

ESCENARIOS DE RIESGO SÍSMICO PARA LA CIUDAD DE MÁLAGA

J. Irizarry⁽¹⁾, A. Macau⁽¹⁾, T. Susagna⁽¹⁾, R. García⁽³⁾, S. Figueras⁽¹⁾, T. Goded⁽²⁾, D. Clavero⁽³⁾,
y A. Pazos⁽⁴⁾,

⁽¹⁾ *Institut Geològic de Catalunya*

⁽²⁾ *Universidad Complutense de Madrid*

⁽³⁾ *Laboratorio del Instituto de Investigación y de Control de Calidad de la Edificación*

⁽⁴⁾ *Real Instituto y Observatorio de la Armada*

jirizarry@igc.cat

RESUMEN

La ciudad de Málaga está localizada en una de las zonas de mayor peligrosidad sísmica de España. Según la Norma Sismorresistente Española, la peligrosidad sísmica de la ciudad para un periodo de retorno de 500 años se define con una aceleración pico de 0.11g, correspondiente a una intensidad de VII-VIII grados. En el año 1680 tuvo lugar en el SE de España un fuerte terremoto con una intensidad epicentral de VIII-IX (EMS-98) que se sintió en gran parte de la Península Ibérica produciendo cuantiosos daños en la ciudad de Málaga. Se presenta la evaluación de daños esperados en la ciudad incluyendo efectos de suelos para estos dos escenarios realizados dentro del proyecto ERSE (Escenarios Realistas de Riesgo Sísmico en España). Estos escenarios de daño se realizan utilizando las matrices de probabilidad de daño según las clases de vulnerabilidad de la escala EMS-98 (Grünthal, 1998) y el método del índice de vulnerabilidad basado en la distribución de las tipologías estructurales en la ciudad. Se mostrarán las consecuencias que se podrían esperar en caso de ocurrir en la región un sismo similar al de 1680 y se compararán con las propias del escenario propuesto por la Norma Sismorresistente Española.

Palabras clave: vulnerabilidad, daños, pérdidas, intensidad macrosísmica, efectos de suelos

SUMMARY

The city of Malaga is affected by one of the higher seismic hazard levels expected within the country. According to the Spanish seismic code, the seismic hazard affecting the city for a return period of 500 years is defined with a peak ground acceleration of 0.11g, corresponding to an intensity of VII-VIII. In 1680 a strong earthquake occurred in the SE of Spain with an epicentral intensity of VIII-IX (EMS-98) was felt in most of the Iberian Peninsula causing expensive damages in the city of Málaga. The damage evaluation for the city including soil effects is presented for these two scenarios performed within the ERSE project (Escenarios Realistas de Riesgo Sísmico en España). These damage scenarios were performed using damage probability matrices based on the vulnerability classes of the EMS-98 scale (Grünthal, 1998) and the vulnerability index method based on the structural typologies of the city. The consequences that could be expected in the case of a similar earthquake occurring in the region are shown and compared with those of the scenario proposed by the Spanish seismic code.

Keywords: vulnerability, damage, losses, macroseismic intensity, soil effects

Introducción

La ciudad de Málaga está bajo la amenaza de uno de los niveles de peligrosidad

sísmica más altos de España. En el pasado, la ciudad fue afectada por terremotos fuertes que produjeron daños severos. Este nivel de peligrosidad en combinación con la concentración de población que caracteriza la ciudad y la vulnerabilidad sísmica de sus edificios hacen que la ciudad de Málaga tengan un alto potencial de sufrir daños severos si se repiten terremotos como los que la han afectado en el pasado.

Este trabajo presenta los estudios realizados dentro del marco del proyecto ERSE para la evaluación del riesgo sísmico de la ciudad de Málaga. La evaluación del riesgo sísmico se realiza para dos casos específicos incluyendo efectos de suelo. El primer caso considera la peligrosidad sísmica definida por la Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE, 2002) para un periodo de retorno de 500 años, y el segundo explora lo que pasaría hoy en día en el caso de ocurrir un terremoto como el que afectó la región de Málaga en 1680.

El estudio de microzonación para la ciudad de Málaga considera los resultados de medidas de ruido sísmico para evaluar la frecuencia fundamental de los suelos, y una clasificación geotécnica de los tipos de suelo para determinar, mediante simulación numérica 1D, las funciones de transferencia de las distintas columnas de suelo identificadas. La vulnerabilidad sísmica de la ciudad se caracteriza en función de las clases de vulnerabilidad de la escala EMS-98, y de las tipologías estructurales típicas de la ciudad mediante el método del índice de vulnerabilidad. La evaluación de daños se lleva a cabo a partir de dos métodos: el método de las matrices de probabilidad de daño basado en las clases de vulnerabilidad de la escala EMS-98 y el método del índice de vulnerabilidad. Las pérdidas asociadas a estos escenarios de daño se expresan en términos de edificios inhabitables, personas sin hogar, heridos y pérdidas de vidas humanas.

Objetivos

El principal propósito de este trabajo es evaluar escenarios de riesgo sísmico para la ciudad de Málaga. Como parte de este, se pretende caracterizar la respuesta sísmica de los suelos de la ciudad y realizar su correspondiente microzonación para poder incluir efectos de suelo en la evaluación del riesgo. También se analizará la vulnerabilidad del parque edificado de la ciudad en función de clases e índices de vulnerabilidad. Los escenarios de daños se evaluarán para dos escenarios sísmicos utilizando dos métodos: uno basado en las clases de vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño, y otro basado en el método del índice de vulnerabilidad. Finalmente se compararán los resultados de ambas metodologías.

Área de Estudio

El área de estudio de este trabajo se centra en la ciudad de Málaga, o sea, la parte más altamente poblada del municipio del mismo nombre. El área sombreada en la Figura 1 indica la extensión de la población de la ciudad de Málaga. En esta área se concentra la amplia mayoría de sus casi 34,000 edificios donde viven las casi 564,000 personas que tiene el municipio. En la Figura 1 también se muestran los distritos delimitados por el ayuntamiento de Málaga y para los cuales se dispone información estadística sobre la población, la edad y altura de los edificios. (Los números de la figura indican el nombre de cada distrito.)

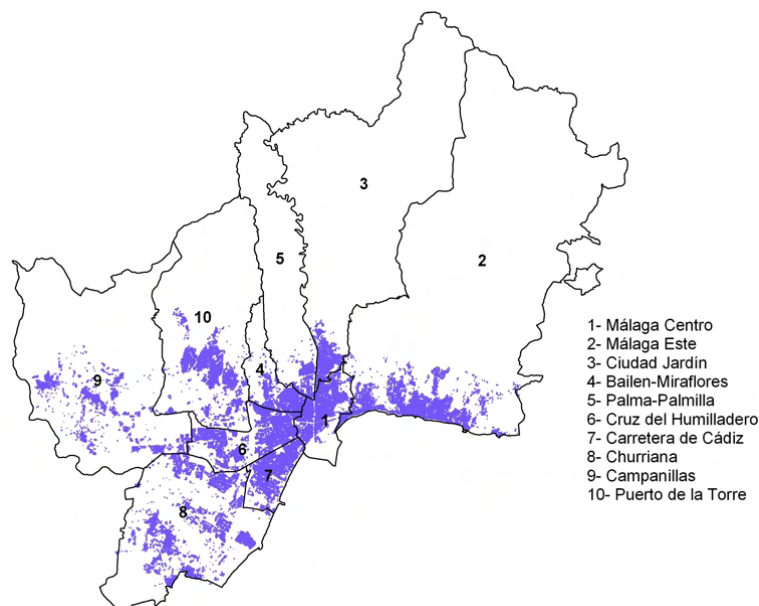


Figura 1 : Distritos y área densamente poblada del municipio de Málaga

Peligrosidad Sísmica de la Ciudad de Málaga

La sismicidad de la Península Iberia está caracterizada por la ocurrencia de terremotos de magnitud moderada, generalmente menor de 5.0. La mayoría de los terremotos son superficiales ($h < 40$ km) pero también han ocurrido terremotos intermedios ($40 < h < 150$ km) y profundos ($h \approx 650$ km) (Buforn et al. 1995). A partir de estudios previos de la sismicidad histórica, se conoce que la península ibérica ha sufrido terremotos fuertes, con una intensidad máxima de X grados, como los terremotos de Lisboa (1755), Torreveja (1829) y Arenas del Rey (1884).

