

# Evaluación holística del riesgo sísmico en zonas urbanas

A.H. Barbat · M.L. Carreño · O.D. Cardona · M.C. Marulanda

Recibido: Mayo 2010, Aceptado: Diciembre 2010  
©Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España 2011

**Resumen** Con el propósito de gestión, el riesgo se define como las consecuencias económicas, sociales y ambientales potenciales de eventos peligrosos que pueden ocurrir en un período de tiempo específico. En el pasado, el concepto de riesgo se ha definido en muchos casos de una forma fragmentada, de acuerdo con cada disciplina científica involucrada en su evaluación. En este artículo se propone un marco conceptual y un modelo de evaluación multidisciplinar del riesgo sísmico que tenga en cuenta no sólo el daño físico esperado y el número o tipo de víctimas o las pérdidas económicas, sino también las condiciones relacionadas con la fragilidad social y la falta de resiliencia que favorecen los efectos de segundo orden (o efectos indirectos) cuando un terremoto impacta un centro urbano. De esta manera, dicha evaluación es holística, es decir, parte de un enfoque integral y comprensivo, se realiza con base en la utilización de indicadores y tiene como principal objetivo guiar la toma de decisiones. El marco conceptual y modelo propuestos son válidos también para su aplicación a estudios de riesgo multiamenaza, aunque este artículo se ha centrado en su aplicación al estudio de riesgo sísmico. El primer paso para obtener el índice de riesgo sísmico urbano (*USRi*) que se propone en el

artículo consiste en calcular un índice de riesgo sísmico físico para cada unidad de análisis partiendo de escenarios existentes de pérdida física. En un segundo paso se aplica a este índice un factor de impacto que tiene en cuenta un conjunto de condiciones socio-económicas y de falta de resiliencia de la comunidad que agrava los efectos físicos, lo que proporciona el *USRi*. Ha sido demostrado que el modelo de evaluación holística del riesgo sísmico que se propone es robusto, proporcionando valores del *USRi* estables y fiables. Finalmente, en el artículo se incluyen resultados de simulación numérica del riesgo sísmico obtenidos mediante la aplicación del modelo propuesto a las ciudades de Bogotá (Colombia), Barcelona (España) y Manila (Filipinas).

## HOLISTIC ASSESSMENT OF SEISMIC RISK IN URBAN AREAS

**Summary** Risk has been defined, for management purposes, as the potential economic, social and environmental consequences of hazardous events that may occur in a specified period of time. In the past, the concept of risk has been defined in many cases in a fragmentary way, according to each scientific discipline involved in its appraisal. A framework and a multidisciplinary risk evaluation model is proposed in this article that take into account not only the expected physical damage, the number and type of casualties or the economic losses, but also the conditions related to social fragility and lack of resilience which favor second order effects (or indirect effects) when an earthquake strikes an urban centre. Thus, the mentioned evaluation is holistic, that is, based on an integrated and comprehensive approach, made by using indicators and oriented towards guiding decision-making. The conceptual framework and

---

Alex H. Barbat, Martha-Liliana Carreño,  
Mabel Cristina Marulanda  
Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria  
(CIMNE)  
Universitat Politècnica de Catalunya. Campus Norte UPC  
c/ Jordi Girona 1-3, Edificio c1, 08034 Barcelona, España  
e-mail: alex\_barbat@upc.edu; liliana@cimne.upc.edu;  
mmarulan@upc.edu

Omar Darío Cardona  
Universidad Nacional de Colombia, Campus Palogrande  
IDEA, Cra. 27 No. 64-60, Manizales, Colombia  
e-mail: odcardona@unal.edu.co

the model proposed are also valid for their application to multihazard risk evaluation, although this article has been focused on the evaluation of the seismic risk. The first step in obtaining the Urban Seismic Risk index (*USRi*) consists of calculating a Physical Risk index for each unit of analysis starting from existing physical risk scenarios. An impact factor, associated with a set of socio-economic and lack of resilience conditions of the community, is applied in a second step to the physical risk index in order to obtain the *USRi*. It has been demonstrated that the proposed holistic evaluation model of the seismic risk is robust, providing stable and reliable values of the *USRi*. Finally, numerical simulation results of the seismic risk obtained with the proposed model are given in the article for the cities of Bogota (Colombia), Barcelona (Spain) and Manila, (The Philippines).

## 1. La Noción de riesgo

La mayor parte de las pérdidas debidas a los terremotos tiene su origen en el deficiente comportamiento sísmico de edificios que genera distintos niveles de daño estructural o incluso el colapso. El nivel de daño sísmico esperado está fuertemente influenciado por la calidad de las normas utilizadas en el proyecto y de la práctica de construcción habitual en el área afectada. Obviamente, los avances en ingeniería sísmica y en las normas tiene un efecto positivo en el comportamiento sísmico de los nuevos edificios y las inspecciones post-terremoto muestran una mejora sustancial del comportamiento de los edificios más recientes. Pero, en las zonas urbanas del mundo existen muchas estructuras más antiguas, sin un diseño sísmico adecuado. Éstas han sido proyectadas y construidas en períodos anteriores, posiblemente mediante normas de diseño sismorresistentes obsoletas hoy en día o, incluso, sin el uso de código alguno. Estos hechos influyen decisivamente en las pérdidas catastróficas que se producen en muchos países durante los terremotos fuertes. En este sentido pueden mencionarse las catástrofes ocurridas en los últimos quince años debidas a los terremotos de Northridge (EE.UU., 1994), Kobe (Japón, 1995), Kocaeli (Turquía, 1999), Nantou (Taiwán, 1999), Quindío (Colombia, 1999), Kachch-Bhuj (la India, 2001), Niigata (Japón, 2007), Wenchuan (China, 2008), L'Aquila (Italia, 2009), Puerto Príncipe (Haití, 2010) y Maule (Chile, 2010).

Disponer de datos predictivos sobre las pérdidas probables esperadas así como sobre los costos de reconstrucción debidos a la ocurrencia de sismos, constituye para los países puntos de partida esenciales para el conocimiento del riesgo y para la planificación de su ges-

tión. La frecuencia de los eventos catastróficos es baja por lo que los datos históricos disponibles en cada zona son limitados. Teniendo en cuenta la posibilidad de ocurrencia de futuros terremotos con gran potencial destructivo, la evaluación del riesgo sísmico tiene que realizarse mediante modelos capaces de predecir, de la mejor manera posible, los futuros escenarios partiendo de la información limitada existente. Dicha evaluación debe ser prospectiva, considerando eventos científicamente creíbles que pueden ocurrir en el futuro. Las bases para desarrollar modelos que permitan la predicción de pérdidas debidas a un evento catastrófico las deben sentar la sismología y la ingeniería sísmica.

El concepto de *amenaza* o *peligrosidad* se utiliza con referencia a un peligro latente o a un factor de riesgo externo de un elemento expuesto que puede ser expresado como la probabilidad de ocurrencia de un evento de cierta intensidad, en un sitio específico y para un período determinado de exposición.

La *vulnerabilidad* puede definirse como un factor interno de riesgo de un elemento expuesto a eventos peligrosos y corresponde a la predisposición intrínseca de dicho elemento de ser afectado o ser susceptible al daño. Respecto a este concepto deben hacerse algunas puntualizaciones. La vulnerabilidad sísmica física está relacionada básicamente con el grado de exposición y la fragilidad de los elementos expuestos a la acción sísmica. Tal como se ha explicado, la calidad de las normas de diseño influye determinadamente en la vulnerabilidad física de las estructuras. La vulnerabilidad sísmica integral es un concepto que abarca mucho más que el de vulnerabilidad física. Puede entenderse como la susceptibilidad física, económica, política o social de una comunidad de ser afectada o de sufrir pérdidas cuando se produce un terremoto. En muchos casos, los aspectos sociales de la vulnerabilidad son las causas de la dimensión física de la vulnerabilidad. La dimensión social de la vulnerabilidad es una condición que surge, crece y se mantiene en el tiempo y está estrechamente vinculada a los aspectos culturales y al nivel de desarrollo de las comunidades [15].

El *riesgo*, que es la convolución de la amenaza con la vulnerabilidad, es la pérdida potencial esperada en el elemento expuesto. En un sentido amplio, puede expresarse como la probabilidad de excedencia de un determinado nivel de consecuencias económicas, sociales o ambientales en un sitio determinado y durante un período determinado [15]. El objetivo de los estudios de riesgo es el de predecir las pérdidas esperadas debido a un terremoto a una escala territorial que, en el caso de este artículo, es una zona urbana. A efectos de gestión, tales estudios tienen que mejorar las decisiones a fin de contribuir a la eficacia de la gestión del ries-

go, invitando a la acción e identificando las debilidades de los elementos expuestos así como su evolución en el tiempo [22].

Las primeras investigaciones especializadas en el tema de desastres naturales se remontan a principios de los años sesenta del pasado siglo, originándose en las contribuciones pioneras de Gilbert White [59] planteadas desde el punto de vista de la ecología y la geografía. Al mismo tiempo, sociólogos como Enrico Quarantelli [48] y Russell Dynes [27] empezaron a explicar la respuesta social a los desastres siguiendo analogías con la respuesta en caso de ataques nucleares. Geógrafos como Robert Kates [38] y Roger Kaspersen [37] y el físico Christopher Hohenemser enfocaron su investigación en riesgos naturales y nucleares. Desde el punto de vista de la ingeniería civil estas investigaciones han sido materializadas en desarrollos realizados en el campo del riesgo físico. Comenzando con el trabajo de evaluación del daño de Whitman [60], han sido desarrollados en todo el mundo numerosos modelos para la evaluación del riesgo sísmico físico. Más tarde, este proceso evolucionó hacia una visión más integral del riesgo sísmico, incorporando otros de sus aspectos [25] hasta llegarse al desarrollo de la metodología general HAZUS (1999), disponible en la actualidad para la evaluación del riesgo multiamenaza. Durante los años 90, muchos investigadores del mundo, motivados por la Década Internacional de Reducción de los Desastres Naturales, trabajaron en el tema de los riesgos y desastres. Dicho tema ganó importancia y se ha reconocido que los términos amenaza, vulnerabilidad y riesgo han tenido diferentes significados e implicaciones vistos desde diferentes ángulos metodológicos y prácticos [15].

Kates [38] desarrolló un modelo de riesgo desde el pensamiento de la escuela ecologista que introduce la noción de “ajuste” de las amenazas naturales considerando las interacciones entre naturaleza, hombre y tecnología. Palmlund [47] propuso un modelo que establece una analogía con la estructura de la tragedia griega clásica (con actores, escenario, drama y roles) para explicar el desastre ambiental desde la perspectiva política y social. Douglas y Wildavsky [26] propusieron un modelo en el que el riesgo es visto como un atributo de las estructuras sociales. Rayner [49] introduce una teoría cultural del riesgo mientras que los enfoques de la escuela de la Economía Política son aplicados en sus respectivos modelos por Wesgate y O’Keefe [57], Wijkman y Timbarlae [58], Susmal *et al.* [54] y Chambers [24]. Las contribuciones de Wisner [63], Cannon [11], Blaikie *et al.* [10] y de los miembros de la Red de Estudios Sociales de Prevención de Desastres en Latinoamérica (La RED) [41,39,13,40] también deben ser consideradas constructivistas, enfatizando la construcción social de la

vulnerabilidad y del riesgo. Una de las contribuciones conceptuales que se derivan en un enfoque multidisciplinario fue hecha por Wilches-Chaux [62] que propuso diferentes clases de vulnerabilidad: cultural, ambiental, social, económica, física, etc.

El informe *Análisis de los desastres naturales y de la vulnerabilidad* [55], que es el resultado de una reunión de expertos realizada en 1979, propuso una definición unificada de la noción de desastre a partir de amenaza,  $A$ , vulnerabilidad,  $V$ , elementos expuestos,  $E$ , y riesgo,  $R$ , mediante la siguiente expresión considerada un estándar hasta el presente

$$R = E \cdot A \cdot V \quad (1)$$

En las últimas décadas han sido desarrolladas, desde diferentes perspectivas, muchas metodologías o modelos de evaluación del riesgo con base en esta formulación y, más recientemente, se desarrolló un enfoque holístico o multidisciplinario para el caso de centros urbanos [17, 42]. Cardona [14] desarrolló un marco conceptual y un modelo para el análisis de riesgo sísmico de una ciudad desde una perspectiva holística. Este modelo considera las variables de riesgo “duro” y “blando” del centro urbano, teniendo en cuenta la exposición, las características socioeconómicas de las diferentes subdivisiones administrativas de la ciudad y su capacidad de resistir desastres o su grado de resiliencia. El modelo de Cardona tenía como objetivos el de guiar la toma de decisiones en la gestión de riesgos y de ayudar a identificar las zonas críticas de una ciudad y su vulnerabilidad desde diferentes disciplinas.

Este artículo presenta un modelo alternativo de evaluación de riesgo sísmico urbano con base en el propuesto por Cardona [14] y Barbat y Cardona [5] utilizando un enfoque holístico y describiendo el riesgo sísmico mediante índices. En dicho modelo, el daño esperado en los edificios, las pérdidas en la infraestructura, el número de víctimas en una unidad de análisis, etc., son la información fundamental a partir de la que se evalúa el *riesgo físico* mediante un índice. En muchos casos, la información para el cálculo del índice de riesgo físico se obtiene partiendo de escenarios de pérdidas físicas ya existentes para la zona urbana bajo estudio. La evaluación holística del riesgo que se propone se logra afectando el riesgo físico con un factor de impacto que considera las condiciones contextuales de la zona urbana estudiada, tales como la fragilidad socioeconómica o la falta de resiliencia, y que agravan el escenario físico de pérdida inicial. Obviamente, para aplicar el modelo propuesto de evaluación del riesgo, se necesitan datos a nivel urbano sobre estas condiciones. Frecuentemente, cuando se dispone de información histórica, la principal amenaza, es decir, la amenaza potencial más crítica,

puede ser identificada. El artículo no tiene como objetivo la evaluación de la amenaza o del riesgo físico; sin embargo, sobre este último se realizarán algunas consideraciones teóricas y prácticas. Al final del artículo se ilustra mediante ejemplos la aplicación del modelo de evaluación holística del riesgo propuesto a las ciudades de Bogotá, Colombia; Barcelona, España y Metro Manila, Filipinas.

