



Evaluación probabilista del riesgo sísmico en Lorca mediante simulaciones de escenarios



M.A. Salgado-Gálvez^{a,*}, M.L. Carreño^a, A.H. Barbat^a y O.D. Cardona^b

^a Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE), Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España

^b Instituto de Estudios Ambientales (IDEA), Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Manizales, Colombia

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 20 de noviembre de 2014

Aceptado el 4 de diciembre de 2014

On-line el 11 de marzo de 2015

Palabras clave:

Peligrosidad sísmica

Evaluación de riesgo sísmico

Simulación numérica

Curva de excedencia de pérdidas

Pérdida anual esperada

R E S U M E N

En este artículo se ha realizado una evaluación probabilista e integral del riesgo sísmico para las edificaciones de Lorca, la ciudad más afectada tras el sismo de mayo de 2011 en la Región de Murcia, España. La amenaza sísmica se ha representado mediante un conjunto de escenarios estocásticos que permite considerar el efecto de eventos pequeños, moderados y extremos en las posibles pérdidas futuras. Mediante funciones de transferencia espectral, se ha considerado la respuesta dinámica del suelo. Se ha utilizado una base de datos de elementos expuestos con nivel de resolución edificio por edificio, la cual permite la desagregación de los resultados en diferentes categorías y, además, la obtención de mapas de riesgo sísmico para la visualización de la distribución geográfica de las pérdidas futuras. Para cada una de las tipologías estructurales identificadas se ha asignado una función de vulnerabilidad que permite obtener las pérdidas esperadas para diferentes niveles de aceleración. Los resultados de riesgo se han obtenido en forma de curva de excedencia de pérdidas a partir de la cual pueden derivarse otras métricas probabilistas de riesgo como la pérdida anual esperada y la pérdida máxima probable. Los resultados de riesgo resultan útiles para los tomadores de decisiones en ámbitos de planeación de emergencia, desarrollo de planes de refuerzo de edificaciones existentes y protección financiera mediante mecanismos tradicionales de seguro y reaseguro u otros instrumentos alternativos para la transferencia del riesgo.

© 2014 CIMNE (Universitat Politècnica de Catalunya). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Probabilistic seismic risk assessment of Lorca through scenario simulations

A B S T R A C T

A comprehensive and probabilistic seismic risk assessment has been performed for the buildings of Lorca, the most affected city in the region of Murcia, Spain, after the May 2011 earthquake. Seismic hazard is represented through a set of stochastic scenarios that allow accounting for small, moderate and extreme events in the future losses, also through spectral transfer functions the dynamic soil response has been considered. A building by building resolution level database has been used allowing the disaggregation of risk results in several categories besides allowing the generation of risk maps to visualize the geographical distribution of the future losses. For each of the identified building classes a vulnerability function has been assigned to determine the expected losses for different acceleration levels. Risk results have been obtained in terms of the loss exceedance curve from where other probabilistic risk metrics such as the average annual loss and the probable maximum loss can be derived. Risk results are useful for the decision-makers in the fields of emergency planning, existent building retrofitting schemes and financial protection through traditional insurance and reinsurance schemes or with alternative risk transfer instruments.

© 2014 CIMNE (Universitat Politècnica de Catalunya). Published by Elsevier España, S.L.U. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Keywords:

Seismic hazard

Seismic risk assessment

Numeric simulation

Loss exceedance curve

Average annual loss

* Autor para correspondencia: Edifici C-1, Despatx C-111, Carrer Gran Capità s/n, Campus Nord UPC. 08034 Barcelona, España.

Correos electrónicos: mario.sal.gal@gmail.com (M.A. Salgado-Gálvez), liliana@cimne.upc.edu (M.L. Carreño), alex.barbat@upc.edu (A.H. Barbat), odcardonaa@unal.edu.co (O.D. Cardona).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.rimni.2014.12.001>

0213-1315/© 2014 CIMNE (Universitat Politècnica de Catalunya). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

El 11 de mayo de 2011, un sismo de magnitud 5,1 (M_W) sacudió la Región de Murcia y, en específico, la ciudad de Lorca fue la más afectada. El epicentro se localizó a poco más de 5 km al norte del casco urbano de Lorca, lo que, combinado con la poca profundidad del evento y a pesar de la magnitud moderada del sismo, causó la muerte de 9 personas, heridas a más de 300, mientras que alrededor de 10.000 no pudieron regresar a sus hogares. Históricamente, varios eventos han sacudido la región, tales como aquellos ocurridos en marzo de 1911, enero de 1917, junio de 1948, agosto de 2002 y enero de 2005 [1], pero solo el de mayo de 2011 causó fallecidos, heridos, daños estructurales severos e interrupciones en el funcionamiento normal de la comunidad. Adicionalmente, debido a la inexperiencia en la aplicación de un plan de emergencias, los daños en la infraestructura desembocaron en una situación caótica, con el agravante que muchas de las acciones de respuesta tomaron más tiempo del esperado inicialmente por la comunidad [2].

En trabajos anteriores se han realizado comparaciones de los daños registrados y modelizados para escenarios sísmicos con características similares a las del sismo de Lorca [3,4], las cuales han permitido la validación de las metodologías e información base utilizada en dichos trabajos. Algunos estudios se han realizado incluso antes del sismo del 2011 [5]. En este artículo se cuantifica el riesgo sísmico no en forma de proporción medias de daño (*mean damage ratio* [MDR]), sino a partir de la curva de excedencia de pérdidas (CEP) obtenida tras la convolución de la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos. A partir de esta se pueden derivar métricas probabilistas como la pérdida anual esperada (PAE) y la pérdida máxima probable (PMP), que permiten la caracterización con mayor detalle de los elementos expuestos y de la amenaza sísmica que las evaluaciones regionales previas [6].

Se ha ensamblado una base de datos de elementos expuestos con un nivel de resolución edificio por edificio, el más detallado para este tipo de evaluaciones, la cual captura información relevante en cuanto a parámetros y tipologías estructurales, los cuales han sido asignados a partir de índices basados en el más reciente censo de población y vivienda [7]. Es importante tener en cuenta que, cuando se realizan análisis probabilistas de riesgo sísmico, una de las suposiciones está relacionada con la ley de los grandes números, es decir, que se requiere un número considerable de elementos expuestos, con lo que aun cuando se produzcan errores por sobre o subestimación, el resultado final tiende al valor medio.

Para la obtención de los resultados de riesgo sísmico en términos de la CEP se requiere una representación probabilista de la amenaza sísmica a partir de escenarios estocásticos, así como de la definición de funciones de vulnerabilidad para las diferentes tipologías estructurales identificadas en el área bajo análisis. La evaluación probabilista del riesgo sísmico se ha realizado únicamente para las edificaciones, tanto públicas como privadas,



Figura 2. Zonificación tectónica utilizada para la evaluación de la amenaza sísmica.

localizadas dentro del área urbana de Lorca y considerando pérdidas económicas directas; sin embargo, los resultados presentados pueden servir como insumo para evaluaciones que abarcan otras dimensiones del riesgo, como las propuestas en las referencias [8-13].

Dentro de las diferentes herramientas para la evaluación del riesgo sísmico, se ha seleccionado la Plataforma CAPRA¹ [14-19], la cual consiste en diferentes módulos para la evaluación de la amenaza sísmica, la vulnerabilidad estructural y el riesgo físico. La plataforma realiza procesos de evaluación y simulación numérica por ordenador que abarca varios ámbitos, tal y como se presenta en la figura 1

2. Evaluación probabilista de la amenaza sísmica

La evaluación de la amenaza sísmica para Lorca se ha realizado con un enfoque probabilista para dar cuenta de las incertidumbres asociadas al proceso de generación de terremotos tales como su localización, profundidad, magnitud, frecuencia de ocurrencia y movimiento del terreno [20]. Para ello, la amenaza en roca se expresa a partir de un conjunto de escenarios estocásticos y, además, debido a que existe información relacionada con la respuesta dinámica del suelo y se han identificado una serie de zonas de suelo homogéneo [21], se han definido funciones de transferencia espectrales para la obtención del movimiento del terreno en el suelo y no en el basamento rocoso. A continuación se presentan los detalles de la evaluación de la amenaza sísmica.

2.1. Evaluación de la amenaza en roca

Como se ha mencionado anteriormente, la metodología de evaluación probabilista de riesgo aplicada en este estudio requiere un conjunto de escenarios estocásticos que representen de manera exhaustiva e integral la amenaza sísmica en Lorca. Para ello, se ha realizado una evaluación tanto probabilista como espectral de la amenaza sísmica que considera fuentes sísmogénicas tanto en la península Ibérica como en zonas aledañas, donde cada una de dichas fuentes se ha caracterizado a partir de un modelo de sismicidad Gutenberg-Richter [22]. La zonificación tectónica es la propuesta en el marco del proyecto SHARE [23], más una fuente adicional en el norte de África, tal como se muestra en la figura 2.

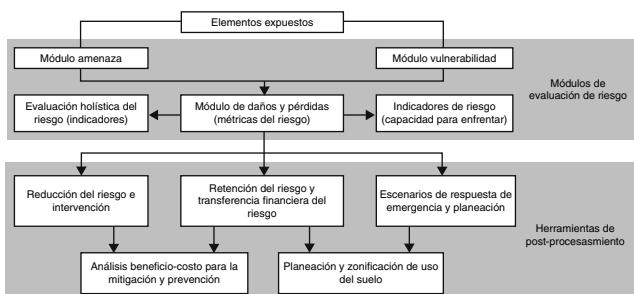


Figura 1. Modelación probabilista del riesgo y usos en la gestión de riesgo de desastres.

¹ Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment (www.ecapra.org).

Como no es posible predecir la ocurrencia de terremotos en el tiempo y la duración de una ventana de observación completa es desconocida, ha sido generado un conjunto con 50.982 escenarios estocásticos. Para caracterizar el proceso de ocurrencia de los sismos en cada una de las fuentes sismogénicas se ha asumido un modelo de Poisson donde la actividad sísmica está representada a partir de curvas de recurrencia de magnitudes, las cuales relacionan la frecuencia de ocurrencia de sismos con determinada magnitud en cada fuente. Consecuentemente, la sismicidad se define a partir de la siguiente ecuación:

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_U}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_U}}, M_0 \leq M \leq M_U \quad (1)$$

que es una versión modificada del modelo Gutenberg-Richter [24], donde $\lambda(M)$ es la tasa de recurrencia para eventos con magnitud igual o superior al valor umbral seleccionado M_0 (3,5 en este caso); λ_0 , β y M_U son los parámetros de sismicidad calculados para cada fuente sismogénica y M es la variable aleatoria que representa la magnitud de cada fuente. λ_0 describe la tasa anual de ocurrencia con magnitud igual o superior a la umbral; β representa la pendiente inicial de la regresión logarítmica, lo que es igual a la relación entre sismos grandes y pequeños, y M_U es la magnitud última asociada a cada fuente sismogénica. Se ha utilizado el catálogo sísmico publicado por el Instituto Geológico Nacional [25], donde se ha realizado una verificación de completitud para la magnitud umbral seleccionada, siguiendo la metodología propuesta por Tinti y Mulargia [26]. Los parámetros λ_0 y β se calcularon utilizando un procedimiento de máxima verosimilitud [27], mientras que los valores esperados de M_U se asignaron a partir de los publicados en el marco del proyecto SHARE [23].

Dentro de los diferentes modelos geométricos posibles, se ha seleccionado el de área para representar cada fuente sismogénica como un plano. Cada fuente principal se divide en subfuentes con la misma sismicidad por unidad de área así como con la misma probabilidad espacial de ocurrencia de sismos. Las subfuentes son polígonos triangulares donde, desde su centroide, se generan eventos con diferentes magnitudes y frecuencias, compatibles con los parámetros de sismicidad.

Se han utilizado relaciones de atenuación de movimiento fuerte calibradas para el entorno europeo [28], con lo que la amenaza sísmica se puede calcular en términos de curva de excedencia de aceleraciones (para diferentes ordenadas espectrales) mediante la siguiente ecuación:

$$v(a) = \sum_{n=1}^N \int_{M_0}^{M_U} - \frac{\partial \lambda}{\partial M} Pr(A > a|M, R_i) dM \quad (2)$$

donde $v(a)$ es la tasa de excedencia de la aceleración, N es el número de fuentes sismogénicas, $Pr(A > a|M, R_i)$ es la probabilidad de que la aceleración sea excedida dada la magnitud y la distancia de un sismo entre la n -ésima fuente y el punto de interés, R_i . Asumiendo que, dada una magnitud y distancia, la aceleración sigue una distribución log-normal, la probabilidad $Pr(A > a|M, R_i)$ puede calcularse como:

$$Pr(A > a|M, R_i) = \Phi \left(\frac{1}{\sigma_{Lna}} \ln \frac{MED(A|M, R_i)}{a} \right) \quad (3)$$

donde $\Phi(\cdot)$ es la distribución normal estándar, $MED(A|M, R_i)$ es la mediana de la aceleración, dada por la relación de atenuación de movimiento fuerte asociada para un par magnitud-distancia conocido, y σ_{Lna} es la desviación estándar del logaritmo natural de la aceleración.

Las curvas de excedencia de aceleraciones se calcularon para diferentes ordenadas espectrales, por lo que es posible obtener espectros de amenaza uniforme (EAU) para diferentes períodos

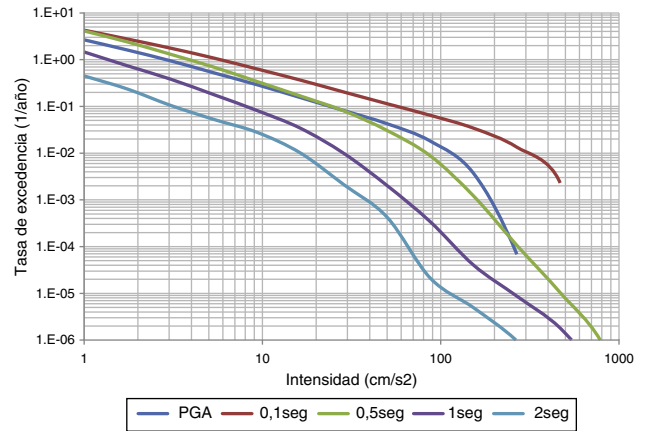


Figura 3. Curvas de excedencia de aceleración para diferentes ordenadas espectrales en Lorca.

de retorno. La evaluación de la amenaza sísmica se ha realizado utilizando el programa CRISIS 2014 V1.2 [29], que corresponde al módulo de amenaza sísmica de la Plataforma CAPRA. La figura 3 muestra las curvas de excedencia de aceleración para diferentes ordenadas espectrales, mientras que la figura 4 presenta los EAU para 225, 475 y 1.000 años de período de retorno. Estos resultados para Lorca tienen en cuenta la contribución de todas las fuentes sismogénicas incluidas en el modelo que estén dentro de la distancia de integración, es decir, 300 km.

2.2. Efectos de sitio

Las características dinámicas del suelo pueden modificar las ondas sísmicas tanto en su contenido frecuencial como en amplitud, por lo que, siempre que exista información para la determinación de zonas de suelo homogéneo (microzonificaciones sísmicas), es deseable incluirlo tanto en la evaluación de la amenaza como en la del riesgo sísmico.

Con base en el estudio de Navarro et al. [21] sobre la microzonificación sísmica del casco urbano de Lorca, para cada una de las zonas de suelo homogéneo se ha asignado un tipo de suelo de acuerdo al Eurocódigo-8. A partir de dicha información es posible calcular funciones de transferencia espectrales para cada una de las zonas de suelo homogéneo calculando el cociente entre la forma funcional para el tipo de suelo identificado y la forma funcional para roca. Es importante notar que la metodología empleada para la definición de las zonas homogéneas de suelo está basada en deformaciones

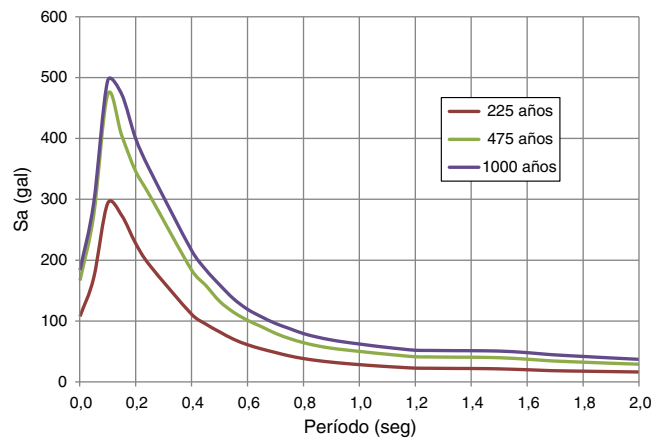


Figura 4. Espectros de amenaza uniforme para diferentes períodos de retorno en Lorca.



Figura 5. Distribución de alturas para el casco histórico de Lorca.

pequeñas que no capturan completamente el comportamiento no lineal de este.

3. Inventario de elementos expuestos

Las evaluaciones de riesgo sísmico requieren la elaboración de bases de datos que contienen los elementos expuestos, en este caso las edificaciones del casco urbano de Lorca. Dichas bases de datos se pueden construir utilizando diferentes niveles de resolución, dentro de los cuales el de edificio por edificio es el más detallado. La selección del nivel de resolución depende no solamente de la información disponible sino del alcance de la evaluación; en el presente caso, dado que se ha realizado una evaluación de la amenaza sísmica detallada, incluyendo la microzonificación sísmica y, además, que la información catastral permite un alto nivel de detalle, se ha seleccionado esa escala. El proceso de elaboración de las bases de datos de elementos expuestos siempre ha significado un reto para la modelación dado que, en muchos casos, la información requerida no se encuentra disponible en una única fuente y que, en muchos casos, necesita ser generada o inferida a partir de índices obtenidos de múltiples fuentes. Para este estudio se requiere información relacionada con la ubicación geográfica y las características estructurales tales como edad, material, sistema estructural, número de plantas y tipología estructural y, por esto, dichos parámetros se han asignado a cada uno de los elementos expuestos mediante el procedimiento que se describe a continuación.

3.1. Caracterización a partir de la información catastral disponible

Se dispone de la información catastral actualizada para Lorca [30] con un nivel de resolución de elemento por elemento. Tras

Tabla 1
Distribución de edades para las edificaciones de Lorca

Edad	Distribución
Antes de 1900	4,4%
1900-1920	2,8%
1921-1940	4,0%
1941-1950	4,8%
1951-1960	11,1%
1961-1970	13,5%
1971-1980	19,4%
1981-1990	13,3%
1991-2001	13,1%
2002-2011	13,6%

Tabla 2
Clases de vulnerabilidad en la escala EMS-98 de acuerdo con la edad para las edificaciones de Lorca

Clase de vulnerabilidad EMS-98	A	B	C	D
<i>Edad</i>				
Antes de 1900	80%	20%	–	–
1900-1920	72%	28%	–	–
1921-1940	72%	28%	–	–
1941-1950	69%	28%	3%	–
1951-1960	46%	49%	5%	–
1961-1970	18%	38%	44%	–
1971-1980	5%	40%	55%	–
1981-1990	–	38%	57%	5%
1991-2001	–	28%	62%	10%
2002-2011	–	18%	69%	13%

la remoción de elementos diferentes a edificaciones, tales como terrazas, plazas y balcones, un total de 17.064 elementos quedaron incluidos en la base de datos inicial. La información catastral tiene datos relacionados con la ubicación geográfica y el número de plantas de cada elemento. La figura 5 presenta la distribución geográfica de alturas (en número de plantas) para cada elemento del casco histórico de Lorca. Puede observarse que la mayoría de edificaciones son de baja altura, entre 1 y 3 plantas.

3.2. Información disponible para la asignación de la vulnerabilidad

Con base en el censo poblacional y de vivienda más reciente de España [7], fue posible definir la distribución de edades para las edificaciones en Lorca. Dichos parámetros fueron asignados a los elementos usando los datos presentados en la tabla 1.

Además, con base en estudios anteriores [5], y usando la información de edad presentada anteriormente, se realizó la clasificación de la vulnerabilidad basada en la escala EMS-98 [31] con los datos presentados en la tabla 2. De allí es posible observar que las estructuras se han clasificado en categorías entre A y D en dicha escala.

3.3. Valoración económica de los elementos expuestos

No se cuenta con el valor catastral de las edificaciones y, por dicha razón, se ha desarrollado un índice basado en el área total construida para inferir el valor de reposición de cada elemento. Dicho valor tiene el objetivo de capturar el valor de reparación o reposición de cada elemento para llevarlo a exactamente la misma condición con la que ha sido inicialmente caracterizado. El principal objetivo de esta valoración es el de establecer un orden de magnitud del valor de reposición de las edificaciones de Lorca como conjunto. En el presente trabajo, los valores de reposición no tienen en cuenta los valores históricos o patrimoniales de las estructuras.

Tabla 3
Valores de reposición y factores por edad para Lorca

Edad	Factor edad	Costo por m ²
Antes de 1900	2,00	2.494 €
1900-1920	2,00	2.494 €
1921-1940	1,75	2.182 €
1941-1950	1,75	2.182 €
1951-1960	1,50	1.871 €
1961-1970	1,50	1.871 €
1971-1980	1,50	1.871 €
1981-1990	1,25	1.559 €
1991-2001	1,25	1.559 €
2002-2011	1,00	1.247 €

Tabla 4
Tipologías estructurales, códigos de abreviación y clase de vulnerabilidad en la escala EMS-98

Tipología estructural	Código	Clase de vulnerabilidad EMS-98
Mampostería de piedra	M-PP	A
Tapial	M-TA	A
Encintado toledano	M-ET	B
Mampostería de ladrillo	M-L	B
Forjados de hormigón	M-H	C
Hormigón armado (pre 1995)	E-H	C
Hormigón armado (post 1995)	E-H2	D
Hormigón con diagonales en acero	E-HX	D
Hormigón prefabricado	E-HF	C
Estructuras metálicas	E-MT	D

Con base en INE [7] se ha definido un valor base de 1.247 euros por metro cuadrado construido pero, para considerar que no todos los elementos pueden tener la misma valoración, el parámetro de edad ha sido seleccionado como diferencial. Debido a que la reparación de mamposterías en piedra y bloques es más costosa que la de edificaciones en forjados de hormigón armado debido a la necesidad de mano de obra más especializada, ha sido definido un factor que aumenta con la edad, tal y como se presenta en la tabla 3. El valor total de reposición de los edificios de Lorca se ha establecido en 6.927 millones de euros.

3.4. Identificación de las tipologías estructurales de Lorca

Habiendo identificado la distribución de edades y de clases de vulnerabilidad, fueron identificadas una serie de tipologías estructurales a partir del trabajo de la referencia [7]. Fue asignada una clase de vulnerabilidad en la escala EMS-98 a cada tipología estructural. Las edificaciones en Lorca están construidas principalmente de diferentes tipos de mampostería (ladrillos y piedra) para las edificaciones de baja altura, mientras que para los edificios de más niveles son comunes los forjados en hormigón armado. En las zonas de uso industrial se encuentran pórticos en acero y estructuras prefabricadas en hormigón armado.

Combinando los parámetros para todos los elementos, ha sido asignada una única tipología estructural a cada edificación; en total se utilizaron en el análisis 10 tipologías estructurales (véase la tabla 4). En la segunda columna de la tabla se presenta el código asignado a cada una de ellas, mientras que en la tercera columna se muestra la clase de vulnerabilidad asociada. A partir de una visita de campo se dividió la ciudad en 11 zonas, para las cuales, en cada una de ellas, se realizó la inspección de validación de las tipologías estructurales inicialmente identificadas y su distribución relativa.

4. Vulnerabilidad sísmica de las edificaciones expuestas

La pérdida L se define como una variable aleatoria, por lo que la variación de los momentos estadísticos de ella para diferentes valores de demanda sísmica se describen mediante funciones de

vulnerabilidad. La distribución de probabilidad de la pérdida $p_{L|S}(L)$ se asume como una función beta (ecuación 4) donde los momentos estadísticos corresponden a la media (conocida como la relación media de daño) y a la desviación estándar:

$$p_{L|S}(L) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a) \cdot \Gamma(b)} L^{a-1} (1-L)^{b-1} \quad (4)$$

donde Γ es la función gamma y sus parámetros a y b son:

$$a = \frac{1 - (1 + c^2(L|S)) \cdot E(L|S)}{c^2(L|S)} \quad (5)$$

$$b = a \cdot \frac{1 - E(L|S)}{E(L|S)} \quad (6)$$

$E(L|S)$ es el valor esperado de la pérdida y $c(L|S)$ es el coeficiente de variación de la pérdida dada una demanda sísmica S . Las funciones de vulnerabilidad, al contrario que las escalas cualitativas de daños, contienen toda la información necesaria para calcular la probabilidad de que se iguale o exceda un nivel de pérdida dada una demanda sísmica a partir de la siguiente ecuación:

$$Pr(L \geq l|S) = \int_l^{\infty} p_{L|S}(L) dL \quad (7)$$

donde l es una pérdida dentro del dominio de definición de la variable aleatoria L , y S es de nuevo la demanda sísmica. El daño es cuantificado a partir de la relación media de daño, que se calcula como la relación entre el costo de reparación estimado y el valor total expuesto de cada elemento. Consecuentemente, la función de vulnerabilidad se define relacionando el daño medio y la intensidad sísmica expresada como aceleración máxima del terreno (para edificaciones de baja altura) o como aceleración espectral (para edificaciones de mayor altura). Dado un nivel de aceleración sísmica para cada tipología estructural, la relación medida de daño puede calcularse mediante la metodología propuesta por Miranda [32] y Ordaz [33]

$$E(\beta|\gamma_i) = 1 - \exp \left[\ln 0.5 \left(\frac{\gamma_i}{\gamma_0} \right)^\varepsilon \right] \quad (8)$$

donde β es la pérdida, γ_0 y γ_i son parámetros de vulnerabilidad estructural que dependen de la tipología estructural y de la edad de construcción, ε es la pendiente y $E(\cdot)$ es el valor esperado. Por definición, β es la relación entre el costo de reparación y el costo total de la edificación, la cual, dado que únicamente se están evaluando las pérdidas físicas directas, toma valores entre 0 y 1.

Adicional al valor esperado del daño, se calcula la dispersión de este para diferentes niveles de aceleración. Esta dispersión es igual a cero para valores extremos y toma su valor máximo cuando el daño medio es igual al 50%.

Se requiere una función de vulnerabilidad para cada tipología estructural identificada y, además, la diferencia en el comportamiento sísmico de las edificaciones puede considerarse a partir del período fundamental de vibración de cada una de ellas, es decir, cada función de vulnerabilidad tiene asociada una ordenada espectral que corresponde al período fundamental elástico típico de cada tipología cuyo daño está siendo caracterizado.

Se utilizaron en la simulación realizada un total de 22 funciones de vulnerabilidad, las cuales han sido desarrolladas en el marco del modelo global de riesgo [34,35] incluido en el *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction* de la Estrategia Internacional para la Reducción de Riesgo de Desastre de las Naciones Unidas [36]. La figura 6 muestra diferentes funciones de vulnerabilidad, de las cuales resulta claro que algunas tipologías estructurales, especialmente aquellas de mampostería simple, son mucho más vulnerables que las otras, teniendo, para un mismo nivel de aceleración, un nivel de daño esperado mayor. La nomenclatura de la

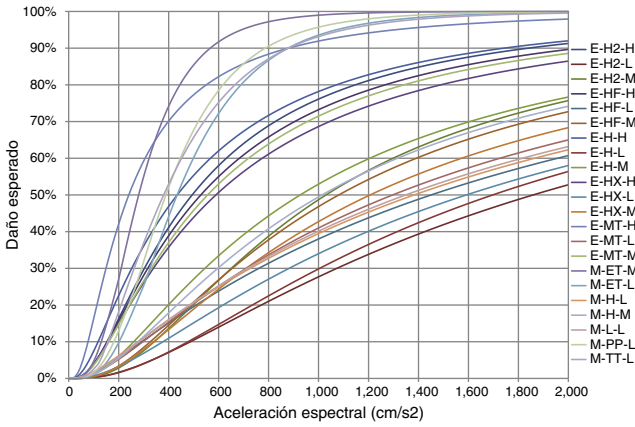


Figura 6. Funciones de vulnerabilidad utilizadas para las edificaciones de Lorca (L: baja altura; M: media altura; H: gran altura).

tabla 4 ha clasificado el número de pisos en 3 categorías: bajo (L) para edificios entre 1 y 3 plantas, mediana (M) para edificios entre 4 y 7 plantas y de gran altura (H) para 8 y más niveles.

5. Evaluación probabilista del riesgo sísmico

5.1. Metodología

Para la evaluación probabilista del riesgo sísmico se ha utilizado el procedimiento analítico propuesto por Ordaz [33], que es el que se encuentra implementado en la Plataforma CAPRA [14]. Así pues, se realiza el cálculo de la función de densidad de probabilidad para la pérdida *l* en el elemento expuesto *j*, condicionada a la ocurrencia del escenario *i*, mediante la siguiente ecuación:

$$f(l_j|Evento_i) \tag{9}$$

Resulta evidente que esta distribución de probabilidad no puede calcularse de manera directa, por lo cual se realiza un encadenamiento de 2 distribuciones de probabilidad separadas, tal como puede verse en la siguiente ecuación:

$$f(l_j|Evento_i) = \int_0^\infty f(l_j|Sa) \cdot f(Sa|Evento_i) dSa \tag{10}$$

Con esto, la función de densidad de probabilidad de la pérdida asociada a cada escenario es calculada mediante la agregación de las pérdidas de cada elemento expuesto. Dado que la pérdida se asume como una variable aleatoria, se requiere calcular el valor esperado

de la pérdida y su varianza asociada para cada escenario para su correcta consideración:

$$E(l|Evento_i) = \sum_{j=1}^{NE} E(l_j) \tag{11}$$

$$\sigma^2(l|Evento_i) = \sum_{j=1}^{NE} \sigma^2(l_j) + 2 \sum_{k=1}^{NE-1} \sum_{j=2}^{NE} cov(l_k, l_j) \tag{12}$$

NE es el número total de elementos expuestos, *E(l_j)* es el valor esperado de la pérdida en el elemento expuesto *j* dada la ocurrencia del escenario *i*, $\sigma^2(l_j)$ es la varianza de la pérdida en el elemento expuesto *j* dada la ocurrencia del escenario *i*, y $cov(l_k, l_j)$ es la covarianza de la pérdida de 2 elementos expuestos separados. La covarianza se calcula asumiendo un coeficiente de correlación ($\sigma_{k,j}$) igual a 0,3 y considerando la desviación estándar para las pérdidas en los diferentes elementos expuestos:

$$\sigma^2(l|Evento_i) = \sum_{j=1}^{NE} \sigma^2(l_j) + 2 \sum_{k=1}^{NE-1} \sum_{j=2}^{NE} \rho_{k,j} \sigma(l_k) \sigma(l_j) \tag{13}$$

Una de las mejores maneras de comunicar los resultados de riesgo es a partir de la curva de excedencia de pérdida (CEP), que asocia las frecuencias con las que los eventos igualan o exceden un valor predeterminado de pérdida. Esta frecuencia, generalmente expresada en términos anuales, es conocida como la tasa de excedencia y se calcula mediante la siguiente ecuación, que es una de las formas del teorema de probabilidad total:

$$v(l) = \sum_{i=1}^N Pr(L > l | Evento_i) \cdot F_A(Evento_i) \tag{14}$$

donde *v(l)* es la tasa de excedencia de la pérdida *l*, *N* es el número de escenarios en el conjunto estocástico, $Pr(L > l | Evento_i)$ es la probabilidad de exceder *l* dada la ocurrencia del evento *i*, mientras que *F_A* (*Evento_i*) es la frecuencia anual de ocurrencia del evento *i*; la suma de la ecuación considera todos los eventos que generan cualquier nivel de pérdida. El valor inverso de *v(l)* es el período de retorno de la pérdida *l*.

5.2. Resultados

La tabla 5 presenta el resumen de los resultados de evaluación probabilista de riesgo sísmico en Lorca. Es posible observar que la pérdida anual esperada, PAE, es de aproximadamente 16,3 millones

Tabla 5
Resumen de los resultados y curva de excedencia de pérdidas para Lorca

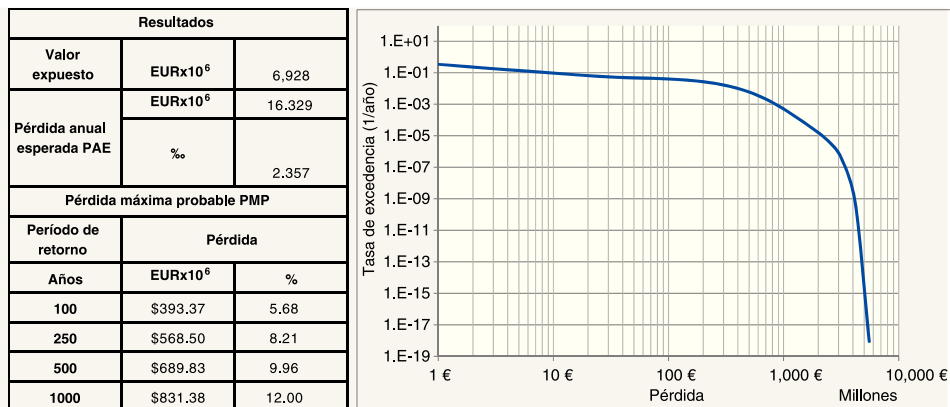


Tabla 6
Desagregación de los resultados de riesgo por tipología estructural

Tipología estructural	Número de elementos	Valor expuesto (millones de €)	% del valor expuesto	Pérdida anual esperada (millones de €)	Pérdida anual esperada (%)	% de la pérdida
Mampostería de piedra	1.838	848	12,2%	3,26	3,84	19,94
Tapial	1.955	978	14,1%	4,31	4,41	26,42%
Encintado toledano	528	203	2,9%	0,54	2,68	3,33%
Mampostería de ladrillo	5.207	2.057	29,7%	4,24	2,06	25,97%
Forjados de hormigón	2.963	1.156	16,7%	2,74	2,37	16,77%
Hormigón armado (pre 1995)	3.432	1.293	18,7%	0,66	0,51	4,04%
Hormigón armado (post 1995)	485	161	2,3%	0,12	0,75	0,74%
Hormigón con diagonales en acero	35	8	0,1%	0,01	0,89	0,04%
Hormigón prefabricado	593	216	3,1%	0,44	2,01	2,66%
Estructuras metálicas	28	8	0,1%	0,01	1,38	0,07%
Total	17.064	6.927.7	100	16,3	2,36	100



Figura 7. Pérdida anual esperada (relativa) para las edificaciones de Lorca.

de euros, lo que, en términos relativos al valor total expuesto, representa el 2,36%; dicho valor corresponde a un nivel alto de riesgo sísmico, el cual se encuentra principalmente dominado por la alta vulnerabilidad estructural de las edificaciones. Adicionalmente, se presentan los valores de pérdida máxima probable, PMP, para diferentes períodos de retorno donde, por ejemplo, para 500 años, se estima una pérdida de 690 millones de euros que corresponde al 10% del valor total expuesto. La estimación de las pérdidas aseguradas para el sismo de mayo de 2011 es del orden de 490 millones de euros [37], las cuales incluyen condiciones específicas de los contratos como deducibles, coaseguro y límites asegurables que no permiten una comparación directa con los valores calculados para las pérdidas físicas directas para la totalidad de edificaciones evaluadas.

Los resultados pueden desagregarse para cualquiera de los factores incluidos en la base de datos de elementos expuestos y se presentan en este caso de acuerdo a las tipologías estructurales para ver cuáles son las que concentran los mayores niveles de riesgo.

La tabla 6 muestra la desagregación de los resultados de riesgo sísmico por tipologías estructurales; de ella es evidente que las de construcciones en tierra, así como de mampostería, son las que mayores valores de riesgo tienen, esto en términos tanto absolutos como relativos. Lo anterior se encuentra asociado con la vulnerabilidad sísmica de dichas tipologías que tienen un pobre comportamiento ante la demanda sísmica debido a las prácticas constructivas deficientes, así como a la utilización de materiales no adecuados. Los edificios con forjados reticulares en hormigón también tienen una contribución importante en las pérdidas modeladas debido también a su alta vulnerabilidad física [38-42].

Dado que la evaluación de riesgo sísmico se ha realizado en una base de datos georreferenciada, se han elaborado mapas de riesgo para observar la distribución geográfica de las pérdidas esperadas. Para una mejor comparación de los niveles de riesgo se ha seleccionado la PAE relativa, dado que constituye una métrica robusta y, en términos generales, insensible a las incertidumbres [43]. La figura 7 muestra dicha distribución.

6. Conclusiones

Los modelos de riesgo sísmico a nivel urbano dan estimaciones que pueden resultar útiles para los tomadores de decisiones en términos de daños esperados y de recursos requeridos. La identificación del riesgo es la primera etapa en un esquema integral de gestión de riesgo [44] y sus resultados pueden ser utilizados en el diseño de planes de emergencia, regulaciones de planeación urbana, definición de planes para el reforzamiento de edificaciones existentes y estrategias de protección financiera [45,46].

La cuantificación del orden de magnitud de las pérdidas antes de la ocurrencia del desastre permite la evaluación de acciones *ex-ante* tales como bonos de catástrofe, créditos contingentes, fondos de reserva para desastre e incluso mecanismos tradicionales de seguro y reaseguro, en vez de las medidas *ex-post* tales como nuevos impuestos, reasignación presupuestal o ayuda internacional para la atención y recuperación de la zona afectada.

Se han obtenido estimaciones de las pérdidas directas para el portafolio de edificaciones en Lorca, las cuales pueden agruparse en diferentes categorías como edad, número de plantas, clase estructural y tipología estructural, entre otras. Lo anterior resulta útil para la determinación de dónde se encuentra concentrado el riesgo. Los resultados permiten la generación de mapas de riesgo con un nivel de resolución elemento por elemento mediante los cuales es posible visualizar la distribución geográfica de las

pérdidas futuras; sin embargo, debe tenerse en cuenta que, en cualquier caso, el riesgo debe ser preferiblemente expresado en términos de tasas y probabilidades de excedencia de valores de pérdida. Estos resultados pueden actualizarse de manera periódica en la medida que mejor información exista relacionada con las características de las edificaciones y sus variaciones a lo largo del tiempo, así como de información de microzonificación sísmica más detallada.

Resultados de investigaciones futuras en los campos de la geotecnia, mediante la determinación de funciones de transferencia para diferentes niveles de excitación sísmica en el basamento rocoso y la ingeniería estructural mediante el desarrollo de funciones de vulnerabilidad más específicos para las edificaciones en Lorca, principalmente aquellas de forjados reticulares en hormigón armado, pueden utilizarse para la actualización de los resultados obtenidos.

Por último, estos resultados pueden usarse como base para la evaluación holística de riesgo sísmico en zonas urbanas. Este enfoque, además de las pérdidas directas, considera factores relacionados con la fragilidad social y la falta de resiliencia que agrava las condiciones del riesgo físico.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer el apoyo del Ministerio de Educación y Ciencia de España para el «Enfoque integral y probabilista para la evaluación del riesgo sísmico en España», CopASRE (CGL2011-29063), y al Ministerio de Economía y Competitividad en el marco del programa de formación de investigadores (FPI).

Bibliografía

- [1] B. Benito, A. Rivas, J. Gaspar-Escribano, P. Murphy, El terremoto de Lorca (2011) en el contexto de la peligrosidad y el riesgo sísmico en Murcia, *Fis. de la Tierra*. 24 (2012) 255–287.
- [2] A. Barbat, M. Carreño, S. Figueras, X. Goula, J. Irizarry, N. Lantada, et al., El terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011, Institut Geològic de Catalunya-IGC, Barcelona, 2011.
- [3] M.A. Salgado, M.L. Carreño, A.H. Barbat, O.D. Cardona, Comparing a simulated loss scenario with the observed Earthquake damage: The Lorca 2011 case study, en: *Proceedings of the Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Istanbul, Turkey, 2014.
- [4] A. Rivas-Medina, S. Martínez-Cuevas, L.E. Quirós, J.M. Gaspar-Escribano, A. Staller, Models for reproducing the damage scenario of the Lorca Earthquake, *Bull. Earthquake Eng.* 12 (2014) 2075–2093.
- [5] B. Benito, E. Carreño, M. Jiménez, P. Murphy, J. Martínez, M. Tsiges, et al., *Riesgo Sísmico en la Región de Murcia - RISMUR*, Instituto Geográfico Nacional, España, 2005.
- [6] J. Valcárcel, G. Bernal, M. Mora, Lorca earthquake May 11 2011: A comparison between disaster figures and risk assessment outcomes, en: *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, 2012.
- [7] Instituto Nacional de Estadística - INE. Censo de población y vivienda 2011 [consultado 10 Dic 2013]. Disponible en: http://www.ine.es/censos2011_datos/cen11_datos_res_pob.htm. 2011.
- [8] O.D. Cardona, J. Hurtado, Holistic seismic risk estimation of a metropolitan center, en: *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, 2000.
- [9] O.D. Cardona, Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos [tesis doctoral], Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2001.
- [10] M.L. Carreño, 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, España, 2006.
- [11] M. Carreño, O. Cardona, A. Barbat, Urban seismic risk evaluation: A holistic approach, *Nat. Hazard. Rev.* 40 (1) (2007) 137–172.
- [12] M. Carreño, O. Cardona, A. Barbat, New methodology for urban seismic risk assessment from a holistic perspective, *Bull. Earthquake Eng.* 10 (2) (2012) 547–565.
- [13] A. Barbat, M. Carreño, O. Cardona, M. Marulanda, Evaluación holística del riesgo sísmico en zonas urbanas, *Rev. Int. Métodos Numer. Calc. Diseño Ing.* 27 (1) (2011) 3–27.
- [14] Evaluación de Riesgos Naturales América Latina-ERN-AL. CAPRA-GIS v2.0. Program for the probabilistic risk assessment. 2011 [consultado 15 Oct 2014]. Disponible en: www.ecapra.org
- [15] O.D. Cardona, M. Ordaz, E. Reinoso, L. Yamín, A. Barbat, Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment (CAPRA). International initiative for disaster risk management effectiveness, en: *Proceedings of the 14th European conference on earthquake engineering*, Ohrid, Macedonia, 2010.
- [16] O.D. Cardona, M. Ordaz, E. Reinoso, L. Yamín, A. Barbat, CAPRA – Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment: International Initiative for Risk Management Effectiveness, en: *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, 2012.
- [17] M.A. Salgado-Gálvez, D. Zuloaga, O. Cardona, Evaluación probabilista del riesgo sísmico de Bogotá y Manizales con y sin la influencia de la Caldas Tear, *Revista de Ingeniería* 38 (2013) 6–13, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.
- [18] M.A. Salgado-Gálvez, D. Zuloaga, G. Bernal, M. Mora, O. Cardona, Fully probabilistic seismic risk assessment considering local site effects for the portfolio of buildings in Medellín, Colombia, *Bull. Earthquake Eng.* 12 (2014) 671–695.
- [19] M. Marulanda, M. Carreño, O. Cardona, M. Ordaz, A. Barbat, Probabilistic earthquake risk assessment using CAPRA: Application to the city of Barcelona, Spain, *Nat. Hazard. Rev.* (2013), DOI:10.1007/s11069-013-0685-z.
- [20] J.J. Egozcue, A.H. Barbat, J.A. Canas, J. Miquel, E. Banda, A method to estimate occurrence probabilities in low seismic activity regions, *Earthq. Eng. and Struct. Dyn.* 20 (1991) 43–60.
- [21] M. Navarro, A. García-Jerez, F.J. Alcalá, F. Vidal, T. Enomoto, Local site effect microzonation of Lorca town (SE Spain), *Bull. of the Seismol. Soc of Am.* 12 (2014) 1933–1959.
- [22] R. Gutenberg, C.F. Richter, Frequency of earthquakes in California, *Bull. of the Seismol. Soc of Am* 34 (1944) 185–188.
- [23] German Research Center for Geosciences – GRG. Seismic Hazard Harmonization in Europe SHARE. Development of a common methodology and tools to evaluate earthquake hazard in Europe. Theme 6: Environment. German Research Center for Geosciences. 2010.
- [24] A. Cornell, E.H. van Marke, The major influences on seismic risk, en: *Proceedings of the 3rd World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile, 1969.
- [25] Instituto Geográfico Nacional – IGN. 2013. Catálogo de terremotos [consultado 1 Sep 2013]. Disponible en: <http://www.ign.es/ign/layoutln/sismoFormularioCatalogo.do>
- [26] S. Tinti, F. Mulargia, An improved method for the analysis of the completeness of a seismic catalogue, *Lett. al Nuovo Cimento* 42 (1985) 21–27.
- [27] R. McGuire, Seismic hazard and risk analysis, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, United States of America, 2004.
- [28] N. Ambraseys, J. Douglas, K. Sarma, P. Smit, Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: Horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration, *Bull. Earthquake Eng.* 3 (1) (2005) 1–53.
- [29] M. Ordaz, F. Martinelli, A. Aguilar, J. Arboleda, C. Meleti, V. d'Amico, CRISIS 2014. Program for computing seismic hazard, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.
- [30] Ministerio de Hacienda y Administración Pública – MHAP. Dirección General del Catastro. 2013 [consultado 15 Sep 2013]. Disponible en: <http://www.catastro.meh.es/>
- [31] G. Grünthal, European Macroseismic Scale, Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, 1998.
- [32] E. Miranda, Approximate seismic lateral deformation demands in multistory buildings, *J. of Struct. Eng.* 125 (4) (1999) 417–425.
- [33] M. Ordaz, Metodología para la evaluación del riesgo sísmico enfocada a la gerencia de seguros por terremoto, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., 2000.
- [34] CIMNE, EAI, INGENIAR, ITEC. Probabilistic modeling of natural risks at the global level: Global Risk Model. 2013 [consultado 3 Ene 2014]. Disponible en: <http://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2013/en/home/documents.html>
- [35] O.D. Cardona, Ordaz vM., M. Mora, M.A. Salgado-Gálvez, G.A. Bernal, D. Zuloaga, et al., Global risk assessment: A fully probabilistic seismic and tropical cyclone wind risk assessment, *Intern. J. of Disaster Risk Reduct.* 10 (2014) 461–476.
- [36] United Nations International Strategy for Disaster Risk Reduction - UNISDR, Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2013, Geneva, Switzerland, 2013.
- [37] Consorcio de Compensación de Seguros – CCS. Estadística: Riesgos extraordinarios. Serie 1971-2012. 2012 [consultado 20 Dic 2013]. Disponible en: <http://www.consorcioseguros.es/web/c/document.library/getfile?uuid=548d4f59-b6c5-40dd-b06b-98dbcefd790f&groupId=10124>
- [38] Y. Vargas, L. Pujades, A. Barbat, J. Hurtado, Capacity, fragility and damage in reinforced concrete buildings: A probabilistic approach, *Bull. Earthquake Eng.* 11 (6) (2013) 2007–2032.
- [39] Y. Vargas, L. Pujades, A. Barbat, Evaluación probabilista de la capacidad, fragilidad y daño sísmico en edificios de hormigón armado, *Rev.Int. Métodos Numér. Cál. Diseño Ing.* 29 (2) (2013) 63–78.
- [40] Y. Vargas, A. Barbat, L. Pujades, J. Hurtado, Probabilistic seismic risk evaluation of reinforced concrete buildings, *Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build.* 167 (2013) 327–336.
- [41] J. Vielma, A. Barbat, S. Oller, Seismic performance of waffled-slab floor buildings, *Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build.* 162 (SB3) (2009) 169–182.
- [42] J. Vielma, A. Barbat, S. Oller, Seismic safety of low ductility structures used in Spain, *Bull. Earthquake Eng.* 8 (1) (2010) 135–155.

- [43] M.C. Marulanda, Modelación probabilista de pérdidas económicas por sismo para la estimación de la vulnerabilidad fiscal del Estado y la gestión financiera del riesgo soberano [tesis doctoral], Universidad Politécnica de Cataluña, UPC, Barcelona, España, 2013.
- [44] O.D. Cardona, La gestión financiera del riesgo de desastres: Instrumentos financieros de retención y transferencia para la Comunidad Andina, PREDECAN, Lima, Perú, 2009.
- [45] T.J. Andersen, Innovative financial instruments for natural disaster risk management. Technical paper, Inter-American Development Bank, 2002.
- [46] P. Freeman, M. Keen, M. Mani, Dealing with increased risk of natural disasters: Challenges and options, 8, International Monetary Fund. Fiscal Affairs Department, 2003, pp. 2003-2197.