La región de Málaga presenta una sismicidad compleja con la ocurrencia de terremotos superficiales e intermedios. En 1494 y 1581, la ciudad de Málaga fue afectada por dos terremotos con intensidades máximas de VIII y VII grados, respectivamente, los cuales causaron daños importantes. El terremoto de 1680 ($I_0 = VIII-IX$) fue muy destructivo causando daños severos en la ciudad y sus alrededores. Muñoz y Udías (1988) le asignaron a este terremoto una profundidad de 50 km, una magnitud de 6.5 y un epicentro a unos 35 km al oeste del puerto de Málaga, basándose en un mapa de isosistas.

La norma sismorresistente española (NCSE-02) establece que, para un periodo de retorno de 500 años, a la ciudad de Málaga le corresponde una aceleración pico del terreno (PGA) de 0.11g y una intensidad de VII-VIII grados (Dirección General de Protección Civil, 1997).

Estudio de los Efectos de Suelo en la Ciudad de Málaga

Desde el punto de vista geológico, los diferentes materiales que afloran en la ciudad de Málaga pertenecen al Complejo Maláguide (en la mitad este y el noroeste de la ciudad), materiales Cuaternarios (se extienden a lo largo de la costa, en los márgenes de los ríos y arroyos, principalmente los ríos Guadalmedina y Guadalhorce, y además al pie de ciertas colinas), y materiales Pliocenos (dispuestos entre el Cuaternario y el relieve Maláguide).

Para el estudio de los efectos de suelo se ha tenido en cuenta la base de datos geotécnica de Málaga, el mapa de microzonación sísmica de la ciudad en función del coeficiente C y el cociente H/V calculado a partir de medidas de ruido sísmico. El coeficiente C depende de las características geotécnicas del terreno de cimentación, está propuesto por la Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02) para considerar un coeficiente de amplificación del terreno en la obtención de la aceleración sísmica de cálculo. El coeficiente C se obtiene realizando una media ponderada de los primeros metros de suelo, y varía entre 1 para roca compacta ($V_s > 750$ m/s) y 2 para suelos blandos ($V_s < 200$ m/s). En la Figura 2 se muestran las cuatro zonas obtenidas en la ciudad de Málaga teniendo en cuenta el valor del coeficiente C (Clavero y Ramos, 2005). También se representa la posición de las cuatro columnas de suelo que se han caracterizado para realizar las simulaciones numéricas 1D (Macau et al, 2007).

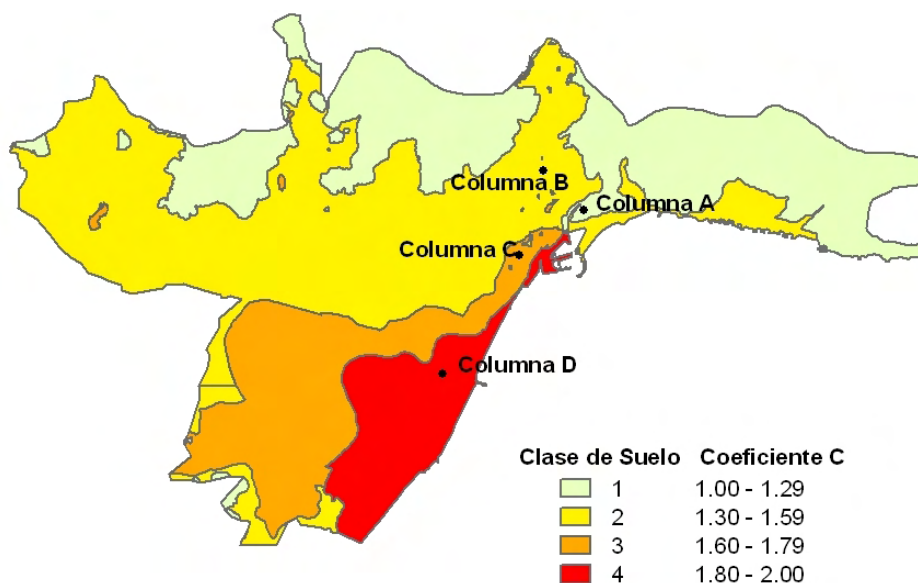


Figura 2 : Mapa de la microzonación sísmica de la ciudad de Málaga, se han definido cuatro clases de suelo en función de los diferentes valores del coeficiente C. También se muestra la situación de las columnas de suelo analizadas.

Durante el mes de Junio de 2005 se realizó una campaña de medidas de ruido sísmico en 74 emplazamientos diferentes de la ciudad de Málaga. Se ha aplicado el método del cociente espectral H/V, método de Nakamura (Nakamura, 1989), para calcular la frecuencia fundamental de cada uno de los emplazamientos. Los resultados obtenidos nos han permitido caracterizar las cuatro clases de suelo que se muestran en la Figura 2 con las siguientes frecuencias fundamentales: 1Hz para las clases de suelo 2 y 3, 0,4Hz para la clase de suelo 4, mientras que la clase de suelo 1 (roca) no muestra ningún pico en el cociente espectral H/V. Los resultados obtenidos muestran cierta dispersión que, en un estudio más detallado, permitirán diferenciar zonas más pequeñas.

Se ha aplicado el método lineal equivalente 1D ProShake para obtener las funciones de transferencia y caracterizar el movimiento del suelo para cada una de las clases de suelo definidas (Figura 2). Se ha definido una columna de suelo característica para cada zona partiendo de la información disponible en la base de datos geotécnicos que ha realizado LIDYCCE (Laboratorio del Instituto de Investigación y de Control de Calidad de la Edificación) recopilando la información de los informes geotécnicos de unos 400 sondeos pertenecientes a 100 estudios geotécnicos de la ciudad de Málaga.

Como sismo de entrada en roca se ha seleccionado un acelerograma de la base de datos de movimientos sísmicos europeos: European Strong-Motion Database 2000 (Ambraseys et al., 2000) con un contenido espectral similar al propuesto por la Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02). Este acelerograma se ha escalado a un PGA de 0,11g que corresponde al valor del PGA que propone la Norma para la ciudad de Málaga para un periodo de retorno de 500 años. En la Figura 3 se muestran las funciones de transferencia calculadas en dos columnas de suelo definidas en la ciudad de Málaga. En la figura también se ha añadido el valor de la frecuencia fundamental del suelo obtenida aplicando el método de Nakamura a los registros de ruido sísmico de los emplazamientos cercanos a estas columnas.

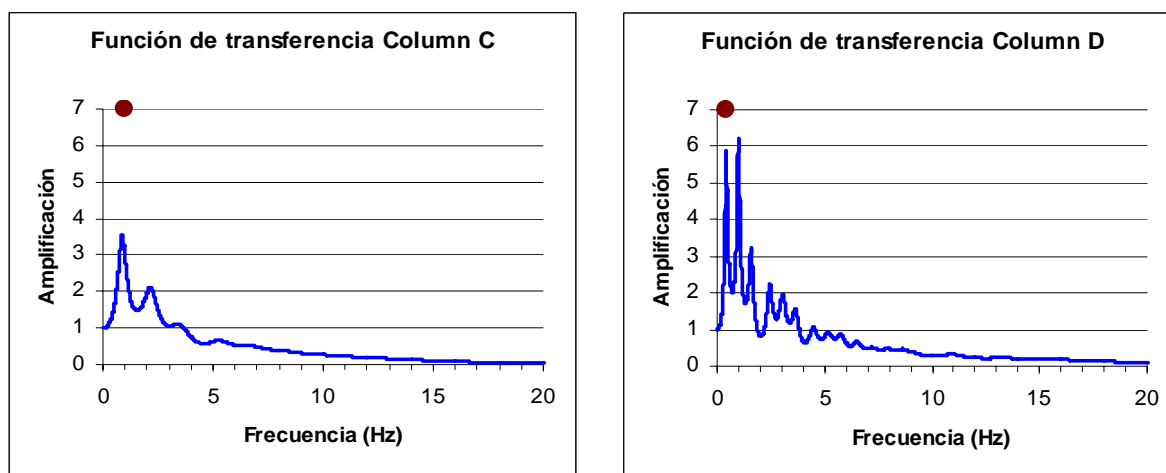


Figura 3 : Funciones de transferencia calculadas en las columnas C (clase de suelo 3) y D (clase de suelo 4) junto con los valores de la frecuencia fundamental (punto) obtenidos mediante el método de Nakamura en emplazamientos cercanos a las columnas.