## 2. El marco conceptual

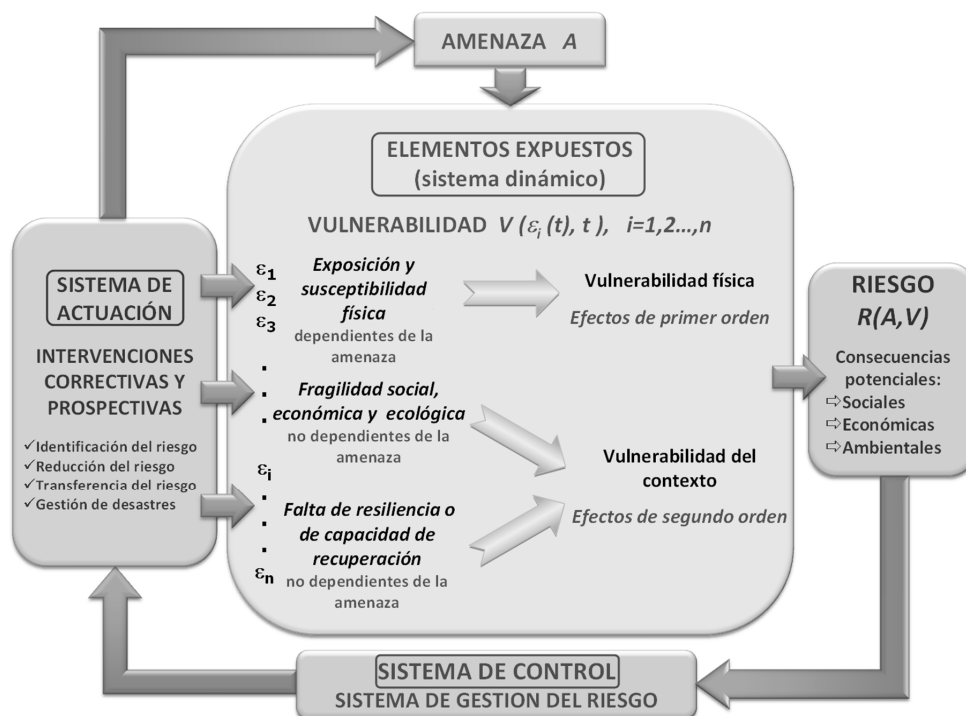
El modelo propuesto por Cardona [14] permite la evaluación del riesgo sísmico total en una zona urbana teniendo en cuenta las características de la vulnerabilidad física, de la amenaza sísmica y de la exposición física, pero también la fragilidad socio-económica y falta de resiliencia que son características de una zona urbana que incrementan el nivel de riesgo de la zona. Este modelo de evaluación del riesgo incorpora diferentes tipos de información mediante indicadores y utiliza un proceso de normalización de los resultados con base en la media y la desviación estándar de cada indicador. Como consecuencia, los resultados obtenidos aplicando dicho modelo permiten una comparación relativa del riesgo sísmico total entre diferentes áreas de una ciudad, pero no una comparación en términos absolutos con otras áreas urbanas. La evaluación holística del riesgo se realiza utilizando un conjunto de variables de entrada, denominadas descriptores, que reflejan tanto el riesgo físico como las condiciones de agravamiento que contribuyen al impacto potencial. El modelo de Cardona [14] utiliza un sistema neuro-difuso que identifica las calificaciones lingüísticas de los descriptores, pero no proporciona la información necesaria para la calibración de este sistema.

En el modelo de evaluación del riesgo que se propone en este artículo se conserva el enfoque con base en el uso de indicadores y de conjuntos difusos o funciones de pertenencia de la propuesta de Cardona [14], pero se mejoran aspectos conceptuales y metodológicos y se refinan las técnicas numéricas aplicadas, desarrollándose una herramienta de cálculo más versátil. Las mejoras conceptuales proporcionan un soporte teórico y analítico más sólido al nuevo modelo de riesgo que se propone, eliminándose aspectos innecesarios y dudosos del modelo de evaluación anterior y aseguran, en algunos casos, una mayor transparencia y aplicabilidad. En este sentido, se mejora el procedimiento de normalización de los indicadores y se calculan los índices finales de una manera absoluta (no relativa), lo que facilita la comparación del riesgo entre centros urbanos. Además, la exposición y la amenaza han sido eliminadas debido a que están ya incorporadas en el cálculo del riesgo

físico. El descriptor de densidad de población, que era un componente de exposición en el modelo de Cardona [14], se considera aquí como un descriptor de la fragilidad social. Otros cambios realizados en este modelo se refieren a las unidades en las que se expresan algunos de los descriptores puesto que, en ciertos casos, es más importante normalizar los valores de entrada con respecto a la población que con respecto al área de la zona estudiada. Este es, por ejemplo, el caso del número de camas en hospitales existentes en el área. Los descriptores, que serán discutidos más adelante, son obtenidos a partir de escenarios de pérdidas y de la información sobre la capacidad socio-económica y de resiliencia de un contexto expuesto [23].

Usando los metaconceptos de la teoría de control y de los sistemas dinámicos complejos, el riesgo puede reducirse mediante la intervención, de forma correctiva y prospectiva, de los factores de vulnerabilidad y, cuando sea posible, también de las amenazas. La gestión del riesgo requiere un sistema de control -que, en este caso, es la estructura institucional de la zona urbana- y un sistema de actuación -que, en este caso, son las políticas públicas y las acciones que se realizan- para implementar los cambios necesarios en los elementos expuestos a fin de mejorar su comportamiento. La Figura 1 muestra el marco teórico conceptual del modelo propuesto de evaluación y gestión de riesgo.

En esta figura puede verse como, desde una perspectiva holística, el riesgo  $R$  es una función de la vulnerabilidad  $V$  y la amenaza  $A$ ; tal como se ha comentado en la sección anterior, dicha función corresponde a la convolución de las dos variables. En este caso, la amenaza o la peligrosidad es sísmica pero el marco conceptual que se propone aquí es también válido para el caso de una evaluación multiamenaza del riesgo. La vulnerabilidad de los elementos expuestos a la amenaza está caracterizada por varios factores  $\varepsilon_i$  que describen los diferentes aspectos a considerar. El primer grupo de factores  $\varepsilon_i$  de la Figura 1 caracterizan la susceptibilidad al daño físico, es decir, un efecto directo o de primer orden, y permiten el cálculo del riesgo físico de la zona. En este artículo, la dimensión física de la vulnerabilidad hace referencia al caso sísmico. Los siguientes factores caracterizan la fragilidad socioeconómica y la falta de resiliencia de la comunidad afectada y son independientes de la amenaza. Dichos factores están relacionados con efectos indirectos o intangibles y describen cuan propenso a un desastre está el sistema socio-económico (o el contexto) de la zona analizada.



**Figura 1.** Marco teórico conceptual del modelo propuesto para el enfoque holístico de evaluación y gestión del riesgo (adaptado de [16,5,32,21,22])

### 3. El riesgo sísmico físico

La evaluación de la vulnerabilidad sísmica física de las estructuras de una zona urbana puede llevarse a cabo de las siguientes maneras:

- Mediante variables o descriptores cualitativos.* Un descriptor cualitativo clasifica los edificios en clases de vulnerabilidad como, por ejemplo, *baja, media, alta*, etc., o *A, B, C*, etc. Las escalas macrosísmicas como, por ejemplo, la escala EMS-98 [29], utiliza tales definiciones de la vulnerabilidad.
- Mediante índices de vulnerabilidad física.* Éstos reflejan la calidad sísmica de un edificio y se calcula en función de las calificaciones (puntuaciones) atribuidas a las características relacionadas con la tipología estructural, con el diseño estructural y con la práctica de construcción existente en la zona [9].
- Mediante curvas de capacidad* que son diagramas fuerza-desplazamiento correspondiente a la respuesta en el primer modo de vibración de las estructuras. Dichas curvas describen razonablemente el comportamiento sísmico de las estructuras, sobre todo el daño posible, y se pueden obtener mediante análisis estructural no lineal.

La evaluación del daño físico esperado, que cuantifica la pérdida media de una estructura o de una infraestructura a partir de un escenario de peligrosidad sísmica

y de la vulnerabilidad estructural, se puede realizar de las siguientes maneras:

- Utilizando matrices de probabilidad de daño* que expresan, en forma discreta, la probabilidad condicional  $P[D = j | i]$  de que se produzca un nivel  $j$  de daño, debido a un terremoto de una severidad  $i$  [61].
- Utilizando funciones de índices de vulnerabilidad* que son relaciones que expresan el daño estructural en forma continua, en función del índice de vulnerabilidad definido por Benedetti y Petrini [9] y también en función de la intensidad del terremoto (inicialmente, se trataba de la intensidad en la escala macrosísmica italiana Mercalli-Cancani-Sieberg).
- Utilizando funciones de vulnerabilidad* que expresan los daños o las pérdidas económicas en las estructuras de edificación en una forma continua, en función de otras características de los terremotos, tales como la aceleración máxima del terreno, la aceleración o el desplazamiento espectral, o el desplazamiento relativo entre los niveles, entre otros [44,45,46,18,19].
- Utilizando curvas de fragilidad* que expresan la probabilidad de que el daño global esperado de una estructura,  $d$ , sea igual o superior a un estado de daño  $d_S$ , en función de un parámetro que cuantifica la severidad de la acción sísmica.

Existe una estrecha relación entre las matrices de probabilidad de daño y las curvas de fragilidad. La di-

ferencia es que las curvas de fragilidad caracterizan el daño de una estructura para cualquier grado de severidad de los terremotos, mientras que las matrices de probabilidad de daños corresponden a un punto concreto de las curvas de fragilidad. Todas estas maneras de cuantificar el daño físico han sido desarrolladas de manera independiente y en diferentes períodos de tiempo. Sin embargo, 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 los daños esperados en las estructuras [8].

Existen varias metodologías o modelos que permiten la evaluación de la vulnerabilidad, del daño y del riesgo físico en zonas sísmicas, enmarcadas dentro de estos conceptos (por ejemplo, [9,2,28,12]). Las matrices de probabilidad de daño, las funciones de vulnerabilidad y las curvas de fragilidad, obtenidas a partir de los daños estructurales observados durante los terremotos, eran las herramientas más utilizadas en los estudios de riesgo sísmico físico [9,35,53,3,4,6,7,8]. Para la aplicación de esos enfoques sería necesario disponer de una base de datos completa de los daños observados. Sin embargo, esto es posible sólo en aquellas zonas de alta sismicidad en las que realizan habitualmente evaluaciones post-terremoto correctas. En las zonas donde los datos existentes para diferentes clases de edificios y diferentes intensidades sísmicas son limitados o incompletos, la opinión de expertos locales se ha utilizado para apoyar o reemplazar por completo el tratamiento probabilista de los datos observados [2,1]. La utilización de modelos de análisis estructural no lineal, conduce a otros métodos para hacer frente a la escasez de datos [43,6]. Para completar la información sobre los daños producidos por los terremotos en las zonas con escasez de datos, han sido utilizados procedimientos de simulación por Monte Carlo [35,53,3]. En este sentido, el análisis probabilista de las respuestas estructurales generadas por ordenador, obtenidas mediante la aplicación de procedimientos de análisis no lineal a edificios representativos, proporciona curvas de fragilidad, matrices de probabilidad de daño y funciones de vulnerabilidad.

#### 4. El modelo de evaluación holística del riesgo

##### 4.1. Planteamiento de la evaluación mediante indicadores del riesgo sísmico

El riesgo sísmico total a nivel urbano se calcula mediante un índice que, de acuerdo con su denominación en inglés que es *Urban Seismic Risk Index*, se denominará a continuación *USRi*. Formalmente, dicho índice

podría escribirse de la siguiente manera:

$$USRi = R_F \cdot \delta_F + R_C \cdot \delta_C \quad (2)$$

donde  $R_F$  es el índice de riesgo físico,  $R_C$  es el índice de riesgo del contexto y  $\delta_F$  y  $\delta_C$  son los factores de participación de  $R_F$  y  $R_C$ . El índice de riesgo físico está relacionado con las pérdidas esperadas debido a la fragilidad de los elementos expuestos a la acción sísmica, es decir, con los efectos directos potenciales. El riesgo del contexto está relacionado con la capacidad socio-económica y de resiliencia de una comunidad expuesta, es decir, con efectos indirectos. Sin embargo, a efectos prácticos no es conveniente utilizar la Ecuación (2) para calcular el índice *USRi* debido a las dificultades relacionadas no sólo con el cálculo del índice de riesgo del contexto sino también con el cálculo de los factores de participación.

El riesgo total se calcula aquí partiendo de los efectos directos o del riesgo físico descrito por algunos factores  $\varepsilon_i$ , mientras que los efectos indirectos o del contexto se incluyen en un coeficiente de agravamiento  $F$  que depende de otro conjunto de factores  $\varepsilon_i$  que describen la fragilidad socio-económica y la falta de resiliencia (véase la Figura 1). Por lo tanto, la Ecuación (2) que proporciona el riesgo total se reescribe mediante la siguiente ecuación:

$$USRi = R_F \cdot (1 + F) \quad (3)$$

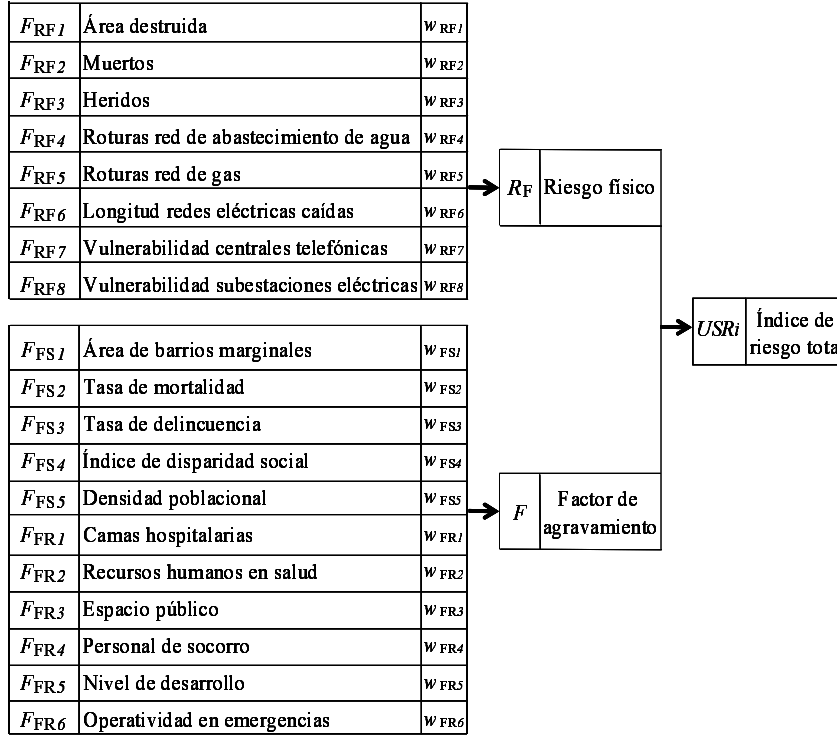
que se conoce como *ecuación de Moncho*, donde  $(1+F)$  se denomina factor de impacto. La Figura 2 muestra el modelo de evaluación del riesgo propuesto, que permite calcular el índice de riesgo total *USRi* para las unidades de análisis que se consideren, que pueden ser distritos, municipios, comunas o localidades, según la nomenclatura utilizada en cada país. De acuerdo con dicho modelo, el riesgo físico  $R_F$  se obtiene como suma ponderada de unos *factores de riesgo físico*  $F_{RFi}$

$$R_F = \sum_{i=1}^p w_{RFi} \cdot F_{RFi} \quad (4)$$

siendo  $w_{RFi}$  los coeficientes de ponderación de cada factor y  $p$  el número total de factores considerados para el riesgo físico que, en el caso considerado en la Figura 2, es ocho. Los  $p$  coeficientes  $w_{RFi}$  suman 1 y se determinan utilizando el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) [52] que se explica en la Sección 4.3. El cálculo de los factores de riesgo  $F_{RFi}$  se desarrolla en la Sección 4.2.

