismos, o tienden a minimizar o infravalorar su valor predictivo. Así quedó claramente de manifiesto en Nueva Orleans donde, en el 2004, un año antes del huracán Katrina, existía una simulación minuciosa virtual de un huracán de características parecidas; de forma que la catástrofe del 2005 fue la realización de una crónica anunciada. La utilidad práctica del esfuerzo de la simulación fue nula.

Así pues el análisis del riesgo sísmico, sea cual sea su nivel de estudio y de acuerdo con la ecuación [3.1], debe contener tres elementos esenciales:

- 1) *La peligrosidad*, entendida como probabilidad de ocurrencia de un sismo.
- 2) *La vulnerabilidad*, que para cada elemento expuesto cuantifica su capacidad resistente frente a las acciones sísmicas.

3) *El coste*, entendido como probabilidad de degradación o pérdida del elemento expuesto, que puede cuantificarse en niveles, clases, grados o índices de daño o en valor económico de su restauración o reposición.

En este capítulo se efectúa una revisión de cómo se cuantifican estos aspectos en diferentes métodos y técnicas de análisis de riesgo sísmico. Distinguiremos dos tipos de métodos a los que nos referiremos como *Métodos del Índice de Vulnerabilidad (MIV)* y *Métodos del Espectro de Capacidad (MEC)*. Los primeros proceden del ámbito de la Sismología, cuantifican la acción mediante un solo parámetro, típicamente la *intensidad macrosísmica*, y definen las características resistentes de los elementos expuestos mediante clases o *índices de vulnerabilidad*. Los segundos, más avanzados y recientes, provienen del ámbito de la Ingeniería Sísmica, especifican la acción mediante *espectros de demanda* y cuantifican la resistencia sísmica mediante *espectros de capacidad*. El daño se define de forma parecida en ambos tipos de métodos, mediante *grados, estados e índices* de daño. Nos referiremos a los primeros métodos como *métodos macrosísmicos o uniparamétricos* y a los segundos como *métodos espectrales o multiparamétricos*.

3.2 Peligrosidad

Demanda, peligrosidad o amenaza son términos que suelen usarse para referirse a la probabilidad de que en una determinada zona y en un periodo de tiempo determinado se iguale o supere un determinado movimiento del suelo por causa de la acción sísmica. Este concepto se ha definido con detalle en el capítulo anterior.

Las escalas de intensidad macrosísmica son precursoras de los estudios de daño sísmico y, en consecuencia, los primeros métodos de análisis de riesgo definen el terremoto mediante un solo parámetro que inicialmente fue la intensidad y, más tarde, con el acceso a registros de aceleración, se generalizó mediante el uso de la aceleración pico o efectiva u otros tipos de intensidad instrumental. Los datos de intensidad macrosísmica pueden cubrir todo el periodo histórico de la humanidad es decir varios miles de años.

La teoría de los espectros de respuesta tiene su origen en el diseño de grandes infraestructuras que requerían un alto nivel de protección sísmica como, por ejemplo, las centrales nucleares. Los códigos de diseño sismorresistente adoptaron esta definición de la acción por su utilidad en la evaluación de la resistencia sísmica de edificios y estructuras y en su diseño y construcción. Existe un amplio consenso entre la Sismología y la Ingeniería Sísmica en que el espectro de respuesta define de forma más rica y adecuada la acción sísmica, pero esta definición requiere de un importante número de registros de aceleración, por lo que puede resultar poco fiable en zonas de peligrosidad moderada y en aquellas zonas en que los periodos de recurrencia de grandes terremotos son largos. En cualquier caso, el periodo con datos de aceleración se extiende solamente a decenas de años. La diversidad en los periodos de tiempo cubiertos por los datos que nutren ambas definiciones de la acción sísmica hace que los métodos macrosísmicos sigan siendo ampliamente utilizados. En los dos subapartados siguientes se resumen los métodos uniparamétricos (3.2.1) y multiparamétricos (3.2.2) para definir los sismos.

3.2.1 Modelos uniparamétricos

En referencia a la definición del terremoto, llamamos *modelos uniparamétricos* aquellos en que el sismo se cuantifica mediante un solo parámetro. Las formas más frecuentes de definición de la acción en este tipo de modelos son: la intensidad sísmica tal como se define en las escalas macrosísmicas, la aceleración máxima, la velocidad máxima y el desplazamiento permanente. Estas formas de definición se describen en los siguientes puntos de este apartado.

Escalas macrosísmicas

La intensidad es un concepto que se introdujo antes de existir los instrumentos capaces de registrar el movimiento de la tierra, y constituye el patrón o regla para medir la capacidad destructiva de un terremoto. Se le acusa de una cierta subjetividad ya que sus grados se establecen a partir de la información recogida por observación directa y por las encuestas a la población.

Aunque existen antecedentes desde el siglo XVI sobre el uso de clasificaciones sencillas de los efectos causados por los terremotos, no se puede hablar de un uso ampliamente generalizado de las escalas de intensidad hasta el último cuarto del siglo XIX. Este punto de referencia en los estudios de intensidad macrosísmica viene marcado por el trabajo del ingeniero irlandés Robert Mallet en 1862 que estudió, junto con un grupo de expertos, los efectos producidos por un importante terremoto ocurrido en Nápoles en diciembre de 1857.

La conocida escala de intensidad de Mercalli, cuya primera versión fue publicada en 1912 por A. Sielberg, constituye la base de la mayoría de escalas modernas de intensidad. Esta escala consta de 12 grados y recoge los efectos que un terremoto causa a las personas, construcciones, y al entorno natural. En 1931 la escala de Mercalli fue traducida al inglés bajo el nombre de escala de Mercalli Modificada o *Modified Mercalli Intensity* (MMI), que fue mejorada por Richter en 1956 (MM-56). Actualmente la MM-56 se emplea en el continente americano, y con algunas modificaciones, también en otros países como: Australia, China, Asia y Nueva Zelanda. En Japón se emplea la escala JMA, una escala específica de 7 grados que toma el nombre de la “*Japanese Meteorological Agency*” que la creó.

En 1964, Medvedev, Sponhauer y Kärnik publicaron la primera versión de la escala MSK que consta también de 12 grados y es la utilizada oficialmente en España y en general en Europa, basada en la escala MCS (Mercalli, Cancani y Sieberg), en la de Mercalli Modificada (MM-31 y MM-56) y en la de Medvedev, elaborada en Rusia en 1953 (llamada GEOFIAN). La variante europea moderna de la escala MSK es la Escala Macrosísmica Europea o EMS-92, cuya versión final publicada en 1998, la EMS-98(Grünthal, 1998), actualiza y sustituye la MSK-64 e introduce nuevos aspectos relacionados con la vulnerabilidad y el daño de los edificios. ATC-13 (1985) contiene una descripción detallada de las escalas MSK, Geofian, JMA y MM. La

Tabla 3.1, extraída de la misma fuente, muestra la correlación entre los grados de intensidad de estas cuatro de las escalas macrosísmicas. Los grados de las escalas EMS son equivalentes a los de la MSK.

Tabla 3.1. Comparación de escalas de intensidad sísmica (ATC-13, 1985).

Modified Mercalli	JMA	Geofian	MSK
I	0	I	I
II	I	II	II
III		III	III
IV	II	IV	IV
V	III	V	V
VI	IV	VI	VI
VII	V	VII	VII
VIII		VIII	VIII
IX	VI	IX	IX
X		X	X
XI	VII	XI	XI
XII		XII	XII

Aceleración pico o efectiva

Un parámetro más actual y avanzado, que tiende a sustituir a la intensidad macrosísmica, es la aceleración máxima o aceleración pico, conocida como *Peak Ground Acceleration* (PGA). La PGA, que también suele conocerse como aceleración efectiva o aceleración básica, es empleada en estudios modernos de ingeniería sísmica. Este parámetro se define por la máxima aceleración horizontal registrada en un acelerograma; pero en zonas de sismicidad baja o moderada se recurre a relaciones empíricas entre la intensidad y la aceleración, debido a la escasez o ausencia de datos de aceleración. Estas relaciones presentan una gran dispersión y bajos coeficientes de correlación indicando la deficiencia del modelo de ajuste o la dispersión de los datos. ATC-13 (1985) muestra una colección de fórmulas empíricas en las que puede observarse diferencias significativas entre diferentes autores y

lugares de estudio. A pesar de que su uso no es aconsejable, se ha convertido en una forma de cuantificar la PGA en zonas con escasos datos de aceleración o en terremotos históricos. La antigua norma española NCSE-94 la usa y la nueva NCSE-92, aunque no la define de forma explícita, mantiene las aceleraciones efectivas de la NCSE-94 obtenidas mediante este tipo de correlaciones.

Velocidad máxima y desplazamiento permanente

En estudios de daño sísmico en líneas vitales y en el análisis de efectos inducidos, como deslizamientos de laderas o potencial de licuefacción, es frecuente utilizar otros parámetros, como la velocidad pico o efectiva y el desplazamiento permanente. Bajo el concepto de *Fallo o Rotura del Suelo (Ground Failure)* se reúnen una serie de fenómenos que se pueden producir durante un sismo y que por sus consecuencias, colapso o rotura del suelo, afectan a las estructuras. El colapso del suelo asociado a los deslizamientos y movimientos de falla provocados por el sismo afectan a la estructura cuando se halla en la zona de influencia de la rotura. Este fenómeno se cuantifica mediante el Desplazamiento Permanente del Suelo (*Permanent Ground Displacement, PGD*). La cuantificación de este parámetro es compleja y está fundamentada en el análisis por separado de los fenómenos de deslizamiento de laderas, movimientos de falla, y potencial de licuefacción. La Velocidad Pico (*Peak Ground Velocity, PGV*), es la velocidad máxima esperada para las ondas sísmicas en la superficie debidas a un evento sísmico, referida al movimiento horizontal. Para profundizar en el significado y la estimación de estos aspectos, véase el capítulo cuarto del manual técnico de HAZUS'99 (FEMA/NIBS, 1999). La velocidad pico y el desplazamiento permanente pueden estimarse también por integración de las historias temporales de aceleración y, por consiguiente, también están sujetos a amplios intervalos de dispersión e incertidumbres.

En este estudio se utiliza la intensidad sísmica para definir la acción sísmica en los métodos uniparamétricos dadas las características de la baja a moderada sismicidad de la ciudad estudiada, Barcelona.

3.2.2 Modelos multiparamétricos.

Los métodos descritos en los informes ATC-13 (1985) y ATC-25 (1991) son ejemplos de procedimientos que cuantifican la acción sísmica de forma uniparamétrica. El terremoto se cuantifica mediante la intensidad. En Europa, los métodos del índice de vulnerabilidad también caracterizan la acción sísmica mediante la intensidad macrosísmica. Llamamos multiparamétricos a aquellos modelos que usan más de un parámetro para cuantificar la acción sísmica. La forma más frecuente de definir el terremoto de forma multiparamétrica es en términos espectrales.

Espectros de respuesta

Para pequeños desplazamientos, los edificios permanecen en el rango elástico, y se pueden caracterizar, de forma simplificada, mediante su periodo propio y su amortiguamiento. La interacción entre edificio y terremoto se caracteriza mediante los desplazamientos, velocidades y aceleraciones máximas que experimenta el edificio al sufrir el sismo. Así, la acción sísmica se cuantifica mediante el espectro de respuesta 5% amortiguado. Para cada periodo, el espectro de respuesta de aceleración se define mediante la máxima aceleración de un oscilador armónico de un grado de libertad, 5% amortiguado, cuando se ve sometido a la aceleración producida por el sismo. Existe una relación sencilla entre los espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento. La siguiente ecuación permite pasar de la representación $S_a(T)$ a la representación $S_a(S_d)$:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \quad [3.2]$$

En la representación gráfica $S_a(S_d)$ definida por la ecuación [3.2], el inverso del coeficiente de S_a define la pendiente de las rectas que parten del origen, que de esta manera corresponden a periodos constantes T .

Ésta es la forma de definición de la acción sísmica adoptada en los códigos sísmicos y que ha sido adoptada por HAZUS'99 y por el proyecto Risk-UE para estudios de daño y riesgo sísmico. Con todo, la dificultad de estimar correctamente los

parámetros espectrales en zonas con escasez de datos de aceleración aconseja mantener métodos basados en intensidad. Más adelante comentaremos cómo este formato espectral, el concepto de ductilidad y el comportamiento no lineal de los edificios sometidos a terremotos severos permiten introducir el concepto del espectro de demanda, que requiere cuantificar la resistencia sísmica de cada edificio mediante su espectro de capacidad (SEAOC, 1980; ATC-40, 1996).

3.3 Vulnerabilidad

La capacidad, vulnerabilidad y fragilidad son conceptos empleados para caracterizar la resistencia sísmica del bien expuesto. Es decir, el término $v(e,x,t)$ de la ecuación [3.1] que se suele definir mediante una cantidad relacionada con el grado de daño que resulta por la ocurrencia de un movimiento sísmico del terreno. A pesar de que la vulnerabilidad, de alguna manera, está relacionada con el terremoto y con el daño esperado, puede entenderse también como una característica intrínseca del edificio o estructura, que depende únicamente de sus características de diseño y construcción. En este sentido se puede afirmar que cada estructura (o tipo de estructura), independientemente de la peligrosidad del lugar donde se halla, se puede caracterizar mediante un parámetro o función que cuantifica su capacidad resistente, la cual depende sólo de sus características y es independiente de la peligrosidad del lugar.

3.3.1 Modelos uniparamétricos

Llamamos uniparamétricos a aquellos modelos en los que la resistencia sísmica del edificio, estructura o infraestructura se califica o cuantifica mediante un solo parámetro. Curiosamente el concepto de vulnerabilidad no aparece en los informes ATC-13 y ATC-25 donde se estudia y caracteriza la capacidad resistente de cada estructura o infraestructura individualmente. Los métodos considerados en este apartado (escalas macrosísmicas, el informe ATC-13, el Método Italiano y el Método del Índice de Vulnerabilidad) definen la acción sísmica mediante la intensidad

macrosísmica y el edificio mediante un sólo parámetro que puede ser una clase alfanumérica o una cantidad numérica.

Escalas macrosísmicas

Podemos considerar la escala de intensidad MSK-64 como precursora del concepto de vulnerabilidad. La Escala MSK-64 no habla de vulnerabilidad pero clasifica los edificios en base a sus características resistentes. La Tabla 3.2 muestra la descripción de las tres clases que van de menor a mayor resistencia sísmica. Mañà (1997) utiliza la escala MSK-64 para clasificar la resistencia sísmica de los edificios de los distritos de *Ciutat Vella* y de *l'Eixample* en Barcelona.

Tabla 3.2. Clasificación de edificios según la escala MSK-64.

TIPO	DESCRIPCIÓN
A	Con muros de mampostería en seco o con barro, de adobe, de tapial.
B	Con muros de fábrica de ladrillo, de bloques de mortero, de mampostería con mortero, de sillarejo, de sillería, entramados de madera.
C	Con estructura metálica o de hormigón armado.

La escala MSK-64 es revisada y actualizada mediante la Escala Macrosísmica Europea dando lugar a una versión preliminar publicada en 1992 (EMS-92). Esta primera versión se publica en su forma definitiva (EMS-98) en 1998 (Grünthal, 1998) incorporando sugerencias de la comunidad sismológica internacional. La Escala EMS-98 mantiene la clasificación de los edificios pero incorpora, de forma explícita, el concepto de vulnerabilidad. La Tabla 3.3 muestra los tipos de edificios y las clases de vulnerabilidad. Se observa cómo la nueva escala establece clases de vulnerabilidad, que aunque son características o más probables para los principales tipos de edificios, admiten diversos rangos de pertenencia definidos como rangos probables y posibles. Chávez (1998) utilizó clases de vulnerabilidad basadas en la escala EMS-98 para efectuar un estudio del riesgo sísmico de edificios de Cataluña. Este estudio se utilizó para elaborar el plan de emergencia sísmica de la comunidad

catalana (SISMICAT). Más recientemente, Giovinazzi (2005) ha efectuado un tratamiento matemático riguroso de estas funciones de pertenencia utilizando la teoría de los conjuntos difusos. Esta formulación, que se comenta más adelante, permitió caracterizar los edificios mediante un índice de vulnerabilidad único, fue adoptada por el proyecto Risk-UE y se utilizará en este trabajo.