Se ha calculado el valor del PGA y de la Intensidad de Arias (AI) para cada uno de los acelerogramas sintéticos obtenidos en cada una de las columnas de suelo. Estos valores se muestran en la Tabla 1. Las clases de suelo 2 y 3, caracterizadas por capas finas de suelos blandos, muestran un valor similar para el PGA y para la AI. Se observa que la clase de suelo 4 tiene un valor mayor para la AI que para el PGA. Este comportamiento puede ser debido a la presencia de un basamento rocoso profundo (frecuencia fundamental de 0.4Hz) que produce un alargamiento del acelerograma y en consecuencia una mayor Intensidad de Arias. Por tanto, la Intensidad de Arias parece más representativa para la respuesta de un suelo profundo que la aceleración máxima (Macau et al., 2007).

La Intensidad de Arias (AI) y la intensidad macrosísmica se pueden relacionar a partir de observaciones empíricas, como por ejemplo la propuesta por Cabañas et al. (1997) para el área Mediterránea. De este modo, el incremento de intensidad macrosísmica (ΔI_S) representativo de cada clase de suelo se puede obtener, usando la Ecuación 1, a partir del cociente entre la Intensidad de Arias en suelo y en roca (A_{I_S}/A_{I_R}). El incremento de intensidad macrosísmica obtenido para cada columna de suelo se muestra también en la Tabla 1.

$$\Delta I_S = 0.66 \ln \left(\frac{A_{I_S}}{A_{I_R}} \right) \quad (1)$$

Los valores del incremento de intensidad macrosísmica debidos al efecto del suelo se usarán para aplicar un incremento al valor de intensidad propuesto por la Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02) para un suelo de referencia en la ciudad de Málaga.

Zona de Suelos	PGA (g)	AI (cm/s)	ΔI MSK
1	0.11	19.4	0
2	0.14	36.7	0.5
3	0.14	38.9	0.5
4	0.14	63.7	1

Tabla 1: Valores del PGA y de la AI calculados para cada clase de suelo junto con los valores correspondientes del incremento de intensidad macrosísmica (ΔI MSK) calculados para cada clase de suelo.

Escenario Sísmico Propuesto por la Norma Sismorresistente Española

El primer escenario sísmico está basado en la norma sismorresistente española (NCSE-02) que considera que para un periodo de retorno de 500 años toda la ciudad de Málaga se ve afectada por una intensidad en suelo medio de VII-VIII grados en la escala EMS-98. Al cruzar los distritos afectados por esta intensidad en suelo medio y el mapa de microzonación presentado en la Figura 2 se obtienen las intensidades que probablemente afecten a la ciudad, considerando el escenario propuesto por la norma NCSE-02 corregido por el efecto del suelo. El mapa de intensidades obtenido se muestra en la Figura 4. Incluyendo los efectos de suelos, la mayoría de la ciudad estaría afectada una intensidad de VIII grados mientras que cerca de la costa podría llegar hasta VIII-IX grados.

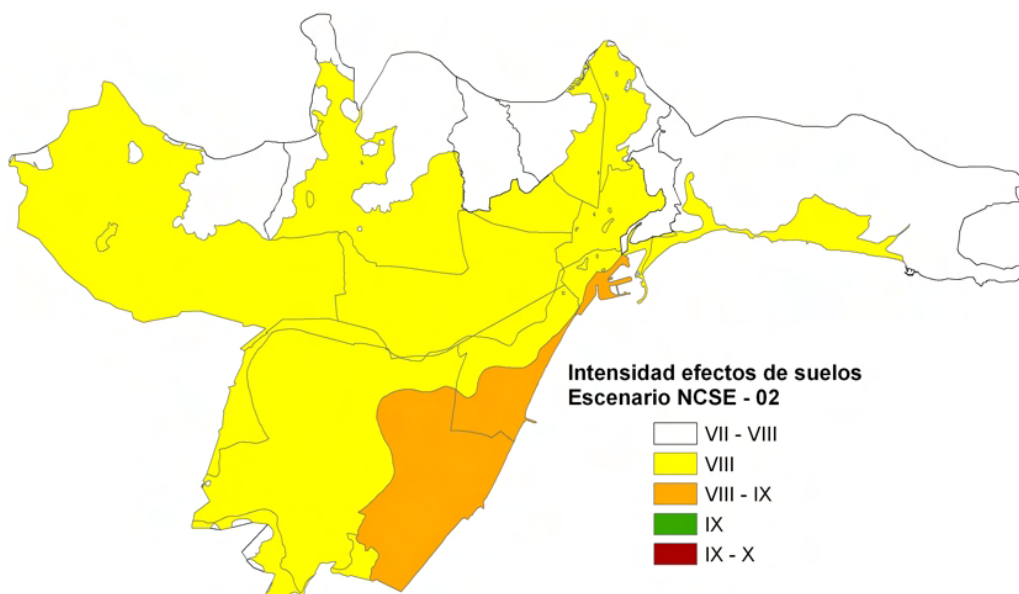


Figura 4: Mapa de intensidades con efectos de suelo que se considerará para el escenario de riesgo sísmico asociado a la NCSE-02.

Escenario Sísmico Basado en el Terremoto de 1680

El segundo escenario sísmico se basa en la acción del terremoto de 1680 que afectó severamente la provincia de Málaga causando graves daños a la ciudad de Málaga. La Figura 5 muestra las intensidades percibidas en algunos pueblos de la provincia de Málaga como consecuencia de este fuerte terremoto con intensidad máxima de VIII–IX grados en la escala EMS-98 y que se sintió en gran parte de la Península Ibérica (Goded, 2006). Esta figura muestra además los diferentes epicentros que han sido propuestos para este terremoto. Goded (2006) realizó una reevaluación de los datos disponibles para este terremoto durante la cual establece que el epicentro más probable es el propuesto por Muñoz y Udías (1988) que lo sitúa en las coordenadas 36.7° N y 4.7° W, a unos 25 km del centro de la ciudad de Málaga (Goded et al., 2007).