De forma similar se calcula el coeficiente de agravamiento  $F$  como la suma ponderada de los factores de agravamiento que describen la fragilidad social,  $F_{FSi}$ , y la falta de resiliencia,  $F_{FRj}$

$$F = \sum_{i=1}^m w_{FSi} \cdot F_{FSi} + \sum_{j=1}^n w_{FRj} \cdot F_{FRj} \quad (5)$$



**Figura 2.** Factores de riesgo físico, fragilidad social y falta de resiliencia y sus pesos

donde  $w_{FSi}$  y  $w_{FRj}$  son coeficientes de ponderación que toman en consideración la importancia relativa de los diferentes factores y también se calculan utilizando el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ);  $m$  y  $n$  son el número total de descriptores para la fragilidad socio-económica y la falta de resiliencia, respectivamente. En el caso considerado en la Figura 2,  $m=5$  y  $n=6$ . Los pesos  $w_{FSi}$  y  $w_{FRj}$  deben cumplir la condición

$$\sum_{i=1}^m w_{FSi} + \sum_{j=1}^n w_{FRj} = 1 \quad (6)$$

En realidad, existe la posibilidad de expresar los índices  $R_F$  y  $F$  como combinaciones lineales de los factores de riesgo físico o de agravamiento, respectivamente, sólo cuando no existe interacción entre dichos factores o entre los factores y los pesos que se utilizan en la ponderación. Pero, aunque esta hipótesis no se cumpla siempre, ha sido admitida su validez teniendo en cuenta las incertidumbres e imprecisiones inherentes a los datos y la necesidad de simplificar el cálculo de la solución.

#### 4.2. Cálculo de los factores de riesgo

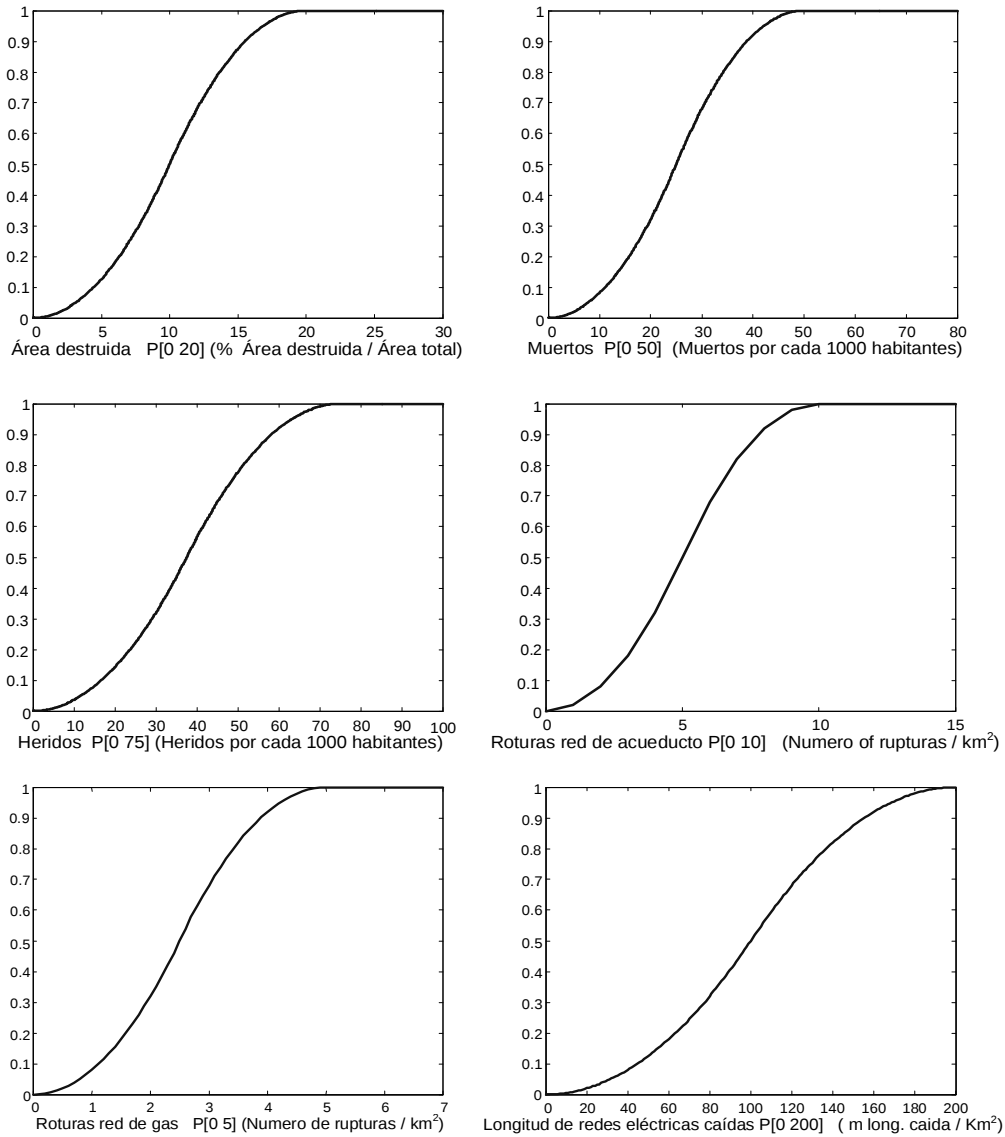
Primeramente se deben identificar los descriptores  $X_{RFi}$  que caracterizan el riesgo físico en el centro urbano analizado. En la Tabla 1 se dan algunos posibles

descriptores que pueden utilizarse para el mencionado cálculo y sus unidades. No en todos los casos de estudio está disponible la misma información, por lo que estas variables deberán adaptarse a la información disponible en cada caso. Los factores de riesgo físico  $F_{RFi}$  se calculan a partir de los descriptores  $X_{RFi}$  pero éstos, tal como puede verse, generalmente tienen diferentes unidades por lo que no son conmensurables. Por esta razón se introducen unas funciones de transformación que permitan escalar y normalizar dichos descriptores de manera que se puedan calcular factores de riesgo y, luego, índices que permitan comparar el riesgo en diferentes unidades administrativas de la misma zona o en diferentes centros urbanos entre sí.

Para el cálculo de los factores de riesgo físico  $F_{RFi}$  se han definido las funciones de transformación de la Figura 3, conocido el valor bruto de cada descriptor (número de fallecidos, área destruida, etc.), se obtienen para cada factor de riesgo físico valores entre 0 y 1. Por ejemplo, de acuerdo con la opinión de los expertos, la función de transformación para el área construida dañada es 0 cuando este descriptor tiene el valor mínimo y es 1 cuando el área dañada llega a ser el 20 % del área construida. En la Figura 3 no se presentan funciones de transformación para las variables  $X_{RF7}$ ,  $X_{RF8}$  y  $X_{RF9}$ , ya que los valores de estas variables están definidos ya como índices entre 0 y 1.

**Tabla 1.** Descriptores de riesgo físico, sus unidades e identificadores

|           | Descriptor                              | Unidades                                    |
|-----------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|
| $X_{RF1}$ | Área destruida                          | % (área destruida / área construida)        |
| $X_{RF2}$ | Muertos                                 | Número de muertos por cada 1,000 habitantes |
| $X_{RF3}$ | Heridos                                 | Número de heridos por cada 1,000 habitantes |
| $X_{RF4}$ | Roturas red de acueducto                | Número de roturas / km <sup>2</sup>         |
| $X_{RF5}$ | Roturas red de gas                      | Número de roturas / km <sup>2</sup>         |
| $X_{RF6}$ | Longitud de redes eléctricas caídas     | m de longitud caída / km <sup>2</sup>       |
| $X_{RF7}$ | Vulnerabilidad de centrales telefónicas | Índice de vulnerabilidad                    |
| $X_{RF8}$ | Vulnerabilidad subestaciones eléctricas | Índice de vulnerabilidad                    |
| $X_{RF9}$ | Daño en la red vial                     | Índice de daño                              |

**Figura 3.** Funciones de transformación utilizadas para normalizar los factores de riesgo físico

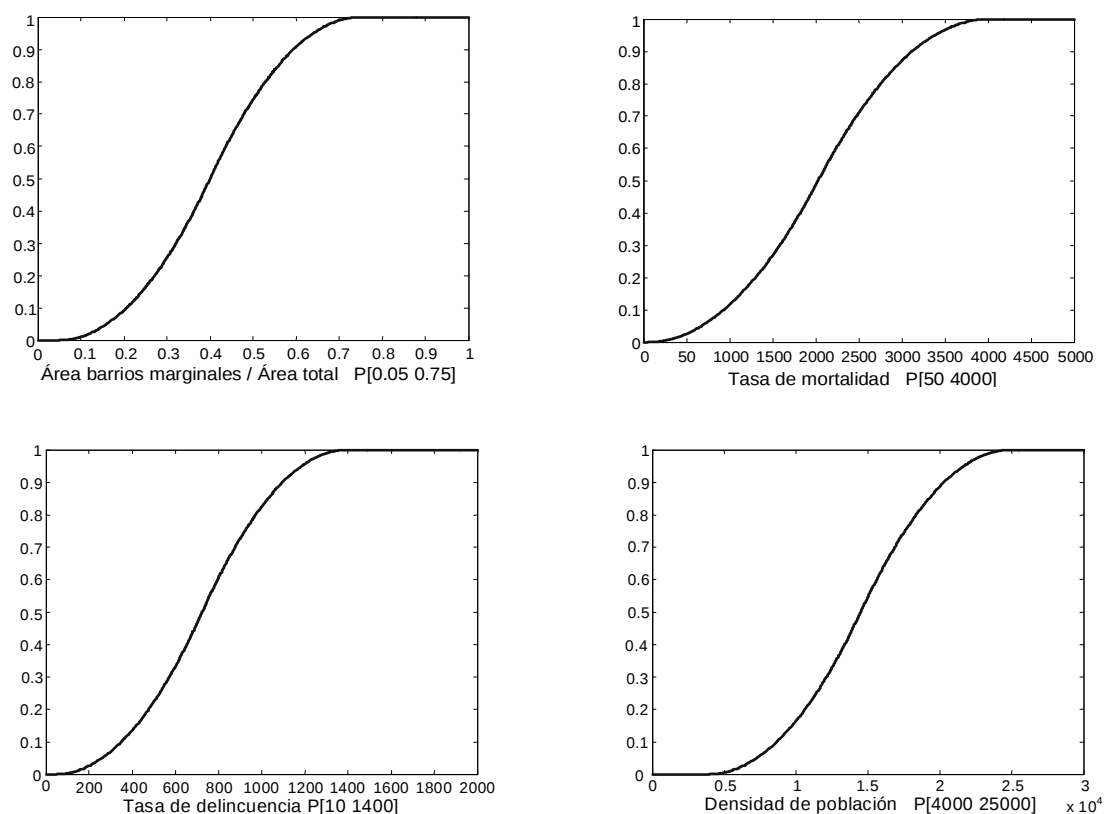
Referente al cálculo de los factores de agravamiento por fragilidad social  $F_{FSi}$  y por falta de resiliencia  $F_{FRi}$ , en la Tabla 2 se muestran los descriptores que pueden

considerarse y las unidades utilizadas, al igual que las variables de riesgo físico, estas variables pueden adaptarse de acuerdo a la información disponible. Los facto-

**Tabla 2.** Descriptores de agravamiento, sus unidades e identificadores

| Descriptor                                                           | Unidades                                               |
|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| $X_{FS1}$ Área de barrios marginales                                 | Área barrios marginales / Área localidad               |
| $X_{FS2}$ Tasa de mortalidad                                         | Número de muertos por cada 10,000 habitantes           |
| $X_{FS3}$ Tasa de delincuencia                                       | Número de delitos por cada 100,000 habitantes          |
| $X_{FS4}$ Índice de disparidad social                                | Índice entre 0 y 1                                     |
| $X_{FS5}$ Densidad de población                                      | Habitantes / km <sup>2</sup> de área construida        |
| $X_{FR1}$ Camas hospitalarias                                        | Número de camas por cada 1,000 habitantes              |
| $X_{FR2}$ Recurso humano en salud                                    | Recurso humano en salud cada por cada 1,000 habitantes |
| $X_{FR3}$ Espacio público                                            | Área de espacio público / Área total                   |
| $X_{FR4}$ Personal de socorro                                        | Personal de socorro por cada 10,000 habitantes         |
| $X_{FR5}$ Nivel de desarrollo de la localidad                        | Calificación de 1 a 4                                  |
| $X_{FR6}$ Operatividad en emergencias o índice de gestión de riesgos | Calificación de 0 a 2 o índice de 0 a 1*               |

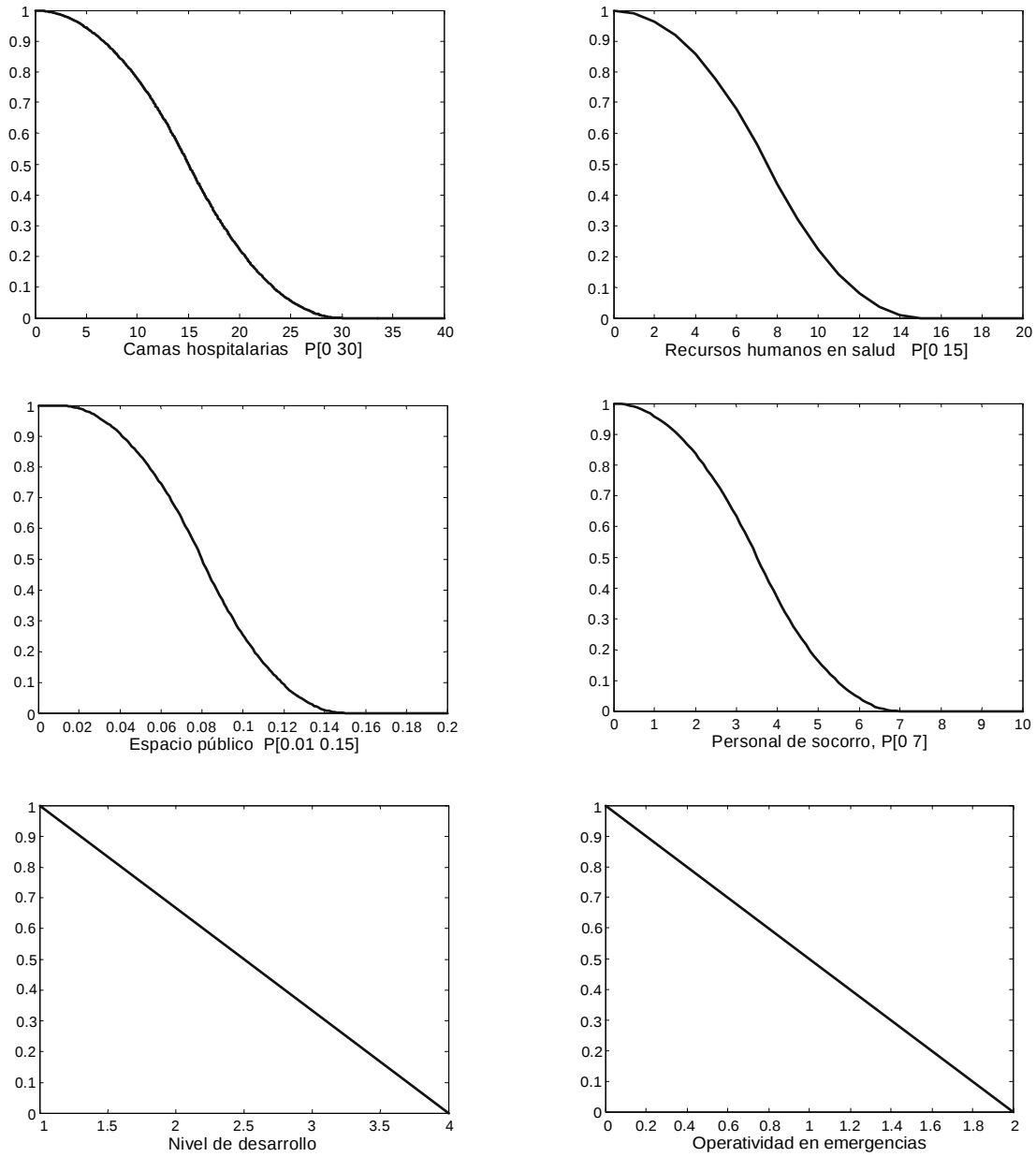
\*Este índice se definió por Carreño *et al.* (2005)

**Figura 4.** Funciones de transformación utilizadas para normalizar los factores de fragilidad social

res de agravamiento se calculan mediante las funciones de transformación de las Figuras 4 y 5 que relacionan los valores brutos de los descriptores que representan la fragilidad social  $X_{FSi}$  y la falta de resiliencia  $X_{FRj}$  con los correspondientes factores de agravamiento. En la Figura 4 no se incluye una función de transformación para la variable  $X_{FS4}$  (el índice de disparidad social) ya que este ya tiene valores en el rango 0-1.