Tabla 3.3. Tipos de edificios y clases de vulnerabilidad según la escala EMS-98.

TIPO DE ESTRUCTURA		CLASE DE VULNERABILIDAD					
		A	B	C	D	E	F
Mampostería	Cascotes. Piedras del campo	○					
	Adobe (ladrillos de barro)	○—					
	Piedras pequeñas, sencillas	—○					
	Piedra grandes, masivas		—○—				
	No reforzada con unidades de piedra manufacturadas	—○—					
	No reforzada con forjados de Hormigón armado		—○—				
	Reforzada o confinada			—○—			
Hormigón Armado	Estructura sin diseño sismorresistente	—○—					
	Estructura con un nivel moderado de diseño sismorresistente		—○—				
	Estructura con un nivel alto de diseño sismorresistente			—○—			
	Muros sin diseño sismorresistente		—○—				
	Muros con un nivel moderado de diseño sismorresistente			—○—			
	Muros con un nivel alto de diseño sismorresistente				—○—		
Metal	Estructuras Metálicas			—○—			
Madera	Estructuras de Madera		—○—				

○ Clase de vulnerabilidad más probable; — Rango probable
 Rango de casos excepcionales menos probables

Informe ATC-13 (1985)

Por encargo de la Agencia Federal para la Gestión de Emergencias (*Federal Emergency Management Agency*, FEMA), el Consejo de Tecnología Aplicada (*Applied Technology Council*, ATC), elaboró el informe o instrucción técnica *Earthquake damage evaluation data for California* o ATC-13 (ATC-13, 1985), para la evaluación de daños previsibles por terremotos en California. Este informe obvia la clasificación de los edificios en clases de vulnerabilidad y analiza directamente hasta 75 tipos de edificios, estructuras e infraestructuras. Los tipos de construcciones analizados corresponden a una clasificación de los edificios de la zona de la Bahía de San Francisco, formada por cinco grupos basados en la estructura principal del inmueble: madera, metálica, acero, hormigón y mixta; con diversas subdivisiones en función del número de plantas y diseño sismorresistente. Basándose en la experiencia y opinión de expertos, establece para cada clase de edificios una serie de curvas que relacionan la intensidad MMI con el factor de daño medio.

El Método Italiano

El *Método del Índice de Vulnerabilidad* fue inicialmente propuesto por Benedetti y Petrini (1984) y es también conocido como *el Método Italiano*. Se han desarrollado distintas versiones de este método que han sido aplicadas a diferentes lugares. Aquí nos referiremos a los métodos basados en su versión inicial como *Método Italiano*, reservando el nombre de *Método del Índice de Vulnerabilidad* para un nuevo método basado en la escala macrosísmica europea que se describe en el apartado siguiente y se aplica en este estudio.

En el *Método Italiano*, la vulnerabilidad de un edificio se define mediante un índice de vulnerabilidad I_v , que se obtiene a partir de la evaluación y ponderación de diferentes parámetros relacionados con componentes, estructurales y no estructurales, que tienen un papel importante en el comportamiento sísmico del edificio. Este método fue adaptado y utilizado en estudios previos de riesgo sísmico en Barcelona (Caicedo, 1993; Barbat *et al.*, 1996; Yépez, 1996; Pujades *et al.*, 2000;

Mena, 2002) y fue revisado y adoptado en el proyecto europeo SERGISAI (Cella *et al.*, 1998). Básicamente el método consiste en la evaluación de 11 parámetros a partir de trabajo de campo. La Tabla 3.4. muestra la descripción, categorías y pesos correspondientes a cada uno de los once parámetros para edificios de hormigón armado.

Tabla 3.4. Valor de los parámetros que contribuyen al índice de vulnerabilidad I_v de los edificios de mampostería no reforzada (Benedetti y Petrini, 1984). El peso de los parámetros 5, 7 y 9 varía entre 0.5 y 1 dependiendo de algunos elementos, como por ejemplo el porcentaje de diafragmas rígidos bien conectados, la presencia de galerías o pasillos y el peso del tejado.

I	Descripción del parámetro i	Valor K_i según categoría				W_i
		A	B	C	D	
1	Organización del sistema resistente	0	0	20	45	1.0
2	Calidad del sistema resistente	0	5	25	45	0.25
3	Resistencia convencional	0	5	25	45	1.5
4	Posición del edificio y cimentación	0	5	25	45	0.75
5	Diafragmas horizontales	0	5	15	45	1.0 (variable)
6	Configuración en planta	0	5	25	45	0.5
7	Configuración en elevación	0	5	25	45	1.0 (variable)
8	Separación máxima entre muros	0	5	25	45	0.25
9	Tipo de cubierta	0	15	25	45	1.0 (variable)
10	Elementos no estructurales	0	0	25	45	0.25
11	Estado de conservación	0	5	25	45	1.0

Las categorías A, B, C y D, van respectivamente desde condiciones favorables a desfavorables y su evaluación permite asignar un valor numérico K_i que varía entre 0 y 45. El índice de vulnerabilidad I_v se obtiene mediante la ecuación [3.3] que es la suma ponderada de los valores numéricos que expresan la calidad de cada uno de los once parámetros.

$$I_v = \sum_{i=1}^{11} K_i \cdot W_i \quad [3.3]$$

Cuanto mayor es el índice de vulnerabilidad peor es la capacidad resistente del edificio. Para los edificios de hormigón armado, el método considera sólo tres categorías: A, B y C. La Tabla 3.5 muestra su descripción, cuantificación y pesos.

Tabla 3.5. Valor de los parámetros que contribuyen al índice de vulnerabilidad I_v de los edificios de hormigón armado (Benedetti y Petrini, 1984).

I	Descripción del parámetro i	Valor K_i según categoría			W_i
		A	B	C	
1	Organización del sistema resistente	0	1	2	4.0
2	Calidad del sistema resistente	0	1	2	1.0
3	Resistencia convencional	-1	0	1	1.0
4	Posición del edificio y cimentación	0	1	2	1.0
5	Diafragmas horizontales	0	1	2	1.0
6	Configuración en planta	0	1	2	1.0
7	Configuración en elevación	0	1	3	2.0
8	Separación máxima entre muros	0	1	2	1.0
9	Tipo de cubierta	0	1	2	1.0
10	Elementos no estructurales	0	1	2	1.0
11	Estado de conservación	0	1	2	1.0

Originariamente, los valores y pesos de estas tablas se calibraron y asignaron en base a datos observados en catástrofes sísmicas. En el caso de Barcelona (Yépez, 1996) se usaron datos de terremotos ocurridos en España, análisis dinámicos de las estructuras y simulaciones numéricas. También es posible incorporar la opinión de expertos para adaptar la metodología a edificios específicos de diferentes entornos urbanos. Castillo (2005) adapta el método para estudios de riesgo sísmico en la ciudad de Mérida en Venezuela.

La ecuación [3.3] puede normalizarse para obtener índices en el rango entre cero (nada vulnerable) y uno (nada resistente) o entre cero y 100. La ecuación [3.4] mues-

$$I_v = 100 \cdot \frac{\left(\sum_{i=1}^{11} K_i \cdot W_i \right) + 1}{34} \quad [3.4]$$

tra un ejemplo de este tipo de normalización para el caso en el que el máximo valor del índice de vulnerabilidad es de 34.

Método del Índice de Vulnerabilidad

Llamaremos aquí *Método del Índice de Vulnerabilidad* (MIV) a una suerte de síntesis entre la escala macrosísmica europea y el Método Italiano. Parte de las clases de vulnerabilidad definidas en la EMS-98 y, al igual que el Método Italiano, cuantifica cada edificio particular mediante un índice de vulnerabilidad. Este índice varía entre 0 y 1, siendo más cercano a 1 cuanto más vulnerable es el edificio. Este método, desarrollado en la Universidad de Génova por el profesor Lagomarsino y colaboradores, véase por ejemplo Giovinazzi (2005), fue adoptado por el proyecto Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003) para la simulación y análisis de escenarios sísmicos, y ha sido uno de los dos métodos adaptados y aplicados en nuestro estudio. Se trata de un método versátil, robusto y sencillo de aplicar, cuya principal ventaja reside en la facilidad para describir la vulnerabilidad de los edificios, con un gran nivel de detalle, y que permite captar, además de sus calidades estructurales, aquellas que se derivan de su geometría en planta, en altura y de su posición. El principal inconveniente reside en su calibración. La aplicación a zonas de sismicidad moderada o baja se fundamenta en funciones de daño calibradas en zonas de alta frecuencia de catástrofes sísmicas.

Las funciones de pertenencia χ a cada una de las seis clases de vulnerabilidad (véase Figura 3.1) se definen de forma difusa, con funciones de pertenencia definidas mediante unos rangos plausibles ($\chi=1$) y unos rangos posibles que definen la transición entre dos clases de vulnerabilidad adyacentes. Así pues, para cada edificio, además de diferentes valores probables V_I^* ($\chi=1$), el método contempla rangos de índices posibles ($\chi \geq 0.6$) y de índices menos probables ($0.6 > \chi \geq 0.2$). De esta forma, para cada tipo de edificio se dispone de los siguientes índices: V_I^* es el valor más probable del índice de vulnerabilidad; $[V_I^-, V_I^+]$ define el intervalo plausible del índice de vulnerabilidad (suelen ser los valores en los que la función de pertenencia

vale 0.5); $[V_I^{min}, V_I^{max}]$ son los límites inferior y superior de los índices de vulnerabilidad que se consideran posibles.

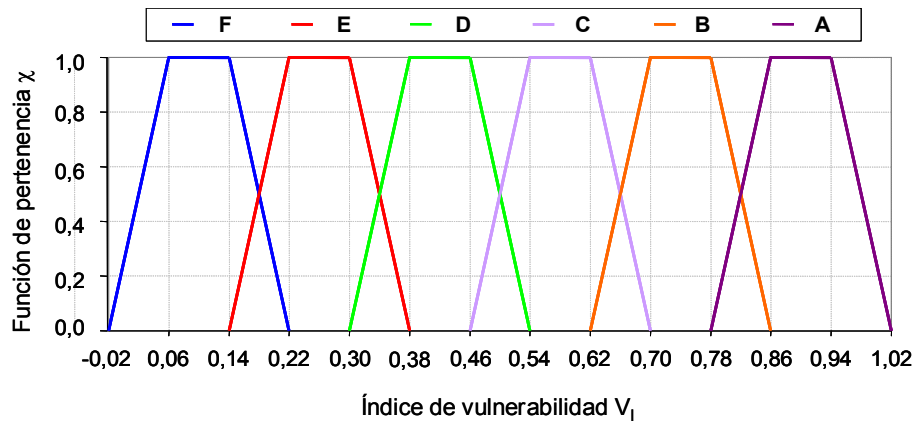


Figura 3.1. Funciones de pertenencia de un edificio a las clases de vulnerabilidad (véase los índices de vulnerabilidad en la Tabla 3.6).

La Tabla 3.6 muestra la matriz de tipos de edificios considerada en el proyecto Risk-UE y los valores de los índices e intervalos. En el caso de que no se disponga de suficiente información para identificar directamente la tipología de un edificio dentro de esta tabla, se pueden definir categorías más generales, siempre que dentro de éstas se conozca la distribución de cada tipología, basándose en la experiencia y el conocimiento del sistema constructivo de la zona estudiada. En ese caso, para cada categoría C_i , los valores del índice de vulnerabilidad se evalúan según la expresión [3.5], conociendo el porcentaje p_t de edificios de cada tipología t de la BTM que se consideran incluidos en la categoría analizada.

$$V_{I-Ci}^* = \sum_{t=1} p_t \cdot V_{I-t}^* \quad [3.5]$$

Milutinovic y Trendafiloski (2003) proporcionan directrices para la modificación de los índices de vulnerabilidad mediante la suma de puntuaciones parciales, basadas en las propuestas ATC-21 y la *National Group for Defense from Earthquake* (GNDDT), atendiendo tanto a la calidad y cantidad de la información disponible, como a las características específicas de los edificios analizados.

Tabla 3.6. Índices de vulnerabilidad propuestos para los edificios de la Matriz de Tipologías (BTM) de Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

Tipología	Descripción ²	Índices de vulnerabilidad representativos				
		V_I^{\min}	V_I^-	V_I^*	V_I^+	V_I^{\max}
M1.1	Cascotes y piedras (<i>Rubble stone, fieldstone</i>)	0.62	0.81	0.873	0.98	1.02
M1.2	Piedra sencilla (<i>Simple stone</i>)	0.46	0.65	0.74	0.83	1.02
M1.3	Sillería (<i>Massive stone</i>)	0.3	0.49	0.616	0.793	0.86
M2	Adobe	0.62	0.687	0.84	0.98	1.02
M3.1	Suelos de madera (<i>Wooden slabs</i>)	0.46	0.65	0.74	0.83	1.02
M3.2	Paredes de mampostería (<i>Masonry vault</i>)	0.46	0.65	0.776	0.953	1.02
M3.3	Forjados mixtos de acero y mampostería (<i>Composite steel and masonry slabs</i>)	0.46	0.527	0.704	0.83	1.02
M3.4	Forjados de losas de hormigón armado (<i>Reinforced concrete slabs</i>)	0.3	0.49	0.616	0.793	0.86
M4	Paredes de mampostería confinadas o reforzadas (<i>Reinforced or confined masonry walls</i>)	0.14	0.33	0.451	0.633	0.7
M5	Totalmente reforzada (<i>Overall strengthened</i>)	0.3	0.49	0.694	0.953	1.02
RC1	Estructuras de Hormigón (<i>Concrete Moment Frames</i>)	-0.02	0.047	0.442	0.8	1.02
RC2	Paredes de cortante de hormigón (<i>Concrete shear walls</i>)	-0.02	0.047	0.386	0.67	0.86
RC3.1	Paredes de relleno regulares (<i>Regularly infilled walls</i>)	-0.02	0.007	0.402	0.76	0.98
RC3.2	Estructuras irregulares (<i>Irregular frames</i>)	0.06	0.127	0.522	0.88	1.02
RC4	Sistemas duales de Hormigón armado (<i>RC Dual systems - RC frame and wall</i>)	-0.02	0.047	0.386	0.67	0.86
RC5	Hormigón pre-colado (<i>Precast Concrete Tilt-Up Walls</i>)	0.14	0.207	0.384	0.51	0.7
RC6	Estructuras de hormigón pre-colado, muros de cortante de hormigón (<i>Precast C. Frames, C. shear walls</i>)	0.3	0.367	0.544	0.67	0.86
S1	Estructuras de acero (<i>Steel Moment Frames</i>)	-0.02	0.467	0.363	0.64	0.86
S2	Estructuras metálicas atirantadas (<i>Steel braced Frames</i>)	-0.02	0.467	0.287	0.48	0.7
S3	Estructuras metálicas con paredes de mampostería (<i>Steel frame+unreinf. mas. infill walls</i>)	0.14	0.33	0.484	0.64	0.86
S4	Estructuras metálicas con paredes de cortante hormigonadas in situ (<i>Steel frame+cast-in-place shear walls</i>)	-0.02	0.047	0.224	0.35	0.54

² Véase Anejo D para una descripción más detallada de las tipologías

Tipología	Descripción ²	Índices de vulnerabilidad representativos				
		V_I^{\min}	V_I^-	V_I^*	V_I^+	V_I^{\max}
S5	Sistemas o estructuras compuestos (metálicas y hormigón armado) (<i>Steel and RC composite system</i>)	-0.02	0.257	0.402	0.72	1.02
W	Estructuras de madera (<i>Wood structures</i>)	0.14	0.207	0.447	0.64	0.86

De este modo, el índice de vulnerabilidad característico de cada edificio en particular, $\bar{V}_{I-\text{edificio}}$, se evalúa según la siguiente ecuación:

$$\bar{V}_{I-\text{edificio}} = V_{I-\text{clase}}^* + \Delta M_R + \sum_{j=1}^n M_{C_j} \quad [3.6]$$

donde se modifica el índice de vulnerabilidad básico de la clase a la que pertenece el edificio ($V_{I-\text{clase}}^*$, véanse valores en Tabla 3.6) sumando un modificador regional, ΔM_R , y una serie de modificadores por comportamiento M_{C_j} .