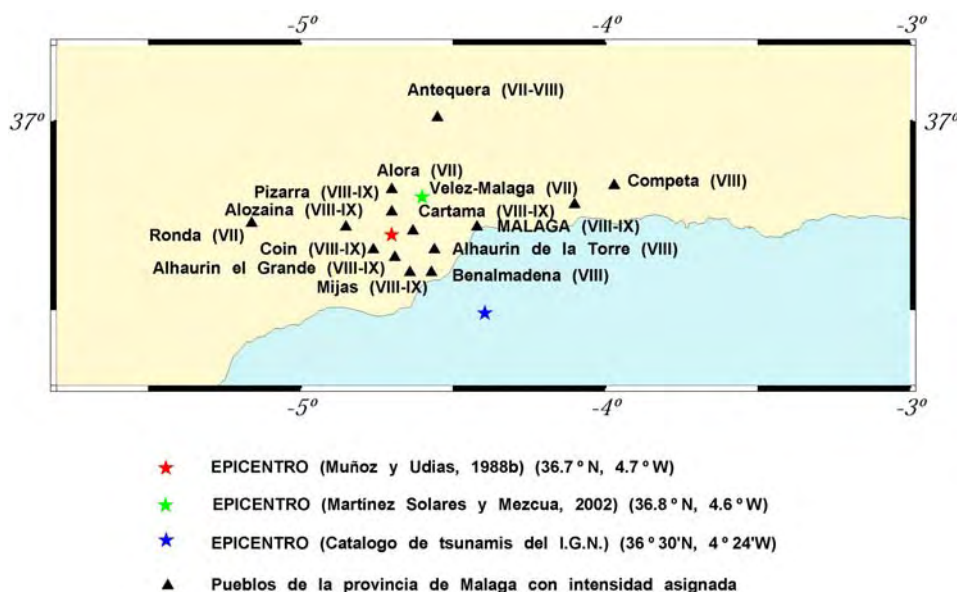


Figura 5: Intensidades percibidas en pueblos de la provincia de Málaga durante el terremoto de 1680 y los posibles epicentros del mismo (Goded, 2006).

Con datos de 36 localidades donde se percibió el terremoto de 1680 se ajustó una curva de atenuación tipo Sponheuer (1960) (Ecuación 2) donde I_0 es la intensidad epicentral, I la intensidad en un punto situado a una distancia r , h la profundidad focal, b la expansión geométrica, γ la atenuación anelástica y k el factor que relaciona la intensidad con el logaritmo de la aceleración pico del suelo.

$$I_0 - I = k \log(\sqrt{(r^2 + h^2)} / h)^b + k\gamma \log e(\sqrt{r^2 + h^2} - h) \quad (2)$$

Fijando el valor de la atenuación anelástica (γ) a $1 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}$ y dejando libres la profundidad (h) y el parámetro de expansión geométrica (b) se obtiene una profundidad, h , de $37 \pm 14 \text{ km}$, y un valor b de 1.59 ± 0.40 con una desviación de $(I_0 - I)$ de ± 0.7 . En la Figura 6 se puede observar la curva obtenida en línea continua y su desviación en líneas discontinuas. El ajuste indica un valor de profundidad alto que apunta a situar el foco por debajo de la corteza (sismo intermedio) tal y como indica el trabajo realizado por Goded (2006).

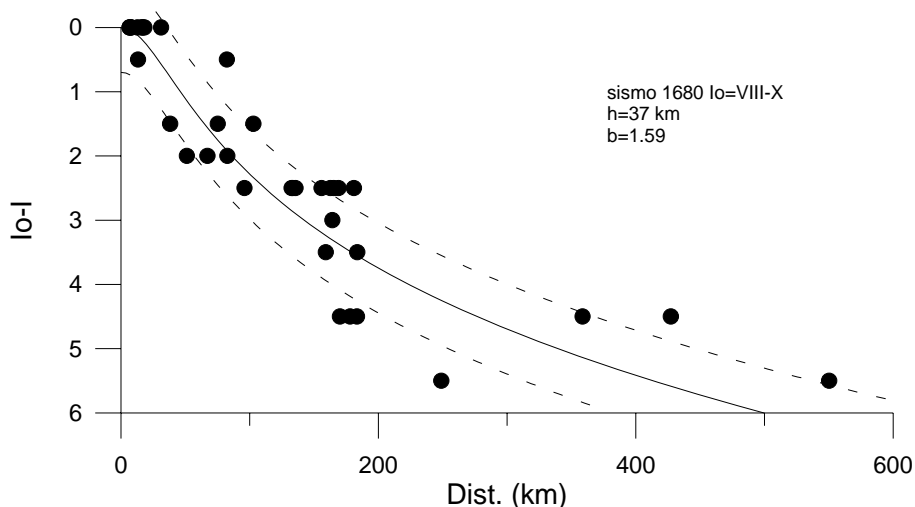


Figura 6: Ajuste de una curva de atenuación con la información de intensidades sentidas en el terremoto de 1680.

La Figura 7 muestra el mapa obtenido al representar los radios de acción del ajuste de la atenuación obtenido para los datos de intensidades sentidas disponibles para el terremoto de 1680. Las intensidades en suelo medio esperadas en la ciudad según este escenario varían entre VII-VIII y VII-IX grados. Este mapa de intensidades en suelo medio esperadas para la ciudad de Málaga se cruzó con el mapa de microzonación que considera efectos de suelo mostrado en la Figura 2 para obtener el mapa de las intensidades, con efectos de suelo, que se pueden esperar en la ciudad en caso de ocurrir un terremoto similar al de 1680 (Figura 8).

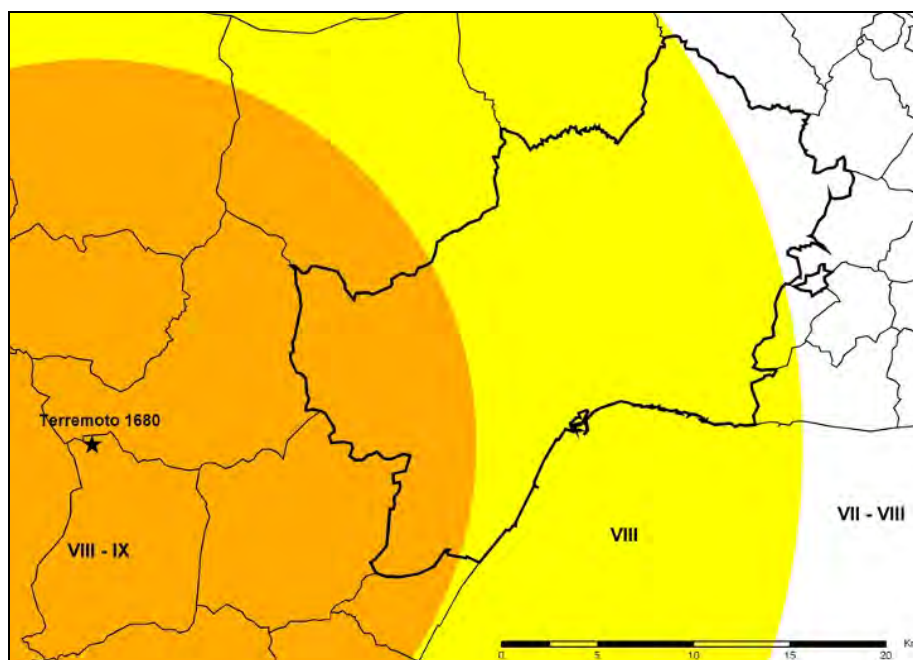


Figura 7: Intensidades en suelo medio esperadas en la ciudad de Málaga para un terremoto como el de 1680 obtenido del ajuste de atenuación tipo Sponheuer.

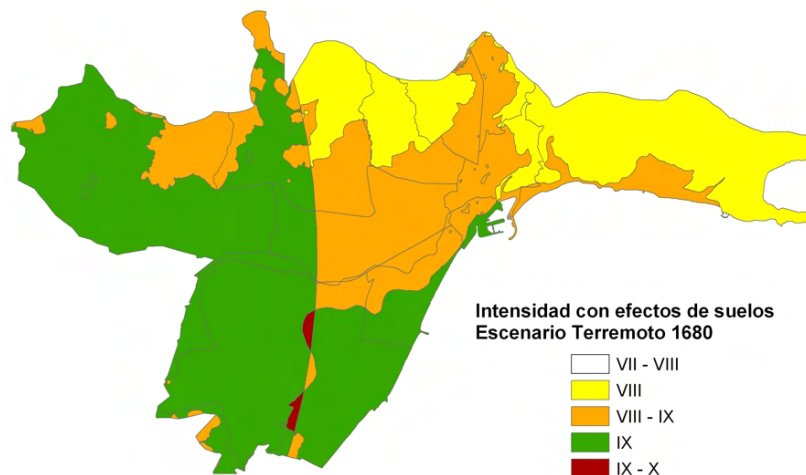


Figura 8: Mapa de intensidades con efectos de suelo a ser usado en el escenario de riesgo sísmico basado en el terremoto de 1680.