En la mayoría de los casos se utilizaron funciones de transformación sigmoideas. Los valores de los descrip-

tores se encuentran en el eje  $x$  y los factores correspondientes, que son los valores escalados, se encuentran en el eje  $y$ . Una vez definida la forma de estas funciones, es necesario fijar los valores extremos para cada factor utilizando la información existente sobre los efectos de desastres ocurridos en el pasado así como opiniones de expertos. En los casos de la falta de resiliencia, para los descriptores del nivel de desarrollo de la comunidad y del plan de emergencias o preparación se ha propuesto una relación lineal.



**Figura 5.** Funciones de transformación utilizadas para normalizar los factores de falta de resiliencia

#### 4.3. Cálculo de los coeficientes de ponderación

Una vez que los descriptores se hayan escalado mediante las funciones de transformación y convertidos en factores conmensurables, se realiza su ponderación con coeficientes que ilustran la importancia relativa que tiene un factor frente a los demás en la composición del índice de riesgo físico o en el coeficiente de agravamiento. La mejor opción para establecer los coeficientes de ponderación es la evaluación subjetiva por parte de expertos de la importancia relativa de los factores que componen un índice. Aunque esta técnica ha recibido críticas por la falta de una base explícitamente repli-

cable, obtener la opinión, la experiencia y el juicio de expertos ésta es la única opción factible y razonable en el caso del riesgo sísmico. Por esto, los coeficientes de ponderación se establecen partiendo de la opinión de expertos obtenida mediante el método Delphi, seguida por la utilización del Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) que facilita el análisis multicriterio con base en importancias relativas y que permite obtener la jerarquía de las comparaciones de pares discretos y continuos [52]. Este proceso, que se explica a continuación, es la forma más adecuada de calcular la importancia relativa de variables de diferente naturaleza y sus pesos relativos.

**Tabla 3.** Matriz de comparaciones para el riesgo físico

|           | $F_{RF1}$ | $F_{RF2}$ | $F_{RF3}$ | $F_{RF4}$ | $F_{RF5}$ | $F_{RF6}$ | $F_{RF7}$ | $F_{RF8}$ |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $F_{RF1}$ | 1         | 4         | 4         | 2         | 3         | 3         | 5         | 5         |
| $F_{RF2}$ | 0.25      | 1         | 1         | 0.5       | 1         | 1         | 3         | 3         |
| $F_{RF3}$ | 0.25      | 1         | 1         | 0.5       | 1         | 1         | 3         | 3         |
| $F_{RF4}$ | 0.50      | 2         | 2         | 1         | 2         | 2         | 4         | 4         |
| $F_{RF5}$ | 0.33      | 1         | 1         | 0.5       | 1         | 1         | 3         | 3         |
| $F_{RF6}$ | 0.33      | 1         | 1         | 0.5       | 1         | 1         | 3         | 3         |
| $F_{RF7}$ | 0.20      | 0.33      | 0.33      | 0.25      | 0.33      | 0.33      | 1         | 1         |
| $F_{RF8}$ | 0.20      | 0.33      | 0.33      | 0.25      | 0.33      | 0.33      | 1         | 1         |

Valor propio = 8.11 ;  $CI = 0.0152$  ;  $CR = 0.0108$

El PAJ es una técnica usada para la toma de decisiones con atributos múltiples [50,52,51]. Permite la descomposición de un problema en una jerarquía y esto asegura que tanto los aspectos cualitativos como los cuantitativos de un problema sean incorporados en el proceso de evaluación durante el cual la opinión es extraída sistemáticamente por medio de comparaciones entre pares (*pairwise*). El PAJ permite la aplicación de datos, experiencia, conocimiento e intuición de una forma lógica y profunda. Es una metodología de decisión compensatoria porque las alternativas que son eficientes con respecto a uno o más objetivos pueden compensarse por su efecto frente a otros objetivos. Como método de ponderación, el PAJ permite a los tomadores de decisiones deducir el valor de los coeficientes de ponderación en vez de asignarlos de forma arbitraria [33,34].

El núcleo del PAJ lo constituye una comparación ordinal entre pares de atributos, que en este contexto son factores de riesgo. A raíz de dicha comparación se expresa una preferencia entre los factores en una escala semántica de 1 a 9, con lo que se mantienen los valores dentro del mismo orden de magnitud. Un valor de 1 indica una igualdad de preferencia entre dos factores mientras que uno de 9 indica que la preferencia por un factor es nueve veces más grande, es decir, que se considera que el indicador es nueve veces más importante que aquel con el que es comparado. Estas comparaciones proporcionan la matriz de la Tabla 3 en la cual se afirma, por ejemplo, que el factor  $F_{RF1}$  es cinco veces más importante que el factor  $F_{RF7}$ .

Los pesos relativos de los factores se calculan utilizando una técnica de valores y vectores propios. Una de las ventajas de este método es que permite verificar la consistencia de la matriz de comparación a través del cálculo de sus valores propios y de un índice de consistencia.

El PAJ tolera la inconsistencia a través de la cantidad de redundancia. Para una matriz de tamaño  $n \times n$ , se requieren sólo  $n - 1$  comparaciones para establecer pesos para los  $n$  indicadores. El número real de comparaciones que se realizan en el PAJ es  $n \cdot (n-1)/2$ .

La redundancia es una característica útil puesto que es análoga a la estimación de un número calculando la media de observaciones repetidas. Esto proporciona un conjunto de pesos que son menos sensibles a errores de opinión. Además, dicha redundancia proporciona una medida de los errores de opinión al ser un medio para el cálculo de un coeficiente de consistencia  $CR$  (Saaty 1987; [36])

$$CR = \frac{CI}{CI_{random}} \quad (7)$$

que se obtiene como la relación entre un índice de consistencia

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (8)$$

y el valor del mismo índice de consistencia  $CI_{random}$  obtenido para una matriz de comparación generada aleatoriamente;  $\lambda_{\max}$  es el valor propio fundamental de la matriz de comparación por pares. De acuerdo con Saaty, se asegura una buena precisión para coeficientes de consistencia pequeños (como una regla general con base en la experiencia se sugiere un valor de  $CR$  menor que 0.1, aunque se citan incluso valores de 0.2). Si no se cumple esta condición, el problema tiene que ser nuevamente analizado y la matriz de comparación revisada. Una vez alcanzada una buena consistencia, se calcula y normaliza el vector propio del modo fundamental dividiendo cada uno de sus elementos por la suma de los valores de sus elementos. Los elementos de este vector propio son los valores de los coeficientes de ponderación. La Tabla 4 muestra dichos pesos obtenidos a partir de la matriz de comparación de pares de la Tabla 3. La Tabla 5 contiene la matriz de comparación de pares para los factores de agravamiento por fragilidad social  $F_{FSi}$  y por falta de resiliencia  $F_{FRi}$  obtenidos mediante opinión de expertos, mientras que los pesos calculados aplicando el PAJ se dan en la Tabla 6.

**Tabla 4.** Coeficientes de ponderación para el cálculo del riesgo físico

|           | Vector propio principal | Vector de coeficientes de ponderación |
|-----------|-------------------------|---------------------------------------|
| $F_{RF1}$ | 0.7410                  | 0.31                                  |
| $F_{RF2}$ | 0.2420                  | 0.10                                  |
| $F_{RF3}$ | 0.2420                  | 0.10                                  |
| $F_{RF4}$ | 0.4368                  | 0.19                                  |
| $F_{RF5}$ | 0.2496                  | 0.11                                  |
| $F_{RF6}$ | 0.2496                  | 0.11                                  |
| $F_{RF7}$ | 0.0958                  | 0.04                                  |
| $F_{RF8}$ | 0.0958                  | 0.04                                  |

**Tabla 5.** Matriz de comparaciones para el coeficiente de agravamiento

|           | $F_{FS1}$ | $F_{FS2}$ | $F_{FS3}$ | $F_{FS4}$ | $F_{FS5}$ | $F_{FR1}$ | $F_{FR2}$ | $F_{FR3}$ | $F_{FR4}$ | $F_{FR5}$ | $F_{FR6}$ |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $F_{FS1}$ | <b>1</b>  | 4         | 4         | 1         | 1         | 3         | 3         | 4         | 4         | 3         | 3         |
| $F_{FS2}$ | 0.25      | <b>1</b>  | 1         | 0.25      | 0.25      | 0.5       | 0.5       | 1         | 1         | 0.5       | 0.5       |
| $F_{FS3}$ | 0.25      | 1         | <b>1</b>  | 0.25      | 0.25      | 0.5       | 0.5       | 1         | 1         | 0.5       | 0.5       |
| $F_{FS4}$ | 1         | 4         | 4         | <b>1</b>  | 1         | 3         | 3         | 4         | 4         | 3         | 3         |
| $F_{FS5}$ | 1         | 4         | 4         | 1         | <b>1</b>  | 3         | 3         | 4         | 4         | 3         | 3         |
| $F_{FR1}$ | 0.33      | 2         | 2         | 0.33      | 0.33      | <b>1</b>  | 1         | 2         | 2         | 0.5       | 0.5       |
| $F_{FR2}$ | 0.33      | 2         | 2         | 0.33      | 0.33      | 1         | <b>1</b>  | 2         | 2         | 0.5       | 0.5       |
| $F_{FR3}$ | 0.25      | 1         | 1         | 0.25      | 0.25      | 0.5       | 0.5       | <b>1</b>  | 2         | 0.33      | 0.33      |
| $F_{FR4}$ | 0.25      | 1         | 1         | 0.25      | 0.25      | 0.5       | 0.5       | 0.5       | <b>1</b>  | 0.33      | 0.33      |
| $F_{FR5}$ | 0.33      | 2         | 2         | 0.33      | 0.33      | 2         | 2         | 3         | 3         | <b>1</b>  | 1         |
| $F_{FR6}$ | 0.33      | 2         | 2         | 0.33      | 0.33      | 2         | 2         | 3         | 3         | 1         | <b>1</b>  |

Valor propio = 11.24 ;  $CI = 0.024$  ;  $CR = 0.016$

**Tabla 6.** Coeficientes de ponderación para el cálculo del coeficiente de agravamiento

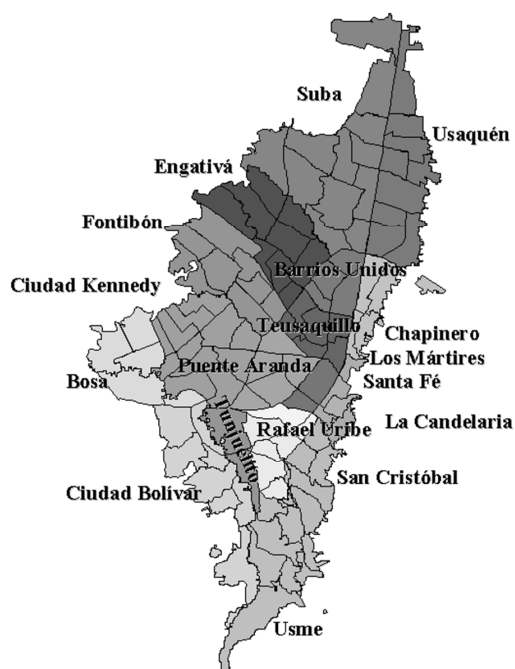
|           | Vector propio principal | Vector de coeficientes de ponderación |
|-----------|-------------------------|---------------------------------------|
| $F_{FS1}$ | 1.0000                  | 0.18                                  |
| $F_{FS2}$ | 0.2136                  | 0.04                                  |
| $F_{FS3}$ | 0.2136                  | 0.04                                  |
| $F_{FS4}$ | 1                       | 0.18                                  |
| $F_{FS5}$ | 1                       | 0.18                                  |
| $F_{FR1}$ | 0.33928                 | 0.06                                  |
| $F_{FR2}$ | 0.33928                 | 0.06                                  |
| $F_{FR3}$ | 0.21601                 | 0.04                                  |
| $F_{FR4}$ | 0.1895                  | 0.04                                  |
| $F_{FR5}$ | 0.47833                 | 0.09                                  |
| $F_{FR6}$ | 0.47833                 | 0.09                                  |

#### 4.4. Observaciones

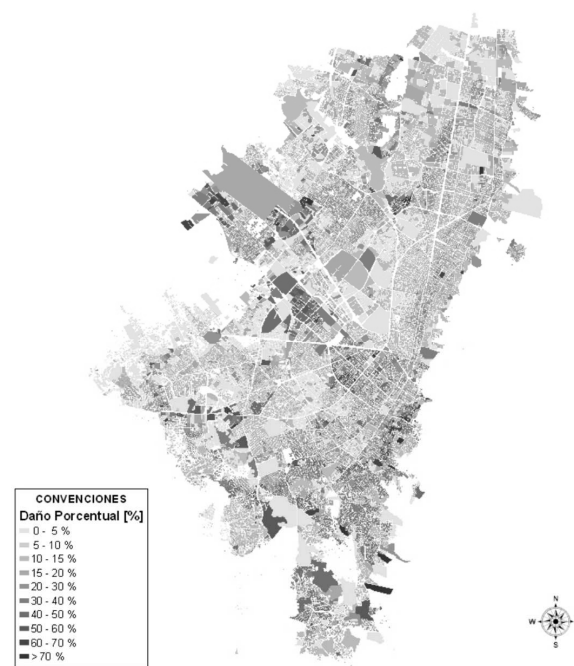
Se considera que los efectos indirectos de los eventos peligrosos, medidos por el coeficiente  $F$  en la Ecuación (3), pueden ser del mismo orden de magnitud que los efectos directos. De acuerdo con la Comisión Económica de Naciones Unidas para Latinoamérica y el Caribe, CEPAL, se estima que los efectos económicos indirectos de un desastre natural dependen del tipo de fenómeno [64]. El orden de magnitud de los efectos económicos indirectos para un desastre ‘húmedo’ (por ejemplo, causado por una inundación) podrían llegar a ser del orden de 0.50 a 0.75 de los efectos directos. En el caso de un desastre ‘seco’ (por ejemplo, un sismo), los efectos indirectos podrían llegar a ser del orden de 0.75 a 1.00

de los efectos directos. La diferencia radica en el tipo de daño que ocasionan (destrucción de cultivos, infraestructura, viviendas, etc.). Esto significa que el riesgo total  $USR_i$  ( $R_T$ ) podría ser del orden de 1.5 y 2 veces el  $R_F$ . En este método se asume que el valor máximo es 2 por lo que el coeficiente de agravamiento  $F$  toma valores entre 0 y 1 en la ec.(2).