Tabla 3.7. Modificadores de comportamiento del índice de vulnerabilidad VI, para edificios de mampostería no reforzada (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

Factores de comportamiento	Parámetros	Puntuaciones del modificador M_{C_j}
Estado de conservación	Buen mantenimiento	-0.04
	Mal mantenimiento	+0.04
Altura o número de plantas	Bajo (1 o 2)	-0.02
	Medio (3, 4 o 5)	+0.02
	Alto (6 o más)	+0.06
Sistema estructural	Grosor de los muros	-0.04 , +0.04
	Distancia entre muros	
	Conexión entre muros: barras de unión (<i>tie-rods</i>), soportes en las esquinas (<i>angle bracket</i>)	
	Conexión horizontal estructura-muros	
Piso blando (<i>Soft-story</i>)	Demolición/ Transparencia, diáfana	+0.04
Irregularidad en planta	...	+0.04
Irregularidad vertical	...	+0.02
Plantas superpuestas	...	+0.04
Cubierta	Peso y acometida (<i>thrust</i>) de la cubierta	+0.04
	Conexiones con la cubierta	
Intervenciones de reparación	...	-0.08 , +0.08

Factores de comportamiento	Parámetros	Puntuaciones del modificador M_{C_j}
Elementos antisísmicos	Barbacanas (<i>barbican</i>) , Láminas de refuerzo (<i>foil arches</i>), Contrafuertes (<i>buttresses</i>)	
Edificio en agregado: posición en planta	Intermedio	-0.04
	Esquina	+0.04
	Terminal (<i>Header</i>)	+0.06
Edificio en agregado: posición en elevación	Plantas escalonadas	+0.02
	Edificios adyacentes de diferente altura	-0.04 , +0.04
Cimientos	Cimientos a diferentes niveles	+0.04
Morfología del terreno	Pendiente	+0.02
	Precipicio o acantilado	+0.04

El modificador regional ΔM_R permite adaptar los índices de clase a las características propias de los edificios de la zona de estudio y puede ser fijado por la opinión de expertos. El modificador por comportamiento en la ecuación [3.6] se expresa como la suma de modificadores parciales M_{C_j} , que pueden ser diferentes para cada tipología; estos modificadores permiten incorporar aspectos tan interesantes como la condición del edificio como aislado, o como situado en una manzana o agregado. La Tabla 3.7 y la Tabla 3.8 muestran los modificadores de comportamiento sugeridos para edificios de mampostería no reforzada y hormigón armado respectivamente. Obviamente, los parámetros considerados en el llamado *método italiano* se pueden incorporar de forma natural a este método, que constituye una generalización del mismo.

Tabla 3.8. Modificadores de comportamiento del índice de vulnerabilidad V_1 , para edificios de hormigón armado (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

FACTORES DE COMPORTAMIENTO		Puntuaciones M_C según nivel de diseño Sismorresistente		
		Código de nivel bajo (<i>Pre or Low Code</i>)	Código de nivel medio (<i>Medium Code</i>)	Código de nivel alto (<i>High Code</i>)
Nivel de Código		+0.16	0	-0.16
Mantenimiento deficiente		+0.04	+0.02	0
Altura o número de plantas	Bajo (1 o 2)	-0.04	-0.04	-0.04
	Medio (3, 4 o 5)	0	0	0
	Alto (6 o más)	+0.08	+0.06	+0.04
Irregularidad en planta	Forma	+0.04	+0.02	0
	Torsión	+0.02	+0.01	0
Irregularidad Vertical		+0.04	+0.02	0
Columna corta		+0.02	+0.01	0
Ventanas en arco (<i>bow windows</i>)		+0.04	+0.02	0
Edificios en agregado (con juntas asísmicas insuficientes)		+0.04	0	0
Cimientos	Vigas (<i>beams</i>)	-0.04	0	0
	Vigas conectadas (<i>connected beams</i>)	0	0	0
	Apoyo aislado (<i>isolated footing</i>)	+0.04	0	0
Morfología del terreno	Pendiente	+0.02	+0.02	+0.02
	Precipicio o acantilado	+0.04	+0.04	+0.04

3.3.2 Modelos multiparamétricos

Parece claro que, aunque sencillo y útil, cuantificar la resistencia sísmica de un edificio mediante un solo índice es pobre. Las estructuras de nuestros edificios son sistemas complejos cuya definición involucra un número importante de variables y de grados de libertad. Con todo, el diseño sísmico basado en el comportamiento esperado de un edificio se basa en modelos simplificados, que permiten representarlo de forma suficientemente aproximada mediante un sistema de un solo grado de libertad. El programa HAZUS'99 adopta los conceptos de curva y espectro de capacidad para representar el edificio y los de espectros de respuesta y de demanda para caracterizar la acción. Veremos cómo estos dos conceptos permiten estimar bien el nivel de exigencia que un terremoto, definido mediante su espectro de respuesta,

causa sobre un edificio definido mediante su espectro de capacidad. Llamaremos *Método del Espectro de Capacidad* (MEC) a aquel que permite modelar el riesgo sísmico utilizando el cruce entre espectros de demanda y de capacidad. HAZUS'99 y el método conocido como de segundo nivel del proyecto Risk-UE, usan esta forma de modelar el riesgo. Este método clasifica los edificios mediante la llamada Matriz Tipológica de Edificios (*Building Typology Matrix* o *BTM*) definiendo un espectro de respuesta para cada una de ellas. En concreto la clasificación de edificios de HAZUS'99 se basa en los tipos de edificios definidos por FEMA (1992) pero la extiende considerando la altura, (típicamente altos, medianos y bajos), e incluye las viviendas móviles o caravanas. También considera el nivel de protección sísmica. Risk-UE se basa en la clasificación de edificios de HAZUS'99 pero la adapta a las características de los edificios de Europa. Veamos a continuación cómo se define un edificio mediante los dos puntos que definen su espectro de capacidad.

El espectro de capacidad

El espectro de capacidad de un edificio define la aceleración espectral en función del desplazamiento espectral de un modelo simplificado de un grado de libertad que representa adecuadamente el comportamiento dinámico del edificio. Esta curva suele obtenerse a partir de un análisis “push-over” que consiste en someter el edificio a un patrón de fuerza lateral, representando la fuerza en la base en función del desplazamiento en la cúspide del edificio. Esta curva de capacidad se transforma al espectro de capacidad utilizando las propiedades modales del edificio. De este modo la estructura se caracteriza por su espectro de capacidad que se suele formular en su forma simplificada bilineal. Así pues esta curva se define por dos puntos característicos que son el punto de fluencia (D_y, A_y) y el punto de resistencia última (D_u, A_u). La Figura 3.2 muestra un ejemplo del espectro de capacidad correspondiente a un edificio de mampostería no reforzada de mediana altura típico de la ciudad de Barcelona. Este tipo de edificio fue catalogado en el proyecto Risk-UE como de tipología M3.3 (véase Anejo D) y altura media (M3.3-M) y el espectro de capacidad fue desarrollado por Bonett (2003).



Figura 3.2. Espectro de capacidad de un edificio tipo M3.3–M de la matriz de tipologías de edificios prevista en el proyecto Risk-UE.

La ductilidad de la estructura se define mediante:

$$\mu = \frac{Du}{Dy} \quad [3.7]$$

3.4 Coste

El tercer término en la ecuación [3.1] se ha definido como el coste y está directamente relacionado con la probabilidad de daño³ o pérdida. Así pues, la valoración económica del daño causado por los terremotos en edificios o estructuras completa y cierra el análisis de su riesgo. En el capítulo anterior se ha visto la complejidad del concepto de daño entendido de forma holística y su evaluación global cae fuera de los objetivos de este trabajo. Aquí nos referimos a aspectos concretos relacionados con el daño físico directo causado por la crisis sísmica sobre edificios y estructuras. En este apartado se revisan las diferentes formas de cuantificar el daño en los diferentes métodos y modelos que se han ido presentando a lo largo de este capítulo.

³ El concepto de *Daño*, cuando se refiere a personas, se halla relacionado con el dolor, malestar o perjuicio, pero también con el concepto de pérdida. Cuando se refiere a cosas se asocia más al concepto de deterioro, destrucción y pérdida de capacidad, utilidad o función. El *Daño* es pues un concepto cualitativo difícil de medir y cuantificar

Escalas macrosísmicas

Las escalas de intensidad hacen referencia exclusiva al daño físico directo en edificios, y lo cuantifican, de forma cualitativa, mediante grados o estados de daño. La escala MSK-64 considera un total de seis estados de daño, incluyendo el estado de daño nulo. De esta manera los estados de daño considerados son: sin daño (grado 0), ligero (grado 1), moderado (grado 2), severo (grado 3), destrucción (grado 4), y colapso (grado 5). La **Error! Reference source not found.** resume y describe los cinco estados de daño no nulos. La escala EMS-98 conserva estos mismos grados o estados de daño, que sin embargo describe con mayor detalle, distinguiendo los edificios de mampostería y hormigón armado. La Tabla 3.10, tomada de Grünthal (1998), muestra estas descripciones.

Tabla 3.9. Grados o estados de daño definidos en la escala MSK (ATC-13, 1985).


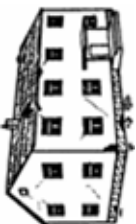
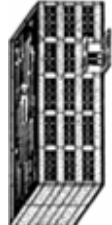


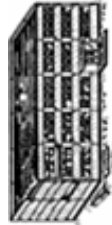

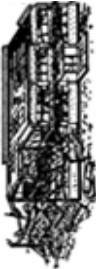
Grado o Estado de daño	Clasificación	Descripción
Grado 1	Daño ligero (<i>Slight</i>)	Fisuras finas en los revestimientos y enlucidos. Caída de pequeños trozos de yeso.
Grado 2	Daño moderado (<i>Moderate</i>)	Pequeñas fisuras en las paredes, caída de grandes trozos de revestimiento, caída de tejas, pretilas, grietas en las chimeneas e incluso derrumbamiento parcial de las mismas.
Grado 3	Daño Severo (<i>Heavy</i>)	Grietas anchas y profundas en los muros, caída de chimeneas de fábrica o de otros elementos externos.
Grado 4	Destrucción (<i>Destruction</i>)	Brechas en los muros resistentes. Partes del edificio pueden colapsar. Pérdida del enlace entre distintas partes de la construcción. Destrucción de tabiques y muros de cerramiento.
Grado 5	Colapso (<i>Total damage</i>)	Ruina completa de la construcción.

Informe ATC-13 (1985)

El informe o instrucción técnica ATC-13 (1985) incorpora aspectos de evaluación global del daño, estableciendo claramente que una evaluación completa del daño y de las pérdidas causadas por un terremoto debe incluir la estimación de: 1) el daño físico directo, 2) el coste social y 3) el coste económico. Por otra parte, tiene en cuenta los fallecidos y heridos, las pérdidas de funcionalidad de las instalaciones y servicios, así como el tiempo de restauración del servicio, proporcionando fórmulas cuantitativas para estimar todos estos aspectos.

En referencia al daño físico directo, introduce varios factores o índices de daño. Las ecuaciones [3.8], [3.9] y [3.10] definen respectivamente la “*Razón de Daño*” (*DR*), el “*Factor de Daño*” (*DF*) y el “*Factor de Daño Medio*” (*MDF*).

Tabla 3.10. Estados de daño según la escala EMS-98 (Grünthal, 1998)

Clasificación del daño en edificios de mampostería no reforzada		Clasificación del daño en edificios de hormigón armado	
 <p>Grado 1: daño leve (Sin daño estructural; daño no estructural leve) Grietas finas en muy pocas paredes. Caída de pequeños trozos del yeso o enlucido. En muy pocos casos se produce la caída de piedras sueltas de las partes altas del edificio.</p>	 <p>Grado 2: Daño moderado (Daño estructural leve; daño no estructural moderado) Grietas en muchas paredes. Caída de trozos bastante grandes del yeso.</p>	 <p>Grado 1: daño leve (Sin daño estructural; leve daño no estructural) Grietas finas en el yeso sobre los elementos estructurales en la base de las paredes. Grietas en las paredes de separación y de relleno.</p>	<p>Grado 2: Daño moderado (Daño estructural leve; daño no estructural moderado) Grietas en las columnas, vigas y muros estructurales. Grietas en las paredes de relleno. Caída de trozos de yeso y de mortero de las juntas de las paredes.</p>
 <p>Grado 2: Daño moderado (Daño estructural leve; daño no estructural moderado) Grietas en muchas paredes. Caída de trozos bastante grandes del yeso.</p>	 <p>Grado 4: Daño muy severo (Daño estructural severo; daño no estructural muy severo) Roturas graves en los muros. Derrumbe estructural parcial de suelos y techos.</p>	 <p>Grado 3: Daño severo (Daño estructural moderado; considerable daño no estructural) Roturas en las columnas y en las juntas viga-columna a nivel del suelo. Deformación del acero de refuerzo. Grandes grietas en las paredes de relleno y caída de paneles de relleno aislados.</p>	<p>Grado 4: Daño muy severo (Daño estructural severo; daño no estructural muy severo) Grandes grietas en los elementos estructurales con fallos a compresión del hormigón; fallo de las uniones de las vigas. Deformación de las columnas. Colapso de algunas columnas o de algún piso superior.</p>
 <p>Grado 5: Destrucción (Daño estructural muy severo) Colapso total o casi total del edificio.</p>	 <p>Grado 5: Destrucción (Daño estructural muy severo) Colapso del primer piso o partes del edificio.</p>		

$$\text{Razón de daño (DR)} = \frac{n^{\circ} \text{ de edificios dañados}}{n^{\circ} \text{ total de edificios}} \quad [3.8]$$

$$\text{Factor de daño (DF)} = \frac{\text{pérdida económica}}{\text{valor de reposición}} \quad [3.9]$$

$$\text{Factor de daño medio (MDF)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\text{coste económico}}{\text{valor de reposición}} \quad [3.10]$$

En la ecuación [3.10] n es el número de edificios o estructuras de la muestra. La *Razón de Daño (DR)* está relacionada con la frecuencia relativa de edificios u objetos dañados, por lo tanto está relacionado directamente con la probabilidad de daño. El *Factor de Daño (DF)* se refiere a un edificio u objeto y se define mediante el cociente entre el coste económico de reparación del daño, o pérdida económica, y el coste o valor de reposición del bien dañado. El *Factor de Daño Medio (MDF)* es análogo al *Factor de Daño (DF)*, pero hace referencia a una colección o agrupación de edificios

De forma análoga a las escalas macrosísmicas, el ATC-13 establece grados o estados de daño. La **Error! Reference source not found.** muestra los estados de daño considerados y su descripción que incluye un rango del índice de daño definido por el *Factor de Daño* de la ecuación [3.9]. Se observa cómo se definen hasta 6 estados de daño además del caso nulo o sin daño. Este mayor grado de resolución de los estados de daño considerados en el ATC-13 se fundamenta en las consideraciones sismorresistentes de la Asociación de Ingenieros Estructurales de California (*Structural Engineers Association of California*, SEAOC, 1980) y, a su vez, permite un mayor margen para la definición de los niveles de daño esperados para diferentes intensidades, que se obtienen a partir de la opinión de expertos.

Informe ATC-25 (1991)

El informe o instrucción técnica ATC-25 (1991), dedicado al análisis del riesgo sísmico de las líneas vitales, simplifica los estados de daño del ATC-13 considerando sólo 5 grados incluyendo el estado nulo. La Tabla 3.12 resume y compara los estados

de daño considerados en las escalas macrosísmicas MSK-64 y EMS-98 y en las directrices del ATC para el análisis de riesgo sísmico.