Evaluación de los Escenarios de Daños basados en Clases de Vulnerabilidad EMS-98

Para la evaluación de los daños asociados a estos escenarios sísmicos se han escogido dos metodologías de carácter estadístico. La primera de estas es el método de las matrices de probabilidad de daño que Roca et al. (2006) habían aplicado a la región de Cataluña y dentro del proyecto ERSE se identifica como una evaluación de Nivel 0. Este método está basado en las clases de vulnerabilidad de la escala EMS-98 y en las matrices de probabilidad de daño para cada clase de vulnerabilidad desarrolladas por Chávez (1998) a partir de observaciones de daños en terremotos italianos.

La Tabla 2 muestra la matriz de probabilidad de daño para los edificios con vulnerabilidad clase A junto a las descripciones de los grados de daño. Como se puede observar, la matriz ofrece la distribución de daño asociada a diferentes niveles de intensidad. Para llevar a cabo la aplicación de este método en la ciudad de Málaga fue necesario definir la distribución de las clases de vulnerabilidad, que varían desde A hasta F en orden decreciente de vulnerabilidad.

Intensidad	Grados de Daño para Edificios de Clase A					
	0	1	2	3	4	5
V	0.441	0.392	0.14	0.025	0.002	0
V-VI	0.325	0.388	0.2115	0.0645	0.0105	0.0005
VI	0.209	0.384	0.283	0.104	0.019	0.001
VI-VII	0.145	0.324	0.314	0.165	0.047	0.005
VII	0.08	0.263	0.346	0.227	0.074	0.01
VII-VIII	0.045	0.169	0.287	0.286	0.168	0.045
VIII	0.01	0.075	0.227	0.346	0.262	0.08
VIII-IX	0.005	0.04	0.136	0.268	0.336	0.215
IX	0	0.005	0.044	0.191	0.409	0.351
IX-X	0	0.003	0.023	0.103	0.296	0.575
X	0	0	0.001	0.017	0.184	0.798

Grado de Daño	Descripción
0	Sin Daño
1	Leve
2	Moderado
3	Severo
4	Muy Severo
5	Colapso

Tabla 2 : Matriz de probabilidad de daño para los edificios con clase de vulnerabilidad A.

En el caso de la ciudad de Málaga se siguió el ejemplo de la metodología aplicada a Cataluña (Roca et al, 2006; Chávez, 1998) donde la distribución de las clases de vulnerabilidad se definió en función de las alturas y año de construcción de los edificios. Para ello se llevaron a cabo junto con LYDICCE visitas técnicas en la ciudad para determinar los rangos de periodos constructivos y número de plantas más característicos de la ciudad, así como las vulnerabilidades de sus tipologías constructivas más representativas. Como fruto de este trabajo se obtuvo la distribución de clases de vulnerabilidad propia para la ciudad de Málaga que se muestra en la Tabla 3. Una vez se ha definido el número de edificios asociados a cada clase de vulnerabilidad es muy fácil obtener la distribución de daño usando las matrices de probabilidad de daño para cada clase de vulnerabilidad.

Plantas	Clase Vuln.	Periodo Constructivo				
		Hasta 1950	1951-1960	1961-1970	1971-1980	Después de 1980
<= 5	A	20	12	14	10	20
	B	80	40	40	40	40
	C	0	47	42	40	30
	D	0	1	4	10	10
> 5	A	40	20	20	20	30
	B	60	50	40	40	30
	C	0	30	35	35	30
	D	0	0	5	5	10

Tabla 3 : Distribución de las clases de vulnerabilidad para la ciudad de Málaga (porcentajes).

Evaluación de los Escenarios de Daños basada en Índices de Vulnerabilidad

El segundo método con el cual se evaluarán los daños que se pueden esperar en la ciudad de Málaga es el método del índice de vulnerabilidad (Corsanego y Petrini, 1994; Bernardini, 2000; Giovinazzi y Lagomarsino, 2004). En este método las diversas tipologías constructivas se caracterizan mediante un índice de vulnerabilidad que al cruzarse con la intensidad por medio de una función de vulnerabilidad permite calcular el daño esperado. Dentro del proyecto ERSE esta metodología se identifica como una evaluación de Nivel 1. El índice de vulnerabilidad de una tipología estructural puede modificarse para ajustarse a características específicas de un conjunto de edificios como lo pueden ser su altura, edad, estado de mantenimiento, etc.

Para calcular la distribución de daño esperado se utiliza la función de vulnerabilidad (Ecuación 3) que fue propuesta por Sandi y Floricel (1995) y usada por Giovinazzi y Lagomarsino (2002) para la evaluación estadística de daños a edificios ordinarios. Esta función permite evaluar el grado de daño promedio, μ_d , esperado a partir de los valores de índice de vulnerabilidad, V_i , de un conjunto de edificios y la intensidad, I , que los afecta. Para obtener las probabilidades de daño asociadas a cada grado de daño y su correspondiente número de edificios se utiliza en este caso la distribución beta como lo recomienda Giovinazzi (2005).

$$\mu_d = 2.5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6.25V_i - 13.1}{2.3} \right) \right] \quad (3)$$

Durante las visitas técnicas por la ciudad de Málaga también se identificaron las tipologías estructurales más representativas y se desarrolló una distribución de estas tipologías en función del año de construcción y del número de plantas, que se presenta en la Tabla 4. La vulnerabilidad de estas tipologías se caracterizó tomando como base los índices de vulnerabilidad definidos dentro del proyecto RISK-UE (Mouroux y Lebrun, 2006). Sus respectivos índices de vulnerabilidad también se muestran en la Tabla 4.

Plantas	Tipología	Vi Promedio	Descripción	Periodo Constructivo				
				Antes 1950	1951-1960	1961-1970	1971-1980	Después de 1980
<=5	M1.2	0.740	Muros Piedra Simple	20	0	0	0	0
	M3.1	0.740	Muros Ladrillo + Vigas Madera	80	0	0	0	0
	M3.4	0.616	Muros Ladrillo + Vigas RC	0	70	15	0	0
	RC1	0.442	Pórticos Rígidos	0	0	0	34	0
	RC3.2	0.462	Pórticos RC con Vigas de Canto	0	30	85	0	0
	RC3.2	0.482	Pórticos RC con Vigas Planas	0	0	0	33	20
	RC3.2	0.502	Pórticos RC con Forjado Reticular	0	0	0	33	80
>5	M1.2	0.740	Muros Piedra Simple	0	0	0	0	0
	M3.1	0.740	Muros Ladrillo + Vigas Madera	100	0	0	0	0
	M3.4	0.616	Muros Ladrillo + Vigas RC	0	0	0	0	0
	RC1	0.442	Pórticos Rígidos	0	0	0	0	0
	RC3.2	0.462	Pórticos RC con Vigas de Canto	0	100	100	0	0
	RC3.2	0.482	Pórticos RC con Vigas Planas	0	0	0	0	0
	RC3.2	0.502	Pórticos RC con Forjado Reticular	0	0	0	100	100

Tabla 4 : Distribución de las tipologías estructurales más representativas de la ciudad de Málaga y asignación de los índices de vulnerabilidad.

Los índices de vulnerabilidad promedio han sido modificados en función de diversos parámetros que se muestran en la Tabla 5. Se ha penalizado la vulnerabilidad de los edificios de mampostería antiguos asumiendo que el mantenimiento dado a los mismos ha sido deficiente. Se aumenta el índice de vulnerabilidad de todas las tipologías con más de 6 plantas, aunque este incremento es mayor para las estructuras de hormigón armado (RC). La condición de planta débil o piso blando también se toma en consideración para todas las tipologías. Esto se lleva a cabo considerando que el 75% de los edificios de la ciudad de Málaga poseen alguna característica que conlleva la condición de piso blando.