Finalmente, se recuerda que el cálculo de escenarios de riesgo físico que permitan obtener los factores de riesgo no es el objetivo de este artículo, sino que el índice de riesgo físico es obtenido partiendo de las evaluaciones de pérdidas existentes. Además, puede mencionarse que en caso de una evaluación holística multiamenaza del riesgo, sería necesario disponer de estimaciones del daño físico para todas las amenazas incluidas en el análisis.



**Figura 6.** División político-administrativa de Bogotá, Colombia



**Figura 7.** Escenario de riesgo sísmico físico de Bogotá, Colombia [57]

## 5. Ejemplos de aplicación

### 5.1. Riesgo sísmico de Bogotá, Colombia

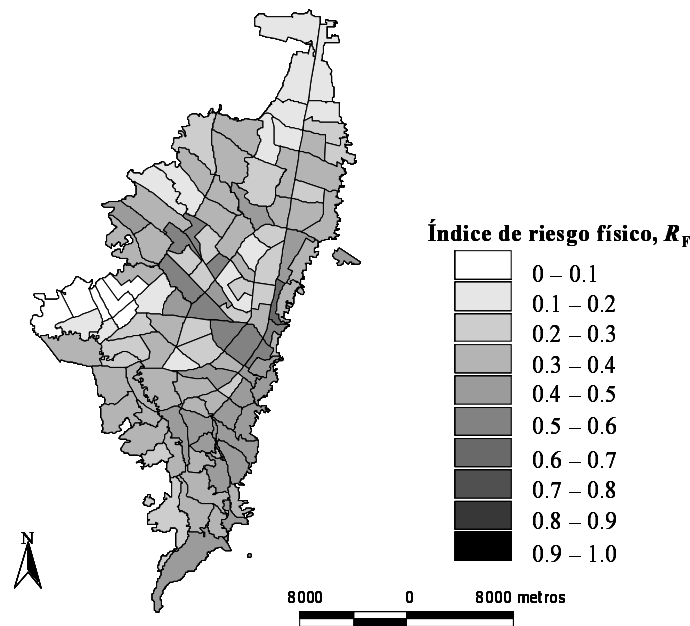
En Bogotá, la capital de Colombia, las localidades o alcaldías menores, son subdivisiones político-administrativas del territorio urbano con competencias claras y con criterios de financiación y de aplicación de recursos. Se crearon con el objetivo de atender de una forma más eficaz las necesidades de la población de cada territorio. Desde 1992, Bogotá está dividida en 20 localidades, las cuales se pueden ver en la Figura 6: Usaquén, Chapinero, Santafé, San Cristóbal, Usme, Tunjuelito, Bosa, Ciudad Kennedy, Fontibón, Engativá, Suba, Barrios Unidos, Teusaquillo, Mártires, Antonio Nariño, Puente Aranda, Candelaria, Rafael Uribe, Ciudad Bolívar y Sumapaz. En este ejemplo se consideraron sólo 19 de estas localidades ya que la localidad de Sumapaz corresponde a la zona rural. Estas localidades están subdivididas en 117 unidades territoriales denominadas Unidades de Planeamiento Zonal, UPZ.

La amenaza sísmica es la más significativa para Bogotá. Como punto de partida para la aplicación del modelo de evaluación holística del riesgo propuesto se utilizó el escenario de riesgo sísmico físico ilustrado en la Figura 7 [57]. Dicho escenario muestra el área destruida en celdas predefinidas considerando que un terremoto con una magnitud  $M_s$  de 7.4 y un período de retorno de 500 años ocurre en la falla frontal de la cordille-

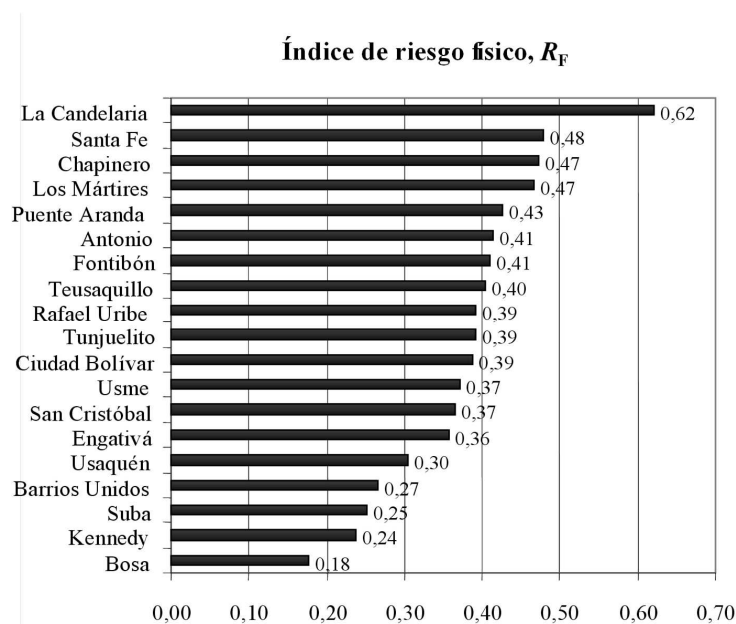
ra oriental [57] y se calculó mediante simulación edificio por edificio. De esta manera, al aplicar el modelo de evaluación holística propuesto en el Apartado 4, los descriptores del riesgo físico se han obtenido para cada UPZ pero, tal como se verá más adelante, la información relacionada con el coeficiente de agravamiento ha sido calculada para cada localidad y no para cada UPZ.

Partiendo de los descriptores del riesgo físico obtenidos del escenario de la Figura 7, se han calculado los valores del índice de riesgo físico que se muestran en la Figura 8 para cada UPZ utilizando las funciones de transformación de la Figura 3 y los pesos de la Tabla 4 obtenidos en la Sección 4.3 usando el PAJ. En la Figura 9 puede verse un diagrama de barras que muestra los índices de riesgo físico para las localidades de Bogotá en orden descendente, que se han calculado normalizando los valores obtenidos para las UPZ con la densidad de población.

Los descriptores para la fragilidad social y la falta de resiliencia de Bogotá están disponibles sólo a nivel de localidades, con lo que la aplicación de las funciones de transformación de las Figuras 4 y 5 ha proporcionado los factores de agravamiento por localidades. Partiendo de éstos y de los pesos de los factores de agravamiento calculados en la Sección 4.3 usando el PAJ que se muestran en la Tabla 6, se han calculado los coeficientes de agravamiento por localidades que pueden verse en la



**Figura 8.** Índice de riesgo físico,  $R_F$ , para las UPZ de Bogotá

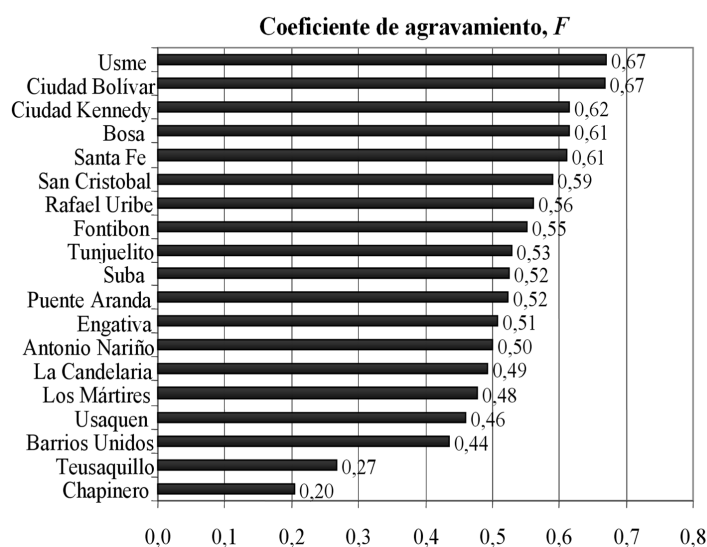


**Figura 9.** Índice de riesgo físico para las localidades de Bogotá

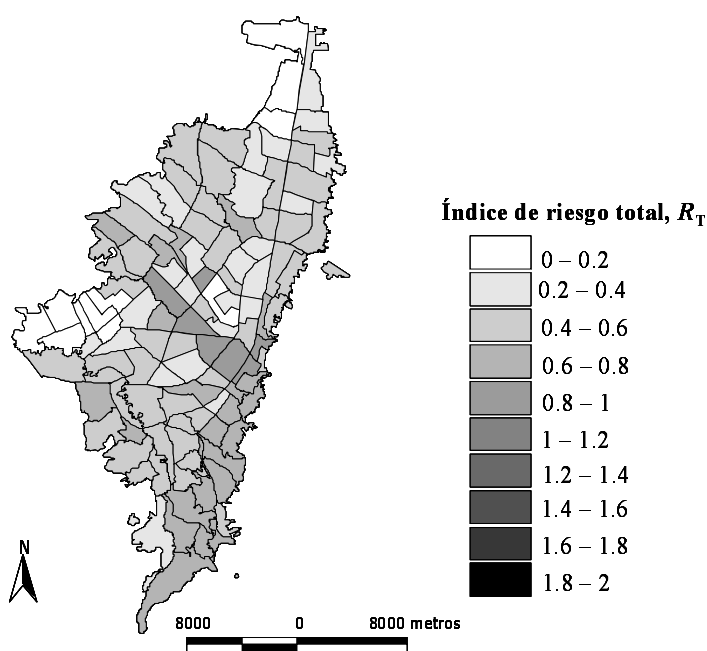
Figura 10 ordenadas de manera decreciente. Los valores promedio del riesgo total por UPZ se muestran en la Figura 11 mientras que en la Figura 12 se muestra un diagrama de barras con los valores de los índices de riesgo total calculados por localidades.

En las Figuras 9 y 12 se puede observar que la localidad de La Candelaria tiene la situación más crítica desde el punto de vista del riesgo sísmico físico y total, ya que su coeficiente de agravamiento es significativo, aunque no es el mayor en la ciudad. Las localidades con mayor coeficiente de agravamiento son Usme, Ciu-

dad Bolívar, Ciudad Kennedy y Bosa, donde los valores más bajos son los de Barrios Unidos, Teusaquillo y Chapinero. Las localidades con el mayor riesgo físico son, además de La Candelaria, las localidades de Santa Fe, Chapinero y Los Mártires, mientras que el menor riesgo físico es el de Ciudad Kennedy y Bosa. Los mayores valores de riesgo total aparecen en las localidades de La Candelaria, Santafé y Los Mártires, y los valores menores son los de Ciudad Kennedy, Barrios Unidos y Bosa.



**Figura 10.** Coeficiente de agravamiento para las localidades de Bogotá, en orden descendente



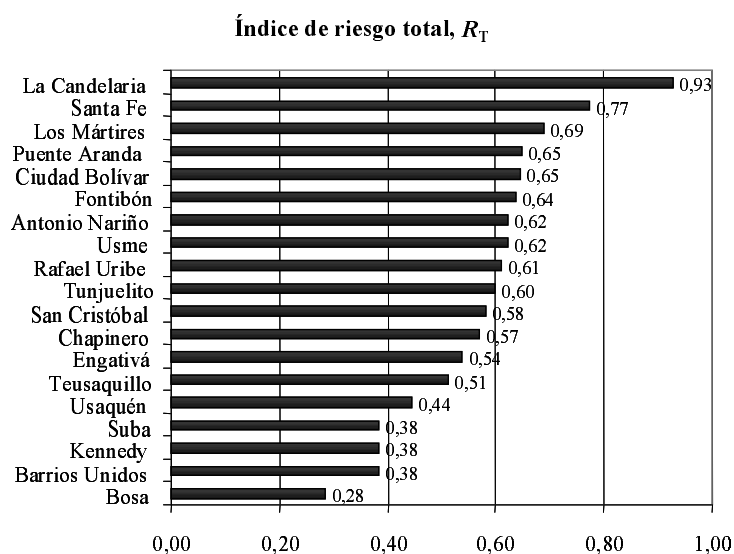
**Figura 11.** Índice de riesgo total,  $R_T$ , para las UPZ de Bogotá

## 5.2. Riesgo sísmico de Barcelona, España

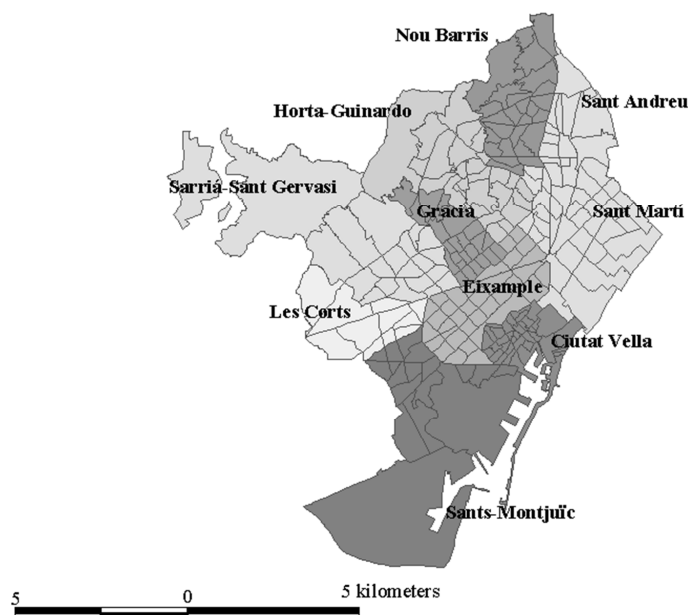
La ciudad de Barcelona, España, está subdividida en los 10 distritos que pueden verse en la Figura 13 y son: Ciutat Vella, Eixample, Sants-Montjuïc, Les Corts, Sarrià-Sant Gervasi, Gràcia, Horta-Guinardó, Nou Barris, Sant Andreu y Sant Martí. Dichos distritos tienen competencias en temas de urbanismo, espacio público, mantenimiento de infraestructuras, etc. y, a su vez, se subdividen en 38 barrios o zonas estadísticas grandes. Barcelona también está subdividida en 248 zonas es-

tadísticas pequeñas, ZRP (“Zonas de Recerca Petitas” en catalán). El índice de riesgo físico se calculó utilizando un escenario de riesgo probabilista obtenido en el marco del proyecto RISK-UE [31] y que se muestra en la Figura 13 considerando las 248 zonas ZRP. Sin embargo, el coeficiente de agravamiento se calculó por distrito debido a la disponibilidad de datos solamente a este nivel.