Tabla 3.11. Estados de daño según informe ATC-13. El valor central del Factor de Faño (DF) viene definido por la Ecuación [3.9]

Estado de Daño	Clasificación	Rango del DF (%)	Valor central del DF	Descripción del grado o estado de daño
1	Daño nulo (<i>None</i>)	0	0	No hay daños
2	Daño leve (<i>Slight</i>)	0-1	0.5	Daños mínimos y localizados. No requieren reparación para mantener la operatividad.
3	Daño ligero (<i>Light</i>)	1-10	5	Daños significativos localizados en algunos elementos que normalmente no necesitan reparación para mantener la operatividad.
4	Moderado (<i>Moderate</i>)	10-30	20	Daños significativos localizados en bastantes elementos y que es necesario reparar.
5	Severo (<i>Heavy</i>)	30-60	45	Daños generales. Es necesario efectuar reparaciones importantes.
6	Grave (<i>Major</i>)	60-99	80	Daños graves que pueden interrumpir la operatividad o la función del elemento. Hay que reparar, sustituir o derribar.
7	Colapso (<i>Destroyed</i>)	100	100	Destrucción del elemento e inutilidad total de la línea o elemento.

Por la parte baja del daño, ATC-25 funde los estados de daño leve y ligero del ATC-13 en un solo estado de daño ligero, con un umbral del factor de daño del 10%. Por la parte alta del daño, une los estados de daño grave y colapso en un estado de daño entre extensivo y completo. De hecho esta simplificación se fundamenta en la consideración de que los edificios, instalaciones y servicios mantienen su plena operatividad por debajo del estado de daño moderado y en el hecho de que la rehabilitación de una estructura o infraestructura no tiene mucho sentido a partir de costes de reparación superiores al 60% del coste de reposición (véase **Error! Reference source not found.** y Tabla 3.12).

Método del Espectro de Capacidad

Los métodos basados en modelos multiparamétricos heredan la clasificación del daño de las instrucciones ATC-13 y ATC-25. Estos métodos, en los que la acción se cuantifica mediante el espectro de respuesta y la demanda mediante el espectro de capacidad, consideran fundamentalmente los estados de daño del ATC-25 (véase Tabla 3.12) es decir, consideran 5 estados de daño.

Tabla 3.12. Relación de Estados o Grados de Daño para varias metodologías.

CLASIFICACIÓN				
MSK	EMS-98	ATC-25	ATC-13	Descripción del grado o estado de daño
No daño	No daño	No daño	Estado 1 Daño nulo (None)	Sin daño
Grado 1 Daño ligero (Slight)	Grado 1 Daño entre insignificante y leve. (Negligible to slight damage)	Daño ligero (Light)	Estado 2 Daño leve (Slight)	Daño insignificante, limitado y localizado, que no necesita reparación.
			Estado 3 Daño ligero (Light)	Daño localizado significativo de algunos elementos que, en general, no requieren ser reparados.
Grado 2 Daño moderado (Moderate)	Grado 2 Daño moderado (Moderate damage)	Daño moderado (Moderate)	Estado 4 Daño moderado (Moderate)	Daño localizado significativo de algunos elementos que requieren reparación.
Grado 3 Daño Severo (Heavy)	Grado 3 Daño entre sustancial y severo (Substantial to heavy damage)	Severo (Heavy)	Estado 5 Severo(Heavy)	Daño generalizado (<i>extensive</i>) que requiere reparaciones importantes.
Grado 4 Destrucción (Destruction)	Grado 4 Daño muy severo (Very heavy damage)	Entre extensivo y colapso (Major to destroyed)	Estado 6 Grave(Major)	Daño importante y general que puede causar que el edificio quede devastado, de forma que requiera ser demolido o totalmente reparado.
Grado 5 Colapso (Total Damage)	Grado 5 Destrucción (Destruction)		Estado 7 Colapso (Destroyed)	Total destrucción de la mayor parte del edificio.

Los dos métodos más conocidos que usan modelos multiparamétricos son HAZUS'99 y Risk-UE. También es frecuente que estos métodos definan “*estados de daño*” específicos y distintos para diferentes infraestructuras, aunque suelen mantener los 5 estados básicos (incluyendo el estado de daño nulo). A efectos de este estudio nos referimos a estos métodos como “*Método del Espectro de Capacidad*” y usaremos los estados de daño establecidos en la Tabla 3.12 para el ATC-25.

3.5 El riesgo sísmico: la convolución

Una vez analizadas las formas de cuantificar los tres términos del lado derecho de la ecuación [3.1], nos queda examinar cómo cada uno de los métodos discutidos efectúa la operación de convolución. Cuando restringimos el estudio, como es nuestro caso, al daño sísmico directo producido por un determinado terremoto sobre un edificio, estructura o infraestructura, e , situado en un punto x , en un periodo de tiempo t , se trata de establecer la cantidad $r(e,x,t)$, que se define como la probabilidad de que el elemento e , caracterizado por su vulnerabilidad $v(e,x,t)$, situado en un lugar x caracterizado por una peligrosidad $p(e,x,t)$ sufra un nivel de degradación o daño de coste $c(e,x,t)$. Esta operación de convolución suele ser finalmente bastante simplificada y cada método recurre a técnicas de evaluación muy simplificadas y, como en el caso de las primeras escalas macrosísmicas, de forma incompleta y difusa. En cualquier caso, el resultado de esta operación suele darse finalmente en la forma de las llamadas *matrices o funciones de probabilidad de daño*. Según ATC-13 (1985), el primero que describe las matrices de probabilidad de daño (*Damage Probability Matrices, DPM*) es Martel (1964) y más tarde su significado fue explicitado por Whitman (1973). Las *DPM* constituyen una forma completa de describir el daño esperado d , en cada elemento expuesto e , en función de la intensidad a de la sacudida, es decir:

$$r(e,x,t) = P[d/e,a] = f(e,a,d) \quad [3.11]$$

Las probabilidades de los diferentes estados de daño son los parámetros básicos intermedios para, con información adicional y muy pocas operaciones, efectuar

estimaciones, por ejemplo, del coste o valor económico o del impacto de la crisis sísmica sobre la población. Pero veamos ya cómo los diferentes modelos de análisis de riesgo gestionan este último e importante aspecto.

3.5.1 Modelos uniparamétricos

Analizamos aquí la definición de las matrices de probabilidad de daño en los métodos que modelan la acción sísmica y el elemento expuesto mediante un solo parámetro; respectivamente la intensidad macrosísmica y la vulnerabilidad.

Escalas macrosísmicas

Una de las mejoras incorporadas por la escala MSK-64, respecto a otras escalas macrosísmicas anteriores, fue la de incluir valoraciones cuantitativas de los términos cualitativos *Algunos*, *Muchos* y *La Mayoría*, respectivamente como frecuencias del 5, 50 y 75% de edificios. De esta forma, la descripción de los diferentes grados de intensidad permite evaluar algunos pocos términos de las matrices probabilidad de daño para cada una de las tipologías A, B y C.

La escala EMS-98, que actualiza y mejora la MSK-64, sigue utilizando los términos cualitativos de *Algunos*, *Muchos* y *la Mayoría* para referirse al número de edificios dañados de cada clase de vulnerabilidad, pero ahora la valoración cuantitativa de estos términos se vuelve *difusa*. La Figura 3.3 muestra los rangos de variabilidad de las frecuencias o porcentajes asignados a estos tres términos.

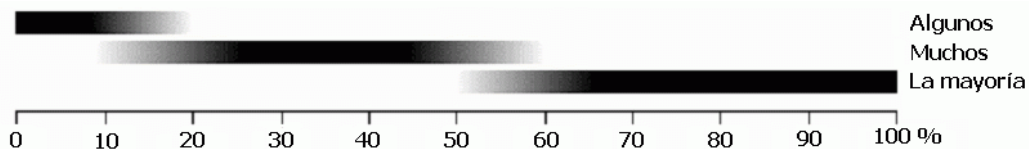


Figura 3.3. Cuantificación de los términos de cantidad en la escala EMS-98.

De nuevo la descripción de los grados de intensidad macrosísmica, permite definir matrices parciales de probabilidad de daño, pero de *forma difusa e incompleta*. De forma *difusa*, ya que la Figura 3.3 se presta a diferentes interpretaciones, y de forma *incompleta*, ya que la Escala EMS-98 tampoco describe los daños esperados para todas las clases de vulnerabilidad y para todos los grados de la escala.

Para subsanar la definición difusa de las probabilidades de los diferentes estados de daño, se supone que los intervalos difusos se deben a las diferentes probabilidades de pertenencia de los elementos en riesgo a las clases de vulnerabilidad, y que quedan bien incorporadas al modelo mediante las funciones de pertenencia correspondientes (véase Figura 3.3 y Tabla 3.3). De esta forma se asignan los valores centrales del 10, 35 y 80% respectivamente a los intervalos difusos 0-20, 10-60 y 50-100% de la Figura 3.3. Estos tres valores se asignan respectivamente a los términos *Algunos*, *Muchos* y la *Mayoría*.

Por otra parte, la escala EMS-98 establece que el daño sigue una distribución de probabilidad de tipo *binomial*. Esta hipótesis sobre la distribución del daño permite subsanar la *incompletitud* en la definición de las matrices de probabilidad de daño. En efecto, para el caso de N estados de daño, no nulo, la distribución *binomial* define la probabilidad del estado de daño k , en función de un solo parámetro d mediante la siguiente ecuación:

$$P_k(N, d) = \frac{(N)!}{(N-k)!k!} d^k (1-d)^{N-k} \quad k = 0, \dots, N. \quad [3.12]$$

que, para el caso de 5 estados de daño (véase Tabla 3.10), queda:

$$P_k(5, d) = \frac{5!}{(5-k)!k!} d^k (1-d)^{5-k} \quad k = 0, \dots, 5. \quad [3.13]$$

donde d es el llamado *parámetro de la distribución*, ya que la define totalmente. Además d toma valores entre cero y uno. También es frecuente utilizar el parámetro equivalente d^* que se define como:

$$d^* = N \cdot d \quad [3.14]$$

De esta forma, d^* es un índice o factor de daño que varía entre cero y el número de estados de daño no nulo (5 en nuestro caso). Para $d=d^*=0$ la probabilidad del estado de daño nulo es la unidad mientras que para $d=1$ ($d^*=5$) vale uno la probabilidad del estado de daño completo. Valores intermedios de d entre 0 y 1 ($0 < d^* < 5$) corresponden a diferentes distribuciones de probabilidad de los diferentes grados o estados de daño. Además se comprueba que:

$$d^* = \sum_{i=0}^N \left[\frac{f_i}{Nobs} \right] i = \sum_{i=0}^N P(i) \cdot i \quad i = 0, \dots, 5 \quad [3.15]$$

donde f_i representa la frecuencia, o número de edificios que sufren el estado de daño i , $Nobs$ representa el número de observaciones o el número de edificios de nuestra muestra, $P(i)$ es la probabilidad de que se dé el estado de daño i , y N es el número de estados de daño no nulos. Así pues, d^* es una especie de grado de daño medio o grado de daño probable que, por otra parte, determina de forma unívoca la distribución de probabilidades de daño. Este parámetro también es útil para representar mapas o distribuciones geográficas del daño esperado.

Por otra parte, la distribución binomial nos permite completar matrices de probabilidad de daño que están definidas, de forma parcial o incompleta, en la descripción de los grados de intensidad. La Tabla 3.13 muestra la matriz de probabilidad de daño completada de este modo para los edificios de *tipo A* en la escala MSK-64 y para los edificios de la *clase de vulnerabilidad A* de la escala EMS-98.

Tabla 3.13. Matrices de probabilidad de daño completadas para los edificios de tipo A de la escala MSK-64 y para la clase de vulnerabilidad A de la escala EMS-98. Los campos resaltados se han ajustado de forma que su suma coincida con la de los valores que se obtienen a partir de la información de la escalas macrosísmicas.

Grado de daño	Edificios tipo A (MSK-64)					Clase de vulnerabilidad A (EMS-98)					
	Intensidad					Intensidad					
	VI	VII	VIII	IX	X	V	VI	VII	VIII	IX	X
Nulo (0)	0.42	0.02	0.00	0.00	0.00	0.90	0.42	0.04	0.00	0.00	0.00
Ligero (1)	0.40	0.11	0.02	0.00	0.00	0.10	0.40	0.17	0.04	0.01	0.00
Moderado (2)	0.15	0.27	0.12	0.02	0.00	0.00	0.15	0.32	0.17	0.04	0.00
Grave (3)	0.03	0.34	0.30	0.11	0.03	0.00	0.03	0.30	0.33	0.19	0.03
Destrucción (4)	0.00	0.21	0.37	0.37	0.22	0.00	0.00	0.15	0.32	0.41	0.22
Colapso (5)	0.00	0.05	0.18	0.50	0.75	0.00	0.00	0.03	0.13	0.35	0.75
d^*	0.80	2.78	3.55	4.35	4.72	0.11	0.80	2.44	3.31	4.05	4.72

El 23 de noviembre de 1980, en el Sur de Italia, ocurrió el terremoto de Irpinia, con una magnitud $M_w=6.9$. Este terremoto causó importantes daños en un número importante de poblaciones. El gobierno italiano, en colaboración con investigadores del *Progetto Finalizzato Geodinamica, Consiglio Nazionale delle Ricerche PFG-CNR*, promovió una campaña de toma de datos realizada por un equipo de 600 ingenieros y arquitectos militares, que fueron entrenados y coordinados por el *Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoto (GNDT)*. La cantidad y calidad de estos datos y el rigor en su tratamiento les dan un alto potencial científico y fueron utilizados en numerosos estudios (Braga *et al.*, 1982, 1985; Orsini, 1999).

Chávez (1998) (véase también (Roca *et al.*, 2006), los utilizó para analizar el riesgo sísmico de Cataluña y calibró matrices de probabilidad de daño para las clases de vulnerabilidad de la escala EMS-98. Más concretamente consideró una muestra de 32,548 edificios de 41 municipios afectados. Analizando distintos modelos de distribución de probabilidad, incluyendo las distribuciones Normal y de Poisson, confirmó que la distribución de probabilidad Binomial es la adecuada, ajustó matrices de vulnerabilidad de daño con los datos disponibles y empleó técnicas de extrapolación para completarlas para las intensidades sísmicas con información escasa o parcial.

Tabla 3.14. Parámetros de las distribuciones de probabilidad de la escala EMS-98 basada en los daños observados en el terremoto de Irpinia y supuesta una distribución de probabilidad binomial (Chávez, 1998).

Intensidad	Clase de vulnerabilidad											
	A		B		C		D		E		F	
	<i>d</i>	<i>d</i> *	<i>d</i>	<i>d</i> *	<i>d</i>	<i>d</i> *	<i>d</i>	<i>d</i> *	<i>d</i>	<i>d</i> *	<i>d</i>	<i>d</i> *
VI	0.269	1.35	0.151	0.76	0.077	0.39	0.055	0.28	0.03	0.15	0.019	0.09
VII	0.396	1.98	0.269	1.35	0.151	0.76	0.077	0.39	0.055	0.28	0.030	0.15
VIII	0.603	3.02	0.396	1.98	0.269	1.35	0.151	0.76	0.077	0.39	0.055	0.28
IX	0.811	4.06	0.603	3.02	0.396	1.98	0.269	1.35	0.151	0.76	0.077	0.39
X	0.956	4.78	0.811	4.06	0.603	3.02	0.396	1.98	0.269	1.35	0.151	0.76

La Tabla 3.14 muestra los valores de los parámetros d y d^* para intensidades entre VI y X, para las seis clases de vulnerabilidad de la escala EMS-98. Estas matrices de probabilidad de daño, fueron incorporadas al programa SES-2002, para la Simulación de Escenarios Sísmicos en ciudades de España, que es una iniciativa de la Dirección General de Protección Civil de España.

Informe ATC-13 (1985)

El informe ATC-13 desarrolla las matrices de daño basándose en el método de Delphi, que consiste en tratar estadísticamente la opinión de expertos sobre un problema determinado, incluyendo, en el tratamiento de la información, el nivel de conocimiento en el tema del experto, así como el nivel de confianza que éste deposita en la opinión manifestada. Dado un edificio o infraestructura se solicita a un determinado número de expertos su opinión sobre el daño que ésta experimentará cuando sufra un terremoto caracterizado por su intensidad sísmica. Más concretamente, se pide información sobre tres estimaciones, por la parte baja (*low estimate, LE*), por la parte alta (*high estimate, HE*) y la estima óptima (*best estimate*). Se supone que las probabilidades de daño se distribuyen según una distribución Beta cuyos parámetros se estiman a partir de las siguientes hipótesis: 1) el valor medio de la distribución coincide con la mejor estima de los expertos y 2) en el intervalo entre la estima *LE* y la estima *HE* se halla el 90% de la muestra. Estas dos condiciones permiten estimar la función densidad de probabilidad de forma unívoca. Posteriormente se hallan las probabilidades de todos y cada uno de los diferentes estados de daño dados en la **Error! Reference source not found.** usando esta función de densidad de probabilidad y los intervalos de definición de los estados de daño.