Modificador de Vulnerabilidad	Tipología	Indicador	Valores
Estado de Conservación	Mampostería	Deficiente (<1950)	+0.04
Número de Plantas	Mampostería	Bajo - Medio (1 a 5)	0.00
		Alto (6 o más)	+0.06
Planta Débil	Todas	Bajo - Medio (1 a 5)	0.00
		Alto (6 o más)	+0.08
Nivel de Código de Diseño	Hormigón Armado (RC)	Ninguno o Bajo	+0.16
		Medio	0.00
		Alto	-0.16

Tabla 5 : Modificadores del índice de vulnerabilidad a ser considerados.

Otra modificación de la vulnerabilidad que solo afecta a las estructuras de hormigón armado es el hecho de que se hayan construido siguiendo normas sismorresistentes específicas. Para España se considera que las estructuras recientes cumplen con una normativa sismorresistente de nivel bajo, por lo que se aplica para todas estas tipologías el modificador para la condición de ausencia de código o aplicación de un código bajo. Una vez se modifican los índices de vulnerabilidad y el número de edificios asociados a cada uno se procede a calcular la distribución de daños mediante la Ecuación 3 y la distribución beta.

Caracterización de la Vulnerabilidad Sísmica de la Ciudad de Málaga

Usando las metodologías ya expuestas se evaluó la vulnerabilidad para la ciudad de Málaga cuyos resultados se muestran en la Figura 9. La distribución de vulnerabilidad según clases de vulnerabilidad (Nivel 0) muestra que las clases de vulnerabilidad B y C caracterizan a la mayoría de los edificios de la ciudad. Cabe observar que esta distribución incluye un 16% de clase A, la más propensa a daños importantes durante un sismo. Dados los porcentajes de las diferentes clases de vulnerabilidad y las recomendaciones de Chávez (1998), la vulnerabilidad de la ciudad se puede clasificar como de nivel medio.

En la Figura 9 también se muestra la distribución de la vulnerabilidad obtenida usando la metodología del índice de vulnerabilidad. El índice de vulnerabilidad promedio que caracteriza a la ciudad de Málaga es de 0.711 indicando que su vulnerabilidad es considerable. La distribución del índice de vulnerabilidad se ha expresado usando una equivalencia aproximada con las clases de vulnerabilidad (Giovinazzi y Lagomarsino, 2004; Giovinazzi, 2005) para facilitar su comparación con los resultados del nivel 0. Como se puede observar los resultados son bastante diferentes aunque ambas están centradas en la clase de vulnerabilidad B. Esta diferencia en la vulnerabilidad de los dos métodos puede deberse al hecho de que la equivalencia ha sido desarrollada sin considerar los modificadores de la vulnerabilidad que, al aumentar la vulnerabilidad, debería dar lugar a una vulnerabilidad de nivel 1 más alta que la vulnerabilidad obtenida mediante el nivel 0.

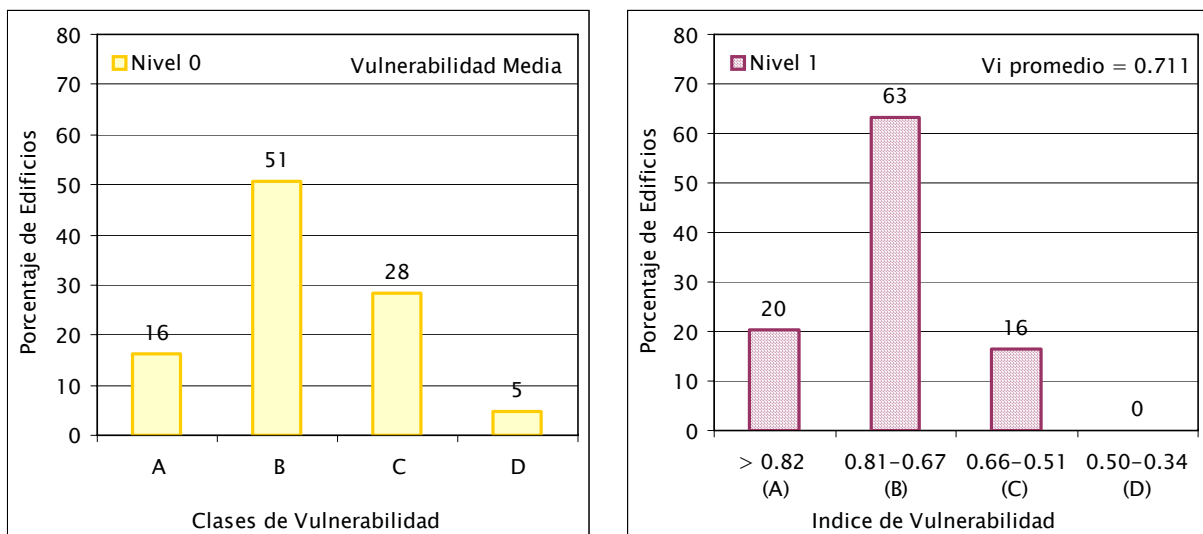


Figura 9 : Vulnerabilidad de la ciudad de Málaga según las dos metodologías consideradas.

Escenarios de Daños para la Ciudad de Málaga Según la Norma Sismorresistente

La distribución de edificios según el grado de daño esperado para el escenario propuesto por la Norma Sismorresistente Española y un periodo de retorno de 500 años para las dos metodologías consideradas se muestran en la Figura 10. Ambas distribuciones de daño están centradas en los grados de daño 1 y 2 indicando que para este escenario predominan los daños leves y moderados.

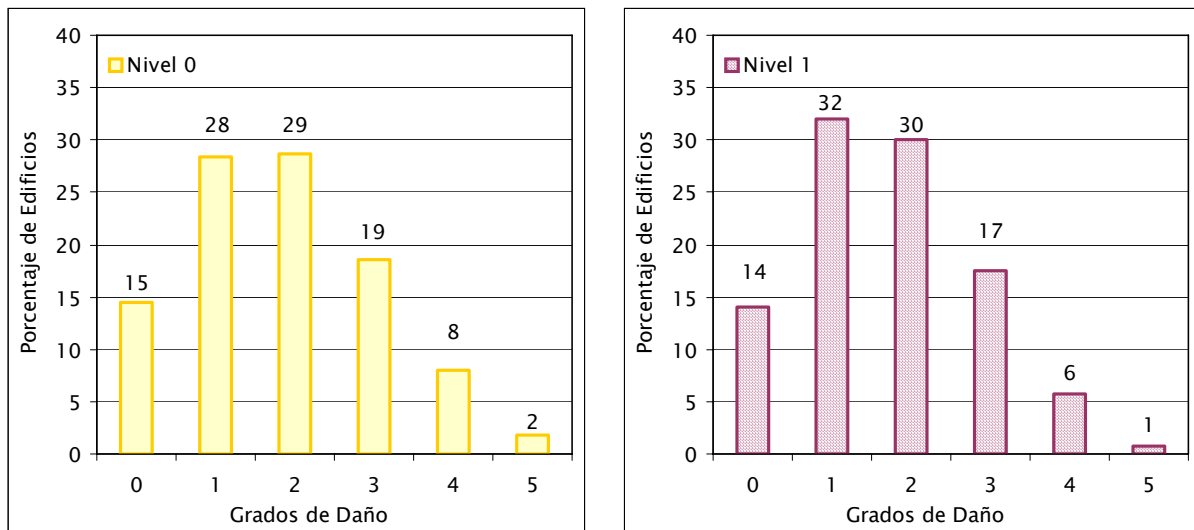


Figura 10 : Distribución de daños de la ciudad de Málaga para el escenario propuesto por la NCSE-02 para un periodo de retorno de 500 años según las dos metodologías consideradas.

