

Estado del arte sobre aplicación de métodos numéricos en la simulación de escenarios de riesgo y al cálculo de la seguridad estructural

A. H. Barbat
L. G. Pujades
O. D. Cardona

Estado del arte sobre aplicación de métodos numéricos en la simulación de escenarios de riesgo y al cálculo de la seguridad estructural

B. H. Barbat
L. G. Pujades
O. D. Cardona

Publicación CIMNE N°-300, Enero 2007

ESTADO DEL ARTE SOBRE APLICACIÓN DE MÉTODOS NUMÉRICOS A LA SIMULACIÓN DE ESCENARIOS DE RIESGO Y AL CÁLCULO DE LA SEGURIDAD ESTRUCTURAL

Alex H. Barbat

Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE)
Universidad Politécnica de Cataluña
Campus Norte UPC, 08034 Barcelona, España
Email: barbat@cimne.upc.edu
web page: <http://www.cimne.upc.edu>

Luís G. Pujades y Omar D. Cardona

Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE)
Universidad Politécnica de Cataluña
Campus Norte UPC, 08034 Barcelona, España
Email: semni@cimne.upc.es
web page: <http://www.cimne.upc.es/semni>

Resumen. En este informe se estudian los métodos numéricos orientados hacia el cálculo de la seguridad de las estructuras, a la evaluación de su vulnerabilidad y riesgo así como al desarrollo de escenarios de riesgo. Partiendo de una amplia revisión bibliográfica, se realiza una descripción del marco conceptual del riesgo, insistiéndose en las formulaciones que se han dado a los conceptos de amenaza, vulnerabilidad, fragilidad y daño involucrados en la definición del riesgo. A pesar de que los conceptos analizados son válidos para cualquier tipo de elemento en riesgo, para responder al principal objetivo de este estudio se pone énfasis en las *estructuras de edificación* y en las *zonas urbanas*. Dicho objetivo es el de estudiar los métodos de última generación orientados a la evaluación del daño esperado tanto en edificios individuales (lo que implica examinar su seguridad y vulnerabilidad) como en zonas urbanas (para las que se describirán procedimientos de simulación de escenarios de riesgo). Después de incluir los principios relacionados con la evaluación de diferentes amenazas naturales (terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, huracanes, inundaciones, deslizamientos, avalanchas, etc.), para las que se introduce el concepto de escenario de amenaza, el presente estudio se centra más en la *amenaza sísmica*, al tener ésta una mayor influencia en la seguridad de las estructuras que se hallan en zonas urbanas.

Se describe, primeramente, del método del índice de vulnerabilidad, desarrollado en el ámbito del riesgo sísmico, que permite caracterizar la vulnerabilidad de las estructuras. Unas funciones de vulnerabilidad semiempíricas permiten estimar el daño estructural para diferentes intensidades de la acción y para diferentes índices de vulnerabilidad estructural. En el segundo lugar, se examina el método del espectro de capacidad que se fundamenta en modelos de análisis no lineal de las estructuras y de curvas de fragilidad estructural. La acción se define mediante el espectro de demanda. El método proporciona las probabilidades de ocurrencia para diferentes estados de daño. También se incluye en el informe una aplicación práctica de los métodos mencionados, utilizándose como ejemplo la ciudad de Barcelona para la se han desarrollado escenarios de riesgo para la amenaza sísmica.

Palabras claves: amenaza, vulnerabilidad, riesgo, fragilidad estructural, seguridad estructural, daño estructural, índice de vulnerabilidad, curva de capacidad, probabilidad de fallo, escenarios de riesgo

1 INTRODUCCIÓN

La sociedad actual vive en la cultura del riesgo y los especialistas conocen relativamente bien cómo predecir, cuantificar y gestionar los riesgos de períodos de recurrencia cortos. Por ejemplo, las sociedades desarrolladas que conviven con los terremotos, tales como Japón y el oeste de Estado Unidos, han aprendido a minimizar los efectos dañinos de los sismos sobre los edificios y la población. La ocurrencia de diferentes fenómenos naturales intensos en diferentes zonas del mundo, pone de manifiesto cada vez más, la diferencia clara entre las pérdidas que se producen en países desarrollados y en países en vías de desarrollo. Por ejemplo, en la primera mitad del siglo XX aproximadamente el 75 % de las víctimas por causa sísmica se producían en países en vías de desarrollo mientras que en la segunda mitad menos del 10 % se producían en países desarrollados.

El análisis de riesgo y los conceptos de seguridad y fiabilidad, sin duda, han sido aportes notables de la ingeniería al estudio de la probabilidad de fallo de un sistema. Las técnicas de convolución probabilista, los árboles de fallo y la modelización estocástica han sido utilizados para estudiar problemas complejos donde interviene la interacción entre múltiples componentes. Este tipo de enfoque, junto con los conceptos de fuentes, parámetros y modelos de incertidumbres, ha contribuido al entendimiento y definición del riesgo desde una perspectiva cuantitativa. Además, muchos de los estudios de peligrosidad o amenaza se han podido realizar utilizando el análisis probabilista, lo que ha permitido respaldar estimaciones que, de otra forma, podrían calificarse como simples especulaciones o apreciaciones.

Antes de revisar conceptos como los de vulnerabilidad y riesgo, es necesario hacer alguna aclaración acerca de la palabra "riesgo" que, en muchos casos, se ha utilizado como sinónimo de "probabilidad". Para algunos ingenieros y expertos en estadística, la palabra riesgo no es más que otra forma de referirse a la probabilidad de ocurrencia de un suceso potencialmente desastroso. Por ejemplo, cuando se afirma que "el riesgo de tormenta es del 20%", se quiere decir que la probabilidad de ocurrencia de una tormenta es del 20%. Pero desde el punto de vista de la industria del seguro el riesgo tiene otro significado: la posibilidad de daño o de efectos adversos (Stewart y Melchers 1997); es decir, en este caso tiene la connotación de consecuencias. Desde la perspectiva de los desastres es aún más amplio el significado del riesgo, pues se le asocia, además, con las "implicaciones" de los daños, lo que hace que la lectura sea definitivamente más amplia que la que se tiene desde el punto de vista de la ingeniería. En definitiva, el riesgo puede entenderse como las posibles consecuencias económicas, sociales y ambientales asociadas a uno o varios fenómenos peligrosos. Pero pueden identificarse diferentes niveles de análisis de riesgo: el primero, cuando se le asocia con la probabilidad de que sean alcanzados ciertos estados críticos (o límites); el segundo, cuando se considera que corresponde a las consecuencias de que varios estados críticos sean alcanzados y las probabilidades de que dichas consecuencias se produzcan; y, el tercero, cuando se analizan, además, los efectos o implicaciones de un fenómeno natural dentro de un contexto aún más amplio, como la sociedad o un segmento de la misma.

El riesgo de desastre no sólo depende de la posibilidad que ocurran fenómenos naturales intensos, sino también de las condiciones de vulnerabilidad que favorecen que se desencadenen desastres cuando ocurren dichos fenómenos. Para corregir las causas del riesgo mediante acciones de intervención de la vulnerabilidad, es necesario primeramente identificar y reconocer el riesgo existente y las posibilidades de que se

generen nuevos riesgos de desastres naturales. Esto requiere medir el riesgo y examinar su evolución temporal con el fin de determinar la eficiencia de las medidas de intervención, sean éstas correctivas o prospectivas, que se han tomado. La evaluación del riesgo es un paso ineludible para su gestión y debe realizarse utilizando herramientas que ayuden la toma de decisiones por parte de los órganos responsables.

El riesgo puede evaluarse a diferentes escalas: para una estructura, para un grupo de estructuras, para una zona urbana entera, para una región o para un país y es evidente que el análisis de riesgo cambia notablemente si el sistema, en vez de ser una estructura (una planta nuclear o una industria química, etc.), es una comunidad o la sociedad misma. Cuando la evaluación se hace a escala urbana, las estructuras que más influencia tienen sobre el riesgo son los edificios. Por ejemplo, durante los terremotos ocurridos en el pasado se ha observado que las pérdidas económicas y el impacto social que se registran dependen directamente del daño sufrido por los edificios y la infraestructura. Esto es debido al número muy alto de edificios existentes en las zonas sísmicas y al hecho de que éstos son propensos a sufrir daños durante la acción de los terremotos, es decir, son vulnerables. También se ha observado que de entre todas las estructuras existentes en un área, las que originan el mayor número de víctimas por su colapso durante los terremotos son los edificios. La mayoría de éstos son antiguos, construidos sin diseño sismorresistente alguno o mediante normas sísmicas obsoletas. También es posible que, durante algún terremoto anterior, estas estructuras hayan sufrido daños que quizás no se aprecien a simple vista. A las cuantiosas pérdidas debidas al deterioro de los edificios durante los terremotos se añaden otras, también enormes, debidas a la interrupción de la actividad económica, de las líneas de comunicación y de los servicios públicos.

Cuando se calcula el riesgo en una escala territorial micro, los resultados se obtienen con más detalles, mientras que, si se trata del nivel macro, los detalles se pierden. La toma de decisiones es diferente en cada nivel puesto que los actores sociales y los interesados en general no son los mismos. Por lo tanto, es necesario contar con herramientas apropiadas a cada caso de evaluación para facilitar y orientar la toma de decisiones. Es también fundamental entender cómo surge la vulnerabilidad, cómo se incrementa y cómo se acumula.

Desde el punto de vista conceptual, técnico-científico y numérico, evaluar el riesgo debido a fenómenos naturales es un desafío mayor. Cualquier método que se desarrolle tendrá limitaciones mayores o menores, según el punto de vista del que lo examine. Esto se debe, por una parte, a la complejidad de lo que se espera reflejar y medir y, por otra, a características enfrentadas y a mutuas restricciones de lo que es factible realizar. La aceptación de ciertos enfoques o criterios de simplificación, comprensión y transparencia, la ausencia de datos o la inherente baja resolución de la información, requieren sacrificar algunas características técnico-científicas o econométricas, como la exactitud y la completitud.

2 OBJETIVOS DEL INFORME

El objetivo principal de este informe es realizar un estudio de revisión de las principales técnicas de evaluación de la vulnerabilidad, del riesgo y de la seguridad estructural, así como de simulación de escenarios de riesgo. Para ello se parte de una amplia revisión bibliográfica a fin de definir de manera rigurosa de los conceptos básicos involucrados en la definición del riesgo: amenaza, vulnerabilidad, fragilidad, riesgo, riesgo aceptable

y probabilidad de daño. Se explica también el concepto de escenario de riesgo, que implica la evaluación del riesgo no a escala de estructura sino a escala urbana, regional o de país. En este sentido, el mencionado objetivo principal del estudio puede reformularse para precisar que se estudian métodos de última generación orientados hacia la evaluación del daño esperado tanto en edificios individuales (lo que implica examinar su seguridad y vulnerabilidad) como en zonas urbanas (para las que se describirán procedimientos de simulación de escenarios de riesgo). Como consecuencia, y de acuerdo con este objetivo, en el presente informe se pone énfasis en las *estructuras de edificación* y en las *zonas urbanas*.

También es objetivo de este informe incluir los principios relacionados con la evaluación de las principales amenazas naturales (terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, huracanes, inundaciones, deslizamientos, avalanchas, etc.). En este sentido se considera el concepto de escenario, pero de manera genérica, sin entrar en detalles correspondientes a cada una de las diferentes amenazas posibles, debido a la excesiva amplitud del tema. Además, de acuerdo con su principal objetivo, el presente estudio se centra más en la *amenaza sísmica*, al tener ésta una mayor influencia en la seguridad de las estructuras que se hallan en zonas urbanas.

Otro objetivo del estudio es el de formular el concepto de vulnerabilidad, especialmente en su aspecto de vulnerabilidad física. A pesar de la importancia crucial de otras dimensiones de la vulnerabilidad, como la vulnerabilidad socio-económica, este informe está restringido a la evaluación de la vulnerabilidad física de las estructuras y describe varios procedimientos para su evaluación. La vulnerabilidad, que está directamente relacionada con la calidad del proyecto y construcción de las estructuras, proporciona información directa para la evaluación de la seguridad de dichas estructuras cuando éstas están sometidas a diferentes amenazas.

Uno de los objetivos más importantes del informe es el de estudiar de manera crítica, los métodos de última generación orientados a la evaluación del daño esperado tanto en edificios individuales (seguridad y vulnerabilidad) como en zonas urbanas (escenarios de riesgo). Uno de los métodos descritos con detalle parte de la definición de un índice de vulnerabilidad y determina el daño estructural utilizando curvas de vulnerabilidad que relacionan el daño, el índice de vulnerabilidad y la amenaza. Otro método evalúa el riesgo con base en un análisis de la capacidad y fragilidad de los edificios, fundamentado en el binomio capacidad-demanda.

Un último objetivo es el de proporcionar alguna aplicación práctica de los conceptos desarrollados. En este sentido se incluye un ejemplo de evaluación de riesgo para la ciudad de Barcelona, que muestra escenarios de riesgo sísmico obtenidos mediante los dos métodos de evaluación mencionados.

3 MARCO CONCEPTUAL DE LA EVALUACIÓN DEL RIESGO

La UNDRO (United Nations Disaster Relief Office) y la UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) promovieron hace más de 25 años una unificación de definiciones. El informe de dicha reunión, *Natural Disasters and Vulnerability Analysis* (UNDRO 1980) incluye las siguientes definiciones:

- a) *Amenaza, peligro o peligrosidad (Hazard - H)*. Es la probabilidad de ocurrencia de un suceso potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado.

- b) *Vulnerabilidad (Vulnerability -V)*. Es el grado de pérdida en un elemento o grupo de elementos en riesgo como resultado de la probable ocurrencia de un suceso desastroso, expresada en una escala desde 0 (sin daño) a 1 (pérdida total).
- c) *Riesgo específico (Specific Risk - R_s)*. Es el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un suceso particular y como una función de la amenaza y la vulnerabilidad.
- d) *Elementos en riesgo (Elements at Risk - E)*. Son las estructuras y la infraestructura, los edificios y obras civiles, la población, las actividades económicas, los servicios públicos y las utilidades expuestas en un área determinada.
- e) *Riesgo total (Total Risk - R_t)*. Se define como el número de víctimas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica debido a la ocurrencia de un desastre; es el producto del riesgo específico, R_s, con los elementos en riesgo E.

De esta manera, la evaluación del riesgo se puede llevar a cabo mediante la siguiente formulación general:

$$R_t = E \cdot R_s = E \cdot H \cdot V$$

De acuerdo con esta ecuación, el riesgo puede entenderse de manera general como el resultado de relacionar la peligrosidad con la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar los posibles efectos y consecuencias económicas, sociales y ambientales asociadas a uno o varios fenómenos peligrosos. Cambios en cualquiera de sus componentes modifican el riesgo en sí mismo, es decir, el total de pérdidas esperadas y las consecuencias en un área determinada.

Conservando este marco conceptual, más tarde se propuso eliminar la variable exposición E, por considerarla implícita en la vulnerabilidad V, sin que esto modificara sensiblemente la concepción original, puesto que no se "es vulnerable" si no se "está expuesto" (Cardona 1986; Coburn y Spence 1992). Esta manera de expresar los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, ampliamente aceptada desde entonces en el campo técnico y científico está fundamentada en la ecuación

$$R_{ie|t} = f(A_i, V_e)|_t$$

Esta ecuación expresa el riesgo como una función $f(\cdot)$ de la amenaza y la vulnerabilidad que muestra que, una vez conocida la amenaza o peligrosidad A_i , entendida como la probabilidad de que ocurra un suceso con una intensidad mayor o igual a i durante un período de exposición t , y conocida la vulnerabilidad V_e , entendida como la predisposición intrínseca de un elemento expuesto e a ser afectado o de ser susceptible a sufrir un daño ante la ocurrencia de un suceso con una intensidad i , el riesgo R_{ie} se expresa como la probabilidad de que ocurra una pérdida en el elemento e , como resultado de la ocurrencia de un suceso con una intensidad mayor o igual a i . Es decir, el riesgo en general puede entenderse como la probabilidad de pérdida durante un período de tiempo t dado (Cardona 1986).

Teniendo en cuenta que no es posible reducir el riesgo en su totalidad, para efectos de planificación, protección y diseño de estructuras y de infraestructura ha sido necesario definir un nivel de *riesgo aceptable*. Dicho riesgo se define, en general, como las consecuencias sociales, económicas y ambientales que, implícita o explícitamente, una sociedad o un segmento de la misma admite o tolera, por considerar que son poco factibles y a cambio de un beneficio inmediato. Desde el punto de vista técnico, corresponde a un valor de probabilidad de unas consecuencias dentro de un período de tiempo, que se utiliza para determinar los requisitos mínimos a aplicar con fines de protección y planificación ante posibles fenómenos peligrosos. Aceptar un riesgo no significa que éste sea despreciable o que se pueda ignorar, sino que se debe reducir en la medida de las posibilidades.

El riesgo puede plasmarse en mapas que pueden ser probabilistas o deterministas dependiendo de la naturaleza de la amenaza. En el caso determinista, los mapas de riesgo representan un *escenario*, o sea la distribución espacial de las pérdidas potenciales en un área dada, debida a una amenaza con una intensidad definida, de acuerdo con el grado de vulnerabilidad de los elementos que componen el área expuesta (Barbat 1998). Estos mapas no sólo son de fundamental importancia para la planificación de la intervención de la amenaza o la vulnerabilidad, sino también para la elaboración de los planes de contingencia que los organismos operativos de respuesta deben realizar durante la etapa de preparativos para emergencias. Un plan operativo elaborado con base en un escenario de riesgo puede ser mucho más eficiente, dado que permite definir procedimientos de respuesta más precisos para atender a la población en caso de desastre.

4 PROCEDIMIENTOS DE EVALUACIÓN DEL RIESGO

4.1 Amenaza

El concepto de peligrosidad o amenaza se utiliza para hacer referencia a un peligro latente o a un factor de riesgo externo a un elemento expuesto. Dicho concepto puede expresarse como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de una intensidad específica, en un emplazamiento dado y durante un período de exposición determinado.

La amenaza es el agente detonante de un desastre. Su evaluación es indudablemente un paso de fundamental importancia en la evaluación del riesgo. La expresión “desastre natural” se ha utilizado frecuentemente como referencia a fenómenos severos de la naturaleza, es decir, a amenazas materializadas. Sucesos como terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, huracanes, inundaciones, deslizamientos, avalanchas, entre otros, han sido considerados directamente como sinónimos de desastre. Durante siglos, esta lectura ha favorecido la creencia de que no hay nada que hacer ante los desastres. Vestigios de esta interpretación se encuentran en las legislaciones de algunos países europeos y latinoamericanos, donde el desastre es incluido en la categoría de “fuerza mayor y caso fortuito”.

Las amenazas que se denominan naturales están asociadas con la posible ocurrencia de fenómenos de la naturaleza como expresión de su dinámica. En muchos casos no pueden ser neutralizadas por la imposibilidad de intervenir su mecanismo, aun cuando en algunas ocasiones puede existir algún tipo de control. A veces, las amenazas naturales se encuentran interrelacionadas unas con otras. Por ejemplo, la ocurrencia de sismos puede generar deslizamientos de tierra, los huracanes pueden generar

inundaciones y las sequías pueden provocar el agotamiento de acuíferos. Otro caso de suceso combinado es el tsunami, que se puede generar por un sismo, por la actividad severa de un volcán o por un deslizamiento de grandes proporciones en el lecho marino.

Una de las maneras de clasificar los fenómenos naturales que generan amenazas puede ser de acuerdo con su origen principal:

- a) *Fenómenos geodinámicos*: sismos, erupciones volcánicas, tsunamis, grandes deformaciones del suelo (licuefacción o movimiento de fallas geológicas), caída de rocas, deslizamientos, flujos de escombros, corrimientos de lava, avalanchas, etc.
- b) *Fenómenos hidrológicos*: inundaciones lentas en planicie, inundaciones súbitas de régimen torrencial, erosión terrestre y costera, sedimentación, salinización, agotamiento de acuíferos, sequías, desertificación, etc.
- c) *Fenómenos atmosféricos*: heladas, granizadas, cambios fuertes de temperatura, incendios forestales, huracanes, el fenómeno de El Niño, etc.
- d) *Fenómenos químicos*: degradación de las características mecánicas de los materiales como, por ejemplo, la corrosión.
- e) *Fenómenos biológicos*: epidemias (cólera, sarampión, gripe, SIDA, etc.) y plagas (nubes de langostas, abejas africanas o reproducción excesiva de roedores, etc.).

En esta clasificación se han incluido fenómenos muy diversos; obviamente, algunas de ellos no son amenazas potenciales que puedan poner en riesgo las estructuras.

Se pueden mencionar también las amenazas antrópicas, que son causadas por el ser humano o están relacionadas con la tecnología. Como ejemplos pueden darse: el terrorismo, las guerras, los accidentes industriales y nucleares, las explosiones, los incendios, la contaminación química y radiactiva, etc. Existe un amplio espectro de fenómenos tales como las hambrunas, las inundaciones, los incendios forestales, los fenómenos deslizamientos, entre otros, que pueden ser causados por la combinación de factores naturales y humanos.

En la evaluación de la amenaza es necesario diferenciar la amenaza y suceso que la caracteriza, puesto que la amenaza significa la potencialidad de que ocurra un suceso con cierto grado de severidad, mientras que el suceso en sí mismo representa al fenómeno con sus características. La materialización de una amenaza, es decir, la ocurrencia de un suceso con un grado de severidad dada, está relacionada con la ventana de tiempo que se utilice en su definición. Es común utilizar el concepto de *período de retorno*, que es el intervalo de recurrencia de un suceso y que corresponde al tiempo medio transcurrido entre eventos con características similares en una región. Para cuantificar la probabilidad de que ocurra un suceso de una cierta intensidad, caracterizado por su período de retorno, durante un período de exposición de una estructura, es necesario contar con información fiable y completa acerca del número de eventos que han ocurrido en el pasado en la zona y acerca de la intensidad que tuvieron los mismos.

Como un ejemplo, consideremos que la amenaza sísmica para un sector de una zona urbana se expresa como la probabilidad de que durante un lapso de 100 años pueda ocurrir un terremoto con una aceleración pico del suelo igual o superior al 30% de la aceleración de la gravedad g . Un valor de la probabilidad cercano a uno 1.0 significaría que existe casi la certeza de que durante el período de tiempo definido ocurre un evento con las características mencionadas. El valor de la amenaza definido de esta manera permite tomar decisiones sobre los requisitos sismorresistentes que deben cumplir las estructuras en dicho sector de la ciudad.

En la mayoría de los casos, la evaluación de las amenazas se realiza combinando el análisis probabilista con el análisis del comportamiento físico de la fuente generadora utilizando modelos de los sistemas físicos involucrados. Evaluar la amenaza es “pronosticar” la ocurrencia de un fenómeno. Un pronóstico puede ser a corto plazo, cuando se interpretan las señales premonitorias de un fenómeno, actividad denominada habitualmente predicción; a medio plazo, cuando se utiliza la información probabilista de parámetros indicadores de ocurrencia; y a largo plazo, si se determina el suceso máximo probable en un período de tiempo que pueda relacionarse con la planificación del área potencialmente afectada. El pronóstico realizado a corto plazo, es decir, la predicción, es fundamental para el desarrollo de sistemas de alerta temprana, cuyo objetivo es informar anticipadamente a la población amenazada acerca de la inminente ocurrencia de un fenómeno peligroso.

Las evaluaciones de amenazas las realizan especialistas relacionadas con los campos de la geofísica, de la meteorología, de la hidrología y de los procesos tecnológicos. Los estudios realizados varían desde estimaciones generales hasta análisis detallados, plasmados en mapas en los que se realizan *zonificaciones* que delimitan áreas homogéneas o zonas de amenaza constante. De esta manera se obtienen mapas de amenaza o *escenarios de amenaza*.

4.2 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad puede definirse como un factor interno de riesgo de un elemento expuesto a sucesos que caracteriza una amenaza y representa su predisposición intrínseca de ser afectado o de ser susceptible de dañarse. Un estudio de evaluación de la vulnerabilidad analiza la capacidad del elemento o sistema de resistir o absorber el impacto de dicho suceso. Por lo tanto, se diferencia de un análisis de riesgo que evalúa las pérdidas o consecuencias de acuerdo con el grado de amenaza considerado y con el nivel de vulnerabilidad existente en los elementos expuestos. La dimensión física de la vulnerabilidad expresa las deficiencias de resistencia de los elementos expuestos, de los que depende su capacidad de absorber la acción de la amenaza.

Es importante comenzar por aclarar una relación implícita que existe entre la vulnerabilidad y la amenaza. Cuando se afirma que un elemento es vulnerable, en rigor es necesario preguntarse: ¿vulnerable ante qué? Es decir, debe existir una amenaza para que dicho elemento esté en riesgo. De la misma manera, no puede existir una situación de amenaza para el elemento si éste no está *expuesto*. Por ejemplo, una población puede ser vulnerable a los huracanes y no serlo a los terremotos o a las inundaciones.

La evaluación de la vulnerabilidad física se ha desarrollado notablemente a raíz de los desarrollos conceptuales y de los avances tecnológicos de la ingeniería en diversos campos. Los estudios analíticos y experimentales de las estructuras y la investigación de nuevos modelos y metodologías para la evaluación de la posibilidad de fallo, por una parte, y la fiabilidad y seguridad de los sistemas estructurales, por otra, han contribuido significativamente al estudio de la vulnerabilidad, al menos desde el punto de vista físico. Un ejemplo de este avance ha sido el desarrollo de técnicas, hoy cada vez más utilizadas, para la evaluación del daño que puede sufrir un edificio o una infraestructura si ocurre una acción de una cierta severidad, por ejemplo, un terremoto (Oller et al. 1996; Barbat et al. 1997; Barbat et al. 1998; Hanganu et al. 2002; Oller y Barbat 2006). Esta valoración se puede realizar con base en la capacidad resistente de los sistemas en consideración, con diferentes niveles de aproximación y detalle. Un enfoque de este tipo

permite estimar la vulnerabilidad de manera diferencial, en función de la severidad de la amenaza y de las características mecánicas y de resistencia de la estructura o del elemento estructural examinado.

Existen casos en los que la vulnerabilidad no es diferencial o el suceso peligroso, es decir la amenaza, tiene una severidad tal que no es posible una gradación del daño en las estructuras. Es el caso de avalanchas o grandes deslizamientos, en los que la sola exposición de un elemento (por ejemplo un sistema estructural o una zona urbana) al fenómeno significa en la práctica una vulnerabilidad física total. Un análisis de exposición, que indique si el elemento está o no dentro del área de influencia del fenómeno, puede ser suficiente para determinar el riesgo si se parte de la hipótesis de que el elemento será gravemente dañado si es alcanzado por la acción del fenómeno.

La vulnerabilidad física de una estructura está relacionada con el grado de exposición y la fragilidad de los elementos expuestos que sufren la acción correspondiente a la amenaza. Puede evaluarse en una de las siguientes maneras (Barbat et al. 2006b):

- *Mediante descriptores cualitativos.* Un descriptor cualitativo clasifica las estructuras en clases de vulnerabilidad tales como baja, media, alta, etc., o A, B, C, etc. Por ejemplo, las escalas macrosísmicas de intensidad como la EMS-89 (Grünthal 1998), utilizan definiciones de este tipo.
- *Mediante índices de vulnerabilidad física.* Dichos índices reflejan la habilidad de la estructura de comportarse adecuadamente frente a cierta amenaza y se calculan en función de indicadores asignados a las características relacionadas con la tipología estructural, el diseño y la práctica constructiva de las estructuras. Para el caso de edificios sometidos a acciones sísmicas existe la propuesta de Benedetti y Petrini (1984).
- *Mediante curvas de capacidad.* Éstas son curvas fuerza-desplazamiento obtenidas mediante el análisis no lineal de las estructuras y corresponden a la respuesta estructural máxima en el primer modo de vibración. Dichas curvas describen razonablemente bien el comportamiento de las estructuras, especialmente su daño cuando están sometidas a acciones dinámicas horizontales como son, por ejemplo, las sísmicas.

Resumiendo, la evaluación de la vulnerabilidad es un proceso mediante el cual se determina el grado de susceptibilidad al daño de un elemento o grupo de elementos expuestos a una amenaza particular, que contribuye al conocimiento del riesgo a través de la interacción de dichos elementos con el ambiente peligroso. Generalmente, los elementos expuestos, o en riesgo, son el contexto social y material que puede ser afectado por una amenaza, es decir, las actividades humanas, los sistemas realizados por el hombre, tales como edificios, líneas vitales o infraestructura, centros de producción, utilidades, servicios, así como la gente que los utiliza.

La evaluación de la capacidad sismorresistente de los edificios o de las obras civiles existentes es un caso ilustrativo de análisis de vulnerabilidad física (Aktan y Ho 1990; Barbat et al. 1996). Lo es también la determinación del nivel de exposición de las viviendas o de la infraestructura que permite establecer su capacidad para soportar una inundación. Por otra parte, la evaluación de las habilidades y de la capacidad de una comunidad para actuar correctamente cuando se produce una erupción volcánica, corresponde a un análisis de vulnerabilidad desde el punto de vista educativo (Cardona

1997). Igualmente, el análisis de la capacidad de reacción del personal de socorro y de la capacidad de los hospitales de hacer frente a una demanda masiva de servicios médicos después de una crisis corresponde a un análisis de la vulnerabilidad institucional y funcional para atender un desastre (OPS 1993). Por este motivo, la vulnerabilidad puede clasificarse desde el punto de vista de su evaluación como de carácter técnico y de carácter social. El primer tipo de vulnerabilidad se cuantifica en términos físicos y funcionales, por ejemplo, en daños físicos potenciales o en posibles perjuicios debidos a la interrupción de la operación de un servicio. El segundo se puede valorar en términos de falta de resiliencia, es decir, falta de capacidad de una comunidad de absorber el impacto. En este caso, su evaluación puede ser cualitativa o relativa, puesto que está relacionada con aspectos económicos, educativos, culturales, etc., que, en la mayoría de los casos, solo pueden evaluarse mediante índices o indicadores.

Es importante mencionar que las evaluaciones de carácter técnico suelen ser vistas como ingenuas desde la perspectiva socio-económica, debido a que el marco que les ha dado la ingeniería no permite evaluar la vulnerabilidad más que de manera parcial y, en consecuencia, permiten calcular sólo una pequeña parte de las pérdidas esperadas en una zona urbana, es decir, del riesgo. Sin embargo, dichas metodologías han demostrado su utilidad práctica en muchos casos, especialmente como punto de partida para la estimación de los aspectos no físicos de la vulnerabilidad y del riesgo.

4.3 Riesgo

El riesgo puede expresarse como la probabilidad de excedencia de un nivel dado de consecuencias económicas, sociales o ambientales en un emplazamiento dado y durante cierto período de exposición (Cardona 2004). Uno de los principales objetivos de un estudio de riesgo es la predicción de mapas del daño esperado debido a una amenaza a una escala territorial que, en muchos casos es una zona urbana.

Para realizar un análisis de riesgo se deben seguir tres pasos: estimar la amenaza o peligrosidad, evaluar la vulnerabilidad y llevar a cabo la evaluación del riesgo relacionando la amenaza con la vulnerabilidad de los elementos expuestos (Taylor *et al.* 1998). Ha sido habitual en la mayoría de estudios existentes que el riesgo sea valorado solamente en términos físicos, dado que la vulnerabilidad social es difícil de evaluar en términos cuantitativos. El riesgo físico específico de un elemento ha sido evaluado como una proporción del valor del elemento o como coste de reparación o reemplazo de los elementos dañados.

La evaluación del daño físico esperado, es decir del riesgo específico, que cuantifica la pérdida media sufrida por una estructura o infraestructura partiendo de un escenario de amenaza y de la vulnerabilidad estructural, puede realizarse de las siguientes maneras (Pujades y Barbat 2004):

- *Utilizando matrices de probabilidad de daño.* Éstas expresan, en una forma discreta, la probabilidad condicional $P [D = j|i]$ de obtener un nivel de daño j debido a una amenaza con una severidad i (Whitman *et al.* 1974).
- *Utilizando funciones de vulnerabilidad.* Dichas funciones expresan el daño en una forma continua como función de los parámetros que describen la severidad de la amenaza y de los valores del índice de vulnerabilidad (Benedetti y Petrini 1984).

- *Utilizando curvas de fragilidad*, que expresan la probabilidad de que un índice esperado de daño global de una estructura, d , exceda un estado de daño dado d_s , en función de un parámetro que describe la severidad de la acción.

Estas tres formas de cuantificar el daño físico han sido desarrolladas de manera independiente, en diferentes épocas y, a veces, para diferentes amenazas. De toda forma, hoy en día las matrices de probabilidad de daño, las funciones de vulnerabilidad y las curvas de fragilidad se reconocen como formas diferentes pero equivalentes para cuantificar el daño esperado en las estructuras bajo diferentes amenazas. Por ejemplo, en el marco de estos conceptos han sido desarrolladas varias metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad, daño y riesgo en áreas sísmicas (Benedetti y Petrini 1984; ATC-13 1985; HAZUS 1999). Las matrices de probabilidad de daño, las funciones de vulnerabilidad y las curvas de fragilidad obtenidas a partir del daño estructural real producido durante terremotos, han sido las herramientas más utilizadas en los estudios de riesgo sísmico realizados en el pasado (Benedetti y Petrini 1984; Kappos et al. 1995; Singhal y Kiremidjian 1996; Barbat et al. 1996). Para aplicar estos procedimientos de evaluación sería conveniente disponer de una base de datos completa de daños observados. Sin embargo, tales bases de datos existen sólo en zonas de alta sismicidad en las que se realizan inspecciones post-terremoto rigurosas y metódicas. En las zonas en las que los datos de daño existentes para las clases de estructuras existentes y para diferentes intensidades sísmicas son limitados o incompletos, se debe utilizar la opinión de expertos para completar o sustituir los datos observados (ATC-13 1985; Anagnos et al. 1995). La falta de datos se ha sustituido también por valores obtenidos mediante métodos de análisis no lineal de las estructuras (Milutinovic y Trendafiloski 2003; Barbat et al. 2006b). Para completar la información sobre el daño sísmico de las estructuras en zonas sin datos, se han utilizado también métodos de simulación por Monte Carlo (Kappos et al. 1995; Singhal y Kiremidjian 1996; Barbat et al. 1996). De acuerdo con este procedimiento, han sido obtenidas curvas de fragilidad, matrices de probabilidad de daño y funciones de vulnerabilidad a partir del análisis probabilista de la respuesta de edificios representativos obtenida mediante métodos de análisis no lineal de estructuras.

Tal como se ha visto anteriormente, las evaluaciones de vulnerabilidad y riesgo deben ser multidisciplinarias, considerando no sólo el daño físico esperado, el número de víctimas y las pérdidas económicas, sino también aspectos relacionados con la fragilidad social y la falta de resiliencia que favorecen los efectos indirectos cuando una amenaza se materializa y un fenómeno natural golpea un centro urbano. Cardona (2001) ha propuesto un modelo de riesgo válido para centros urbanos desde una perspectiva holística y Carreño et al. (2006), partiendo de este modelo, han desarrollado un método de evaluación del riesgo urbano con base en índices.

5 EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

La principal causa de pérdidas humanas y económicas que producen los terremotos es el comportamiento sísmico inadecuado de las estructuras. Concretamente, en el siglo XX el colapso de edificios produjo el 75% de las pérdidas humanas por terremotos. La única forma de reducir el riesgo es reduciendo la vulnerabilidad de los edificios.

Un estudio de riesgo sísmico requiere la consideración de los siguientes aspectos: 1) la amenaza sísmica; 2) el edificio expuesto, 3) las funciones de daño o funciones de

pérdida; 4) el análisis del riesgo; y 5) la toma de decisiones. Este estudio se refiere a los tres primeros: el terremoto, el edificio y el daño esperado. Los dos restantes requieren estudios multidisciplinarios en los que participen los responsables de la protección civil y de la planificación y gestión de emergencias.

5.1 La amenaza sísmica

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

Otro aspecto fundamental y controvertido es la caracterización del movimiento del suelo. Definir la acción mediante un solo parámetro, llámese intensidad macrosísmica o máxima aceleración del suelo, es útil y cómodo pero insuficiente. Los terremotos y el correspondiente daño observado han puesto de manifiesto la complejidad de la aceleración sísmica y de la respuesta de los edificios. La tendencia actual es definir la acción mediante espectros de respuesta compatibles con acelerogramas reales. Con todo, especialmente en aquellas regiones donde sólo existen datos macrosísmicos, el amplio período histórico cubierto por la intensidad macrosísmica puede aconsejar utilizar este parámetro en los estudios de riesgo, lo que permite aproximaciones razonables al daño esperado. En zonas con registros de aceleración o con conocimientos de fuente es preferible usar espectros de respuesta observados o sintéticos. McGuire (2004) resume los principales métodos para la estimación probabilista de la amenaza sísmica.

Ejemplos de métodos de análisis de daño y riesgo que utilizan la intensidad son: el método del índice de vulnerabilidad (Angeletti et al. 1988; Benedetti y Petrini 1984; Bendetti et al. 1988; Barbat et al. 1996, 1998; Barbat 1998) y las instrucciones ATC-13 (1985) y ATC-25 (1996). Hazus'99 (2002) define la acción en términos espectrales y en el proyecto Risk-UE, que ha proporcionado herramientas para el análisis de riesgo sísmico en ciudades europeas, se proponen métodos basados en la intensidad macrosísmica y en valores espectrales (Milutinovic y Trendafiloski 2003; Giovinazzi y Lagomarsino 2002; Giovinazzi 2005; Lagomarsino y Penna 2003)

5.2 El edificio: matrices tipológicas, vulnerabilidad y capacidad

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

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

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

Este tipo de funciones que, por ejemplo, el ATC-13 y ATC-25 definen para un gran número de edificios e instalaciones, se utiliza para predecir el daño esperado para un escenario sísmico concreto. Algunas iniciativas europeas como, por ejemplo, el método del índice de vulnerabilidad, introducen la vulnerabilidad mediante una variable explícita. Cada edificio, estructura, infraestructura o servicio puede calificarse mediante una clase de vulnerabilidad (Grünthal, 1998) o puede cuantificarse mediante un índice que, en general, vale cero cuando el elemento no es nada vulnerable, es decir, no se espera daño, y vale 1 para el caso más vulnerable, es decir, cuando para intensidades sísmicas relativamente bajas se espera un daño importante o incluso el colapso. En estos casos, en la determinación de funciones de daño, es decir en las funciones del tipo de la ecuación (1), la variable e , que define el edificio, se sustituye por un índice de vulnerabilidad I_v . Sandi (1983), Wilches-Chaux (1989), Cardona y Barbat (2000), Barbat *et al.* (2006a) y Barbat *et al.* (2006b) discuten aspectos conceptuales relacionados con la tipificación de los edificios y su vulnerabilidad. Definimos a continuación las variables y conceptos utilizados en este trabajo, en el que sólo nos referimos a edificios convencionales residenciales.

Matriz tipológica

Dada una ciudad o un entorno edificado, una matriz tipológica es una clasificación de los edificios según clases o tipos. Probablemente el ejemplo más sencillo de matriz tipológica es la de la escala MSK (Sponheuer y Karnik, 1964), donde los edificios se agrupan de acuerdo a sólo tres clases: A, B y C. En el *método del espectro de capacidad* los edificios se clasifican mediante una building typology matrix (BTM).

Clases e índices de vulnerabilidad

Constituyen una forma alternativa de clasificar los edificios. Por ejemplo, la escala macrosísmica europea EMS'98 (Grünthal, 1998) establece 6 clases de vulnerabilidad: A, B, C, D, E y F. A diferencia de la clasificación de acuerdo con una BTM de tipos constructivos, el concepto, clases e índices de vulnerabilidad hacen referencia, generalmente implícita, al comportamiento sísmico esperado y, por consiguiente, diferentes tipos constructivos pueden estar bien representados por una misma clase o índice de vulnerabilidad. En el *método del índice de vulnerabilidad*, los edificios se caracterizan mediante un índice de vulnerabilidad. La estimación del daño se efectúa a partir de la definición de funciones de daño del tipo definido en la ecuación (1)

Curvas y espectros de capacidad

Las curvas y espectros de capacidad permiten caracterizar el comportamiento resistente de los edificios de forma analítica. Aunque un edificio de planta rectangular, cuando es sometido a un movimiento no estacionario tridimensional, tiene características diferentes según las dos direcciones ortogonales, para evaluar el daño esperado, el edificio puede ser bien descrito por un modelo sencillo con un solo grado de libertad. Los métodos numéricos de estimación del daño tienen en cuenta el comportamiento no lineal de una estructura durante movimientos sísmicos fuertes. Una curva fuerza-desplazamiento cuantifica, de forma simplificada, la no linealidad y es característica de la estructura que representa. La curva de capacidad indica la fuerza lateral que se requiere para causar un determinado desplazamiento. Una forma conveniente y equivalente de representar la curva de capacidad es el formato (Sd, Sa) , donde Sd y Sa son las aceleraciones y desplazamientos espectrales, respectivamente.

Este tipo de diagramas muestran la aceleración espectral asociada a un rango de desplazamientos espectrales y se llaman *espectros de capacidad*. Es frecuente representar el espectro de capacidad en forma simplificada, bilineal. De esta manera, el espectro de capacidad se aproxima mediante dos tramos de recta definidos por los puntos de plastificación (Sd_y, Sa_y) y de capacidad última (Sd_u, Sa_u) . La Figura 1 muestra un ejemplo de este tipo de espectros de capacidad. El espectro de capacidad bilineal se muestra en trazo discontinuo y sobre él se indican los puntos de plastificación y de capacidad última. El primer tramo recto, que pasa por el origen de los ejes de coordenadas, define el período propio inicial del edificio y representa su comportamiento lineal correspondiente a desplazamientos y aceleraciones espectrales pequeños. Cuanto mayor sea la aceleración de plastificación y la aceleración de capacidad última, mayor es la resistencia de la estructura. Como se verá más adelante, los espectros de capacidad permiten determinar el desplazamiento espectral esperado cuando el edificio sufre un terremoto caracterizado por su espectro de respuesta pero, además, también permite calcular curvas de fragilidad y, por consiguiente, el daño esperado.

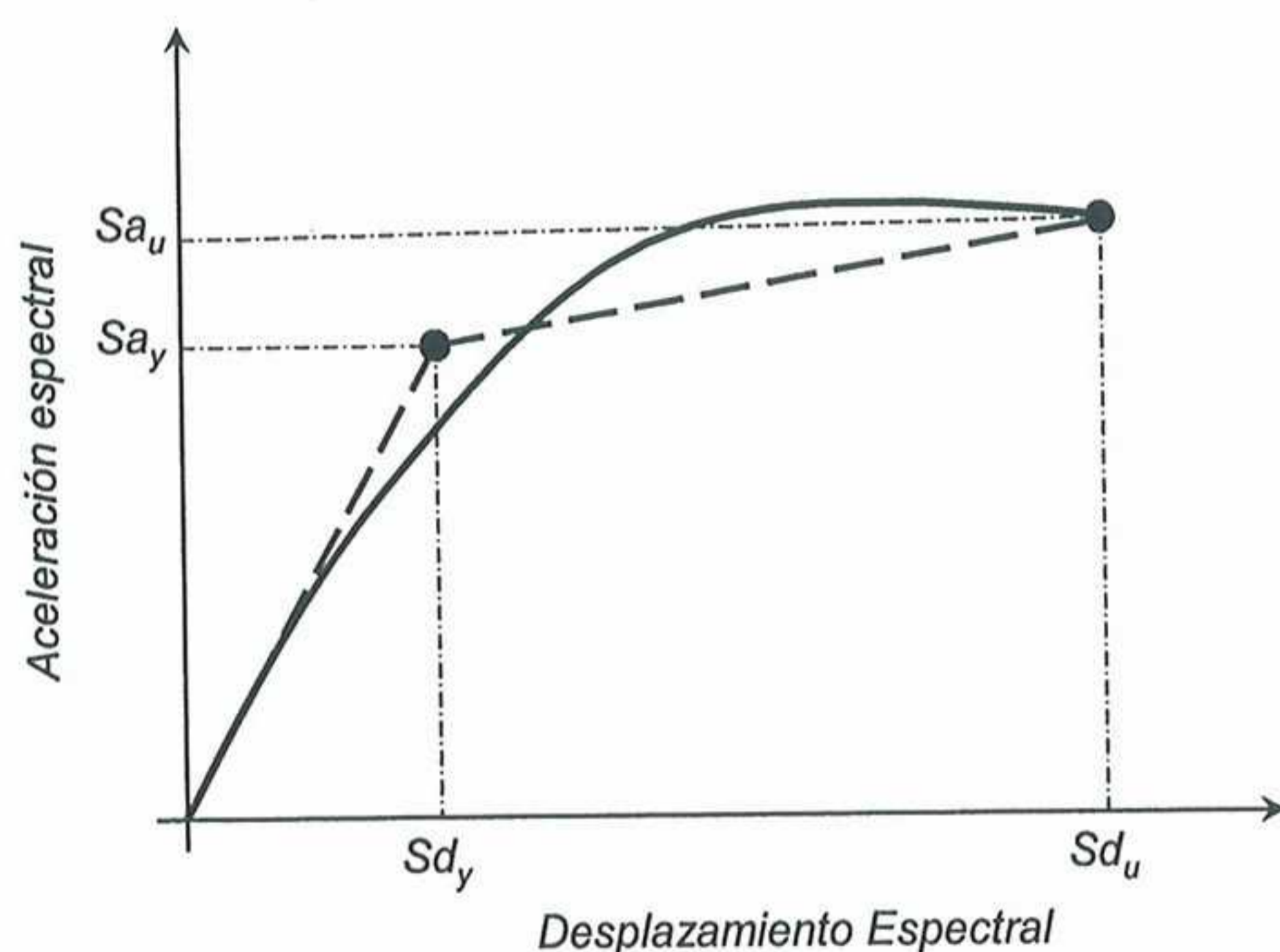


Figura 1. Espectro (trazo continuo) y espectro bilineal (trazo discontinuo) de capacidad. Se muestran los puntos de plastificación (Sd_y, Sa_y) y de capacidad última (Sd_u, Sa_u) .

5.3 El daño

Desde mucho antes del desarrollo de la sismología y de la ingeniería sísmica, el daño causado por los terremotos ha sido el observable más usado para describir y cuantificar la severidad de los terremotos. Jacobo Castaldi y Robert Mallet se consideran precursores de las escalas de intensidad y, en sentido amplio, podemos decir que son también precursores de los escenarios de riesgo sísmico. El primero recogió, en un mapa, los efectos del terremoto de Niza ocurrido el 20 de julio de 1561; el segundo se desplazó con un equipo de expertos para estudiar los efectos del terremoto de Nápoles ocurrido en diciembre de 1857. En esta época ya se conocía que la distribución de los efectos macrosísmicos de un terremoto pueden ser representados mediante líneas que delimitan zonas de igual intensidad o zonas en las que los efectos causados por los terremotos son similares.

Con todo, la descripción y cuantificación del daño no ha dejado aún de tener grandes dosis de subjetividad que dificultan su tratamiento científico y preciso. Existen diversas formas de describir y cuantificar el daño. Aquí se hará referencia a la forma adoptada en este estudio. En general, las escalas de intensidad y los métodos empíricos de análisis de riesgo basados en el concepto de vulnerabilidad y en observaciones macrosísmicas definen el daño mediante los llamados estados de daño. Los métodos basados en espectros de capacidad y curvas de fragilidad heredan la consideración del daño mediante grados o niveles de daño. En ambos casos, el daño suele también cuantificarse mediante diferentes parámetros o índices de daño cuyo significado es también diverso. Las funciones de daño (ecuación 1) deben permitir predecir, para cada edificio y para cada escenario sísmico, el daño esperado. Se describirán a continuación los conceptos y formalismos empleados en el *método del índice de vulnerabilidad* y en el *método del espectro de capacidad*. El primero es representativo de los métodos que usan índices de vulnerabilidad y funciones de daño empíricas basadas en escalas macrosísmicas. El segundo es representativo de los que usan espectros de capacidad y curvas de fragilidad.

5.3.1 Estados y distribuciones de daño

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

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

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

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

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

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

d^* toma valores entre 0 y 5 y representa el estado de daño más probable. Así, $d=d^*=0$ representa una probabilidad 1 para el estado de daño *nulo* (0) y 0 para los otros estados. Un valor de $d=1$ corresponde a $d^*=5$, a una probabilidad igual a la unidad para el estado de daño de *colapso* o *completo* (5) y a una probabilidad nula para los otros estados de daño. Valores intermedios entre 0 y 1 para d y entre 0 y 5 para d^* indican una distribución de daño. En este caso, d^* es una especie de grado de daño medio o grado de daño más probable. En cualquier caso lo importante es que d^* determina de forma unívoca la distribución de las probabilidades de daño. Esta sencilla hipótesis sobre la distribución del daño permite construir distribuciones de probabilidad de daño a partir de descripciones parciales o incompletas en las escalas de intensidad. Así, por ejemplo, la escala MSK-64 describe de la siguiente manera los daños sufridos por los edificios de tipo A cuando ocurre un terremoto de intensidad VII. “*Muchas construcciones del tipo A sufren daños graves (clase 3) y algunas incluso destrucción (clase 4)*”. Entendiendo por muchas el 50% y por algunas el 5%, podemos predecir la distribución binomial probable de forma que la suma de las probabilidades de los estados de daño grave y destrucción sumen 55%. La Tabla 1 y la Figura 2 muestran un ejemplo de este tipo de construcción de la distribución binomial que corresponde a $d=0.5553$ y $d^*=2.78$.

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

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

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

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

Tabla 1. Completando una distribución de probabilidad de daño.

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

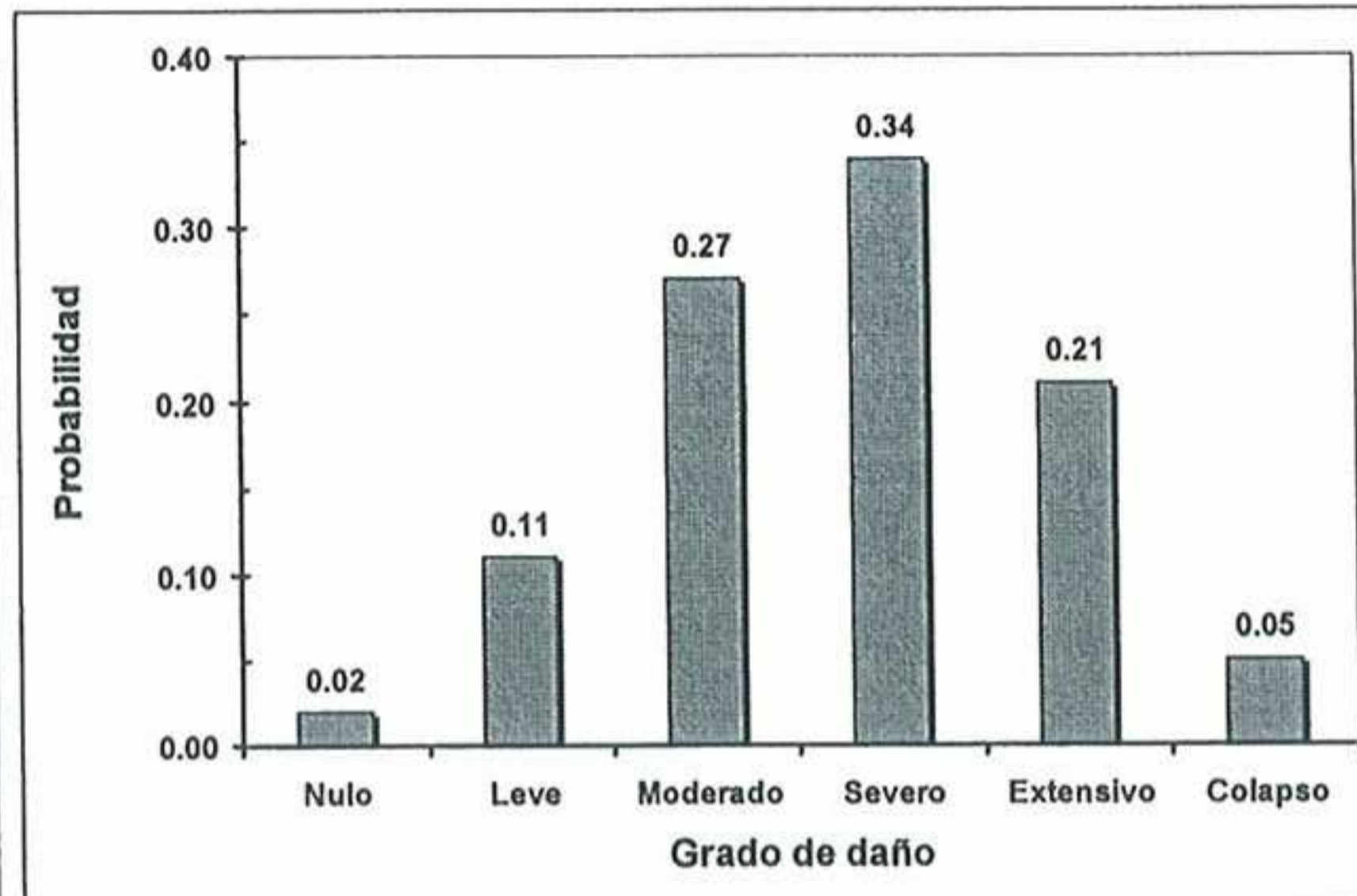


Figura 2. Distribución binomial de probabilidad correspondiente a la Tabla 1.

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

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

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

$$P(D \geq D_k) = 1 - P_{\beta}(k) \quad (8)$$

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

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

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

5.3.2 Curvas de fragilidad

Una forma equivalente de definir el daño es mediante curvas de fragilidad (Hazus'99 2 002). Para un tipo de edificio y un estado de daño dado, estas curvas definen la probabilidad de que se iguale o exceda el estado de daño considerado en función de la intensidad sísmica. Es decir:

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

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

$$P[ds | S_d] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{S_d}{S_{d, ds}} \right) \right] \quad (11)$$

donde ahora S_d es el desplazamiento espectral o parámetro de la acción sísmica, $\overline{S_{d, ds}}$ es el valor medio del desplazamiento en el que el edificio alcanza un umbral del estado de daño ds , β_{ds} es la desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral del estado de daño ds y Φ es la función de distribución acumulativa normal estándar. Por lo tanto, estas curvas quedan definidas mediante sólo dos parámetros: el valor medio $\overline{S_{d, ds}}$ y la desviación típica β_{ds} . El valor medio define el punto en el que la probabilidad de igualar o exceder el estado de daño es igual al 50%; la desviación típica nos da una idea de la dispersión. La siguiente ecuación muestra la función de densidad de probabilidad correspondiente a las curvas de fragilidad

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

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

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

La Figura 3 muestra un ejemplo de curvas de fragilidad.

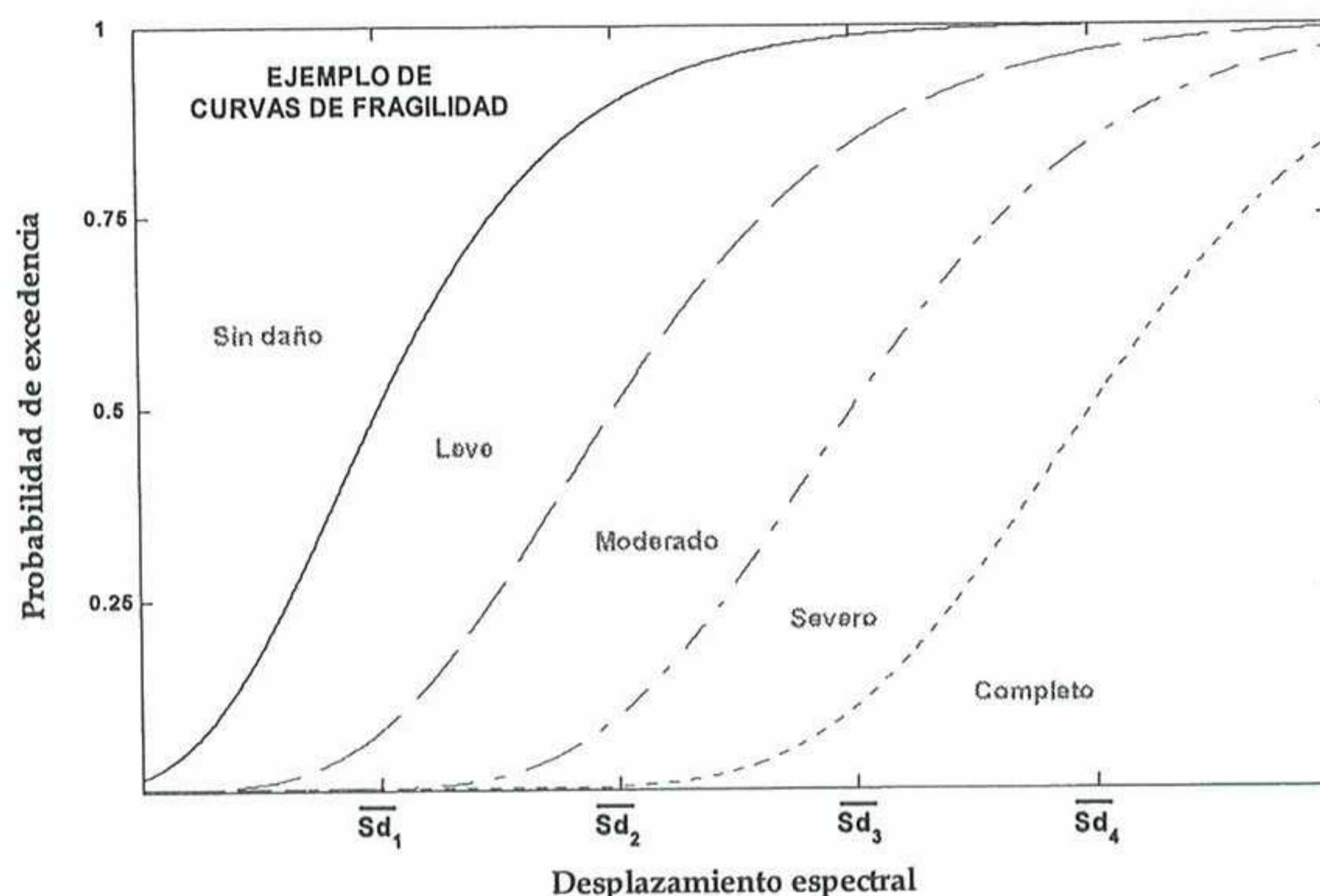


Figura 3. Ejemplo de curvas de fragilidad. Se consideran 4 estados de daño diferentes del grado de daño nulo o sin daño.

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

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

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

5.4 Funciones y matrices de probabilidad de daño

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

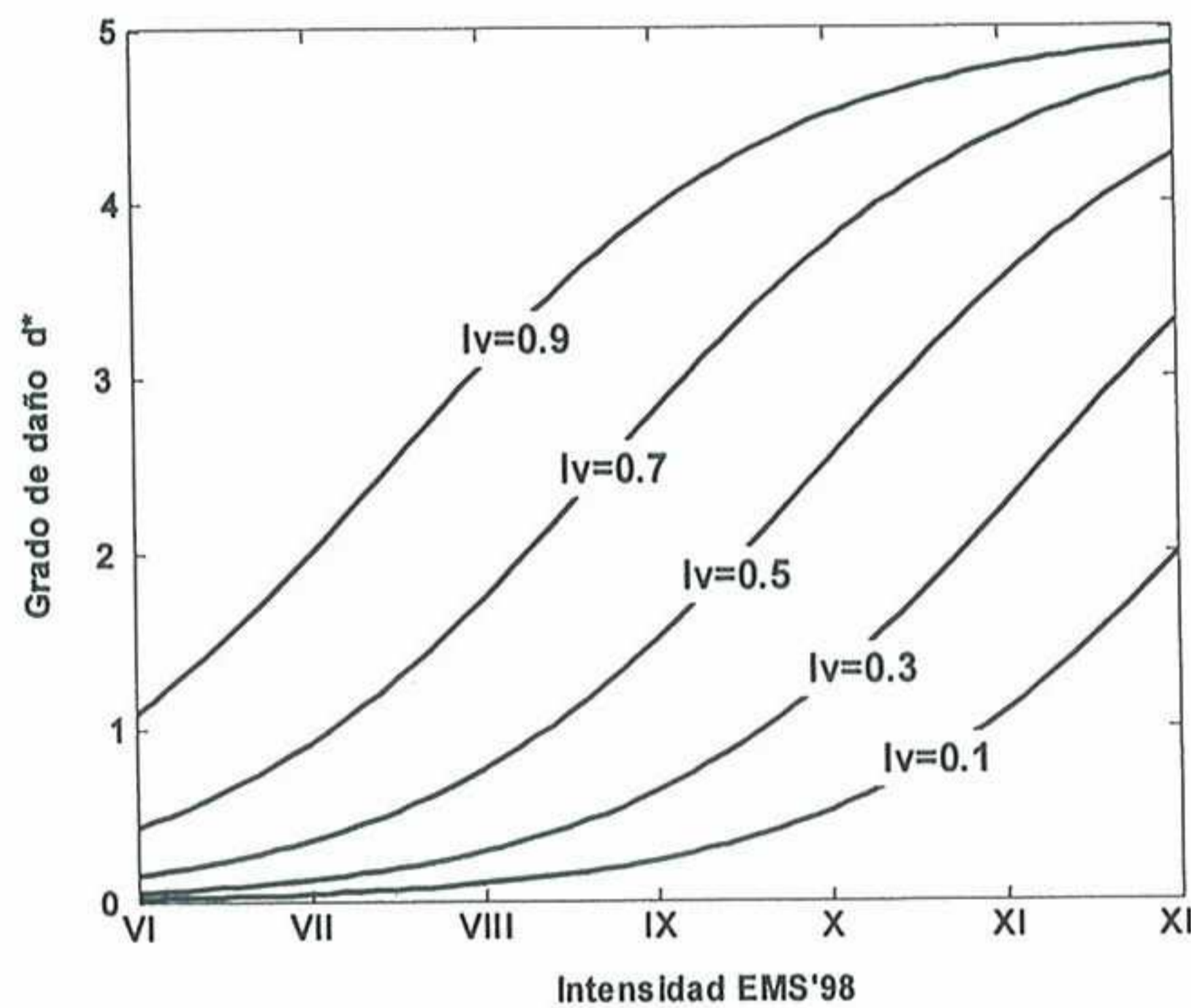
5.4.1 Método del índice de vulnerabilidad

En este método, la acción sísmica se caracteriza mediante la intensidad macrosísmica EMS'98 y el edificio mediante un índice de vulnerabilidad. La información de daños observados en terremotos pasados se ha utilizado para obtener la siguiente función semiempírica propuesta por Giovinazzi y Lagomarsino (2004):

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

La Figura 4 muestra las funciones de daño para diferentes índices de vulnerabilidad. Obsérvese cómo, dada una intensidad sísmica, el grado de daño aumenta con el índice de vulnerabilidad. Por ejemplo, para una intensidad X el grado de daño más probable es 0.52 para un índice de vulnerabilidad de 0.1 mientras que es 4.5 para un índice de vulnerabilidad de 0.9, indicando que, para esta intensidad, los edificios tipificados mediante el primer índice de vulnerabilidad apenas sufrirán daños mientras que los daños serán muy severos en los edificios caracterizados mediante el segundo índice.

Figura 4. Ejemplo de funciones de daño para diferentes índices de vulnerabilidad. d^* se obtiene a partir de la ecuación (15).



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

5.4.2 Método del espectro de capacidad

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

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

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

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

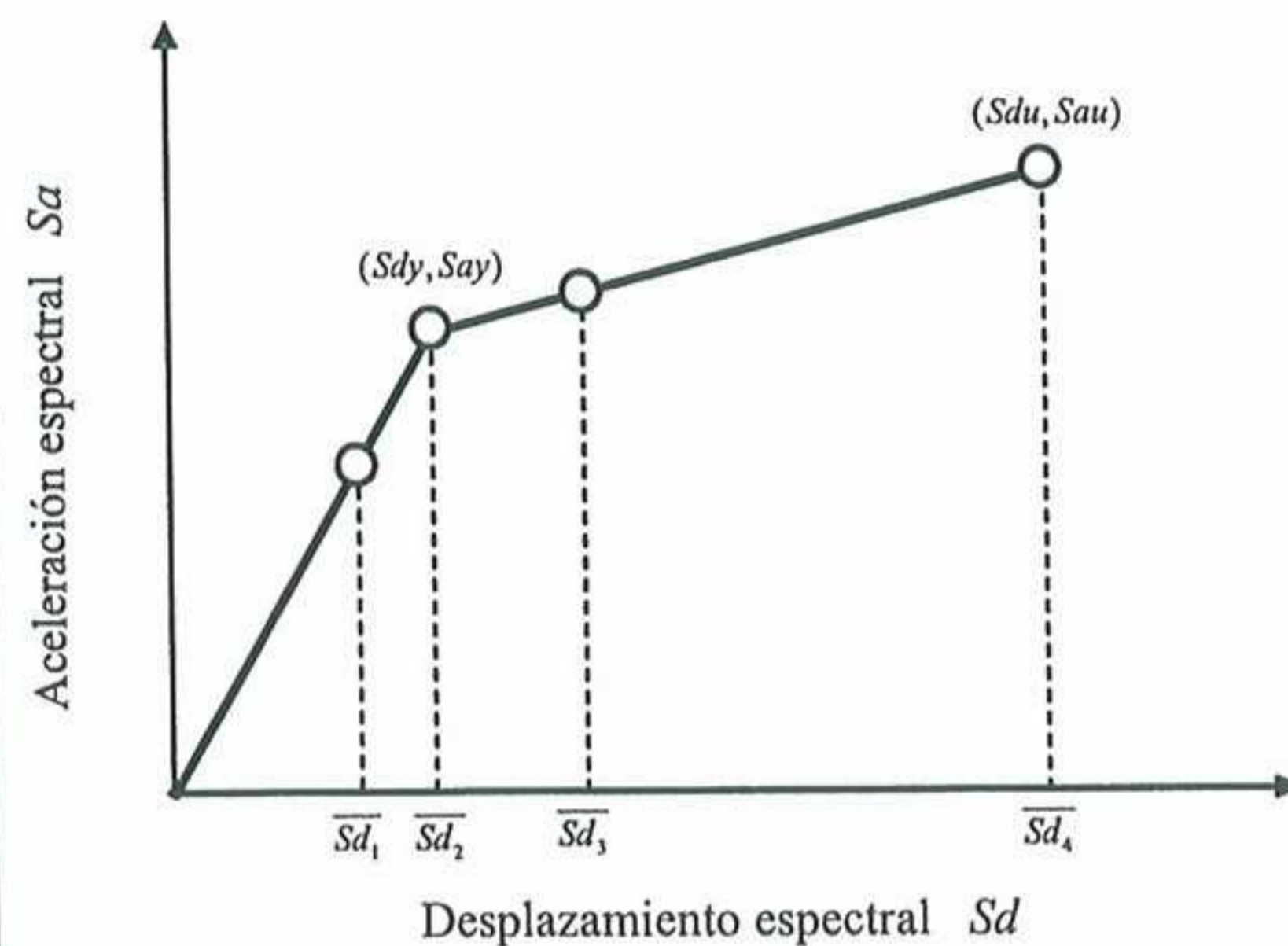


Figura 5. Umbrales de los estados de daño.

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

De esta forma, para cada edificio definido por su espectro de capacidad, se obtienen las curvas de fragilidad. El problema de la estimación de la matriz de probabilidad de daño correspondiente a un escenario sísmico o terremoto concreto se reduce ahora a obtener el desplazamiento espectral esperado, que permite entrar en las curvas de fragilidad y obtener las probabilidades de cada estado de daño mediante las ecuaciones (13) y (14). El método del espectro de capacidad permite realizar esta estimación mediante la obtención del llamado *punto de prestación* (“*performance point*”) que proporciona el nivel de desplazamiento espectral producido en el edificio por el terremoto del escenario considerado (Fajfar, 2002; Fajfar y Gaspersic 1996). El ATC-40 (1996) proporciona tres métodos para determinar este punto y Milutinovic y Trendafiloski (2003) explican, paso a paso, la aplicación de estos métodos. Todos ellos tienen en cuenta el comportamiento no lineal de los edificios cuando se hallan sometidos a fuerzas severas que producen la incursión en su comportamiento no elástico y, por lo tanto, requieren la reducción del espectro de respuesta lineal 5% amortiguado.

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

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

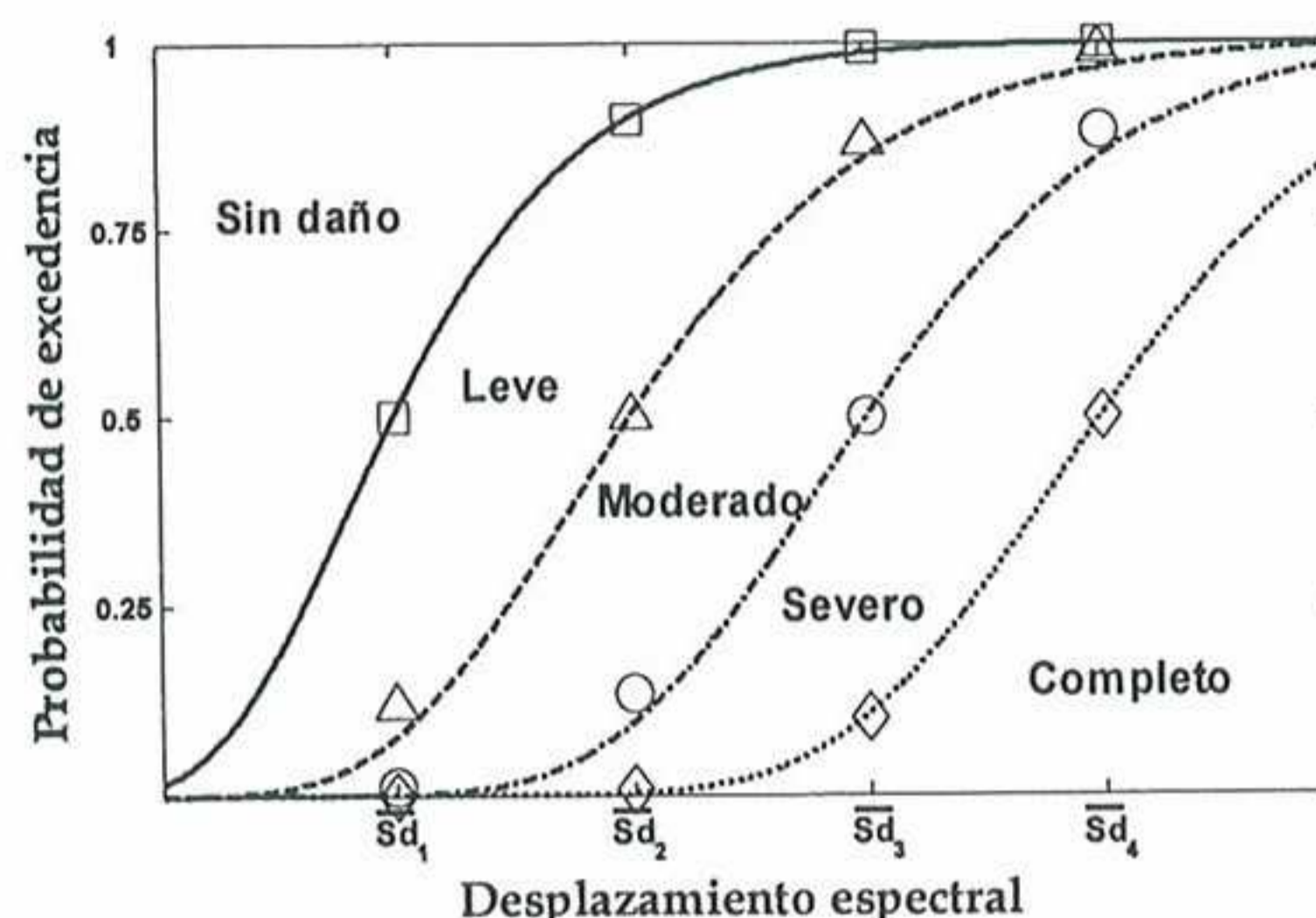


Figura 6. Curvas de fragilidad ajustadas a los puntos de la Tabla 3.

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

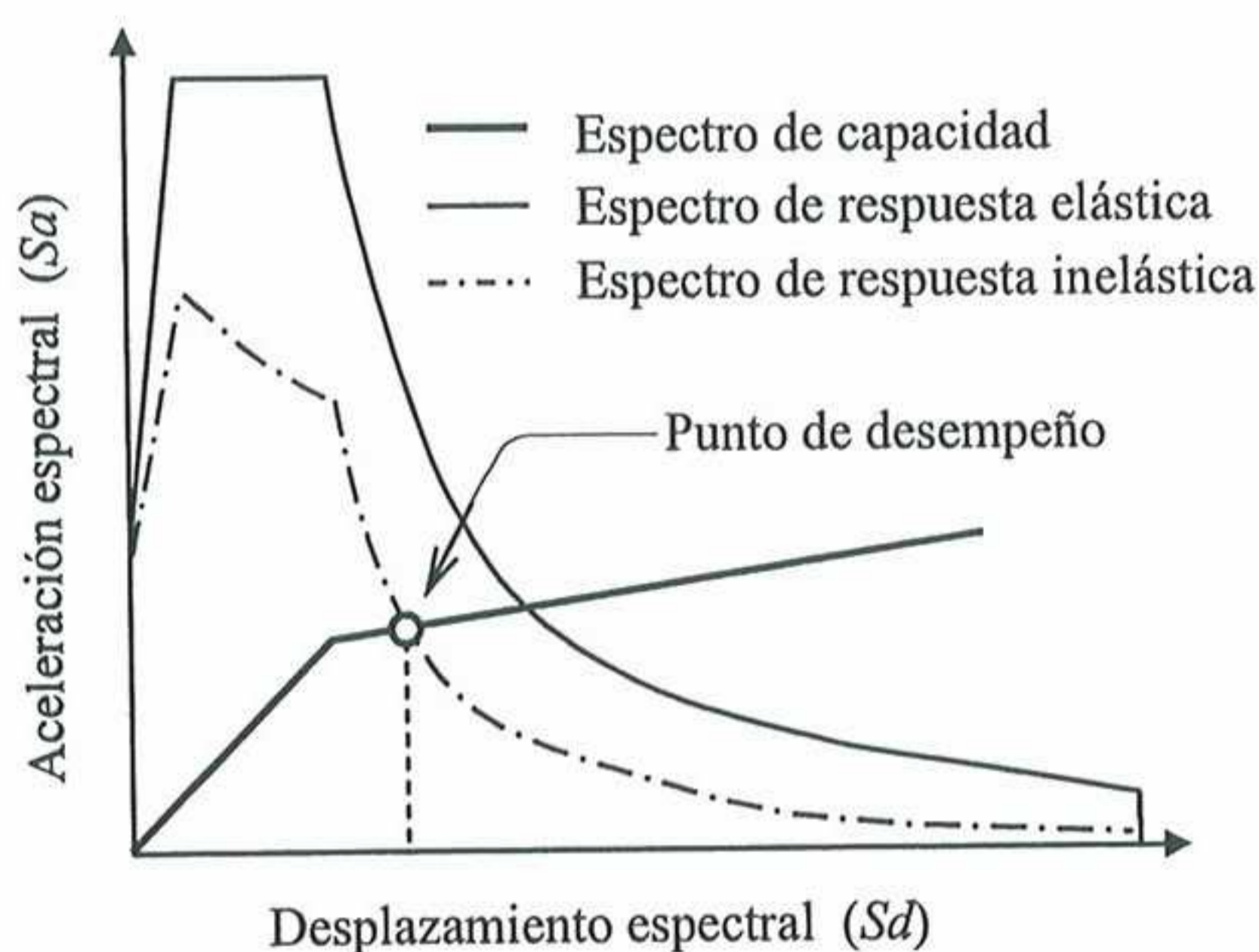


Figura 7. Ejemplo de cálculo del punto de prestación que define la respuesta máxima del edificio para la acción sísmica mediante el espectro de respuesta. También se obtiene el espectro de demanda o espectro de respuesta inelástica.

En resumen, en el *método del índice de vulnerabilidad*, la acción se cuantifica mediante la intensidad macrosísmica y el edificio mediante un índice de vulnerabilidad; el ajuste de funciones semiempíricas permiten establecer la relación que predice el grado de daño medio esperado en el edificio cuando ocurre el terremoto. La hipótesis de

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

6 EVALUACIÓN DE OTROS RIESGOS

6.1 La percepción del riesgo y el riesgo aceptable

La evaluación del riesgo en las zonas urbanas es muy importante y condiciona el riesgo total de una región o de un país. Dicha evaluación es especialmente crítica en aquellas zonas donde las ciudades siguen creciendo a ritmos acelerados y la planificación de ese crecimiento es superada por la realidad, aumentando el riesgo. Las estructuras que se encuentran en estas zonas pueden estar sometidas a fenómenos naturales tales como grandes huracanes, terremotos, inundaciones, enormes deslizamientos y flujos de escombros, inundaciones, etc. En tales condiciones se produzcan graves daños a las personas, bienes e infraestructura y las pérdidas pueden llegar a afectar de forma muy severa el desarrollo económico y social de regiones o países enteros que posteriormente tardan muchos años en recuperarse (Cardona y Barbat 2000).

Dadas las condiciones dinámicas del riesgo, la sociedad requiere mecanismos diferenciados para gestionar los distintos riesgos que existen o que pueden llegar a existir (Lavell 2000). Identificar y estimar el riesgo de los elementos expuestos y analizar su origen y evolución a lo largo del tiempo, permite priorizar el tipo de medidas para su reducción mediante acciones de intervención y planificación. Metodológicamente, es la identificación y análisis de la vulnerabilidad la herramienta adecuada para reducir el riesgo, que se aplica a partir de técnicas de monitoreo y que facilita la utilización de técnicas de planificación realistas, en forma dinámica, ajustadas a los cambios producidos como consecuencia de los procesos de intervención o debidos a nuevos factores o sorpresas del entorno natural.

En una política de gestión de riesgos existen diferentes áreas de intervención que se deben considerar. En todo caso se debe partir de un buen conocimiento de la dinámica, la incidencia, la causalidad y la naturaleza de los factores de riesgo, amenazas y vulnerabilidades y, a partir de esto, construir escenarios dinámicos de riesgo para las distintas regiones. Entre las acciones de reducción de las condiciones de riesgo *existentes* pueden mencionarse los mecanismos de reordenamiento territorial, de reasentamiento humano, de recuperación y control ambiental, así como el refuerzo de estructuras, la construcción de infraestructura de protección ambiental, la diversificación de estructuras productivas, el fortalecimiento de los niveles organizacionales, etc.

Muchas ciudades están construidas en sitios propensos a desastres debido a tres razones principales:

- 1) *Las ciudades se fundaron en lugares peligrosos* porque en esa época las ventajas del sitio valían más que los riesgos. La aparición de muchas ciudades en valles con ríos o deltas propensos a inundarse se vinculaba a la disponibilidad de agua fresca o tierra fértil. Otras ciudades se establecieron en las costas o cerca de los ríos debido a la importancia económica, política y militar de los puertos y del transporte acuático.
- 2) *El desarrollo de las ciudades no estaba conducido por una cultura del riesgo.* Se realizaban modificaciones masivas del sitio natural, sin medidas que minimicen el riesgo. La explotación de los bosques y suelos puede trastornar el régimen de las cuencas y aumentan las inundaciones. La expansión de las áreas para construir incrementa los deslizamientos.
- 3) *Las ciudades traspasaron lo que originalmente fueron sitios relativamente seguros.* Muchas de las ciudades más grandes del mundo se fundaron en sitios que originalmente eran seguros y convenientes. Cuando estas ciudades crecieron, la población no pudo ubicarse en áreas seguras.

Desde el punto de vista temporal, los desastres, interpretados como la materialización del riesgo, son graves consecuencias que causan sucesos súbitos, aunque este calificativo depende del contexto. Algunos desastres, provocados por sucesos como terremotos, erupciones volcánicas o accidentes aéreos, podrían calificarse como impactos instantáneos; otros, como los causados por la desertificación, las hambrunas o las guerras, que usualmente tienen efectos más severos en términos demográficos, pueden considerarse impactos prolongados. Los desastres repentinos, impredecibles, producen, en general, un mayor temor y son percibidos como más catastróficos, justamente por que son inesperados y causan sensación. Otro aspecto temporal se relaciona con la frecuencia de los fenómenos. Algunas poblaciones están habituadas a un ambiente propenso, donde la ocurrencia de los sucesos llega a ser casi parte de su estilo de vida, al que llegan a acostumbrarse o adaptarse. En otras poblaciones, ciertos sucesos son tan poco recurrentes que llegan a ser considerados como eventualidades fortuitas.

Desde el punto de vista espacial, el impacto de las amenazas es extremadamente variado. Algunos desastres son aislados y localizados; otros son difusos y dispersos. Por lo tanto, algunos sólo son el resultado de los efectos sobre una población, mientras que otros son lo suficientemente amplios, es decir los daños y las consecuencias del fenómeno cubren varias poblaciones. El área de influencia de un accidente aéreo o de una erupción volcánica, por ejemplo, es considerada generalmente como pequeña y discreta; mientras que una sequía, una hambruna o una epidemia pueden llegar a afectar grandes superficies, incluso de orden continental.

Las experiencias en varios países y la responsabilidad que establecen las leyes condicionan el tipo de estudios de evaluación de la amenaza, de la vulnerabilidad y del riesgo. Aspectos a clarificar en cada zona, y para cualquier amenaza, podrían ser:

- 1) ¿Cómo se define un *evento máximo probable* o un *sismo de diseño*?
- 2) ¿Qué significa alto, medio y bajo en términos de amenaza y riesgo y quién debe decidir dichos calificativos y su respectiva asignación a una zona?

- 3) ¿Qué responsabilidades se asumen cuando se traza una línea divisoria entre dos zonas de amenaza o riesgo consideradas como diferentes para efectos de reglamentación?
- 4) ¿Cómo se debe pesar la posibilidad de una falsa alarma con la posibilidad de exponer a una comunidad cuando existen elementos de predicción?
- 5) ¿Qué implica no informar a la población acerca del grado de amenaza o riesgo al cual ella está sometida o simplemente informarle y no proporcionarle las medidas de prevención?
- 6) ¿Qué implica desestimar o sobreestimar una amenaza no por deficiencia en la información sino como consecuencia de la falta de conocimiento?

Aunque parezca ilógico, la sociedad está más preocupada por un evento desastroso que afecte muchas personas que por una serie de sucesos menores que acumulativamente causen daños a un número similar de personas. A este fenómeno social se le conoce como “aversión al riesgo” (Stewart y Melchers 1997). Es decir, la frecuente ocurrencia de un número menor de fatalidades tiende a generar menos aversión que un suceso poco frecuente pero de gran impacto, aunque la suma de sus correspondientes fatalidades sea comparable. Por ejemplo, el número de muertes causadas por accidentes de tránsito supera ampliamente al causado por terremotos, erupciones volcánicas u otros fenómenos. En lo referente a la percepción del riesgo ante ciertos fenómenos naturales o de origen antrópico, usualmente las personas tienen una noción bastante incompleta o fragmentada del mismo. Por esta razón, desde la perspectiva técnica, algunos investigadores consideran inadecuado definir el nivel de riesgo aceptable de un elemento sólo con base en la valoración o percepción de los individuos o de la comunidad en general. Eventos poco probables pero sensacionales tienden a ser percibidos como más peligrosos que eventos más frecuentes y poco reconocidos.

Las normativas de seguridad, los códigos de construcción y las regulaciones del suelo, entre otros, fijan un *riesgo aceptable* al definir unos parámetros mínimos de exigencia para los cuales se debe, por ejemplo, llevar a cabo el diseño de los edificios. Durante la vida útil de los mismos, éstos deben cumplir con seguridad y de manera confiable con la función para la cual se les ha construido. Se incluyen en este caso eventualidades o fuerzas extraordinarias, como las causadas por terremotos, lo que implica estimar ante qué severidad del fenómeno natural y con qué características estructurales debe realizarse el proyecto. Los niveles de severidad exigidos en los códigos de construcción están asociados con un nivel de riesgo aceptable. Excepto valores cuantitativos proporcionados por algunos cuerpos legislativos del oeste de los Estados Unidos, se puede decir que en la práctica no existen leyes que establezcan un valor de riesgo aceptable en forma directa. El valor correspondiente a una seguridad suficiente se encuentra implícito, de alguna manera, en los reglamentos o normas técnicas derivadas de una ley marco. También existe la opinión de que es necesario que el nivel de riesgo aceptable sea revisado en forma periódica Hall y Wiggins (2000).

6.2 La evaluación del riesgo

Los desastres son un problema en aumento; el impacto de los fenómenos naturales o socio-naturales es cada vez mayor debido a los modelos de desarrollo imperantes en muchos países. Los llamados desastres naturales no son sucesos de la naturaleza *per se* sino más bien el resultado de políticas de desarrollo urbano y regional que no tienen en cuenta la problemática del riesgo y que, en ocasiones, incrementan la vulnerabilidad.

Debido a que no existen criterios unificados para la evaluación de diferentes riesgos, en la actualidad se utilizan metodologías diversas, muchas de ellas altamente cualitativas o de alcance parcial. Por esta razón es más común encontrar estudios de amenazas que de riesgos. Además, dichos estudios de amenaza pueden no ser consistentes con el nivel de resolución posible de aplicar en los estudios de vulnerabilidad. Esta situación ocurre cuando se define el alcance de los estudios de manera unilateral, por parte de profesionales de una sola disciplina como, por ejemplo, la geología, la sismología, la hidrología, etc., sin tener en cuenta la opinión de otros especialistas tales como ingenieros, sociólogos, economistas, planificadores, etc. Muchos estudios de amenaza no contribuyen en forma significativa al análisis de riesgo, debido a que no permiten cuantificar realmente la probabilidad de ocurrencia del fenómeno. Por ejemplo, existen mapas de amenaza volcánica o por deslizamientos, que más bien son mapas de zonificación de depósitos o de susceptibilidad relativa, puesto que no cuantifican la probabilidad de que un suceso específico se manifieste durante un período de tiempo determinado.

A efectos de evaluación, el riesgo específico correspondiente a un elemento expuesto y a una amenaza se puede representar en términos de pérdida de vidas, de personas afectadas o de pérdidas económicas. Debido a la dificultad de estimar el *riesgo total en una región*, es decir, de cuantificar el riesgo específico acumulado *de cada uno de los elementos expuestos y para cada una de las amenazas*, es habitual que se acepte un riesgo específico como representativo para toda la región. Ejemplos de situaciones de este tipo pueden ser: el riesgo por inundación para una cosecha, el riesgo sísmico para un grupo de edificios, el riesgo por deslizamientos para las líneas vitales, etc.

Evaluar pérdidas esperadas en un área y para diferentes amenazas implica importantes incertidumbres, por lo que es usual que se utilicen técnicas probabilistas en su estudio. Cuando los riesgos se expresan en pérdidas medias de dinero o de vidas por año, y se tiene en cuenta que los sucesos de gran intensidad son muy poco frecuentes, las pérdidas medias pueden no dar una imagen representativa de las grandes pérdidas que podrían producirse. A veces se considera que este tipo de situación pone en entredicho el análisis de riesgo, puesto que el riesgo es el producto de un número muy grande –las consecuencias– por un número muy pequeño –la probabilidad–. Esta dificultad puede resolverse determinando, para un valor límite de pérdida, la probabilidad de que dicho valor sea igualad o sobrepasado. Un ejemplo puede ser la probabilidad de que el coste de las reparaciones de los edificios de una zona sobrepase una cifra, digamos de un millón de euros, como consecuencia de por lo menos un suceso en los próximos cincuenta años. Este límite podría también expresarse en términos de víctimas humanas, de número de edificios colapsados o de impacto social en general.

6.2.1 Relación coste-beneficio

Una metodología ampliamente utilizada para la determinación indirecta del nivel de riesgo es el análisis de coste y beneficio, en el cual se relaciona la inversión en seguridad con el daño potencial en las estructuras y el peligro para la vida. Los beneficios anticipados de diferentes programas de protección deben compararse con el coste económico que significa su implementación. Existe un punto de equilibrio a partir del cual no se justifica una mayor protección o prevención, que puede ser utilizado como límite ideal a partir del cual se puede transferir la pérdida a los sistemas de seguros.

En áreas altamente propensas, en donde ocurren con frecuencia sucesos de dimensiones moderadas, cualquier aumento en los costes de prevención-mitigación se

verá compensado por la reducción en los costes de los daños. Sin embargo, en áreas menos propensas o en las que no se han realizado grandes inversiones económicas, los requisitos de reducción de riesgos se pueden justificar sólo en términos de seguridad para la vida. Esto es debido al hecho de que los ahorros esperados en daños por sucesos que ocurren con muy poca frecuencia no son lo suficientemente cuantiosos para justificar un aumento en los costes de la prevención-mitigación. Esta circunstancia habitual en los países pobres, donde el análisis de coste y beneficio en términos económicos no es una buena metodología para argumentar las bondades de la prevención-mitigación. En estos casos, el coste social debe ser el que orienta la toma de decisiones.

Se sabe que la aplicación de medidas preventivas no garantiza una seguridad del 100% de que no se produzcan consecuencias, razón por la cual el riesgo no puede eliminarse totalmente. Su valor, por pequeño que éste sea, nunca será nulo, por lo que siempre existe un límite hasta el cual se considera que el riesgo es controlable y a partir del cual no se justifica económica o socialmente aplicar medidas preventivas. A todo valor que supere dicho límite se le cataloga como riesgo incontrolable. Por ejemplo, las obras de ingeniería que se realizan para controlar ciertos fenómenos, siempre han sido proyectadas para soportar sucesos cuya probabilidad de ocurrencia se considera lo suficientemente baja para que la obra sea eficiente en la gran mayoría de los casos, es decir, para los sucesos más frecuentes. Esto significa que se admite que pueden ocurrir sucesos poco probables que podrían no ser controlados y para los que resultaría injustificado realizar inversiones mayores.

El alcance de los estudios y el tipo de metodología para la evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo dependen de:

- a) La escala del espacio geográfico involucrado;
- b) El tipo de decisiones de mitigación que se esperan tomar;
- c) La información disponible, factible y justificable de conseguir;
- d) La importancia económica y social de los elementos expuestos; y
- e) La consistencia entre los niveles de resolución posibles de obtener en cada etapa de la evaluación.

Se puede concluir que la naturaleza de los riesgos es muy compleja y su percepción y aceptabilidad depende de muchos factores. El análisis de riesgo no es una *disciplina* sino un *campo de interés* de múltiples especialistas relacionados con la física, la ingeniería, la estadística, la economía, los aspectos sociales y la planificación, entre otros. No obstante, no existe una teoría unificada del análisis del riesgo, que realice una modelización integral del riesgo y que, además, facilite la toma de decisiones sobre la gestión del riesgo frente a fenómenos peligrosos.

6.2.2 Niveles de seguridad

De manera implícita, en los proyectos de ingeniería ha sido común utilizar un nivel de riesgo aceptable con el fin de lograr un grado de protección y seguridad que justifique una inversión teniendo en cuenta como referencia la vida útil de la obra. Para ello se utilizan factores de seguridad que, en términos probabilistas, cubren razonablemente la incertidumbre en las amenazas, la imprecisión de los modelos analíticos y la aproximación de las hipótesis de análisis.

Se han llevado a cabo muchos estudios para evaluar cual es el nivel de riesgo que puede considerarse como "razonable", "factible" o "aceptable". Estadísticas de mortalidad realizadas por Kletz (1982) indican que una persona corre el mismo riesgo de

morir en las siguientes situaciones: recorriendo 6500 km en automóvil, fumando 100 cigarrillos diarios, haciendo alpinismo durante dos horas, trabajando en la industria química durante un año, o siendo simplemente una persona de sesenta años durante treinta y seis horas. En el pasado, se ha considerado que un riesgo aceptable de desastres es razonable si no supera el rango entre 1 y 0.01 víctimas por millón de personas expuestas anualmente (Starr 1969). Algunos países han utilizado criterios de este tipo para definir el nivel de seguridad que deben ofrecer ciertas estructuras, por ejemplo las presas, ante las amenazas a las que están expuestas.

Diversos investigadores han estudiado el nivel de seguridad y fiabilidad en los códigos de construcción utilizando métodos estadísticos (Cornell 1969; Hasofer y Lind 1974; Galambos et al. 1986; Galambos 1992). Estos autores han definido el margen de seguridad, Y , como la diferencia entre la resistencia (capacidad) de un elemento y la carga aplicada sobre el (demanda). La relación entre el valor medio de Y y su desviación estándar ha sido denominada índice de fiabilidad, β . De esta manera, la probabilidad de que cualquier elemento de una estructura sea sobrecargado durante su vida útil es una función de β y de la distribución de Y , donde β proporciona una medida relativa de seguridad. Galambos et al. (1986) encontraron que, en edificios existentes y para cargas no sísmicas, β varía entre 3.0 y 4.0. Si Y obedeciera a una distribución normal, estos valores podrían corresponder a probabilidades de fallo entre $1.3 \cdot 10^{-3}$ y $3.2 \cdot 10^{-5}$ por elemento estructural y para una vida útil de 50 años. Para cargas sísmicas se recomienda un β de 1.75, equivalente a una probabilidad del orden de 0.04 de que el sismo de proyecto supere la carga en un elemento. El valor bajo de β en el caso de cargas sísmicas se debe al alto coste del diseño de un edificio para resistir terremotos sin daño en relación con el correspondiente a otras cargas y a que es posible conseguir un mayor factor seguridad contra el colapso proyectando estructuras dúctiles (Porter et al. 1998).

Existen normas de cálculo y construcción de estructuras menos rigurosas que conducen a costes bajos de construcción pero a valores más altos del daño esperado. Por el contrario, estándares más exigentes reducen el número de víctimas y las pérdidas producidas por diversas amenazas, pero con un mayor coste de construcción. Como consecuencia, es posible enfocar el problema del riesgo a partir de un coste óptimo para su utilización en las normas, evaluando el coste de la construcción más el del daño y de las víctimas como una función del nivel de riesgo deseable Wiggins (1978). El enfoque del coste óptimo para minimizar el riesgo requiere valorar explícitamente el coste de la vida humana. La subjetividad de dicha valoración ha conducido, a veces, a acuerdos institucionales para abstenerse de realizar este tipo de valoraciones.

En resumen, las técnicas de análisis de riesgo basadas en modelos probabilistas han contribuido notablemente a realizar valoraciones consistentes y están implícitamente en numerosas normas. Sin embargo, estas técnicas no son suficientes por sí solas para definir el riesgo y su nivel de aceptabilidad. Aunque se argumente su supuesta objetividad, muchas de las hipótesis de dichas técnicas son igualmente subjetivas, razón por la cual es cuestionable que el riesgo aceptable se determine exclusivamente mediante este enfoque. Una posibilidad razonable de resolver el problema consiste en combinar los resultados de los análisis probabilistas con apreciaciones u otras valoraciones cualitativas sobre la percepción del riesgo. También debe tenerse en cuenta que el nivel del riesgo aceptable no es constante, sino depende la controlabilidad del riesgo y de la distribución de los costes y beneficios asociados a dicho control.

7 APLICACIÓN A LA CIUDAD DE BARCELONA

7.1 Un poco de historia

Lo que da paso al nacimiento de la Barcelona actual es el ensanche por el llano. Entre 1858 y 1868 se derriban las murallas de la ciudad y se inicia el gran proyecto urbanístico para la construcción de la Barcelona moderna, una nueva ciudad abierta e industrial. El *Ensanche* (*l'Eixample*) de Barcelona, fue proyectado por el ingeniero Ildefonso Cerdá (Cerdá, 1968). Este proyecto de expansión de la ciudad permitió unir el núcleo de la ciudad con los pueblos del llano que darán nombre a los distritos y barrios de la ciudad actual. El censo de 1900 establece en 553 000 el número de habitantes de esta ciudad ampliada. Entre 1909 y 1929 Barcelona experimenta una colosal expansión. De los 587 411 habitantes de 1910 se pasa a 1 005 565 en 1930. Entre 1940 y 1960 se produce un considerable crecimiento sostenido y la ciudad gana medio millón de habitantes y se produjo un crecimiento especulativo y desordenado con grandes deficiencias estructurales.

En la actualidad Barcelona está encajada entre *Montjuïc*, *Collserola* y el río *Besós*, que limitan claramente su crecimiento en superficie, dejando, como única alternativa de crecimiento, la reconversión de zonas deprimidas, en desuso o industriales. Los últimos ejemplos de transformación urbanística de la ciudad son la *Vila Olímpica* de 1992 y la apertura al mar de la *Avinguda Diagonal* con el *Forum de las Culturas* en el 2004. El distrito del *Eixample* destaca como la principal área de Barcelona donde se acumula una importante población, una notable actividad económica y un importante patrimonio cultural (García Espuche, 1990; Paricio, 2001). Actualmente, el municipio de Barcelona se extiende en una superficie de 9 907 Ha con una población de 1,5 millones de habitantes según el censo de 2001. La Figura 8 muestra las principales características de la ciudad junto con los diez distritos que la componen en la actualidad.

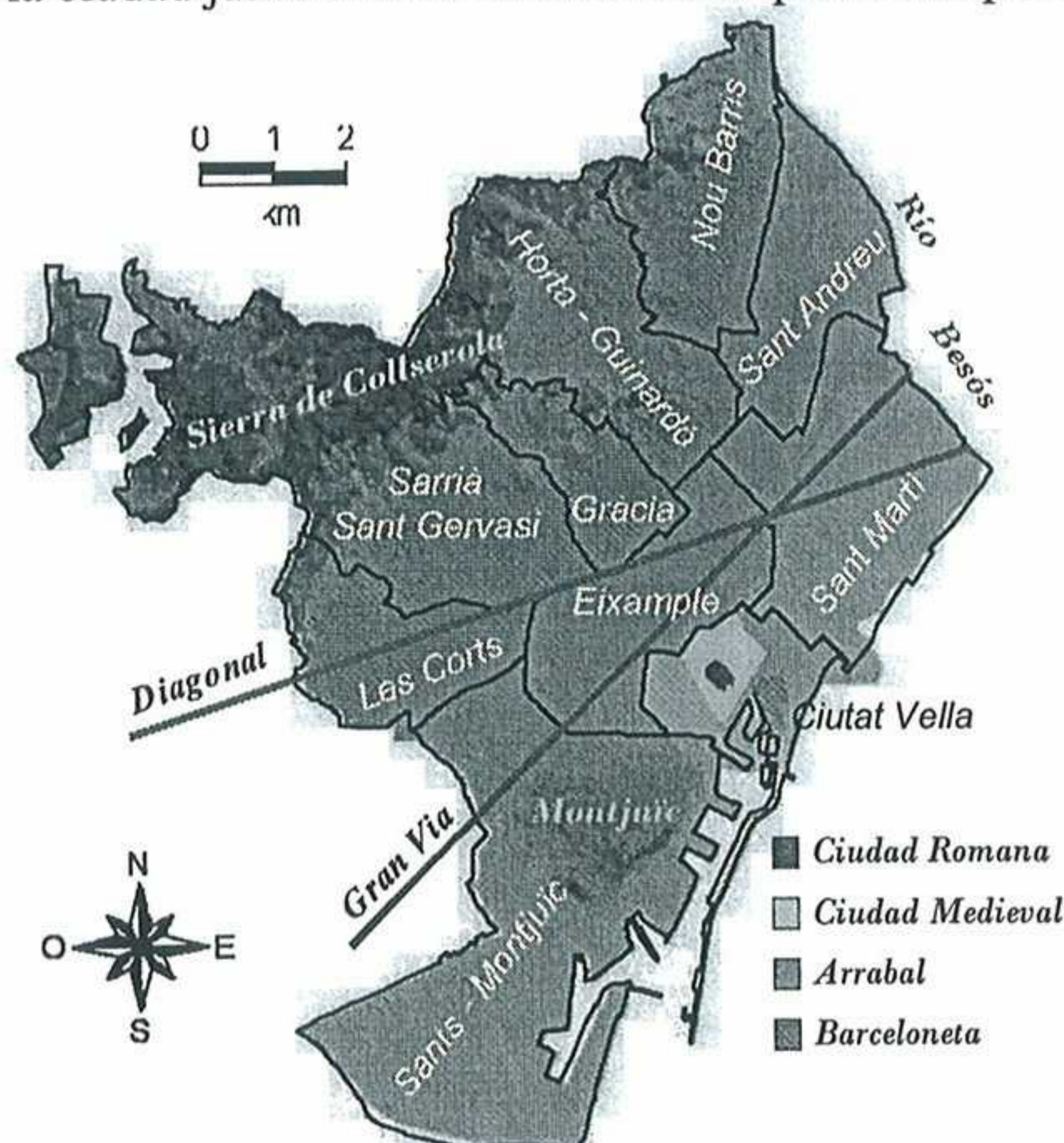


Figura 8. Principales características de la ciudad de Barcelona. Se muestran sus 10 distritos.

7.2 Los datos

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

7.3 Los terremotos: escenarios sísmicos

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

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

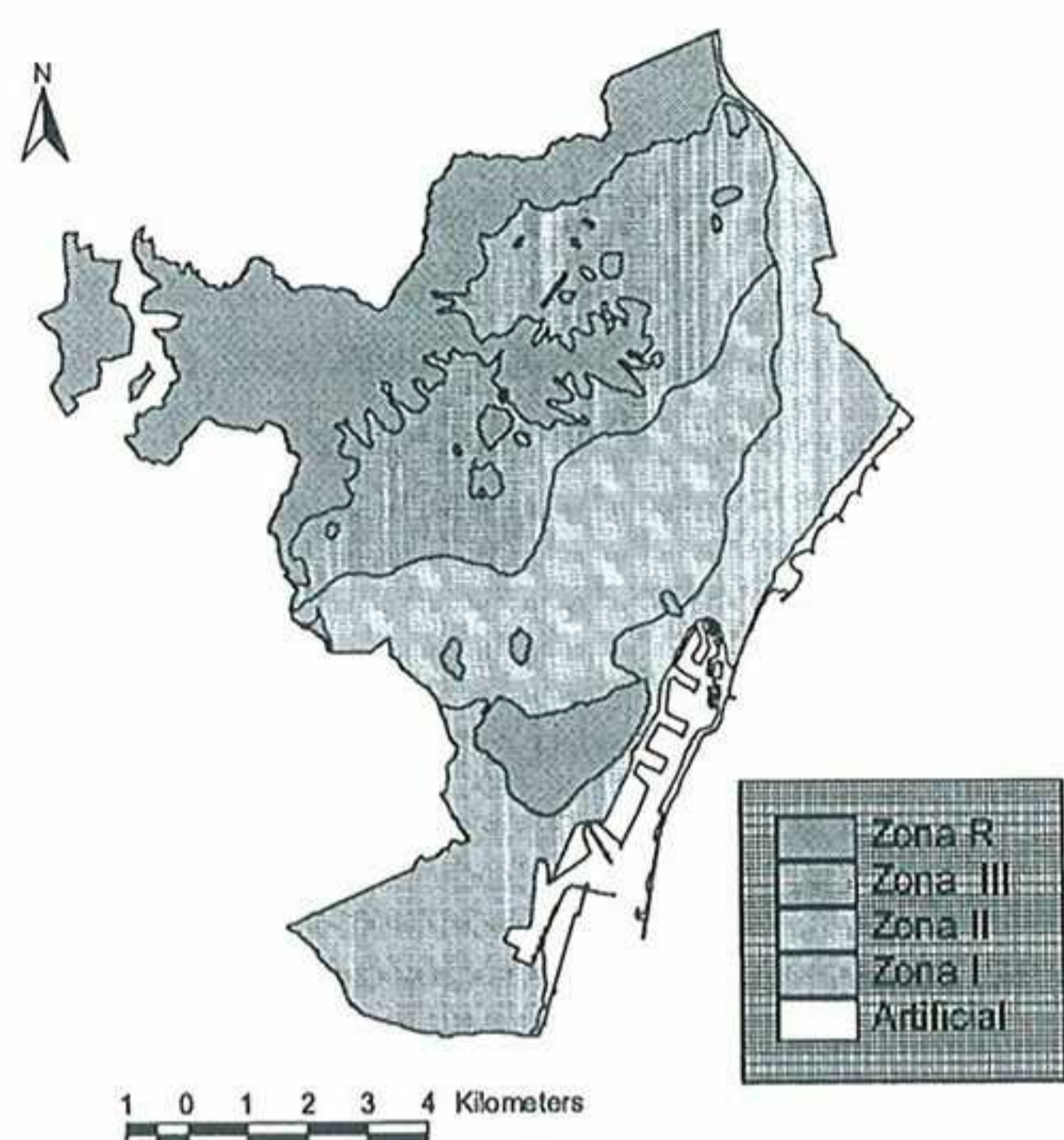


Figura 9. Zonificación sísmica de los suelos de Barcelona (Cid 1998).

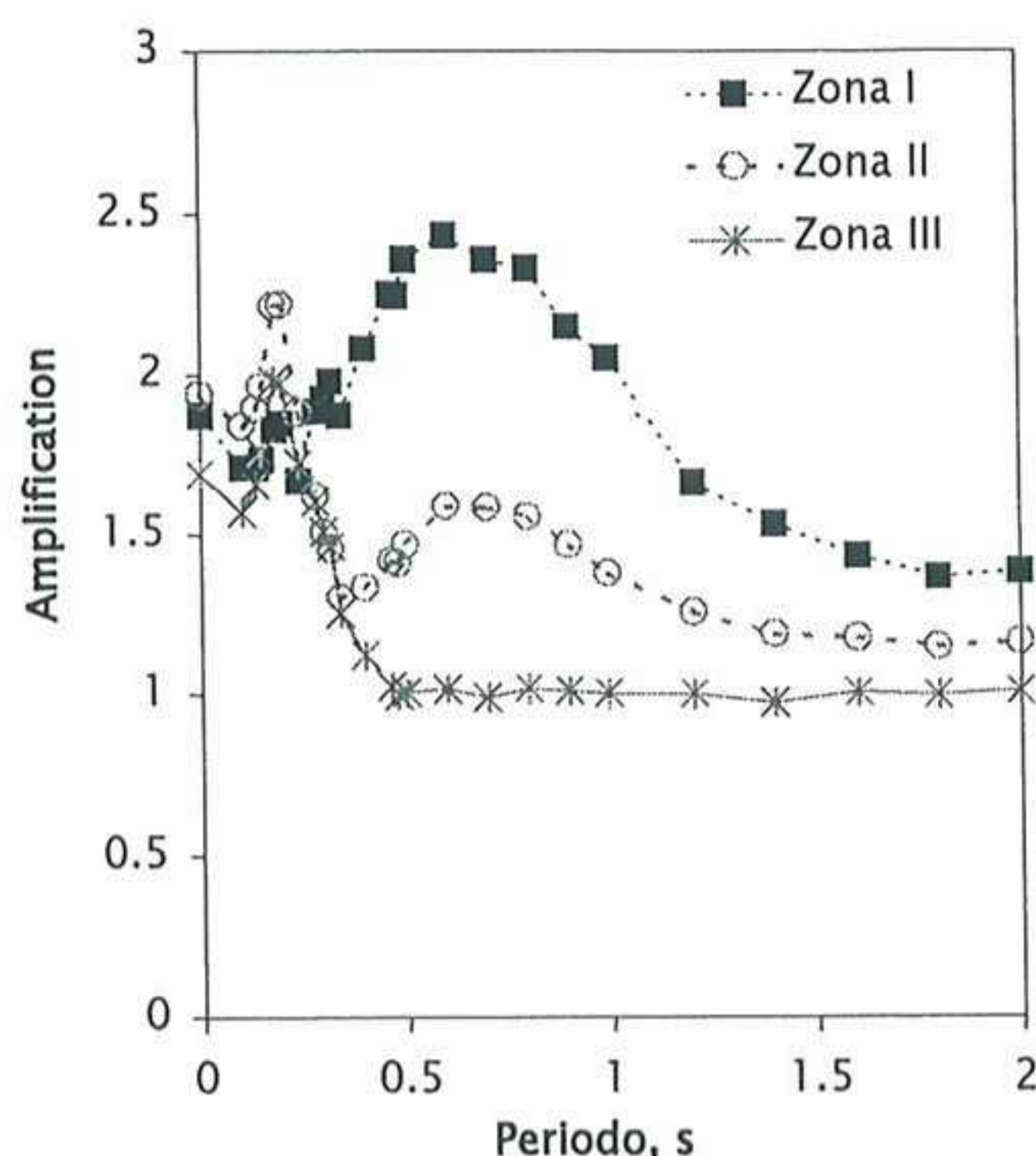


Figura 10. Funciones de amplificación espectral de los suelos de Barcelona (Cid 1998).

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

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

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

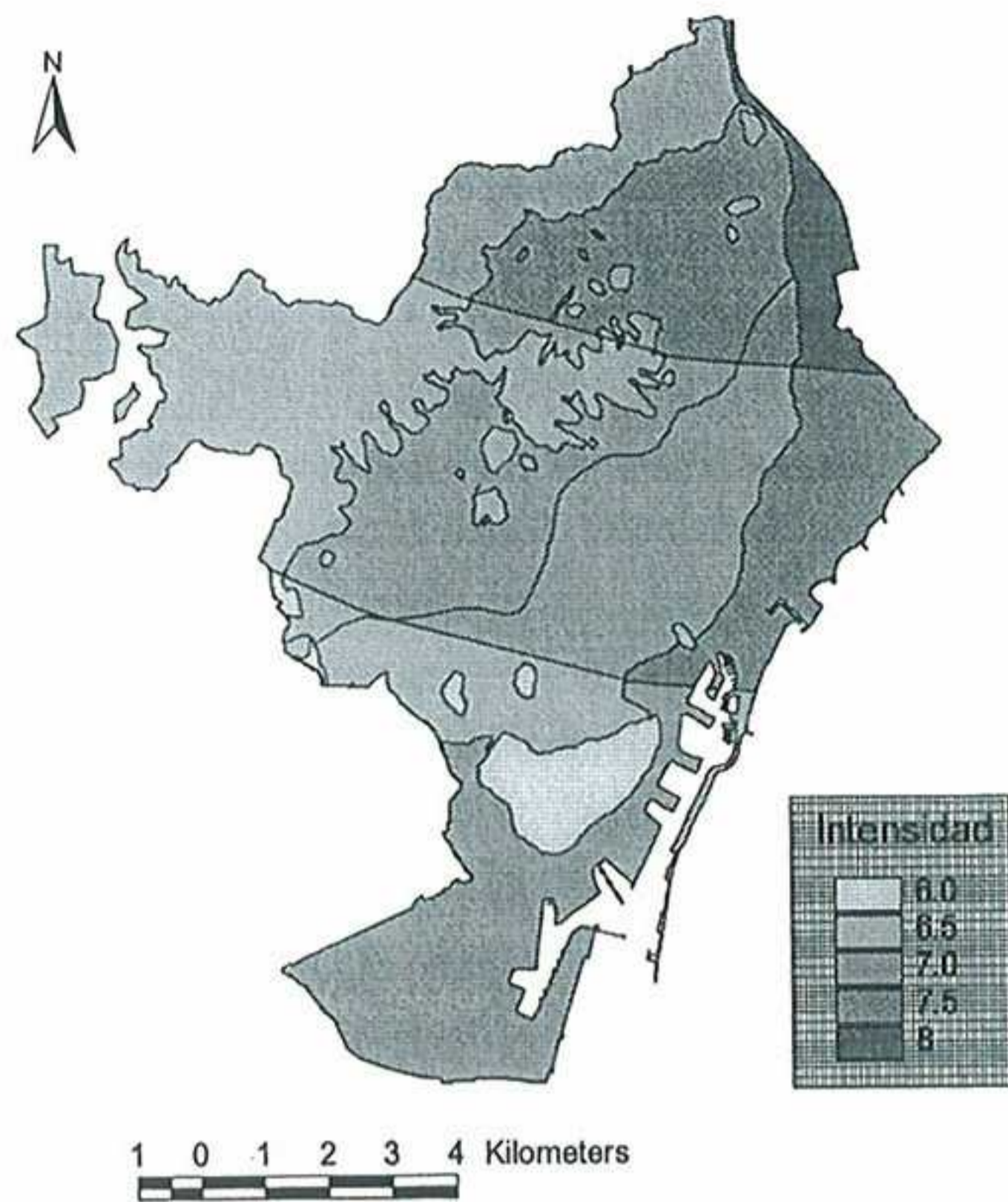


Figura 11. Escenario determinista en términos macrosísmicos.

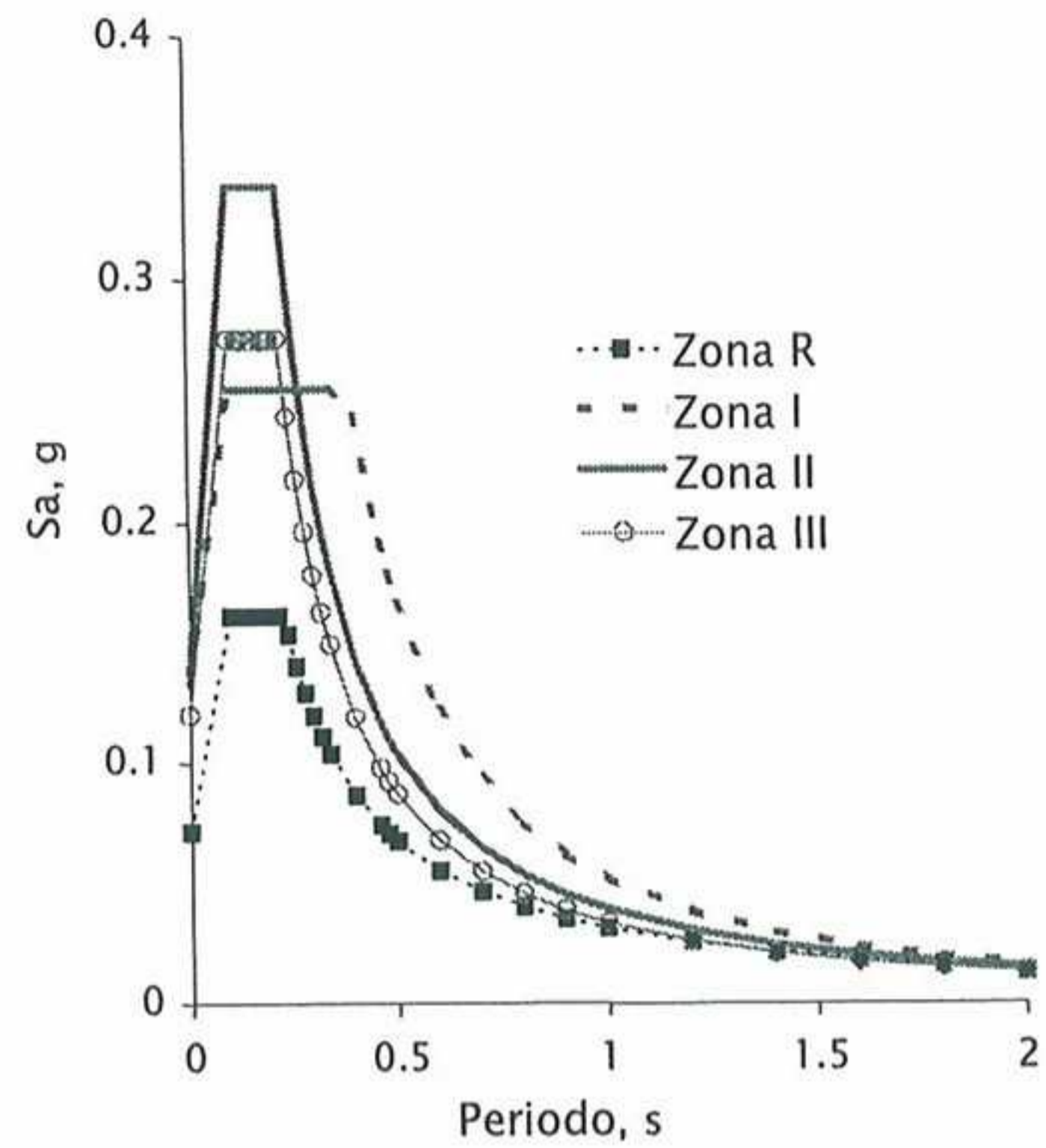


Figura 12. Escenario determinista en términos espectrales.

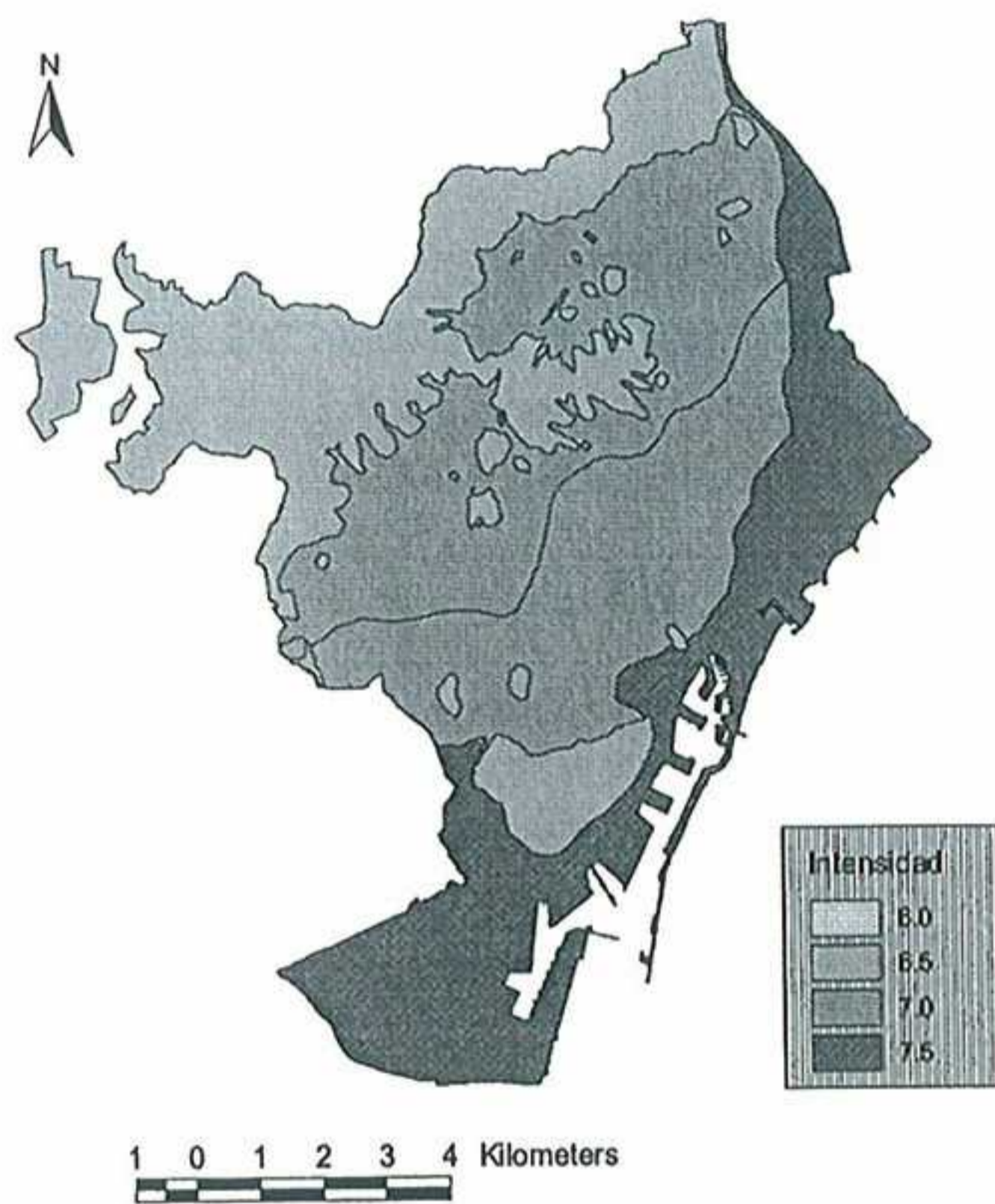


Figura 13. Escenario probabilista en términos macrosísmicos.

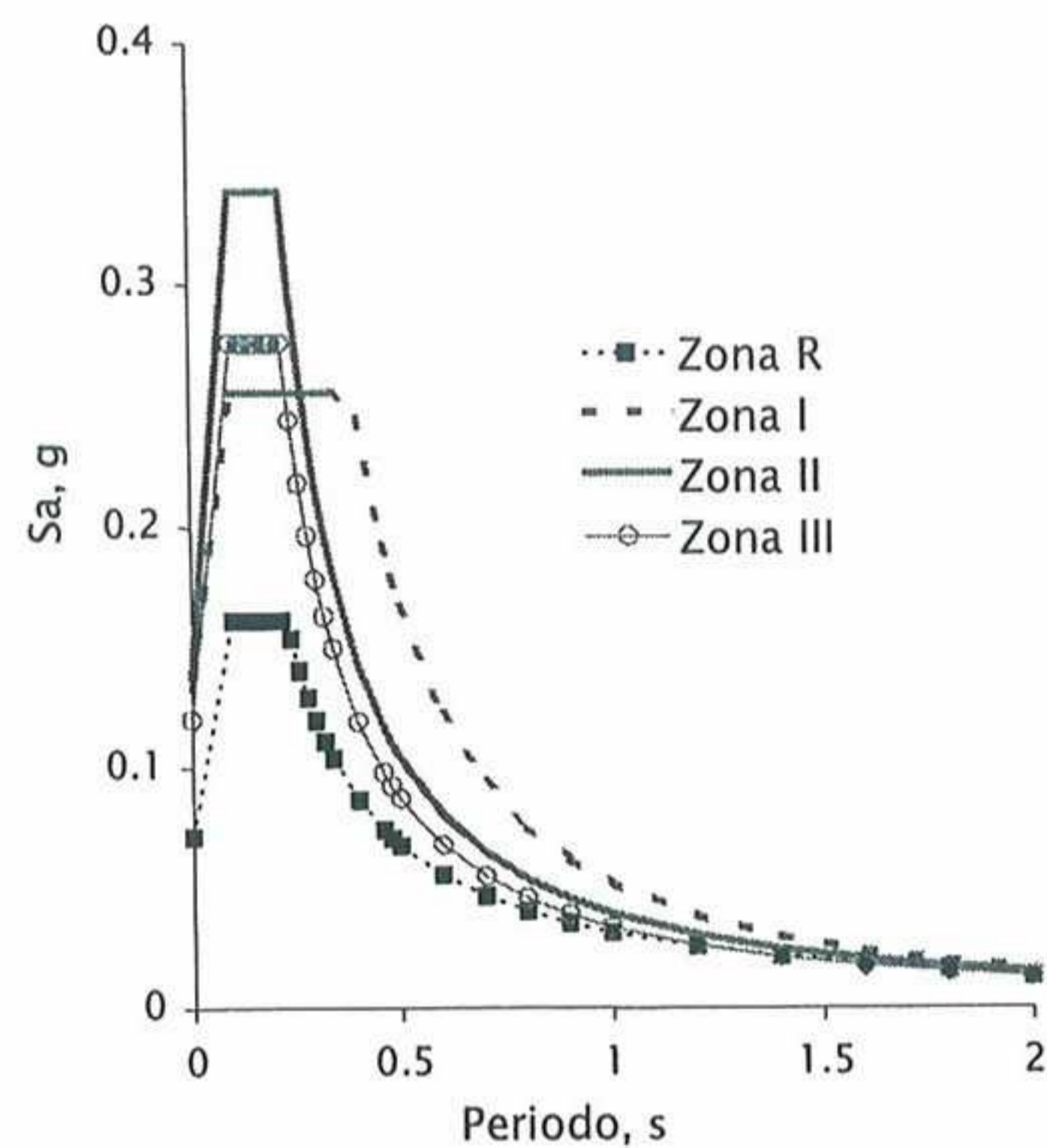


Figura 14. Escenario probabilista en términos espectrales.

7.4 Los edificios

Aproximadamente el 92% de los edificios de viviendas de Barcelona pueden agruparse en dos grandes clases: edificios de mampostería u obra de fábrica de ladrillo y edificios de hormigón armado. Las bases de datos disponibles de los edificios de la ciudad han permitido caracterizarlos tanto mediante un índice de vulnerabilidad (Lantada 2 006) como mediante espectros de capacidad (Bonett 2 003; Bonett *et al.* 2 004; Moreno *et al.* 2 004a,b, Moreno 2 006). Resumimos a continuación los principales resultados obtenidos por estos autores.

7.4.1 Índices de vulnerabilidad

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

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

El índice básico es diferente para las diferentes tipologías constructivas; los modificadores regionales tienen en cuenta las peculiaridades de la región o período de construcción mientras que los modificadores de comportamiento incorporan otros aspectos como, por ejemplo, características geométricas o de posición del edificio que influyen en su comportamiento sísmico. Lantada (2006) describe, detalladamente, el procedimiento de asignación del índice de vulnerabilidad. El modificador regional se fundamenta en la existencia de normativas de diseño sísmico en la fecha de construcción del edificio, penalizando los edificios antiguos construidos sin ninguna conciencia colectiva del peligro sísmico y bonificando los edificios más modernos que, a pesar de que frecuentemente no existía ninguna obligación de diseño sismorresistente, se beneficiaban de mejoras en las prácticas constructivas. Se consideran dos modificadores de comportamiento: modificador de edificio y modificador de posición. El modificador de edificio hace referencia al edificio aislado y cuantifica y puntúa propiedades como el número de plantas, la irregularidad en planta y en altura, la longitud de la fachada y el estado de conservación. El modificador de posición tiene en cuenta otras características del edificio en relación con la manzana o bloque de edificios al que pertenece. Así, por ejemplo, se tiene en cuenta la diferencia de altura entre edificios colindantes y la posición en referencia al conjunto, agregado o manzana a la que pertenece. Concretamente, este modificador penaliza los edificios esquina y los terminales, aumentando su índice de vulnerabilidad respectivamente en 4 y en 6 centésimas, y bonifica los edificios que se hallan en medio de otros dos edificios disminuyendo su índice de vulnerabilidad en 4 centésimas.

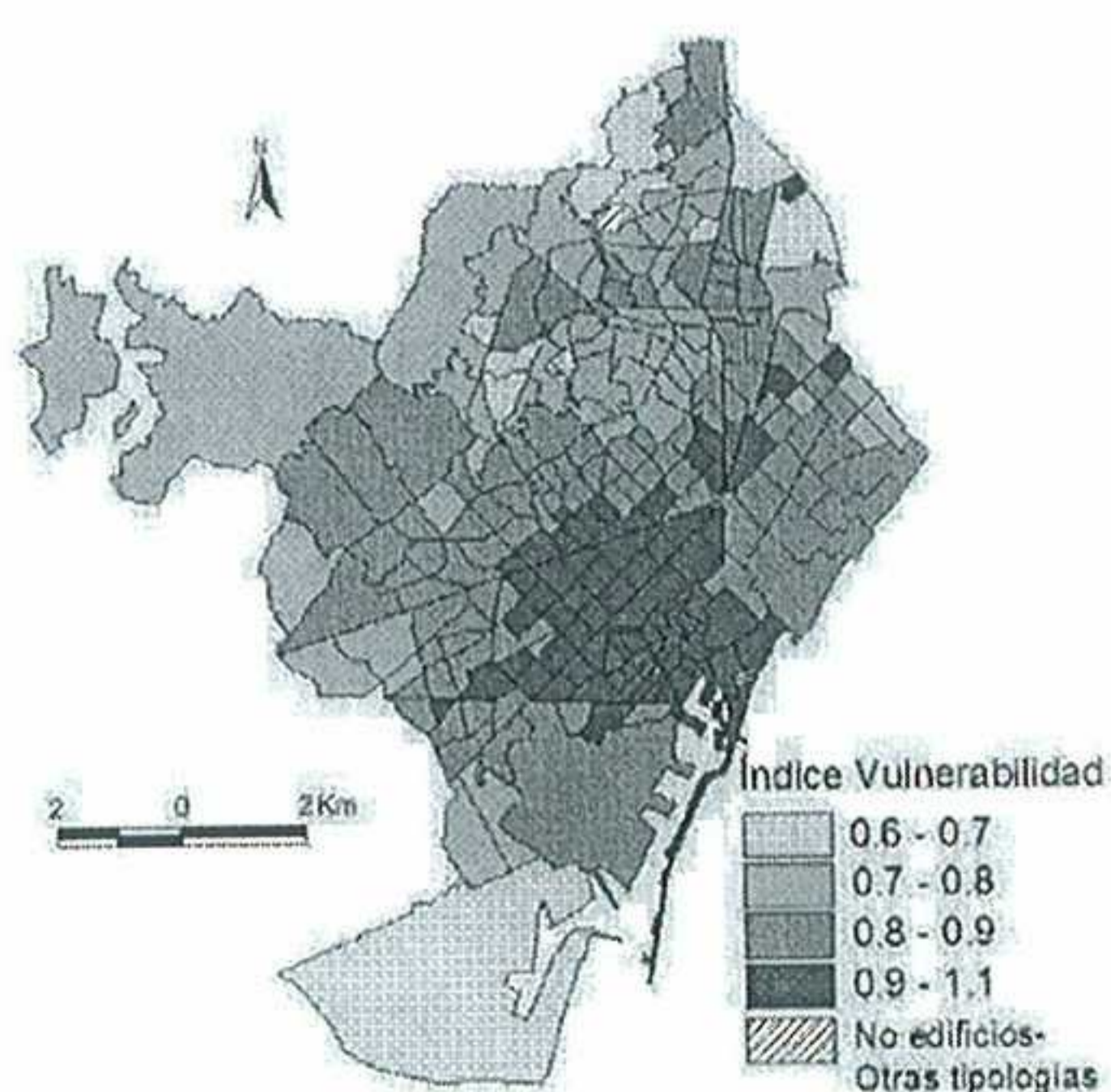


Figura 15. Índices de vulnerabilidad medios para los edificios de mampostería.

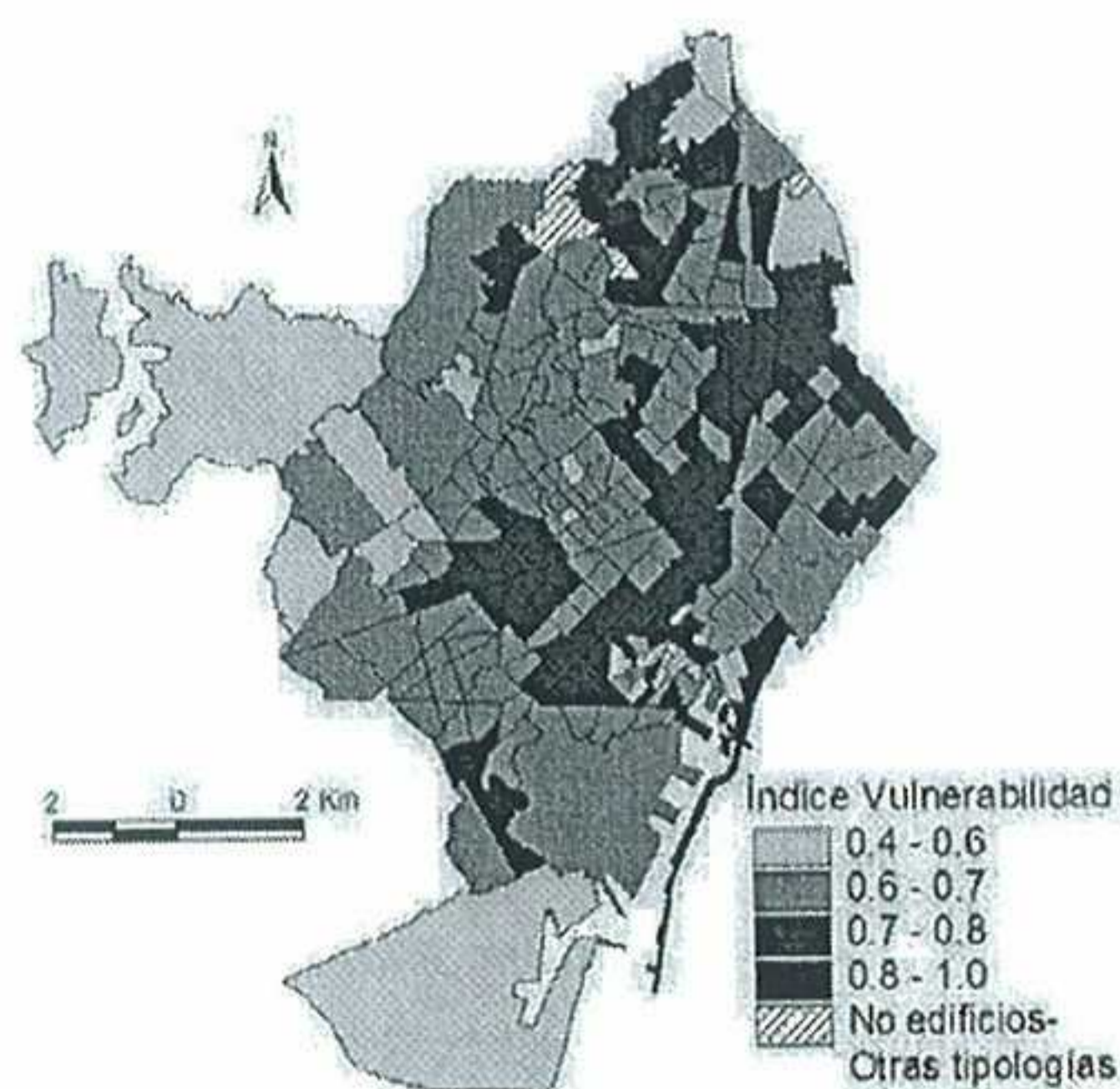


Figura 16. Índices de vulnerabilidad medios para los edificios de hormigón armado.

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

7.4.2 Espectros de capacidad y curvas de fragilidad

Para aplicar el método del espectro de capacidad los edificios se clasifican en altos, medianos y bajos y se han usado planos estructurales y constructivos para el modelado y estudio de su comportamiento dinámico mediante programas de análisis estructural no lineal. Bonett (2 003) obtiene los espectros de capacidad para las tres categorías de edificios de mampostería usando el programa TreMuri (Galasco *et al.* 2 002). La Figura 17 muestra los espectros bilineales de capacidad para los edificios medianos y altos especificando sus características de altura.

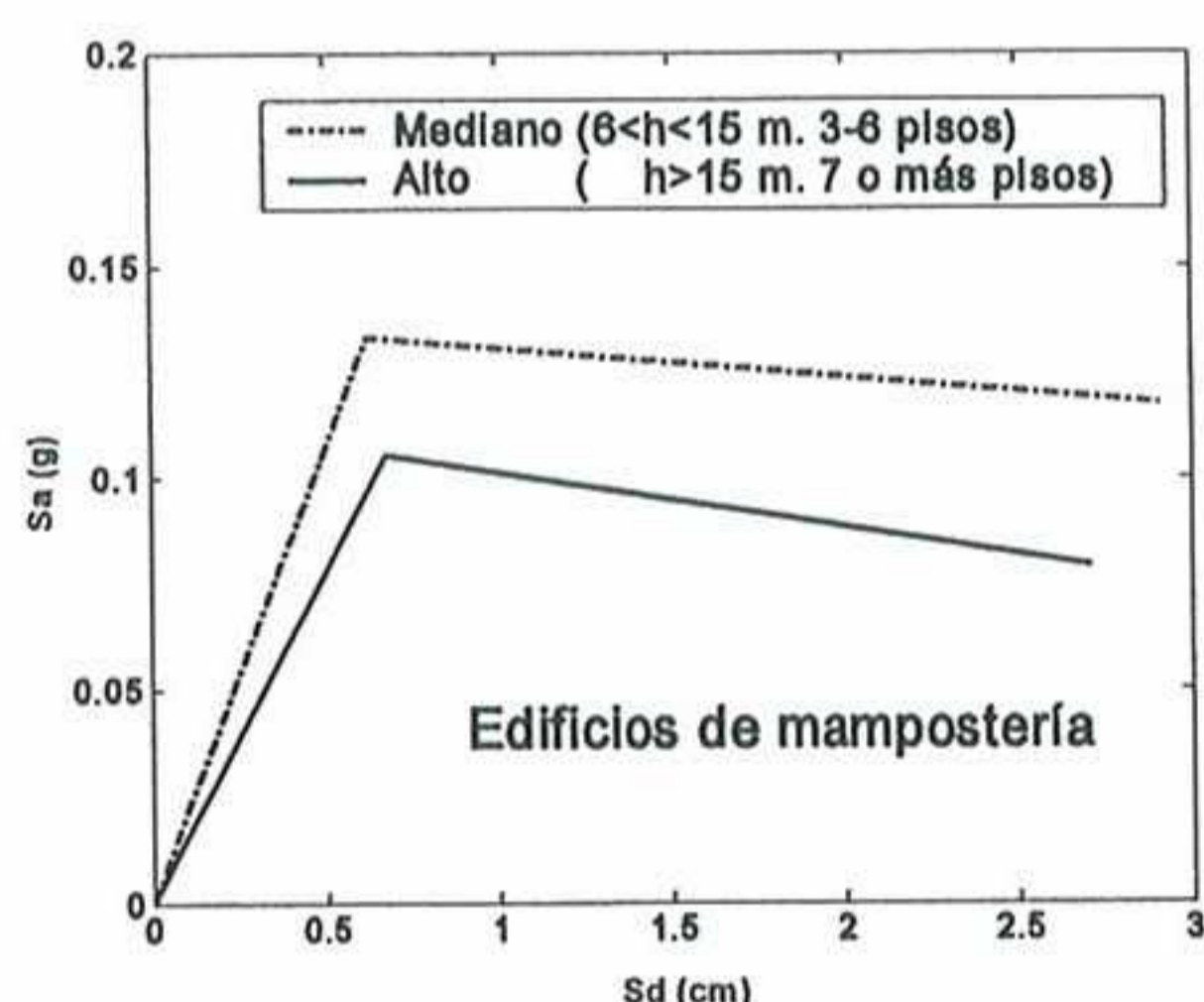


Figura 17. Espectros de capacidad para los edificios de mampostería medianos y altos.

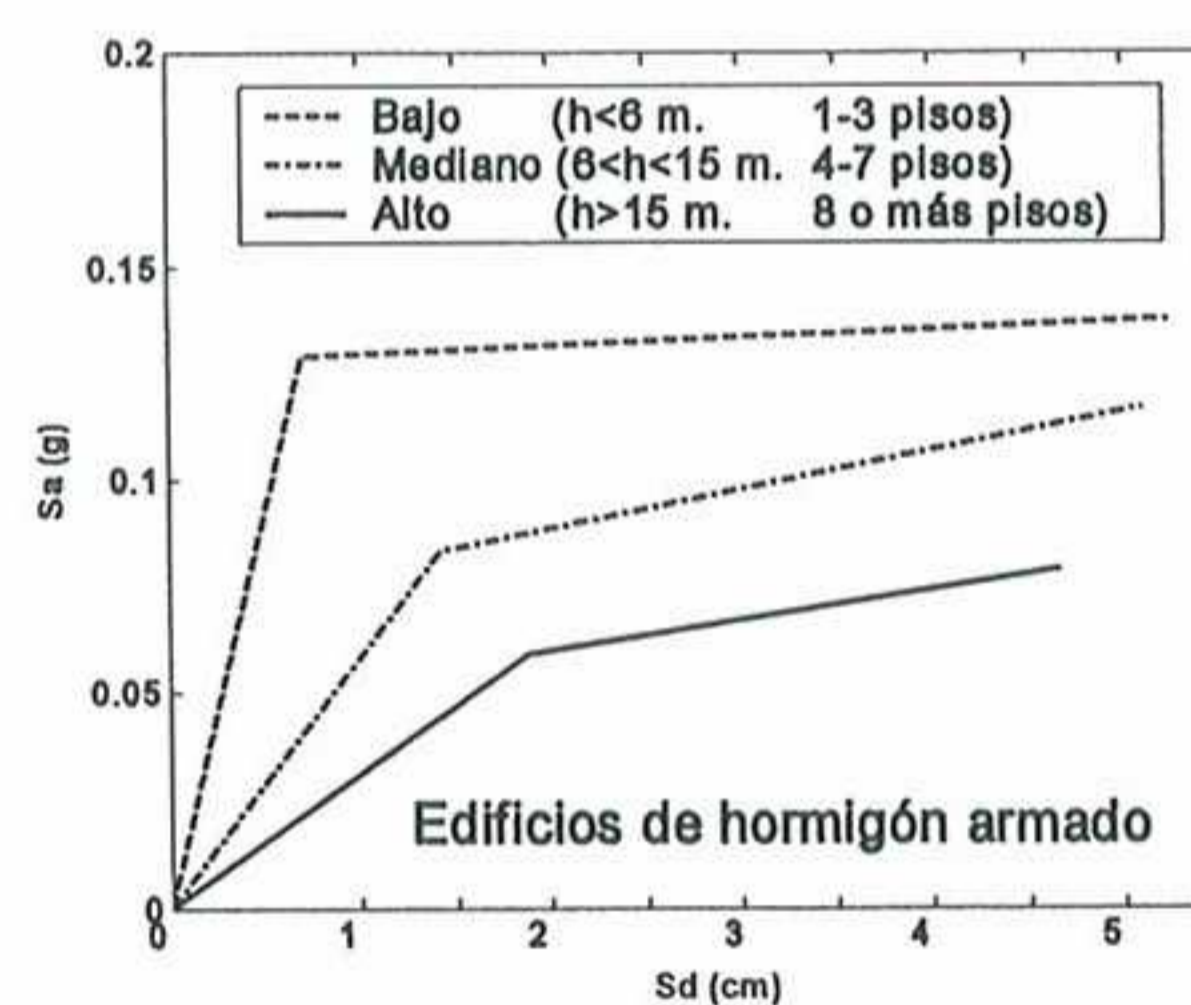


Figura 18. Espectros de capacidad para los edificios de hormigón armado bajos, medianos y altos.

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

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

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

Se observa cómo la capacidad de los edificios de mampostería disminuye con la altura. La Figura 18 muestra las características en altura y los espectros de capacidad de los

edificios de hormigón armado (Moreno *et al.* 2 004 a; Moreno, 2 006), calculados mediante el programa Ruaumoko (Carr 2 000). De nuevo se observa cómo la capacidad disminuye con la altura. A partir de los espectros de capacidad se estiman las curvas de fragilidad mediante el procedimiento descrito en el apartado 0 (ver también Tabla 2 y Tabla 3). La Tabla 4 muestra los parámetros de las curvas de fragilidad para los diferentes tipos de edificios considerados.

7.5 El daño físico directo: escenarios

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

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

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

7.5.1 Método del índice de vulnerabilidad

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

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

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

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

7.5.2 Método del espectro de capacidad

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

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

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

Se observa cómo el daño esperado para un terremoto relativamente pequeño es relativamente alto. Por ejemplo, para el escenario determinista, aproximadamente un 45% de los edificios altos y medianos de mampostería no reforzada localizados en la Zona II sufrirían un estado de daño entre moderado y severo. Para el escenario probabilista los edificios dañados estarían alrededor del 75%. Este hecho confirma la alta vulnerabilidad de este tipo de edificios. Moreno (2006) efectúa un estudio análogo para los edificios de hormigón armado, obteniendo las matrices de probabilidad de daño correspondientes. A partir de estas matrices de probabilidad de daño, se han construido los escenarios de daño físico directo. La Figura 21 muestra el escenario de daño determinista. La Figura 22 muestra el caso probabilista.

El detalle y calidad de la base de datos de los edificios de la ciudad ha permitido analizar la vulnerabilidad y el daño edificio por edificio. Por lo tanto, el sistema de información geográfica utilizado permite obtener mapas detallados de cualquier distrito, barrio o división administrativa a nivel de edificio. Una forma útil de representar el daño es mediante mapas de probabilidad de ocurrencia de un determinado estado de daño. Las figuras 23 y 24 muestran las probabilidades del estado de daño moderado y severo para el escenario determinista y para el distrito más antiguo de la ciudad (*Ciutat*

Vella). La Figura 25 y la Figura 26 muestran las probabilidades de los mismos estados de daño para el distrito más emblemático de Barcelona (*L'Eixample*) donde se acumula una importante actividad económica y una elevada densidad de población.

En el método del índice de vulnerabilidad es extremadamente versátil para caracterizar el comportamiento sísmico de los edificios, dado que permite modular el índice de vulnerabilidad, representativo de la clase, mediante modificadores regionales y de edificio. De esta forma, un mismo tipo de edificio puede recorrer un amplio rango de índices y, por lo tanto, de acuerdo a la escala macrosísmica EMS'98, un amplio rango de vulnerabilidades. La aplicación a grandes núcleos urbanos es rápida y sencilla y permite obtener escenarios robustos cuando se interpretan desde la óptica probabilista.

El método del espectro de capacidad ha sido incorporado por las nuevas metodologías de predicción de daño y de riesgo sísmico en grandes aglomeraciones urbanas. Con todo, requiere una mayor cantidad y calidad de información, tanto en lo que se refiere a la acción sísmica como en lo que se refiere a la caracterización de la fragilidad de los edificios. Para lo primero se requieren datos de aceleración sísmica; para lo segundo se requiere analizar modelos mecánicos de los edificios mediante programas de análisis no lineal de estructuras, para lo que se requieren también importantes simplificaciones. Se trata pues de un método potente pero costoso en tiempo de cálculo y en cantidad y calidad de datos.

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

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

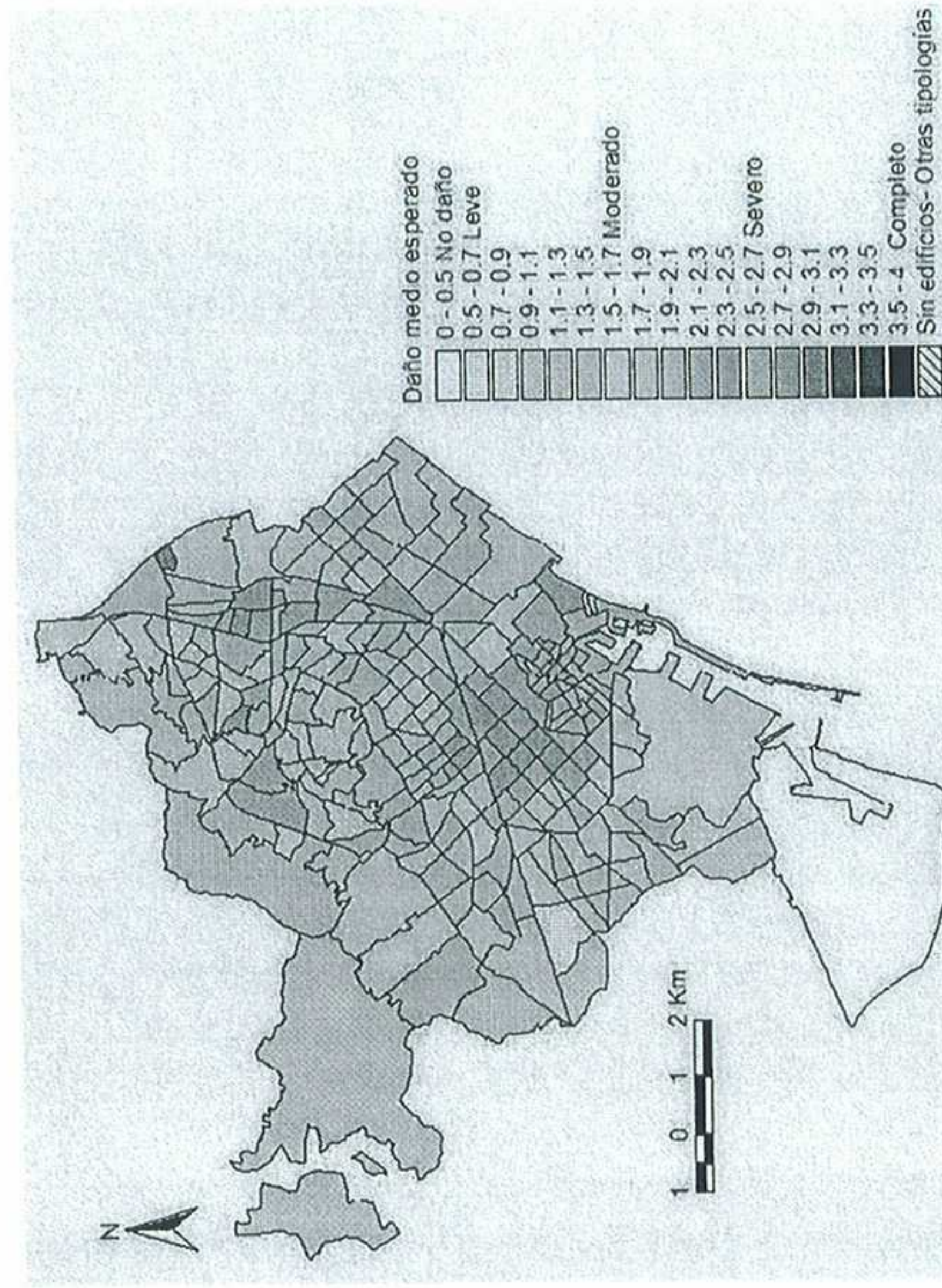


Figura 19. Distribución del grado de daño medio esperado por ZRP para el escenario determinista. Método del índice de vulnerabilidad.

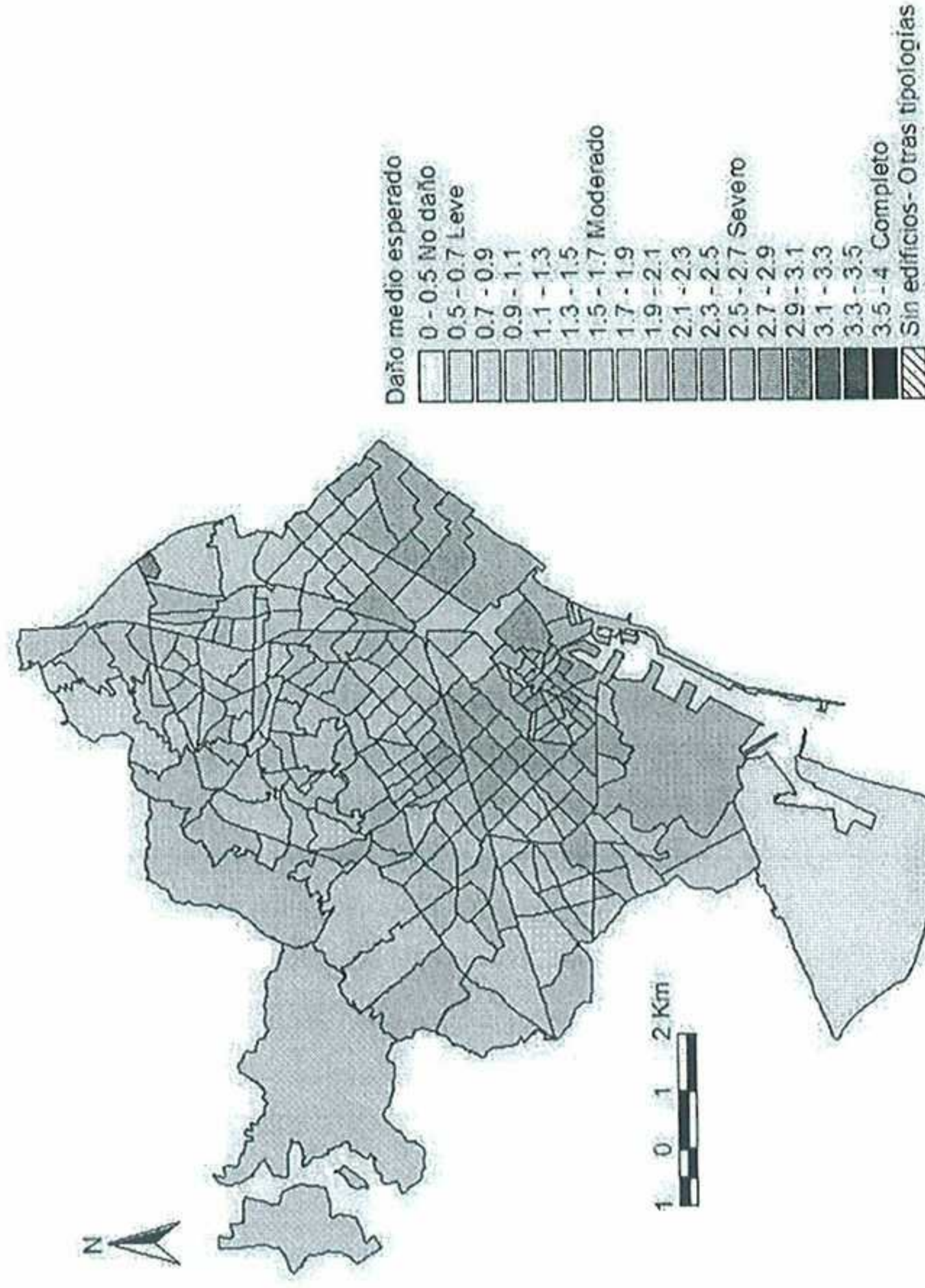


Figura 20. Distribución del grado de daño medio esperado por ZRP para el escenario probabilista. Método del índice de vulnerabilidad.

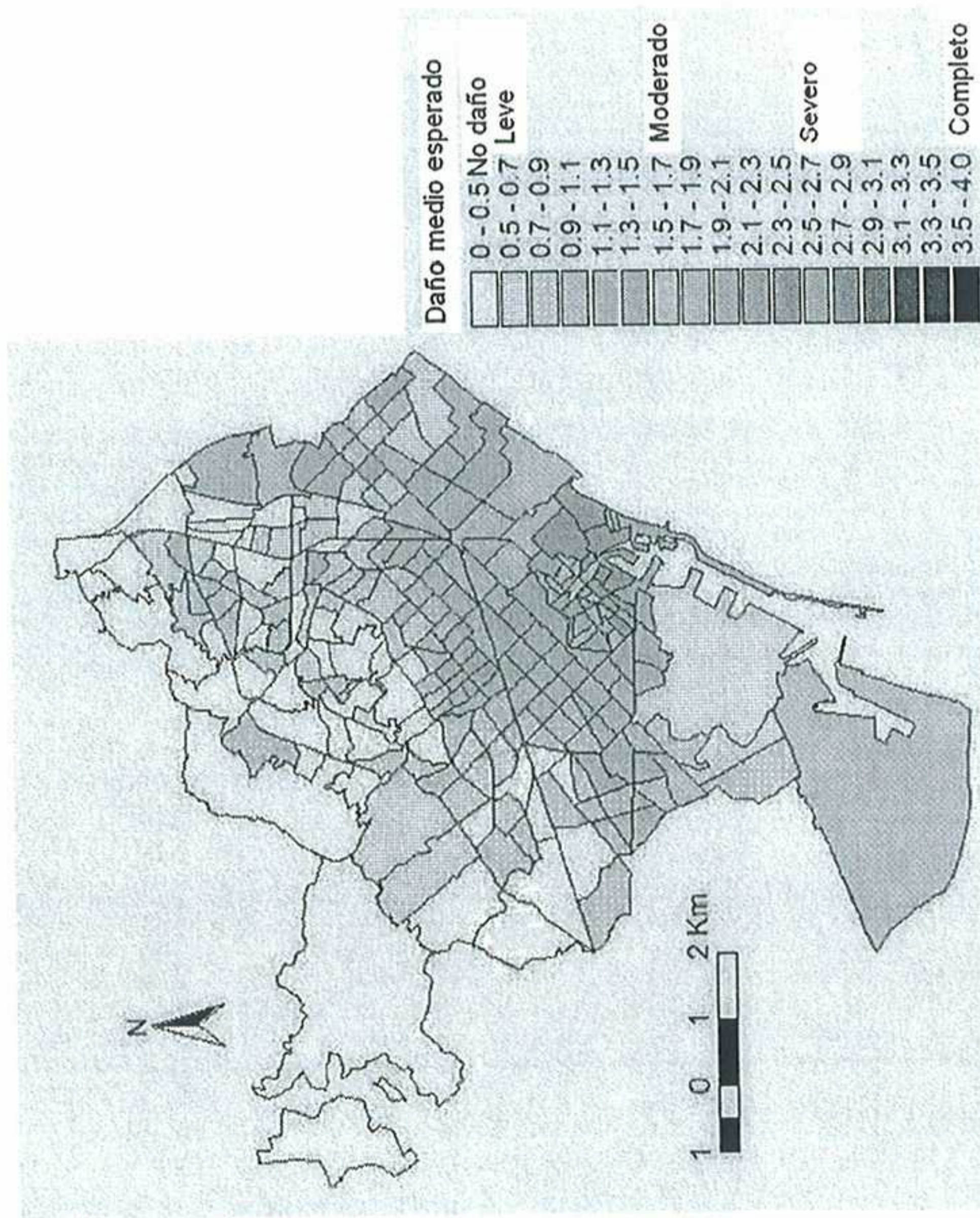


Figura 21. Distribución del grado de daño medio esperado por ZRP para el escenario determinista. Método del espectro de capacidad.

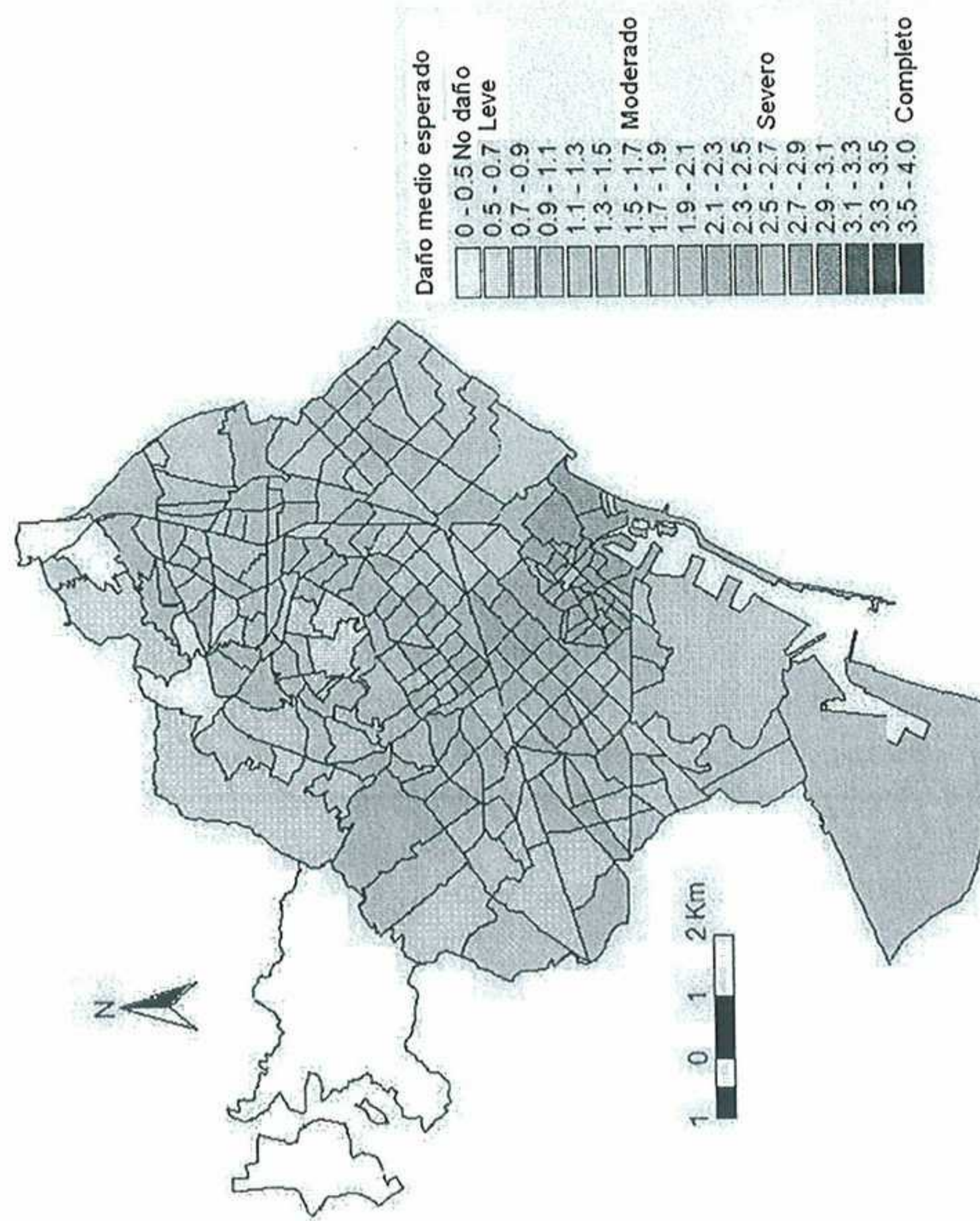


Figura 22. Distribución del grado de daño medio esperado por ZRP para el escenario probabilista. Método del espectro de capacidad.

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

		Escenario determinista					Escenario probabilista						
		Probabilidades de los estados de daño					d^*	Probabilidades de los estados de daños					d^*
Zona		0	1	2	3	4		0	1	2	3	4	
Edificios bajos	I	0,950	0,037	0,011	0,002	0,000	0,066	0.632	0.257	0.095	0.014	0.002	0.498
	II	0,737	0,189	0,063	0,009	0,001	0,349	0.287	0.416	0.249	0.042	0.006	1.065
	III	0,917	0,061	0,018	0,003	0,001	0,109	0.431	0.365	0.173	0.027	0.004	0.807
	R	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0.981	0.013	0.004	0.002	0.000	0.025
Edificios medianos	I	0,003	0,166	0,399	0,353	0,079	2,339	0.000	0.032	0.322	0.453	0.193	2.807
	II	0,121	0,384	0,289	0,189	0,017	1,598	0.007	0.160	0.419	0.347	0.067	2.306
	III	0,273	0,364	0,215	0,139	0,009	1,247	0.029	0.270	0.395	0.271	0.035	2.012
	R	0,623	0,193	0,105	0,076	0,003	0,642	0.109	0.391	0.305	0.181	0.014	1.600
Edificios altos	I	0,003	0,145	0,389	0,371	0,092	2,404	0.000	0.019	0.248	0.464	0.269	2.983
	II	0,135	0,388	0,281	0,178	0,018	1,556	0.002	0.133	0.385	0.381	0.099	2.441
	III	0,307	0,369	0,195	0,120	0,009	1,155	0.014	0.23	0.386	0.307	0.056	2.154
	R	0,647	0,205	0,086	0,059	0,003	0,566	0.632	0.257	0.095	0.014	0.002	0.498

Zonas correspondientes a la Microzonificación sísmica de la ciudad:
 R – Afloramiento rocoso. I – Suelos blandos. II y III – Suelos intermedios.
 Estados de daño: 0-Nulo, 1-Leve, 2-moderado, 3-Severo, 4-Completo.
 d^* es el estado de daño medio o factor central de daño.

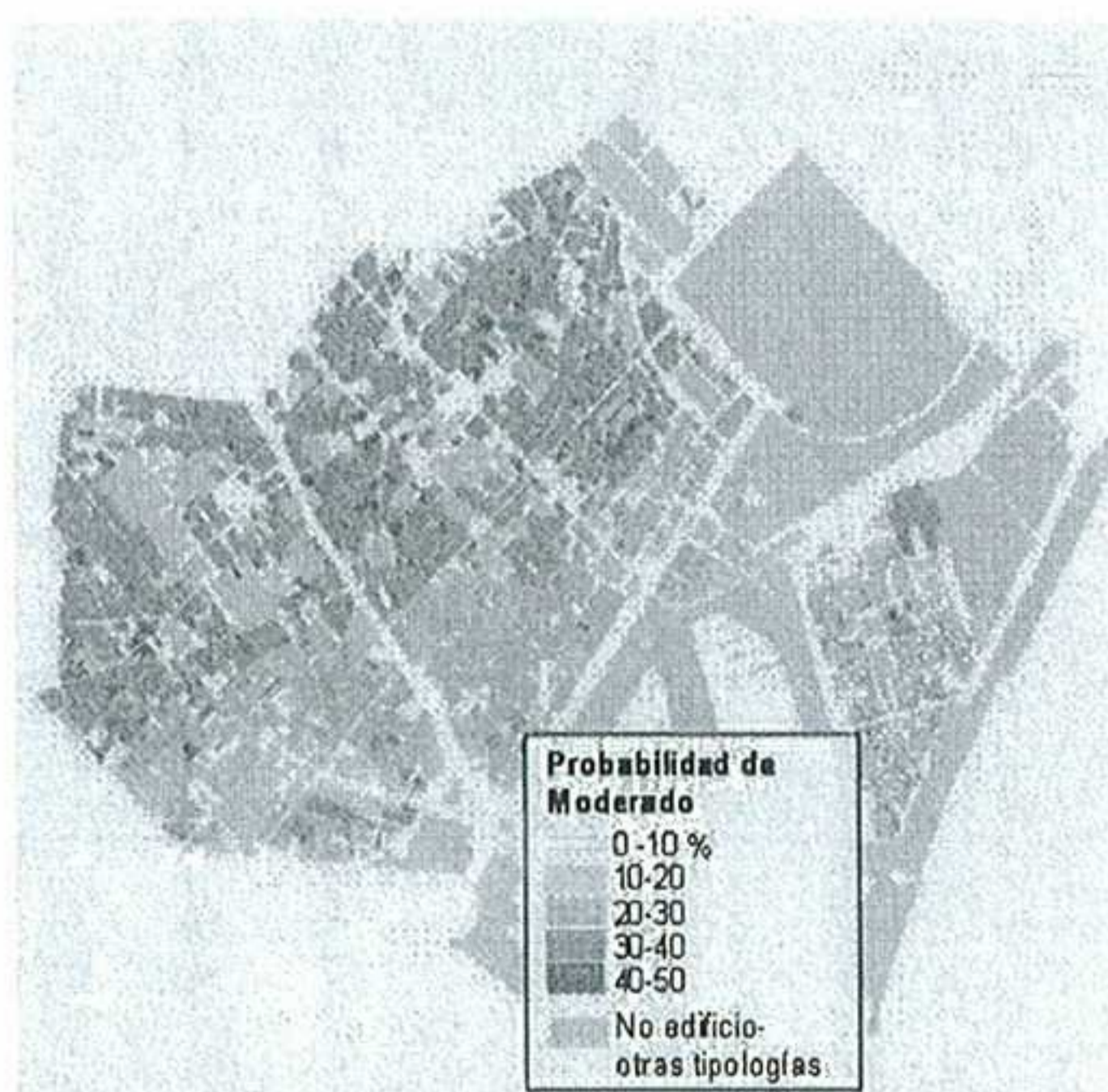


Figura 23. Probabilidad del estado de daño Moderado en el distrito de Ciutat Vella para el escenario determinista y el método del espectro de capacidad.

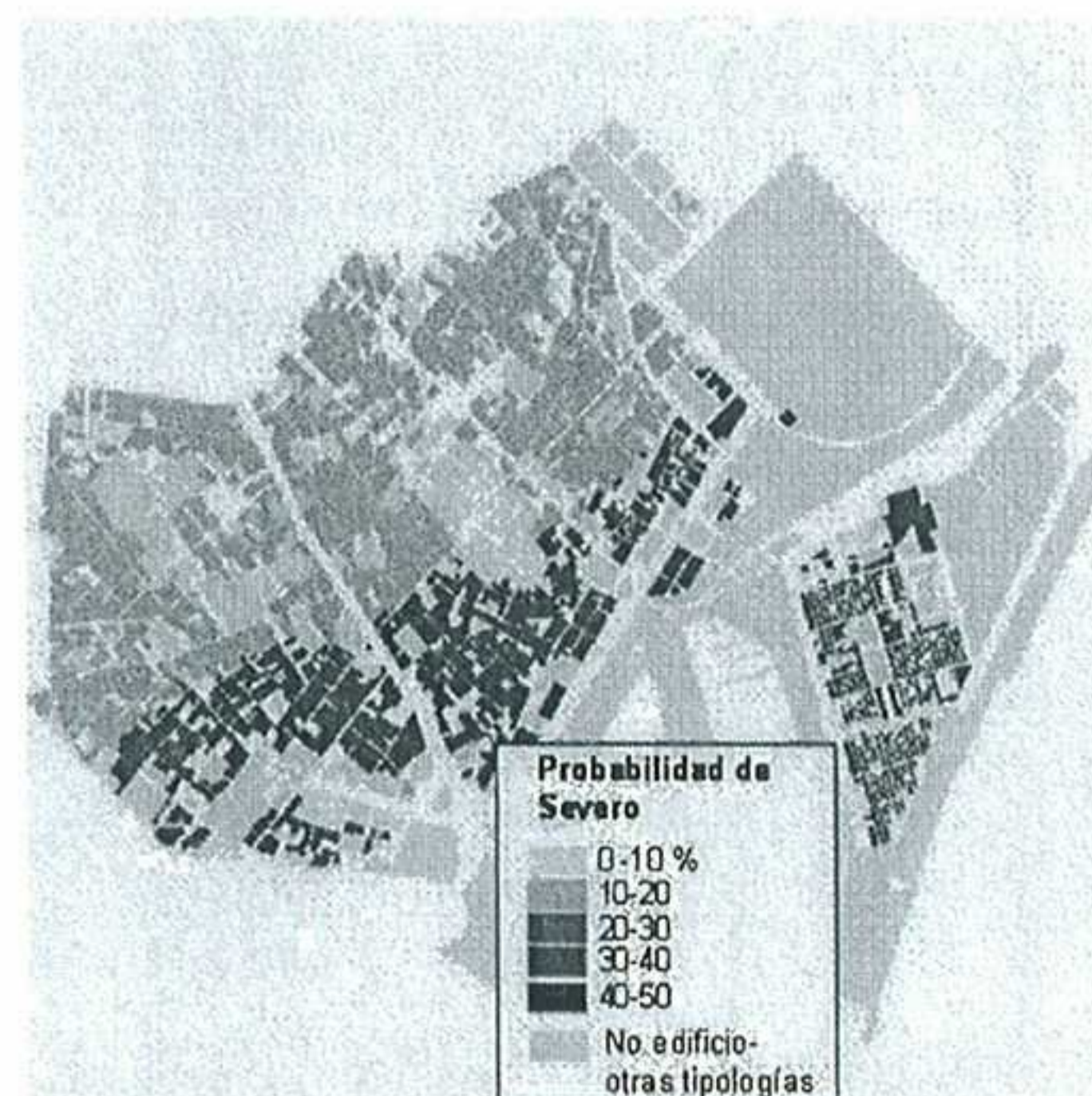


Figura 24. Probabilidad del estado de daño Severo en el distrito de Ciutat Vella para el escenario determinista y el método del espectro de capacidad.

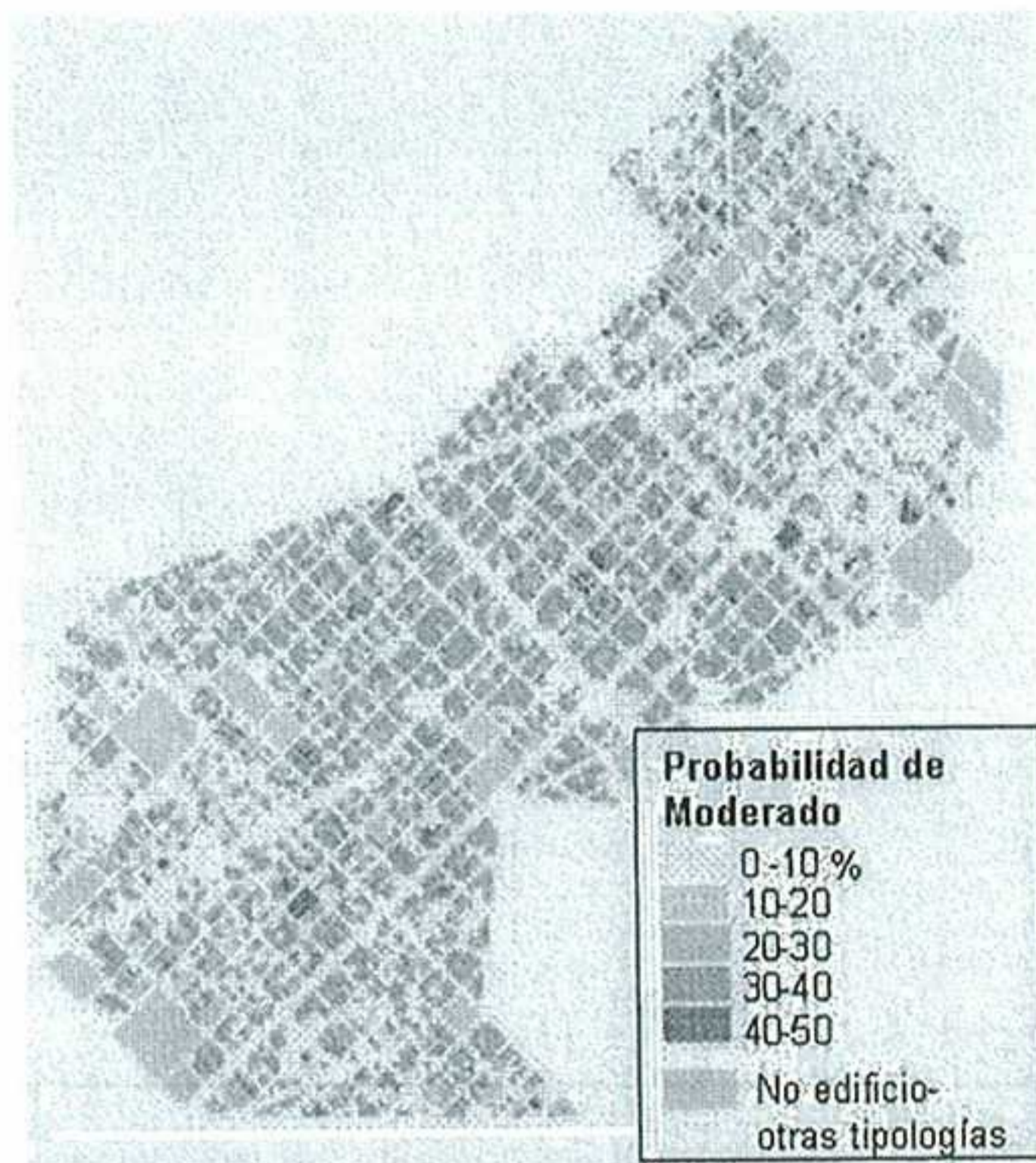


Figura 25. Probabilidad del estado de daño moderado en el distrito de l'Eixample para el escenario probabilista y el método del espectro de capacidad.

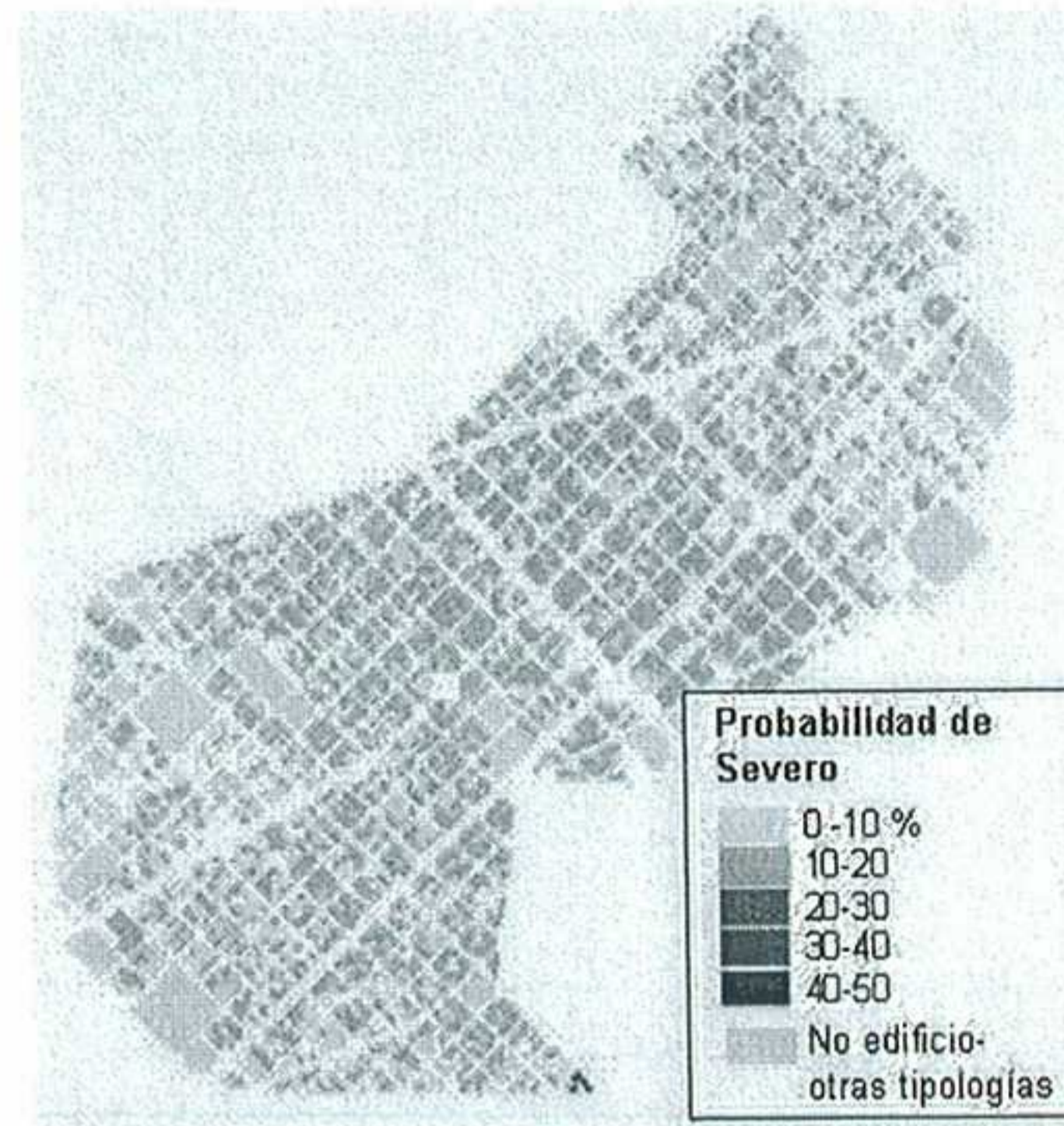


Figura 26. Probabilidad del estado de daño Severo en el distrito de l'Eixample para el escenario probabilista y el método del espectro de capacidad..

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

8 CONCLUSIONES

La mayoría de los desastres tienen grandes similitudes que permiten reflexionar sobre el riesgo y expresar una profunda preocupación sobre la muy probable repetición de los mismos escenarios el futuro, con consecuencias similares o peores, en los mismos o en otros lugares del mundo. Esto es debido a que muchas regiones tienen situaciones de riesgo similares. Edificios con las mismas características vulnerables, por ejemplo, a los terremotos, que se siguen construyendo en muchas ciudades del mundo. Por esta razón, para que se produzca un desastre no sólo es necesario que exista una alta amenaza. Una alta vulnerabilidad de las estructuras de una zona también puede dar origen a un desastre, incluso para un fenómeno natural moderado. El nivel de la amenaza es completamente dependiente del tiempo de exposición en el cual se espera que pueda ocurrir un suceso de cierta severidad. Subestimar la amenaza es la razón por la que muchos desastres pueden ocurrir en lugares donde la vulnerabilidad de las estructuras es alta y la amenaza se considera de menor importancia.

Considerando el caso sísmico, no es posible intervenir mediante refuerzos estructurales todos los edificios vulnerables a sismo existentes en una zona, pues en muchos lugares del mundo la mayoría han sido construidos sin tener en cuenta los requisitos de las normas sismorresistentes modernas. Sin embargo, es necesario rehabilitar o reforzar al menos los edificios esenciales, tales como hospitales, cuarteles de bomberos, centrales de líneas vitales y, en general, los edificios indispensables para la atención de la comunidad una vez haya ocurrido un terremoto. En cada ciudad debería existir un inventario de edificios vulnerables identificados para poder priorizar la intervención preventiva de acuerdo con su importancia y su grado de vulnerabilidad frente a diferentes amenazas. Es una obligación de la generación actual con las futuras generaciones reducir la vulnerabilidad mediante aplicación del estado del conocimiento y de los requisitos de las normas a todas las construcciones que se realizan en la actualidad, para evitar que aumente el riesgo.

En general se puede afirmar que los desastres son un problema en aumento. El impacto de los fenómenos naturales es cada vez mayor debido a los estilos o modelos de desarrollo imperantes en muchos países. El crecimiento demográfico y los procesos de urbanización, la utilización de sistemas organizacionales inadecuados, etc., han hecho aumentar en forma continua la vulnerabilidad de las zonas urbanas frente a una amplia diversidad de peligros naturales.

En síntesis se pueden formular las siguientes conclusiones:

1. La formulación del riesgo y la terminología utilizada en su definición ha variado con el tiempo pero también en función de la perspectiva disciplinar desde la cual se aborda el problema. Esto significa que no ha existido un planteamiento que unifique manera coherente los distintos enfoques. Es evidente que siempre existirán diferentes enfoques lo que dificultará la gestión efectiva del riesgo. Tampoco ha existido una formulación integral del riesgo que facilite su evaluación e intervención desde una perspectiva multidisciplinar.
2. El riesgo es el problema fundamental y el desastre es un problema derivado. La ciencia es necesaria pero no es suficiente para garantizar la evaluación y la reducción del riesgo ante los fenómenos naturales. Su gestión debe surgir como un componente fundamental de la planificación y como una estrategia ineludible para lograr un desarrollo sostenible.
3. La evaluación de riesgos con base en modelos probabilistas ha contribuido notablemente a realizar valoraciones consistentes que han sido incorporadas implícitamente en innumerables normas y leyes. Sin embargo, estas técnicas no han sido suficientes por sí solas para definir el nivel de aceptabilidad del riesgo. Aunque se argumente su supuesta objetividad, muchos de sus fundamentos e hipótesis son subjetivas, razón por la cual es cuestionable que el riesgo aceptable se pueda determinar exclusivamente mediante este tipo de enfoque.
4. La revisión del estado del conocimiento en materia de evaluación del daño sísmico ha permitido identificar la manera como se puede llevar a cabo la estimación del riesgo sísmico físico a partir de métodos de cálculo no lineal de estructuras cuando no existe una información completa sobre casos reales. Se puede generar de manera sintética una muestra de los diferentes estados de daño en modelos de estructuras que sean representativos. Luego se

pueden obtener funciones de fragilidad o vulnerabilidad utilizando técnicas de simulación.

5. Para realizar la gestión del riesgo es necesario evaluarlo teniendo en cuenta, desde un punto de vista multidisciplinar, no solamente el daño físico esperado, las víctimas o las pérdidas económicas, sino también factores sociales, organizacionales e institucionales. Por lo tanto, el riesgo, es decir las consecuencias potenciales, no sólo está relacionado con el impacto de un suceso peligroso, sino también con la capacidad para soportar el impacto y sus implicaciones en el área geográfica considerada.
6. Se ha mostrado un ejemplo de aplicación de las técnicas de modelización del riesgo sísmico urbano a la ciudad de Barcelona. Los resultados (escenarios de riesgo) son útiles para priorizar las acciones de prevención y planificación que se deben realizar para mejorar las condiciones que más influyen en el riesgo sísmico de la ciudad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia en el marco del Programa Consolider-Ingenio 2010, Proyecto *Seguridad y durabilidad de estructuras de construcción (SEDUREC)*, referencia CSD2006-00060 .

REFERENCIAS

- Aktan, A.E., Ho, I.K. (1990). "Seismic Vulnerability Evaluation of Existing Buildings", *Earthquake Spectra*, 6(3).
- Anagnos, T., Rojahn C. and Kiremidjian, A. (1995). *NCEER-ATC joint study on fragility of buildings*, Report NCEER-95-0003, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.
- Angeletti, P., Bellina, A., Grandori, E., Moretti, A. y Petrini, V. (1988). "Comparison between vulnerability assessment and damage index, some results", *Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, 7, 181-186.
- ATC-13 (1985). *Earthquake Damage Evaluation Data for California*, ATC-13, (FEMA), Applied Technology Council . Redwood City, CA.
- ATC-25 (1991) *Seismic vulnerability and impact of disruption of lifelines in the conterminous United States*. ATC-25, (FEMA), Applied Technology Council (1991). Redwood City, CA.
- ATC-40 (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, Applied Technology Council, Report: SSC 96-01, Volume 1, Seismic Safety Commission, Redwood City, California.
- Barbat, A. H. (1998). *El riesgo sísmico en el diseño de edificios*, Calidad Siderúrgica, Madrid.
- 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.
- Barbat, A. H., Oller, S., Oñate, E. and Hanganu, A. (1997), "Viscous damage model for

- Timoshenko beam structures”, *International Journal of Solids Structures*, 34(30), 3953–76.
- Barbat, A. H., Mena, U. y Yépez, F. (1998). Evaluación probabilista del riesgo sísmico en zonas urbanas, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 14(2), 247-268.
- Barbat, A. H., Cervera, M., Hanganu, A., Cirauqui, C. and Oñate, E. (1998). “Failure pressure evaluation of the containment building of a large dry nuclear power plant”, *Nuclear Engineering and Design*, Amsterdam, Holland, 180, 251-270.
- Barbat, A. H., Lagomarsino, S. and Pujades, L. G. (2006a). Vulnerability assessment of dwelling buildings, in *Assessing and Managing Earthquake Risk*, Sousa, C., Roca, A. and Goula, X., editors, Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Barbat, A. H., Pujades, L. G. and Lantada, N. (2006b). “Performance of buildings under earthquake in Barcelona, Spain”, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 21, 573-593.
- 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.
- Benedetti, D., Benzoni, G. and Parisi, M. A. (1988). “Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16, 183-201.
- Bonett, R.L., Barbat, A. H., Pujades, L. G., Lagomarsino, S. and Penna, A. (2004). “Performance assessment for unreinforced masonry buildings in low seismic hazard areas”, *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver B.C (Canadá), CD.
- Bonett, R.L. (2003). *Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada*, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Cardona, O.D. (1986). “Estudios de Vulnerabilidad y Evaluación del Riesgo Sísmico: Planificación Física y Urbana en Áreas Propensas”, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, *Boletín Técnico AIS* No. 33, Bogotá, Colombia.
- Cardona, O.D. (1997). “Management of the Volcanic Crises of Galeras Volcano: Social, Economic and Institutional Aspects”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1698, Elsevier, London.
- Cardona, O.D. (2001). *Estimación Holística del Riesgo Sísmico utilizando Sistemas Dinámicos Complejos*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Cardona O. D. y Barbat, A. H. (2000). *El riesgo sísmico y su prevención*, Calidad Siderúrgica, Madrid.
- Carr, A. (2000) Inelastic Dynamic Analysis Program: RUAUMOKO and Post-processor for RUAUMOKO, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Nueva Zelanda.
- Carreño, M. L., Cardona, O. D. and Barbat, A. H. (2007). “Urban seismic risk evaluation: a holistic approach”, *Natural Hazards* (in press).

- Cerdà, I. (1968) *Teoría General de la Urbanización. Reforma y Ensanche de Barcelona*. Reedición: Instituto de estudios fiscales. Barcelona, 1968.
- Cid, J. (1998). *Zonificación sísmica de la ciudad de Barcelona basada en métodos de simulación numérica de efectos locales*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Cid, J., Susagna, T., Goula, X., Chavarria, L., Figueras, S., Fleta, J., Casas, A. y A. Roca, (2001). "Seismic zonation of Barcelona based on numerical simulation of site effects", *Pure Applied Geophysics* Vol. 158.
- Coburn A. and Spence R. (1992). *Earthquake protection*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.
- Coburn, A. and R. Spence (2002). *Earthquake Protection*. Second edition. John Wiley & Sons, Chichester (England).
- Cornell, C.A. (1969). "Structural safety specification based on second-moment reliability", *Proceedings of the Symposium of the International Association of Bridge and Structural Engineers*, London.
- Fajfar, P. (2002). "Structural analysis in earthquake engineering - A breakthrough of simplified non-linear methods", *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.
- Galambos, T.V. (1992). "Design codes", en *Engineering Safety*, Blockley, D. (editor) MacGraw-Hill International Series in Civil Engineering, London.
- Galambos, T.V. y Ellingwood, B. (1986). "Serviceability Limit States: Deflection", *Journal Structural Engineering*, ASCE, 112(1), 67-84.
- Galasco, M., Lagomarsino, S. y Penna, A. (2002). *TREMURI Program: Seismic Analyser of 3D Masonry Buildings*, Universidad de Genoa.
- García Espuche, A. (1990). *El quadrat d'or. Centre de la Barcelona modernista. La formació d'un espai urbà privilegiat*, Olimpiada cultural Barcelona'92, Lunwerg Editores.
- Giovinazzi S. (2005). *The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis*, Ph D. Dissertation, May 2005, Faculty of Engineering Department of Civil Engineering of the University of Florence, Italy.
- Giovinazzi, S. y Lagomarsino, S. (2002). *Guidelines for the implementation of the first level methodology for the vulnerability assessment of current buildings*, Work Package 4 of RISK-UE Project, European Commission, EVK4-CT-2000-00014.
- Giovinazzi S. and Lagomarsino S. (2004). *A Macroseismic Model for the vulnerability assessment of buildings*. 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, Canada.
- Grünthal, G. (editor) (1998). *European Macroseismic Scale 1998*, Centre Européen de Géodynamique et Séismologie, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Volume 15, Luxemburg.

- Hall, W. y Wiggins, J.H., (2000). "Acceptable Risk: A Need for Periodic Review", *Natural Hazard Review*, Journal ASCE, 1(3), Washington.
- Hanganu, A. D., Oñate, E. and Barbat, A. H. (2002), "A finite element methodology for local/global damage evaluation in civil engineering structures", *Computers and Structures*, 80, 2002, 1667-1687.
- Hasofer, A.M. y Lind, N. (1974). "An exact and invariant first-order reliability format", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 100(1), February, 111-121.
- HAZUS 99-SR2 (2002). *HAZUS Technical Manual*, Federal Emergency Management Agency, FEMA & National Institute of Building Sciences, NIBS, Washington D.C., Vol.1, 2, 3.
- Infocca (1999). *Funcions d'informació de Barcelona i Cartografia*, Informe interno. Institut Municipal d'Informàtica.IMI, Ajuntament de Barcelona.
- Irizarry J., Goula X. y Susagna, T. (2003). *Analytical formulation for the elastic acceleration-displacement response spectra adapted to Barcelona soil conditions*. Technical Report, Instituto Cartográfico de Cataluña, Barcelona.
- Kappos, A., Pitilakis, K., Stylianidis K, and Morfidis, K. (1995). "Cost-benefit analysis for the seismic rehabilitation of buildings in Thessaloniki, based on a hybrid method of vulnerability assessment", *Proceedings of the 5th International Conference on Seismic Zonation*, Nice, 1, 406-413.
- Kletz, T.A. (1982). Hazard Analysis: A Review of Criteria, *Reliability Engineering*, 3 325-338.
- Lagomarsino, S. and Penna, A. (2003). *Guidelines for the implementation of the second level vulnerability methodology*, Work Package 4 of RISK-UE Project, European Commission, EVK4-CT-2000-00014.
- Lantada N. (2006). *Escenarios de riesgo sísmico en la ciudad de Barcelona*. Tesis Doctoral. Universidad Politècnica de Catalunya. Barcelona. (en curso).
- Lavell, A. (2000). *Draft Annotated Guidelines for Inter-Agency Collaboration in Programming for Disaster Reduction*, Emergency Response Division at UNDP, Geneva.
- McGuire R.K. (2004). *Seismic hazard and risk analysis*, Earthquake Engineering Research Institute, EERI Publication No. MNO-10, Oakland, California.
- Milutinovic Z. V. and Trendafiloski G. S. (2003). *Vulnerability of current buildings*, Work Package 4 of RISK-UE Project, European Commission, EVK4-CT-2000-00014.
- Moreno, R.; Bairán, J.M., Pujades, L.G., Aparicio A.C. y A. Barbat (2004a). "Evaluación probabilista del comportamiento de edificios porticados de hormigón armado", *Hormigon y Acero*, 232, 125-136.
- Moreno, R., Pujades, L. G., Barbat, A. H. and A. C. Aparicio (2004b). "Influence of masonry infill walls on the seismic behaviour of multi-storeys waffle slabs RC buildings", *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver B.C (Canadá).

- Moreno, R. (2006). *Análisis no lineal estático y dinámico para la evaluación del riesgo sísmico en edificios: aplicación a diversos escenarios sísmicos de Barcelona*, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Olivera C. Redondo E., Lambert J. Riera Melis A. i A. Roca (2006). *Els terratrèmols dels segles XIV i XV a Catalunya*. Ed. Institut Cartogràfic de Catalunya. Barcelona.
- Oller, S., Luccioni, B. and Barbat, A. H. (1996). *Un Método de Evaluación del Daño Sísmico en Estructuras de Hormigón Armado*. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, 12(2), 215-238.
- Oller, S. and Barbat, A. H. (2006). "Moment-curvature damage model for bridges subjected to seismic loads", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195 (7-8), 4490-4511.
- OPS (1993). *Mitigación de Desastres en las Instalaciones de la Salud. Aspectos Generales, de Administración, Arquitectura e Ingeniería*, cuatro volúmenes, Organización Panamericana de la Salud (OPS), Washington.
- Paricio, A. (2001). *Secrets d'un sistema constructiu: l'Eixample*, Universidad Politécnica de Cataluña, Ediciones UPC, Barcelona.
- Porter, K., Scawthorn C., Taylor C. y Blais N. (1998). *Appropriate Seismic Reliability for Critical Equipment Systems*, Technical Report MCEER-98-0016, University of Buffalo, State University of New York.
- Pujades, L. G. y Barbat, A. H. (2004). *Metodología de estimación de la vulnerabilidad sísmica de las construcciones clasificadas de "importancia especial" en la NCSE-02*, Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMNE), Barcelona, Informe Técnico IT 438.
- Sandi, H. (1983). Earthquake risk and earthquake preparedness: some qualitative aspects and quantification possibilities, *Proceedings of the Seminar on Earthquake Preparedness*. UNDP/UNESCO/UNDRO Project for Earthquake Risk Reduction in the Balkan Region, Athens, 79-93.
- Secanell, R., Goula, X., Susagna, T., Fleta, J. y Roca, A. (2004). Seismic hazard zonation of Catalonia, Spain integrating uncertainties. *Journal of Seismology* 8(1): 24-40.
- Singhal, A. and Kiremidjian, A. S. (1996). "Method for probabilistic evaluation of seismic structural damage", *Journal of Structural Engineering ASCE*, 122(12), 1459-1467.
- Sponheuer, W. and Karnik, V., (1964). Neue seismische Skala, in Sponheuer, W., (ed), *Proc. 7th Symposium of the ESC*, Jena, 24-30 Sept. 1962, Veröff. Inst. f. Bodendyn. u. Erdbebenforsch. Jena d. Deutschen Akad. d. Wiss., No 77, pp 69-76.
- Starr C. (1969). "Social benefit versus technological risk", *Science*, American Association for the Advancement of Science, 165.
- Stewart, M., Melchers, R. (1997). *Probabilistic risk assessment of engineering systems*, Chapman & Hall.

- UNDRO (1980). *Natural Disasters and Vulnerability Analysis, Report of Experts Group Meeting*, Geneva.
- Whitman, R. V., Reed, J. W. y Hong, S. T. (1973). Earthquake damage probability matrices, *Proceedings of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering*, Roma.
- Wilches-Chaux G. (1989). *Desastres, ecologismo y formación profesional*, SENA, Popayán, Colombia.
- Wiggins, J.H. (1978). *Seismic Risk Analysis*, Earthquake Engineering Research Center, EERI, Berkeley, Ca.