Tabla 3.15. Ejemplo de matriz de probabilidad de daño (DPM) para edificios de altura media con estructura de mampostería no reforzada con muros de carga, según ATC-13.

Estado de daño	Factor central	Intensidad MMI						
		VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Sin daño (1)	0.00	***	***	***	***	***	***	***
Insignificante (2)	0.50	4.7	1.5	***	***	***	***	***
Leve (3)	5.00	89.9	49.5	3.7	***	***	***	***
Moderado (4)	20.00	5.4	46.4	53.3	7.6	0.9	***	***
Fuerte (5)	45.00	***	2.6	42.0	63.4	21.4	5.3	3.1
Grave (6)	80.00	***	***	1.0	29.0	74.7	80.0	43.0
Destrucción (7)	100.00	***	***	***	***	3.0	14.7	53.9

(***) indica una probabilidad muy pequeña.

La Tabla 3.15 muestra la matriz de probabilidad de daño así obtenida para edificios de mediana altura de mampostería no reforzada construidos con muros de carga. Curiosamente, ni ATC-13 ni ATC-25 ni HAZUS'99 contemplan el concepto de

vulnerabilidad y definen funciones y matrices de probabilidad de daño específicas para cada edificio, estructura o infraestructura.

Por otra parte, aunque ATC-25 permite bonificar o penalizar las matrices en función de los niveles de protección sísmica previstos en la zona de aplicación, no considera incrementos del daño debidos a condiciones especiales u otros daños colaterales, como los debidos a incendios, inundaciones, desplazamientos permanentes, licuefacción o deslizamientos. Sin embargo, ATC-13 proporciona pautas e instrucciones para tener en cuenta dichos efectos, bien incrementando la intensidad esperada, o bien modificando las matrices de probabilidad de daño.

Informe ATC-25 (1991)

ATC-25 es una extensión del ATC-13 a las líneas vitales que, como hemos visto más arriba, simplifica los estados de daño a los cuatro estados de daño no nulo que usarán los métodos posteriores basados en el espectro de capacidad. Para definir la relación entre la intensidad y el daño, se basa en las mismas curvas que ATC-13 obtuvo mediante la opinión de expertos. Los puntos correspondientes a la mejor estima (*best estimate*) se ajustan mediante una función analítica de tipo potencial:

$$d = a I^b \quad [3.16]$$

Donde d es el factor de daño económico, en porcentaje, tal como ha sido definido en las ecuaciones [3.9] o [3.10], I es la intensidad macrosísmica y a y b son los coeficientes del modelo. La Figura 3.4 muestra un ejemplo de este tipo de curvas para el caso de túneles ferroviarios excavados en roca. Los puntos corresponden a la mejor estima propuesta por el ATC-13; la curva corresponde a la función potencial de la ecuación [3.16] ajustada por mínimos cuadrados.

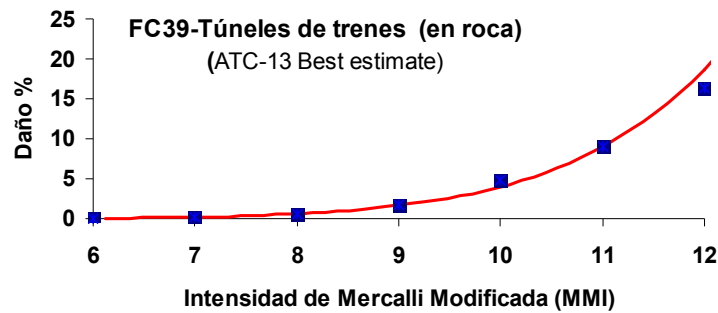


Figura 3.4. Relación entre intensidad y daño esperado para túneles ferroviarios en roca, propuesta por el ATC-25. Los puntos corresponden a la mejor estima propuesta por el ATC-13. La curva es un ajuste de acuerdo a una ley potencial.

El Método Italiano

A continuación se presenta una primera aplicación del método a la ciudad de Barcelona y después otra versión del método italiano adoptada en el proyecto europeo SERGISAI. En ambos casos el edificio se caracteriza mediante un índice de vulnerabilidad que procede de la evaluación de once parámetros mediante la ecuación [3.3] o [3.4].

Caicedo (1993), Barbat *et al.* (1996) y Yépez (1996) adaptan la metodología propuesta por Benedetti y Petrini (1984) a las peculiaridades de la ciudad de Barcelona, procediendo a definir y calibrar índices de vulnerabilidad y funciones de daño específicas para la ciudad. La calibración se fundamentó en datos del daño observado durante los terremotos ocurridos en Almería (1993 y 1994) y en simulaciones numéricas. El terremoto de Murcia de 1999 permitió confirmar la adecuación del método y de las curvas construidas. Mena (2002) efectúa la aplicación masiva a la ciudad de Barcelona. Se consideran los edificios de mampostería no reforzada y los edificios de hormigón armado, distinguiendo, en este último caso, entre las estructuras de pilares y vigas (pórticos), y las de forjados reticulares. Los edificios con estructura de mampostería no reforzada y de hormigón armado con forjados reticulares son los más frecuentes en la ciudad. Respectivamente las ecuaciones [3.17] y [3.18] definen las curvas que definen el grado de daño esperado en función del índice de vulnerabilidad.

$$D(\%) = a_1 \cdot I_v + a_2 \cdot I_v^2 + a_3 \cdot I_v^3 \quad \text{Mampostería} \quad [3.17]$$

$$D(\%) = a + b \cdot I_v + c \cdot I_v^2 + d \cdot I_v^3 \quad \text{Hormigón} \quad [3.18]$$

Estas funciones se ajustan para diferentes intensidades macrosísmicas. La Tabla 3.16 y la Figura 3.5 (izquierda) muestran los parámetros y las gráficas para los edificios de mampostería no reforzada. La Tabla 3.17 y la Figura 3.5 (derecha) muestran el caso de los edificios de hormigón armado de forjados reticulares.

Tabla 3.16. Parámetros de las funciones vulnerabilidad-daño según la ecuación [3.17] para los edificios de mampostería no reforzada (Yépez, 1996; Mena, 2002).

Intensidad	a_1	a_2	a_3	Coef. Correlación (%)
VI	0.0048	-0.0014	0.000086	80
VII	0.0170	-0.0025	0.000140	89
VIII	-0.0047	0.0012	0.000190	88
IX	-0.1500	0.0280	-0.000039	91

Tabla 3.17. Parámetros de las funciones vulnerabilidad-daño según la ecuación [3.18] para los edificios de hormigón armado con forjados reticulares (Yépez, 1996; Mena, 2002).

Intensidad	a	b	c	d	Coef. Correlación (%)
VI	-2.9	0.31	0.0	0.0	84.1
VII	1.7	1.0	-0.11	0.00012	67.1
VII	10.3	1.5	-0.63	0.002	83.7

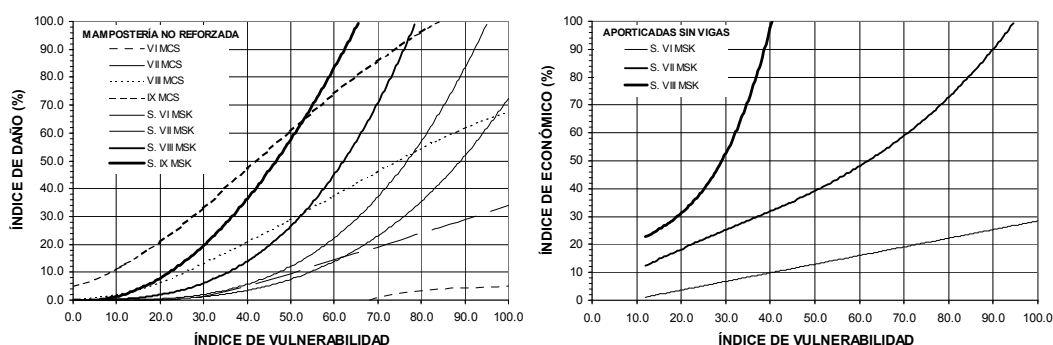


Figura 3.5. Funciones de vulnerabilidad para edificios de mampostería no reforzada (izquierda) y para los edificios de hormigón armado con forjados reticulares. Las curvas con trazo discontinuo de la figura de la izquierda, fueron propuestas por Angeletti et al. (1988). Las escalas MCS (Mercalli, Cancani Sieberg), MSK y EMS son equivalentes.

Para estimar el daño esperado, la versión del método italiano adoptada en el proyecto SERGISAI (Cella *et al.*, 1998), ajusta curvas en función de la vulnerabilidad y de la intensidad sísmica. Para ello, para cada tipo de edificio se ajusta una función que relaciona el índice de vulnerabilidad con un índice de daño. Guagenti y Petrini (1989) proponen la siguiente relación:

$$d(y, I_V) = \begin{cases} 0 & \text{si } y \leq y_i \\ \frac{y - y_i}{y_c - y_i} & \text{si } y_i < y < y_c \\ 1 & \text{si } y_c \leq y \end{cases} \quad [3.19]$$

donde d es el índice de daño, y es el parámetro que define la acción sísmica (la aceleración del suelo en este caso). y_i y y_c son aceleraciones umbrales para las que, respectivamente, no ocurre daño u ocurre el colapso. Estas aceleraciones umbrales, dependen del índice de vulnerabilidad y Guagenti y Petrini (1989) proponen las siguientes relaciones empíricas:

$$\begin{aligned} y_i &= \alpha_i \exp[-\beta_i (I_V - I_{VS})] \\ y_c &= [\alpha_c + \beta_c (I_V - I_{VS})^\gamma]^{-1} \end{aligned} \quad [3.20]$$

En esta última ecuación, el rango de variación del índice de vulnerabilidad, entre 0 y 100, se extiende a valores entre I_{VS} y 100, pudiendo considerar valores negativos. Estos valores negativos permiten incluir estructuras con un mejor comportamiento que aquellas diseñadas y construidas según la normativa sísmica y para las que se fijaba un índice de vulnerabilidad nulo. Guagenti y Petrini (1989) utilizaron los daños producidos por los terremotos de Friuli (1976) y del centro de Italia (1984) para calibrar estas funciones. Para ello utilizaron los datos de las poblaciones de Venzone (intensidad IX), Tarcento (intensidad VIII), Barrea (intensidad VII) y San Daniele (intensidad VIII) que fueron inspeccionadas de forma extensiva. Para estimar la aceleración a partir de la intensidad utilizan la siguiente fórmula empírica:

$$\ln y = 0.602 I - 7.073 \quad [3.21]$$

donde y es la aceleración expresada en g e I es la intensidad EMS.

Dentro del proyecto SERGISAI (Cella *et al.*, 1998), se revisó y se ajustó la metodología. La Tabla 3.18 muestra los valores ajustados a las expresiones de la

ecuación [3.20] para $I_{VS}=-20$. La Figura 3.6 muestra los umbrales de daño y de colapso para los edificios de mampostería no reforzada.

Tabla 3.18. Parámetros propuestos en el proyecto SERGISAI (Cella et al., 1998) correspondientes a la ecuación [3.20].

α_i	β_i	α_c	β_c	γ
0.08	0.013037	1.5371	0.00097401	1.8087

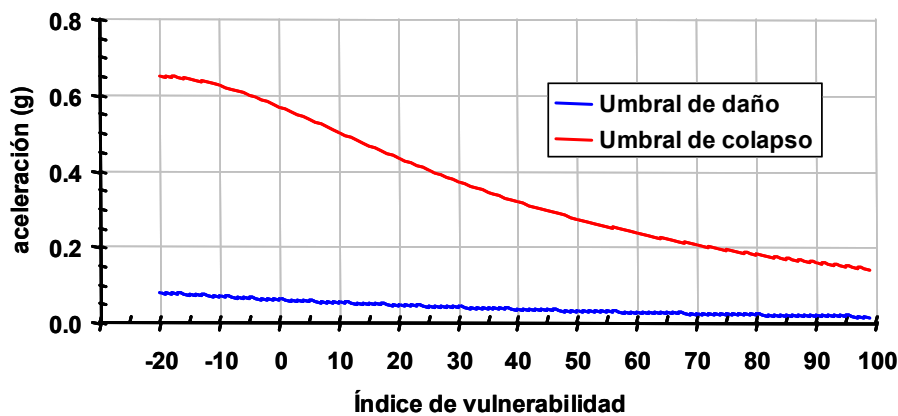


Figura 3.6. Umbrales de daño y de colapso de acuerdo a la ecuación [3.20] con los parámetros de la Tabla 3.20.

La Tabla 3.19 resume los umbrales de daño y de colapso en función del índice de vulnerabilidad. Se incluyen los valores umbrales en aceleración y en intensidad, que se han transformado mediante la ecuación [3.21]. La Figura 3.7 muestra las funciones que relacionan la aceleración y el índice de daño esperado para diferentes índices de vulnerabilidad de acuerdo a las ecuaciones [3.19] y [3.20] (Grimaz et al., 1998) donde el índice de vulnerabilidad se ha hecho variar entre -20 y 100.

Método del Índice de Vulnerabilidad

El *método del índice de vulnerabilidad*, también llamado *Método de Nivel I* en el proyecto Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003; Giovinazzi, 2005) mantiene la hipótesis de la distribución binomial para la distribución de los estados de daño pero

prefiere utilizar la distribución Beta para su representación, dado que esta última distribución es continua y, al depender de dos parámetros, se considera más versátil.

Tabla 3.19. Parámetros propuestos en el proyecto SERGISAI (Cella et al., 1998) correspondientes a la ecuación [3.20].

Umbral de daño y de colapso				
Índice I_v	Umbral de daño		Umbral de colapso	
	Aceleración (g)	Intensidad	Aceleración (g)	Intensidad
-20	0.08	VII-VIII	0.65	XI
0	0.06	VII	0.57	XI
20	0.05	VI-VII	0.43	X-XI
40	0.04	VI	0.32	X
60	0.03	V-VI	0.24	IX-X
80	0.02	V	0.18	IX
100	0.02	V	0.14	VII-IX

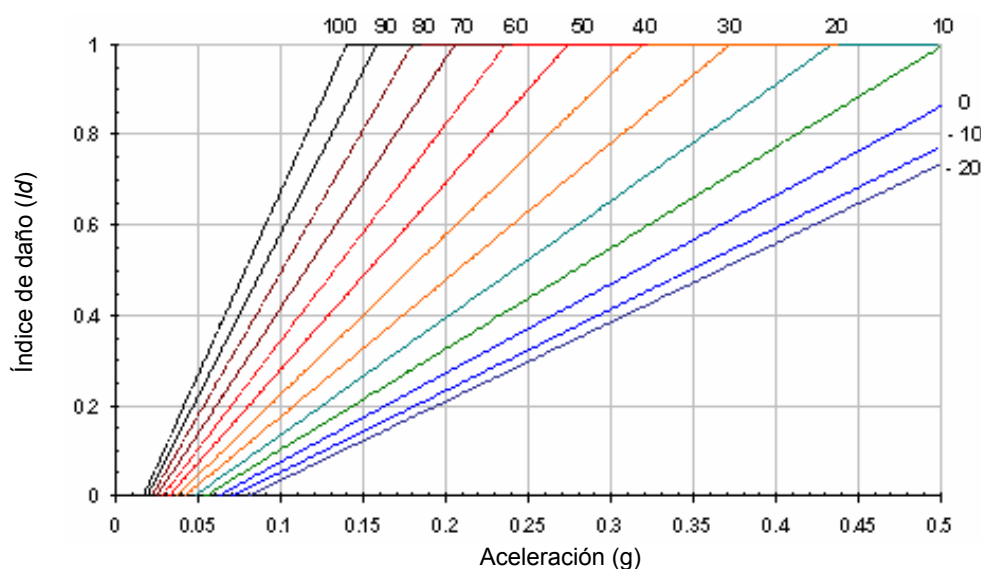


Figura 3.7. Relación entre la aceleración y el índice de daño esperado en función de los índices de vulnerabilidad. Se ha utilizado la formulación de las ecuaciones [3.19] y [3.20]. Modificado de (Grimaz et al., 1998).

La ecuación siguiente describe la función densidad de probabilidad $p_{\beta}(x)$ de esta distribución, en el intervalo [a,b).

$$p_{\beta}(x) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(q) \cdot \Gamma(t-q)} \frac{(x-a)^{q-1} (b-x)^{t-q-1}}{(b-a)^{t-1}} \quad \text{para } a \leq x < b \quad [3.22]$$

donde x es una variable continua, que varía entre los límites del intervalo de definición a y b , t y q son los parámetros de la distribución, y Γ es la función gamma. La probabilidad de que se iguale o exceda un nivel de daño x , $P_\beta(x)$ viene definida por la integral, entre a y x de la función $p_\beta(x)$; es decir:

$$P_\beta(x) = \int_a^x p_\beta(\varepsilon) \cdot d\varepsilon \quad [3.23]$$

En nuestro caso, para 6 grados o estados de daño, incluyendo el estado de daño *nulo*, se toma $a=0$ y $b=6$ de forma que la probabilidad del estado de daño k ($k=0\dots5$) se define por la ecuación:

$$p_k = P_\beta(k+1) - P_\beta(k) \quad k=0, \dots, 5. \quad [3.24]$$

El parámetro t , que está relacionado con la dispersión de la distribución, se toma igual a 8 y se ajusta el parámetro q de forma que las probabilidades de la ecuación [3.24], definidas a partir de la distribución Beta de parámetros t y q (ecuación [3.22]), sean equivalentes a las correspondientes a la distribución binomial de parámetro d o $d^* = \mu_D = N \cdot d$, tal como han sido definidas en las ecuaciones [3.12] [3.13] y [3.14]. La siguiente ecuación (Milutinovic y Trendafiloski, 2003; Giovinazzi, 2005) define la relación entre los parámetros t , q y $\mu_D = d^* = N \cdot d$ ($N=5$):

$$q = t \cdot (0.07 \cdot \mu_D^3 - 0.052 \cdot \mu_D^2 + 0.2875 \cdot \mu_D) \quad [3.25]$$

De esta forma, el problema de la convolución de la ecuación [3.1] se reduce a hallar una relación entre la peligrosidad definida mediante la intensidad macrosísmica I , la vulnerabilidad definida mediante el índice de vulnerabilidad V_I y el coste o daño definido mediante el índice o factor de daño $d^* = \mu_D$. Giovinazzi (2005), en base a las descripciones de la escala EMS-98 determina las matrices de probabilidad de daño correspondientes a las clases de vulnerabilidad establecidas en la misma escala y ajusta la siguiente ecuación:

$$\mu_D = d^* = 2.5 \cdot \left[1 + \tanh \cdot \left(\frac{I + 6.25 \cdot V_I - 13.1}{2.3} \right) \right] \quad [3.26]$$

La Figura 3.8 (Milutinovic y Trendafiloski, 2003) muestra algunos ejemplos de las curvas obtenidas a partir de la Escala EMS-98 que han constituido los datos para el ajuste de la ecuación [3.26]. Ésta será una ecuación clave en la aplicación de este método a la ciudad de Barcelona.

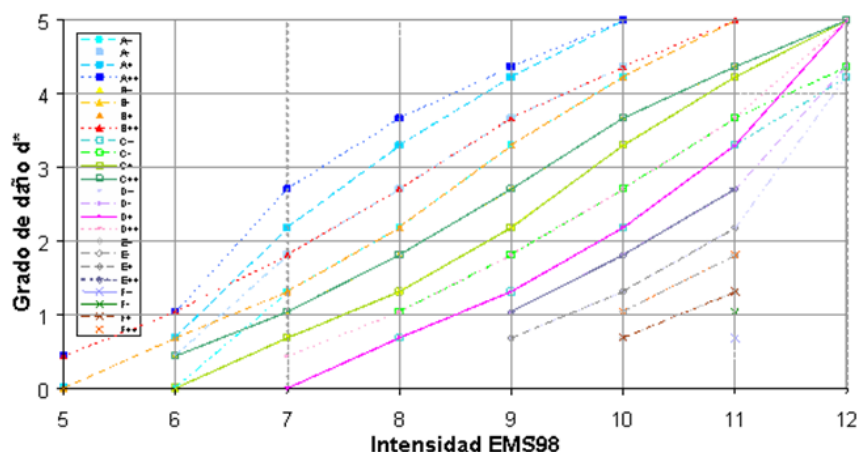


Figura 3.8. Funciones semi-empíricas de vulnerabilidad basadas en las clases de vulnerabilidad definidas en la Escala Macrosísmica Europea EMS-98 y que fueron usadas por Giovinazzi (2005) para ajustar la ecuación [3.26] (véase también Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

3.5.2 Modelos multiparamétricos

HAZUS'99 y el Método del Espectro de Capacidad son los modelos que definen la acción y el elemento expuesto en términos multiparamétricos. El nombre de “*Método del Espectro de Capacidad*” se ha preferido frente a otras nomenclaturas, como por ejemplo el método mecánico (Giovinazzi, 2005) o método de nivel II en el proyecto Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003), por su sencillez y porque incorpora en el nombre los conceptos fundamentales del método. Estos modelos, que consideran la acción mediante *espectros de respuesta* y la resistencia sísmica mediante el *espectro de capacidad*, suelen cuantificar el proceso de convolución de la ecuación [3.1] mediante las llamadas *curvas de fragilidad*. HAZUS'99 proporciona tablas que definen de forma completa las curvas de fragilidad para los edificios, estructuras e infraestructuras allá consideradas, pero no describe los procedimientos para su obtención. Restringiremos este apartado a describir con un mayor detalle el *Método del Espectro de Capacidad*. Primero describiremos el concepto de curva de

fragilidad y un método para su obtención a partir del espectro de capacidad. Después introduciremos el concepto del *punto de desempeño* como el nivel de la máxima respuesta que un determinado terremoto definido mediante su espectro de respuesta exigirá de un edificio definido mediante su espectro de capacidad. Estas respuestas máximas, junto con las curvas de fragilidad permitirán obtener las correspondientes matrices de probabilidad de daño.

Concepto de curva de fragilidad

Para cada elemento e , nivel de peligro x y coste o estado de daño k , la correspondiente curva de fragilidad define la probabilidad de que el elemento expuesto e sufra un nivel de pérdida, degradación o grado de daño d mayor o igual que k cuando sucede un terremoto caracterizado por la variable independiente x ; es decir:

$$F_{e,k}(x) = P[x \geq k] \quad [3.27]$$

La curva de fragilidad del estado de daño nulo es trivialmente la unidad. HAZUS'99 y Risk-UE suponen que para los estados de daño diferentes del nulo ($k=0$), las curvas de fragilidad siguen una distribución de probabilidad lognormal, cuya función densidad de probabilidad $pdf_{e,k}(x)$ viene definida mediante la siguiente ecuación:

$$pdf_{e,k}(x) = \frac{1}{\beta_{e,k} x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\beta_{e,k}} \ln \frac{x}{x_{e,k}} \right)^2 \right] \quad [3.28]$$

donde x es la variable que define la acción o la interacción entre el sismo y el elemento expuesto e , $\overline{x_{e,k}}$ es el valor medio de la distribución de probabilidad, y $\beta_{e,k}$ es la desviación típica del $\ln x$; e y k se refieren respectivamente al elemento expuesto y al grado o estado de daño.

La *curva de fragilidad*, es decir, la probabilidad de que el elemento e sufra un nivel de daño mayor o igual que el estado de daño k , en función de la acción x , viene dada por la unidad menos la integral entre 0 y x de la función de densidad de probabilidad definida por la ecuación [3.28], es decir:

$$F_{e,k}(x) = P[x \geq k] = 1 - P[x < k] = 1 - \int_0^x pdf_{e,k}(\xi) d(\xi) = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{e,k}} \ln \left(\frac{x}{x_{ek}} \right) \right] \quad [3.29]$$

De esta forma, las curvas de fragilidad quedan definidas mediante dos parámetros: el valor medio $\overline{x_{ek}}$, y la desviación típica $\beta_{e,k}$. El primero define el punto x para el cual la probabilidad de excedencia es del 50%. El segundo da una idea de la dispersión.

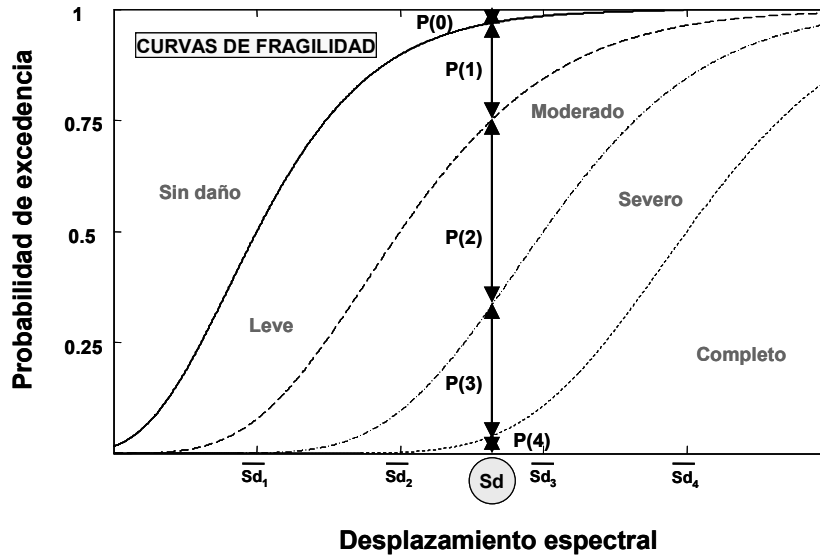


Figura 3.9. Ejemplo de curvas de fragilidad. Se consideran 4 estados de daño diferentes del grado de daño nulo o sin daño. Se muestra también el uso de las curvas de fragilidad para obtener las matrices de probabilidad de daño $P(k)$ para cualquier desplazamiento espectral Sd .

Es frecuente utilizar como variable x parámetros espectrales. En este estudio se utiliza el desplazamiento espectral Sd , que se define como el desplazamiento máximo de la respuesta de la estructura cuando sufre el terremoto definido mediante su espectro de respuesta. La Figura 3.9 muestra un ejemplo de curvas de fragilidad para los 4 estados de daño (1 Leve, 2 Moderado, 3 Severo y 4 Completo) en función del desplazamiento espectral Sd .

Además, para $k < N$, dado un desplazamiento espectral cualquiera $x = Sd$, las curvas de fragilidad permiten hallar las matrices de probabilidad de daño a partir de diferencias entre curvas adyacentes, es decir:

$$P(k) = P(x \geq k) - P(x \geq k + 1) \quad k = 0, \dots, (N-1) \quad [3.30]$$

Este procedimiento se ilustra también en la misma Figura 3.9. Si $k=N$, entonces $P(k)=P(x \geq k)$ ya que no existen grados de daño superior al colapso⁴.

Ahora la cuestión es cómo obtenemos las curvas de fragilidad para un elemento e definido mediante su espectro de capacidad y cómo obtenemos el desplazamiento espectral correspondiente a este mismo elemento cuando soporta un movimiento sísmico definido mediante su espectro de respuesta. Resueltos estos dos problemas el uso de la ecuación [3.30] permite obtener la correspondiente matriz de probabilidad de daño. Veamos estos dos aspectos.

Obtención de la curva de fragilidad

Las curvas de fragilidad quedan totalmente definidas conocidos el valor medio y la desviación típica. En este estudio se ha adoptado el método propuesto en Risk-UE que consiste en fijar estos umbrales de daño a partir de los puntos de plastificación y de colapso que definen los espectros de capacidad en su forma bilineal, en formato desplazamiento espectral–aceleración espectral (S_d-S_a). Para determinar las desviaciones típicas, se considera consistencia con las hipótesis del Método del Índice de Vulnerabilidad, es decir que la distribución del daño es binomial o Beta equivalente.

Así pues, sean (S_{d_y}, S_{a_y}) el punto de plastificación o de cadencia (*Yielding point*) y sea (S_{d_u}, S_{a_u}) el punto de capacidad última (*Ultimate point*). Por opinión experta, se conviene en establecer los umbrales de los estados de daño, entendidos como aquellos para los que la probabilidad de excedencia del daño es del 50%, mediante las ecuaciones de la Tabla 3.20 (véase también Figura 3.10).

⁴ Obsérvese cómo este procedimiento, ecuación [3.30], permite también la construcción de curvas de fragilidad a partir de matrices de probabilidad de daño, y, por consiguiente ambos conceptos son diferentes herramientas formales para representar la convolución de la ecuación [3.1]; es decir la probabilidad de coste o daño.

Tabla 3.20. Umbrales de los Estados de daño.

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
$\bar{Sd}_4 = Sdu$	Completo

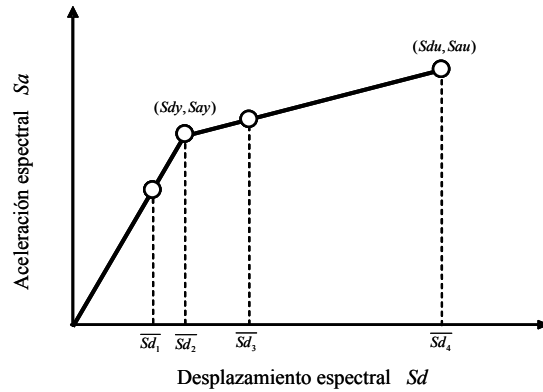


Figura 3.10. Umbrales de los estados de daño.

Para estimar las desviaciones típicas se supone que para cada desplazamiento espectral Sd_k el daño se distribuye de forma binomial, o beta equivalente, y se obtienen las probabilidades de los otros estados de daño imponiendo que la del umbral k sea del 50%. Finalmente, se usa la ecuación [3.29] para efectuar un ajuste por mínimos cuadrados y estimar las desviaciones típicas. La Tabla 3.21 muestra las probabilidades obtenidas, mientras que la Figura 3.11 muestra los puntos correspondientes y las curvas de fragilidad ajustadas.

Tabla 3.21. 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

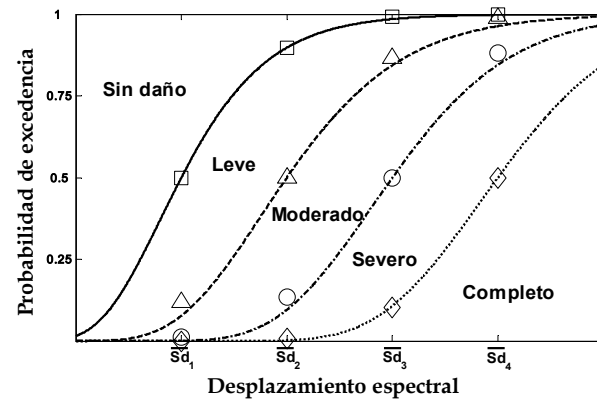


Figura 3.11. Curvas de fragilidad ajustadas a los puntos de la Tabla 3.21.

De esta forma, para cada edificio definido por su espectro de capacidad se obtienen las curvas de fragilidad. De acuerdo a la Figura 3.9 y a la ecuación [3.30], la estimación de la matriz de probabilidad de daño correspondiente a un escenario sísmico o terremoto concreto se reduce a obtener el desplazamiento espectral esperado.

Desplazamiento espectral esperado (performance point)

Si bien el Método del Espectro de Capacidad tiene su origen en el análisis estructural sismorresistente, basado en el *diseño por comportamiento esperado (performance based design)*, su uso se ha extendido a la evaluación de la resistencia sísmica de edificios existentes. Este método es preferido por los ingenieros por entender que se modela mejor tanto el terremoto como el edificio. Una vez especificados el *espectro de capacidad*, que representa el elemento, y el *espectro de respuesta elástica*, que modela el terremoto, el punto clave del método consiste en determinar el desplazamiento espectral que sufrirá. El punto de comportamiento o respuesta esperada (*punto de desempeño* o *performance point*) se obtiene cruzando los espectros de capacidad y de respuesta, ambos en el formato $S_a(S_d)$. Cuando la intersección del espectro elástico de respuesta, 5% amortiguada, y el espectro de capacidad se halla en el rango de comportamiento lineal del espectro de capacidad, el punto de intersección es directamente el punto de desempeño. Para movimientos intensos, es necesario considerar el comportamiento no elástico del edificio y reducir el espectro de respuesta elástico. Al espectro de respuesta reducido por comportamiento inelástico se le llama *espectro de demanda*. En cualquier caso, el punto de comportamiento esperado pertenece al espectro de capacidad, que representa a la estructura, y pertenece al espectro de demanda que representa al terremoto. La Figura 3.12 muestra el procedimiento de obtención del punto de desempeño y del desplazamiento espectral correspondiente.

Existen diversos métodos para determinar el *punto de desempeño* de una estructura (véase por ejemplo, (Fajfar y Gaspersic, 1996; Fajfar, 2002). El ATC-40 (1996) proporciona tres métodos. Queda fuera de los objetivos de esta tesis entrar en detalles para su construcción y se remite al lector al trabajo de Milutinovic y Trendafiloski (2003) donde explican, paso a paso, la aplicación de dichos métodos.

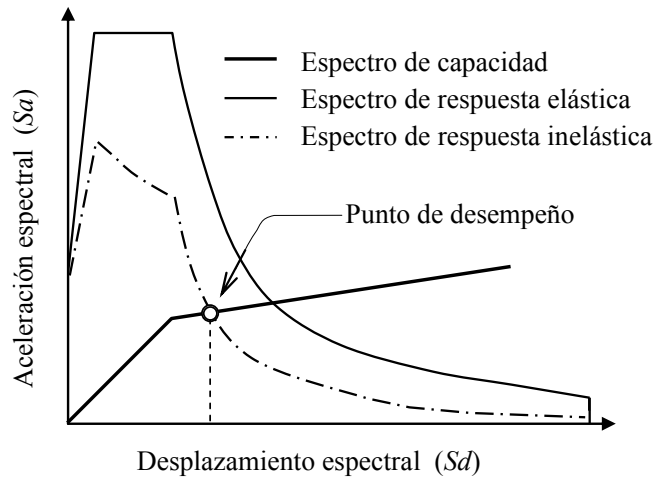


Figura 3.12. Ejemplo de estimación del punto de desempeño.

A partir del desplazamiento espectral obtenido, entrando en las curvas de fragilidad se obtienen las correspondientes matrices de probabilidad de daño (véase la Figura 3.9 y la ecuación [3.30]). Como veremos más adelante, Bonett (2003) y Moreno (2006) aplican este método para determinar matrices de probabilidad de daño, respectivamente para edificios de mampostería y de hormigón armado, típicos de Barcelona.

3.6 Otros aspectos relacionados con el daño

Si bien es cierto que la estimación del daño físico directo es el punto de partida para la evaluación del riesgo, no lo es menos que el análisis del riesgo sísmico va más allá del daño sufrido por edificios, estructuras e infraestructuras. Tal y como se ha apuntado ya en el capítulo anterior, el impacto de un terremoto en una sociedad tiene importantes efectos sobre la población, sus sistemas sociales, económicos y políticos y sobre su crecimiento. Por otra parte, la consideración exclusiva del daño sísmico directo limita notablemente la utilidad de los estudios de riesgo. Por consiguiente, los modelos de riesgo deben permitir estimaciones de estos otros aspectos que están íntimamente relacionados no sólo con la vulnerabilidad y fragilidad del espacio físico sino también con la capacidad de organización y de respuesta de la sociedad. En este sentido ATC-13 (1985) incorpora fórmulas para cuantificar, por ejemplo, el número

de fallecidos y heridos. ATC-25 (1991) proporciona funciones para estimar el tiempo de recuperación de los servicios y líneas vitales interrumpidas. El programa HAZUS (FEMA/NIBS, 1999) permite cuantificar el valor económico de la reparación o reposición de edificios y líneas vitales, así como los costes asociados a la interrupción de su funcionamiento. Eguchi *et al.* (1997) formulan un modelo de evaluación del daño en edificios y líneas vitales y la estimación de víctimas, en tiempo real, a partir de los parámetros de la fuente del sismo. El proyecto europeo Risk-UE, que crea una metodología de estimación del riesgo en ciudades europeas, se apoya en HAZUS'99 y en los modelos propuestos por Coburn y Spence (1992; 2002) para formular el daño a la población, fallecidos, heridos y personas sin hogar, el volumen de escombros y el coste económico de una crisis sísmica (Vacareanu *et al.*, 2004). Estos modelos se aplican en este estudio y se describen en detalle en el Capítulo 9. A continuación se revisan otras iniciativas para la estimación cuantitativa de estos aspectos de daños a la población y daño económico.

3.6.1 Daños a la población: fallecidos y heridos

Para tasar los daños a la población es fundamental el daño sufrido por los edificios que le dan cobijo, pero también la exposición, es decir, la densidad de habitantes y la ubicación de la población en el momento de producirse el terremoto. Por lo tanto, los modelos de daño en las personas, parten de la matriz de probabilidad de daño y deben tener en cuenta la estación del año, el día e incluso la hora en que se produce el siniestro, dada la alta movilidad de las personas en las ciudades modernas. Así por ejemplo, SES-2002 (2002) usa dos métodos mixtos: el ATC-13 (1985) y fórmulas simplificadas. La Tabla 3.22 (ATC-13, 1985) permite estimar los daños esperados sobre la población en función de los estados de daño.

Las ecuaciones siguientes (ATC-13, 1985; Coburn y Spence, 1992; Gülkan y Sucuoglu, 1992; Tiedemann, 1992; 1997) permiten también efectuar estas estimaciones teniendo en cuenta la distribución de la población en las viviendas:

$$N^{\circ} \text{ fallecidos} = NF = 0.3 \cdot P(5) \cdot N_{\text{viv}} \cdot (\text{hab} / \text{viv}) \quad [3.31]$$

donde $P(5)$ es la probabilidad del grado de daño 5 o *Completo*; N_{viv} es el número de viviendas del tipo considerado y hab/viv es el número de habitantes de la vivienda. La ecuación [3.32] permite estimar el número de heridos a partir del número de fallecidos estimado mediante la ecuación [3.31].

$$N^{\circ} \text{ heridos} = NH = 6.0 \cdot NF \quad [3.32]$$

Tabla 3.22. Fracción de heridos leves y graves y de fallecidos para cada uno de los cinco grados o estados de daño (ATC-13, 1985).

Grado de daño	Heridos leves	Heridos graves	Fallecidos
1	3.3/10000	1.1/25000	1/100000
2	3/1000	1/2500	1/10000
3	3/100	1/250	1/1000
4	3/10	1/25	1/100
5	2/5	2/5	1/5

El *Número de Personas Sin Hogar (NPSV)* se estima a partir del *Número de Viviendas Inhabitables (NVI)* que se estima mediante la siguiente ecuación:

$$N^{\circ} \text{ Viviendas Inhabitables} = NVI = NV(P(5) + P(4) + 0.5 \cdot P(3)) \quad [3.33]$$

donde NV es el número de viviendas del tipo correspondiente y $P(5)$, $P(4)$ y $P(3)$ son respectivamente las probabilidades de los estados de daño 5 (*Destrucción*) 4 (*Daño muy Severo*) y 3 (*Daño entre substancial y Severo*). Finalmente, el *Número de Personas Sin Vivienda (NPSV)* se modela mediante:

$$N^{\circ} \text{ Personas Sin Vivienda} = NPSV = NVI \cdot (hab / viv) \quad [3.34]$$

Por su parte, McCormack y Rad (Vacareanu *et al.*, 2004) desarrollaron un modelo, con la ayuda de un GIS, para la estimación de las pérdidas económicas y daños en la población a partir de la observación de más de 30,000 edificios no residenciales de Portland (Oregón, EEUU). Para la estimación de las pérdidas humanas se basaron en el ATC-13 y, a partir del factor de daño (DF) expresado en tanto por ciento (véase

también ecuación [3.9]), proponen las siguientes fórmulas para el número de fallecidos (NF) esperados en una vivienda con NP_{viv} personas o habitantes:

$$N^{\circ} \text{ Fallecidos} = NF = NP_{viv} [5.94 \cdot 10^{-6} \exp(0.104 \cdot DF)] \quad [3.35]$$

Para los heridos graves suponen un factor de 4 veces el número de fallecidos de la ecuación anterior. Es decir:

$$N^{\circ} \text{ Heridos Graves} = NHG = 4 \cdot NF \quad [3.36]$$

HAZUS (FEMA/NIBS, 1999) y Risk-UE (Vacareanu *et al.*, 2004) hacen una mayor distinción de la gravedad de las víctimas producidas por el terremoto, clasificándolas en cuatro categorías: *heridos leves*, *heridos que requieren hospitalización*, *heridos graves* (o heridos cuya vida está amenazada) y *fallecidos*. De esta forma se consigue una mayor definición de la distribución del daño en la población, que es de utilidad en la planificación de la emergencia. El método aquí utilizado se basa en la propuesta de Risk-UE y su formulación y aplicación se describen en detalle en el Capítulo 9. Allí se revisa y discute también el trabajo de Smardjieva y Badal (2002) donde se proporcionan fórmulas empíricas para la estimación de personas fallecidas en función de la densidad de población y de la intensidad del sismo. En ninguno de los estudios expuestos, y tampoco en este trabajo, se consideran las víctimas que pueden producirse como consecuencia de daños secundarios que pueden aparecer tras el terremoto, o personas afectadas por ataques al corazón, efectos psicológicos o heridas debido a las actividades de limpieza o construcción posteriores al sismo.

3.6.2 El daño económico

La evaluación del coste socio-económico de una catástrofe en general y sísmica en particular es compleja, ya que va más allá de la estimación del coste de reparación o reconstrucción de los edificios e infraestructuras dañados. Así, por ejemplo, el daño funcional tiene una importante incidencia en la recuperación. Sin duda la degradación de la función de hospitales y servicios incrementa el coste y prolonga periodos de baja o nula productividad económica de la población. Incluso, situacio-

nes de caos suelen incrementar los precios de materiales y mano de obra, como consecuencia de una alta demanda en un entorno de baja capacidad, lo que hace variar al alza las previsiones del impacto económico del desastre. Por otra parte, la recuperación es un proceso de larga duración que suele durar varios años, complicando aún más este tipo de tasaciones que acaban siendo enfoques muy parciales y simplificados de estos aspectos. Esta tesis se centra en el estudio de las pérdidas económicas directas debido al daño sufrido por los edificios. Las características del modelo usado y su aplicación a la ciudad de Barcelona se detallan en el Capítulo 9 mientras que aquí se revisa el enfoque del tema económico en diferentes iniciativas.

Como hemos visto en las ecuaciones [3.9] y [3.10] y en la **Error! Reference source not found.**, ATC-13 (1985) define un factor de daño económico (DF) y establece los estados de daño en función del mismo. Por consiguiente, el coste económico, para un edificio y un escenario, puede obtenerse directamente a partir de la matriz de probabilidad de daño. La integral de los costes esperados para todos los bienes dañados arroja el coste económico global de la crisis sísmica considerada.

En este trabajo se ha seguido el modelo de daño económico postulado en el proyecto Risk-UE (Vacareanu *et al.*, 2004) que, a su vez, se basa en la metodología HAZUS (FEMA/NIBS, 1999). Los parámetros básicos son la superficie destruida y los costos de reposición y reparación. La estima de la superficie destruida o dañada depende directamente de la matriz de probabilidad de daño, mientras que los costes de reparación y reposición dependen de los precios de las viviendas que están sujetos a presiones de todo tipo debido al crecimiento demográfico, a la importancia de una vivienda digna, a las fórmulas para su financiación a largo plazo y a la presión especulativa y financiera. Finalmente, además del continente, el modelo permite incorporar las pérdidas económicas por deterioro o pérdida del contenido, cuyo valor, en base al ATC-13 (1985), se supone del 50% del coste del continente. Como se ha comentado más arriba, las particularidades concretas y cuantitativas del modelo de tasación económica y su aplicación en este estudio se definen en el Capítulo 9.

3.7 Incertidumbres

No sería correcto finalizar este capítulo sin comentar, aunque sea brevemente, las incertidumbres y los niveles de confianza de este tipo de estimaciones. Sin duda, en zonas de peligrosidad sísmica moderada o baja, los largos periodos de recurrencia de las catástrofes sísmicas y la aún relativamente baja infraestructura de datos someten a la caracterización de la acción sísmica a una alta incertidumbre, tanto en su forma uniparamétrica como multiparamétrica. En cualquier caso, las incertidumbres de los mecanismos de la fuente sísmica y del medio de propagación de las ondas generadas así como de las condiciones locales del emplazamiento se trasladan a la definición del escenario sísmico probable. Las cosas no mejoran mucho en la caracterización de los elementos expuestos. Dentro de un mismo tipo de edificios, por ejemplo, existen diferencias en su configuración geométrica, materiales y procedimientos constructivos, de forma que su caracterización masiva también se halla expuesta a un alto grado de incertidumbre. Finalmente la obtención de matrices de probabilidad de daño en el Método del Índice de Vulnerabilidad se basa en daños observados, normalmente, para terremotos distintos ocurridos en diferentes lugares, por lo que estas matrices no están exentas de incertidumbre. En el Método del Espectro de Capacidad las curvas de fragilidad se basan en los espectros de capacidad y en opiniones expertas sobre la aparición del daño al aumentar los desplazamientos máximos de la estructura, por lo que heredan las incertidumbres involucradas en los espectros de capacidad y en la subjetividad de la opinión experta. Para profundizar en los aspectos relacionados con los niveles de confianza de los métodos expuestos, se remite a lector a ATC-13 (1985), Giovinazzi (2005), Bonett (2006), Giovinazzi (2003) y Moreno (2006). ATC-13 describe como efectuar el tratamiento estadístico de la opiniones expertas; Bonett (2005) y Moreno tienen en cuenta las incertidumbres en los parámetros que definen los edificios modelo representativos de los edificios de la ciudad Barcelona, obteniendo espectros de capacidad medios; Giovinazzi discute con un gran detalle y a nivel cuantitativo, las incertidumbres involucradas en los métodos del *índice de vulnerabilidad* y del *espectro de capacidad*.

3.8 Resumen y conclusión

Este capítulo se refiere al modelado del riesgo sísmico. Se aprovecha la riqueza del concepto de convolución en el análisis de la respuesta de sistemas para reflexionar sobre la contribución de los tres elementos básicos que intervienen en un análisis de riesgo: la *peligrosidad*, la *vulnerabilidad* o *fragilidad* y el *coste*. De esta forma, la noción de convolución se extiende para representar los modelos y procedimientos de composición de estos tres componentes para efectuar evaluaciones parciales o globales del riesgo. En cualquier caso, para un elemento expuesto y un escenario sísmico, el punto de partida para un análisis de riesgo es la matriz de probabilidad de daño. Estas matrices permiten la incorporación del análisis de otros aspectos, también esenciales, del riesgo sísmico.

Junto con el marco conceptual establecido en el capítulo anterior, se aprovecha la construcción de modelos teóricos para efectuar una revisión del estado del arte de los modelos de evaluación del riesgo sísmico. Los métodos empleados en la literatura se han clasificado en uniparamétricos y multiparamétricos. Los primeros definen la peligrosidad mediante un solo parámetro, generalmente la intensidad macrosísmica, y caracterizan el elemento expuesto también mediante un solo parámetro, el índice de vulnerabilidad. Los métodos multiparamétricos definen la acción sísmica mediante espectros de respuesta elástica, y el elemento expuesto mediante espectros de capacidad. Ambos tipos de modelos definen el coste o daño mediante grados, estados e índices de daño. Los métodos uniparamétricos suelen utilizar 5 estados de daño diferentes del estado de daño nulo, mientras que los multiparamétricos acostumbran a usar sólo cuatro grados o estados de daño además del estado nulo. En ambos casos, suponiendo que el daño se distribuye de forma binomial, el daño se puede representar mediante un solo parámetro que define la función de distribución de probabilidad de forma unívoca. En este estudio se aplica el *Método del Índice de Vulnerabilidad* como representativo de los modelos uniparamétricos y el *Método del Espectro de Capacidad* como representativo de los multiparamétricos. Dado un elemento expuesto a un escenario sísmico, la convolución entre *peligrosidad*, *vulnerabilidad* y *coste* lleva a obtener el *grado de daño esperado* y las *matrices de probabilidad de daño*.

Esta convolución, en el *método índice de vulnerabilidad*, se realiza mediante funciones semiempíricas que relacionan el *índice de vulnerabilidad* y la *intensidad macrosísmica* para obtener el *daño esperado*, mientras que en el Método del Espectro de Capacidad la convolución se efectúa mediante *curvas de fragilidad*. Finalmente se muestra cómo las probabilidades de los estados de daño son el *input* imprescindible para avanzar en la evaluación de otros aspectos, directamente relacionados con el riesgo; concretamente se revisan los modelos de estimación de daños a la población y modelos de tasación económica.

A pesar de que se reconoce que la aplicación de los modelos aquí resumidos tiene un amplio rango de incertidumbre en todos sus pasos y componentes, debemos concluir que son robustos y fiables cuando se aplican a una gran población de edificios o elementos, pero que hay que ser cuidadosos y cautos cuando se aplican a edificios individuales. En los casos de aplicación masiva, los errores aleatorios tenderán a compensarse, y los resultados deben entenderse como valores medios.

Se concluye por tanto que los escenarios obtenidos son altamente representativos y robustos cuando se aplican a una muestra amplia de edificios y se interpretan los resultados mediante una óptica probabilista. Por consiguiente, los modelos y procedimientos expuestos en este capítulo proporcionan una amplia gama de herramientas de suma utilidad y fiabilidad orientadas a la evaluación del riesgo sísmico y a la predicción de escenarios de daño en medianas y grandes ciudades. Estos dos aspectos son de gran ayuda para la prevención de catástrofes sísmicas, minoración de la vulnerabilidad de nuestras ciudades, protección civil y planificación y gestión de emergencias sísmicas.

Índice

3.1	Introducción	51
3.2	Peligrosidad	54
3.2.1	Modelos uniparamétricos	55
3.2.2	Modelos multiparamétricos.	59
3.3	Vulnerabilidad	60
3.3.1	Modelos uniparamétricos	60
3.3.2	Modelos multiparamétricos	71
3.4	Coste	73
3.5	El riesgo sísmico: la convolución	80
3.5.1	Modelos uniparamétricos	81
3.5.2	Modelos multiparamétricos	Error! Bookmark not defined.
3.6	Otros aspectos relacionados con el daño	99
3.6.1	Daños a la población: fallecidos y heridos	100
3.6.2	El daño económico	102
3.7	Incertidumbres	104
3.8	Resumen y conclusión	105
	Índice	107
	Lista de Figuras	108
	Lista de Tablas	109
	Referencias	110

Lista de Figuras

- Figura 3.1.** Funciones de pertenencia de un edificio a las clases de vulnerabilidad (véase los índices de vulnerabilidad en la Tabla 3.6). 67
- Figura 3.2.** Espectro de capacidad de un edificio tipo M3.3–M de la matriz de tipologías de edificios prevista en el proyecto Risk-UE. 73
- Figura 3.3.** Cuantificación de los términos de cantidad en la escala EMS-98. 81
- Figura 3.4.** Relación entre intensidad y daño esperado para túneles ferroviarios en roca, propuesta por el ATC-25. Los puntos corresponden a la mejor estima propuesta por el ATC-13. La curva es un ajuste de acuerdo a una ley potencial. 87
- Figura 3.5.** Funciones de vulnerabilidad para edificios de mampostería no reforzada (izquierda) y para los edificios de hormigón armado con forjados reticulares. Las curvas con trazo discontinuo de la figura de la izquierda, fueron propuestas por Angeletti et al. (1988). Las escalas MCS (Mercalli, Cancani Sieberg), MSK y EMS son equivalentes. 88
- Figura 3.6.** Umbrales de daño y de colapso de acuerdo a la ecuación [3.20] con los parámetros de la Tabla 3.20. 90
- Figura 3.7.** Relación entre la aceleración y el índice de daño esperado en función de los índices de vulnerabilidad. Se ha utilizado la formulación de las ecuaciones [3.19] y [3.20]. (Modificado de (Grimaz et al., 1998). 91
- Figura 3.8.** Funciones semi-empíricas de vulnerabilidad basadas en las clases de vulnerabilidad definidas en la Escala Macrosísmica Europea EMS-98 y que fueron usadas por Giovinazzi (2005) para ajustar la ecuación [3.26] (véase también Milutinovic y Trendafiloski, 2003). 93
- Figura 3.9.** Ejemplo de curvas de fragilidad. Se consideran 4 estados de daño diferentes del grado de daño nulo o sin daño. Se muestra también el uso de las curvas de fragilidad para obtener las matrices de probabilidad de daño $P(k)$ para cualquier desplazamiento espectral S_d . 95
- Figura 3.10.** Umbrales de los estados de daño. 97
- Figura 3.11.** Curvas de fragilidad ajustadas a los puntos de la Tabla 3.21. 97
- Figura 3.12.** Ejemplo de estimación del punto de desempeño. 99

Lista de Tablas

Tabla 3.1. Comparación de escalas de intensidad sísmica (ATC-13, 1985).	57
Tabla 3.2. Clasificación de edificios según la escala MSK-64.	61
Tabla 3.3. Tipos de edificios y clases de vulnerabilidad según la escala EMS-98.	62
Tabla 3.4. Valor de los parámetros que contribuyen al índice de vulnerabilidad I_v de los edificios de mampostería no reforzada (Benedetti y Petrini, 1984). El peso de los parámetros 5,7 y 9 varía entre 0.5 y 1 dependiendo de algunos elementos, como por ejemplo el porcentaje de diafragmas rígidos bien conectados, la presencia de galerías o pasillos y el peso del tejado.	64
Tabla 3.5. Valor de los parámetros que contribuyen al índice de vulnerabilidad I_v de los edificios de hormigón armado (Benedetti y Petrini, 1984).	65
Tabla 3.6. Índices de vulnerabilidad propuestos para los edificios de la Matriz de Tipologías (BTM) de Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).	68
Tabla 3.7. Modificadores de comportamiento del índice de vulnerabilidad V_I , para edificios de mampostería no reforzada (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).	69
Tabla 3.8. Modificadores de comportamiento del índice de vulnerabilidad V_I , para edificios de hormigón armado (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).	71
Tabla 3.9. Grados o estados de daño definidos en la escala MSK (ATC-13, 1985).	Error! Bookmark not defined.
Tabla 3.10. Estados de daño según la escala EMS-98 (Grünthal, 1998)	76
Estados de daño según la escala EMS-98	76
Tabla 3.11. Estados de daño según informe ATC-13. El valor central del Factor de Faño (DF) viene definido por la Ecuación [3.9].	Error! Bookmark not defined.
Tabla 3.12. Relación de Estados o Grados de Daño para varias metodologías.	79
Tabla 3.13. Matrices de probabilidad de daño completadas para los edificios de tipo A de la escala MSK-64 y para la clase de vulnerabilidad A de la escala EMS-98. Los campos resaltados se han ajustado de forma que su suma coincida con la de los valores que se obtienen a partir de la información de la escalas macrosísmicas.	83
Tabla 3.14. Parámetros de las distribuciones de probabilidad de la escala EMS-98 basada en los daños observados en el terremoto de Irpinia y supuesta una distribución de probabilidad binomial (Chávez, 1998).	84
Tabla 3.15. Ejemplo de matriz de probabilidad de daño (DPM) para edificios de altura media con estructura de mampostería no reforzada con muros de carga, según ATC-13.	85
Tabla 3.16. Parámetros de las funciones vulnerabilidad-daño según la ecuación [3.17] para los edificios de mampostería no reforzada (Yépez, 1996; Mena, 2002).	88
Tabla 3.17. Parámetros de las funciones vulnerabilidad-daño según la ecuación [3.18] para los edificios de hormigón armado con forjados reticulares (Yépez, 1996; Mena, 2002).	88
Tabla 3.18. Parámetros propuestos en el proyecto SERGISAI (Cella et al., 1998) correspondientes a la ecuación [3.20].	90
Tabla 3.19. Parámetros propuestos en el proyecto SERGISAI (Cella et al., 1998) correspondientes a la ecuación [3.20].	91
Tabla 3.20. Umbrales de los Estados de daño.	97
Tabla 3.21. Distribución de probabilidades de excedencia fijando la probabilidad del umbral en un 50%.	97
Tabla 3.22. Fracción de heridos leves y graves y de fallecidos para cada uno de los cinco grados o estados de daño (ATC-13, 1985).	101

Referencias

- Angeletti, P., Bellina, A., Guagenti, E., Moretti, A. y Petrini, V. (1988). Comparison between vulnerability assessment and damage index, some results. *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo- Kyoto, Japan, 181-186.
- ATC-13 (1985). *Earthquake damage evaluation data for California, ATC-13*. Applied Technology Council. Redwood City, California. 492 pp.
- ATC-25 (1991). *Seismic Vulnerability and impact of disruption on lifelines in the coterminous United States.*, Applied Technology Council. Redwood City, California. pp.
- ATC-40 (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. 2 vols, Applied Technology Council. Redwood City, California. pp.
- 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.
- 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 (en italiano).
- 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.
- Braga, F., Dolce, M. y Liberatore, D. (1982). Southern Italy November 23, 1980 earthquake: a statistical study on damage building and an ensuing review of the MSK-76 scale. *Proceedings of the 7th European Conference on Earthquake Engineering*, Athens. Greece.
- Braga, F., Dolce, M. y Liberatore, D. (1985). Assessment of the relationships between macroseismic intensity, type of building and damage, based on the recent Italy earthquake data. *Proceedings of the 8th European Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal.
- Caicedo, C. (1993). Vulnerabilidad sísmica en zonas urbanas. Aplicación a un sector del Eixample de Barcelona. *Tesis doctoral*. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 165 pp.
- Castillo, A. (2005). Seismic risk scenarios for buildings in Mérida, Venezuela. Detailed vulnerability assessment for non-engineered housing. *Tesis doctoral*. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 348 pp.
- Cella, F., Luzi, L., Meroni, F., Ober, G., Pergalani, F., Petrini, V., Tomasoni, R. y Zonno, G. (1998). *SERGISAI project final report. By the partner CNR-IRRS. Final Report*. Scientist in Charge: Gaetano Zonno. Contract Number: ENV4-CT96-0279. 71-220 pp.

- Chávez, J. (1998). Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico a escala regional: Aplicación a Cataluña. *Tesis doctoral*. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 323 pp.
- Coburn, A. y Spence, R. (1992). *Earthquake Protection*. John Wiley & Sons, Chichester, England. 355 pp.
- Coburn, A. y Spence, R. (2002). *Earthquake Protection (2nd edition)*. John Wiley & Sons, Chichester, England. 420 pp.
- Eguchi, R. T., Goltz, J. D., Hope, A., A.Seligson, Flores, P. J., Blais, N. C., Heaton, T. H. y Bortugno, E. (1997). "Time loss estimation as an emergency response decision support system: The Early Post-Earthquake Damage Assessment Tool (EPEDAT)". *Earthquake spectra* **13** (4): 815-832.
- Fajfar, P. (2002). Structural analysis in earthquake engineering - A breakthrough of simplified non-linear methods. *Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering*, London.
- 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.
- FEMA (1992). *Handbook for the seismic evaluation of the existing buildings. FEMA 178*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA. pp.
- FEMA/NIBS: Federal Emergency Management Agency and National Institute of Building Sciences (1999). *HAZUS' 99 technical manual. Earthquake Loss Estimation Methodology*, Washington, D.C., USA. pp.
- Giovinazzi, S. (2005). The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis. *Tesis doctoral*. The Department of Civil Engineering of the Technical University Carolo-Wilhelmina at Brannschweig, and The Faculty of Engineering Department of Civil Engineering of the University of Florence. Florence. Italy. 200 pp.
- Grimaz, S., Meroni, F., Petrini, V., Tomasoni, R. y Zonno, G. (1998). "Il ruolo dei dati di danneggiamento del terremoto del Friuli, nello studio di modelli di vulnerabilità sismica degli edifici in muratura. " *La scienza e i terremoti - Analisi e prospettive dall' esperienza del Friuli-1976/1996*: 14-16 Novembre 1996, Udine.
- Grünthal, G. (1998). *European Macroseismic Scale 1998*. Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxemburg. pp.
- Guagenti, E. y Petrini, V. (1989). Il caso delle vecchie costruzioni: verso una nuova legge danni-intensità. *Proceedings of the 4th Italian National Conference on Earthquake Engineering*, Milan, Italy, 145-153.
- Gülkan, P. y Sucuoglu, H. (1992). Earthquake vulnerability, loss and risk assessment in Turkey. *Proceedings of the X World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid (España), 539-543.
- Mañà, F. (1997). *Vulnerabilitat sísmica dels edificis de la ciutat de Barcelona*. ITEC, Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya, Barcelona. pp. (en catalán)
- Martel, R. R. (1964). *Earthquake damage to type III buildings in Long Beach, 1933*. Earthquake investigations in the Western United States 1931-1964, Publication 41-2. Department of Commerce, Coast and Geodetic Survey, Washington D. C. pp.

- McCormack, T. C. y Rad, F. N. (1997). "Earthquake loss estimation methodology for buildings based on ATC-13 and ATC-21". *Earthquake Spectra* **13** (4): 605-621.
- Mena, U. (2002). Evaluación del Riesgo Sísmico en Zonas Urbanas. *Tesis doctoral*. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 240 pp.
- Milutinovic, Z. V. y Trendafiloski, G. S. (2003). *WP04. Vulnerability of current buildings*. RISK-UE project: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contract No.EVK4-CT-2000-00014. Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZIIS), Skopje. 109 pp.
- Milutinović, Z. V. y Trendafiloski, G. S. (2003). *WP04. Vulnerability of current buildings*. RISK-UE project: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. Contract No.EVK4-CT-2000-00014. Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZIIS), Skopje. 109 pp.
- 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*. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 332 pp.
- Orsini, G. (1999). "A model for buildings' vulnerability assessment using the parameterless scale of seismic intensity (PSI)". *Earthquake Spectra* **15** (3): 463-483.
- Pujades, L. G., Canas, J. A., Mena, U., Espinoza, F., Alfaro, A. J. y Caselles, O. (2000). Seismic risk evaluation in Barcelona, Spain. *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, CD-ROM, Paper No. 2810.
- Roca, A., Goula, X., Susagna, T., Chávez, J., González, M. y Reinoso, E. (2006). "A Simplified Method for Vulnerability Assessment of Dwelling Buildings and Estimation of Damage Scenarios in Catalonia, Spain". *Bulletin of Earthquake Engineering* **4** (2): 141-158.
- SEAOC (1980). *Recommended lateral force requirements and Commentary*. Seismology Committee, Structural Engineering Association of California, San Francisco, California. pp.
- SES2002 (2002). *Simulación de escenarios sísmicos, SES 2002. Manual técnico*. Ministerio del Interior. Dirección General de Protección Civil e Instituto Geográfico Nacional, Madrid. 47 pp.
- Smardjjeva, E. y Badal, J. (2002). "Estimation of the Expected Number of Casualties Caused by Strong Earthquakes". *Bulletin of the Seismological Society of America* **92** (6): 2310-2322.
- Tiedemann, H. (1992). *Earthquakes and Volcanic Eruptions, a Handbook on Risk Assessment*. Swiss Re Publication, Zurich. 951 pp.
- Vacareanu, R., Lungu, D., Aldea, A. y Arion, C. (2004). *WP07. Report Seismic Risk Scenarios Handbook*. Risk-UE Project, Bucarest. 50 pp.
- Whitman, R. W. (1973). *Damage probability matrices for prototype buildings*. Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering Research. Report R73-57, Cambridge. Massachusetts, USA. pp.

Yépez, F. (1996). Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras aplicando técnicas de simulación. *Tesis doctoral*. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona (Spain). 215 pp.