Las dos metodologías reflejan un importante porcentaje de edificios que podrían verse afectados por daños muy severos e incluso colapso (grados de daño 4 y 5). Aplicando el método basado en las clases de vulnerabilidad, un 10% de los edificios de la ciudad podrían sufrir daños muy severos o colapso, mientras que con el método del índice de vulnerabilidad este porcentaje se reduce a un 7%. Aún con esta reducción, la cifra es significativa porque, dados los más de 33,000 edificios en la ciudad de Málaga, se podría esperar alrededor de 2,000 edificios con daños muy severos o colapso debido a este escenario. Los distritos con mayor porcentaje de edificios que podrían presentar daños serios son: Málaga Centro, Carretera de Cádiz, Churriana, Campanillas y Cruz de Humilladero.

Escenarios de Daños para la Ciudad de Málaga Basado en el Terremoto de 1680

La Figura 11 presenta las distribuciones de daño obtenidas para el escenario basado en el Terremoto de 1680 tanto para la metodología de Nivel 0 como para la de Nivel 1. Al comparar estas distribuciones de daño con las obtenidas para el escenario de la Norma Sismorresistente se puede observar que ambas están centradas en los grados de daño 2 y 3, representando así una expectativa de daños aún mayores que los del escenario de la NCSE-02. Esto era de esperarse dado que un escenario como el de un terremoto similar al de 1680 representa un evento muy destructor en el cual la mayoría de los edificios de la ciudad se verían afectados por intensidades entre VIII y IX grados debido a la influencia de los efectos de suelo que se pueden esperar en la ciudad.

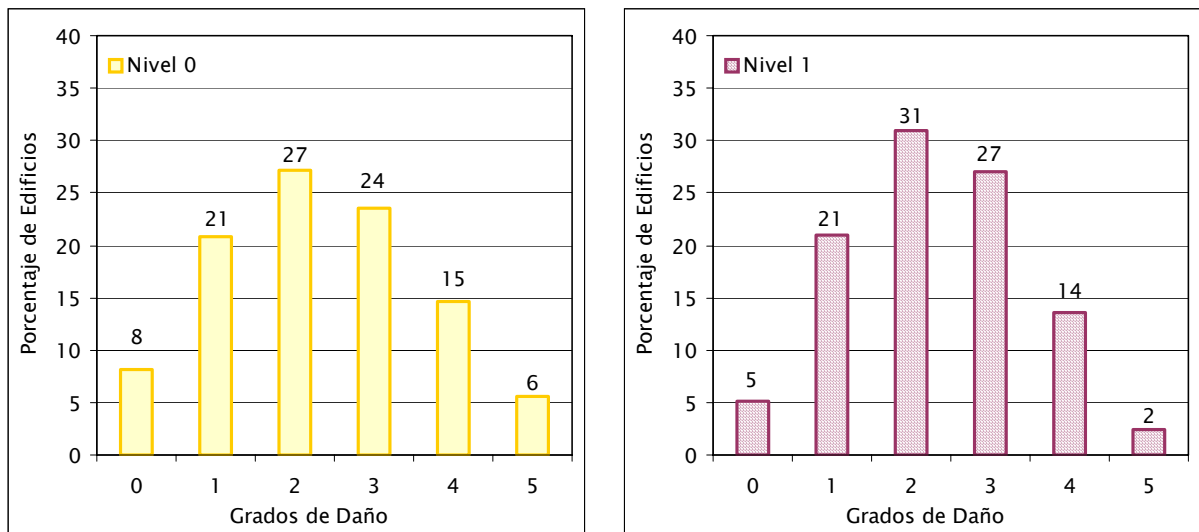


Figura 11 : Distribución de daños de la ciudad de Málaga para el escenario basado en la ocurrencia de un terremoto similar al del año 1680 según las dos metodologías consideradas.

En este escenario casi la mitad de los edificios sufrirían daños moderados y severos (grados de daño 2 y 3) teniendo en cuenta los resultados de la metodología de Nivel 0, basada en las clases de vulnerabilidad, mientras que según la metodología de Nivel 1 esta condición de daño podría afectar el 58% de los edificios. Al comparar los resultados referentes al porcentaje de edificios con posibles daños muy severos y colapso (grados de daño 4 y 5), la metodología basada en las clases de vulnerabilidad presenta un 21% de edificios afectados en este renglón, mientras que con el método del índice de vulnerabilidad este porcentaje totaliza un 16%. Al ser este un escenario tan intenso, no puede pasar desapercibido que del 2 al 6% de los más de 33,000 edificios en la ciudad podrían colapsar.

Evaluación de las Pérdidas Asociadas a cada Escenario

Para cada uno de los escenarios considerados se calculan las pérdidas que se podrían asociar a los mismos expresándolas en términos de edificios inhabitables, personas sin hogar, heridos y víctimas mortales. El número de edificios inhabitables se calcula como la suma de la mitad de los edificios con grado de daño 3, y la totalidad de los edificios con grados de daño 4 y 5. Con el número de edificios inhabitables y la razón de personas por edificio se estima el número de personas sin hogar. Las pérdidas en función de vidas humanas se calculan usando el criterio propuesto por el ATC-13 (1985), que provee coeficientes para el cálculo de heridos leves, heridos graves y víctimas mortales en función del número de personas asociadas a los edificios dañados.

La Tabla 6 muestra un resumen de las pérdidas calculadas en base a las distribuciones de daño obtenidas para los escenarios sísmicos considerados. Para cada escenario se indica un rango esperado de pérdidas dada la gran incertidumbre que conllevan estas cifras. Se observan grandes pérdidas asociadas al escenario basado en el terremoto de 1680 implicando que este puede ser un escenario devastador no solo para la ciudad de Málaga sino también para la región de Andalucía en general. Las pérdidas obtenidas para el escenario de la NCSE-02 para un periodo de retorno de 500 años, aunque menores que las del escenario similar al terremoto de 1680, se consideran muy altas al estar asociadas a un escenario de diseño de la norma sismorresistente cuyas consecuencias también causarían un gran impacto en el progreso no solo de la ciudad de Málaga sino de la región completa.

Escenario Basado en :	NCSE-02 - 500 Años	Terremoto de 1680
Edificios Inhabitables	5,000 - 6,500	9,000 - 11,000
Personas Sin Hogar	90,000 - 115,000	160,000 - 300,000
Heridos Leves	15,000 - 25,000	30,000 - 80,000
Heridos Graves	3,000 - 8,000	9,000 - 40,000
Victimas Mortales	1,000 -3,000	3,000 - 20,000

Tabla 6 : Resumen de las pérdidas que podrían esperarse en los escenarios considerados.

Conclusiones

Málaga es una ciudad altamente poblada y los resultados de los escenarios evaluados indican que es muy vulnerable a sufrir daño sísmico. La mayoría de su población está concentrada cerca de la costa donde los efectos de amplificación del suelo son más críticos. Las consecuencias de escenarios sísmicos como los considerados en este trabajo pueden causar un estado de emergencia para el cual sería esencial disponer de muchos recursos y una buena coordinación por parte de las instituciones para el manejo de la misma.

En el estudio de los efectos de suelo se ha observado que la respuesta de los suelos blandos está mejor caracterizada usando la Intensidad de Arias (AI) que con la aceleración máxima (PGA). Se han obtenido acelerogramas sintéticos en las columnas de suelo definidas en los distintos tipos de suelo. Se ha calculado la Intensidad de Arias de estos acelerogramas y se ha correlacionado con la intensidad macrosísmica obteniendo, para cada clase de suelo, un valor del incremento de intensidad para considerar los efectos de suelo en los escenarios sísmicos. En los escenarios sísmicos propuestos, las intensidades obtenidas varían entre un mínimo de VII-VIII en roca y un máximo de IX-X en la clase de suelo 4.

Con respecto a los escenarios sísmicos considerados queda claro que el escenario basado en la posibilidad de que ocurra un terremoto similar al que afectó a la ciudad en 1680 representa un escenario mucho más devastador que el escenario basado en la norma de construcción sismorresistente española (NCSE-02). Su intensidad epicentral de VIII-IX, su cercanía a la ciudad de Málaga y la amplificación debida a los efectos de suelo hacen que este terremoto represente un gran potencial destructor para la zona de estudio.