A partir del escenario de riesgo sísmico físico de la Figura 14, se han obtenido los descriptores del riesgo físico para las 248 ZRP y, luego, aplicando las funcio-



**Figura 12.** Índice de riesgo total para las localidades de Bogotá, en orden descendente



**Figura 13.** División territorial de Barcelona

nes de transformación de la Figura 3, los factores de riesgo físico. La Figura 15 muestra los índices de riesgo físico por ZRP, que se han obtenido utilizando en la ec.(4) los factores de riesgo físico así obtenidos y los pesos de la Tabla 4. Los factores de agravamiento se han obtenido por distrito (véase la Figura 16) partiendo de los valores de los descriptores de fragilidad social y falta de resiliencia y aplicando las funciones de transformación de la Figura 4. Utilizando los mismos pesos que para Bogotá (Tabla 6) se ha calculado el coeficiente de agravamiento por distrito; la ecuación de Moncho

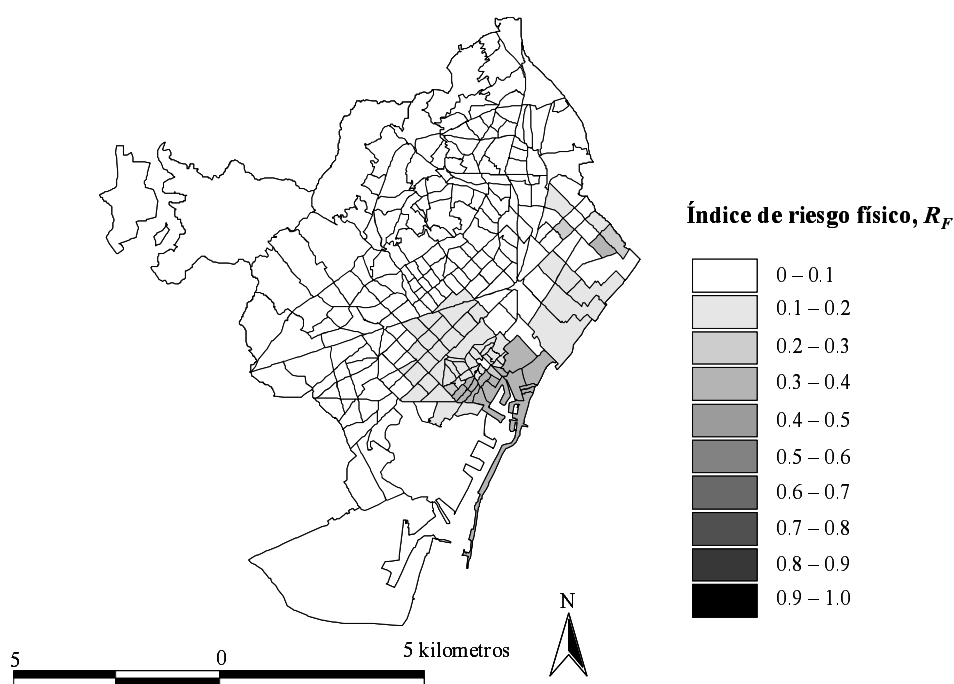
proporciona finalmente el índice de riesgo total para Barcelona que ha sido representado en la Figura 17.

### 5.3. Riesgo sísmico de Metro Manila, Filipinas

Metro-Manila, la capital de Las Filipinas, es oficialmente llamada Región Capital Nacional (the National Capital Region). Aunque es la región más pequeña, es la más densamente poblada del país. Está compuesta por 4 municipios, Taguig, Pateros, San Juan y Navotas y 13 ciudades: Quezon, Kaloocan, Valenzuela, Muntin-



**Figura 14.** Escenario de riesgo sísmico físico para Barcelona, usando los 248 zonas estadísticas menores (ZRP)



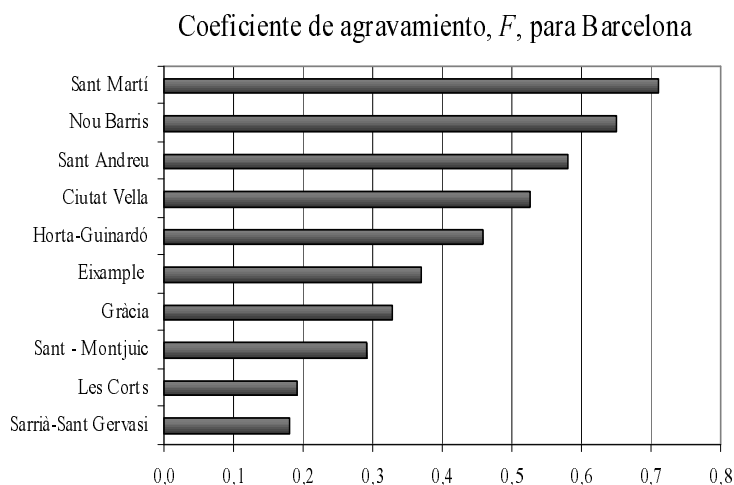
**Figura 15.** Índice de riesgo físico para Barcelona representado por las 248 ZRP

lupa, Las Piñas, Marikina, Manila, Parañaque, Makati, Mandaluyong, Malabon, Pasay y Pasig que pueden verse en la Figura 18.

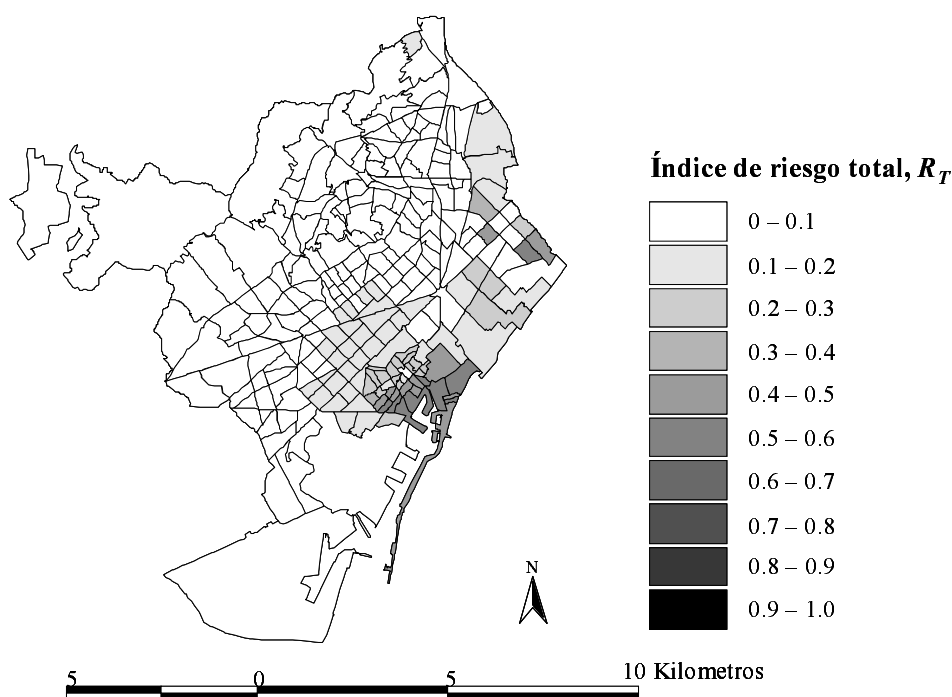
Para el cálculo del  $USR_i$ , el índice de riesgo físico se calculó usando los descriptores de riesgo físico obtenidos del Earthquake Impact Reduction Study of Metro Manila (MMEIRS-08), para el escenario correspondiente a

un terremoto de magnitud 7.2 en la falla West Valley. Las Figuras 19 a 21 muestran el índice de riesgo sísmico físico, el coeficiente de agravamiento y el índice de riesgo sísmico total, respectivamente.

En la Tabla 7 se muestran las ciudades de Metro-Manila agrupadas, de acuerdo con su nivel de riesgo, en cuatro grupos según el índice de riesgo sísmico total y de



**Figura 16.** Coeficiente de agravamiento para los distritos de Barcelona



**Figura 17.** Índice de riesgo total de Barcelona por ZRP

sus componentes, el riesgo sísmico físico y el coeficiente de agravamiento.

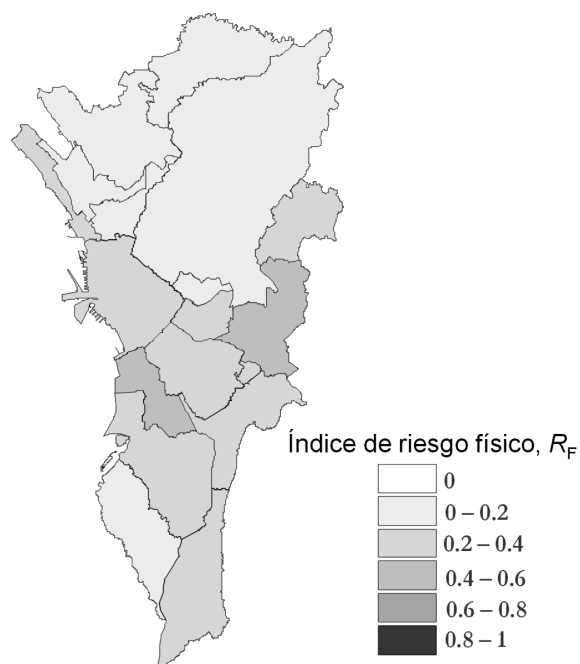
#### 5.4. Comparación y discusión de los resultados

Promediando de acuerdo con la densidad de población, se obtuvieron resultados globales para cada ciudad. La Tabla 8 muestra los valores promedios del riesgo para las ciudades de Bogotá, Barcelona y Metro Manila. Las ciudades de Bogotá y Metro Manila están localizadas en una zona con amenaza sísmica intermedia,

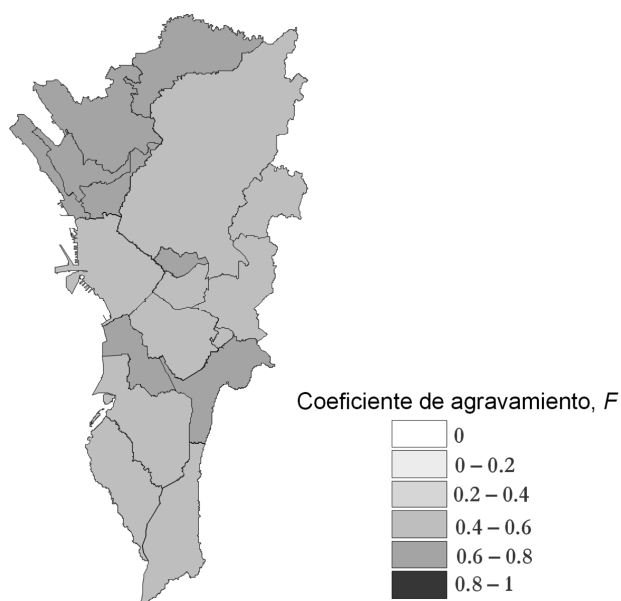
mientras que Barcelona está localizada en una zona con amenaza sísmica baja a moderada. Los valores promedios obtenidos para el índice de riesgo físico,  $R_F$ , no solo reflejan claramente esta situación, sino que también reflejan el nivel de vulnerabilidad de cada ciudad. Cabe mencionar que los resultados obtenidos del coeficiente de agravamiento,  $F$ , en las tres ciudades no son muy diferentes. En cuanto al riesgo físico,  $R_f$  la peor situación la presenta Bogotá, mientras que Barcelona presenta el valor medio más bajo debido a que la amenaza sísmica a la que se encuentra expuesta es considerablemente me-



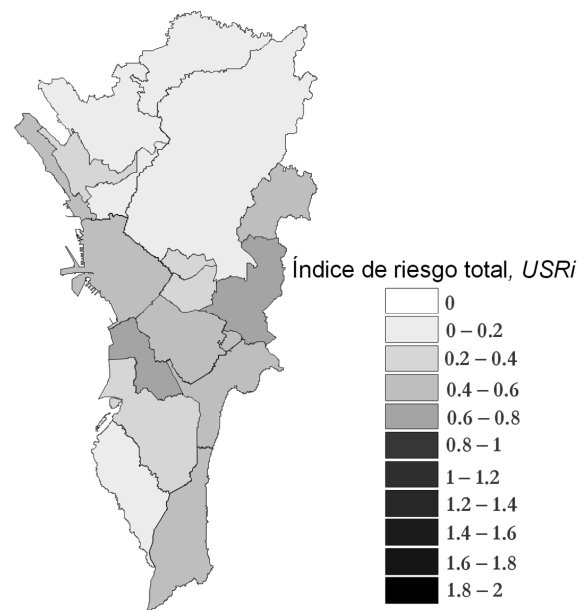
**Figura 18.** Metro-Manila y las ciudades componentes



**Figura 19.** Índice de riesgo físico,  $R_F$ , para Metro-Manila



**Figura 20.** Coeficiente de agravamiento,  $F$ , para Metro-Manila



**Figura 21.** Índice de riesgo sísmico total,  $USR_i$ , para Metro-Manila

nor. En el caso del coeficiente de agravamiento, la peor situación es para Metro Manila, mientras que Barcelona presenta el valor medio más bajo, aunque no es muy lejano al correspondiente a Metro Manila. Cuando se hace la evaluación holística del riesgo sísmico para

las tres ciudades, se observa que en promedio en mayor riesgo total lo presenta la ciudad de Bogotá y el menor la ciudad de Barcelona.

**Tabla 7.** Evaluación holística del riesgo sísmico urbano en Metro-Manila

| Componente                          | Grado      | Rango       | Ciudades de Metro Manila                                                               |
|-------------------------------------|------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Riesgo físico</b>                | Muy alto   | 0.45 - 1.00 | Pasig, Pasay                                                                           |
|                                     | Alto       | 0.30 - 0.44 |                                                                                        |
|                                     | Medio-alto | 0.20 - 0.29 | Pateros, Muntinlupa, Marikina, Makati, Manila, Navotas, Taguig, Mandaluyong, Paranaque |
|                                     | Medio-bajo | 0.10 - 0.19 | Las Piñas, Quezon, Malabon, San Juan                                                   |
|                                     | Bajo       | 0.00 - 0.09 | Valenzuela, Kalookan                                                                   |
| <b>Coefficiente de agravamiento</b> | Muy alto   | 0.65 - 1.00 | Navotas, Malabon, Taguig, San Juan                                                     |
|                                     | Alto       | 0.55 - 0.64 | Kalookan, Valenzuela, Pasay, Pateros, Las Piñas, Quezon, Pasig                         |
|                                     | Medio-alto | 0.40 - 0.54 | Marikina, Paranaque, Mandaluyong, Manila, Makati, Muntinlupa                           |
|                                     | Medio-bajo | 0.20 - 0.39 |                                                                                        |
|                                     | Bajo       | 0.00 - 0.19 |                                                                                        |
| <b>Riesgo total</b>                 | Muy alto   | 0.70 - 1.00 | Pasay, Pasig                                                                           |
|                                     | Alto       | 0.45 - 0.69 | Navotas, Pateros, Marikina, Taguig                                                     |
|                                     | Medio-alto | 0.30 - 0.44 | Muntinlupa, Manila, Makati, Mandaluyong, Paranaque                                     |
|                                     | Medio-bajo | 0.15 - 0.29 | Las Piñas, Quezon, Malabon, San Juan                                                   |
|                                     | Bajo       | 0.00 - 0.14 | Kalookan, Valenzuela                                                                   |

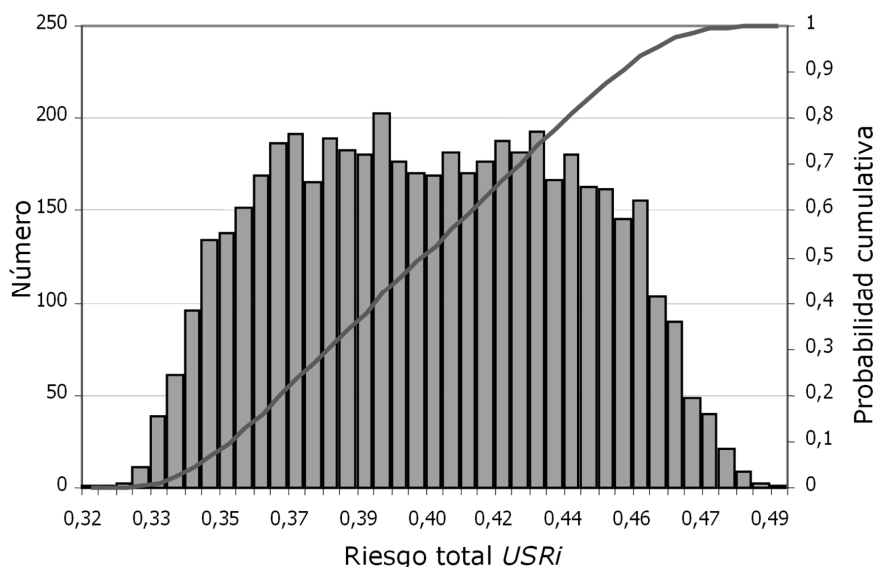
**Tabla 8.** Comparación de los valores promedio entre Bogotá y Barcelona

| Index                             | Bogotá 2005 | Barcelona | Metro Manila |
|-----------------------------------|-------------|-----------|--------------|
| Riesgo físico, $R_F$              | 0,32        | 0,08      | 0,24         |
| Coefficiente de agravamiento, $F$ | 0,55        | 0,42      | 0,59         |
| Riesgo total, $R_T$               | 0,50        | 0,11      | 0,38         |

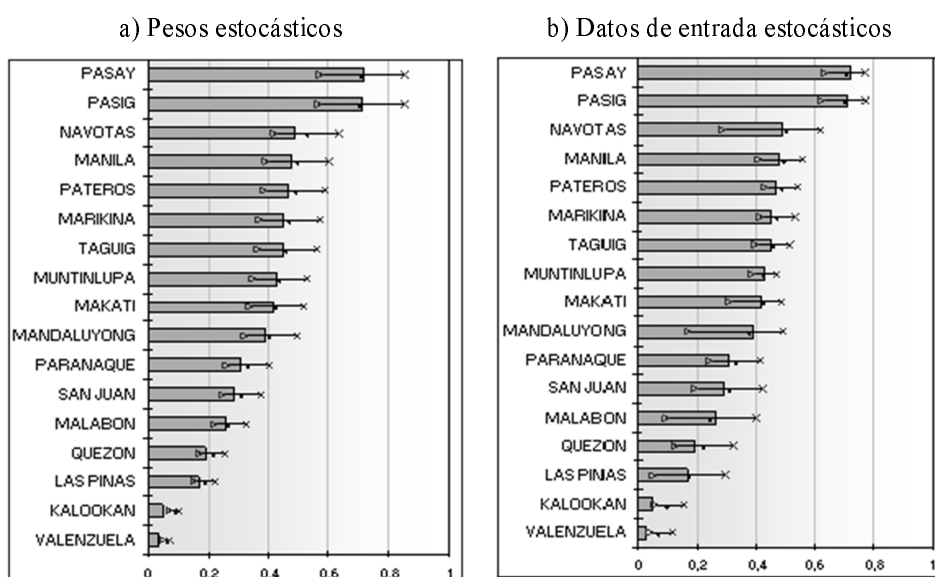
## 6. Análisis de la robustez del modelo propuesto

La robustez del modelo de evaluación holística del riesgo que se ha propuesto se ha examinando mediante simulación por el método de Monte Carlo que, habitualmente, se utiliza para estudiar cómo se propagan en los resultados las incertidumbres en los datos de entrada y en los parámetros del propio modelo de cálculo. De esta manera, es posible diagnosticar, por una parte, si los resultados esperados cumplen con ciertos criterios de seguridad característicos del problema analizado y, por otra, si el modelo es robusto y fiable, especialmente cuando éste es complejo, no lineal y/o con parámetros inciertos [30]. La técnica de simulación consiste en considerar como aleatorias las variables con incertidumbres y en generar un número suficientemente grande de conjuntos de datos de entrada del problema y de parámetros del modelo de evaluación, realizando un muestreo de cada variable dentro de un rango aceptable de variabilidad. Luego, para cada conjunto de datos generado se calculan, mediante el modelo de análisis, las variables de salida que se quieren estudiar, que también son aleatorias y, al final, se estudian sus características estadísticas que se pueden interpretar en términos de seguridad, robustez, fiabilidad, etc.

En la simulación realizada para estudiar la robustez del modelo propuesto de evaluación holística del riesgo, se han considerado como variables de salida los índices de riesgo total,  $USR_i$ , correspondientes a las unidades de análisis y se ha examinado su sensibilidad a las incertidumbres tanto en los datos de entrada (que, en este caso, son los valores de los descriptores del riesgo  $X_{RFi}$ ,  $X_{FSi}$  y  $X_{FRi}$ ) como en los parámetros del modelo mencionado (que, en este caso, son las funciones de transformación de las Figuras 3, 4 y 5 y los coeficientes de ponderación de los factores de riesgo  $w_{RFi}$ ,  $w_{FSi}$  y  $w_{FRj}$ ). Al considerar como aleatorias estas variables y funciones, se han generado cinco mil conjuntos de datos de entrada para el problema. Los valores mínimos y máximos que definen el intervalo de variación de cada una de las variables fueron elegidos de acuerdo con opiniones de expertos. Para cada variable del conjunto mencionado se han obtenido los valores aleatorios considerando distribuciones uniformes en cada intervalo característico de las variables. Luego, para cada conjunto de valores generado, se han efectuado cinco mil cálculos deterministas aplicando la metodología o modelo propuesto y se han obtenido cinco mil valores de  $USR_i$  para cada unidad territorial de análisis y se han estudiado estadísticamente. Primeramente, se han creado histogramas para visualizar la incertidumbre de



**Figura 22.** Ejemplo de un histograma de resultados del índice de riesgo total,  $USR_i$ , para Mandaluyong City, considerando los coeficientes de ponderación estocásticos



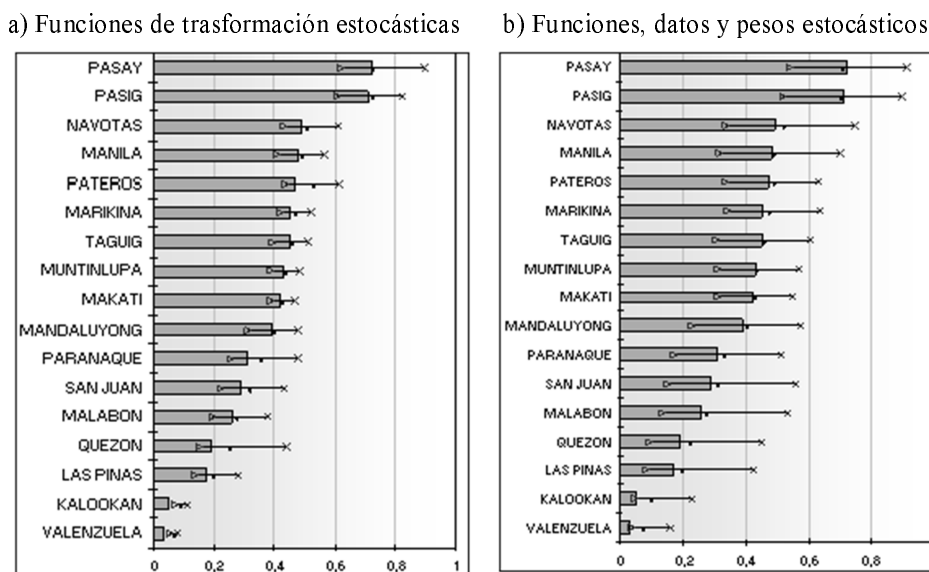
**Figura 23.** Variación de los valores del  $USR_i$  obtenidos por simulación para a) pesos estocásticos y b) la variación estocástica de los datos de entrada

los resultados, en los que puede verse el perfil de los resultados, el grado de incertidumbre y la distribución existente. La Figura 22 muestra un ejemplo de un histograma para Mandaluyong City de Metro Manila, junto la función de distribución acumulada.

Luego se han construido las graficas de variabilidad o volatilidad de las Figuras 23 y 24. Éstas comparan los valores mínimo (▷), máximo (×) y medio (■) con los  $USR_i$  obtenidos en cada unidad territorial para valores fijos de los parámetros (barras), considerando para dichos valores las características originales del modelo de evaluación holística del riesgo (parámetros y funciones)

utilizados en los ejemplos del Apartado 5. Puede observarse que la volatilidad de los valores de  $USR_i$  no es muy alta cuando se considera la aleatoriedad de cada parámetro por separado. La incertidumbre es mayor en el caso en que se considera la variación simultánea de los parámetros (Figura 24b).

La Tabla 9 muestra cómo los valores obtenidos mediante simulación son muy similares a los obtenidos utilizando valores fijos para los datos de entrada, los pesos y las funciones de transformación del modelo de evaluación propuesto. En general, los resultados muestran que el ranking de las ciudades del área metropolitana varía



**Figura 24.** Variación de los valores del  $USR_i$  obtenidos por simulación para a) funciones de transformación estocásticas y b) la variación estocástica simultanea considerando la aleatoriedad de los datos, pesos y funciones

**Tabla 9.** Comparación entre los valores del  $USR_i$  obtenidos con valores fijos y con valores estocásticos para las ciudades de Metro-Manila, considerando niveles de riesgo

| Nivel de riesgo | Valores fijos |         | Datos aleatorios |         | Pesos aleatorios |         | Funciones aleatorias |         |
|-----------------|---------------|---------|------------------|---------|------------------|---------|----------------------|---------|
|                 | Ciudad        | $USR_i$ | Ciudad           | $USR_i$ | Ciudad           | $USR_i$ | Ciudad               | $USR_i$ |
| Muy alto        | Pasay         | 0.72    | Pasay            | 0.70    | Pasay            | 0.71    | Pasay                | 0.70    |
|                 | Pasig         | 0.71    | Pasig            | 0.70    | Pasig            | 0.70    | Pasig                | 0.70    |
| Alto            | Navotas       | 0.49    | Manila           | 0.52    | Manila           | 0.53    | Manila               | 0.53    |
|                 | Manila        | 0.48    | Navotas          | 0.49    | Navotas          | 0.49    | Navotas              | 0.49    |
|                 | Pateros       | 0.47    | Pateros          | 0.49    | Pateros          | 0.49    | Pateros              | 0.49    |
|                 | Marikina      | 0.45    | Marikina         | 0.47    | Marikina         | 0.46    | Marikina             | 0.47    |
|                 | Taguig        | 0.45    | Taguig           | 0.46    | Taguig           | 0.46    | Taguig               | 0.46    |
| Medio-alto      | Muntinlupa    | 0.43    | Makati           | 0.43    | Makati           | 0.43    | Makati               | 0.43    |
|                 | Makati        | 0.42    | Muntinlupa       | 0.43    | Muntinlupa       | 0.42    | Muntinlupa           | 0.43    |
|                 | Mandaluyong   | 0.39    | Mandaluyong      | 0.40    | Mandaluyong      | 0.40    | Mandaluyong          | 0.40    |
|                 | Paranaque     | 0.31    | Paranaque        | 0.33    | Paranaque        | 0.33    | Paranaque            | 0.33    |
| Medio-bajo      | San Juan      | 0.29    | San Juan         | 0.31    | San Juan         | 0.31    | San Juan             | 0.32    |
|                 | Malabon       | 0.26    | Malabon          | 0.27    | Malabon          | 0.27    | Malabon              | 0.27    |
|                 | Quezon        | 0.19    | Quezon           | 0.21    | Quezon           | 0.21    | Quezon               | 0.22    |
|                 | Las Pinas     | 0.17    | Las Pinas        | 0.19    | Las Pinas        | 0.19    | Las Pinas            | 0.19    |
| Bajo            | Kalookan      | 0.05    | Kalookan         | 0.09    | Kalookan         | 0.09    | Kalookan             | 0.09    |
|                 | Valenzuela    | 0.03    | Valenzuela       | 0.07    | Valenzuela       | 0.06    | Valenzuela           | 0.06    |

levemente. Algunas ciudades de Metro Manila fluctúan tan solo en una posición. En el caso de otros centros urbanos, como Bogotá, Barcelona y Manizales, donde este modelo ha sido también aplicado y donde también se ha realizado un análisis de sensibilidad, los resultados son similares a los obtenidos para Metro Manila.

De acuerdo con la clasificación del riesgo total por niveles, todas las ciudades de Metro Manila mantienen el mismo nivel, con la excepción de la ciudad de San Juan, que presenta un cambio de nivel de medio-alto a medio-bajo, debido a que el resultado total de ries-

go para valores fijos es igual a 0,29 y para los valores estocásticos el resultado fue mayor que 0,30. Esta clasificación por niveles de riesgo tiene especial interés, ya que para la gestión del riesgo es más relevante tener en cuenta el nivel de riesgo de una unidad territorial que su valor numérico.

## 7. Conclusiones

La estimación del riesgo requiere un enfoque multidisciplinar que tenga en cuenta no sólo el daño físico

esperado, el número de víctimas o las pérdidas económicas sino también los aspectos sociales, organizacionales e institucionales relacionados con el desarrollo de las comunidades que contribuyen a la creación del riesgo. A nivel urbano, por ejemplo, la vulnerabilidad vista como un factor de riesgo interno, puede ser relacionada no sólo con el nivel de exposición y con la susceptibilidad física de los edificios y de la infraestructura, sino también con la fragilidad social y la falta de resiliencia de la comunidad expuesta. Una mala organización institucional y comunitaria, una insuficiente preparación para la respuesta a la emergencia, la inestabilidad política y una economía débil, contribuyen a aumentar el riesgo. Por todo esto, las consecuencias potenciales negativas no están relacionadas sólo con los efectos de los mismos eventos peligrosos, sino también con la capacidad de la comunidad de absorber sus efectos y de controlar todas sus implicaciones.

En este artículo se ha propuesto un modelo simplificado pero multidisciplinar para la evaluación del riesgo sísmico urbano, con base en el uso paramétrico de las variables que reflejan los diferentes aspectos del riesgo. Dicho enfoque paramétrico ha permitido formular, de la manera más realista posible, un modelo de evaluación del riesgo en el cual se puedan introducir continuamente mejoras o aspectos alternativos o nuevos. La consideración de los aspectos físicos ha permitido la construcción de un índice de riesgo físico. La consideración de las variables contextuales (de índole socio-económica y de falta de resiliencia) ha permitido la construcción de un coeficiente de agravamiento y, mediante éste, de un factor de impacto. El índice de riesgo físico se obtiene a partir de la información existente que describe el daño sísmico físico (efectos directos) mediante escenarios; el coeficiente de agravamiento es el resultado de la estimación de las condiciones de agravamiento (efectos indirectos) a partir de descriptores relacionados con la fragilidad socio-económica y la falta de resiliencia de los elementos expuestos. En el artículo se han incluido y se han comparado los resultados de evaluación holística del riesgo obtenidos mediante el modelo de propuesto para las ciudades de Bogotá, Barcelona y Metro Manila.

Se ha demostrado que el modelo propuesto de evaluación holística del riesgo sísmico es robusto, al ser muy poco sensible a las posibles incertidumbres en los datos de entrada y a los cambios en los parámetros del modelo, tales como los pesos y las funciones de transformación. Es decir, los resultados que se obtienen aplicando el modelo son estables y fiables.

El modelo propuesto para la evaluación del riesgo sísmico facilita la gestión integral del riesgo por parte de los actores implicados. Su enfoque holístico contribuye a la efectividad de la gestión al invitar a la acción

y al permitir identificar las debilidades físicas y socio-económicas de los centros urbanos. Es útil para que se realice el seguimiento tanto de la situación del riesgo en un centro urbano como de la eficacia de las medidas de prevención y mitigación tomadas. El análisis de los resultados permite establecer las prioridades para las acciones de prevención y planificación con el fin de modificar aquellas condiciones que tienen mayor influencia sobre el riesgo de la zona urbana. Una vez que los resultados hayan sido expresados gráficamente para cada subdivisión administrativa de la zona, es fácil identificar los aspectos más relevantes del índice de riesgo total sin la necesidad de realizar nuevos análisis e interpretaciones de los resultados. Finalmente, el modelo de evaluación del riesgo propuesto permite comparar el riesgo sísmico entre diferentes ciudades del mundo. Además, el marco conceptual en el que se ha desarrollado el modelo permite su fácil extensión a la evaluación multiamenaza del riesgo.

## Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Banco Interamericano de Desarrollo (BID) por el soporte financiero a través del *Programa de Indicadores de Gestión de Riesgos de Desastres para Latinoamérica y el Caribe*, 2003-2005, operación ATN/JF-7907-RG; y 2008-2009, operación RG-T1579. Al Ministerio de Educación y Ciencia de España, programa CONSOLIDER, proyecto *Safety and Durability of Constructions, SEDUREC*, CSD2006-00060. Este trabajo se realizó también con el apoyo del Comisionado para Universidades e Investigación de Departamento de Innovación, Universidades y Empresa de la Generalitat de Cataluña (programa Beatriu de Pinos) y de la Comisión Europea (proyecto *Methods for the Improvement of Vulnerability Assessment in Europe*, MOVE, FP7-ENV-2007-1-211590).

## Referencias

1. Anagnos T., Rojahn C., Kiremidjian A. (1995) *NCEER-ATC joint study on fragility of buildings*. Report NCEER-95-0003. National Center for Earthquake Engineering Research. Buffalo, New York
2. ATC-13 (1985) *Earthquake Damage Evaluation Data for California*. Applied Technology Council. Redwood City, California
3. Barbat A.H., Yepez Moya F., Canas J.A. (1996) "Damage scenarios simulation for seismic risk assessment in urban zones". *Earthquake Spectra* 12(3):371-394
4. Barbat A.H., Mena U., Yepez F. (1998) "Evaluación probabilista del riesgo sísmico en zonas urbanas". *Rev. Int. Mét. Num. Cál. Dis. Ing.* 14:247-268
5. Barbat A.H., Cardona O.D. (2003) "Vulnerability and disaster risk indices from engineering perspective and holistic

- approach to consider hard and soft variables at urban level". *Programa de Indicadores de Riesgo y Gestión de Riesgos* BID/IDEA. Universidad Nacional de Colombia. Manizales. Disponible en: <http://idea.unalmz.edu.co>
6. Barbat A.H., Pujades L.G., Lantada N., Moreno R. (2006) "Performance of buildings under earthquake in Barcelona, Spain". *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 21:573-593
  7. Barbat A.H., Pujades L.G., Lantada N., Moreno R. (2008) "Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method: application to Barcelona". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 28:851-865
  8. Barbat A.H., Carreño M.L., Pujades L.G., Lantada N., Cardona O.D., Marulanda M.C. (2010) "Seismic vulnerability and risk evaluation methods for urban areas. A review with application to a pilot area". *Structure and Infrastructure Engineering*. 6 (1-2):17-38
  9. Benedetti D., Petrini V. (1984) "Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura i proposte di un metodo di valutazione". *L'industria delle Costruzioni*. 149: 66-74
  10. Blaikie P., Cannon T., Davis I., Wisner B. (1996) *Vulnerabilidad: El Entorno Social, Político y Económico de los Desastres*. La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. La RED/ITDG. Bogotá
  11. Cannon T. (1994) "Vulnerability analysis and the explanation of Natural Hazards". En *Disasters Development and Environment* A. Varley Ed. Wiley. Chichester.
  12. CAPRA (2010). [http://www.ecapra.org/capra\\_wiki/es\\_wiki/index.php?title=CAPRA-GIS](http://www.ecapra.org/capra_wiki/es_wiki/index.php?title=CAPRA-GIS). [consulta 22 de marzo de 2010]
  13. Cardona O.D. (1996) "Manejo ambiental y prevención de desastres: dos temas asociados". En *Ciudades en Riesgo*. M. A. Fernández Ed. La RED. USAID
  14. Cardona O.D. (2001) "Estimación Holística del Riesgo Sísmico utilizando Sistemas Dinámicos Complejos" Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España
  15. Cardona O.D. (2004) "The need for rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: A necessary review and criticism for effective risk management". En *Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People*. G. Bankoff, G. Frerks, D. Hilhorst Eds. Earthscan Publishers. Londres, UK. 37-51
  16. Cardona O.D., Barbat A.H. (2000) *El riesgo sísmico y su prevención*. Calidad Siderúrgica. Madrid, España
  17. Cardona O.D., Hurtado J.E. (2000) "Holistic seismic risk estimation of a metropolitan center". *Proceedings of 12th World Conference of Earthquake Engineering*. Auckland, Nueva Zelanda
  18. Cardona O.D., Ordaz M.G., Yamín L.E., Marulanda M.C., Barbat A.H. (2008a) "Earthquake loss assessment for integrated disaster risk management". *Journal of Earthquake Engineering*. 12(S2):48-59
  19. Cardona O.D., Ordaz M.G., Marulanda M.C., Barbat A.H. (2008b) "Estimation of probabilistic seismic losses and the public economic resilience-An approach for macroeconomic impact evaluation". *Journal of Earthquake Engineering*. 12(S2):60-70
  20. Carreño M.L. (2006) *Técnicas innovadoras para la evaluación del riesgo sísmico y su gestión en centros urbanos: Acciones ex ante y ex post*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona
  21. Carreño, M.L., Cardona, O.D. and Barbat, A.H. (2007a) "Urban Seismic Risk Evaluation: A Holistic Approach". *Natural Hazards*. 40 (1):137-132
  22. Carreño M.L., Cardona O.D., Barbat A.H. (2007b) "Disaster risk management performance index". *Natural Hazards*. 41:1-20
  23. Carreño M.L., Cardona O.D., Barbat A.H. (2005) *Sistema de indicadores para la evaluación de riesgos*. Monografía de ingeniería sísmica IS-52. A.H. Barbat Ed. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). Barcelona, España
  24. Chambers R. (1989) "Vulnerability, coping and policy". *IDS Bulletin No. 20*, Institute of Development Studies. Sussex
  25. Coburn A., Spence R. (1992) *Earthquake protection*. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, UK
  26. Douglas M., Wildavsky A. (1982) *Risk and Culture: An Essay on the Selection of Technological and Environmental Dangers*. Berkeley. Press of the University of California
  27. Dynes R.R., Drabek T.E. (1994) "The structure of disaster research: its policy and disciplinary implications". *International Journal of Mass Emergencies and Disasters* 12:5-23
  28. FEMA/NIBS (2002) *HAZUS 99/SR2 Technical Manual*. Federal Emergency Management Agency, FEMA & National Institute of Building Sciences, NIBS. Washington D.C. Tomos 1, 2 y 3
  29. 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
  30. Hurtado J.E., Barbat A.H. (1998) "Monte Carlo techniques in computational stochastic mechanics". *Archives of Computational Methods in Engineering*. 5(1):3-30
  31. ICC/CIMNE (2004) *An Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios with Applications to Different European Towns, WP08, Application to Barcelona*. RISK-UE project of the European Commission
  32. IDEA (2005) *System of indicators for disaster risk management: Main technical report*. IDB/IDEA Programme of Indicators for Disaster Risk Management (Manizales: UNC).
  33. JRC-EC (2002) *State-of-the-art Report on Current Methodologies and Practices for Composite Indicator Development*. Applied Statistics Group. Joint Research Centre. European Commission. Ispra, Italia
  34. JRC-EC (2003) *First Workshop on Composite Indicators of Country Performance*. Applied Statistics Group. Joint Research Centre. European Commission. Ispra, Italia
  35. Kappos A., Pitilakis K., Stylianidis K., 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
  36. Karlsson J. (1998) *A systematic approach for prioritizing software requirements*. Ph.D. dissertation No. 526. Linköping, Sverige
  37. Kasperson R.E., Renn O., Slovic P., Brown H.S., Emel J., Goble R., Kasperson J.X., Ratick S. (1988) "The social amplification of risk: A conceptual framework". *Risk Analysis* 8(2):177-187
  38. Kates R.W. (1971) "Natural hazard in human ecological perspective: hypotheses and models". *Economic Geography*. Clark University. 47(3):438-451
  39. Lavell A. (1996) "Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: Hacia la definición de una agenda de investigación". En *Ciudades en riesgo*. M. A. Fernández Ed. La RED, USAID
  40. Mansilla E. (editor) (1996) *Desastres: Modelo para armar*. La RED. Lima, Perú
  41. Maskrey A. (1994) "Comunidad y Desastres en América Latina: Estrategias de Intervención", en *Viviendo en Riesgo: Comunidades vulnerables y prevención de desastres en América Latina*. Allan Lavell Ed. LA RED. Tercer Mundo Editores. Bogotá, Colombia

42. Masure, P. (2003) "Variables and indicators of vulnerability and disaster risk for land-use and urban or territorial planning". Programa de Indicadores para la Gestión de Riesgos, BID/IDEA, disponible en: <http://idea.unalmz.edu.co>. Universidad Nacional de Colombia, Manizales
43. Milutinovic Z.V., Trendafiloski G.S. (2003) *Vulnerability of current buildings*. Work Package 4 of RISK-UE Project. European Commission. EVK4-CT-2000-00014
44. Miranda E. (1999) "Approximate seismic lateral deformation demands on multistory buildings". *Journal of Structural Engineering*. 125(1):417-425
45. Ordaz M. (2000). *Metodología para la Evaluación del Riesgo Sísmico Enfocada a la Gerencia de Seguros por Terremoto*. Universidad Nacional Autónoma de México. México DF.
46. Ordaz M., Miranda E., Reinoso E., Pérez Rocha L.E. (1998) *Seismic Loss Estimation Model for México City*. Universidad Nacional Autónoma de México. México DF.
47. Palmlund I. (1989) *The Case of Estrogens: An Inquiry Into Social Risk Evaluation*. Doctoral dissertation. Clark University.
48. Quarantelli E.L. (1988) "Disaster studies: an analysis of the social historical factor affecting the development of research in the area". *International Journal of Mass Emergencies*. 5(3):285-310
49. Rayner S. (1992) "Cultural theory and risk analysis". en *Social Theories of Risk*. S. Krinsky y D. Golding Eds. Praeger, West Port, CT
50. Saaty T.L. (1987) "The analytic hierarchy process: what it is and how it is used". *Mathematical Modeling*. 9:161-176
51. Saaty T.L., Vargas L.G. (1991) *Prediction, Projection, and Forecasting: Applications of the Analytical Hierarchy Process in Economics, Finance, Politics, Games, and Sports*. Kluwer Academic Publishers. Boston, USA
52. Saaty T.L. (2001) *Decision making for leaders the analytic hierarchy process for decisions in a complex world*. Pittsburgh RWS, USA
53. Singhal A., Kiremidjian A.S. (1996) "Method for probabilistic evaluation of seismic structural damage". *Journal of Structural Engineering ASCE*. 122(12):1459-1467
54. Susman P., O'Keefe P., Wisner B. (1984) *Global disasters: A Radical Interpretation*. Hewitt. pp.264-83.
55. UNDRO (1980) *Natural Disasters and Vulnerability Analysis*. Report of Experts Group Meeting. UNDRO. Geneva.
56. Universidad de los Andes (1996) *Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá*. Ingeominas. Bogotá, Colombia
57. Universidad de los Andes (2005) *Escenarios de riesgo y pérdidas por terremoto para Bogotá, D.C*. Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos CEDERI. Alcaldía Mayor de Bogotá. Dirección de Prevención y Atención de Emergencias, DPAAE. Bogotá, Colombia
58. Wesgate K.N., O'Keefe P. (1976) "Some definitions of disaster". *Disaster Research Unit*. Paper No. 4. University of Bradford
59. Wijkman A., Timberlake L. (1984) *Natural Disasters: Act of God or Acts of Man*. Earthscan, Washington
60. White G.F. (1964) "Choice of adjustment of floods". Research Paper 93. Department of Geography. Universidad de Chicago
61. Whitman R.V. (1973) *Damage Probability Matrices for Prototype Buildings*. Structures Publication 380. Department of Civil Engineering. Massachusetts Institute of Technology. Boston, Massachusetts
62. Whitman R.V., Reed J.W., Hong S.T. (1974) "Earthquake damage probability matrices". *Proceedings of the 5th European Conference on Earthquake Engineering*. Rome. p. 2531
63. Wilches-Chaux G. (1989) *Desastres, ecologismo y educación y profesional*, SENA. Popayán, Colombia
64. Wisner B. (1993) "Disaster vulnerability: scale, power and daily life". *GeoJournal*. 30(2):127-40
65. Zapata R. (2004) Comunicación personal