La caracterización del parque de edificios de la ciudad en función de la distribución de las clases de vulnerabilidad y de las tipologías constructivas más representativas de la ciudad ha permitido realizar análisis de vulnerabilidad basados en las clases de vulnerabilidad y en el índice de vulnerabilidad. Al comparar los resultados de vulnerabilidad de ambos métodos, se observa que usando el método del índice de vulnerabilidad la ciudad parece ser más vulnerable. Aun así ambos análisis indican que su vulnerabilidad es de nivel medio. Las diferencias observadas pueden deberse al hecho de que la equivalencia usada entre las clases y los índices de vulnerabilidad no considera la aplicación de los modificadores de la vulnerabilidad. En el caso de la ciudad de Málaga con aproximadamente un 75% de edificios afectados por la condición de planta débil o piso blando, la influencia de los modificadores de la vulnerabilidad es mayor pudiendo causar las diferencias observadas.

La comparación de las distribuciones de daño obtenidas por las dos metodologías consideradas, la basada en las clases de vulnerabilidad y el método del índice de vulnerabilidad, para un mismo escenario sísmico refleja que el primer método presenta mayores daños severos que el método del índice de vulnerabilidad. La razón para esta diferencia radica en el hecho que el método basado en las clases de vulnerabilidad utiliza la distribución binomial, mientras que el método del índice de vulnerabilidad usa la distribución beta a la hora de distribuir el daño. Sandi y Floricel (1995) observaron que la dispersión de la distribución binomial es demasiado alta cuando se considera una clasificación de edificios detallada, lo que puede implicar que se sobreestime el número de edificios asociados a los grados de daño 4 y 5, en el caso de valores bajos del grado de daño promedio, μ_d .

Los resultados de daños esperados para el escenario basado en la NCSE-02 muestran que entre un 6-8% de los más de 33,000 edificios de la ciudad de Málaga podrían sufrir daños muy severos, casi la mitad de los mismos podrían verse afectados por daños moderados o severos e incluso hasta un 2% de ellos podrían colapsar. Considerando el escenario basado en el terremoto de 1680, se obtiene que cerca de la mitad de los edificios sufrirían daños moderados o severos, pero a diferencia con el escenario de la NCSE-02, hasta un 15% podrían experimentar daños muy severos y un 2-6% podrían colapsar. Estos resultados indican que, aun con el escenario basado en al NCSE-02 para un periodo de retorno de 500 años, la ciudad se estaría enfrentando a unos daños importantes muy serios que afectarían fuertemente a sus habitantes.

Dados los niveles de daño obtenidos, se estiman pérdidas muy altas que incluyen miles de edificios inhabitables, un alto porcentaje de personas sin hogar y heridos, así como una pérdida de vidas considerable, pudiendo generar un alto nivel de emergencia en la región. Como se ha presentado, el rango de las pérdidas asociadas a los escenarios considerados es muy amplio debido a las diferencias en las distribuciones de daño obtenidas usando las dos metodologías.

Referencias:

- Ambraseys, N. N., Smit, P., Berardi, R., Rinaldis, D., Cotton, F. y Berge-Thierry, C. (2000), "Dissemination of European Strong-Motion Data. CD-ROM collection. European Council", Environment and Climate Research Programme.
- ATC-13, (1985), "Earthquake damage evaluation data for California, ATC-13", Applied Technology Council, Redwood City, California.
- Bernardini, A. (2000), "The vulnerability of buildings - Evaluation on the national scale of the seismic vulnerability of ordinary buildings", CNR-GNDT, Rome.
- Buforn, E., Sanz de Galdeano, C., y Udías, A. (1995), "Seismotectonics of the Ibero-Maghrebian region", Tectonophysics Vol. 248, pp. 247-261.
- Cabañas, L., Benito, B. y Herráiz, M. (1997), "An approach to the measurement of the potential structural damage of earthquake ground motion", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, N° 26, pp 79-92.
- Chávez, J. (1998), "Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico a escala regional. Aplicación a Cataluña.", Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, 343 pp.
- Clavero, D. y Ramos, L. (2005), "Riesgos Geológicos y Geotécnicos en el término Municipal de Málaga", LIDYCCE, 42 pp.
- Corsanego, A. y Petrini, V. (1994), "Evaluation of criteria of seismic vulnerability of the existing building patrimony on the national territory.", Seismic Engineering, Vol. 1

- Patron Ed., pp. 76-106.
- Dirección General de Protección Civil (1997), "Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico", Imprenta Nacional del Boletín Oficial del Estado, Madrid, España.
 - Giovinazzi, S., (2005), "The vulnerability assessment and damage scenario in seismic risk analysis", Tesis Doctoral, Technical University of Braunschweig. Alemania, 300 pp.
 - Giovinazzi, S. y Lagomarsino, L., (2002), "A methodology for the vulnerability analysis of built-up areas", Proceedings of the International Conference on Earthquake Loss Estimation and Risk Reduction, Bucharest, DVD-Rom
 - Giovinazzi, S. y Lagomarsino, S. (2004), "A macroseismic method for vulnerability assessment of buildings", Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004, Paper ID 896.
 - Goded, T. (2006), "Reevaluación de daños de los terremotos de Málaga de 1494 y 1680", Trabajo de Investigación, Universidad Complutense de Madrid, 152 pp.
 - Goded, T., Buforn, E., Muñoz, D., y Martín, D., (2006), "Estudio preliminar de la vulnerabilidad de los monumentos de la ciudad de Málaga.", 3er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 8-11 Mayo 2007, Girona, 11 pp.
 - Grünthal, G. (editor) (1998), "European Macroseismic Scale 1998". *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, 7, Luxembourg, 99 pp.
 - Macau, A., Figueras, S., Colas, B., Lebrun, B., Bitri, A., Susagna, T., Cirés, J., González, M., y Roullé, A. (2006). "Seismic microzonation in two valleys of the Eastern Pyrenees: Andorra and the Cerdanya". First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, Septiembre 2006.
 - Macau, A., Figueras, S., Susagna, T., Colas, B., Le Brun, B., Bitri, A., Cirés, J., González, M., y Roullé, A., (2007), "Microzonación sísmica en el Pirineo Oriental en términos de aceleración y intensidad macrosísmica", 3er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 8-11 Mayo 2007, Girona.
 - Mouroux, P. y Lebrun, B. (2006), "RISK-UE project: an advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different european towns", In: C. S. Oliveira, A. Roca and X. Goula, (Editors), *Assessing and Managing Earthquake Risk*, pp 479 - 508, Springer.
 - Muñoz, D., y Udías, A. (1988), "Evaluation of damage and source parameters of the Malaga earthquake of 9 October 1680", *Seismograms and Earthquakes of the World*, pp. 208-221.
 - Nakamura, Y. (1989), "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface", *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, Nº 30-1, pp 25-33.
 - NCSE-02 (2002). "Normativa de Construcción Sismorresistente Española. Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes", Real Decreto 997/2002. Boletín Oficial del Estado No. 244 del 11 de octubre de 2002, España.
 - Roca, A., Goula, X., Susagna, T., Chávez, J., González, M. y Reinoso, E. (2006), "A simplified method for vulnerability assessment of dwelling buildings and estimation of damage scenarios in Spain", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol 4, pp 141 -158.
 - Sandi H., y Floricel I., (1995), "Analysis of seismic risk affecting the existing building stock", Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering, Vol. 3, pp 1105-1110.
 - Sponheuer, W. (1960), "Methoden zur Herdtirefenbestimmung in der Makroseismic", *Freiberger Forschungshefte*, C88, 117 pp.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado dentro del marco del proyecto ERSE (Escenarios Realistas de Riesgo Sísmico en España) (REN2003-5178-C03-01) financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología.