

## SERVICIO DE ACTUALIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE RIESGO SÍSMICO (RISMUR) EN LA REGIÓN DE MURCIA

## SERVICIO DE ACTUALIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE RIESGO SÍSMICO (RISMUR) EN LA REGIÓN DE MURCIA

### Anejo

## VULNERABILIDAD DE LA REGIÓN DE MURCIA









## Contenido

<b>1</b>	<b>PELIGROSIDAD SÍSMICA</b> .....	<b>4</b>
1.1	INTRODUCCIÓN: FUNDAMENTO Y DEFINICIONES.....	6
1.2	PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO .....	10
1.2.1	Definición de la fuente sísmica .....	10
1.2.2	Selección de modelos de movimiento fuerte .....	15
1.2.3	Estimación de la peligrosidad. Árbol lógico .....	15
1.3	APLICACIÓN EN LA REGIÓN DE MURCIA.....	18
1.3.1	Datos de partida.....	18
1.3.2	Caracterización de las fuentes sísmicas .....	36
1.3.3	Selección del modelo de movimiento fuerte .....	45
1.3.4	Estimación de la peligrosidad sísmica en roca .....	52
1.3.5	Estimación de la peligrosidad sísmica en suelo, incluyendo el Efecto local.....	65
1.3.6	Resultados .....	69
<b>2</b>	<b>RIESGO SÍSMICO</b> .....	<b>76</b>
2.1	INTRODUCCIÓN .....	78
2.2	EXPOSICIÓN .....	82
2.2.1	Introducción .....	82
2.2.2	Sistema de información geográfica (SIG) .....	83
2.2.3	Análisis de la exposición.....	92
2.3	VULNERABILIDAD Y GRADO DE DAÑO.....	96
2.4	CÁLCULO DEL DAÑO EN RELACIÓN CON LA VULNERABILIDAD .....	98
2.4.1	Metodología EMS-98.....	100
2.4.2	Metodología RISK-UE (I-DCM).....	108
2.4.3.	Combinación de metodologías.....	121
2.5	OTROS PARÁMETROS DE RIESGO .....	125
2.5.1	Introducción .....	125
2.5.2	Número de edificios que alcanzarán el colapso.....	126
2.5.3	Daño medio .....	127
2.5.4	Viviendas inhabitables y personas que quedarían sin hogar .....	128
2.5.5	Pérdidas humanas .....	130
2.5.6	Pérdidas económicas.....	135
2.6	CONCLUSIONES.....	137
2.6.1	Sobre Peligrosidad Sísmica en Suelo Genérico en Roca.....	137
2.6.2	Sobre peligrosidad sísmica incluyendo el efecto local .....	138
2.6.3	Sobre LA EXPOSICION en la Región .....	139
2.6.4	Sobre vulnerabilidad en la Región.....	140
2.6.5	Sobre Distribución de Daños y pérdidas .....	141
	REFERENCIAS .....	145
	ANEXO I. DETALLE DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA HÍBRIDA (ZONAS Y FALLAS) PARA EL CÁLCULO DE LA PELIGROSIDAD.....	152
	ANEXO II. CALIBRACION DE MODELOS DE ATENUACION CON DATOS LOCALES .....	162

En el proyecto RISMUR II se ha llevado a cabo una revisión del riesgo sísmico de la Región de Murcia, lo que ha supuesto la actualización del primer estudio a escala regional que se desarrolló en 2005 en el marco del proyecto RISMUR (Benito et al, 2008), cuyos resultados sirvieron de base para el plan de emergencias SISMIMUR.

En este segundo proyecto (RISMUR II), se realiza un nuevo estudio de riesgo sísmico de la Región de Murcia incorporando nuevas metodologías en la estimación de la peligrosidad y del riesgo sísmico, así como datos más recientes en las variables de cálculo a partir de la información generada a raíz del terremoto de Lorca de 2011. Concretamente, las aportaciones más significativas de este nuevo estudio se clasifican en dos bloques de acciones:

1. Actualización de los datos de partida:

- El catálogo de registros sísmicos se ha actualizado hasta octubre de 2013, permitiendo incorporar al cálculo de peligrosidad el último terremoto destructor ocurrido en la región (Lorca, 2011).
- El catálogo de zonificaciones se ha actualizado con las nuevas zonificaciones desarrolladas para España en estos últimos años, en especial las zonificaciones utilizadas en el Nuevo Mapa de Peligrosidad Sísmica de España que servirá para la revisión de la futura norma sismorresistente nacional, en adelante **MPSE** (IGN-UPM, 2012).
- El catálogo de fallas activas de la región se ha actualizado con la nueva base de datos QAFI (García-Mayordomo et al 2012a). Los parámetros físicos y cinemáticos de las fallas de Murcia han sido revisados y actualizados con los resultados del estudio de fallas activas de Murcia QAFIMUR desarrollado por el IGME para este proyecto específico (Martín-Banda y García-Mayordomo, 2013).
- El catálogo de modelos de movimiento fuerte (GMPE, *Ground Motion Prediction Equation*) se ha revisado y actualizado con los últimos modelos desarrollados a nivel mundial para régimen cortical de tectónica activa. En especial, se han incorporado y analizado los nuevos modelos GMPE desarrollados en la iniciativa NGA-W2.
- La base de datos con el parque inmobiliario de la región de Murcia se ha actualizado hasta septiembre de 2013, incorporando nuevos datos relativos a la estructura que han permitido incorporar nuevas clasificaciones de vulnerabilidad sísmica en edificios y viviendas.

## 2. Aplicación de nuevas metodologías de cálculo:

La definición de las fuentes sísmicas para la estimación de la peligrosidad se ha realizado incluyendo un modelo híbrido de fallas y zonas. Este modelo combinado ha permitido definir las fallas activas conocidas y modelizarlas en el cálculo como fuentes sísmicas independientes, lo que proporcionará una mayor aproximación al movimiento real que puede generarse especialmente en el entorno próximo a las fallas. Precisamente el terremoto de Lorca 2011 ha evidenciado que dicho movimiento es muy elevado en las inmediaciones de la falla y decae bruscamente a pocos kilómetros, hecho que no queda reflejado cuando se adoptan únicamente modelos de zonas sismogénicas en representación de la fuente sísmica. Se espera así obtener mejor resolución en la estimación de la peligrosidad sísmica en la región de Murcia, dado que hay un importante número de fallas activas, lo que a su vez llevará a una estimación más precisa del riesgo en las poblaciones próximas a esas fallas.

La estimación del daño estructural se realizó por medio de diferentes metodologías, empleando métodos empíricos y métodos analíticos y combinando sus resultados por medio de un árbol lógico. Éstos últimos se han aplicado asignando curvas de capacidad y fragilidad a las clases de vulnerabilidad identificadas en la región y modelizando la peligrosidad a través de curvas de demanda (o espectros de respuesta) que cubran las diferentes ordenadas espectrales de interés para las estructuras.

El riesgo sísmico se ha caracterizado no solo en términos de daño estructural en edificaciones y edificios inhabitables, sino que además se estiman pérdidas humanas y económicas.

# 1 PELIGROSIDAD SÍSMICA



## 1.1 INTRODUCCIÓN: FUNDAMENTO Y DEFINICIONES

---

Al igual que se hizo en RISMUR I, la estimación de la peligrosidad sísmica en RISMUR II se ha llevado a cabo por un método probabilista, con el fin de obtener en cada punto del territorio el movimiento esperado por acción de todas las fuentes en un área de influencia, con probabilidad de excedencia del 10 % en 50 años.

La concepción probabilista de la peligrosidad sísmica considera la probabilidad de que se iguale o supere un determinado nivel de movimiento del terreno, como resultado de la acción de terremotos en el área de influencia durante un período de tiempo especificado. Matemáticamente, la peligrosidad  $H$  queda definida por la expresión:

$$H = P [y \geq Y; \text{ en } t \text{ años, en el emplazamiento } E] \quad [1.1]$$

Donde  $Y$  es el nivel de movimiento cuya probabilidad de excedencia se incluye en la definición de peligrosidad en el emplazamiento  $E$ , y  $t$  es el periodo de exposición o intervalo de tiempo durante el cual se calcula la probabilidad de que se produzca, al menos, una excedencia del movimiento del terreno  $Y$ .

Lo más común en estimaciones de peligrosidad es considerar que la sismicidad de una determinada fuente sigue un proceso de Poisson. Entonces se puede suponer que el movimiento fuerte del suelo en un cierto emplazamiento también se rige por un proceso poissoniano. En este caso, la probabilidad de que haya al menos una excedencia del parámetro de movimiento en un tiempo de exposición  $t$ , está relacionada con la tasa anual de excedencia  $\lambda$  o con el periodo de retorno  $T$  (la inversa de la probabilidad anual de excedencia del movimiento), mediante la expresión:

$$P(\text{al menos 1 excedencia en } t \text{ años}) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-t/T} \quad [1.2]$$

La metodología probabilista concreta que se empleará en este estudio es la conocida como PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Assessment*), que fue originalmente propuesta en la guía metodológica del análisis probabilista de la peligrosidad sísmica (NRC-DOE-EPRI 1997) y se ha convertido en una metodología de uso generalizado en aplicaciones donde se requiere un control de la incertidumbre de los resultados. Con ella se pretende conseguir que el estudio de peligrosidad y los resultados obtenidos representen de la manera más general y completa posible el punto de vista de la comunidad científica involucrada en la materia. Para ello se hace hincapié en la importancia de identificar la naturaleza de la incertidumbre de los diversos factores que intervienen en el cálculo y cuantificarla apropiadamente.

La metodología PSHA (1997) constituye una mejora de los métodos convencionales del cálculo probabilista de la peligrosidad sísmica porque incorpora nuevos elementos cuya relevancia se ha venido evidenciando durante las últimas décadas, como son el análisis cuantitativo de incertidumbres, el concepto de árbol lógico y la desagregación de la peligrosidad.

La estimación de la peligrosidad sísmica parte de la definición de tres elementos principales:

1. Caracterización de la fuente sísmica. Supone la identificación de las fuentes potencialmente activas que afectan al emplazamiento de estudio. Estas fuentes son estudiadas y caracterizadas por medio de modelos matemáticos que se ajustan a las características de una determinada fuente, representando su patrón de sismicidad. Estos modelos establecen la frecuencia de ocurrencia de los sismos en la zona en función de su tamaño, quedando así definido el potencial sísmico de la fuente.
2. Caracterización de la atenuación del movimiento. Donde se identifica el comportamiento de la onda sísmica desde la fuente al emplazamiento de estudio por medio de modelos empíricos o teóricos.
3. Caracterización del efecto de sitio. Donde se identifican los efectos debido a las características litológicas, topográficas y de la estructura del subsuelo bajo el emplazamiento de cálculo y que pueden variar drásticamente las características del movimiento del terreno en la base rocosa.

Una vez definidos estos tres elementos, la peligrosidad sísmica en un emplazamiento se calculará mediante la suma de las contribuciones a la excedencia de un cierto nivel de movimiento fuerte (movimiento de referencia), en ese emplazamiento, debidas a la actividad de todas las fuentes sísmicas contenidas en la zona de influencia, con sus niveles de probabilidad asociados. Para ello, primero debe modelizarse cada fuente sísmica de forma independiente, definiendo su geometría y su patrón de recurrencia de terremotos. Seguidamente, se debe considerar el efecto de la atenuación del movimiento a través del medio de propagación entre la fuente y el emplazamiento y, por último, determinar el efecto de las condiciones locales (en el entorno más próximo de cada emplazamiento) sobre el movimiento sísmico.

En la Figura 1.1 se muestra un esquema de las fases que se han seguido para desarrollar el estudio de peligrosidad sísmica, desde la confección de los datos de partida hasta la estimación de los mapas de peligrosidad sísmica.

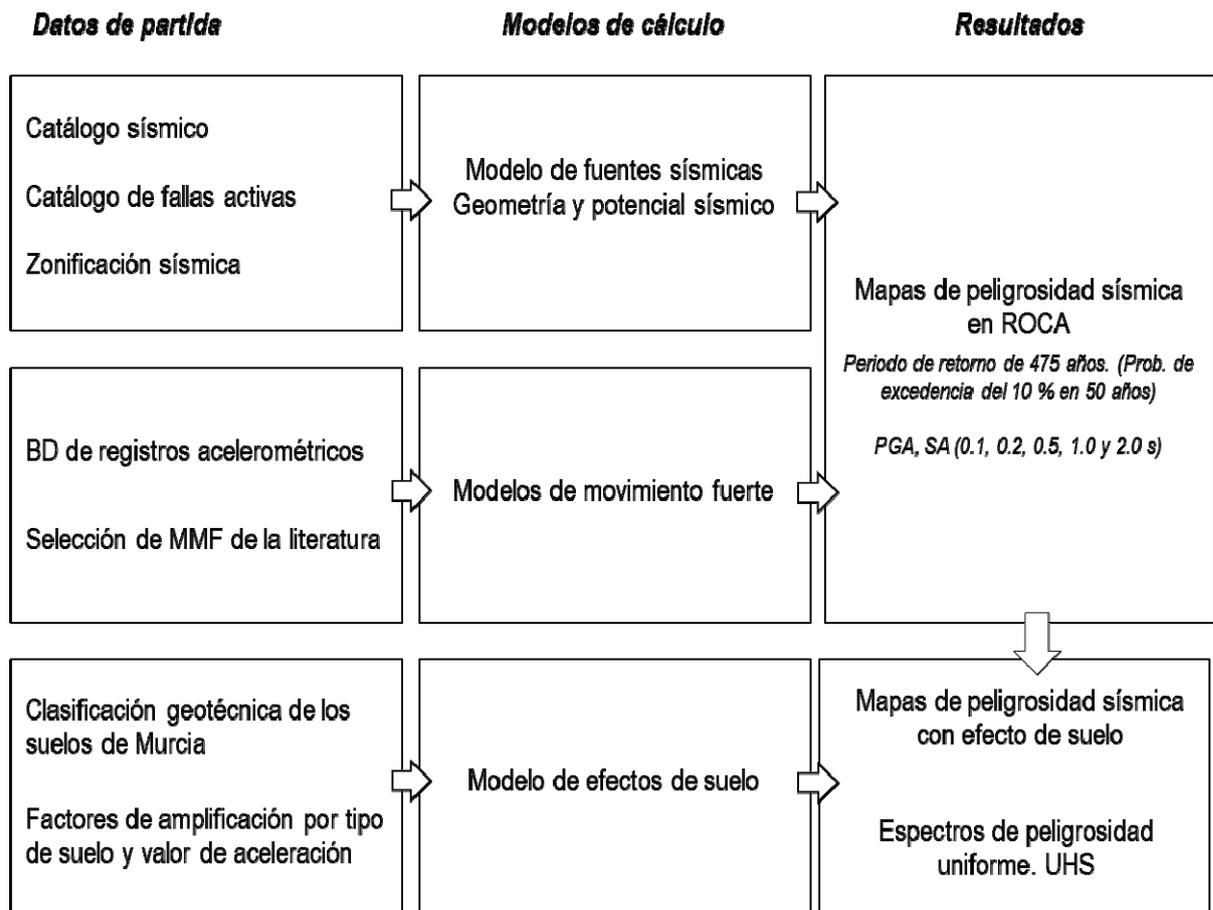


Figura 1.1. Esquema del estudio de peligrosidad sísmica.

### ECUACIÓN DE PELIGROSIDAD

La ecuación [1.3] proporciona la peligrosidad en un emplazamiento por una única fuente, dada como probabilidad anual de excedencia de un nivel del movimiento  $Y$  del parámetro  $y$ .

$$P_{anual}(y > Y) = \lambda_{anual}(y > Y) = \tau \iiint P(y > Y | m, r, \epsilon) \cdot p(m) \cdot p(r) \cdot p(\epsilon) \, dm \, dr \, d\epsilon \quad [1.3]$$

Donde:

$y$  representa el parámetro de movimiento con el que expresamos la peligrosidad (habitualmente aceleración pico PGA, o aceleración espectral SA (T)) e  $Y$  es el valor fijado del nivel de movimiento cuya excedencia se evalúa.

$\tau$  es la tasa anual de ocurrencia de sismos y se considera constante dentro de una misma fuente.

$p(m)$  se refiere a la función de densidad de probabilidad de la magnitud dentro de cada fuente. Describe la probabilidad de que ocurra un terremoto de una determinada magnitud en la fuente sísmica y representa directamente el denominado *efecto de la fuente*.

$p(r)$  se refiere a la función de densidad de probabilidad de la distancia. Describe la probabilidad de que si se produce un terremoto en la fuente, su foco se encuentre a una distancia  $r$  del emplazamiento de cálculo. Esta función representa la posible localización de un sismo dentro de la fuente sísmica y se relaciona con el *efecto de la atenuación del movimiento* a lo largo del trayecto entre la fuente y el emplazamiento.

$p(\varepsilon)$  está relacionada con la función de densidad de probabilidad asociada a la incertidumbre del movimiento que puede registrarse en el emplazamiento debido a un sismo determinado. Así, dadas una magnitud  $m$  y una distancia  $r$ , cabe esperar distintos niveles de movimiento dada la aleatoriedad del mismo; niveles que se consideran mediante una distribución lognormal de  $y$  en base a observaciones empíricas. El parámetro  $\varepsilon$  indica precisamente el número de desviaciones estándar que se consideran para estimar  $y$ .

$P(y > Y | m, r, \varepsilon)$  es un término de probabilidad que refleja si se produce o no excedencia del nivel de movimiento prefijado al calcular el movimiento esperado para unas variables  $m$ ,  $r$  y  $\varepsilon$  determinadas. Es por tanto un término que toma dos valores: 1 cuando sí se produce excedencia y 0 en caso contrario.

$$P(y > Y | m, r, \varepsilon \text{ fijos}) = 1 \quad \text{ó} \quad P(y > Y | m, r, \varepsilon \text{ fijos}) = 0 \quad [1.4]$$

La integral triple se extiende al rango de variación de las tres variables ( $m$ ,  $r$  y  $\varepsilon$ ) y se resuelve numéricamente, dado que en la mayor parte de los casos no existe solución analítica. Sumando la contribución de todas las zonas se obtiene la tasa anual de excedencia del movimiento o peligrosidad sísmica expresada en términos anuales (p. ej., Kramer 1996). Bajo la hipótesis de que la excedencia del movimiento es un proceso poissoniano, entonces esta probabilidad anual se traduce en una probabilidad en  $t$  años mediante la expresión:

$$P(y > Y \text{ en } t \text{ años}) = 1 - \exp(-t \cdot \lambda_{\text{anual}}) \quad [1.5]$$

## 1.2 PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

---

### 1.2.1 DEFINICIÓN DE LA FUENTE SÍSMICA

Las fuentes sísmicas representan los focos donde se generan los posibles terremotos. En este apartado del estudio se define el modelo de sismicidad que refleje, de la forma más completa posible, la geometría y el potencial sísmico de las fuentes que puedan contribuir al movimiento en cada emplazamiento o punto que se quiera estudiar. En este caso, dado que se trata de un estudio regional, se definirán puntos de una malla cubriendo toda la región.

Atendiendo a la geometría de las fuentes y a la modelización adoptada para representar el potencial sísmico, cabe diferenciar las siguientes opciones:

De acuerdo a la geometría, pueden diferenciarse cuatro grandes grupos de representación de las fuentes, por medio de:

- 1) Zonas sismogénicas tipo área cuyo potencial sísmico se considera uniforme (Cornell 1968 y Esteva 1968).
- 2) Polígonos que representan planos de fallas.
- 3) Malla de celdas regulares donde se reparte la sismicidad (Frankel 1995).
- 4) Una superficie de densidad de probabilidad de ocurrencia de eventos de distintas magnitudes (Woo 1996).

De estos cuatro grupos generales, el planteamiento de zonas sismogénicas en las que la sismicidad sigue un modelo poissoniano (lo que implica la independencia temporal y espacial entre la ocurrencia de dos terremotos) es conocido como método zonificado y ha sido el que se ha usado con más frecuencia en estudios de peligrosidad sísmica, considerándose uno de los métodos clásicos de representar las fuentes sísmicas. El uso sistematizado de zonas sismogénicas en lugar de fallas, que son las fuentes reales de la sismicidad, se ha debido al desconocimiento de éstas con el grado de detalle requerido como para poder incluirlas directamente en los cálculos de peligrosidad.

Sin embargo, en los últimos años se han ido recabando de forma creciente datos sobre el potencial sísmico de las fallas, gracias a estudios de paleosismicidad y control de deformaciones con técnicas GPS, que han comenzado a desarrollarse en muchas regiones, dando como resultado parámetros como la tasa de deslizamiento, el intervalo de recurrencia, el tiempo desde el último evento, etc. Estos datos permiten la modelización de las fallas como unidades independientes en el cálculo de la peligrosidad.

En España, la región de Murcia es precisamente la región donde existe mejor control de las fallas activas, tanto en lo referente a su geometría y posible segmentación, como a los índices de actividad sísmica. Por esta razón, en este trabajo incluimos las fallas conocidas como unidades independientes, empleando un método híbrido que combina las opciones 1) y 2), siguiendo la metodología recientemente propuesta en Rivas-Medina 2014.

De acuerdo con la modelización del potencial sísmico, se utilizan diferentes modelos matemáticos que determinan la frecuencia y el tamaño de sismos que se producen en una fuente sísmica en un tiempo determinado (por ejemplo en un año). Estos modelos se denominan **modelos de recurrencia** o leyes de recurrencia. Los parámetros más usados para definir el potencial sísmico son la tasa de sismos de una cierta magnitud ( $\dot{n}(m)$ ) o tasa acumulada de sismos de una magnitud igual o superior a una dada ( $\dot{N}(m)$ ), que en algunas publicaciones se denota como  $\lambda(m)$ , así como la proporción de sismos grandes frente a los pequeños  $b$  o  $\beta$ .

Dependiendo de la relación que se establezca entre estos parámetros, la literatura ofrece diferentes modelos. Cabe destacar el publicado por Gutenberg y Richter (1944) (GR) y usado con un doble truncamiento en magnitud ( $M_{min}$  y  $M_{max}$ ) propuesto por Cosentino et al. (1977), por ser el modelo de uso más generalizado para caracterizar la fuente. Este modelo establece una proporción entre el número de sismos de distintas magnitudes (parámetro  $b$  o  $\beta$ ) y deduce el número de sismos de una magnitud igual o superior a una mínima establecida ( $\dot{N}_{min}$ ), producidos en un cierto tiempo y en una zona determinada, a partir del cual se estima la tasa o número de sismos por año. Suele emplearse con dos formas funcionales diferentes (GR-modificado y GR-truncado). Otros modelos a destacar que tienen un planteamiento similar al modelo GR pero con algunas variantes son los publicados en Main y Burton (1981), Chinnery y North (1975) o el usado en Bath (1978) y Anderson (1979). La expresión matemática de ley de Gutenberg-Richter es:

$$\log N = a - b \cdot m \quad [1.6]$$

donde  $m$  es la magnitud,  $N$  representa la tasa acumulada de sismos de magnitud mayor o igual a una magnitud dada  $m$  y las constantes del modelo,  $a$  y  $b$ , son números reales positivos.

### 1.2.1.1 MODELO HÍBRIDO DE ZONAS Y FALLAS

En este modelo, las fallas activas conocidas serán modelizadas como fuentes sísmicas independientes y las zonas sismogénicas representarán el conjunto de fallas pequeñas o desconocidas que no pueden ser modelizadas de forma independiente por no conocer suficientemente sus características geométricas y mecánicas.

La metodología citada establece el reparto del potencial sísmico de las fuentes individuales por medio del reparto de la tasa de momento sísmico registrada en la región entre la tasa de momento sísmico acumulado en las fallas incluidas en dicha región y la que queda residual en la zona, entendiendo por zona la misma geometría que la región pero con menor sismicidad, al descontar de ella la correspondiente a las fallas. Se igualará el momento sísmico anual liberado en la región con el momento sísmico anual acumulado en la misma. (Figura 1.2).



Figura 1.2. Esquema de la descomposición del potencial sísmico de una región en diferentes fuentes

Partiendo de esta premisa, se asumen en el reparto de tasas de momento sísmico una serie de condiciones:

- La tasa sísmica anual observada en cada región, por medio del registro sísmico, se mantendrá constante y fija, independientemente de las fuentes sísmicas consideradas.
- El reparto del potencial sísmico no se hará con todo el catálogo sísmico, sino solo con aquel que con mayor probabilidad ha sido registrado de forma completa en la región, atendiendo a la magnitud de los sismos y a la cobertura espacio-temporal de estaciones en la zona de estudio. Dicho de otra forma, se considerará solo el periodo en el que el catálogo sísmico puede considerarse completo para cada rango de magnitud.
- El potencial sísmico de la falla que se sustrae del potencial sísmico regional para obtener el de la zona, no será el de toda la falla, sino aquel que ha sido registrado en el periodo en el que se considera que el catálogo es completo.

El registro sísmico que se tiene de una región viene dado por el catálogo de eventos. Este catálogo ayuda a conocer el potencial sísmico, ya que aporta información sobre el tamaño, localización y frecuencia de los sismos registrados.

El catálogo sísmico no proporciona información sobre todo el potencial sísmico de las fuentes, ya que dicho catálogo no cubre la profundidad temporal necesaria como para poder asegurar que se ha registrado el máximo potencial sísmico de las fuentes existentes. Por este motivo, el reparto de potencial sísmico se hará solo con los intervalos de tiempo del catálogo que se consideren completos para cada magnitud (utilizando los **periodos de completitud** para cada rango PC(m)). Del mismo modo, también se identificará el intervalo de magnitudes que pueden haber sido registradas de forma completa en el catálogo, estableciendo una **magnitud mínima de corte** (Mmin) y una **magnitud máxima de completitud** (MMC).

El reparto de tasa de momento sísmico se hará en dicho intervalo de magnitud (Mmin, MMC), tal y como muestra la ecuación [1.7].

$$\dot{M}_{Región}^{MMC} = \dot{M}_{Zona}^{MMC} + \sum \dot{M}_{Falla}^{MMC} \quad [1.7]$$

### 1.2.1.2 CONFECCIÓN DE LOS DATOS DE PARTIDA

#### *Catálogo sísmico de proyecto*

La primera etapa del estudio de peligrosidad sísmica en un cierto emplazamiento consiste en acotar la zona cuya sismicidad y tectónica pueden tener influencia en la peligrosidad de dicho emplazamiento; es decir, la zona en la que se pueden localizar fuentes sísmicas que presenten un peligro potencial para el sitio o la región estudiada. Esta zona se denomina zona de influencia y a través de ella se establece el marco de referencia para el resto del estudio. Los resultados de esta etapa permitirán determinar el grado de detalle con el que se deben abordar las siguientes fases.

El segundo paso a ejecutar en el estudio es la confección de un catálogo de proyecto que incluya todos los terremotos que potencialmente puedan afectar al emplazamiento, es decir, que se encuentren dentro de la zona de influencia.

El catálogo de proyecto que se utilice en los cálculos de peligrosidad debe ser *homogéneo*, en cuanto a la medida del tamaño de los terremotos, debe estar *depurado* de réplicas y premonitores que son dependientes de un sismo principal y cuya consideración incrementaría erróneamente la sismicidad de la zona a efectos de cálculo de la peligrosidad y, finalmente, debe ser *completo* para cada rango de magnitud, lo que requerirá determinadas correcciones para suplir la ausencia de registros, especialmente de los grados más bajos de magnitud, al remontarnos en el tiempo.

#### *Homogeneización del catálogo*

El catálogo de proyecto debe ser unión de los catálogos procedentes de todas las agencias que disponen de datos en la región y, además, debe ser homogéneo en cuanto al parámetro de tamaño, es decir, todos los terremotos deberán tener un dato de magnitud medido en la misma escala. Ello requiere realizar las conversiones pertinentes entre las diferentes estimaciones de magnitud catalogadas. En este trabajo se utiliza la magnitud momento  $M_w$  como parámetro de tamaño, lo que requerirá realizar conversiones de los datos dados en otras escalas a  $M_w$ .

Además, en el catálogo de proyecto también se eliminan los sismos de muy baja magnitud que no presenten una incidencia significativa en la peligrosidad y que pueden incrementar el valor del movimiento esperado, dando una estimación de la peligrosidad injustificadamente elevada. Se define para ello una magnitud umbral, filtrando todos los sismos que no alcancen dicha magnitud.

#### *Depuración del catálogo*

Asimismo, y con el objetivo de satisfacer la hipótesis de que la sismicidad se ajusta a un proceso *poissoniano*, lo que supone considerar que los sismos son independientes espacial y temporalmente, se eliminan del catálogo los terremotos que sean premonitores o réplicas de otro principal. Dicha eliminación es debida a que éstos contradicen la hipótesis de que no existe una vinculación causa-efecto entre sismos, al estar directamente asociados al sismo principal de su serie. Este proceso de depuración del catálogo precisa, en primera instancia, identificar series sísmicas o agrupaciones de terremotos relacionados en el espacio y en el tiempo, para

posteriormente sustraer de las mismas todos los eventos excepto los de mayor magnitud, que se consideran principales de la correspondiente serie.

#### *Compleitud del catálogo*

La última fase en la confección del catálogo de proyecto consiste en el análisis de completitud. Un catálogo sísmico se considera completo si contiene todos los sismos que han ocurrido en el área de influencia considerada y no sólo de aquellos de los que se tenga registro histórico o instrumental. El problema frecuentemente encontrado es que al remontarnos en el tiempo, la información relativa a terremotos pequeños o terremotos no sentidos disminuye o es inexistente. En general, cuanto menor sea la intensidad o magnitud, menor será el periodo en el que el catálogo pueda considerarse completo, ya que la información se pierde al remontarnos en el tiempo. Así pues, se deben fijar los años de referencia para cada rango de magnitud o de intensidad a partir de los cuales se puede asumir completitud. Esto se hace representando las frecuencias de aparición de terremotos de cada rango de magnitud en el catálogo e identificando el año de referencia a partir del cual la frecuencia cambia claramente. Una vez determinados los años de referencia, se determinan las tasas de ocurrencia de sismos para cada intervalo de magnitud o intensidad, a partir de dichos años. Estas tasas se consideran constantes, y se pueden usar para estimar (mediante extrapolación) el número hipotético de terremotos ocurridos durante todo el periodo de estudio, aunque estos no hayan sido documentados.

#### *Catálogo de fallas activas*

Cuando se estima la peligrosidad sísmica es importante tener un control de las fuentes reales generadoras de terremotos, es decir de las fallas. Si además se modelizan las fallas como fuentes sísmicas independientes, es importante tener una catalogación de todas las estructuras tectónicas activas que pueden afectar a la peligrosidad sísmica de la región de estudio, lo que significa conocer sus características geométricas (localización, acimut, buzamiento y profundidad (mínima y máxima) y cinemáticas (tasa de deslizamiento anual, periodo de recurrencia, tiempo desde el último evento).

#### *Catálogo de zonificaciones*

La falta de conocimiento sobre la totalidad de las fallas activas que pueden afectar a la peligrosidad sísmica de una región, hace necesario disponer de divisiones del territorio en zonas que tengan las mismas características tectónicas y el mismo potencial sísmico (tanto en frecuencia de sismos como en tamaño de los mismos), conocidas como zonas sismogénicas. Estos modelos de zonas, junto con las fallas de las que exista el suficiente control, componen el modelo de fuentes sísmicas final. A las divisiones del territorio en zonas se las denomina zonificaciones y es usual disponer de diferentes modelos (o zonificaciones) para un mismo territorio propuestas por diferentes autores, dada la subjetividad en su definición.

## 1.2.2 SELECCIÓN DE MODELOS DE MOVIMIENTO FUERTE

El modelo del movimiento fuerte del terreno o modelo de atenuación (GMPE, del inglés *Ground Motion Prediction Equation*) permite *traducir* el movimiento generado en la fuente sísmica al movimiento del terreno esperado en un emplazamiento a cierta distancia, a causa de los sismos originados en cualquiera de las fuentes definidas dentro de la zona de influencia. Así pues, los modelos del movimiento expresan, para una magnitud y una distancia fuente-emplazamiento concretas, una estimación del movimiento del terreno en el emplazamiento. Los modelos del movimiento presentan la siguiente forma funcional:

$$\ln y = \Psi(R, M, \dots) + \varepsilon \sigma_{\ln y} \quad [1.8]$$

donde:

$\ln y$  es el logaritmo (neperiano) del parámetro del movimiento en el emplazamiento (es habitual también encontrar logaritmo decimal en lugar de neperiano). A su vez, la variable  $y$  suele representar la aceleración pico, PGA, o alguna aceleración o velocidad espectral, SA o SV para ciertos periodos estructurales.

$\Psi(R, M, \dots)$  es una función de la magnitud, de la distancia y de otros parámetros característicos de la fuente o el medio (factor de suelo, tipo de falla, etc.).  $\Psi(R, M, \dots)$  se identifica con el valor medio de  $\ln y$ ; es decir con el valor obtenido para  $\varepsilon = 0$ , lo que supone predicción en la media de la distribución normal.

El término  $\varepsilon \sigma_{\ln y}$  se denomina término de error del modelo del movimiento. Consta de dos factores. El parámetro  $\varepsilon$  es un número real que indica el número de desviaciones estándar  $\sigma_{\ln y}$  utilizadas para evaluar el movimiento y  $\sigma_{\ln y}$  es la desviación estándar del  $\ln y$ .

En este estudio, se seleccionarán de la literatura especializada los modelos de movimiento fuerte desarrollados para regiones de régimen de corteza activa que han sido publicados recientemente y que cumplen con los requisitos de la zona de estudio (rangos de magnitud, rango de distancia, ordenadas espectrales que predicen...). Esos modelos seleccionados se calibrarán con una base de datos acelerométrica de sismos ocurridos en España en los últimos años por medio del método de calibración propuesto por Scherbaum et al, 2004 y Kale y Akkar 2012. En función del análisis de los residuos de los modelos con los datos locales, se identificarán los modelos de movimiento fuerte más apropiados para el cálculo de peligrosidad, que mejor reflejen la atenuación de la zona de estudio.

## 1.2.3 ESTIMACIÓN DE LA PELIGROSIDAD. ÁRBOL LÓGICO

En este trabajo se realiza el cálculo de la peligrosidad con el programa CRISIS, desarrollado por Ordaz y colaboradores en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de

México (Ordaz et al, 2008). Este programa resuelve la integral de peligrosidad numéricamente, discretizando las funciones de probabilidad en intervalos de magnitud y distancias finitos.

Se configurará un árbol lógico para cuantificar la incertidumbre epistemológica relacionada con la zonificación de la sismicidad y con los modelos de predicción del movimiento fuerte empleados. La formulación del árbol lógico fue hecha por Coppersmith y Youngs (1986), EPRI (1987) y *National Research Council* (1988). El método ordena la serie de estimaciones a realizar en el análisis y dirige la incertidumbre de cada estimación de una manera secuencial hasta obtener la incertidumbre de los resultados finales. La estructura de árbol lógico se muestra en la Figura 1.3, donde se presenta un ejemplo de aplicación de esta metodología.

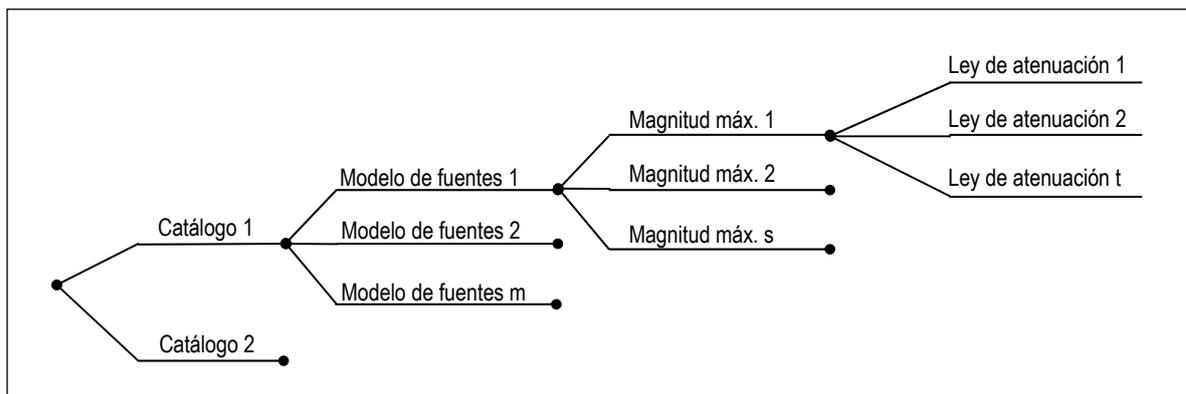


Figura 1.3. Ejemplo de estructura general de árbol lógico para la estimación probabilista de la peligrosidad sísmica.

El árbol está compuesto por una serie de nodos y ramas. Cada nodo representa la estimación de un parámetro o un estado del proceso que debe ser realizado en el análisis, como es, por ejemplo, la definición de un modelo de fuente sísmica o de una ley de atenuación. Cada rama que parte de un nodo representa una posible alternativa discreta para el parámetro o estado del proceso en cuestión, y lleva asignado un peso que indica el grado de credibilidad otorgado por el analista de que la rama represente la opción correcta. Estas probabilidades son condicionales y se asume que todas las ramas que conducen a un nodo representan el estado verdadero de los parámetros precedentes, siendo la suma de los pesos de todas ellas la unidad. Como resultado, el árbol lógico puede tener multitud de ramas, cada una de las cuales aporta una estimación de la peligrosidad, pudiendo estimarse después la media, la moda y la mediana del conjunto de resultados y sus medidas de dispersión. De esta forma el resultado final se presenta asociado a una medida de la incertidumbre de su estimación, si bien en ésta intervienen juicios subjetivos por parte de expertos, necesarios para cubrir las lagunas del conocimiento en las fases sucesivas del cálculo.

En el presente trabajo se construirá un árbol lógico para la cuantificación de las incertidumbres asociadas a diferentes formas de definir la fuente sísmica y a la elección del modelo de movimiento fuerte. La construcción de cada rama supone una opción individual de cálculo, que deberá seguir las pautas del método probabilista de Cornell, ya descrito. El resultado total del árbol lógico se expresa a través del valor medio ponderado y de la desviación típica estándar de la muestra de estimaciones de peligrosidad resultantes de las diferentes ramas del árbol. Asimismo, se tiende a usar el coeficiente de variación *COV*, definido como la desviación típica de los

resultados dividida por el valor medio en cada punto. El valor de COV da la medida de la variabilidad de los resultados respecto a su valor medio y se representa también en mapas que se interpretan conjuntamente con los de estimaciones de peligrosidad, para dar una información más completa. Así, un lugar con alto COV indica que la estimación de peligrosidad es altamente variable dependiendo de la rama del árbol lógico, y que podría llegar, por ejemplo, a superar la peligrosidad de otro emplazamiento en el que la peligrosidad media sea más alta pero presente un bajo valor de COV. Dicho de otra forma, los resultados en un sitio con alto valor de COV pueden considerarse poco robustos. Los mapas de COV también son útiles para identificar áreas de mayor variabilidad relativa en las que se deben concentrar los esfuerzos para reducir la incertidumbre.

## 1.3 APLICACIÓN EN LA REGIÓN DE MURCIA

---

En este apartado se presenta la aplicación del método de cálculo de peligrosidad antes expuesto al caso de la Región de Murcia. En primer lugar, se detalla el proceso de recopilación de datos necesarios para el estudio y se describe el proceso de confección del catálogo sísmico y de fallas, así como la selección de la zonificación. Seguidamente, se selecciona el modelo de movimiento fuerte a emplear mediante una calibración con registros acelerométricos de España. Finalmente se plantea el uso de un árbol lógico y se justifica tanto su estructura como la elección de pesos de las opciones alternativas consideradas. Asimismo, se comentan otros parámetros requeridos en el cálculo de la peligrosidad y se presentan los resultados (mapas de aceleración esperada en la región y espectros en localidades).

### 1.3.1 DATOS DE PARTIDA

#### 1.3.1.1 CATÁLOGO SÍSMICO DE PROYECTO

Para la elaboración del catálogo sísmico de este proyecto se ha partido del catálogo utilizado para el nuevo mapa de peligrosidad sísmica de España (MPSE) (IGN-UPN, 2012). La información de partida que se utilizó para este catálogo procedía del Instituto Geográfico Nacional (IGN). No obstante, con el fin de tener un catálogo lo más completo posible y homogeneizado a magnitud momento  $M_w$ , se incluyeron datos de  $M_w$  que no estaban disponibles en el catálogo del IGN y se revisaron y modificaron los datos de algunos terremotos concretos a partir de trabajos monográficos o estudios específicos publicados, resultando el catálogo final cuyos epicentros se muestran en la Figura 1.4.

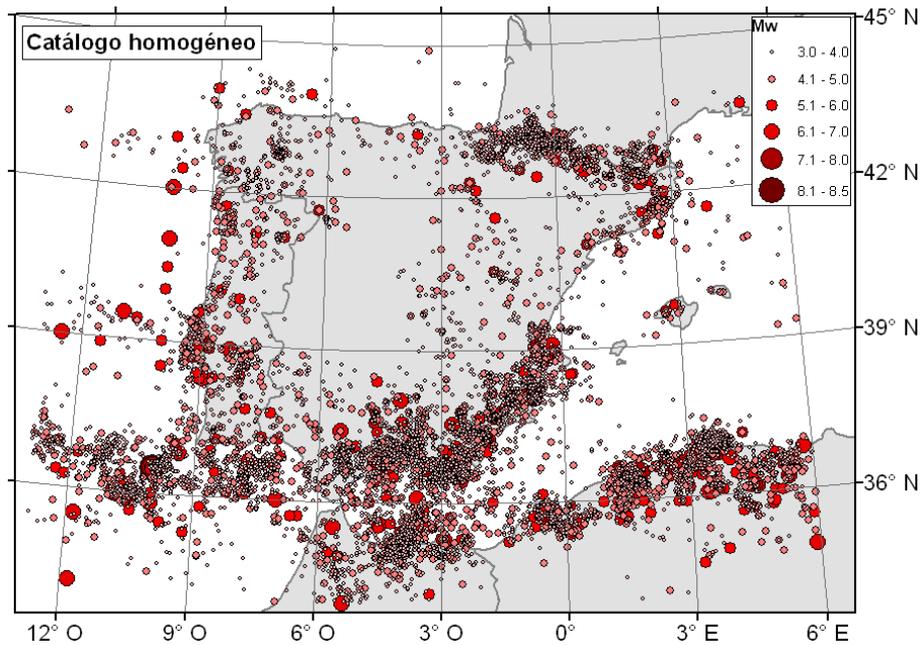


Figura 1.4. Catálogo elaborado para la revisión del mapa de peligrosidad sísmica de España (MPSE)

Para llegar a éste catálogo final se realizaron de forma exhaustiva distintas tareas, entre las que destacan: el estudio de las magnitudes utilizadas en el catálogo dependiendo del periodo temporal, filtrado de profundidades hipocentrales, definición de umbrales mínimos de intensidad y magnitud, revisión de datos a partir de otros catálogos y estudios, así como el proceso de homogeneización, completitud y depuración de réplicas y premonitores. Además, se hizo un esfuerzo por incorporar la incertidumbre de los datos originales de intensidad o magnitud a los cálculos. Como por lo general este dato no está disponible para todos los registros del catálogo, se asignó esta incertidumbre por criterio de experto, dando un mayor valor de incertidumbre al dato más antiguo (IGN-UPN, 2012).

En el caso del proyecto que nos ocupa, los pasos seguidos para la elaboración del catálogo sísmico de proyecto han sido los siguientes:

- Definición de la zona geográfica de interés o zona de influencia.
- Actualización del catálogo de partida con terremotos ocurridos hasta octubre de 2013 (incluido).
- Homogeneización a Mw de los nuevos terremotos incluidos en el catálogo de partida.
- Filtrado de todos aquellos sismos profundos y terremotos de bajas magnitudes.
- Depuración de réplicas y premonitores en nuestro área de estudio.
- Completitud del catálogo.

#### *Definición de la zona geográfica de influencia*

Como se ha indicado, antes de la confección del catálogo sísmico de proyecto, ha sido necesario definir la zona de influencia en nuestra zona de estudio. Tras varios análisis sobre la contribución de posibles zonas o fuentes, se ha decidido definir como zona de influencia un rectángulo entorno

a la región de Murcia que abarca el área comprendida entre las latitudes 4.3 E y 8.3 W y longitudes 42.10 N y 34.10 N (Figura 1.5).

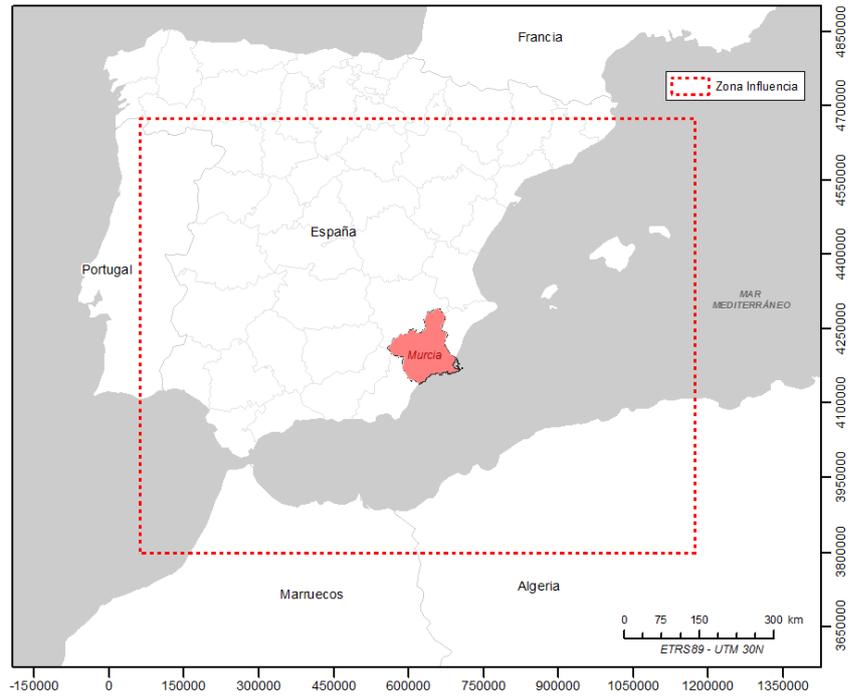


Figura 1.5. Zona de influencia del estudio.

A continuación se ha realizado un filtrado del catálogo de partida para extraer únicamente aquellos terremotos que se encuentran dentro de esta zona de influencia (Figura 1.6).

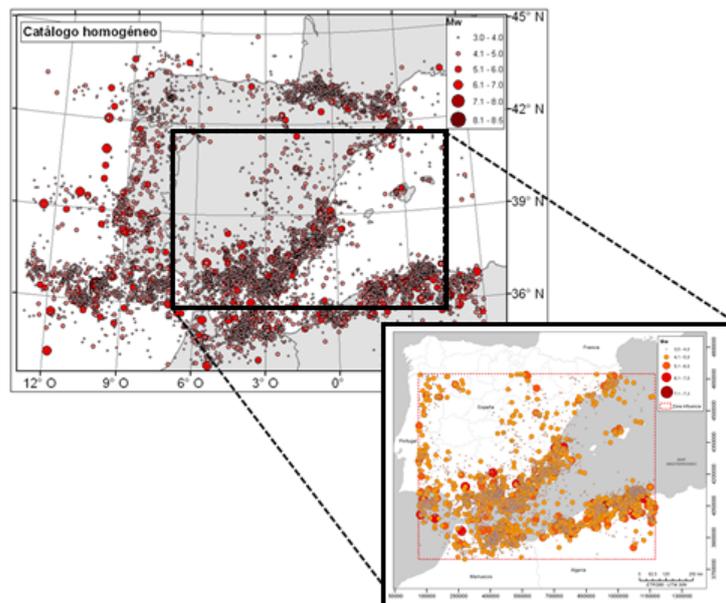


Figura 1.6. Filtrado del catálogo de partida para la zona de influencia definida

De esta forma, el catálogo de partida filtrado para la zona de influencia cuenta con un total de 6719 terremotos homogeneizados a  $M_w$ . Hay que decir que en este catálogo solo se incluyen los terremotos con una profundidad hipocentral menor que 65 km, pues se consideró que los terremotos con una profundidad mayor no tenían contribución significativa en la peligrosidad.

#### *Actualización del catálogo sísmico de partida*

El catálogo de partida (que sirvió de base para el MPSE) abarca los terremotos ocurridos hasta el 30 de Junio de 2011 (incluido). Para el caso de este estudio, se ha actualizado el catálogo sísmico incorporando todos aquellos terremotos ocurridos hasta el 31 de Octubre de 2013 (incluido) con la información del catálogo sísmico del IGN. De este modo, se han considerado 7293 terremotos, cuyos epicentros pueden verse representados en la Figura 1.7. Al igual que se hizo con el catálogo de partida y utilizando el mismo criterio de experto, se les ha asignado a cada uno de estos nuevos terremotos una incertidumbre, dependiendo del tipo de parámetro de tamaño original ( $I$ ,  $m_{blg}$ ,  $M_L$ , etc) y también de su época de registro.

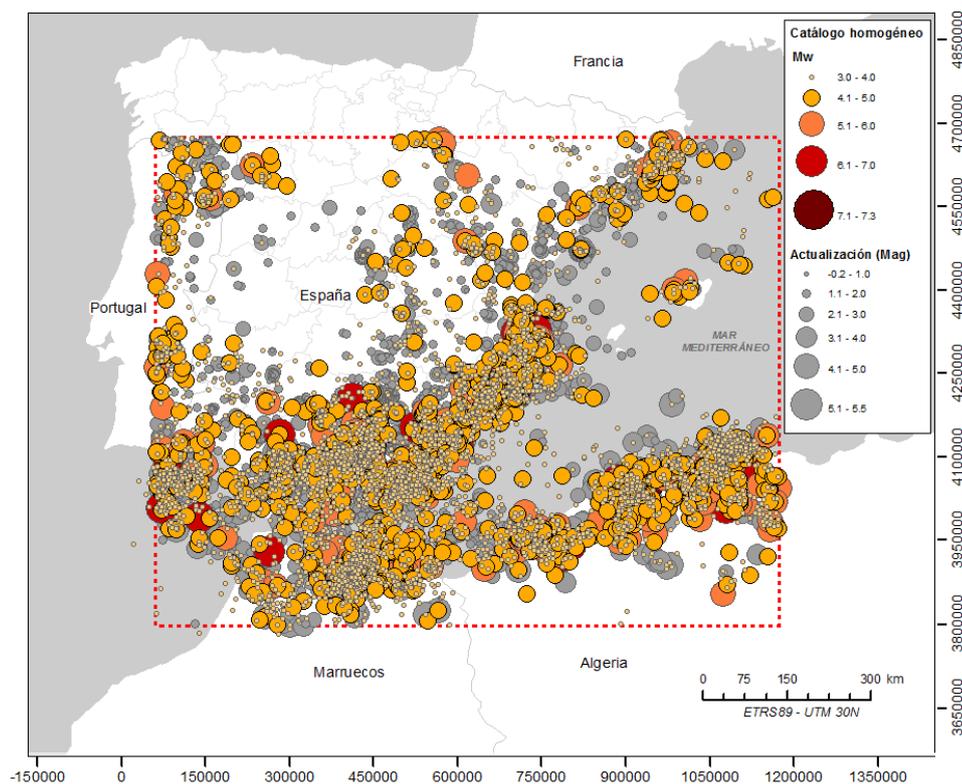


Figura 1.7. Epicentros de sismos incluidos en el catálogo de proyecto, actualizado hasta octubre de 2013 .

### Homogeneización del catálogo

Los diferentes terremotos que componen el catálogo sísmico original no presentan un parámetro de tamaño uniforme. Así, el tamaño de los terremotos más antiguos (la mayor parte de ellos ocurridos antes de la segunda mitad del siglo XX) se expresa en términos de intensidad macrosísmica. Posteriormente, en época instrumental, se han ido introduciendo distintas escalas de magnitud en función de la distribución y características de la red sísmica en cada época, de la localización geográfica de los epicentros y de las técnicas de estimación de la magnitud en el momento.

En el catálogo sísmico de partida de este estudio (MPSE), se establecieron una serie de correlaciones entre escalas de tamaño, unificando todos los registros a magnitud momento  $M_w$  (Hanks y Kanamori, 1979), por presentar la ventaja de ser una escala que no se satura para grandes terremotos y al mismo tiempo tiene una relación directa con la física de la fuente, pues deriva del momento sísmico escalar  $M_0$ .

Para la homogeneización de los nuevos registros sísmicos incluidos en el catálogo se han considerado las mismas correlaciones que las empleadas en el catálogo base para el MPSE (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Correlaciones obtenidas entre distintos parámetros de tamaño y  $M_w$  (regresiones RMA)

$y=a+bx$	$\sigma_a$	$\sigma_b$	$\sigma_{ab}$	Rango de aplicación
$M_w = 1.656 + 0.545 I_{max}$	0.144	0.030	-0.00011	III- (IX-X)
$M_w=0.290 + 0.973 m_{bLg(MMS)}$	0.208	0.049	-0.00045	3.1-7.3
$M_w=- 1.528 + 1.213 m_b (VC)$	0.385	0.077	-0.00013	3.7-6.3
$M_w=0.676 + 0.836 m_{bLg(L)}$	0.202	0.052	-0.00013	3.0-5.1

Siguiendo las indicaciones del catálogo base (MPSE), se ha asignado una incertidumbre a las magnitudes de los nuevos registros y, por propagación de errores, se ha estimado una incertidumbre sobre la  $M_w$  de cada registro.

### Filtrado de terremotos profundos y bajas magnitudes

Tras la elección de la zona geográfica de interés y la actualización del catálogo de partida incorporando los terremotos ocurridos hasta Octubre de 2013, y una vez realizada la homogeneización a  $M_w$ , se han filtrado los terremotos considerados potencialmente no peligrosos, eliminando los sismos por debajo de una  $M_w < 3.0$ . Del mismo modo, se han eliminado aquellos sismos ocurridos a una profundidad mayor de 65 km por considerar también que no presentan peligro significativo.

Tras aplicar este filtrado y extrayendo los terremotos profundos y de bajas magnitudes, el número total de sismos registrados entre 29/06/2011 y 31/10/2013 y que finalmente han sido añadidos al catálogo de partida es de 285. Por tanto, llegado a este punto y a falta de aplicar la depuración y completitud, el catálogo cuenta con un total de 7004 terremotos.

En la Tabla 1.2 y Tabla 1.3 se muestran el número de terremotos del catálogo por cada periodo temporal, así como el desglose de eventos según su parámetro de tamaño de procedencia, respectivamente.

Tabla 1.2. Número de datos del catálogo por intervalos temporales.

Periodo	Número de terremotos
Histórico (hasta 1923)	1242
1924-1962 (hasta 11/2)	1120
1962-1998 (hasta 24/2)	2941
1998-2002 (hasta 4/2)	295
2002-2013 (hasta 31/10)	1406
TOTAL	7004

Tabla 1.3. Número de eventos desglosados según el parámetro de tamaño de procedencia.

Tipo	Origen del dato	Número de terremotos	% de terremotos
I (EMS)	IGN /IGC	1821	26%
I marinos	IGN	47	1%
mD-MMS	IGN	512	7%
mbLg-MMS	IGN	3033	43%
mb-VC	IGN	892	13%
mbLg-L	IGN	419	6%
Mw	IGN/IAG/ISC/Estudios específicos	280	4%

### Depuración del catálogo

Una vez que el catálogo ha sido filtrado, actualizado y homogeneizado a Mw, el siguiente paso a realizar para obtener el catálogo final de proyecto es el proceso de depuración de réplicas y premonitores.

La hipótesis de que la sismicidad sigue un modelo poissoniano implica que la ocurrencia de cualquier terremoto es independiente de la ocurrencia de todos los demás, dentro de una misma fuente sísmica. En realidad, son frecuentes las asociaciones de terremotos en forma de series sísmicas, con un terremoto principal y otros premonitores y/o réplicas. Para verificar la hipótesis de independencia de sismos es necesario, entonces, detectar las series sísmicas, formadas por un terremoto principal y sus premonitores y réplicas, e incluir en los cálculos únicamente los eventos principales, eliminando por tanto del catálogo los restantes de una misma serie. Este proceso se conoce como *depuración* del catálogo.

No existe un criterio estadístico único y definitivo para delimitar la extensión de los terremotos no principales de una serie, conjuntamente en el espacio y en el tiempo. En este caso, se ha optado por aplicar el método de Gardner y Knopoff 1974, utilizado también el nuevo MPSE, y las ventanas espacio temporales calibradas en el correspondiente estudio (Figura 1.8).

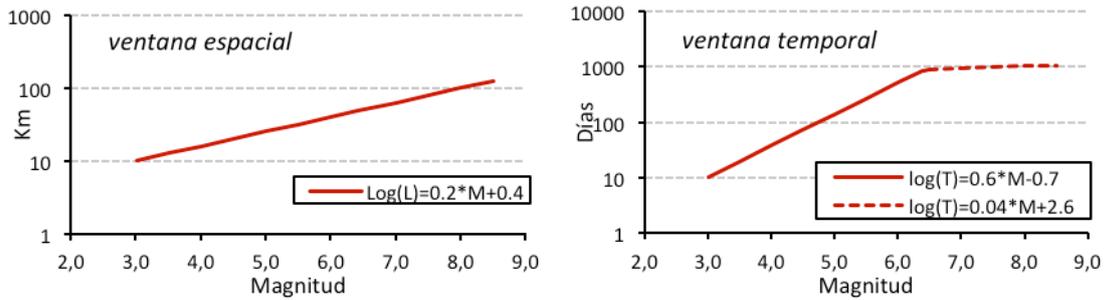


Figura 1.8. Gráficas con las ventanas espacio-temporales aplicadas en el estudio de depuración del catálogo sísmico para el MPSE.

Hay que tener en cuenta que el método de depuración del catálogo considera diferentes ventanas espacio-temporales en función de la magnitud y que ésta lleva asociada una incertidumbre. Por tanto, en el proceso de depuración del catálogo esta incertidumbre se debe incluir a la hora de etiquetar un evento como principal o no. Para considerar esta cuestión se ha diseñado un procedimiento, basado en el método de simulación de Montecarlo, que permita la identificación de réplicas, que conlleva las siguientes fases:

- Se considera que la magnitud de cada evento tiene asociada una incertidumbre que responde a una distribución triangular, cuya media y dispersión son los valores que aparecen en el catálogo.
- Seguidamente se genera un número elevado de catálogos sintéticos de proyecto (1.000) con el método de Montecarlo, de forma que la magnitud de cada evento es un valor escogido aleatoriamente de acuerdo con la distribución de magnitudes indicada anteriormente.
- Para cada uno de estos catálogos, se aplica un algoritmo de identificación de eventos principales y réplicas, y se cuantifica el número de veces que un mismo evento es etiquetado como tal. La calificación de un terremoto como réplica o no, se basa en el algoritmo del programa *Cluster*, integrado en el software SEISAN (Havskov y Ottemöller, 1999) y readaptado aquí para una mayor operatividad.
- Se calcula la frecuencia con la que cada sismo es catalogado como réplica.
- Se establece un umbral de frecuencia, del 95% de las ejecuciones, por encima del cual se considera definitivamente que el terremoto es una réplica y en ese caso, se etiqueta como tal.

Para la implementación de este proceso de depuración del catálogo, se ha desarrollado un programa en C++, que permite introducir como variables las ventanas espacio-temporales, el número de ejecuciones de Montecarlo y el rango de búsqueda de eventos dentro del catálogo.

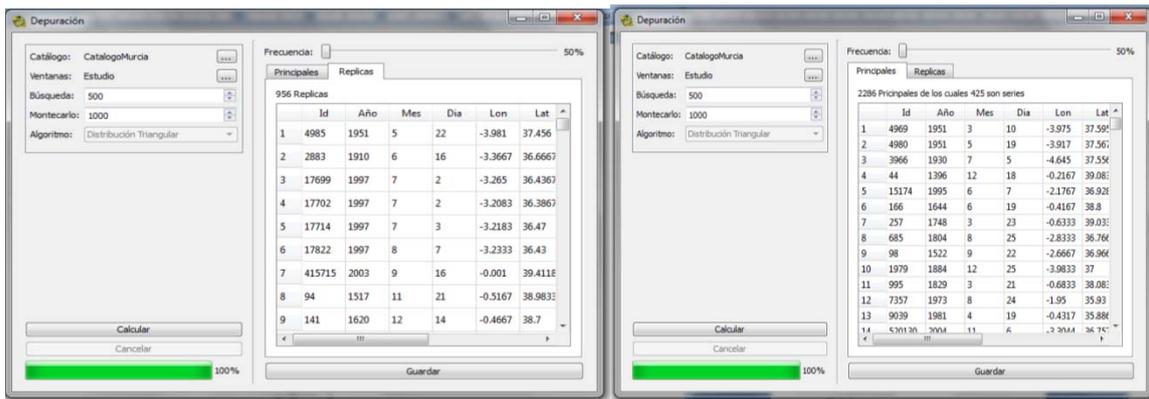


Figura 1.9. Programa desarrollado para la implementación del método de Montecarlo en el proceso de depuración

Una vez ejecutado el programa, el porcentaje de eventos que se identifican como réplicas es de 34.4%. Especialmente las réplicas se distribuyen tal y como se muestra en la Figura 1.10.

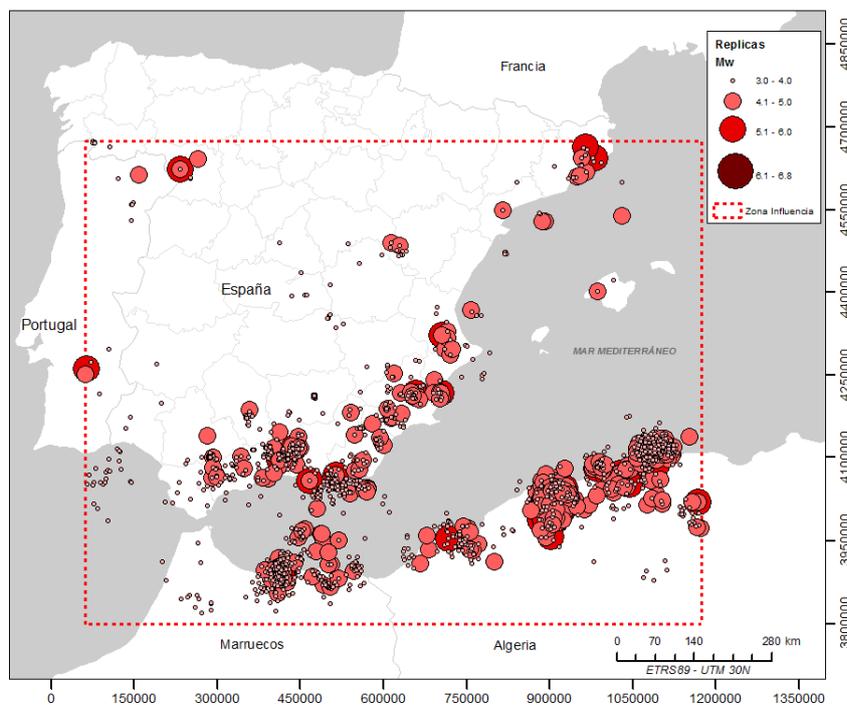


Figura 1.10. Distribución de réplicas identificadas en el proceso de depuración

El catálogo de nuestra zona de influencia homogeneizado a Mw y depurado de réplicas y premonitores cuenta con un total de 4527 terremotos principales.

### *Completitud del catálogo*

Como ya se ha indicado, el análisis de completitud consiste en identificar los periodos de tiempo para los cuales se puede considerar que el catálogo es completo para los diferentes intervalos de magnitud considerados. Concretamente, se deben identificar una serie de años de referencia que

marcan el inicio del periodo de completitud, para cada zona y para cada rango de magnitudes. Estos años de referencia dependen de la zona considerada, ya que ésta puede haber estado más o menos poblada en el pasado, lo que condiciona la información existente, mejor o peor cubierta por estaciones de registro, etc.

En este estudio, se considerarán los años de completitud identificados para el catálogo del MPSE, donde se diferenciaron 4 grandes zonas según la completitud: Sureste de España, Azores, África y el resto de España. Los años de referencia se establecieron para intervalos de magnitud de 0.5 y siguiendo el método de Stepp (1972). Estos años, correspondientes a las zonas de completitud definidas, se muestran en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4. Años de referencia considerados para el estudio de completitud.

	3.0-3.4	3.5-3.9	4.0-4.4	4.5-4.9	5.0-5.4	5.5-5.9	6.0-6.4	6.5-..
COMPLETO	1985	1980	1933	1910	1800	1720	---	---
SE ESPAÑA	1978	1975	1908	1883	1800	1520	---	---
AZORES	1987	1985	1972	1950	1935	1876	1720	---
ÁFRICA	1987	1987	1950	1930	1910	1845	---	---

No todas las magnitudes registradas en el catálogo sísmico han podido ser registradas de forma completa en el mismo, en todas las zonas de estudio. En concreto, las magnitudes iguales o superiores a 6.0 (en Azores 6.5) corresponden a terremotos poco frecuentes con largos periodos de recurrencia.

En la Figura 1.11 se muestran los periodos de completitud  $PC(m)$ , en años, de los distintos rangos de magnitud en la zona que contiene a la Región de Murcia (SE España), donde puede observarse que los periodos de completitud para las mayores magnitudes,  $PC(m \geq 6.0)$ , no están observados de forma completa. Dicho de otra forma, los correspondientes  $PC(m)$  no están incluidos en el Periodo de observación completo  $POC$ , algo decisivo a la hora de aplicar la metodología Híbrida de zonas y fallas.

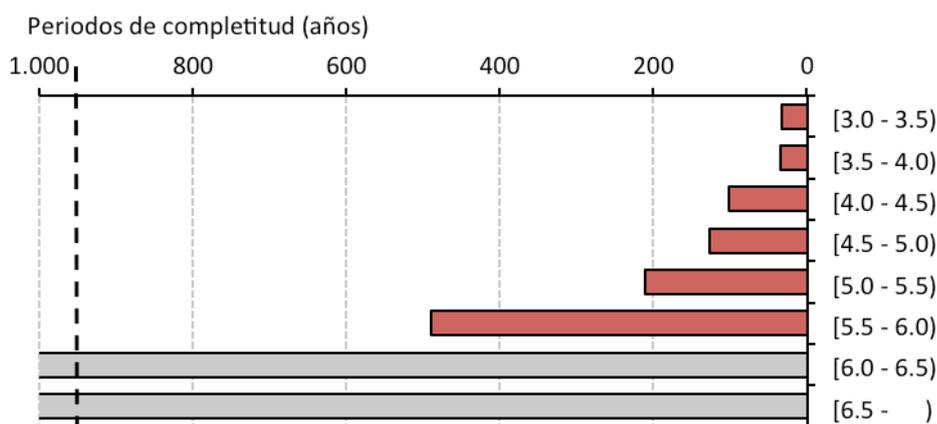


Figura 1.11. Esquema temporal de los periodos de completitud en los rangos de magnitud de 0.5 grados. En rojo, periodos de completitud contenidos en el periodo de observación completo (POC) del catálogo. En gris, periodos de completitud de magnitudes no observadas completamente en el POC.

### Catálogo final de proyecto

El catálogo final de Proyecto, es resultante de los procesos de depuración, filtrado y corrección por falta de completitud, para una magnitud  $M_w \geq 3.0$ . En la Figura 1.12 se muestra un mapa con la localización epicentral de los eventos contenidos en este catálogo.

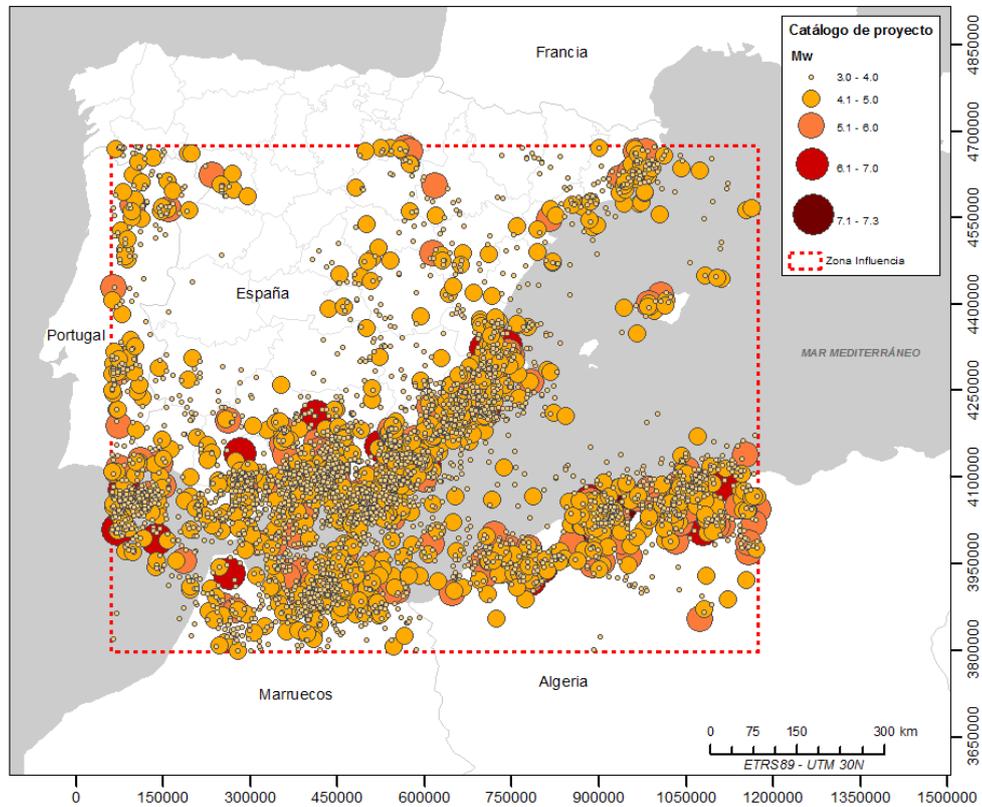


Figura 1.12. Catálogo final de proyecto

#### 1.3.1.2 CATÁLOGO DE FALLAS ACTIVAS

El conocimiento de fallas activas en la Península Ibérica se ha incrementado notablemente en los últimos años debido a diferentes iniciativas y proyectos desarrollados por un gran número de geólogos (IberFault, FaseGeo, Share, etc.). Una de estas iniciativas, liderada por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), ha sido la base de datos de fallas activas del Cuaternario para la Península Ibérica QAFI (García-Mayordomo et al. 2012a). Esta es una fuente de información muy completa y fiable.

Para este estudio, se tomará como información de partida la correspondiente a las fallas de la región de Murcia publicada en la base de datos QAFI. Esta información ha sido actualizada y completada con el trabajo expresamente realizado para este proyecto RISMUR 2, de construcción de una Base de datos de fallas activas de la región de Murcia **QAFIMUR-2013** (Martín-Banda y García-Mayordomo, 2013).

*Información de partida*

La base de datos QAFIMUR-2013 consta de 72 registros de fallas activas, de las cuales 35 son nuevas fallas que no están registradas en la base de datos QAFI y además 3 de ellas han sido modificadas.

En la Figura 1.13 se muestra la localización y traza de las fallas activas de la base de datos QAFIMUR.

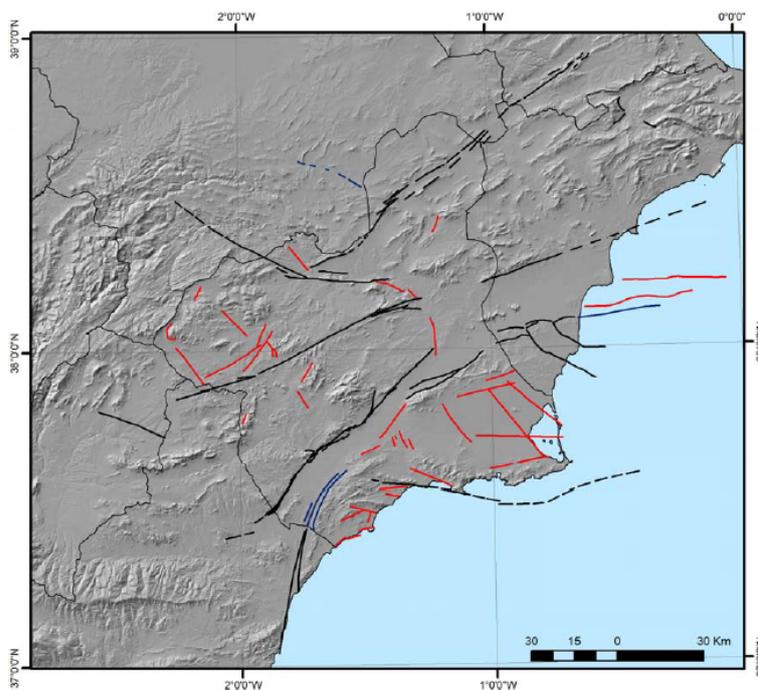


Figura 1.- Trazas de las fallas activas de la Región de Murcia (QAFIMUR-2013) sobre el MDT200 en ETRS89-UTM-Huso30N. En negro aparecen las fallas ya incluidas en la QAFI v.2.0, en azul las que han sido modificadas sustancialmente y en rojo las de nueva incorporación.

Figura 1.13. Mapa con las trazas de las fallas de QAFIMUR (Martín-Banda y García-Mayordomo, 2013)

De las 72 fallas catalogadas en la base de datos QAFIMUR, no todas pueden ser utilizadas en la estimación de peligrosidad para este estudio, pues algunas de ellas carecen de parámetros básicos para ser modelizadas correctamente de forma independiente, concretamente de información sobre la tasa de deslizamiento anual (Tabla 1.5). Por este motivo, dichas fallas no podrán ser modelizadas individualmente en este cálculo de peligrosidad.

Tabla 1.5. Fallas que no tienen la información suficiente para poder ser modelizadas de modo individual en el cálculo de peligrosidad.

ID	FaultName	Acimut	Buzamiento	Longitud	Prof. Min	Prof. Max	Slip rate
ES600	Crevillente (Sector Alicante) (2/2)	250	90	50	1	15	0.000
ES623	Alcoy-Cocentaina	050	75	6	0	15	0.000
ES628	Alhama de Murcia (3/4)	221	70	12	0	12	0.000
ES629	Alhama de Murcia (4/4)	225	70	25	0	12	0.000
ES633	Torremendo	079	30	12	1	12	0.000
ES744	Cartagena-2	258	60	21	0	8	0.000
ES747	Llano de las Cabras	150	45	7	0	5	0.000
ES748	Mazarrón Norte	110	85	16	0	8	0.000

ES749	Hinojar	245	45	7	0	8	0.000
ES751	Falla del Chopillo	320	40	10	0	11	0.000
ES752	Sucina - El Estacio	310	85	25	0	8	0.000
ES753	Cartagena-1 (Murta - Cartagena)	320	60	17	0	8	0.000
ES754	Corvera	075	35	21	0	8	0.000
ES755	Rebate	071	55	11	0	8	0.000
ES757	Lomas de Cliler - Avilés Sur	210	45	8	0	5	0.000
ES758	West of Carche	200	40	6	0	5	0.000
ES759	Las Lomas System	150	80	7	0	5	0.000
ES762	Ramonete	100	80	5	0	5	0.000
ES763	Bolmueva	260	30	10	0	8	0.000
ES764	West of Pericay - Gigantes	202	85	4	0	5	0.000
ES767	El Sabinar	205	85	6	0	5	0.000
ES768	Archivel	316	90	12	0	5	0.000
ES770	Tarragoya	060	90	23	0	15	0.000
ES771	Caravaca - Singla	030	90	9	0	5	0.000
ES772	Loma de Yeguas - Cañada Lengua	215	85	17	0	11	0.000
ES773	La Encarnación	150	60	7	0	5	0.000
ES774	Segura Medio Fault System	170	45	14	0	11	0.000
ES775	Segura Medio Fault System	110	90	14	0	11	0.000
ME024	La Marina	082	60	39	0	8	0.000

Las regiones sísmicas que contienen las fallas seleccionadas dentro de la zona de influencia de nuestro estudio, también contienen otras fallas que han quedado fuera del rango geográfico de la base de datos QAFIMUR y que pueden tener repercusión en el potencial sísmico que afecta a la región de Murcia. Por ese motivo, la base de datos final de fallas será completada con fallas de la base de datos QAFI. Estas fallas se presentan en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6. Fallas incluidas en la base de datos final de cálculo provenientes de la base de datos QAFI, que no han sido inicialmente incluidas en QAFIMUR.

ID	FaultName	Acimut	Buzamiento	Longitud	Prof. Min	Prof. Max	Slip rate
ES608	Jumilla (Sector Valencia) (2/2)	65	90	34.8	0.0	15.0	0.050
ES625	Alhamilla Sur	67	80	25.0	0.0	8.0	0.050
ES630	Carboneras (1/2)	48	90	110.5	0.0	11.0	1.101
ES635	Polopos fault zone (1/2)	85	75	13.0	5.0	10.0	0.050
ES636	Polopos fault zone (2/2)	95	80	12.0	5.0	10.0	0.071
ME005	Cabo de Cullera Western Fault	327	60	28.0	1.5	15.0	0.030
ME006	Cabo de Cullera Central-Western Fault	331	60	25.0	1.5	15.0	0.030
ME007	Cabo de Cullera Central-Eastern Fault	197	60	48.0	1.5	15.0	0.020
ME008	Cabo de Cullera Eastern Fault	188	60	16.0	1.5	15.0	0.020
ME009	Southwest of Columbretas Basin	335	60	10.0	1.5	15.0	0.020

El número total de fallas y segmentos de fallas que se utilizará finalmente en el cálculo de peligrosidad es de 53, de las cuales 42 pertenecen a la base de datos QAFIMUR y 11 a la base de datos QAFI. El listado completo se presenta en la Tabla 1.7, junto a los parámetros característicos de su geométrica y tasa de deslizamiento. En la Figura 1.14 se muestra un mapa con la localización de las correspondientes trazas de falla.

Tabla 1.7. Fallas y segmentos de falla incluidos en el cálculo de peligrosidad sísmica en este proyecto RISMUR 2.

ID	FaultName	Acimut	Buz	Longitud	Prof. Min	Prof. Max	Slip rate	BD
ES601	Crevillente (Sector Murcia) (1/3)	252	90	30.0	0.0	15.0	0.100	QAFIMUR
ES602	Crevillente (Sector Murcia) (2/3)	243	90	43.7	0.0	15.0	0.100	QAFIMUR
ES603	Crevillente (Sector Murcia) (3/3)	253	90	17.8	0.0	15.0	0.100	QAFIMUR
ES604	Crevillente (Sector Alicante) (1/2)	250	90	30.0	0.0	15.0	0.070	QAFIMUR
ES605	Jumilla (Sector Murcia) (1/3)	53	90	35.0	0.0	11.0	0.010	QAFIMUR
ES606	Jumilla (Sector Murcia) (2/3)	57	90	30.0	0.0	11.0	0.010	QAFIMUR
ES607	Jumilla (Sector Murcia) (3/3)	51	90	15.0	0.0	11.0	0.050	QAFIMUR
ES608	Jumilla (Sector Valencia) (2/2)	65	90	34.8	0.0	15.0	0.050	QAFI
ES609	Palomares (1/2)	14	90	45.0	0.0	8.0	0.040	QAFIMUR
ES610	Palomares (2/2)	37	90	25.0	0.0	8.0	0.050	QAFIMUR
ES611	Corredor de Las Alpujarras (Sector Almería)	84	90	50.0	0.0	12.0	0.050	QAFI
ES612	Las Moreras - Escarpe de Mazarrón (1/3)	104	90	15.0	0.0	8.0	0.050	QAFIMUR
ES613	Las Moreras - Escarpe de Mazarrón (2/3)	102	90	30.0	0.0	8.0	0.050	QAFIMUR
ES614	Las Moreras - Escarpe de Mazarrón (3/3)	79	90	50.0	0.0	8.0	0.050	QAFIMUR
ES615	Carrascoy	56	70	32.0	0.0	12.0	0.540	QAFIMUR
ES616	Torre vieja	116	80	22.0	0.0	12.0	0.110	QAFIMUR
ES617	San Miguel de Salinas	125	80	30.5	0.0	12.0	0.430	QAFIMUR
ES618	Bajo Segura (1/3)	83	60	10.0	1.0	12.0	0.400	QAFIMUR
ES619	Bajo Segura (2/3)	84	60	8.0	1.0	12.0	0.270	QAFIMUR
ES620	Bajo Segura (3/3)	77	60	9.0	1.0	12.0	0.200	QAFIMUR
ES622	Muro de Alcoy (o de Mariola)	335	60	6.0	0.0	15.0	0.200	QAFIMUR
ES624	Benasau	300	60	5.0	0.0	15.0	0.200	QAFIMUR
ES625	Alhambilla Sur	67	80	25.0	0.0	8.0	0.050	QAFI
ES626	Alhama de Murcia (1/4)	215	70	30.0	0.0	12.0	0.500	QAFIMUR
ES627	Alhama de Murcia (2/4)	238	70	20.0	0.0	12.0	0.300	QAFIMUR
ES630	Carboneras (1/2)	48	90	110.5	0.0	11.0	1.101	QAFI
ES631	Amarguillo	20	90	12.0	0.0	8.0	0.100	QAFIMUR
ES632	Las Viñas	285	80	3.5	0.0	5.0	0.400	QAFIMUR
ES634	Jumilla (Sector Valencia) (1/2)	60	90	40.0	0.0	15.0	0.050	QAFIMUR
ES635	Polopos fault zone (1/2)	85	75	13.0	5.0	10.0	0.050	QAFI
ES636	Polopos fault zone (2/2)	95	80	12.0	5.0	10.0	0.071	QAFI
ES684	Botardo-Alfahuara	112	85	25.0	0.0	11.0	0.043	QAFIMUR
ES716	Albox	255	50	10.0	0.0	10.0	0.020	QAFIMUR
ES728	Socovos (1/2)	295	85	53.0	0.0	15.0	0.040	QAFIMUR
ES729	Socovos (2/2)	272	75	36.0	0.0	15.0	0.200	QAFIMUR
ES730	Pozohondo	113	75	25.0	0.0	11.0	0.100	QAFIMUR
ES743	West Cabezo Gordo (Murcia - Mar Menor)	140	60	30.9	0.0	8.0	0.087	QAFIMUR
ES745	El Cantal	60	80	8.9	0.0	8.0	0.072	QAFIMUR
ES746	Garrovilla	20	90	4.0	0.0	5.0	0.050	QAFIMUR
ES750	La Puebla	271	60	30.0	0.0	8.0	0.081	QAFIMUR
ES756	La Galera	102	80	9.0	0.0	8.0	0.072	QAFIMUR
ES760	Los Tollos	37	80	15.0	0.0	8.0	0.158	QAFIMUR
ES761	Falla de Águilas	250	90	15.2	0.0	5.0	0.057	QAFIMUR
ES765	Rambla del Puerto	36	85	3.0	0.0	5.0	0.013	QAFIMUR
ES766	Sur de Revolcadores	160	90	5.2	0.0	5.0	0.019	QAFIMUR
ES769	La Junquera-Mancheño	325	85	16.2	0.0	5.0	0.280	QAFIMUR
ME005	Cabo de Cullera Western Fault	327	60	28.0	1.5	15.0	0.030	QAFI
ME006	Cabo de Cullera Central-Western Fault	331	60	25.0	1.5	15.0	0.030	QAFI
ME007	Cabo de Cullera Central-Eastern Fault	197	60	48.0	1.5	15.0	0.020	QAFI
ME008	Cabo de Cullera Eastern Fault	188	60	16.0	1.5	15.0	0.020	QAFI
ME009	Southwest of Columbretas Basin	335	60	10.0	1.5	15.0	0.020	QAFI
ME021	Bajo Segura Offshore	82	60	29.3	1.0	12.0	0.200	QAFIMUR
ME023	Santa Pola	89	60	36.2	0.0	8.0	0.046	QAFIMUR

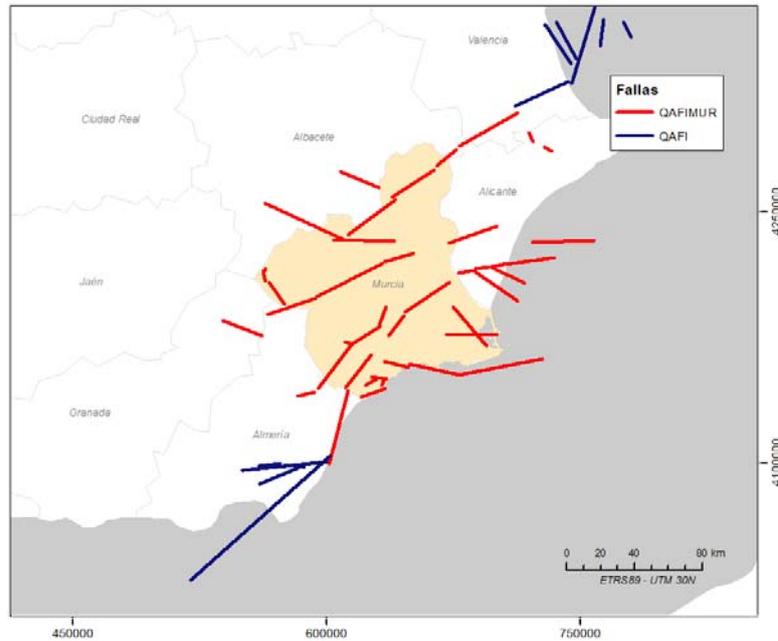


Figura 1.14. Mapa con la localización de las trazas de fallas. En rojo las fallas seleccionadas para su uso en esta aplicación.

### *Geometría de las fallas*

Al considerarse una falla como fuente sísmica potencialmente activa e independiente, se modeliza el plano de falla en el que se asume que se produce la ruptura, incluso sabiendo que lo habitual es que se generen superficies irregulares de ruptura. No resulta frecuente tener datos completos sobre la geometría de las fallas que permitan modelizar de una forma precisa dicha ruptura, por lo que de manera general se utiliza un plano rectangular, con las simplificaciones que ello conlleva.

Para ello, se utilizan los parámetros geométricos de la falla que se muestran en la Figura 1.15. Con la traza de la falla, el buzamiento y la profundidad, se pueden obtener como mínimo cuatro puntos que delimitan dicho plano.

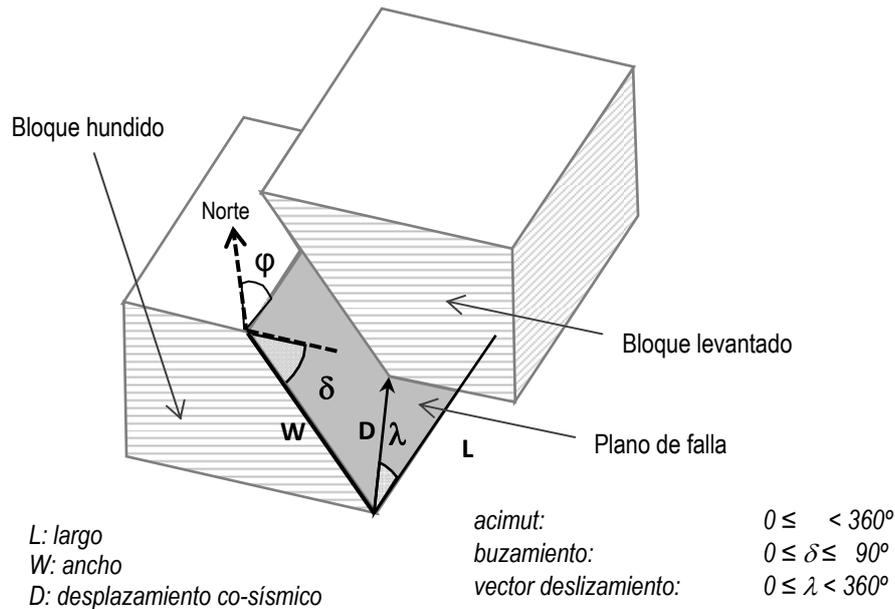


Figura 1.15. Geometría y parámetros de la falla.

### Actividad sísmica de las fallas

La actividad sísmica de las fallas vendrá dada por el sismo máximo que se espera en cada una y por la tasa de momento sísmico que se acumule, suponiendo que la energía se acumula de forma homogénea en todo el plano de falla. La magnitud máxima esperada en la falla (o segmento) la obtendremos por el área del plano de falla, utilizando un promedio entre diferentes fórmulas empíricas propuestas en la literatura: Wells & Coppersmith (1994), Stirling et al. (2002) y Stirling et al. (2008).

Haciendo la suposición conservadora de que en todo el plano de falla se está acumulando energía uniformemente, la **tasa de momento sísmico  $\dot{M}_0$**  que se acumula en la falla (*moment rate*) está relacionada con la **tasa de deslizamiento anual de la falla  $\dot{u}$**  (*Slip rate*) según la ecuación de Brune (1968):

$$\dot{M}_0 = \mu \cdot \dot{u} \cdot A \quad [1.9]$$

Donde  $\mu$  es el módulo de rigidez o de cizalla,  $\dot{u}$  la tasa de deslizamiento y  $A$  el área del plano de falla.

En la Tabla 1.8 se presentan los valores de las magnitudes máximas y las tasas de momento sísmico asociadas a cada falla o segmento de falla utilizadas en el estudio. Como puede comprobarse en dicha tabla, la falla con mayor tasa de momento sísmico incluida en el estudio es la falla de Carboneras (1/2). Esta falla se encuentra a una distancia mínima de 45 km, aproximadamente, de la región de Murcia, por lo que su potencial sísmico no repercutirá de forma directa en la peligrosidad de la región. Dentro de la región murciana, las fallas con una

mayor tasa de momento sísmico acumulado al año son las fallas de Carrascoy, Alhama de Murcia (1/4) y San Miguel de Salinas.

Tabla 1.8. Parámetros que describen la geometría y cinemática de las fallas y segmentos de falla empleados en el cálculo de peligrosidad.

ID	Nombre	L	W	Área	Slip rate	Mo	Mmax			
							WC94	ST02	S08	Promedio
ES601	Crevillente (Sector Murcia) (1/3)	30.0	15.0	450.0	0.100	1.35E+22	6.8	6.6	6.9	6.8
ES602	Crevillente (Sector Murcia) (2/3)	43.7	15.0	655.5	0.100	1.97E+22	7.0	6.7	7.2	6.9
ES603	Crevillente (Sector Murcia) (3/3)	17.8	15.0	267.0	0.100	8.01E+21	6.6	6.5	6.6	6.6
ES604	Crevillente (Sector Alicante) (1/2)	30.0	15.0	450.0	0.070	9.45E+21	6.8	6.6	6.9	6.8
ES605	Jumilla (Sector Murcia) (1/3)	35.0	11.0	385.0	0.010	1.16E+21	6.9	6.7	6.9	6.8
ES606	Jumilla (Sector Murcia) (2/3)	30.0	11.0	330.0	0.010	9.90E+20	6.8	6.6	6.8	6.8
ES607	Jumilla (Sector Murcia) (3/3)	15.0	11.0	165.0	0.050	2.48E+21	6.5	6.5	6.4	6.5
ES608	Jumilla (Sector Valencia) (2/2)	34.8	15.0	521.3	0.050	7.82E+21	6.9	6.7	7.0	6.9
ES609	Palomares (1/2)	45.0	8.0	360.0	0.040	4.32E+21	7.0	6.7	7.0	6.9
ES610	Palomares (2/2)	25.0	8.0	200.0	0.050	3.00E+21	6.7	6.6	6.6	6.7
ES611	Corredor de Las Alpujarras	50.0	12.0	600.0	0.050	9.00E+21	7.1	6.7	7.2	7.0
ES612	Escarpe de Mazarrón (1/3)	15.0	8.0	120.0	0.050	1.80E+21	6.5	6.5	6.4	6.4
ES613	Escarpe de Mazarrón (2/3)	30.0	8.0	240.0	0.050	3.60E+21	6.8	6.6	6.8	6.7
ES614	Escarpe de Mazarrón (3/3)	50.0	8.0	400.0	0.050	6.00E+21	7.1	6.7	7.0	6.9
ES615	Carrascoy	32.0	12.8	408.6	0.540	6.62E+22	6.8	6.6	6.9	6.8
ES616	Torre vieja	22.0	12.2	268.1	0.110	8.85E+21	6.7	6.6	6.7	6.6
ES617	San Miguel de Salinas	30.5	12.2	371.6	0.430	4.79E+22	6.8	6.6	6.9	6.8
ES618	Bajo Segura (1/3)	10.0	12.7	127.0	0.400	1.52E+22	6.3	6.4	6.2	6.3
ES619	Bajo Segura (2/3)	8.0	12.7	101.6	0.270	8.23E+21	6.2	6.3	6.1	6.2
ES620	Bajo Segura (3/3)	9.0	12.7	114.3	0.200	6.86E+21	6.2	6.4	6.2	6.3
ES622	Muro de Alcoy (o de Mariola)	6.0	17.3	103.9	0.200	6.24E+21	6.0	6.3	6.0	6.1
ES624	Benasau	5.0	17.3	86.6	0.200	5.20E+21	5.9	6.2	5.9	6.0
ES625	Alhamilla Sur	25.0	8.1	203.1	0.050	3.05E+21	6.7	6.6	6.7	6.7
ES626	Alhama de Murcia (1/4)	30.0	12.8	383.1	0.500	5.75E+22	6.8	6.6	6.9	6.8
ES627	Alhama de Murcia (2/4)	20.0	12.8	255.4	0.300	2.30E+22	6.6	6.5	6.7	6.6
ES630	Carboneras (1/2)	110.5	11.0	1215.5	1.101	4.01E+23	7.4	6.9	7.6	7.3
ES631	Amarguillo	12.0	8.0	96.0	0.100	2.88E+21	6.4	6.4	6.2	6.3
ES632	Las Viñas	3.5	5.1	17.8	0.400	2.13E+21	5.8	6.2	5.4	5.8
ES634	Jumilla (Sector Valencia) (1/2)	40.0	15.0	600.0	0.050	9.00E+21	7.0	6.7	7.1	6.9
ES635	Polopos fault zone (1/2)	13.0	5.2	67.3	0.050	1.01E+21	6.4	6.4	6.1	6.3
ES636	Polopos fault zone (2/2)	12.0	5.1	60.9	0.071	1.29E+21	6.4	6.4	6.1	6.3
ES684	Botardo-Alfahuara	25.0	11.0	276.1	0.043	3.56E+21	6.7	6.6	6.7	6.7
ES716	Albox	10.0	13.1	130.5	0.020	7.83E+20	6.3	6.4	6.3	6.3
ES728	Socovos (1/2)	53.0	15.1	798.0	0.040	9.58E+21	7.1	6.7	7.3	7.0
ES729	Socovos (2/2)	36.0	15.5	559.0	0.200	3.35E+22	6.9	6.7	7.0	6.9
ES730	Pozohondo	25.0	11.4	284.7	0.100	8.54E+21	6.7	6.6	6.7	6.7
ES743	West Cabezo Gordo	30.9	9.2	284.7	0.087	7.43E+21	6.8	6.6	6.8	6.8
ES745	El Cantal	8.9	8.1	72.3	0.072	1.56E+21	6.2	6.4	6.1	6.2
ES746	Garrovilla	4.0	5.0	20.2	0.050	3.03E+20	5.8	6.2	5.5	5.8
ES750	La Puebla	30.0	9.2	276.4	0.081	6.72E+21	6.8	6.6	6.8	6.7
ES756	La Galera	9.0	8.1	73.1	0.072	1.58E+21	6.2	6.4	6.1	6.2
ES760	Los Tollos	15.0	8.1	121.8	0.158	5.78E+21	6.5	6.5	6.4	6.4
ES761	Falla de Águilas	15.2	5.0	76.0	0.057	1.30E+21	6.5	6.5	6.2	6.4
ES765	Rambla del Puerto	3.0	5.0	15.1	0.013	5.87E+19	5.7	6.1	5.3	5.7
ES766	Sur de Revolvedores	5.2	5.0	26.0	0.019	1.48E+20	6.0	6.2	5.6	5.9
ES769	La Junquera-Mancheño	16.2	5.0	81.3	0.280	6.83E+21	6.5	6.5	6.3	6.4
ME005	Cabo de Cullera Western Fault	28.0	15.6	436.5	0.030	3.93E+21	6.8	6.6	6.9	6.8
ME006	Cabo de Cullera Central-Western Fault	25.0	15.6	389.7	0.030	3.51E+21	6.7	6.6	6.8	6.7
ME007	Cabo de Cullera Central-Eastern Fault	48.0	15.6	748.2	0.020	4.49E+21	7.0	6.7	7.2	7.0
ME008	Cabo de Cullera Eastern Fault	16.0	15.6	249.4	0.020	1.50E+21	6.5	6.5	6.6	6.5
ME009	Southwest of Columbretas Basin	10.0	15.6	155.9	0.020	9.35E+20	6.3	6.4	6.3	6.3
ME021	Bajo Segura Offshore	29.3	12.7	372.2	0.200	2.23E+22	6.8	6.6	6.9	6.8
ME023	Santa Pola	36.2	9.2	334.4	0.046	4.61E+21	6.9	6.7	6.9	6.8

En la Figura 1.16 se muestra un mapa con la tasa de deslizamiento de las fallas y segmentos de falla incluidos en el cálculo.

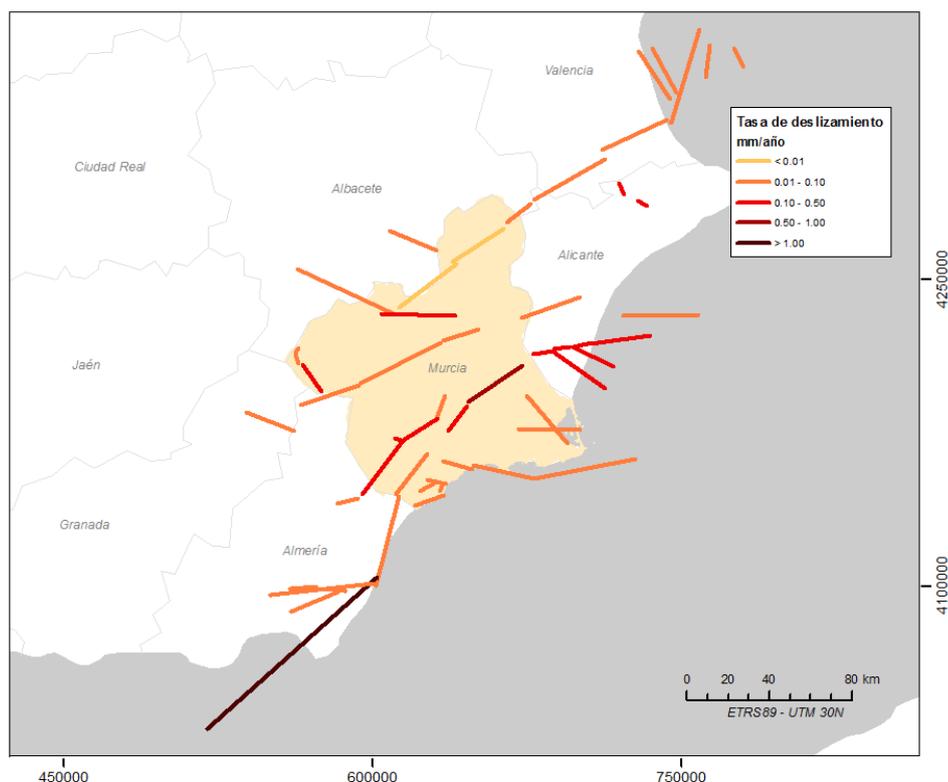


Figura 1.16. Mapa con las tasas de deslizamiento anual (mm/año) de las fallas y segmentos de fallas incluidas en el cálculo. Se han nombrado algunas de las fallas más significativas y que han sido citadas anteriormente.

### 1.3.1.3 ZONIFICACIÓN SÍSMICA

La última zonificación propuesta en la literatura que abarca la región de estudio ha sido la de García-Mayordomo et al. (2012b), que se diseñó a través de un proceso inicial de juicio de expertos españoles (interacción e integración), sometido después a consenso con otros expertos de Francia y Portugal para las zonas fronterizas. La zonificación está basada en la metodología propuesta por García-Mayordomo y Giner (2006), en la que se analizan seis temáticas diferentes para la definición de zonas o adaptación de otras ya propuestas: cartografía geológica y tectónica, morfología del relieve, espesor de corteza, flujo térmico y sismicidad histórica e instrumental. Además, conlleva un proceso de delimitación de zonas por parte de expertos regionales en tectónica activa, paleosismicidad y sismotectónica, que permitió producir finalmente un modelo integrado resultado de las opiniones y de los análisis realizados. Esta zonificación, tiene varias versiones desde su creación. Cabe destacar la versión publicada en García-Mayordomo et al. (2010) (GM10), donde algunas zonas del sureste de España fueron diseñadas para su combinación con modelos de fuente tipo fallas, mientras que una última versión de esta zonificación, publicada en García-Mayordomo et al. (2012b) (GM12), está concebida para su uso como fuente sísmica única.

Para implementar la metodología propuesta en este estudio, se ha seleccionado la zonificación de GM10, por ser una zonificación diseñada para su uso con modelos híbridos de zonas y fallas. De esta zonificación se han seleccionado 24 zonas, por ser las que están incluidas en el área de influencia de este estudio (Figura 1.17).

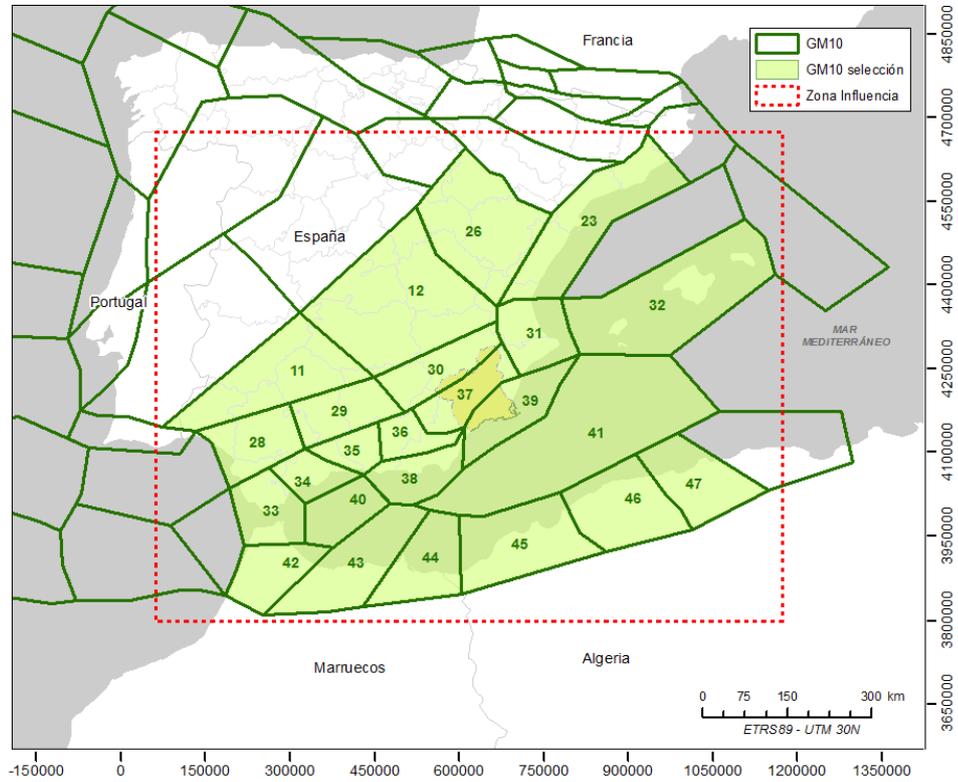


Figura 1.17. Zonas sísmogénicas utilizadas en el estudio publicadas en GM10

## 1.3.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES SÍSMICAS

La implementación de la metodología propuesta se efectuará con las 24 zonas seleccionadas de la zonificación de GM10 y las 53 fallas identificadas, lo que constituye un total de 77 fuentes sísmicas independientes, integradas en un modelo híbrido de zonas y fallas.

A continuación se describen las diferentes fases a seguir en esta aplicación metodológica.

### 1.3.2.1 REGIONALIZACIÓN DEL CATÁLOGO SÍSMICO

En primer lugar se identificarán los terremotos cuyos epicentros están contenidos en cada zona sismogénica (GM10). Para ello se explotará el catálogo sísmico por zonas y se extraerán los eventos localizados dentro de cada una de ellas (Figura 1.18).

Cada zona sismogénica representa una región independiente en la metodología híbrida propuesta. La sismicidad registrada en cada región se distribuirá entre las fallas conocidas con suficiente información, que serán modelizadas como fuentes *tipo falla*, y el resto de la sismicidad asignada a la zona, que recordemos tiene la misma geometría que la región, pero menor potencial sísmico. En realidad la fuente *tipo zona* viene a englobar aquellas fallas de las que no se dispone de información suficiente para una modelización independiente, y en las que la sismicidad se considera repartida de forma homogénea, respondiendo a la definición de zona sismogénica.

En resumen, se considera un método híbrido de zonas y fallas, en el que la sismicidad de cada región será modelizada por medio de fallas independientes y de zonas sismogénicas. Se reitera que **la región y la zona tienen la misma geometría**, pero diferente potencial sísmico (PS), ya que la primera incluye el de zonas y fallas, mientras la segunda contiene solo el potencial residual eliminando las fallas.

$PS(\text{Región}) = PS(\text{Fallas como unidades independientes}) + PS(\text{Zona})$ .

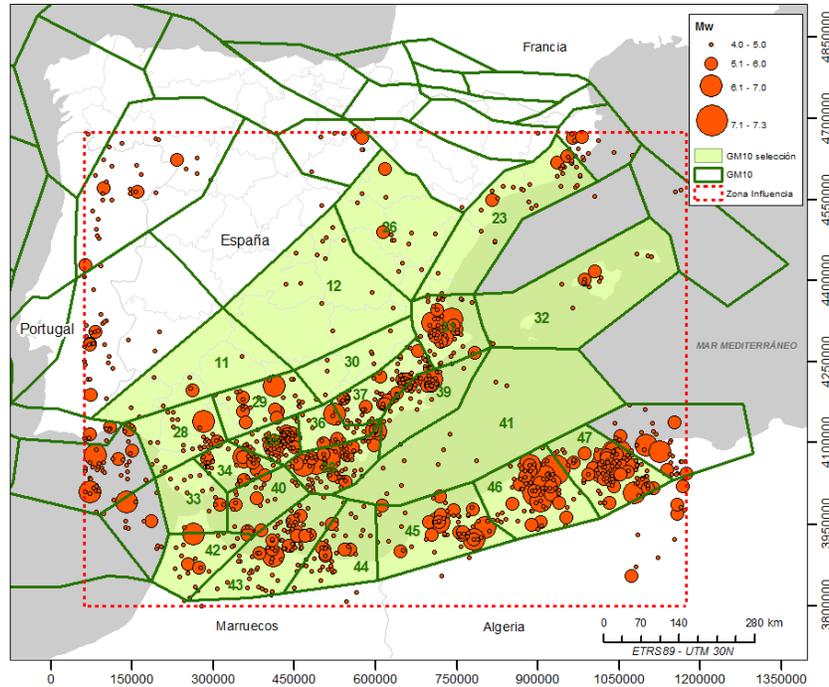


Figura 1.18. Superposición de epicentros según el catálogo de proyecto con la zonificación sismogénica GM10

La zonificación GM10 permite identificar 24 regiones diferentes que engloban un total de 1103 terremotos (de magnitud  $M_w$  mayor o igual a 4.0) distribuidos de forma heterogénea entre unas y otras regiones. (Figura 1.19). La región con mayor sismicidad es la región 35, con casi 120 sismos, seguida de la región 47 con 110 sismos y de las regiones 37, 38 y 43, con más de 80 sismos cada una. En contraposición, las regiones 11, 30 y 41, tienen muy poca sismicidad, con menos de 10 sismos cada una.

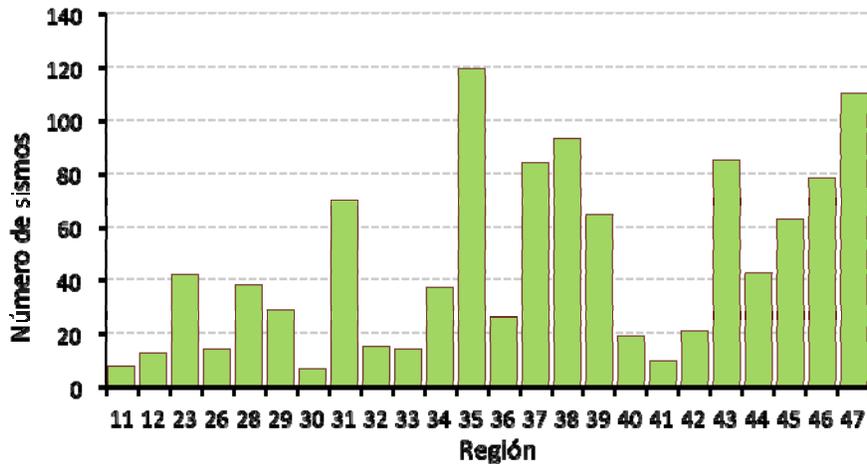


Figura 1.19 Distribución de sismos en las regiones identificadas en GM10

### 1.3.2.2 FALLAS CONTENIDAS EN CADA REGIÓN.

La siguiente fase, según la metodología propuesta, se dirige a la identificación de las fallas y segmentos de falla que están incluidos en cada región. Para ello se superpondrá el catálogo de fallas activas con el mapa de regiones (Figura 1.20), identificando qué fallas están contenidas en cada región. En aquellos casos en los que una falla quede contenida en dos regiones, se combinará con la región que contenga el mayor tramo de la traza de la falla. Como puede observarse en la Figura 1.20, solo 5 regiones tienen contenidas fallas en su interior. Estas son las regiones 30, 31, 37, 38 y 39, que serán las que más contribuyan a la peligrosidad sísmica de la región de Murcia. El resto de regiones, se modelizarán como fuentes tipo zona únicamente.

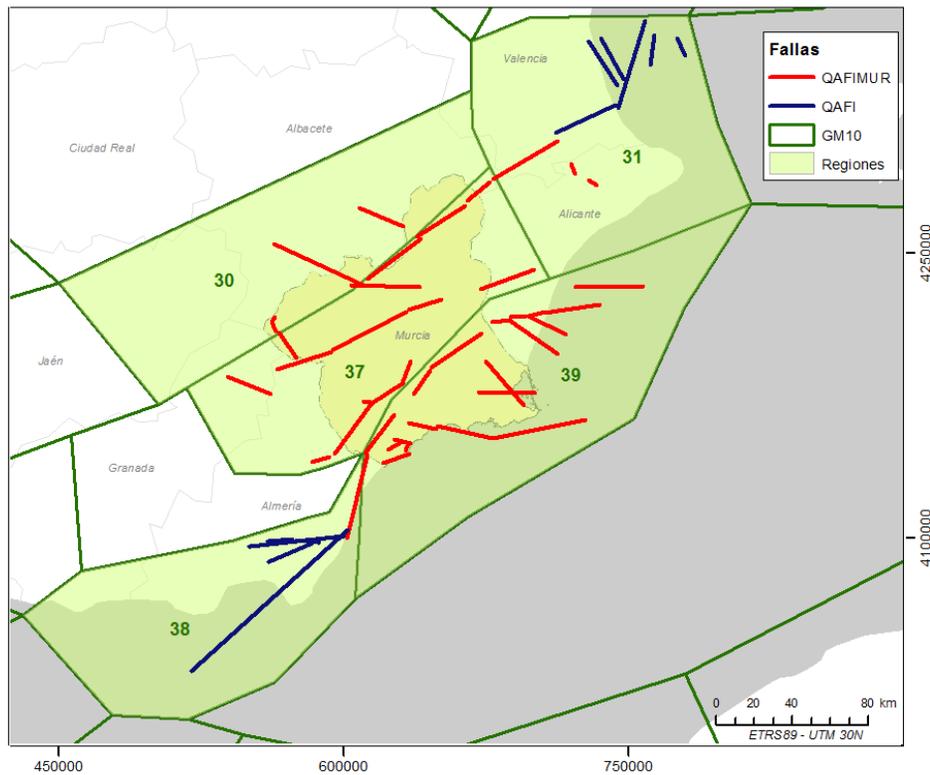


Figura 1.20. Superposición de las fallas y segmentos de falla con las regiones.

En la Figura 1.21 se muestra un diagrama de barras con el número de fallas y segmentos de falla contenidos en cada una de las regiones. La región que engloba mayor número de fallas catalogadas es la 39, con un total de 19 fallas y segmentos de falla, seguida de la región 37 con 15 fallas.

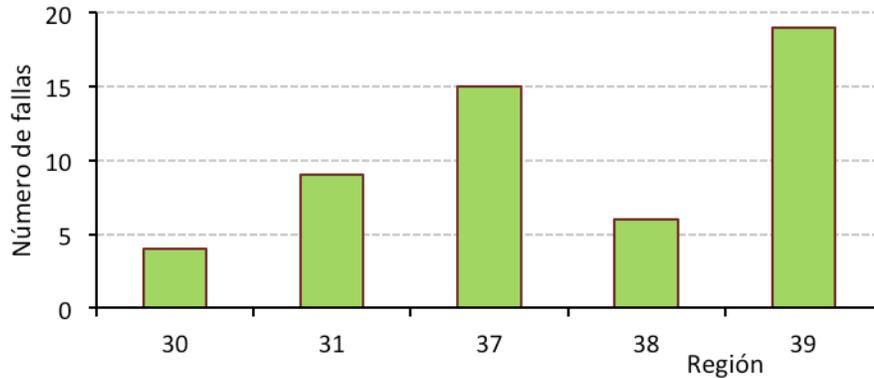


Figura 1.21. Número de fallas incluidas en cada región

### 1.3.2.3 TASA DE MOMENTO SÍSMICO, TASA DE SISMICIDAD Y PARAMETRO B EN LAS DIFERENTES FUENTES

La metodología híbrida que se aplica estima la tasa de momento sísmico registrada en cada región y la reparte entre las fuentes contenidas en ella. El fundamento de dicha metodología se explica en el Anexo 1, incluyendo en este apartado los resultados parciales de tasas de sismicidad, momento sísmico y parámetro  $\beta$  de la Ley de Gutenberg-Richter encontrados para cada fuente.

La Tabla 1.9 contiene las tasas de sismicidad y de momento sísmico para las 5 regiones que incluyen fallas y los correspondientes valores de  $\beta$ .

Tabla 1.9. Tabla con las tasas de sismicidad y de momento sísmico observadas en cada región, así como los valores de  $\beta$  obtenidos.

Región	Mmin	MMC	$\square(4.0)$	$\square o$ (Nm/año)	$\beta_{región} = \beta_{zona}$
30	4.0	4.6	0.056	1.90E+21	2.200
31	4.0	5.7	0.239	4.70E+22	1.980
37	4.0	5.7	0.440	8.40E+22	2.025
38	4.0	5.4	0.534	5.72E+22	2.267
39	4.0	5.4	0.282	3.91E+22	1.760

El modelo de recurrencia que se asignará a las fallas será el de GR modificado y se considerará que todas las fallas contenidas en una misma región tendrán igual valor de  $\beta$  (y ligeramente menor que el valor de  $\beta$  de la región) (Tabla 1.10).

Tabla 1.10. Valor de las betas de las fallas obtenidas.

Zona	$\beta$ -fallas
30	1.560
31	1.470
37	1.785
38	1.930
39	1.430

En la Tabla 1.11 se presenta un resumen del reparto de potencial sísmico de cada región entre las fallas y las zonas.

Tabla 1.11. Reparto de las tasas de sismicidad y momento sísmico. (%: representa el porcentaje de tasa de momento sísmico de la región asociado a las fallas y a la zona en el intervalo de magnitudes registradas de forma completa en el catálogo ( $M_{min}$ ,  $MMC$ ).  $\% = M_o (M_{min} - MMC) \text{ falla o zona} / M_o (M_{min} - MMC) \text{ región}$ .

Región	Fuente	$\square_{min} (M_{min} - MMC)$	$\square_o (M_{min} - MMC)$	%
30	Zona	0.051	1.73E+21	91%
	$\Sigma$ Fallas	0.006	1.73E+20	9%
	<b>Total</b>	<b>0.056</b>	<b>1.90E+21</b>	
31	Zona	0.210	4.14E+22	88%
	$\Sigma$ Fallas	0.029	5.61E+21	12%
	<b>Total</b>	<b>0.239</b>	<b>4.70E+22</b>	
37	Zona	0.284	5.41E+22	64%
	$\Sigma$ Fallas	0.156	2.99E+22	36%
	<b>Total</b>	<b>0.440</b>	<b>8.40E+22</b>	
38	Zona	0.352	3.77E+22	66%
	$\Sigma$ Fallas	0.183	1.96E+22	34%
	<b>Total</b>	<b>0.534</b>	<b>5.72E+22</b>	
39	Zona	0.171	2.38E+22	61%
	$\Sigma$ Fallas	0.111	1.53E+22	39%
	<b>Total</b>	<b>0.282</b>	<b>3.91E+22</b>	

#### 1.3.2.4 FUENTES SÍSMICAS FINALES DE CÁLCULO

Como ya se ha explicado, el reparto de tasa de momento sísmico regional y la recurrencia de las fuentes sísmicas (zonas y fallas) se ha hecho considerando solo el intervalo de magnitudes registradas de forma completa en el catálogo ( $M_{min}$ ,  $MMC$ ), es decir, se ha estimado la recurrencia de las fuentes utilizando únicamente ese intervalo de magnitudes. No obstante, las fuentes tienen un potencial sísmico mayor que el observado en ese intervalo inicial, siendo el intervalo real, a efectos del potencial sísmico a considerar finalmente, el que va desde  $M_{min}$  a la magnitud máxima posible en cada una.

Por este motivo, al modelizar el potencial sísmico de cada una de las fuentes en el cálculo de la peligrosidad se extrapolará la recurrencia de cada una hasta sus límites máximos ( $M_{min}$ ,  $M_{max \text{ fuente}}$ ). En el caso de las fallas, la extrapolación se efectuará hasta las magnitudes máximas esperadas en las mismas y en el caso de las fuentes tipo zona, hasta la magnitud creíble, que se estimará como la magnitud máxima de completitud más 0.5 grados de magnitud. Con estos límites, se está suponiendo que las magnitudes superiores a la magnitud máxima de completitud (magnitudes iguales o superiores a 6.0) están asociadas mayoritariamente a las fallas modelizadas independientemente, pero dejando un margen de superación por parte de las zonas.

La sismicidad de las fuentes será caracterizada por medio de las tasas simples de sismos  $\dot{n}(m)$  y suponiendo que la fuente puede romper cada 0.1 unidades de magnitud. No obstante, en las siguientes tablas se referirán los valores de los parámetros de sismicidad que comúnmente se usan en peligrosidad:  $M_{min}$ ,  $M_{max}$ ,  $\beta$  y  $\dot{N}(m)$ .

**Región 30.** En la Tabla 1.12 se presentan los parámetros de cálculo obtenidos para la zona 30 y para las 4 fallas contenidas en la región y en la Figura 1.22 se representan los modelos de recurrencia que resultan, tras el reparto de sismicidad, para la zona y las cuatro fallas (o segmentos) y su prolongación hasta las magnitudes máximas esperadas.

Tabla 1.12. Parámetros para el cálculo de peligrosidad de las región 30.

	Fuente	Mmin	Mmax	$\dot{N}_{min}$	beta
ES728	Socovos (1/2)	4.0	7.0	0.0032	1.560
ES730	Pozohondo	4.0	6.7	0.0054	1.560
ES765	Rambla del Puerto	4.0	5.7	0.0002	1.560
ES766	Sur de Revolcadores	4.0	5.9	0.0004	1.560
Zona 30		4.0	5.1	0.0576	2.200

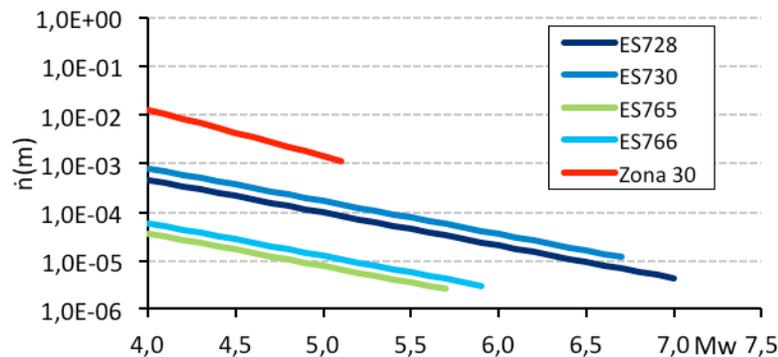


Figura 1.22. Modelo de recurrencia de las fuentes de la región 30.

**Región 31.** En la Tabla 1.13 se presentan los parámetros de cálculo obtenidos en la zona región 31 y en los segmentos de falla incluidos en la región y en la Figura 1.23 se representan los correspondientes modelos de recurrencia.

Tabla 1.13. Parámetros para el cálculo de peligrosidad de las región 31.

	Fuente	Mmin	Mmax	min	beta
ES608	Jumilla (Sector Valencia) (2/2)	4.0	6.9	0.0031	1.470
ES622	Muro de Alcoy (o de Mariola)	4.0	6.1	0.0107	1.470
ES624	Benasau	4.0	6.0	0.0101	1.470
ES634	Jumilla (Sector Valencia) (1/2)	4.0	6.9	0.0032	1.470
ME005	Cabo de Cullera Western Fault	4.0	6.8	0.0019	1.470
ME006	Cabo de Cullera Central-Western Fault	4.0	6.7	0.0018	1.470
ME007	Cabo de Cullera Central-Eastern Fault	4.0	7.0	0.0014	1.470
ME008	Cabo de Cullera Eastern Fault	4.0	6.5	0.0011	1.470
ME009	Southwest of Columbretas Basin	4.0	6.3	0.0010	1.470
Zona 31		4.0	6.2	0.2321	1.980

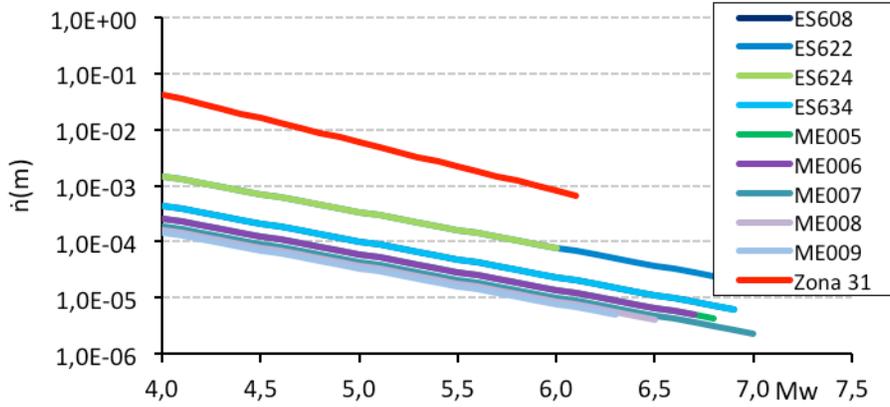


Figura 1.23. Modelo de recurrencia de las fuentes de la región 31.

**Región 37.** En la Tabla 1.14 se presentan los parámetros de cálculo obtenidos en la zona 37 y en las fallas y segmentos de falla incluidos en la región y en la Figura 1.24 se representan los correspondientes modelos de recurrencia.

Tabla 1.14. Parámetros para el cálculo de peligrosidad de las región 37

	Fuente	Mmin	Mmax	min	beta
ES601	Crevillente (Sector Murcia) (1/3)	4.0	6.8	0.0104	1.785
ES602	Crevillente (Sector Murcia) (2/3)	4.0	6.9	0.0116	1.785
ES603	Crevillente (Sector Murcia) (3/3)	4.0	6.6	0.0089	1.785
ES604	Crevillente (Sector Alicante) (1/2)	4.0	6.8	0.0073	1.785
ES605	Jumilla (Sector Murcia) (1/3)	4.0	6.8	0.0008	1.785
ES606	Jumilla (Sector Murcia) (2/3)	4.0	6.8	0.0008	1.785
ES607	Jumilla (Sector Murcia) (3/3)	4.0	6.5	0.0033	1.785
ES626	Alhama de Murcia (1/4)	4.0	6.8	0.0453	1.785
ES627	Alhama de Murcia (2/4)	4.0	6.6	0.0242	1.785
ES631	Amarguillo	4.0	6.3	0.0047	1.785
ES632	Las Viñas	4.0	5.8	0.0088	1.785
ES684	Botardo-Alfahuara	4.0	6.7	0.0033	1.785
ES716	Albox	4.0	6.3	0.0013	1.785
ES729	Socovos (2/2)	4.0	6.9	0.0225	1.785
ES769	La Junquera-Mancheño	4.0	6.4	0.0097	1.785
Zona 37		4.0	6.2	0.3145	2.025

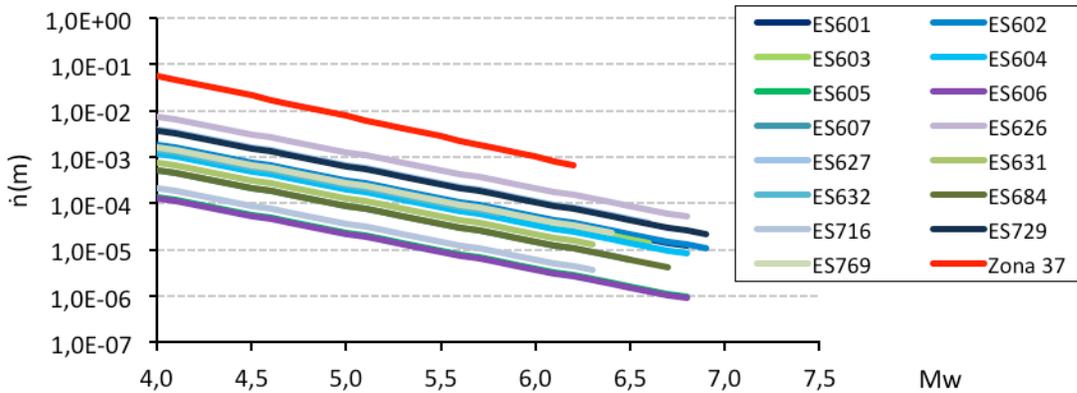


Figura 1.24. Modelo de recurrencia de las fuentes de la región 37.

**Región 38.** En la Tabla 1.15 presentan los parámetros de cálculo obtenidos en la zona 38 y en las fallas y segmentos de falla incluidos en la región y en la Figura 1.25 se representan los correspondientes modelos de recurrencia.

Tabla 1.15. Parámetros para el cálculo de peligrosidad de las región 38

	Fuente	Mmin	Mmax	min	beta
ES609	Palomares (1/2)	4.0	6.9	0.0036	1.930
ES611	Corredor de Las Alpujarras (Sector Almería)	4.0	7.0	0.0066	1.930
ES625	Alhamilla Sur	4.0	6.7	0.0037	1.930
ES630	Carboneras (1/2)	4.0	7.3	0.1768	1.930
ES635	Polopos fault zone (1/2)	4.0	6.3	0.0020	1.930
ES636	Polopos fault zone (2/2)	4.0	6.3	0.0027	1.930
Zona 38		4.0	5.9	0.3949	2.267

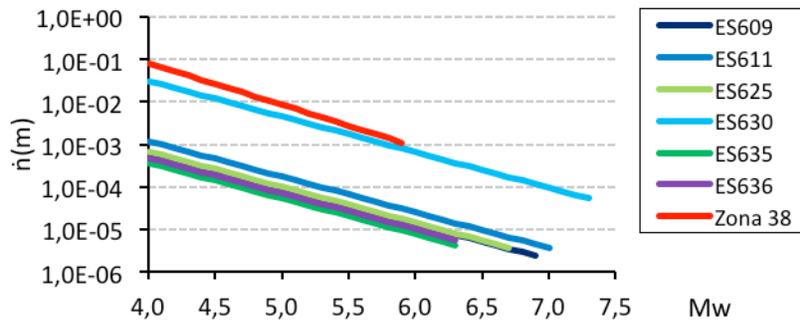


Figura 1.25. Modelo de recurrencia de las fuentes de la región 38.

**Región 39.** En la Tabla 1.16 se presentan los parámetros de cálculo obtenidos en la zona 39 y en las fallas y segmentos de falla incluidos en la región y en la Figura 1.26 se representan los correspondientes modelos de recurrencia.

Tabla 1.16. Parámetros para el cálculo de peligrosidad de las región 39

	Fuente	Mmin	Mmax	min	beta
ES610	Palomares (2/2)	4.0	6.7	0.0017	1.430
ES612	Las Moreras - Escarpe de Mazarrón (1/3)	4.0	6.4	0.0015	1.430
ES613	Las Moreras - Escarpe de Mazarrón (2/3)	4.0	6.7	0.0017	1.430
ES614	Las Moreras - Escarpe de Mazarrón (3/3)	4.0	6.9	0.0018	1.430
ES615	Carrascoy	4.0	6.8	0.0272	1.430
ES616	Torrevieja	4.0	6.6	0.0050	1.430
ES617	San Miguel de Salinas	4.0	6.8	0.0207	1.430
ES618	Bajo Segura (1/3)	4.0	6.3	0.0168	1.430
ES619	Bajo Segura (2/3)	4.0	6.2	0.0110	1.430
ES620	Bajo Segura (3/3)	4.0	6.3	0.0083	1.430
ES743	West Cabezo Gordo (Murcia - Mar Menor)	4.0	6.8	0.0033	1.430
ES745	El Cantal	4.0	6.2	0.0021	1.430
ES746	Garrovilla	4.0	5.8	0.0008	1.430
ES750	La Puebla	4.0	6.7	0.0031	1.430
ES756	La Galera	4.0	6.2	0.0021	1.430
ES760	Los Tollos	4.0	6.4	0.0049	1.430
ES761	Falla de Águilas	4.0	6.4	0.0012	1.430
ME021	Bajo Segura Offshore	4.0	6.8	0.0099	1.430
ME023	Santa Pola	4.0	6.8	0.0018	1.430
Zona 39		4.0	5.9	0.1881	1.760

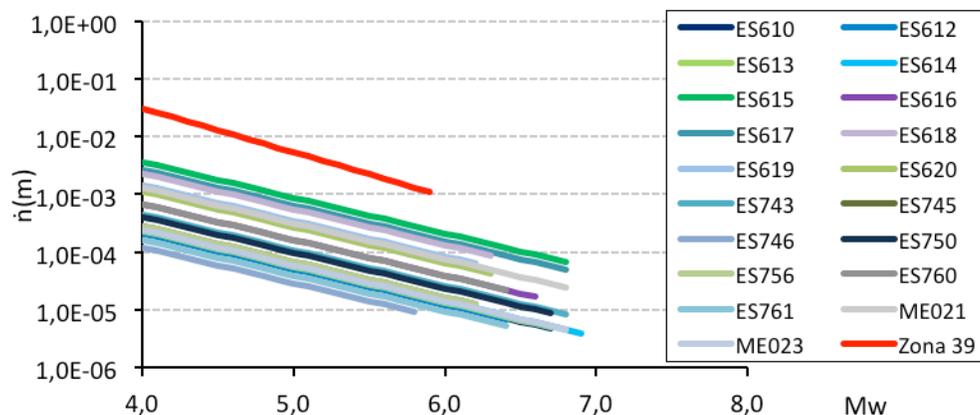


Figura 1.26. Modelo de recurrencia de las fuentes de la región 39.

En el caso de las zonas sismogénicas que no tienen fallas activas catalogadas en su interior, las fuentes se modelizarán según la metodología clásica zonificada, siendo los parámetros de dichas fuentes los que se muestran en la Tabla 1.17.

Tabla 1.17. Parámetros de sismicidad de las zonas sismogénicas sin fallas activas catalogadas en su interior en el estudio.

	<b>Mmin</b>	<b>Mmax</b>	<b>min</b>	<b>beta</b>
Zona11	4.0	6.1	0.087	2.598
Zona12	4.0	5.2	0.098	3.269
Zona23	4.0	6.7	0.147	1.601
Zona26	4.0	6.3	0.081	2.057
Zona28	4.0	6.7	0.236	2.767
Zona29	4.0	6.6	0.270	1.884
Zona32	4.0	5.8	0.121	1.192
Zona33	4.0	5.8	0.137	2.339
Zona34	4.0	6.9	0.228	2.418
Zona35	4.0	6.8	0.508	2.482
Zona36	4.0	6.4	0.141	2.285
Zona40	4.0	6.5	0.210	2.251
Zona42	4.0	6.8	0.244	2.158
Zona43	4.0	7.1	0.861	2.242
Zona44	4.0	6.4	0.311	1.912
Zona45	4.0	7.4	0.538	1.826
Zona46	4.0	7.6	0.813	1.833
Zona47	4.0	7.7	0.912	1.777
Zona 41	4.0	6.5	0.140	2.317

### 1.3.3 SELECCIÓN DEL MODELO DE MOVIMIENTO FUERTE

#### 1.3.3.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los factores determinantes en el cálculo de la peligrosidad sísmica es el modelo de movimiento fuerte que se aplique, también denominado ley de atenuación o ecuación de predicción del movimiento fuerte (GMPE, *Ground Motion Prediction Equation*). La GMPE se utiliza para estimar el movimiento del suelo en un emplazamiento dado a partir de la magnitud del terremoto, la distancia fuente-emplazamiento y otras variables como son el mecanismo focal, tipo de suelo en el emplazamiento, etc. La GMPE reproduce la atenuación de ondas en la zona de aplicación y tiene un gran impacto en los resultados de peligrosidad, por lo que se ha dedicado una buena parte del trabajo a analizar con el máximo rigor los modelos existentes e identificar los más idóneos para la aplicación que nos ocupa.

Para reproducir de forma óptima la atenuación de una zona lo ideal es disponer de modelos propios, desarrollados con datos registrados en la misma zona de aplicación, y cubriendo los rangos de magnitud y distancia de los terremotos que controlen la peligrosidad.

Existen dos métodos fundamentales para obtener un modelo de movimiento fuerte: el empírico y el analítico. El primero de ellos se basa en el ajuste por regresión de una forma funcional a unos datos observados, con unos ciertos requisitos matemáticos que dan cuenta de la bondad del ajuste. El segundo parte de un modelo físico-teórico de generación y propagación de energía sísmica que se calibra con datos registrados, esencialmente acelerogramas. En ambos casos, se precisa contar con una base de datos de movimiento fuerte suficientemente amplia para que los modelos tengan una validación estadística.

Desafortunadamente, este no es el caso de la Península Ibérica, donde la cantidad de registros de movimiento fuerte no es todavía tan extensa. La base de datos acelerométricos del IGN contiene pocos datos correspondientes a distancias cortas (inferiores a 5 km) y a altas magnitudes (sobre todo superiores a 5.0) y todavía son pocos los terremotos de los que se conocen otros parámetros como su mecanismo focal o se tiene una buena definición del tipo de suelo en el emplazamiento.

Por ello, se hace inviable desarrollar un modelo propio basado en datos locales para calcular el movimiento fuerte del suelo en los casos correspondientes a terremotos en campo próximo y con las mayores magnitudes que cabe esperar en el territorio español ( $M_w$  del orden de 6.5 a 7.0). Para cubrir estos rangos de cortas distancias y altas magnitudes debemos entonces acudir a modelos foráneos, desarrollados para otras regiones geográficas, que presenten una cierta afinidad con la de aplicación, en lo que a atenuación se refiere.

Si se consulta la literatura especializada se comprueba que muchos de estos modelos existentes van siendo mejorados y actualizados de manera constante, convirtiéndose en modelos cada vez más complejos. Hace 20 años, los modelos eran muy simples, tanto en su forma funcional como en sus variables (magnitud y distancia), incluyendo en muchos casos una clasificación simple del tipo

de suelo en el emplazamiento (Ambraseys et al. 1996; Sabeta y Pugliese 1996; Berge-Thierry et al. 2003). En la última década, se ha empezado a incorporar el mecanismo focal como variable de cálculo, entre otras variables (Ambraseys et al. 2005; Akkar y Bommer 2010; Bindi et al. 2011). La tendencia actual es desarrollar modelos cada vez más robustos, con mayor número de variables para caracterizar de forma óptima la fuente sísmica y el suelo del emplazamiento. El ejemplo más claro se puede observar en los modelos de la NGA (*Next Generation Attenuation models*) en su primera versión en 2008 y en la segunda versión publicada en 2013.

Dado este avance en la definición de las GMPE, y para su correcta utilización, es necesario disponer de información relativa al mecanismo focal de cada evento, tipo de suelo y diferentes definiciones de distancia fuente-emplazamiento ( $R_{jb}$ ,  $R_{rup}$ ,  $R_x$ ), entre otros parámetros. Por ello, se ha intentado elaborar una base de datos acelerométrica para España compuesta por todos los registros de los que, además de conocer los valores de aceleración, se tenga información acerca de su mecanismo focal, tipo de suelo, etc.

Con esta base de datos y partiendo de una serie de modelos preseleccionados que cubran el rango de magnitudes y distancias de nuestros registros, se ha realizado un contraste estadístico aplicando los métodos de Scherbaum et al., 2004 y Kale & Akkar (2012), permitiendo de este modo calibrar dichos modelos con los datos locales y establecer una selección de aquellos que resulten más idóneos para utilizar en el territorio español. Dicho análisis se ha llevado a cabo, además de para PGA, para las ordenadas espectrales de corto y largo periodo, SA (0.1 s) y SA (1.0 s).

### 1.3.3.2 BASE DE DATOS ACELEROMÉTRICA PARA CALIBRACIÓN DE MODELOS

La red de acelerómetros del IGN comienza a instalarse en el año 1977 con los primeros equipos analógicos, siendo a partir del año 1989 cuando comienzan a instalarse los primeros equipos digitales. En la actualidad, esta red consta de más de 120 estaciones (Figura 1.27) con cuyos registros acelerométricos se ha configurado una base de datos que abarca el periodo desde 1984 hasta la fecha actual.



Figura 1.27. Red acelerométrica del IGN.

Para el caso concreto de este estudio se ha elaborado una base de datos acelerométrica (BDA) compuesta por un total de 155 registros procedentes de 48 terremotos con magnitudes momento ( $M_w$ ) comprendidas entre 3.0 y 5.1 y distancias epicentrales de hasta 300 km. La distribución geográfica de los eventos incluidos en la base de datos se muestra en la Figura 1.28:

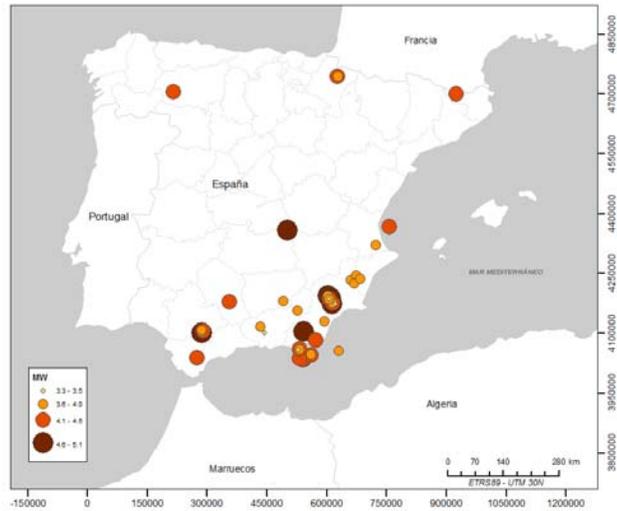


Figura 1.28. Terremotos con registros de aceleración en la base de datos del IGN.

En la Figura 1.29 se muestra la relación entre la magnitud y distancia epicentral de cada registro, pudiéndose observar que la mayor parte de los datos se sitúan en distancias comprendidas entre 10 y 100 km.

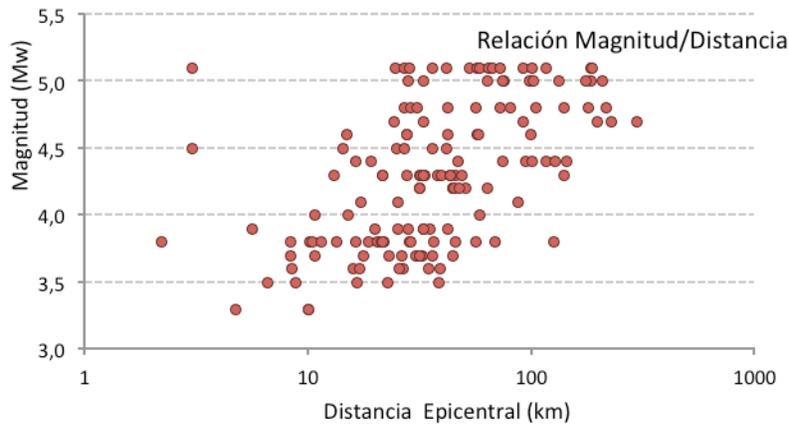


Figura 1.29. Relación entre la magnitud y la distancia epicentral de cada registro

Cada estación de la red de acelerómetros del IGN registra generalmente el movimiento por cada evento en las tres componentes espaciales: componente horizontal en dirección NS, componente horizontal en la dirección EW y componente vertical V. Los rangos de aceleraciones registradas (PGA) para las diferentes componentes son:

- Componente NS: 0.44 - 357.9  $\text{cm/s}^2$
- Componente EW: 0.17 - 150.3  $\text{cm/s}^2$
- Componente V: 0.26 - 114.9  $\text{cm/s}^2$

En la Figura 1.30 se pueden observar los valores de PGA registrados en función de la distancia epicentral para cada una de las tres componentes.

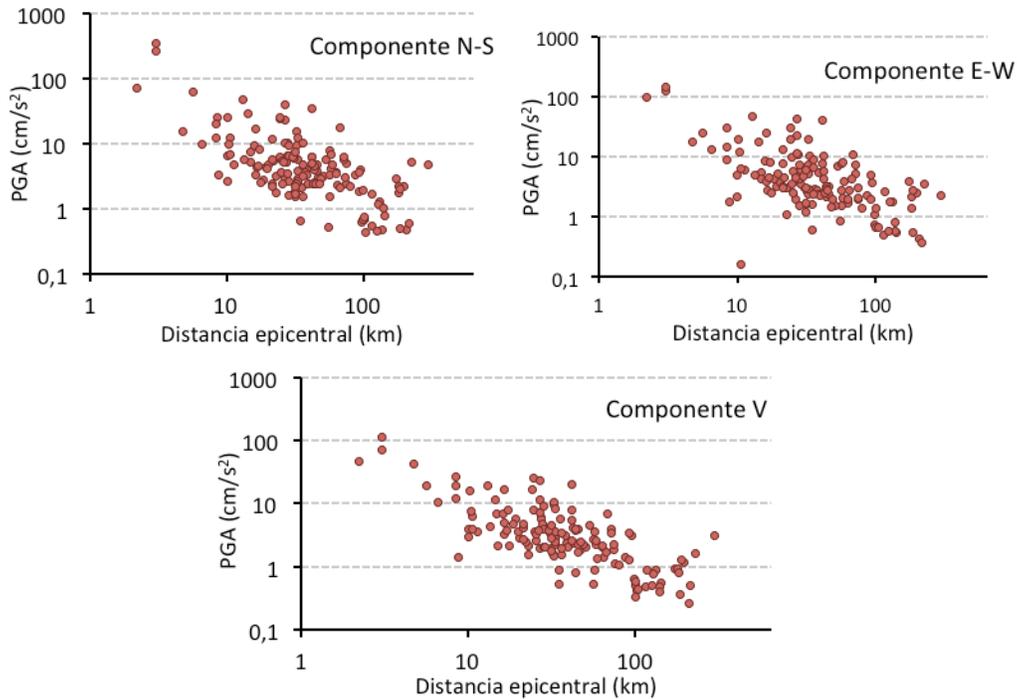


Figura 1.30. Valores de aceleración registrados en las tres componentes frente distancia epicentral.

Se ha decidido eliminar de la base de datos aquellos registros correspondientes a terremotos ocurridos en la Zona del SO de Cabo de San Vicente, por la lenta atenuación observada en la misma, muy diferente al resto de zonas, así como los sismos ocurridos en la zona del N de África o con epicentro en el mar con una larga propagación a través del medio marino.

Para cada registro se ha recopilado información sobre su mecanismo focal y geometría de la falla, con el fin de calibrar de la mejor manera posible los modelos más recientes y completos, tanto europeos como mundiales (NGA), en los que se definen variables como el tipo de mecanismo, distintos tipos de distancia a la fuente así como el parámetro del tipo de suelo, entre otros. Esta información permite, además, pasar de considerar la ruptura en la fuente como un elemento puntual a definirla por medio de un plano de ruptura, cuya orientación y geometría se determinan a partir del mecanismo.

Al mismo tiempo, se pueden aplicar distintas definiciones de la distancia fuente-emplazamiento, como la distancia al plano de ruptura (*Rrup*), la distancia a la proyección del plano de ruptura en superficie (*Rjb*) y la distancia a la proyección en superficie de la traza más superficial del plano de

ruptura ( $R_x$ ). Estas son las distancias más empleadas por los distintos modelos de movimiento fuerte, por lo que han sido calculadas para todos los registros de la BDA, para la correcta calibración de los modelos.

Por último, ha sido necesario caracterizar el suelo en cada estación de registro, ya que los modelos a calibrar proporcionan distintas aceleraciones para los diferentes tipos de suelo. Esto solo se ha hecho de forma aproximada, ya que las estaciones acelerométricas del IGN tan solo disponen de una clase de suelo según la clasificación del Eurocode 8. A partir de la clase asociada a cada estación se ha asignado un valor de  $V_s30$ , siguiendo también la propuesta del EC8, característico del tipo de suelo.

### 1.3.3.3 MODELOS DE MOVIMIENTO FUERTE SELECCIONADOS Y CALIBRADOS

Se ha optado por analizar la segunda versión de los modelos de la NGA, NGA-West2 (*Next Generation Attenuation models*) para su posible aplicación en España. Los modelos NGA, en su primera versión, surgen de una iniciativa llevada a cabo en EE. UU., en la que se entrega a cinco equipos de investigadores una amplia base de datos de movimiento fuerte y cada uno desarrolla y propone su propia GMPE (Power et al. 2008). La base de datos consta de un total de 173 terremotos (3551 registros) pertenecientes a zonas activas de corteza superficial de todo el mundo, siendo una gran parte de estos (excepto para magnitudes mayores que 7) correspondientes a terremotos de California. Los modelos son desarrollados por Abrahamson y Silva (2008), Boore y Atkinson (2008), Campbell y Bozorgnia (2008), Chiou y Youngs (2008) e Idriss (2008). Las principales novedades que presentaban son: incorporan el efecto de suelo a través del valor de  $V_s30$  y no de una categoría genérica, incluyen efectos de suelo no lineales dependientes de la profundidad de un determinado horizonte de velocidades, distinguen entre el efecto de bloque superior e inferior de una falla (*hanging-wall effect*), introducen el mecanismo focal de la fuente y emplean un modelo detallado de incertidumbre.

Con el fin de mejorar tales modelos y dada la limitación existente para su aplicabilidad en zonas de moderada y baja sismicidad (como es el caso de España), durante el último año se ha publicado una segunda versión NGA (NGA-West 2).

La base de datos del proyecto NGA-West2, se ha aumentado con datos de movimiento de todo el mundo registrados después de 2003. Esta base de datos actualizada, cubre un rango de magnitud de entre 3.0 y 7.9, y un rango de distancias a la ruptura de 0,05 a 1.533 kilómetros. Los nuevos modelos NGA- W2 han sido publicados en Abrahamson et al. 2013 (ASK13), Boore et al. 2013 (BSSA13), Campbell y Bozorgnia 2013 (CB13), Chiou y Youngs 2013 (CY13) e Idriss 2013 (I13).

En la Tabla 1.18 se presenta un resumen de los parámetros que usa cada modelo, para facilitar su comparación.

Tabla 1.18. Tabla resumen con las variables que utiliza cada uno de los modelos de la NGA W2 preseleccionados para este estudio.

	ASK13	CB13	CY13	BSSA13	I13
Parámetros de la fuente					
Magnitud	X	X	X	X	X
Mecanismos	X	X	X	X	X
Buzamiento (dip)	X (HW)	X	X		
Ancho del plano de ruptura (W)	X (HW)	X (HW)			
Efecto <i>Hanging-wall</i> (HW)	X	X	X		
Centroide Rjb (CRjb)	X				
Indicador de réplica (Fas)	X				
Profundidad del plano de ruptura (Ztor)	X	X (HW)	X		
Profundidad del hipocentro (Zhyp)		X			
Tipo de distancias					
Distancia Rx	X (HW)	X (HW)	X (HW)		
Distancia Joyner-Boore (Rjb)	X (HW)	X (HW)		X	
Distancia al plano de ruptura (Rrup)	X	X	X		X
Distancia Ry	X (HW)				
Distancia Ryo	X (HW)				
Efecto de sitio					
Vs30	X	X	X	X	X
Z1.0	X		X	X	
Z2.5		X			
Otros efectos					
Efecto de directividad			X		
Regionalización de la atenuación	X	X	X	X	

### 1.3.3.4 ANÁLISIS DE RESIDUOS

Una vez analizados los nuevos modelos NGA-West 2, se ha realizado un contraste de los mismos con acelerogramas locales de nuestra BDA. El fin último de este estudio es identificar qué modelos se ajustan mejor a nuestros datos y por tanto reproducen de forma más realista la atenuación en nuestra zona de aplicación. Estos modelos serán entonces los más idóneos para el posterior cálculo de la peligrosidad. Teniendo en cuenta la alta sensibilidad de los resultados a los modelos que se apliquen, la elección de los mismos tiene una importancia especial, por lo que se han aplicado las últimas metodologías propuestas para el contraste de modelos con significación estadística. Se han utilizado dos metodologías diferentes:

- Metodología propuesta por Scherbaum et al. (2004)
- Metodología propuesta por Kale & Akkar (2012)

EL detalle de la aplicación de ambas metodologías se incluye en el anexo II.

### 1.3.3.5 MODELOS FINALMENTE SELECCIONADOS

A la vista de los resultados obtenidos de los dos análisis anteriores (Metodología Scherbaum et al. 2004 y Kale y Akkar 2012) los modelos finalmente seleccionados y los pesos con los que serán ponderados en el árbol lógico que se formule para el cálculo de la peligrosidad son:

- ASK13 (Abrahamson et al. (2013)), con peso: 0.7
- CB13 (Campbell y Bozorgnia (2013)), con peso: 0.3

Se ha decidido dar más peso al modelo de Abrahamson et al. (2013) puesto que es el modelo que mejor resultado ha dado al aplicar ambas metodologías de contraste de datos. A continuación se incluye una breve descripción de cada uno de estos modelos seleccionados.

#### ASK13. Abrahamson et al., 2013

Este modelo, desarrollado por Abrahamson, Silva y Kamai, es la versión actualizada del modelo AS08. Los parámetros de entrada del modelo son los mismos que en la versión anterior, con algunas excepciones: la componente no lineal del efecto de suelo se basa en el periodo de la aceleración espectral de interés en lugar de la PGA; el efecto de *hanging-wall* fuera de los extremos de la ruptura incluye una dependencia del acimut entre la fuente y el emplazamiento y se mejora mediante restricciones de las simulaciones numéricas. Se incluye una regionalización para largas distancias y valor de Vs30 en California, Japón, China y Taiwán. La desviación estándar se hace dependiente de la magnitud, de tal forma que las magnitudes bajas conllevan una mayor desviación.

Este modelo es muy complejo y con muchas variables de entrada. La escala de la fuente sísmica se define con 7 parámetros: la magnitud ( $M_w$ ), la profundidad a la parte superior de la ruptura ( $Z_{top}$ ), el mecanismo focal, un identificador de réplicas ( $Fas$ ), mediante la definición de dos clases dependientes de la distancia al centroide Joyner-Boore ( $CR_{jb}$ ) (ver Wooddell y Abrahamson 2012) y dos parámetros adicionales de fuente, el buzamiento ( $dip$ ) y la anchura del plano de ruptura ( $W$ ) en los casos que incluyen el efecto *hanging-wall*.

La distancia viene definida por la distancia más cercana al plano de ruptura ( $R_{rup}$ ), pero también se incluyen cuatro medidas adicionales de distancia, ( $R_{jb}$ ,  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_{yo}$ ). Estas se usan para modelar la atenuación en el efecto *hanging-wall*. De estos cuatro parámetros, hay dos nuevos, las distancias  $R_y$  (valor de  $R_x$  en el borde inferior de la ruptura), que no se usa en esta versión y  $R_{yo}$ , que se refiere a la distancia horizontal del extremo de la rotura medida.

La amplificación por efecto de sitio está clasificada con dos variables: la Vs30 y Z1.0. Aunque la Z2.5 (profundidad a la velocidad de la onda de corte de 2.5 km/s) puede estar más directamente relacionada con la respuesta del sitio en los largos periodos, los autores seleccionan el parámetro

Z1.0 (profundidad a la velocidad de la onda de corte de 1.0 km/s) por ser más próximo al parámetro geotécnico tradicional de profundidad hasta la roca madre y por ser más fácil de medir.

### CB13. Campbell y Bozorgnia 2013

Este modelo, es la nueva versión del modelo publicado por los mismos autores en Campbell y Bozorgnia 2008. Al igual que en la versión anterior, el modelo nuevo incluye parámetros referentes a la magnitud, la atenuación geométrica, el mecanismo focal, el efecto *hanging-wall* y la respuesta lineal y no lineal del efecto de sitio. También se han añadido nuevos términos y variables, incluyendo un nuevo efecto de *hanging-wall* y las variables de profundidad hipocentro (*Zhyp*), buzamiento (*dip*) y una regionalización de la atenuación anelástica.

Las características de la fuente sísmica vienen definidas por la magnitud (*Mw*), la profundidad a la parte superior de la ruptura (*Ztor*), el mecanismo focal, el buzamiento (*dip*) y el ancho del plano de ruptura (*W*).

La distancia fuente-emplazamiento se define por medio de la distancia más cercana al plano de ruptura (*Rrup*), la distancia *Rjb* y la distancia *Rx*. El efecto de sitio es incluido por medio de la *Vs30* y la profundidad del sedimento (Z2.5).

## 1.3.4 ESTIMACIÓN DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA EN ROCA

### 1.3.4.1 ESPECIFICACIONES DE CÁLCULO

La peligrosidad sísmica se ha estimado en términos de los siguientes parámetros de movimiento: aceleración pico (PGA) y aceleraciones espectrales SA referentes a 8 periodos estructurales  $T = 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5,$  y  $2.0$  segundos, todas ellas expresadas en g. Estas aceleraciones representarán el movimiento esperado con probabilidad de excedencia del 10% en 50 años, lo que se corresponde con el periodo de retorno de 475 años, tal como establecen la mayor parte de las normativas relacionadas con el diseño sismorresistente de estructuras convencionales.

El cálculo se efectuará en una malla de puntos compuesta por  $36 \times 31$  nodos, separados en 0.05 grados de latitud y longitud, respectivamente. La malla está encuadrada en un polígono limitado por la latitud  $37.3N - 39.1N$  y la longitud  $2.4W - 0.6W$  (Figura 1.31), cubriendo la región de Murcia completamente.

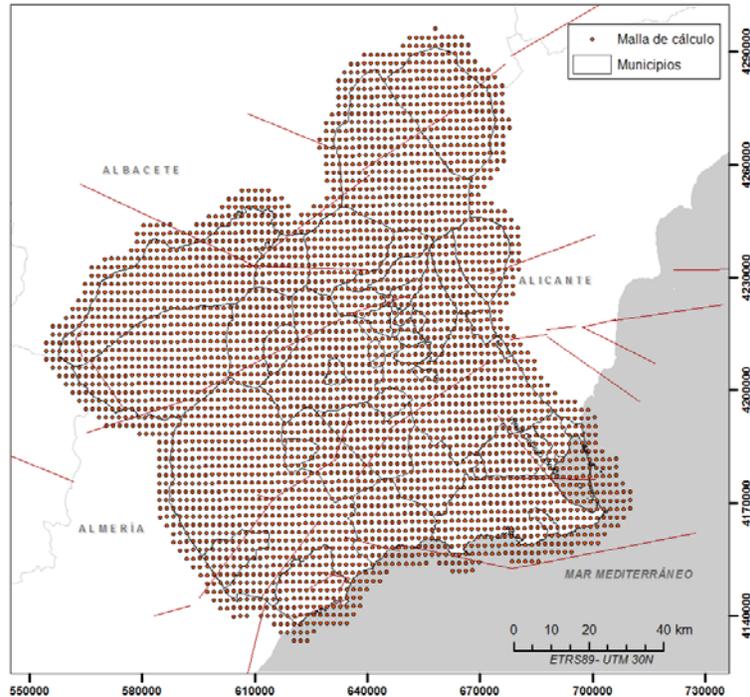


Figura 1.31. Malla en la que se realizará el cálculo de peligrosidad.

Las aceleraciones resultantes serán estimadas en emplazamientos genéricos para suelo tipo roca o suelo duro ( $V_{s30} = 760$  m/s), considerando que en dichos emplazamientos debe calcularse posteriormente el efecto local.

Se considerará la variabilidad aleatoria del modelo de movimiento fuerte hasta un máximo de 3 desviaciones estándar ( $\epsilon=3$ ), por suponer que dicho truncamiento contempla sobradamente la aleatoriedad del movimiento asociado al modelo de predicción.

#### 1.3.4.2 PROGRAMA DE CÁLCULO

El programa que se utilizará para desarrollar el cálculo probabilista de la peligrosidad será el Software libre CRISIS2012 v5.0 (Ordaz et al. 2013). Este programa, permite implementar la metodología híbrida de zonas y fallas, usando las fallas como fuentes sísmicas independientes.

#### Modelización de las fuentes sísmicas

La geometría de estas fuentes será modelizada por el programa a partir de:

- 1) polígonos en el espacio que delimitarán las zonas sismogénicas, en el caso de fuentes *tipo área*, por medio de planos horizontales (5 km de profundidad).
- 2) planos de falla, en los casos de fuentes *tipo falla*, situados a la profundidad a la que estos se encuentren.

De forma adicional, el programa permite crear planos de ruptura para los diferentes sismos que se contemplan en el cálculo probabilista, cuyo tamaño será dependiente de la magnitud del evento y

del mecanismo, utilizando en esta aplicación las fórmulas propuestas por Wells y Coppersmith (1994) para los diferentes mecanismos. La inclusión de estos planos de ruptura en la estimación de la peligrosidad se hace necesaria cuando se emplean modelos de predicción que usan como medidas de distancia  $Rrup$  y  $Rjb$ , como es el caso que nos ocupa. En este caso concreto, las fuentes tipo falla tienen la particularidad de que los planos de ruptura generados en las mismas nunca sobrepasen el área de la fuente.

Este programa también permite asignar una inclinación a dicho plano de ruptura. En el caso de las zonas tipo área, estos planos serán definidos de acuerdo a las ramas del árbol lógico determinadas en el apartado anterior, realizando tres cálculos independientes por cada rama que posteriormente serán ponderados. Para el caso de las fallas no será necesario incluir dicha inclinación, ya que la propia geometría de la fuente define el buzamiento de la falla.

#### *Modelización de los parámetros de sismicidad*

En este estudio, para las zonas que no tienen fallas en su interior, se utilizará la modelización dada por defecto por el programa para el caso de una zona sismogénica con un modelo de recurrencia de GR modificado. Esta modelización permite incorporar la incertidumbre del parámetro  $\beta$  asociado al ajuste de sismicidad y la correspondiente a la magnitud máxima. Este modelo, establece por defecto 9 rangos de magnitud para la integración entre la magnitud mínima y la máxima de la zona.

En el caso de las fuentes incorporadas con la metodología híbrida de zonas y fallas, se usará el modelo poissoniano genérico, que permite introducir los parámetros de sismicidad de la fuente a partir de las tasas simples de sismicidad en función de la magnitud, estableciendo los rangos de magnitud que se deseen. Estos modelos de fuente se incorporarán considerando intervalos de magnitud de 0.1 grados. De este modo, se puede introducir el modelo de recurrencia GR modificado tal y como se ha obtenido a partir de la tasa de momento sísmico, evitando así posibles variaciones en las tasas de momento sísmico en las fuentes de cálculo finales.

#### *Modelización del movimiento fuerte*

El programa CRISIS2012 v5.0 permite incorporar los modelos de predicción de movimiento fuerte a partir de la programación de dichos modelos con Visual Basic, lo que facilita a su vez la incorporación de modelos con muchas variables de cálculo, como es el caso que nos ocupa. Para programar el modelo o GMPE se establece diferencia entre las variables que fija el usuario y las variables que el programa calcula de forma interna para cada combinación fuente-emplazamiento.

Las variables internas que utiliza el programa son las referentes a la geometría de la fuente (profundidad hipocentral  $Zhyp$ , menor profundidad del plano de ruptura  $Ztor$ , magnitud  $Mw$  y ángulo de buzamiento  $dip$ ) y la distancia fuente-emplazamiento (mínima distancia al plano de ruptura  $Rrup$ , mínima distancia a la proyección del plano de ruptura en superficie  $Rjb$  y mínima distancia a la proyección en superficie de la traza más superficial del plano de ruptura  $Rx$ ).

Las variables que han sido definidas para que las incluya el usuario en cada cálculo son las referentes a: el mecanismo focal (desgarre, inverso y normal), la regionalización de la atenuación anelástica para distancias mayores a 80km, la posibilidad de considerar el efecto *hanging-wall*, el valor de la velocidad  $V_{s30}$  y la profundidad  $Z_{2.5}$  y  $Z_{1.0}$ .

#### *Otros parámetros de cálculo fijados en el programa*

La distancia máxima de cálculo estimada en la peligrosidad ha sido fijada en 300 km, por ajustarse a las especificaciones de los modelos de movimiento fuerte empleados y ser suficiente para incluir todos los sismos potencialmente peligrosos dentro del área de influencia, atendiendo a las características de atenuación en el área de estudio.

El programa utiliza un método de triangulación para discretizar los distintos focos sísmicos dentro de las fuentes sismogénicas. Esta discretización establece la proporción mínima que se considerará en cada fuente atendiendo a la distancia fuente-emplazamiento y afectará sobre todo a las fuentes próximas a los emplazamientos de cálculo. En este caso se ha establecido una relación entre el radio del triángulo generado en la fuente y la distancia fuente-emplazamiento de 1/3 y una distancia mínima de la fuente de 1 km.

#### **1.3.4.3 INCERTIDUMBRES ASOCIADAS A LOS RESULTADOS**

El cálculo de la peligrosidad sísmica que se desarrolla lleva asociado una serie de incertidumbres que es preciso conocer, acotar y cuantificar. Teniendo en cuenta la naturaleza de las mismas, estas pueden clasificarse entre incertidumbres aleatorias y epistemológicas.

##### *Incertidumbres aleatorias*

Estas incertidumbres están asociadas a errores en la estimación de parámetros de un determinado modelo. Se refieren a la variabilidad natural de los procesos relacionados con la generación del movimiento fuerte y la fuente sísmica y pueden reducirse aumentando la cantidad y calidad de los datos existentes para estimar con mayor precisión dichos procesos.

Esta incertidumbre se puede cuantificar adecuadamente a través de una distribución de probabilidad y puede incorporarse al propio cálculo de manera analítica o bien mediante simulaciones de Montecarlo.

En lo referente a la incertidumbre de la magnitud asociada a cada terremoto, éste es un parámetro sujeto a una incertidumbre que depende, esencialmente, del nivel de detección de la red sísmica en el momento de ocurrencia del terremoto. Si bien la cuantificación precisa de esta incertidumbre es un problema largo y, en algunos casos, complejo, se puede realizar una estimación plausible y satisfactoria a partir del parámetro de tamaño del registro sísmico original, en función de su fecha de ocurrencia y su localización y de la incertidumbre asociada a las correlaciones que después se emplean para homogeneizar el catálogo.

Esta incertidumbre ha sido considerada asociando una función de distribución triangular a dicha incertidumbre a la hora de obtener la tasa de momento sísmico regional asociada a la sismicidad.

La incertidumbre aleatoria asociada a la desviación  $\sigma$  del modelo de movimiento fuerte representa la variabilidad o dispersión de los datos que se ajustan al mismo. Esta desviación se incorpora al cálculo probabilista de forma directa en la triple integral de peligrosidad por medio de la variable épsilon  $\varepsilon$ . Este parámetro determinará el número de  $\sigma$  que se consideran en la predicción del movimiento y se incluye por medio de la función densidad de probabilidad  $p(\varepsilon)$ . En este cálculo, como ya se ha mencionado, se acotará a un valor de  $\varepsilon = 3$ .

### *Incertidumbres epistemológicas*

La incertidumbre epistemológica se considera inherente a los modelos asumidos de sismicidad, zonificación, predicción del movimiento, entre otros. Está asociada a la falta de conocimiento completo sobre las leyes que rigen cada proceso y sólo podría estimarse si se conociera el modelo real. Estas incertidumbres no se pueden cuantificar por medio de una distribución y para tratarlas se recurre al formalismo del árbol lógico. Éste contiene diferentes nodos, que representan cada estado del proceso, de los que parten diferentes ramas u opciones alternativas, cada una de las cuales recibe un peso que da cuenta del grado de fiabilidad ofrecido por esa rama o alternativa.

En este caso, el árbol lógico se utilizará para implementar los dos modelos de movimiento fuerte seleccionados en la calibración como los más óptimos y las variables de cálculo que contemplan los modelos de predicción del movimiento elegidos y que no es posible determinar en las fuentes tipo área. Esta forma de abordar el problema, según Campbell y Bozorgnia (2013), se considera el enfoque más riguroso que se puede establecer a la hora de incorporar variables desconocidas en predicciones de movimiento. En el mismo trabajo se presenta una guía sobre la selección y estimación de estas variables, basada en el trabajo publicado por Kaklamanos et al. (2011) para los modelos NGA en la versión de 2008.

Siguiendo estas indicaciones y atendiendo a las necesidades de esta aplicación, para el tratamiento de las fuentes tipo área se incluirá un nodo de cálculo que permita incorporar tres ramas o alternativas a los mecanismos focales asociados al modelo (mecanismos de desgarre, inverso y normal). El buzamiento de los planos de ruptura considerados serán de  $90^\circ$  para mecanismos de desgarre y  $50^\circ$  para mecanismos inversos y normales. Los pesos asignados a cada rama serán los mismos.

En los casos de las fuentes tipo falla este nodo (de mecanismos) no será necesario, ya que la geometría de dichas fuentes definen directamente el plano de ruptura y los mecanismos de las fallas son conocidos.

Finalmente se ha incorporado una rama más al árbol lógico, que contiene los resultados obtenidos en el nuevo mapa de peligrosidad sísmica de España (MPSE) (IGN-UPN, 2012). Aunque el estudio no ha sido específico para la región de Murcia, sino que se ha tratado de un estudio para todo el Territorio Nacional, se ha creído conveniente incluir las correspondientes aceleraciones máximas

con cierto peso, dado que serán las que se consideren para el diseño sismorresistente en la siguiente edición de la normativa. Conviene considerar, no obstante, que el estudio realizado en RISMUR II es un estudio más específico para la región de Murcia, que considera, como hecho diferencial, las fallas activas de la región como fuentes sísmicas y por tanto proporciona previsiblemente resultados de peligrosidad más fiables, sobre todo en el entorno de dichas fallas. Estos resultados, a su vez, representarán inputs de cálculo del riesgo sísmico más realistas en las poblaciones próximas a las fallas.

Los resultados de cálculo de la peligrosidad según esta nueva rama han sido obtenidos con dos metodologías de cálculo:

- Metodología clásica zonificada. Empleando las zonificaciones de García-Mayordomo et al, 2012b y ByA2009.
- Metodología no zonificada. Utilizando como fuente sísmica distintas superficies de densidad de probabilidad de ocurrencia de ciertos eventos en función de su magnitud.

El árbol lógico final del cálculo se muestra en la Figura 1.32 y consta de 3 nodos, que se refieren a la metodología de cálculo, los mecanismos focales (3 ramas) de las fuentes tipo zona y los modelos de movimiento fuerte (2 ramas).

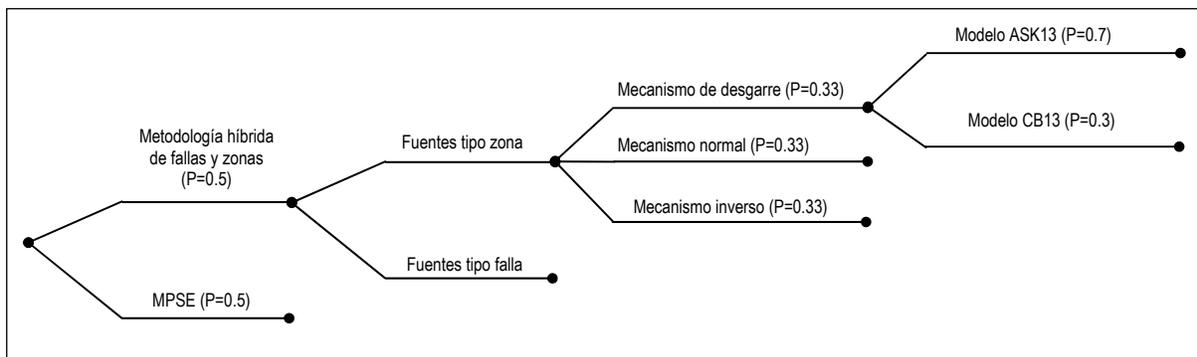


Figura 1.32. Esquema del árbol lógico que se incluirá en el cálculo.

#### 1.3.4.4 RESULTADOS DE PELIGROSIDAD SÍSMICA EN ROCA

En la Figura 1.33 se muestra el mapa final de peligrosidad sísmica obtenido en emplazamientos genéricos en roca en la región de Murcia, en términos de PGA y para un periodo de retorno de 475 años. Las aceleraciones representan valores promedio de las aceleraciones máximas en las dos componentes horizontales.

**Mapa de Peligrosidad PR 475 años. Aceleraciones en PGA (g) en roca**

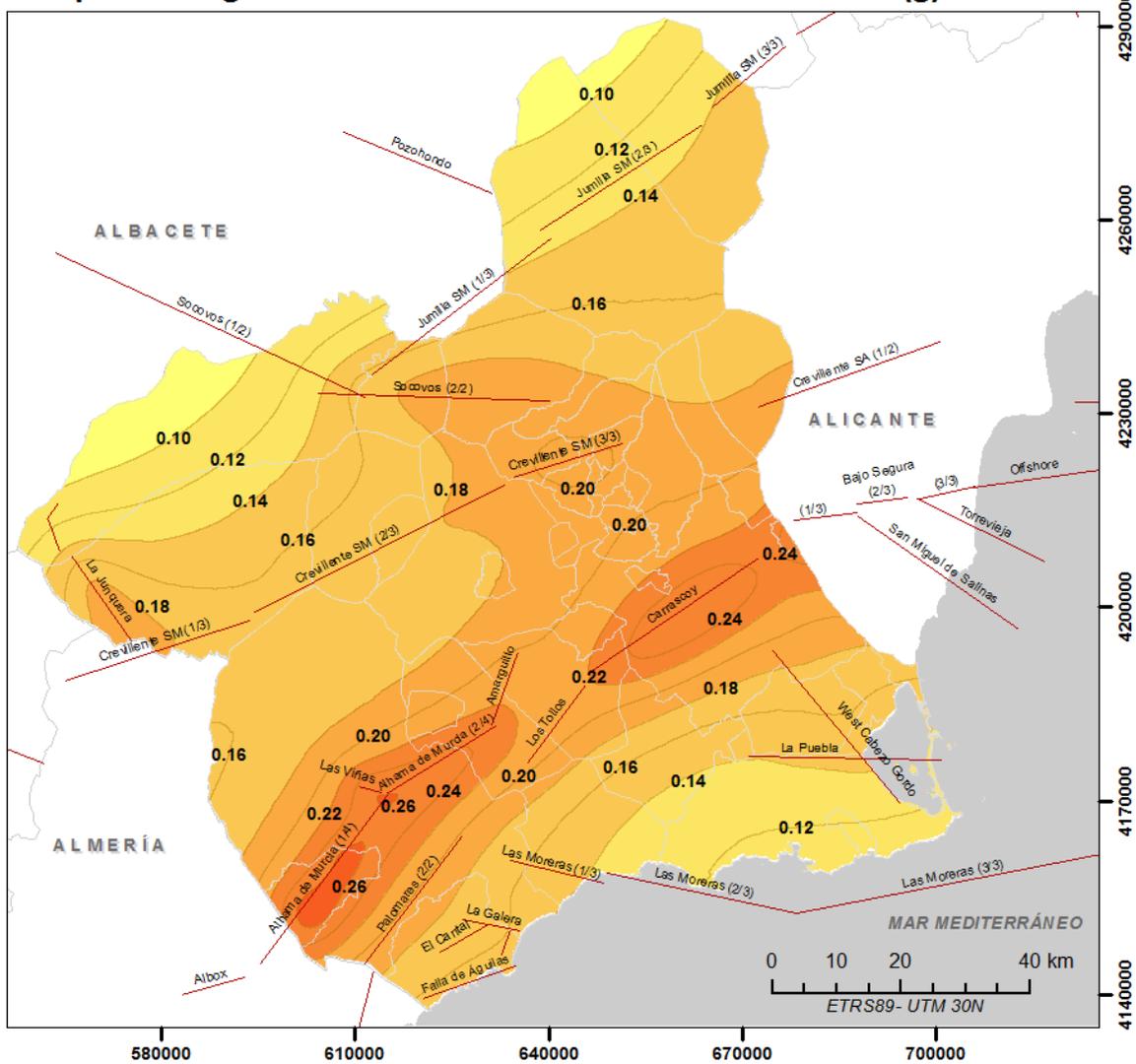


Figura 1.33. Mapa de peligrosidad sísmica en roca de la región de Murcia para periodo de retorno de 475 años. Se representan las aceleraciones máximas (PGA) promedio de las dos componentes horizontales del movimiento.

El mapa muestra aceleraciones máximas PGA en las zonas próximas a la falla de Alhama de Murcia, donde se alcanzan valores de hasta 0.26 g y en las zonas próximas a la falla de Carrascol (próxima a la ciudad de Murcia) donde se alcanzan valores de 0.24 g. Otras contribuciones menos significativas de fallas pueden observarse en el extremo oeste de la región, en la falla La Junquera-Manchego, con valores de PGA de 0.18 g y en los segmentos (2/3) y (3/3) de la falla Crevillente (sector Murcia). Las menores aceleraciones se esperan en los extremos Noroeste y Sureste de la región, con valores de 0.10 g.

**Mapa de Peligrosidad PR 475 años. Aceleraciones en SA (0.1 s) (g) en roca**

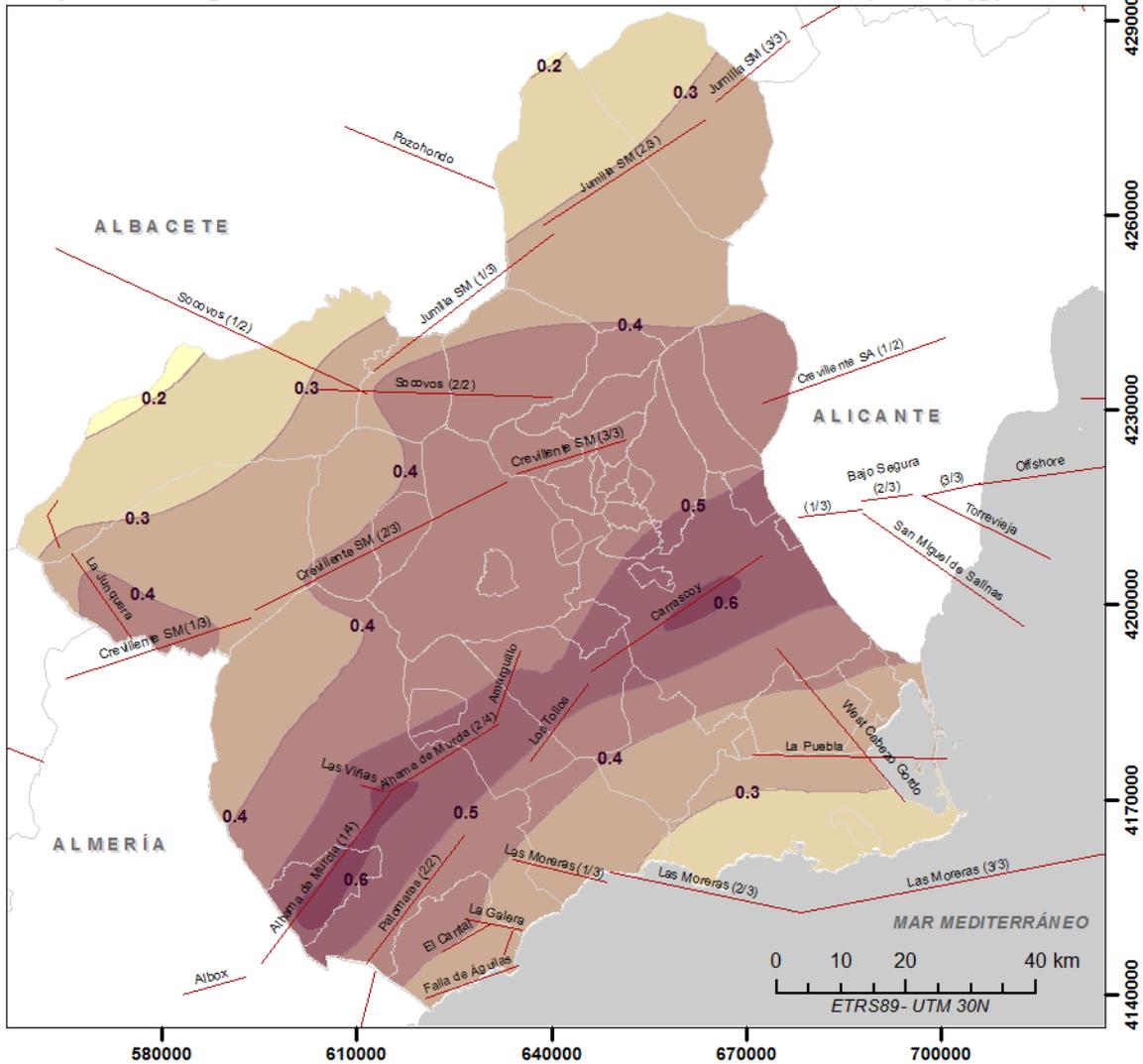


Figura 1.34. Mapa de peligrosidad sísmica en roca de la región de Murcia. SA (0.1 s) y PR=475 años.

El mapa de aceleraciones espectrales SA (0.1 s) muestra una morfología muy similar a la del mapa de PGA, concentrándose los valores máximos en las zonas próximas a la falla de Alhama de Murcia y a la falla de Carrascoy. Estas aceleraciones espectrales (que coinciden generalmente con las máximas del espectro de peligrosidad uniforme UHS) alcanzan valores de 0.6 g en ambos casos. En el resto de la región las aceleraciones son menores hasta alcanzar mínimos en el extremo Noroeste con valores de 0.2 g.

**Mapa de Peligrosidad PR 475 años. Aceleraciones en SA (0.2 s) (g) en roca**

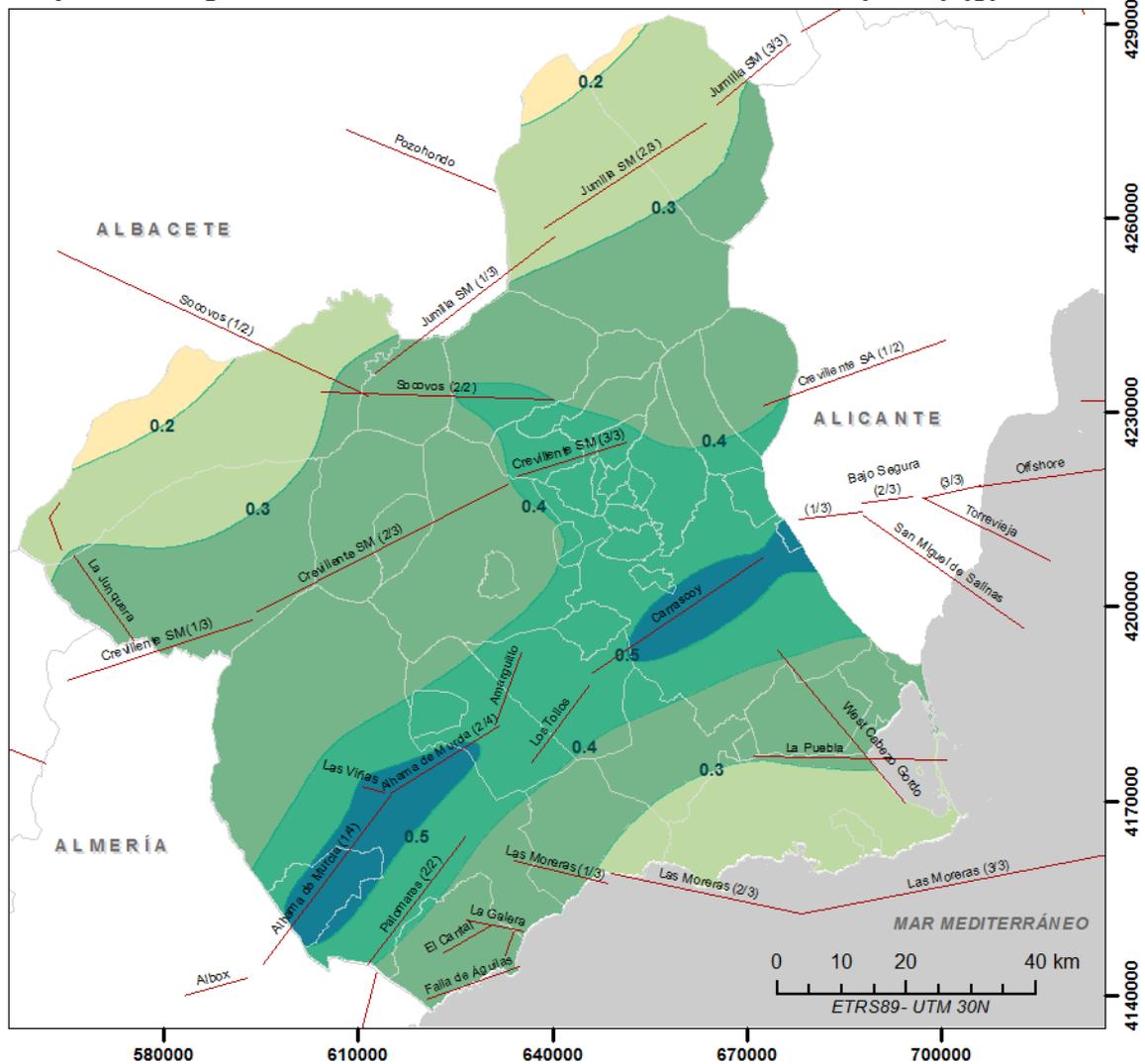


Figura 1.35. Mapa de peligrosidad sísmica en roca de la región de Murcia. SA (0.2 s) y PR=475 años.

El mapa de aceleraciones espectrales SA (0.2 s) muestra una distribución de valores máximos muy similar al de los mapas anteriores. En este caso los valores son un poco inferiores que los correspondientes a SA (0.1 s), siendo los máximos de 0.5 g en las zonas próximas a la falla de Alhama de Murcia y a la falla de Carrascoy.

**Mapa de Peligrosidad PR 475 años. Aceleraciones en SA (0.5 s) (g) en roca**

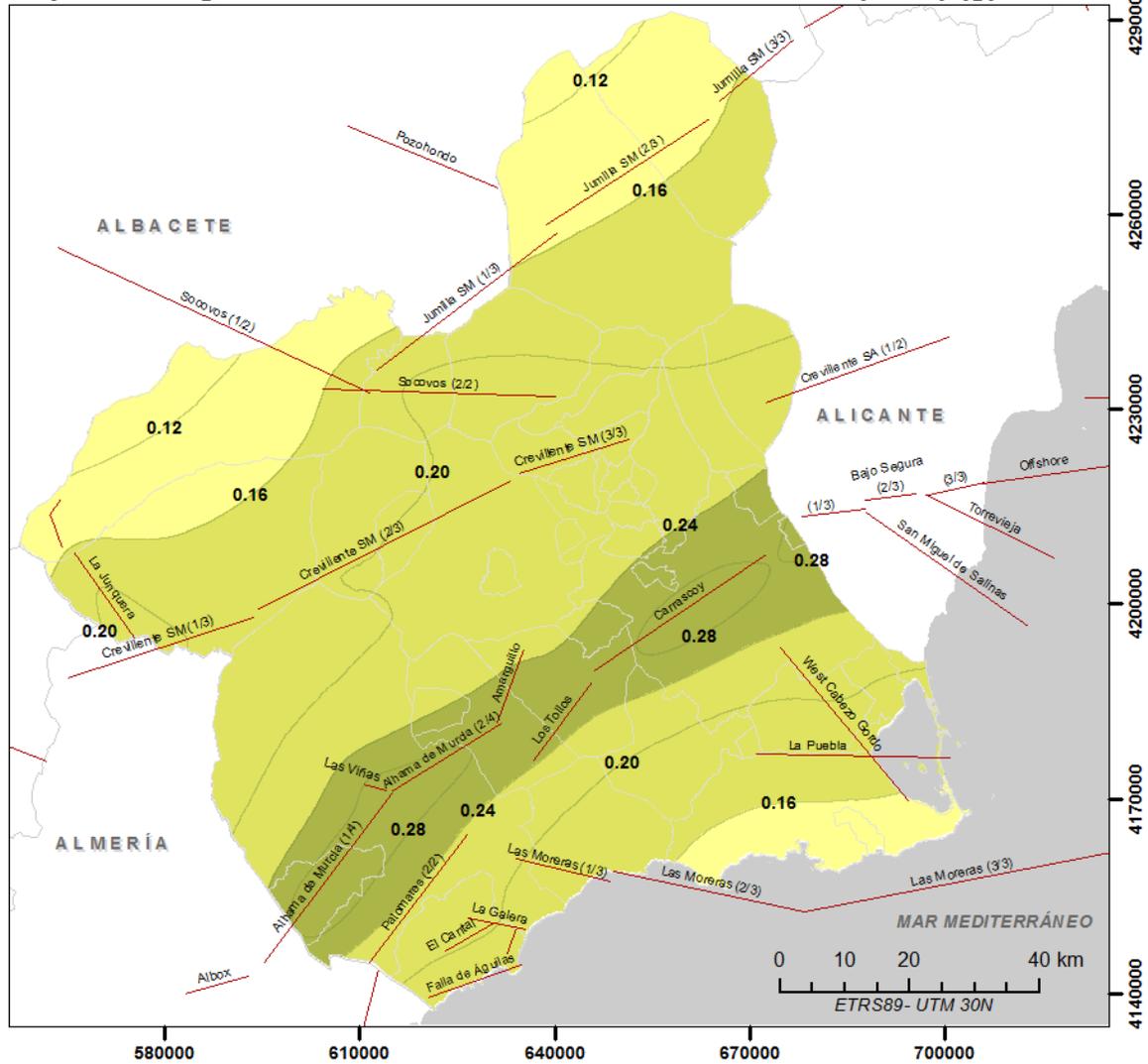


Figura 1.36. Mapa de peligrosidad sísmica en roca de la región de Murcia. SA (0.5 s) y PR=475 años.

El mapa de aceleraciones espectrales SA (0.5 s) muestra valores de aceleración muy similares a los de PGA. Una vez más, los valores máximos se encuentran en las zonas próximas a la falla de Alhama de Murcia y falla de Carrascoy donde se alcanzan valores de 0.28 g.

**Mapa de Peligrosidad PR 475 años. Aceleraciones en SA (1.0 s) (g) en roca**

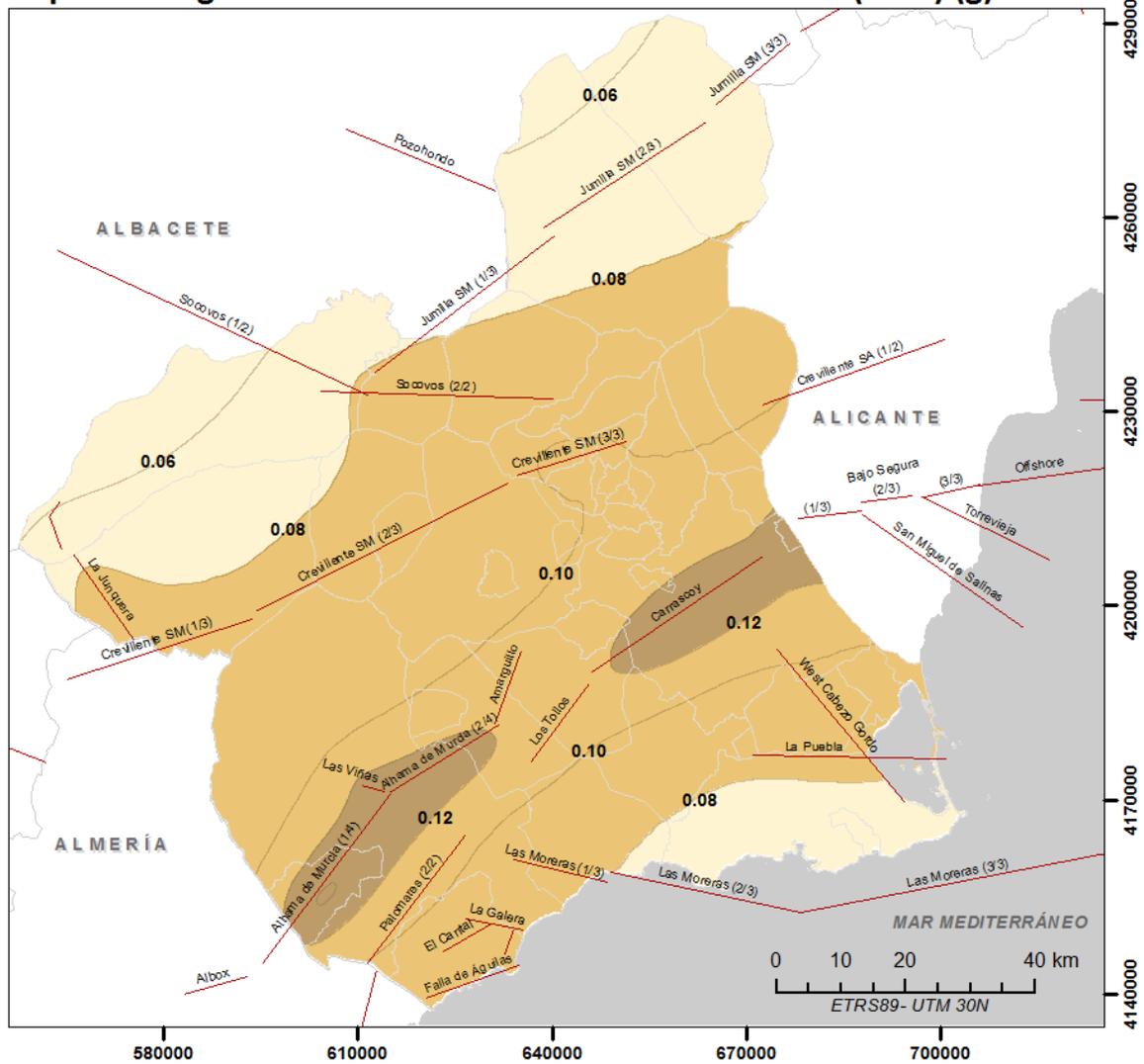


Figura 1.37. Mapa de peligrosidad sísmica en roca de la región de Murcia. SA (1.0 s) y PR=475 años.

El mapa de aceleraciones espectrales SA (1.0 s) muestra valores considerablemente menores que los mapas anteriores, algo que se explica porque las aceleraciones de T=1s corresponden ya a la parte mas baja del espectro UHS. Estas aceleraciones son las que afectan de forma más significativa a las edificaciones altas (próximas a 10 plantas) y estructuras más flexibles, con un periodo natural de vibración próximo a 1 s. En este caso las aceleraciones alcanzan valores de 0.12 g en las zonas próximas a la falla de Alhama de Murcia y a la falla de Carrascoy.

**Mapa de Peligrosidad PR 475 años. Aceleraciones en SA (2.0 s) (g) en roca**

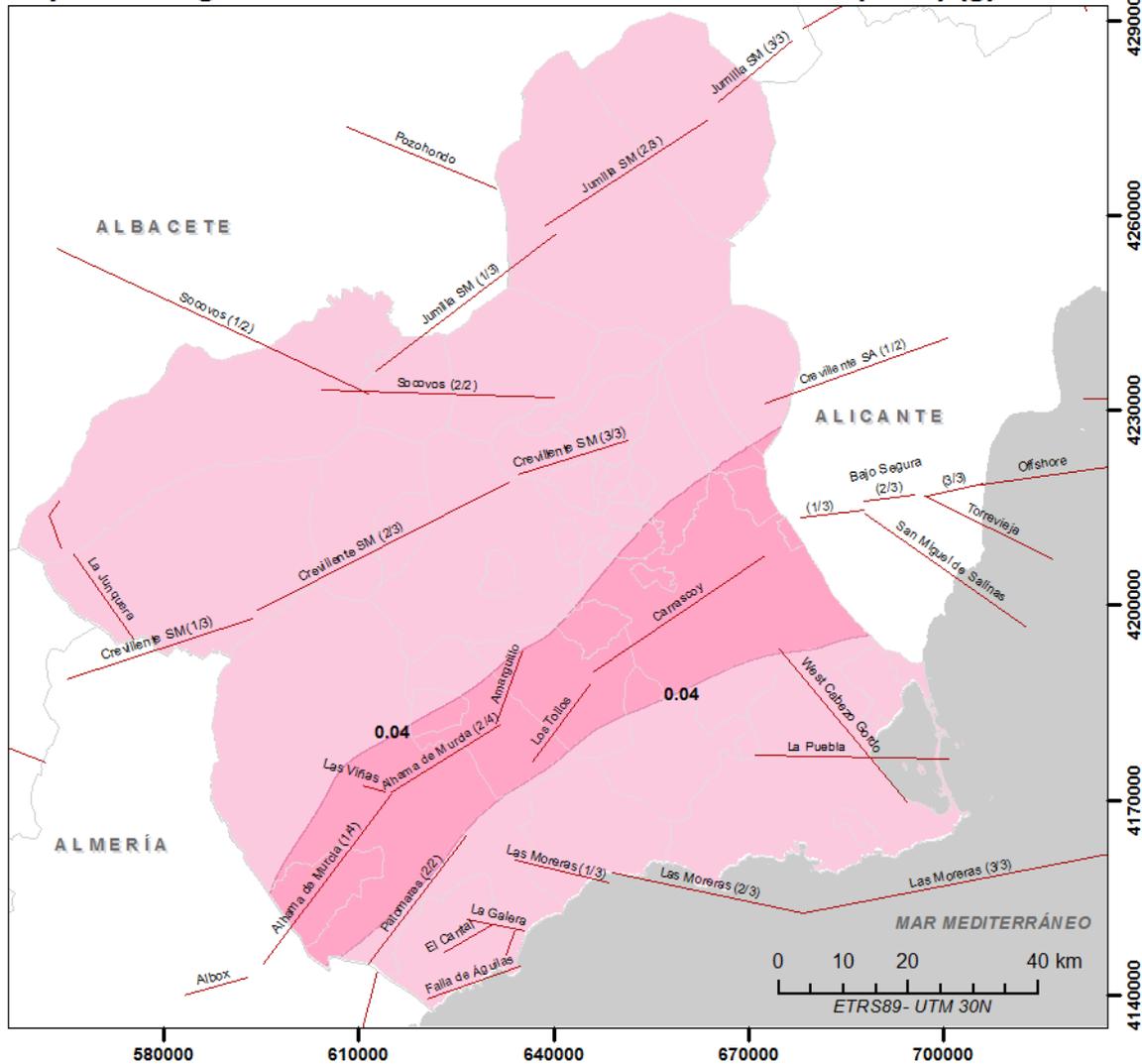


Figura 1.38. Mapa de peligrosidad sísmica en roca de la región de Murcia. SA (2.0 s) y PR=475 años.

El mapa de aceleraciones espectrales SA (2.0 s) muestra la distribución de aceleraciones para el mayor periodo estructural considerado en el estudio, que corresponde a la parte más baja del espectro UHS. Los valores máximos en este caso son de 0.04 g.

Con el fin de analizar la variabilidad de los resultados debido a la metodología de cálculo y a la definición de las fuentes sísmicas, en la Figura 1.39 se muestran la diferencias de aceleraciones que arrojan las dos ramas del primer nodo, esto es la variabilidad asociada a los resultados específicos obtenidos en este estudio con la metodología híbrida de fallas y zonas (MHFZ) y los obtenidos en el nuevo mapa de peligrosidad sísmica de España (MPSE) (IGN-UPN, 2012). En este último caso no se han incluido las fallas como unidades independientes en el cálculo de peligrosidad.

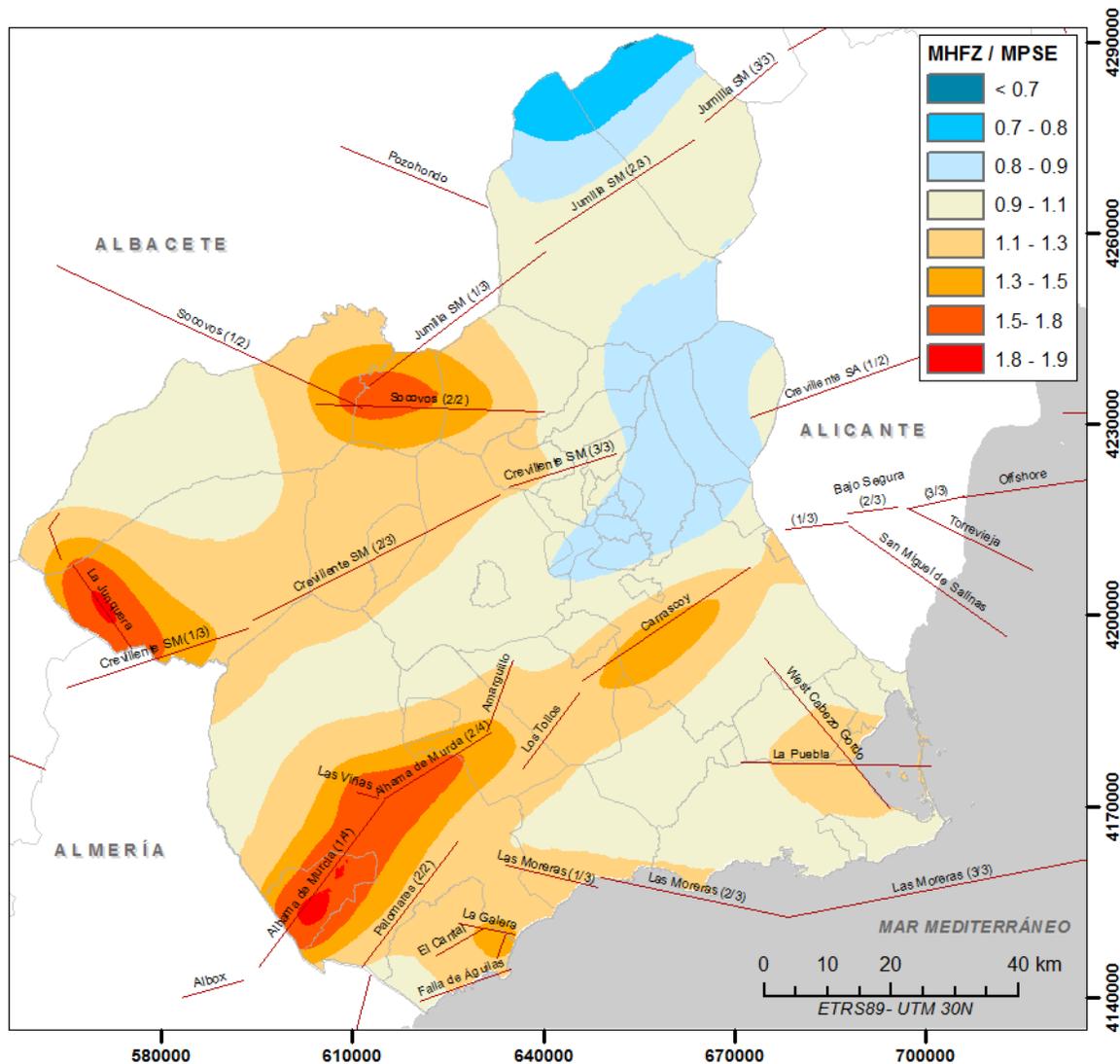


Figura 1.39. Mapa comparativo de las dos ramas del primer nodo del árbol lógico (aplicando diferentes metodologías). Se representan los cocientes entre las aceleraciones estimadas con la metodología híbrida de zonas y fallas empleada específicamente en este estudio (MHFZ) y las obtenidas para el Mapa de Peligrosidad de la norma Sismorresistente Española (MPSE) sin incluir fallas como fuentes sísmicas independientes.

El mapa comparativo entre las aceleraciones estimadas con la metodología MHFZ y el mapa MPSE muestran que las mayores diferencias entre las ramas se encuentran en zonas próximas a las fallas con mayor contribución a la peligrosidad, como es el caso de la falla de Alhama de Murcia o a fallas con contribuciones secundarias fuera de la franja central (dirección NE), como son las fallas de La Junquera-Manchega o Socovos (2/2).

## 1.3.5 ESTIMACIÓN DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA EN SUELO, INCLUYENDO EL EFECTO LOCAL

### 1.3.5.1 INTRODUCCIÓN

La respuesta del terreno y la magnitud del daño producido por un terremoto están controladas principalmente por los comportamientos geotécnicos y las características dinámicas de las formaciones superficiales. Así pues, uno de los factores que más influye en los datos sísmicos registrados en un sitio es el denominado *efecto local*, que consiste en la amplificación o atenuación del movimiento del suelo en función de la estructura geológica local y la topografía donde se asienta el emplazamiento. En muchos casos, el efecto local resulta dominante sobre los efectos de la fuente y la propagación de ondas, y por tanto, su inclusión en la estimación del movimiento del suelo esperado tiene una importancia primordial.

De este modo, la presencia de terrenos blandos de gran potencia, produce un aumento considerable de los daños generados por terremotos en las estructuras situadas sobre ellos al condicionar la amplificación de las ondas sísmicas. Son muchos los ejemplos de terremotos donde la geología superficial ha influido de manera notable en el nivel de la sacudida sísmica, produciendo daños importantes en las estructuras de áreas urbanas (Youd y Perkins (1978), Seed et al. (1985)).

La cuantificación de este efecto local es muy compleja, ya que en él intervienen multitud de aspectos. En estudios a escala regional como el presente estudio, se tiende a emplear clasificaciones geológicas más o menos simples, englobando los distintos tipos de suelos de la región. Para cada clase se adopta un factor de amplificación promedio, que se aplica sobre el movimiento estimado en roca o suelo duro, resultando así el movimiento incluyendo la contribución de la geología en cada emplazamiento. Este es el tratamiento que se sigue en este proyecto, para lo que se ha partido del cuidadoso estudio de caracterización geotécnica de los materiales que se realizó en el trabajo de RISMUR I, donde se propuso una clasificación de suelos particular para la Región de Murcia. Con esta clasificación de suelos se han asignado factores de amplificación, en este caso los propuestos en las especificaciones del NEHRP 2009. En los siguientes apartados se destacan los aspectos más importantes que se han tenido en cuenta para la estimación final de la peligrosidad sísmica incluyendo el efecto local.

### 1.3.5.2 CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA

El mapa de clasificación geotécnica constituye un documento fundamental para la estimación de los efectos locales que producen diferentes tipos de suelos (especialmente los suelos blandos) en el movimiento registrado en superficie, y que tienen incidencia directa en los daños sobre las estructuras. Dicho mapa suministra una información general del comportamiento sísmico de los

materiales geológicos en función de sus propiedades geotécnicas, estimadas teniendo en cuenta la edad, génesis y origen de estos materiales. La información sobre la respuesta sísmica de distintas formaciones geológicas se puede utilizar para definir factores promedio de amplificación sobre distintas clases de materiales en estudios a escala regional (menores de 1:100.000). A su vez, esos factores de amplificación se establecen mediante relaciones empíricas entre la geología superficial y la velocidad de ondas de cizalla. (Seed, 1997, Chyi-Tyi *et al.*, 2000, Joyner y Fumal, 1985, NEHRP, 1997, 2003, 2009). Esta será la aproximación que se seguirá en este estudio, acorde a la escala de trabajo.

Cabe destacar que la región de Murcia presenta una geología muy compleja, encontrándose un comportamiento geotéctonico muy diferente entre los distintos materiales que la componen, lo que hace que tenga especial importancia la aplicación e introducción de amplificaciones para estimar el movimiento de forma realista.

En este caso se ha partido de la clasificación geotécnica que se realizó para el anterior estudio de RISMUR I. Esta clasificación de los materiales está basada fundamentalmente en criterios geológicos y zonación geotécnica. Para la realización de dicha clasificación se utilizó toda la información geológica disponible hasta el momento de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, incluyendo: mapas geológicos a distintas escalas, mapas geotécnicos, y mapa de suelos, publicados todos ellos conjuntamente por el IGME y la Consejería competente en materia de Ordenación del Territorio de la Región de Murcia, así como otras publicaciones y datos procedentes de diferentes sondeos. Con todo ello se delimitaron los tipos de materiales presentes en el área de estudio y se efectuaron las correspondientes clasificaciones atendiendo a su respuesta sísmica, asignando un rango de velocidades Vs30 para cada clase. El mapa final con la clasificación geotécnica para toda la Región de Murcia se muestra en la Figura 1.40.

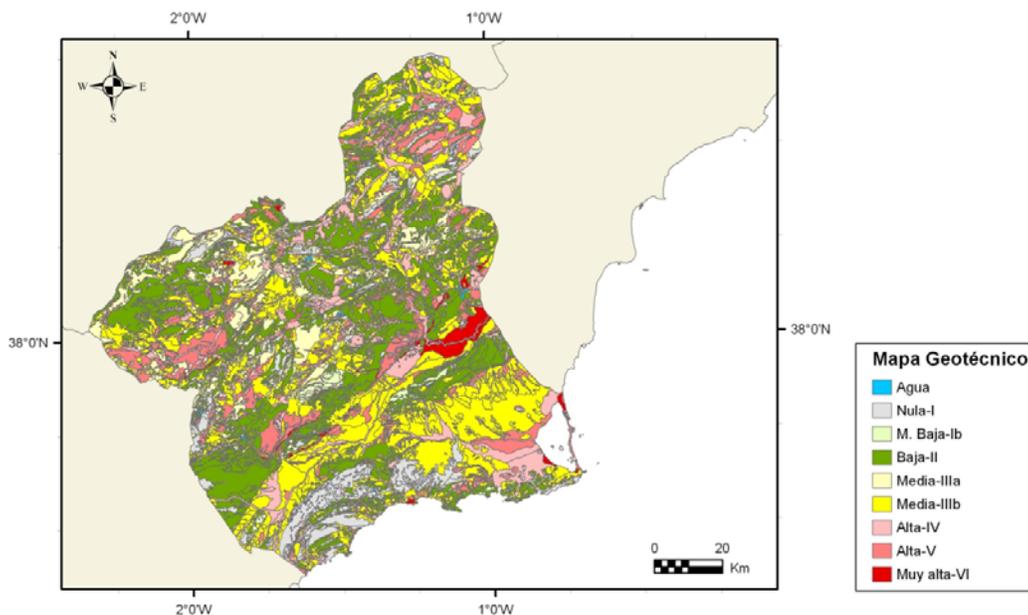


Figura 1.40. Mapa geotécnico de la región de Murcia. (RISMUR I)

En la Tabla 1.19 se muestra la descripción de la clasificación geotécnica resultante y que se ha utilizado para clasificar el suelo de la zona de trabajo y su correspondencia con la clasificación FEMA (NEHRP, 2003) ≈ FEMA (NEHRP, 2009).

Tabla 1.19 Tabla comparativa de la clasificación geotécnica realizada en el Proyecto RISMUR (Volumen 2) y la del FEMA (NEHRP-2003) = FEMA (NEHRP, 2009).

CLASIFICACIÓN RISMUR	DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA	DESCRIPCIÓN GEOTÉCNICA	VALOR APROXIMADO $V_s$ (m/s)	CLASIFICACIÓN FEMA (NEHRP-2003)
<b>I NULA</b>	Rocas ígneas, basalto, andesita y diabasa, etc. Rocas metamórficas; cuarcitas Rocas sedimentarias, dolomía, Paleozoico y Jurásico.	Rocas muy duras y poco fracturadas	>1500	<b>A</b>
<b>IIa MUY BAJA</b>	Rocas sedimentarias y cobertura Intercalación dolomitas y calizas, filitas y areniscas. Jurásico.	Roca dura y fracturada. Intercalación de rocas muy duras y duras	1500-800	<b>B</b>
<b>IIb BAJA</b>	Rocas sedimentarias, calizas margosas, calizas eolíticas y calizas calcáreas, Cretácico y Terciario.	Roca dura-media muy fracturada e intercaladas	750-450	<b>C</b>
<b>IIIa MEDIA</b>	Rocas sedimentarias, calizas margosas, calizas eolíticas y calizas calcáreas, Cretácico y Terciario.	Roca de resistencia media muy fracturada y con abundantes intercalaciones de rocas más blandas (margas y arcillas)	450-350	<b>C</b>
<b>IIIb MEDIA</b>	Rocas fundamentalmente triásicas del Keuper. Arcillas abigarradas y yeso y sedimentos terciario. Areniscas turbidíticas y arcillas verdes oscuras, Conglomerados y areniscas.	Roca blanda con arcillas expansivas Suelos no cohesivos poco cementados	350-250	<b>D</b>
<b>IV ALTA</b>	Sedimentos cuaternarios de origen fluvial y coluviales, pie de monte, etc.	Suelos no cohesivos inestables, gravas y arenas, cantos y costras	250-180	<b>D</b>
<b>V ALTA</b>	Sedimentos cuaternarios de origen fluvial y coluvial, dunas sedimentos eólicos. Depósitos expansivos de margas diatomíticas.	Suelos cohesivos blandos, Arcillas, Limos y Arenas, y No Cohesivos Poco Compactos Arenas, Arenas y Conchas	180-150	<b>E</b>
<b>VI MUY ALTA</b>	Depósitos de playa y cauces del río, marismas, fangos, limos y limos arcillas.	Suelos muy blandos	< 150	<b>F</b>

### 1.3.5.3 FACTORES DE AMPLIFICACIÓN

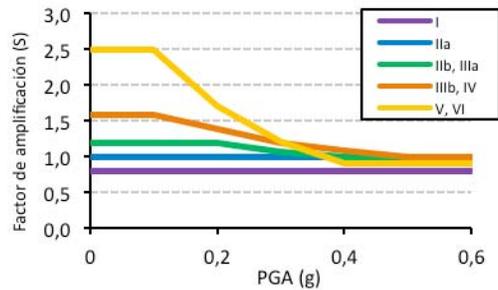
Una vez clasificados los materiales se debe estimar su grado de amplificación relativa al movimiento sísmico. Dicha amplificación depende de la velocidad de ondas de cizalla ( $V_s$ ), siendo en general mayor cuanto menor sea ésta. De este modo, los materiales más blandos, de velocidades  $V_s$  más pequeñas, tienden a producir mayores amplificaciones.

En este estudio se ha decidido aplicar los factores de amplificación adoptados por las especificaciones del NEHRP, 2009 sobre las diferentes ordenadas espectrales. El NEHRP, 2009 cuantifica dichos factores de amplificación para PGA, así como para largos y cortos periodos del movimiento para cada tipo de suelo definido. Estos factores son mostrados en la Tabla 1.20. Como se puede ver, el factor de amplificación para cada tipo de suelo (tanto para cortos como para largos periodos) depende del valor de aceleración de entrada (sin aplicar el efecto local), contemplando así el hecho de que la amplificación del suelo no es lineal. Dicha amplificación es proporcionalmente mayor para movimientos débiles que para movimientos fuertes. Para aquellos valores de aceleración intermedios, se propone una interpolación lineal para la obtención del factor de amplificación.

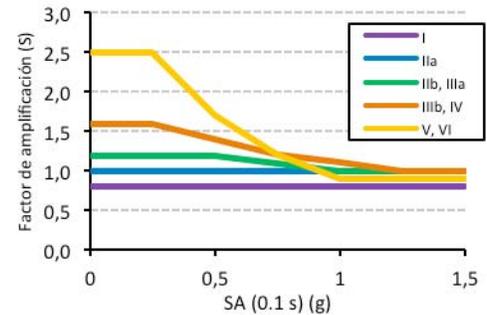
Junto a cada tabla que muestra los valores del factor de amplificación para el correspondiente parámetro del movimiento (PGA, aceleración espectral de corto periodo (0.1s) y aceleración espectral de largo periodo (1s)), se incorpora un gráfico donde se representa la variación del factor de amplificación en función de la aceleración de entrada para para cada tipo de suelo.

Tabla 1.20. Factores de amplificación para diferentes tipos de suelo, periodos estructurales y valores de aceleración base.

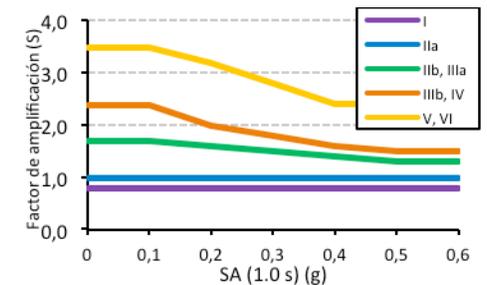
Site Class	Mapped MCE Geometric Mean Peak Ground Acceleration, PGA				
	PGA ≤ 0.1	PGA = 0.2	PGA = 0.3	PGA = 0.4	PGA ≥ 0.5
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	See Section 11.4.7				



Site Class	Spectral Response Acceleration Parameter at Short Period				
	S <sub>s</sub> ≤ 0.25	S <sub>s</sub> = 0.5	S <sub>s</sub> = 0.75	S <sub>s</sub> = 1.0	S <sub>s</sub> ≥ 1.25
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	See Section 11.4.7				



Site Class	Spectral Response Acceleration Parameter at 1-Second Period				
	S <sub>1</sub> ≤ 0.1	S <sub>1</sub> = 0.2	S <sub>1</sub> = 0.3	S <sub>1</sub> = 0.4	S <sub>1</sub> ≥ 0.5
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	See Section 11.4.7				



Para el caso de PGA y movimientos de corto periodo el factor de amplificación varía de 0.8 a 2.5, siendo este valor máximo la amplificación que ejercería el tipo de suelo más blando sobre un movimiento de entrada con una baja aceleración. Para el caso de periodos largos, los factores de amplificación oscilan entre 0.8 y 3.5. Estos factores de amplificación sobre una cierta aceleración espectral [FSA (T)] se aplicarán sobre los valores de la correspondiente aceleración obtenidos en roca [SA (T) (roca)], para obtener las aceleraciones espectrales representativas de la peligrosidad sísmica final incluyendo el efecto local [SA (T) (con efecto de sitio)]:

$$SA(T) \text{ (con efecto sitio)} = FSA(T) \times SA(T) \text{ (roca)}$$

[1.10] #

## 1.3.6 RESULTADOS

### 1.3.6.1 MAPAS DE PELIGROSIDAD INCLUYENDO EFECTO LOCAL

Una vez definidos los factores de amplificación a aplicar para cada clase geotécnica se procede a calcular la peligrosidad sísmica incluyendo el efecto local. Para ello se parte del mapa de peligrosidad en roca, así como del mapa de clasificación geotécnica para la Región de Murcia. Con ayuda del SIG, ambos mapas son combinados aplicando en cada caso los factores de amplificación presentados anteriormente.

Los mapas resultantes reflejan el movimiento esperado para periodo de retorno de 475 años considerando el tipo de suelo en cada punto del territorio, obtenidos en términos de PGA y para las ordenadas espectrales de 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 y 2.0 s.

Los mapas resultantes aplicando el efecto local tienen un aspecto similar al mapa geotécnico mostrado en la Figura 1.40, lo que es debido a la fuerte influencia de dicho efecto en la aceleración final resultante. Es de destacar las altas aceleraciones que se encuentran en todos los casos en torno a la ciudad de Lorca y en los municipios de Alcantarilla y Murcia, cerca de la falla de Carrascoy, coincidiendo con la presencia de suelos blandos y altos valores de peligrosidad en roca.

Si comparamos el mapa de PGA en roca y el mapa de PGA incluyendo el efecto local, se aprecia una subida general de los valores de aceleración, pasando de máximos de 0.26 g para roca a 0.36 g con efecto local. Esto mismo ocurre para el resto de ordenadas espectrales, llegando hasta valores máximos de aceleración de 0.90 g para el caso de SA de (0.1 s y 0.2 s) con efecto local, a valores máximos de 0.70 g para SA (0.5 s) y aceleraciones de 0.36 g y 0.20 g para el caso de SA (1.0 s y 2.0 s) respectivamente.

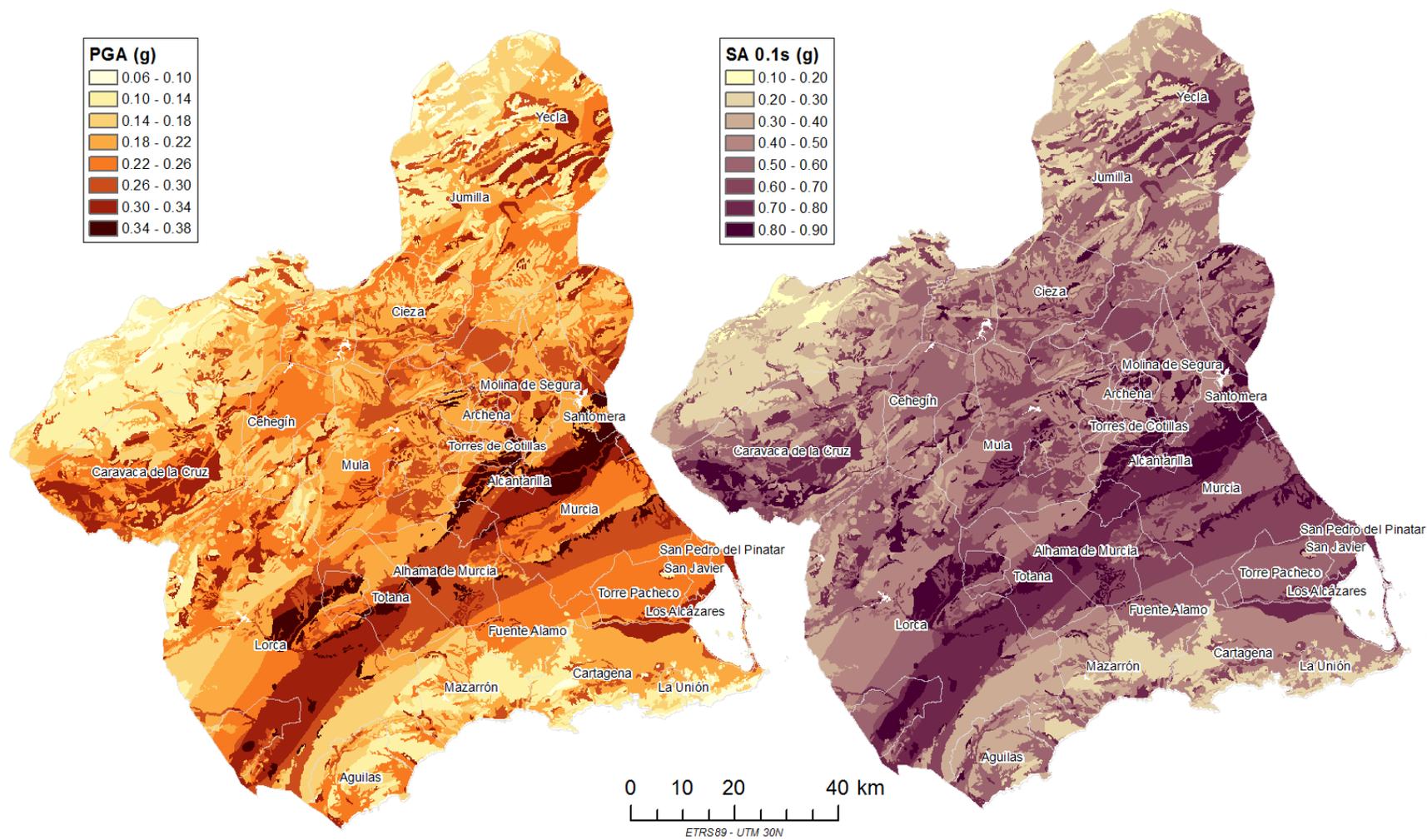


Figura 1.41. Mapa de peligrosidad sísmica en suelo (con efecto local) de la región de Murcia. PGA y SA(0.1s) para PR=475 años.

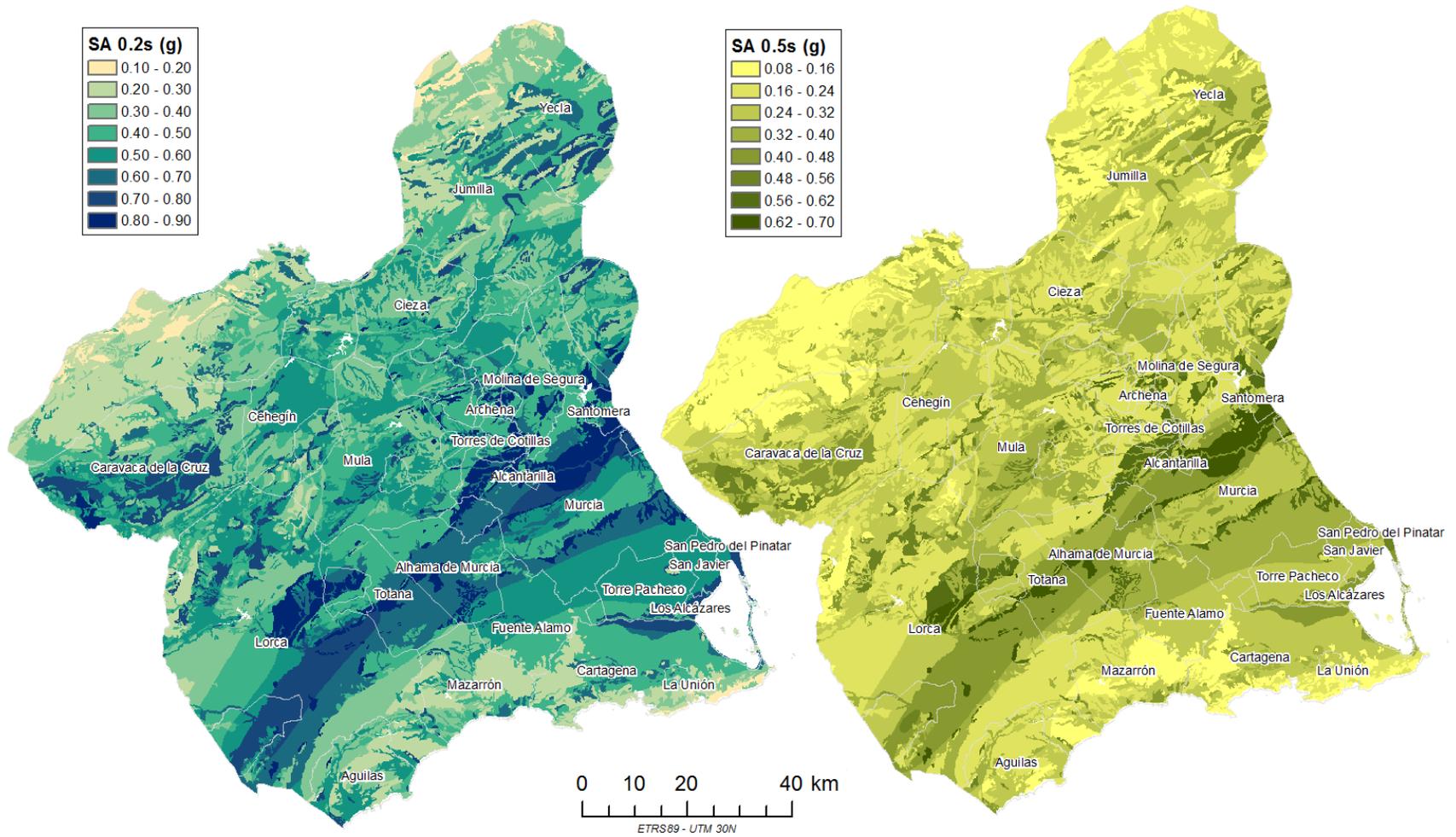


Figura 1.42. Mapa de peligrosidad sísmica en suelo (con efecto local) de la región de Murcia. SA(0.2s) y SA(0.5 s) para PR=475 años.

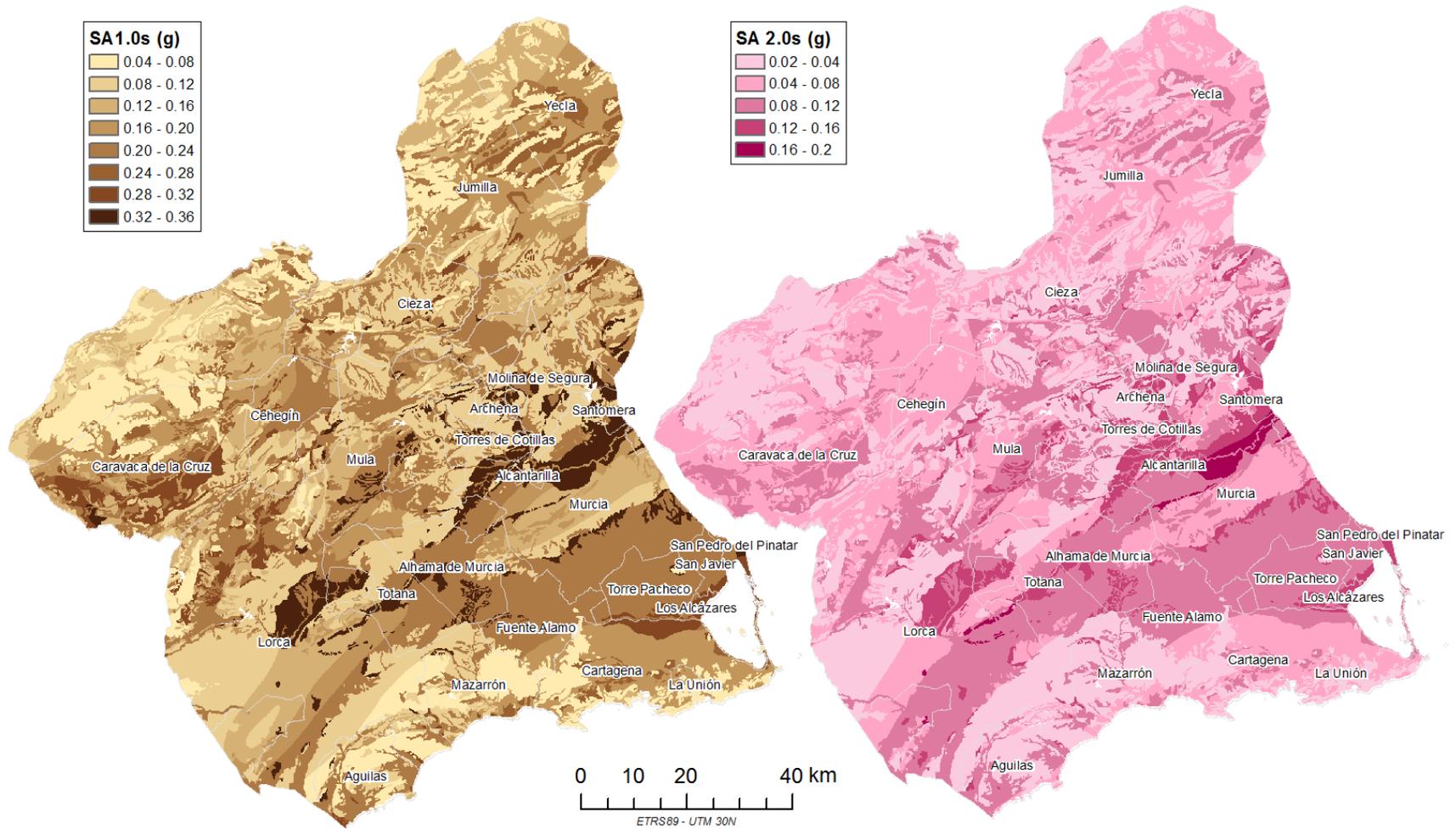


Figura 1.43. Mapa de peligrosidad sísmica en suelo (con efecto local) de la región de Murcia. SA(1s) y SA(2s) para PR=475 años.

### *1.3.6.2 ESPECTROS DE PELIGROSIDAD UNIFORME (UHS)*

Los espectros de peligrosidad uniforme UHS representan las aceleraciones espectrales para diferentes periodos estructurales, todas ellas con una misma probabilidad de excedencia o periodo de retorno. Se considerarán las aceleraciones espectrales correspondientes al periodo de retorno de 475 años. Concretamente se han estimado las aceleraciones para periodos T de 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 y 2.0 s, junto con la PGA , que se identifica con la aceleración espectral para T= 0.

Los espectros de peligrosidad uniforme UHS para periodo de retorno de 475 años correspondientes a diferentes núcleos de población en la región de Murcia se incluyen en la

Figura 1.44.

En la parte superior de la figura se observa que el espectro correspondiente a la ciudad de Alcantarilla supera en todo el rango espectral a los espectros de los otros núcleos de población considerados. En el caso de Cartagena, su espectro queda claramente por debajo de las demás poblaciones para los cortos periodos, quedando próximo al espectro de Murcia para SA (1.0 s).

En los espectros de los núcleos de población comparados en la parte inferior de la

Figura 1.44, se aprecia que los espectros de peligrosidad uniforme de las ciudades de Mazarrón, Aguilas y Yecla son prácticamente coincidentes y quedan claramente por debajo de los espectros de las demás ciudades representadas. Esto es debido fundamentalmente al tipo de suelo considerado. El espectro en Totana es en este caso el espectro que queda por encima de los demás hasta periodos de 1.0s.

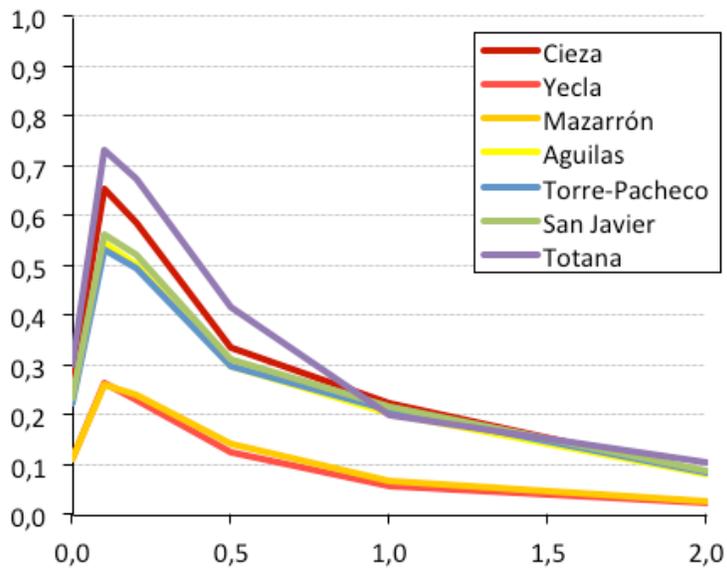
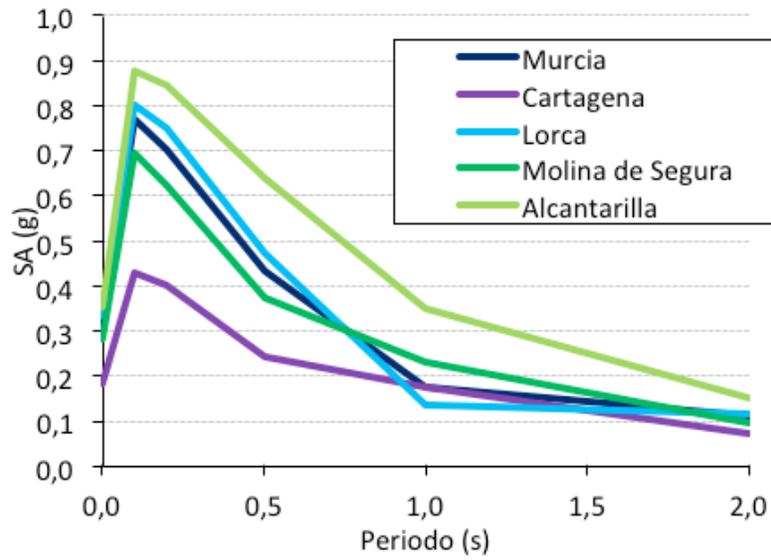


Figura 1.44. Espectros de peligrosidad uniforme UHS de algunas ciudades de la región de Murcia (más de 30.000 hab.)

## 2 RIESGO SÍSMICO



## 2.1 INTRODUCCIÓN

---

Para diseñar de forma efectiva planes de emergencia y definir medidas correctoras que ayuden a controlar y reducir el riesgo existente, es esencial disponer de estimaciones de riesgo sísmico en las poblaciones de la región de interés, sobre las cuales realizar una correcta identificación de los edificios más vulnerables y de aquellas áreas críticas que requerirán mayor atención. Dichas estimaciones pueden ayudar a avanzar, de forma más efectiva, en la mitigación del riesgo y en la creación de planes de emergencia y, de ese modo, reducir las pérdidas que puede ocasionar un fenómeno sísmico, tanto desde el punto de vista físico, como social y económico.

El riesgo sísmico se define como la función de probabilidad de pérdidas derivadas de los daños a un elemento o conjunto de elementos (pe. una ciudad) como consecuencia de la acción de terremotos futuros (López Arroyo y Villacañas, 1999). Es, por tanto, función de las características de esta acción y de la respuesta a ella de los elementos en riesgo.

En otras palabras, quedan enmarcadas dentro del riesgo sísmico las consecuencias sociales y económicas potenciales provocadas por un terremoto, como resultado del fallo de estructuras cuya capacidad resistente pueda ser excedida por el movimiento ocasionado por el sismo. El riesgo se estima mediante la convolución entre la peligrosidad y la vulnerabilidad correspondiente a cada nivel de severidad considerado para el sismo. Las consecuencias pueden ser de tipo físico, económico, financiero, indemnización, social, humano, etc.

Los parámetros de riesgo que se estimarán en este estudio serán:

- Estimaciones de diferentes tipos de daño en edificios.
- Estimación de viviendas inhabitables y personas que quedarían sin hogar
- Estimación de pérdidas humanas (víctimas mortales y heridos de diversa consideración) para dos periodos del año, con el fin de dar cuenta del distinto nivel de ocupación de las viviendas, y por tanto, de personas afectadas por el sismo.
- Estimación de pérdidas económicas o costes de reconstrucción y de reparación de las estructuras dañadas

Estas estimaciones se harán para toda la región de Murcia y por cada entidad poblacional (638 entidades). Para ello, se empleará un método de cálculo basado en la metodología propuesta por el proyecto Risk-UE (Risk-UE, 2003; Mouroux *et al.*, 2004).

Para poder realizar estas estimaciones, es necesario construir una base de datos que contenga la mayor cantidad de información posible referente a los elementos expuestos ante los posibles eventos sísmicos futuros. Estos elementos son esencialmente los edificios que conforman el parque inmobiliario de la región y más concretamente de cada población expuesta a la ocurrencia de dichos eventos.

La Base de Datos se inicia con la fase de recopilación de información de la zona de estudio, integrada básicamente por los siguientes datos:

- Datos catastrales (valor catastral, número de edificios y viviendas, superficie construida, etc.)
- Datos administrativos (distritos, secciones censales, límites municipales)
- Datos de población y ocupación de viviendas.

Durante esta etapa inicial se definen las unidades de cálculo y de representación de los resultados, se configura la Base de Datos (BD) y se desarrolla el Sistema de información geográfica (SIG) que va a constituir la herramienta esencial de gestión de los datos y representación de los resultados.

Una vez constituida la BD con todos los edificios del parque inmobiliario, se procede a la asignación de vulnerabilidad para cada uno de estos edificios. La vulnerabilidad sísmica de una edificación se expresa por un conjunto de parámetros capaces de predecir el tipo de daño estructural, el modo de fallo y la capacidad resistente de una estructura bajo unas condiciones probables de sismo. Ésta se asigna a través del análisis de las tipologías constructivas en el sitio y de clasificaciones de vulnerabilidad descritas en las metodologías existentes para la evaluación del riesgo sísmico.

En este estudio se hará una asignación de vulnerabilidad siguiendo dos escalas y/o metodologías:

- 1) La clasificación propuesta por la Escala Macrosísmica Europea EMS-98
- 2) La metodología propuesta en el proyecto europeo de riesgo RISK-UE.

La primera clasificación fue adoptada en el proyecto RISMUR I. La asignación según la metodología de RISK-UE supone otra de las novedades que se introducen en RISMUR II.

Tras estas asignaciones se estimarán parámetros de riesgo, como daño esperado en estructuras, pérdidas humanas y pérdidas económicas. Se realizará también una doble estimación del daño utilizando el método empírico de la Escala Macrosísmica Europea EMS-98 y el método analítico del proyecto Risk-UE. Los resultados de daño obtenidos empleando ambas metodologías se combinarán en el estudio por medio de un árbol lógico, ponderando de igual manera cada una de ellas. Los resultados de daño finales obtenidos se utilizarán para el cálculo de los demás parámetros de riesgo.

La Figura 2.1 muestra un esquema con las fases que se siguen para desarrollar el estudio de riesgo sísmico en RISMUR II, desde la construcción de la base de datos de exposición y vulnerabilidad, hasta los mapas con resultados de los parámetros de riesgo estimados.

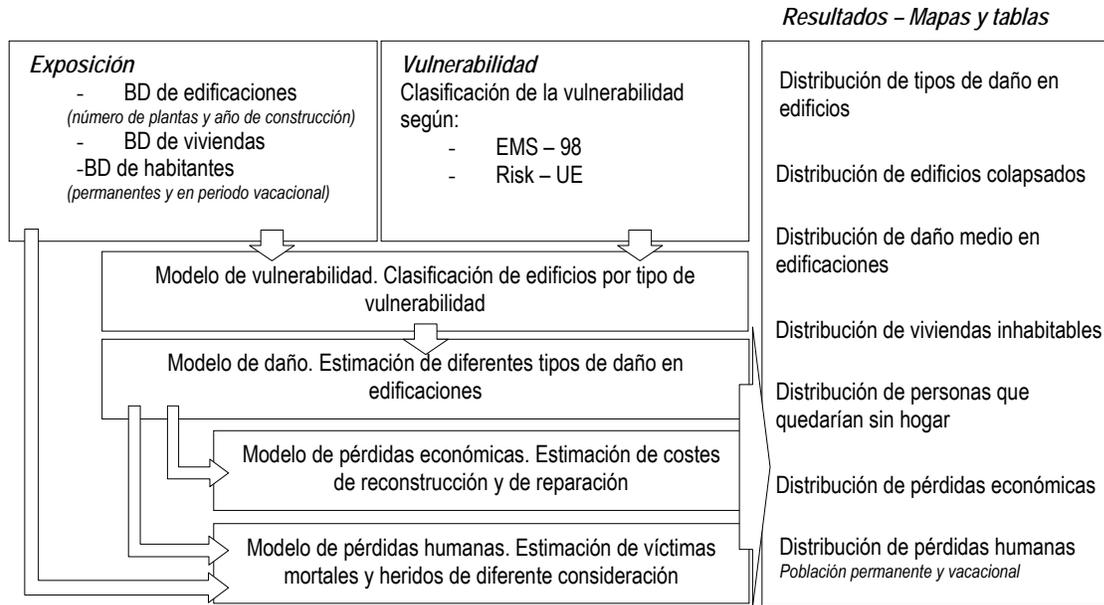


Figura 2.1. Fases a seguir en el estudio de riesgo sísmico de RIMUR II.



## 2.2 EXPOSICIÓN

---

### 2.2.1 INTRODUCCIÓN

Un estudio de riesgo sísmico requiere la construcción de una Base de Datos georreferenciada con un gran volumen de información referente a los elementos en exposición ante un evento sísmico. Éstos son fundamentalmente el parque inmobiliario, necesario para estimar la vulnerabilidad de las estructuras, y la densidad de población, necesaria para estimar las víctimas potenciales.

Concretamente, la información necesaria para generar una base de datos completa del parque inmobiliario de Murcia requiere catalogar datos referentes a la localización de los edificios y viviendas, el entorno en el que están ubicadas (rústico o urbano), la cuantificación de la superficies construidas, el año de construcción y el número de plantas de los edificios. Estos dos últimos datos son necesarios para poder asignar la vulnerabilidad de los edificios y así estimar el comportamiento que tendrían ante un cierto movimiento esperado. En el caso de la densidad de población, es necesario conocer la distribución geográfica de los habitantes de Murcia y, al tratarse de una región con una amplia zona costera, se requiere conocer también la variación de dicha población en época vacacional.

Toda esta información debe estar debidamente georreferenciada, ya que la unidad de trabajo que se utilizará será la entidad de población (Figura 2.2). Esta unidad, coincide con la tomada en el estudio RISMUR I y corresponde con una subunidad del municipio.

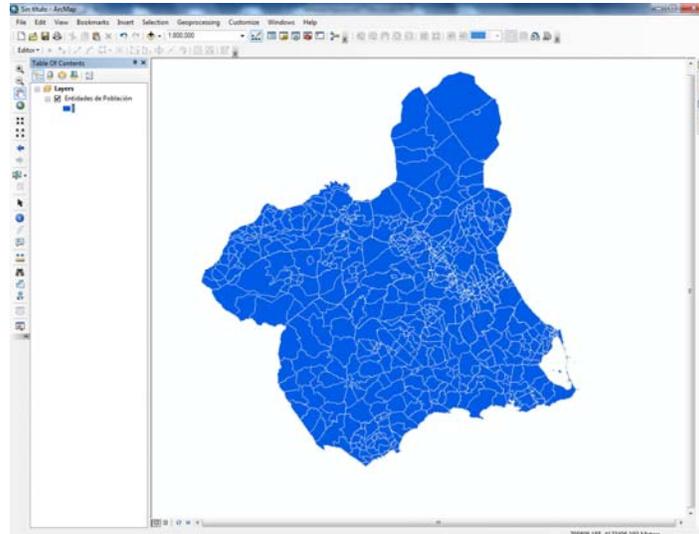


Figura 2.2. Entidades de población en la región de Murcia, que se identifican con las unidades de trabajo del estudio de riesgo sísmico.

## 2.2.2 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

Para poder ejecutar este tipo de estudios es necesario diseñar y desarrollar un Sistema de Información Geográfica (SIG), que facilita el almacenamiento, edición, análisis y representación de la información de la base de datos en un mismo sistema de referencia.

### 2.2.2.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL SIG DESARROLLADO

#### *Unidad de trabajo*

La unidad de trabajo del estudio será la entidad de población. Esta unidad, como ya se ha dicho anteriormente, es una subunidad del municipio, que permite delimitar de forma independiente núcleos de población dentro de un mismo límite municipal. En la región de Murcia hay un total de 638 unidades. En la Figura 2.3 se muestra la distribución de entidades de población entre los 45 municipios de Murcia.

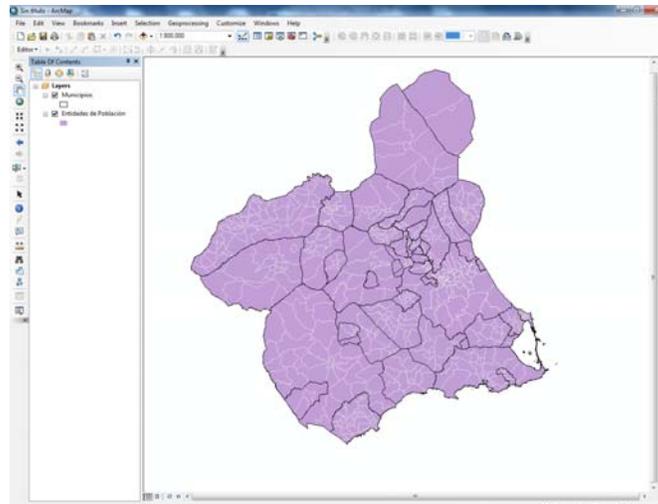


Figura 2.3. Distribución de las entidades de población entre los municipios de Murcia.

### *Marco de trabajo*

El marco de trabajo representa la extensión geográfica de la zona de estudio, en este caso comprende todo el territorio de la región de Murcia, aproximadamente 11.313 km<sup>2</sup>.

### *Sistema de referencia y proyección cartográfica*

Para la realización de este estudio, se fija como sistema de referencia el ETRS89 (Sistema de Referencia Terrestre Europeo 1989) coincidiendo con el sistema de referencia oficial de España, tal y como aparece publicado en el Boletín Oficial del Estado (BOE) el 29 de agosto de 2007.

Para la presentación final de resultados, se utilizará la proyección Transversa de Mercator (UTM) en el hemisferio Norte Huso 30.

### *Herramienta de trabajo*

El software que se utilizará para la elaboración del Sistema de Información Geográfica, será *ArcGIS v 10.1* producido y comercializado por la empresa ESRI (*Environmental Systems Research Institute*).

### *Modelo conceptual*

Para realizar el esquema conceptual, en primer lugar se analizaron todos los datos suministrados, seleccionando todos aquellos que fueran útiles para el objetivo del proyecto. Posteriormente se elaboró un esquema descriptivo con todos ellos, para facilitar la obtención del esquema conceptual; es decir, se definieron las entidades (objetos), atributos y relaciones que se iban a considerar (Figura 2.4).

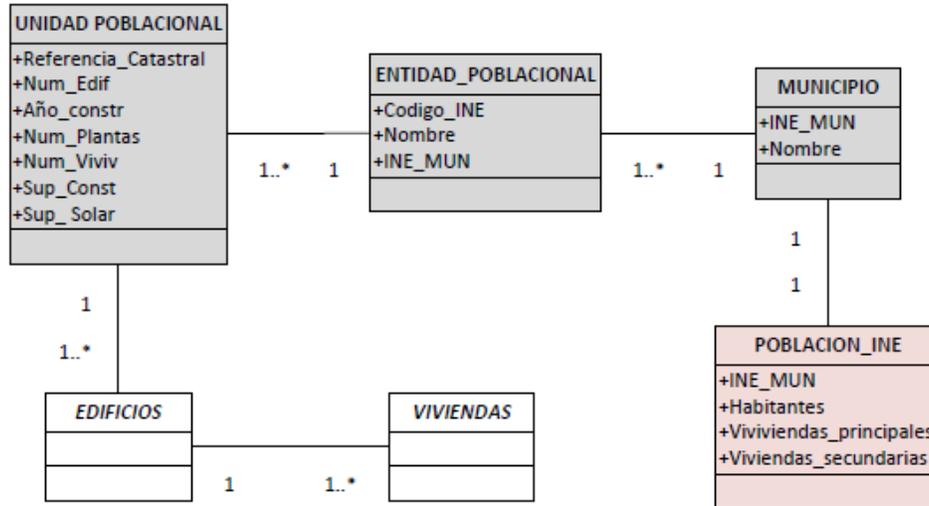


Figura 2.4. Esquema con la relación entre las clases del SIG. Diagrama de clases U.M.L., donde se especifica la relación entre las entidades finales del sistema de información geográfica.

### 2.2.2.2 RECOPIACIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS

#### Fuentes de información

##### Cartografía base

Este estudio contó con toda la información geográfica generada en el estudio RISMUR I, referente a las entidades de población y a los límites administrativos (municipales y regionales).

##### Parque Inmobiliario. Edificaciones y Viviendas

Las dos fuentes de información pública más completas sobre el parque inmobiliario de España son las disponibles en el Instituto Nacional de Estadística (INE) y en la Dirección General de Catastro (DGC). Ambas, aunque con fines diferentes, proporcionan información sobre el número de edificios y viviendas que hay en una región, así como las características necesarias para un estudio de riesgo sísmico (año de construcción, número de plantas, uso, superficie construida...).

El INE actualiza su información cada 10 años, pero la última actualización completa sobre la región de Murcia es del año 2001, no habiendo publicado aun la información referente al año 2011. Esta base de datos fue la utilizada en el estudio RISMUR I.

La DGC actualiza su información con mayor frecuencia que el INE. Por ello, para desarrollar la base de datos de edificios y viviendas en este proyecto RISMUR II se ha utilizado esta fuente de información, concretamente actualizada hasta septiembre de 2013.

No obstante, la información más general proporcionada por el INE del año 2011 también fue utilizada para calibrar la base de datos final obtenida del catastro.

### *Población*

El número de habitantes total por municipio se obtuvo a partir del Censo de Población y Viviendas de 2011, elaborado por el Instituto Nacional de Estadística (INE).

Del Centro Regional de Estadística de Murcia (CREM) se pudieron obtener los datos de densidad de población, expresados en términos de número de habitantes por km<sup>2</sup>, para cada municipio de la Comunidad Autónoma de Murcia.

### *Análisis de la información de partida*

#### *Cartografía base:*

**Entidades de población.** Capa en formato vectorial (*Shapefile* - poligonal), con 638 registros (diputaciones o pedanías de la Región de Murcia). Esta capa tiene asociados diferentes atributos que dan información sobre el código INE (submunicipal) y municipal.

**Municipios.** Capa en formato vectorial (*Shapefile* - poligonal), con 45 registros. Esta capa tiene asociados diferentes atributos que dan información sobre el código INE municipal y el nombre de dichos municipios.

#### *Parque Inmobiliario*

**Datos Alfanuméricos.** Una parte de los archivos de descarga tratados para la construcción de la base de datos del proyecto fueron alfanuméricos: CAT Tipo 15 de la Dirección General del Catastro. Éstos son los ficheros informáticos de remisión de catastro (bienes urbanos, rústicos y de características especiales) particularizados para registro de inmuebles. Existe uno por cada *bien inmueble* en cada parcela catastral. De estos archivos se rescató información útil para asignar la vulnerabilidad de las tipologías constructivas como: el año de construcción, el número de plantas, el uso o la superficie de viviendas construida. Se obtuvieron un total de 899.323 registros para edificaciones de todos los tipos, de uso tanto en el entorno urbano como en el rústico.

**Cartografía catastral.** Por medio de la Sede Electrónica del Catastro, para la implementación de la Base de Datos espacial, se ha configurado la cartografía catastral en formato vectorial (*Shapefile* - poligonal) con historia, obteniendo de este modo la geometría de las parcelas catastrales. El número total resultante de registros de parcelas es de 2.456.684, divididos según su origen en 672.258 urbanos y 1.784.426 rústicos.

### *Población*

**Datos Alfanuméricos.** Con procedencia también del INE se extrajo una tabla con el número de habitantes censado por municipio, así como el número de viviendas principales y secundarias censadas.

*Tratamiento de la base de datos*

*Parque inmobiliario*

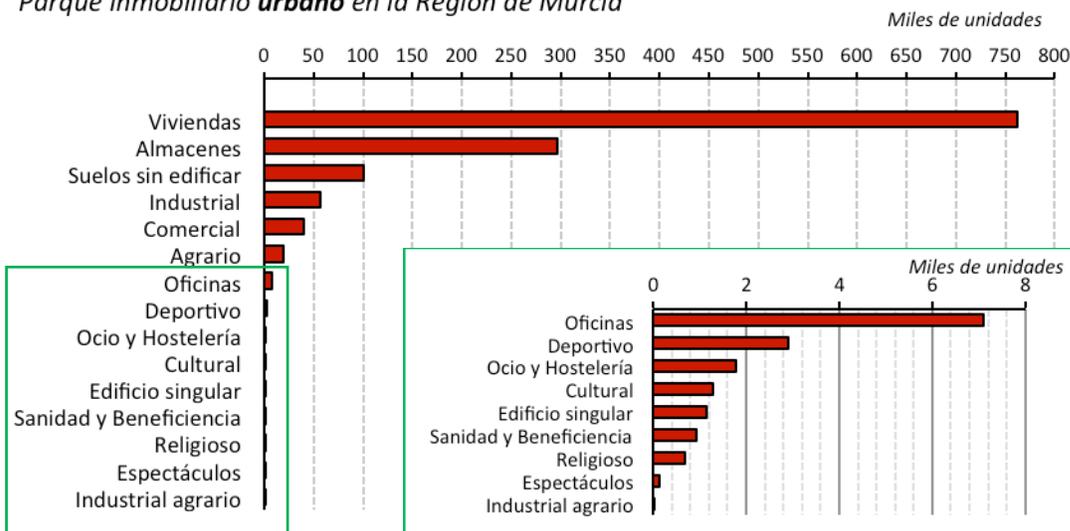
La unidad de partida del parque inmobiliario, dada la fuente de información tomada, es la referencia catastral, que tal y como lo define la DGC, “es el identificador oficial y obligatorio de los bienes inmueble. Consiste en un código alfanumérico que es asignado por el Catastro de manera que todo el inmueble debe tener una única referencia catastral que permita situarlo inequívocamente en la cartografía catastral”.

El hecho de partir de una unidad tan pequeña permite recopilar un gran número de datos necesarios para el estudio, pero también lleva asociado un volumen de información extremadamente pesado, tanto en su manejo como en su procesado.

Los datos alfanuméricos contienen toda la información necesaria para clasificar el parque inmobiliario, mientras la capa cartográfica incluye la localización de la referencia catastral. Ha sido necesario por ello el tratamiento de ambas bases de datos para disponer así de una información unificada con representación geográfica.

Según la información registrada en la Dirección de Catastro (*fuente: ficheros CAT Tipo 15*), la región de Murcia cuenta con un parque inmobiliario de 1.779.164 unidades. Estas unidades pueden agruparse, según el código catastral, en 899.323 unidades constructivas (UC). En la Figura 2.5 se muestra unas gráficas con uso de cada unidad (registrada) para entornos urbanos y rurales.

*Parque inmobiliario urbano en la Región de Murcia*



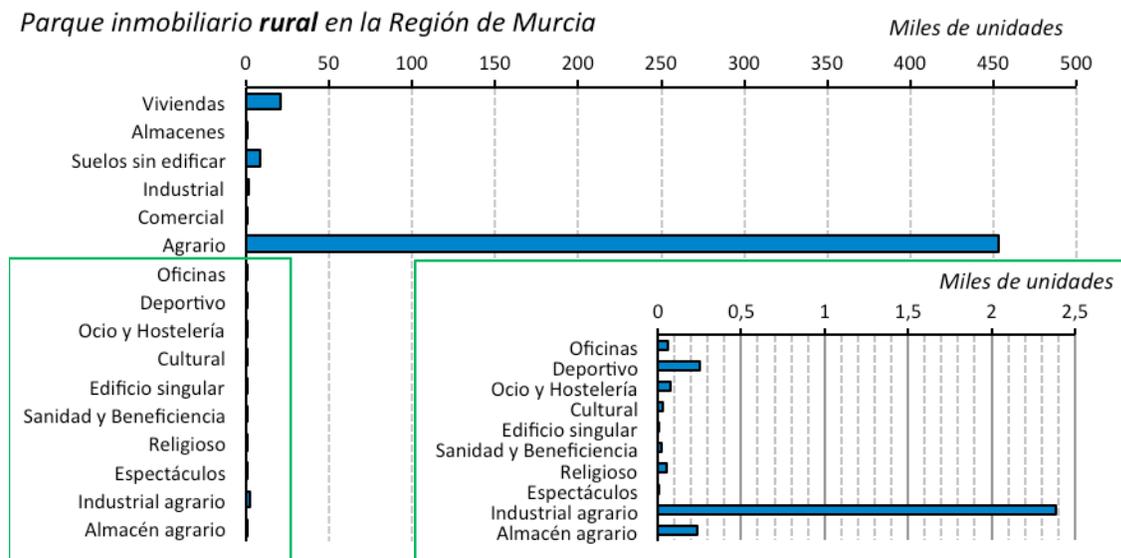


Figura 2.5. Parque inmobiliario en la Comunidad de la Región de Murcia para entorno urbano y rural

El tratamiento de la Base de Datos para la posterior asignación de vulnerabilidad ha requerido, en primer lugar, agrupar las unidades registradas en el catastro (referencias catastrales) en unidades constructivas (UC). En el caso de la cara con representación geográfica, se ha realizado una fusión de los polígonos y se ha obtenido su centroide, dando como resultado una unidad geográfica más simple.

Atendiendo al tipo de uso de las unidades constructivas (UC), se ha procedido a la selección de aquellas unidades cuyo uso es “Vivienda”. En total se obtuvieron 295.476 UC. De estas UC, se han mantenido algunos atributos importantes para la asignación de la vulnerabilidad (el entorno (urbano o rural), número de plantas, año de construcción, número de viviendas, superficie del solar, superficie total construida y el código catastral único). En total se han censado 777.917 viviendas en la región de Murcia.

En la Figura 2.6 se muestra un ejemplo de las UC (viviendas) catalogadas en un entorno rústico, diseminado y urbano.

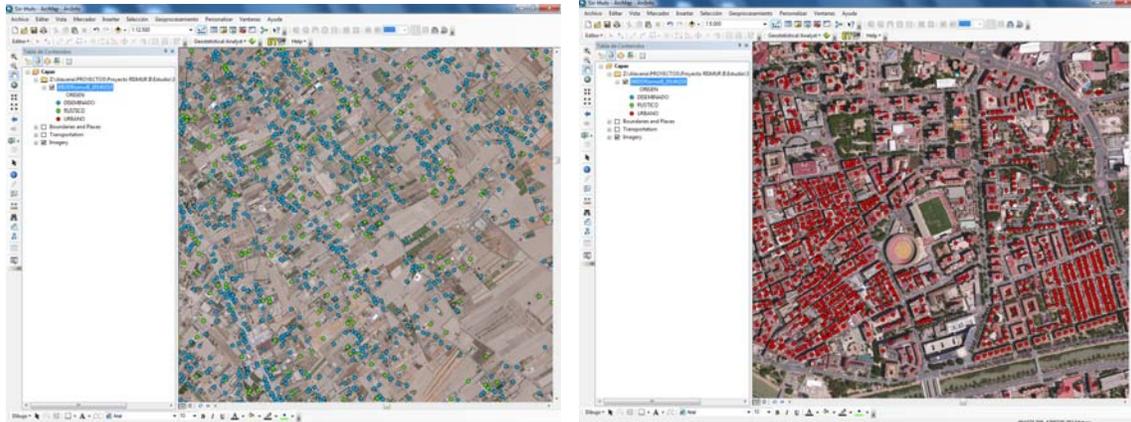


Figura 2.6. Ejemplo de una muestra de UC (vivienda) en un entorno rústico y diseminado (izda) y urbano (dcha).

### Edificios

Para obtener el número aproximado de edificios contenidos en el conjunto de unidades constructivas se establecieron diferentes indicadores de la base de datos como:

- 1) el número de años de construcción diferentes en cada unidad constructiva
- 2) la relación entre la superficie del solar y la superficie construida con el número de plantas
- 3) la relación entre el número de viviendas y el número de plantas.

Mediante relaciones estándar entre estos atributos fue posible obtener una cifra muy próxima a la aportada por otras fuentes de información, llegando a un total de 392.168 edificaciones. (389.965 edificios censados en el INE en 2011). No obstante, al aplicar las relaciones entre los distintos atributos de las unidades constructivas, se observaron ciertos errores en los datos de partida de la base de datos, en concreto se identificaron un número significativo de registros erróneos en el número de plantas de los edificios.

Los errores más comunes detectados fueron:

- Edificios con número de plantas muy superiores al de viviendas
- Edificios de gran altura con superficie construida muy inferior a los 1.000 m<sup>2</sup>
- Un gran número de edificios con 20 plantas
- 14 casos en los que el número de plantas era superior a las 33 alturas

Tras el análisis exhaustivo de estos indicios, se realizó un estudio en detalle de una muestra de 917 edificios cuyo número registrado de plantas era superior a 8 alturas. Se detectaron errores importantes en algunos de estos datos descargados del catastro. Aunque solo representan un 0.3% de la muestra poblacional final, se trata de los edificios más altos de la Región de Murcia y por tanto con incidencia significativa en el cálculo del riesgo, por lo que se han tratado de manera pormenorizada.

Para comprobar la calidad de los datos en casos donde se localizaron posibles anomalías y para poder subsanarlas, se revisaron las fuentes originales del catastro y, a través de la referencia catastral, se localizó la ubicación espacial de los registros anómalos. Esto se hizo con ayuda de imágenes satelitales gracias a la herramienta Google Earth (Figura 2.7). Posteriormente, se hizo un chequeo del número de plantas real para cada edificio estudiado (Figura 2.8) a partir de la vista Street View de la aplicación. En caso de no disponer de esta vista, se emplearon los datos del catastro para validar los datos en estos casos particulares.

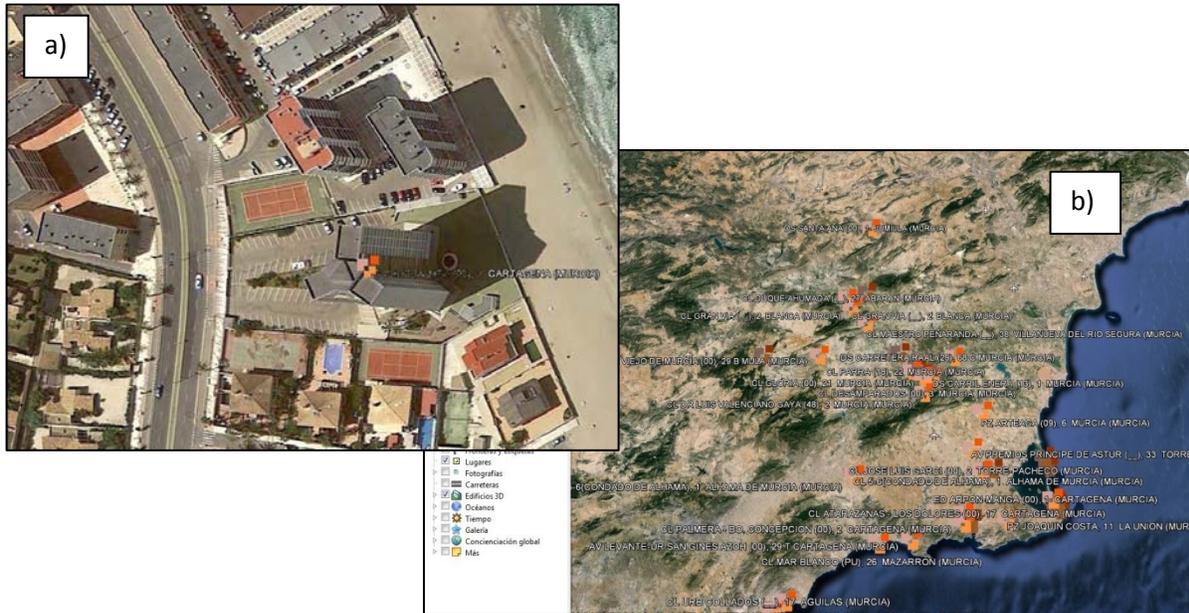


Figura 2.7: a) Vista del mosaico de ortoimágenes de la Región de Murcia y alrededores con algunas de las referencias catastrales analizadas señaladas sobre la misma con la herramienta Google Earth. b) Vista de ortofoto, con la herramienta Google Earth, que incluye una de las referencias catastrales a verificar dentro de los edificios con más de ocho alturas



Figura 2.8: Vista lateral de uno de los edificios estudiados con la herramienta Street View de Google.

### *Población*

Como ya se ha mencionado anteriormente, el número de habitantes total por municipio, se obtuvo a partir del Censo de Población y Viviendas de 2011, elaborado por el INE.

Concretamente se requiere una estimación del número de personas por vivienda en cada municipio, para poder estimar posteriormente el número de víctimas. Para ello se ha establecido el número de habitantes por vivienda en cada municipio a partir del censo del INE de 2011 y se ha realizado una extrapolación de la densidad resultante hasta 2013.

Una de las particularidades de la zona de estudio, es la diferencia de población que se produce en las poblaciones costeras en época vacacional, llegándose a duplicar la población en casos extremos de núcleos costeros.

Para establecer una proporción entre dichas densidades de población, se partió de la información proporcionada por el INE sobre viviendas principales y secundarias, y se hizo la suposición de que en época invernal solo están ocupadas las viviendas principales, mientras que en época vacacional están ocupadas las viviendas principales y las secundarias.

### 2.2.3 ANÁLISIS DE LA EXPOSICIÓN

Para el análisis de los datos, se clasificó el número de edificios por año de construcción, pudiendo así observarse en qué períodos de tiempo se concentra la mayor cantidad de edificios, lo cual permite estimar, a priori, qué tipologías constructivas serán predominantes en cada municipio, puesto que el año de construcción indica bajo qué norma constructiva fue construida la edificación, o qué tipología constructiva predominaba en la época.

La Figura 2.9 muestra el número de edificios y viviendas construidos por en la Comunidad de la Región de Murcia. En ambos casos se puede apreciar un incremento en la construcción de edificios urbanos a partir de la década de 1950. Sin embargo, en algunos municipios se observaron picos a inicios del siglo XX, como es el caso de Lorca, indicativo de que existe un importante número de edificaciones antiguas de mampostería.

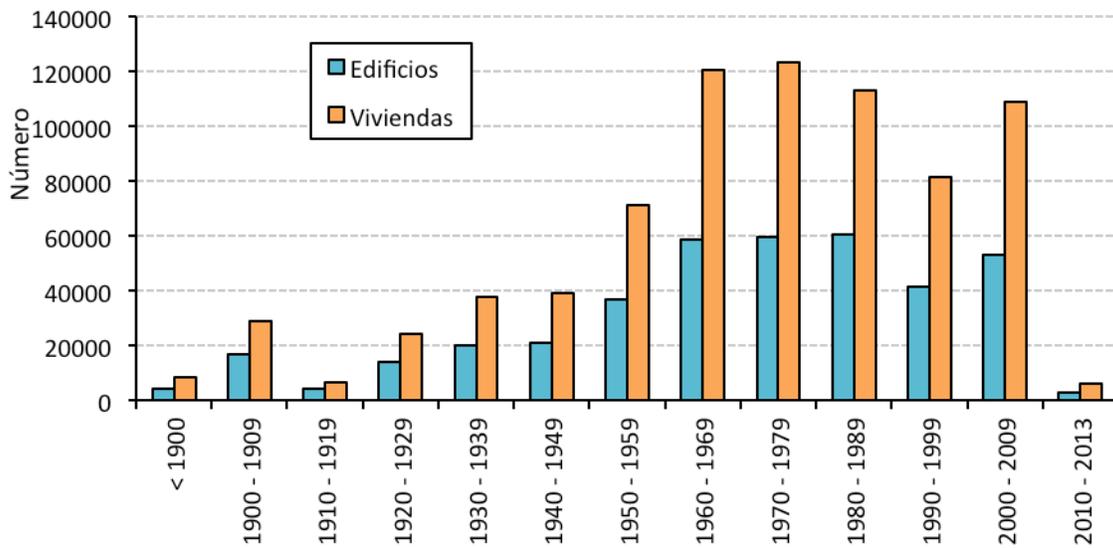


Figura 2.9. Número de edificios y viviendas catalogadas por décadas de construcción

La Figura 2.10 muestra dos mapas con la distribución del número de edificios y del número de viviendas por entidad poblacional. En el caso de los edificios se observa que las entidades con mayor número de edificios se encuentran en el municipio de Cartagena, en particular en la entidad de Rincón de San Ginés, seguido por las entidades de Alcantarilla, Lorca, Murcia y Totana. Sin embargo, aunque Rincón de San Ginés presenta un elevado número de viviendas, la mayor concentración de las mismas se encuentra en la entidad de Murcia, debido a que ésta cuenta con edificios de mayor altura.

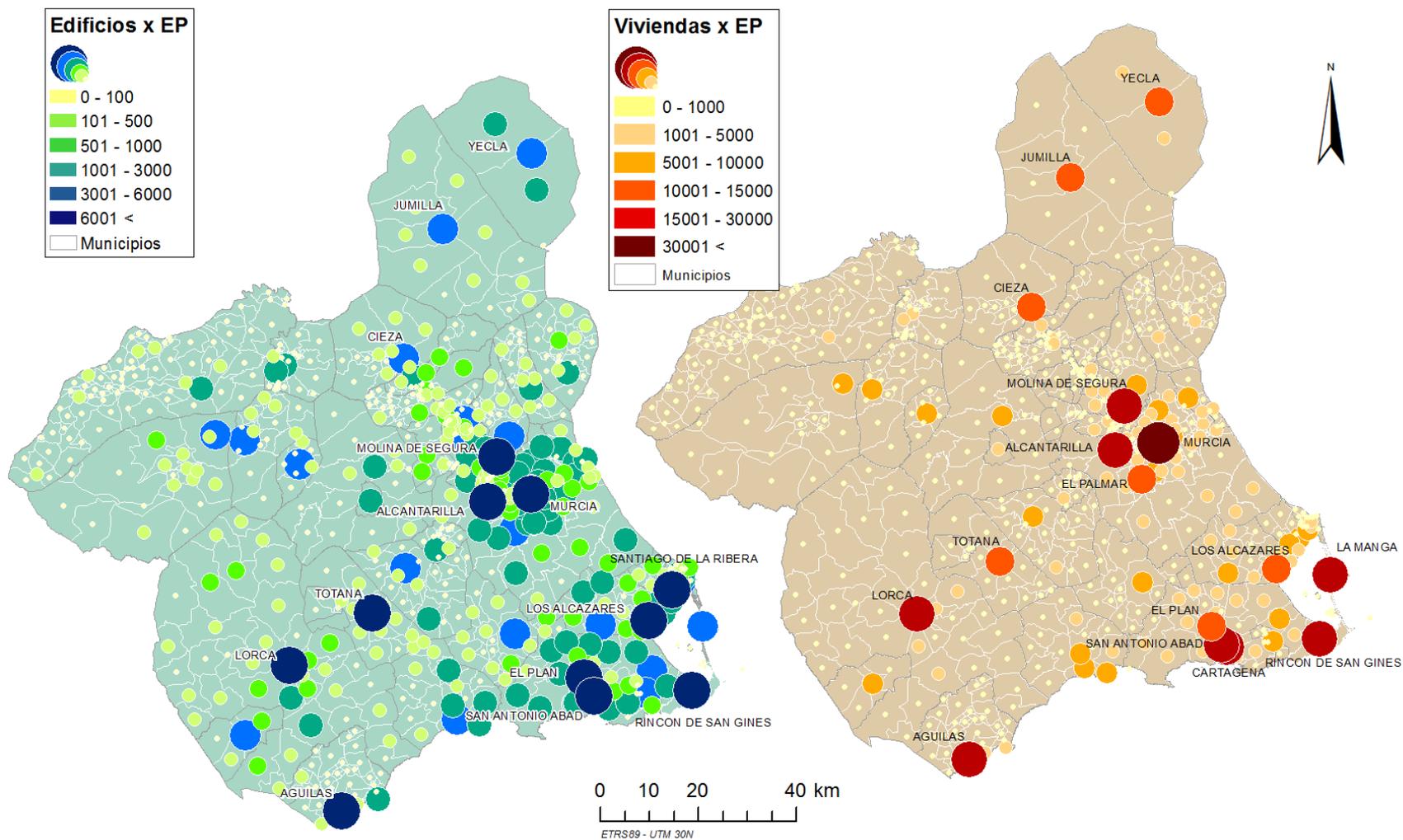


Figura 2.10. Izq. Mapa con el número de edificios por entidad poblacional (EP) de la Región de Murcia. Dcha. Mapa con el número de viviendas por entidad poblacional (EP) de la Región de Murcia.

### *2.2.3.1 POBLACIÓN*

Como se mencionó anteriormente, los datos de densidad de población se tomaron para dos épocas del año: época invernal o periodo permanente, tomando en consideración que es en esta cuando la población ocupa las viviendas principales, y época o periodo vacacional, que considera el movimiento de las personas hacia zonas vacacionales, ocupando así también las viviendas secundarias. Este cambio en la densidad de población se traduce en un mayor o menor número de víctimas en función de la zona y la época del año en que ocurra el evento sísmico.

En la Figura 2.11 se muestran los mapas con la población permanente y la población en época vacacional para todos los municipios de la Comunidad de la Región de Murcia. Se observa claramente como las entidades pertenecientes a la costa aumentan la densidad de población significativamente en época vacacional. Tal es el caso de las entidades de Rincón de San Ginés, La Manga, San Javier, Los Alcázares y El Plan, principalmente.

De igual manera, puede observarse un aumento considerable en la entidad de Alcantarilla para este mismo periodo del año; sin embargo, no se observan disminuciones significativas en otras entidades de la Comunidad para el periodo vacacional, lo que indica que el movimiento de las personas hacia la Costa de Murcia proviene de personas residentes en otras comunidades autónomas del país.

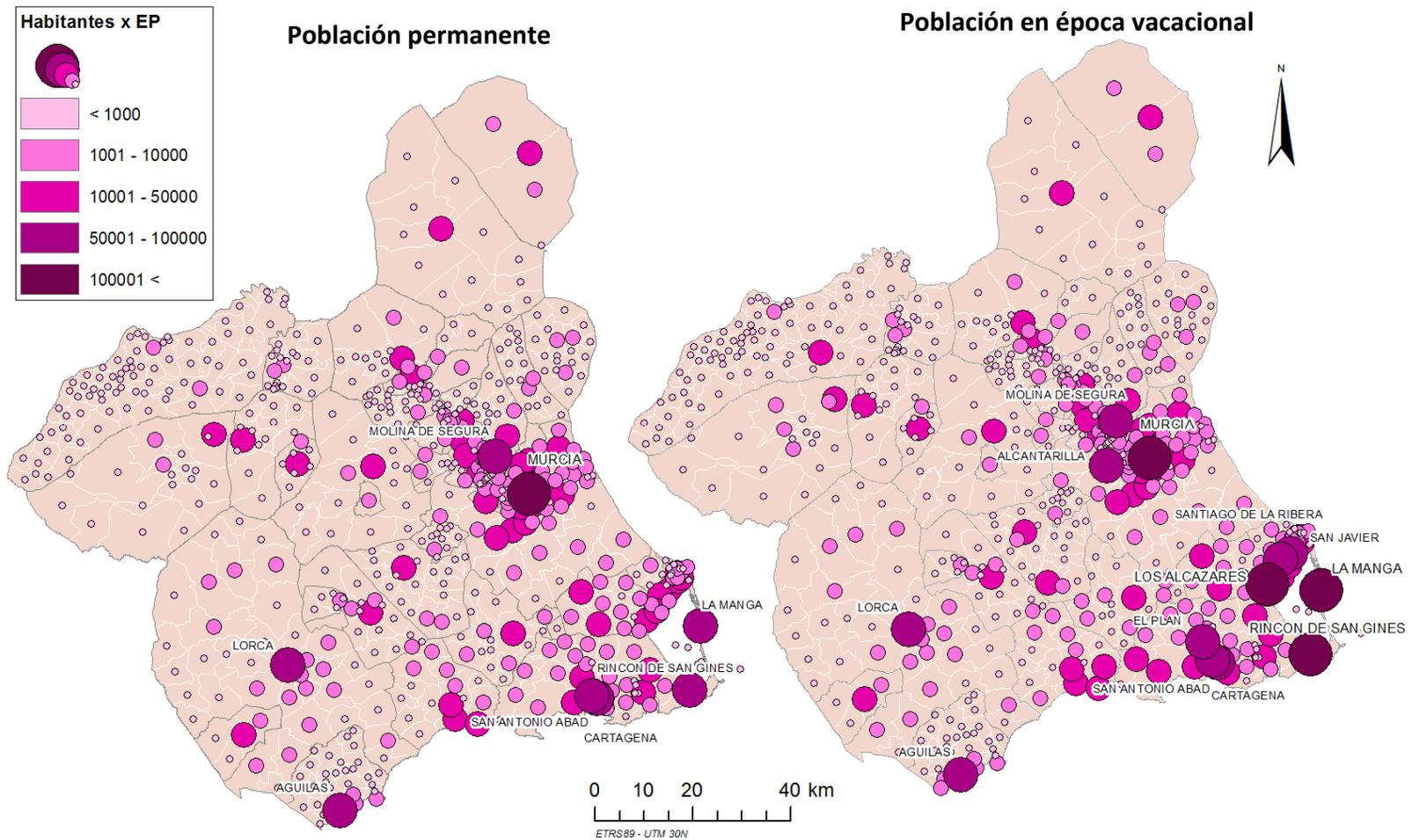


Figura 2.11. Izq. Mapa con el número de habitantes permanentes por entidad poblacional (EP) de la Región de Murcia. Dcha. Mapa con el número de habitantes en época vacacional por entidad poblacional (EP) de la Región de Murcia.

## 2.3 VULNERABILIDAD Y GRADO DE DAÑO

La clasificación de vulnerabilidad se ha realizado siguiendo dos escalas y/o metodologías: la EMS98 (ya adoptada en RISMUR I) y la propuesta en el proyecto RISK-UE. La Figura 2.12 y Figura 2.13 ilustran las distribuciones de vulnerabilidad asignada por entidades poblacionales en ambas escalas.

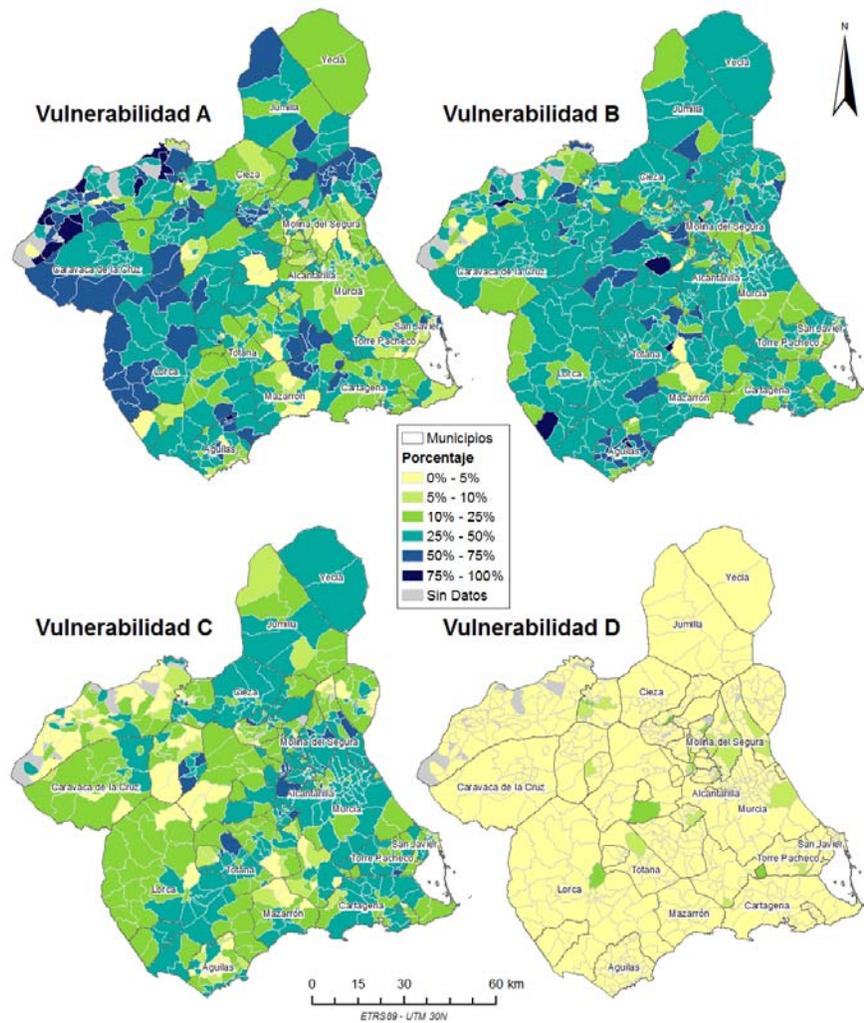


Figura 2.12. Mapas de distribución de edificios con vulnerabilidad A, B, C y D para la región de Murcia de acuerdo con la EMS-98, expresando la distribución en porcentaje.

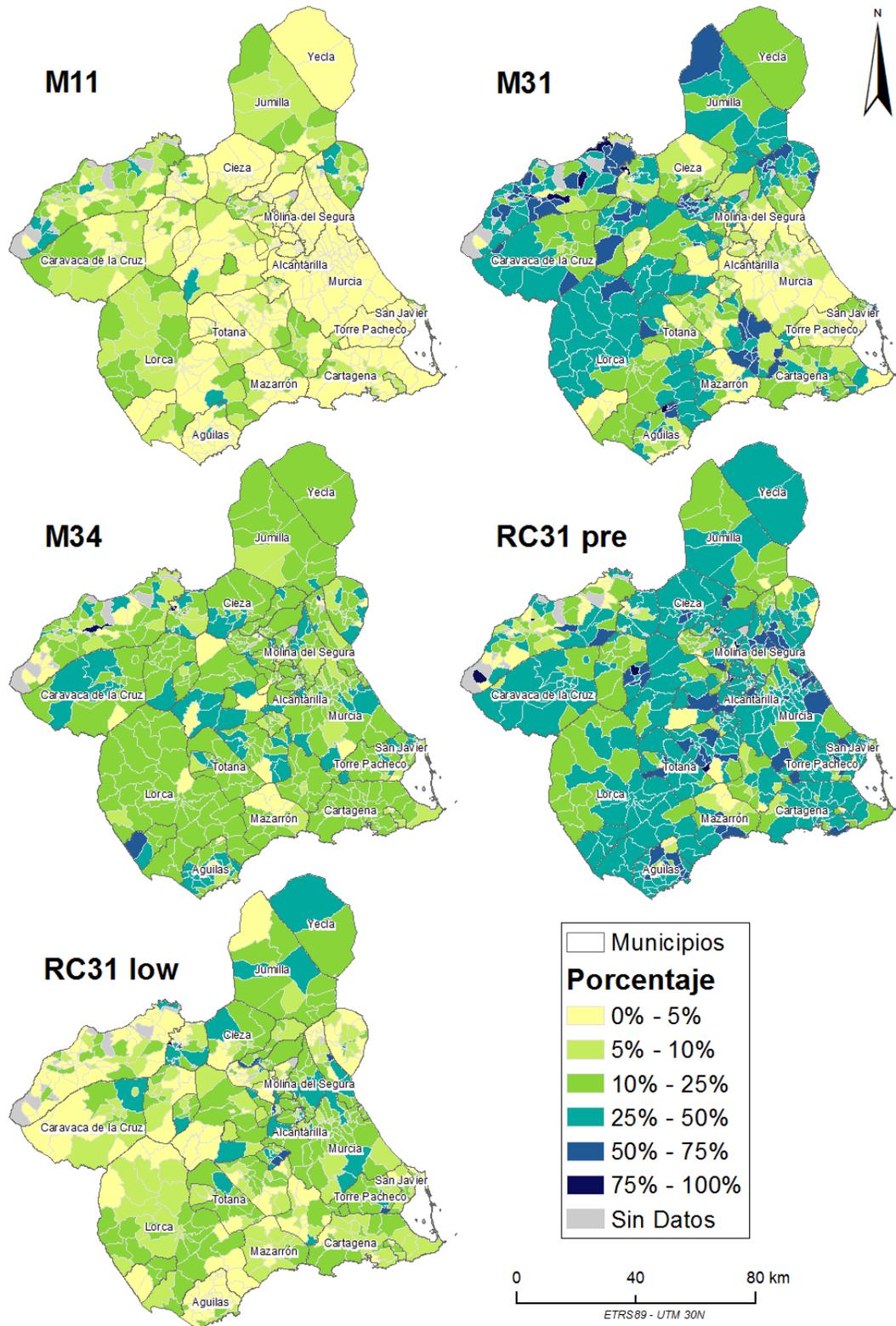


Figura 2.13. Mapas de distribución de las diferentes clases de vulnerabilidad de acuerdo con Risk-UE para la región de Murcia, expresando la distribución en porcentaje.

## 2.4 CÁLCULO DEL DAÑO EN RELACIÓN CON LA VULNERABILIDAD

---

Una vez establecida la peligrosidad sísmica potencial sobre la ciudad o región, se debe evaluar la vulnerabilidad de la misma ante dicha peligrosidad o movimiento esperado, esto es la afectación o daño que van a tener las estructuras ante el movimiento representativo de la peligrosidad.

Durante un terremoto, la energía fluye del suelo a las estructuras y estas deben disiparla mediante los mecanismos de amortiguamiento en el rango elástico y mediante las deformaciones plásticas. Estas últimas son las responsables de los daños en la estructura.

Para la estimación de daños existen diferentes metodologías, basadas en el uso de curvas de fragilidad, matrices de probabilidad de daño, relaciones entre índices de vulnerabilidad e índices de daño, espectros de capacidad y demanda, etc. En todas ellas, el objetivo es estimar el porcentaje de cada grado de daño, para cada clase de vulnerabilidad, ante un cierto parámetro de movimiento.

Los procedimientos para la estimación de la vulnerabilidad sísmica de las diferentes tipologías constructivas se clasifican generalmente en métodos empíricos, analíticos y basados en juicio de expertos. Los primeros implican análisis estadísticos mediante la información de la distribución de los daños y el desempeño sísmico de edificios en terremotos pasados. Los métodos analíticos utilizan expresiones derivadas mecánicamente para describir la capacidad de los edificios para soportar la demanda sísmica y la experiencia de diferentes grados de daño (Rivas-Medina et al. 2014).

Existen métodos híbridos (Dolce et al., 1995; Kappos et al., 2002; Barbat et al., 2008) en la literatura, que combinan varios de los métodos anteriores, y se utilizan para comparar las diferentes construcciones de una misma tipología en una determinada zona, de acuerdo con algunos factores cuya contribución a la resistencia sísmica es calibrada por expertos. Estos métodos son los más apropiados para la evaluación de edificaciones a gran escala, debido a que arrojan resultados más rápidos para un sin número de tipologías constructivas, que pueden ser determinantes para la toma de decisiones en el ámbito de la mitigación del riesgo, en una región determinada.

Entre las metodologías actuales más conocidas para el análisis de la vulnerabilidad sísmica y estimación del daño se encuentra la metodología HAZUS (FEMA/NIBS, 2009), basada en la ATC-38 (ATC-2000), con datos de daño obtenidos de terremotos importantes ocurridos en Estados Unidos en el pasado, y los métodos analíticos desarrollados en la ATC-55 (ATC-2005). También destacan los métodos desarrollados en el proyecto europeo de evaluación de riesgo RISK-UE, realizado para escenarios de riesgo sísmico de diferentes ciudades europeas, en su capítulo de Vulnerabilidad de las edificaciones (Risk-UE, 2003; Milutinovic & Trendafiloski, 2003).

Otro procedimiento de estimación de vulnerabilidad basado tanto en observaciones como en opiniones de expertos es el uso de la vulnerabilidad de las construcciones contemplada en las escalas macrosísmicas. Estas escalas utilizan el daño en la construcción y otros fenómenos para evaluar el desempeño de las estructuras de una región ante la ocurrencia de un movimiento sísmico. A partir de la descripción de los daños en la estructura para diferentes intensidades, es posible deducir funciones de vulnerabilidad. En Europa la escala más utilizada es la Escala Macrosísmica Europea (EMS-98) (Grünthal, 1998).

Los métodos analíticos para la vulnerabilidad y la evaluación de los daños son la mejor forma de estimación del daño cuando el movimiento del suelo se da en términos de aceleraciones espectrales  $S_a$  y desplazamientos espectrales  $S_d$ . En estos métodos, el comportamiento de cada edificio está representado por una curva de capacidad que se refiere a su desplazamiento lateral con diferentes aceleraciones de base. Para una tipología constructiva dada, las curvas de capacidad están vinculadas a las curvas de fragilidad, que representan la probabilidad de que el edificio sufra diferentes grados de daño ante distintos niveles de la acción sísmica. Estas curvas de fragilidad se modelan con una distribución logarítmica normal probabilística.

Este procedimiento para la estimación del daño físico utiliza fórmulas derivadas mecánicamente para describir la capacidad de desplazamiento de las edificaciones para tres estados límites diferentes. Estas ecuaciones se dan en términos de las propiedades geométricas y de los materiales, incluyendo la altura media de los edificios en cada clase. Tras sustituir esta altura usando una fórmula que la relaciona con el periodo correspondiente al estado límite, se pueden establecer funciones de capacidad del desplazamiento en términos del periodo. La principal ventaja es que, de esta forma, se puede establecer una comparación directa para cualquier periodo entre la capacidad de desplazamiento de una edificación y la demanda en desplazamiento predicha a partir de un espectro de respuesta.

Sin embargo, existe un grado de incertidumbre importante en la elección de las curvas que representen el comportamiento de los edificios, por el hecho de que éstas son realizadas para un modelo de edificios con características estructurales, diseño y materiales de construcción similares, pero que dependen de la geometría y métodos constructivos que pueden variar de un edificio a otro dentro de una misma tipología estructural.

Por otro lado, los métodos empíricos se basan en el hecho de que ciertas clases de estructuras que comparten características estructurales y patrones de carga similares se comportan de la misma manera y sufren tipos de daños similares ante la ocurrencia de terremotos. Estos métodos suelen

utilizar el parámetro de intensidad de movimiento para establecer las funciones de vulnerabilidad, lo que introduce un alto grado de incertidumbre al pasar del parámetro de intensidad al parámetro de aceleraciones espectrales, cuando la peligrosidad sísmica está expresada en función de este último parámetro, como es el caso de este estudio.

Por este motivo, para la evaluación del daño físico en este estudio se realizará un árbol lógico con dos metodologías, la primera basada en el modelo de vulnerabilidad descrito en la escala EMS-98, como método empírico (utilizada en RISMUR I), y la segunda consiste en el método analítico del proyecto Risk-UE. Estas dos metodologías pueden considerarse las más idóneas para la evaluación del comportamiento de edificaciones existentes en el continente europeo, debido a que fueron desarrolladas con este mismo objetivo. El hecho de emplear las dos en este estudio y combinarlas por medio de un árbol lógico permite tener en cuenta la incertidumbre epistemológica asociada a los distintos métodos y la falta de conocimiento sobre el modelo real.

En el siguiente apartado se describen las dos metodologías utilizadas en el estudio.

## 2.4.1 METODOLOGÍA EMS-98

### 2.4.1.1 FUNDAMENTO

La Escala Macrosísmica Europea, en su última revisión en el año 1998 (EMS-98), describe varios tipos de vulnerabilidad para la edificación tradicional y tecnológica. Esta escala, de uso oficial en España para valoraciones macrosísmicas, es también un estándar en valoraciones de riesgo en el ámbito europeo. De ahí la conveniencia de realizar la clasificación de vulnerabilidad de acuerdo a esta escala.

Esta escala clasifica los posibles daños en cinco grados (Tabla 2.1), a los que hay que añadir el grado nulo (ausencia de daño).

Tabla 2.1. Grados de daño, según la Escala Macrosísmica Europea EMS-98 (Grüntal 1998)

GRADO DE DAÑO	DESCRIPCIÓN CUALITATIVA	DAÑO ESTRUCTURAL	DAÑO NO ESTRUCTURAL
1	Leve a Despreciable	Sin Daño	Ligero
2	Moderado	Ligero	Moderado
3	Sustancial a Severo	Moderado	Severo
4	Muy Severo	Severo	Muy Severo
5	Destrucción	Muy Severo	----

La metodología propuesta por la EMS-98 está basada en un modelo de vulnerabilidad implícita, que deriva de la asignación de grados de intensidad que describen la severidad del movimiento del suelo en función de los efectos observados en un área limitada.

Para poder aplicar esta metodología, hay que clasificar antes la vulnerabilidad de todos los edificios del parque inmobiliario. Para esto se asigna una clase de vulnerabilidad a cada tipología estructural, dependiendo de la mayor o menor susceptibilidad de la estructura a sufrir daños debido a la acción sísmica. La EMS-98 distingue 6 clases (A, B, C, D, E, F). La vulnerabilidad disminuye de la clase A a la F (Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Diferenciación de estructuras (edificios) en clases de vulnerabilidad

Tipo de estructura		Clase de vulnerabilidad					
		A	B	C	D	E	F
Fábrica	Piedra suelta o canto rodado	●					
	Adobe (ladrillos de tierra)	●	○				
	Mampostería	○	●				
	Sillería		○	●	○		
	Sin armar, de ladrillos o bloques	○	●	○			
	Sin armar, con Forjados de HA		○	●	○		
	Armada o confinada			○	●	○	
Hormigón Armado (HA)	Estructura sin diseño sismorresistente (DSR)	○	○	●	○		
	Estructura con nivel medio de DSR		○	○	●	○	
	Estructura con nivel alto de DSR			○	○	●	○
	Muros sin DSR		○	●	○		
	Muros con nivel medio de DSR			○	●	○	
	Muros con nivel alto de DSR				○	●	○
Acero	Estructuras de acero			○	○	●	○
Madera	Estructuras de madera		○	○	●	○	

● Clase de vulnerabilidad más probable      ○ Rango probable      ○ Rango de casos menos probables, excepcionales

Una vez asignada la clase de vulnerabilidad al conjunto de edificaciones que componen la muestra poblacional, se procede a estimar el grado de daño esperado ante el nivel de movimiento del suelo (expresado en grado de intensidad) mediante curvas o matrices de probabilidad de daño.

#### 2.4.1.2 MATRICES DE PROBABILIDAD DE DAÑO (MPD)

Estas matrices expresan en forma discreta la probabilidad condicional de obtener un determinado grado de daño para cada tipo de estructura o clase de vulnerabilidad ante un cierto nivel de movimiento.

Existen diferentes propuestas de MPD, derivadas de análisis de datos de terremotos reales, o bien a partir de datos empíricos y opiniones de expertos. Entre ellas son de destacar las propuestas por la ATC (ATC-13, 1985), Braga et al. (1982, 1986) y Chávez (1998).

Para la estimación de la probabilidad de daño en cada clase de vulnerabilidad de cada entidad poblacional se han tomado las matrices MPD desarrolladas por Chávez (1998), que se presentan en la Tabla 2.3. Estas MPD consideran la acción sísmica en términos de intensidad sentida, deducida a partir de los valores de aceleración resultantes del estudio de peligrosidad.

Tabla 2.3. Matrices de Probabilidad de Daño para cada clase de vulnerabilidad, según Chávez 1998. Cada celda de la matriz representa el porcentaje de edificaciones que previsiblemente experimentarán cada grado de daño para cada nivel de intensidad.

INT	CLASE DE VULNERABILIDAD A						CLASE DE VULNERABILIDAD B					
	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D0	D1	D2	D3	D4	D5
V	0.441	0.392	0.140	0.025	0.002	0.000	0.670	0.279	0.047	0.004	0.000	0.000
V - VI	0.325	0.388	0.212	0.065	0.011	0.001	0.556	0.336	0.094	0.015	0.001	0.000
VI	0.209	0.384	0.283	0.104	0.019	0.001	0.441	0.392	0.140	0.025	0.002	0.000
VI - VII	0.145	0.324	0.314	0.165	0.047	0.005	0.325	0.388	0.211	0.064	0.011	0.001
VII	0.080	0.263	0.346	0.227	0.074	0.010	0.209	0.384	0.283	0.104	0.019	0.001
VII - VIII	0.045	0.169	0.287	0.286	0.168	0.045	0.145	0.323	0.314	0.165	0.047	0.006
VIII	0.010	0.075	0.227	0.346	0.262	0.080	0.080	0.263	0.346	0.227	0.074	0.010
VIII - IX	0.005	0.040	0.136	0.268	0.336	0.215	0.045	0.169	0.287	0.286	0.168	0.045
IX	0.000	0.005	0.044	0.191	0.409	0.351	0.010	0.075	0.227	0.346	0.262	0.080
IX - X	0.000	0.003	0.023	0.103	0.296	0.575	0.005	0.040	0.136	0.268	0.336	0.215
X	0.000	0.000	0.001	0.017	0.184	0.798	0.000	0.005	0.044	0.191	0.409	0.351
INT	CLASE DE VULNERABILIDAD C						CLASE DE VULNERABILIDAD D					
	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D0	D1	D2	D3	D4	D5
V	0.755	0.218	0.025	0.001	0.000	0.000	0.859	0.133	0.008	0.000	0.000	0.000
V - VI	0.713	0.025	0.036	0.003	0.000	0.000	0.807	0.176	0.017	0.001	0.000	0.000
VI	0.670	0.279	0.047	0.004	0.000	0.000	0.755	0.218	0.025	0.002	0.000	0.000
VI - VII	0.556	0.336	0.093	0.014	0.001	0.000	0.712	0.249	0.036	0.003	0.000	0.000
VII	0.441	0.392	0.140	0.025	0.002	0.000	0.670	0.279	0.047	0.004	0.000	0.000
VII - VIII	0.325	0.388	0.211	0.064	0.011	0.001	0.556	0.336	0.093	0.014	0.001	0.000
VIII	0.209	0.384	0.283	0.104	0.019	0.001	0.441	0.392	0.140	0.025	0.002	0.000
VIII - IX	0.144	0.324	0.314	0.165	0.047	0.006	0.325	0.388	0.211	0.064	0.011	0.001
IX	0.080	0.263	0.346	0.227	0.074	0.010	0.209	0.384	0.283	0.104	0.019	0.001
IX - X	0.045	0.169	0.287	0.286	0.168	0.045	0.144	0.324	0.314	0.165	0.047	0.006
X	0.010	0.075	0.227	0.346	0.262	0.080	0.080	0.263	0.346	0.227	0.074	0.010

En la Figura 2.14 se comparan, por medio de una representación gráfica, las probabilidades de ocurrencia de distintos tipos de daño de la clase más vulnerable (Clase A, mayoritaria en gran parte de los municipios de Murcia) y la clase menos vulnerable encontrada en Murcia (Clase D).

Como puede observarse, para la clase de vulnerabilidad A, que representa el tipo de estructuras más vulnerables o más susceptibles a sufrir daños, al ir incrementándose la intensidad del movimiento, la probabilidad de daño nulo se hace menor y la probabilidad de que la estructura sufra grados de daño más severos va aumentando; en este caso, para un sismo de intensidad IX y X, el porcentaje de que la estructura alcance el colapso es del 80% y el 20% restante de las estructuras sufrirían un daño muy fuerte. Por otra parte, para la clase de vulnerabilidad D, que representa estructuras menos vulnerables (generalmente estructuras de hormigón armado con diseño sismorresistente), se observa cómo la probabilidad de que la estructura quede libre de

daño es mayor en todos los niveles de intensidad, y en el caso de los niveles más altos de intensidad, el daño probable que sufrirá la estructura será daño ligero y moderado.

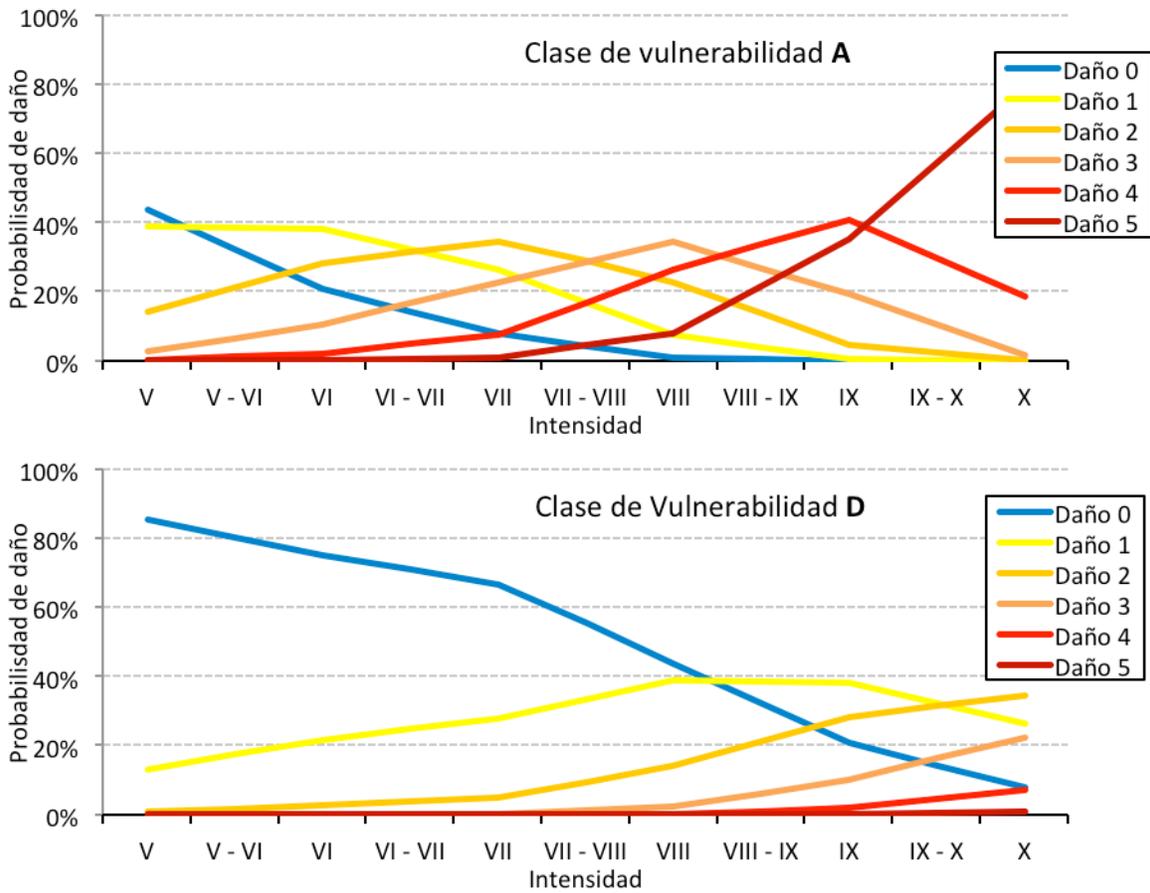


Figura 2.14. Gráficos con las probabilidades de distinto tipo de daño que puede esperarse en las clases de vulnerabilidad A y D para diferentes acciones sísmicas.

### 2.4.1.3 ESTIMACIÓN DEL DAÑO

Aplicando las probabilidades de daño de la MPD de la Tabla 2.3 y teniendo en cuenta el número de edificios y viviendas de cada entidad poblacional se puede estimar el número de edificios y viviendas que tendrán cada tipo de daño teniendo en cuenta la siguiente formulación:

Si llamamos  $V_i$  a cada clase de vulnerabilidad,  $D_j$  cada grado de daño y  $k$  el subíndice representativo de cada población, el número de edificaciones de la clase  $V_i$  que experimentan daño  $D_j$  en la población  $k$ , será  $N_{ijk}$  y vendrá dado por la expresión:

$$N_{ijk} = P(D_j / V_i, I_k) * N_{ik} \quad [2.1]$$

donde:

$P(D_j/V_i, I_k)$  es la probabilidad de daño  $D_j$  condicionada a la clase  $V_i$  y para una intensidad de movimiento  $I_k$ . Su valor es el correspondiente coeficiente de las matrices de daño adoptadas MPD.

$N_{ik}$  es el número de edificaciones de la clase  $V_i$  en la población  $k$ .

Los intervalos de variación de los subíndices son:

$i = 1...4$  (para las 4 clases de vulnerabilidad de la Región: A, B, C y D)

$j = 1...6$  (para los 6 grados de daño en la escala EMS-98, incluyendo daño nulo)

$k = 1...1058$  (Nº total de entidades poblacionales de la base depurada)

Se calcula entonces, para cada clase de vulnerabilidad  $V_i$  y en cada entidad de población el número de edificaciones y viviendas  $N_{ijk}$  que se espera experimenten cada grado de daño,  $D_j$ , dada la intensidad  $I_k$  de la población.

#### 2.4.1.4 CUANTIFICACIÓN DEL DAÑO EN LA REGIÓN DE MURCIA

##### *Cálculo de la intensidad*

El concepto de intensidad gira alrededor de la idea de que, para un sitio particular afectado por algún terremoto, el nivel de severidad de la vibración es característico de los efectos experimentados. Esto implica, en primer lugar, que el asentamiento es suficientemente grande para que se pueda obtener una muestra estadísticamente significativa, sin ser afectado por peculiaridades locales de pequeña escala y, en segundo lugar, que no es tan grande como para que las variaciones locales genuinas no desaparezcan.

La cuantificación de los distintos grados de daño se centra en los efectos del sismo en las personas, los objetos, la naturaleza y en los daños en edificios.

Cada grado de intensidad puede incluir también los efectos de la sacudida de los grados de intensidad menores, aunque dichos efectos no se mencionen explícitamente.

La definición de los grados de intensidad especificada en la EMS-98 se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Grado de intensidad macrosísmica y su correspondiente descripción, según la escala MSK.

INTENSIDAD	DESCRIPCIÓN
I	Terremoto imperceptible. Sólo son registrados por los sismógrafos.
II	Terremotos escasamente perceptibles (muy leves).
III	Terremoto débil, observado sólo parcialmente. Las personas más sensibles lo sienten.
IV	Terremoto sentido considerablemente. El evento es sentido por muchas personas.
V	Fuerte. Despertamiento. Sentido por todas las personas en el interior de edificios y por muchas fuera. Muchas personas durmiendo se despiertan. Hay algunos daños en edificios menos sólidos.
VI	Daños ligeros. Las personas se asustan y corren hacia afuera de las edificaciones. Hay daños en estructuras medias.
VII	Daños en edificios. Se asustan la mayoría de las personas. Hay daños sobre las estructuras. En el diseño y construcción debe ser tomada en cuenta la carga de sismo.
VIII	Fuertes daños en los edificios. Destrucción de edificios. Alarma general. La carga de sismo comienza a ser crítica en el diseño.
IX	Daño general de edificios. Pánico general. Muchos edificios se caen. La carga de sismo es la más importante en el diseño. Hay que tomar medidas especiales antisísmicas.
X	Destrucción general de edificios. Grandes grietas en el suelo.
XI	Catástrofe. Ocurren serios daños, destrucción total. Considerables deformaciones del suelo.
XII	Cambio de relieve. Se destruyen prácticamente todas las construcciones. Cambios radicales en la superficie del terreno.

En este caso, se partió de una intensidad teórica estimada a partir de las aceleraciones máximas esperadas en el terreno obtenidas en el cálculo de la peligrosidad. Para ello, se utilizó la ecuación de correlación entre intensidad y aceleración desarrollada en RISMUR I, siendo esta:

$$I = 0.0661 \log PGA + 3.247 \log EPA + 0,1311 \quad r = 0.85, = 0.60 \quad [2.2]$$

Donde I es la intensidad, PGA es la aceleración pico efectiva y EPA la aceleración espectral promedio en el rango de periodos de 0.1 a 0.5 s, normalizada por un factor de 2.5. Una ventaja de esta correlación es que no solo considera valores de PGA, sino también de aceleraciones espectrales entre 0.1 y 0.5 Hz para deducir el correspondiente grado de intensidad.

En la Figura 2.15 se muestra el mapa de intensidades teóricas obtenidas del estudio de peligrosidad y aplicando la ecuación de correlación antes citada.

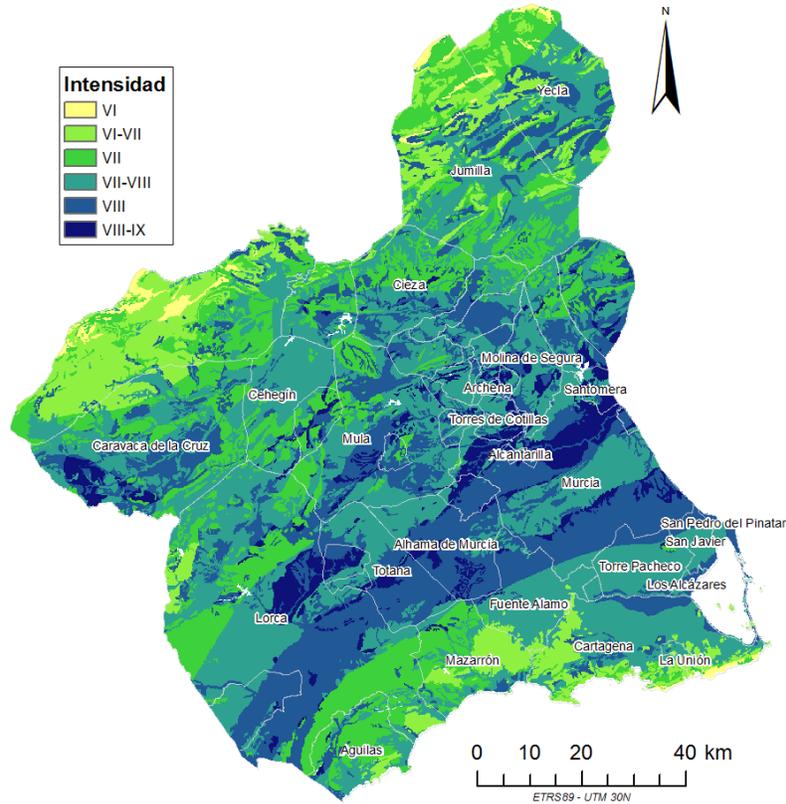


Figura 2.15. Mapa de intensidades teóricas de la región de Murcia, obtenidas por correlación con las aceleraciones estimadas en el estudio de peligrosidad. Periodo de retorno TR=475 años.

### *Daño por entidad poblacional*

El cálculo del daño esperado en cada entidad poblacional de la Región de Murcia se ha realizado para cada clase de vulnerabilidad (A, B, C y D), considerando como nivel de movimiento de entrada el mapa de intensidades teóricas de la figura 2.13. (periodo de retorno de 475 años).

Se adopta en el estudio la escala de daños y la clasificación de vulnerabilidad de la EMS-98, diferenciando 6 grados de daño (incluyendo daño nulo) y 6 clases de vulnerabilidad, aunque en la Región de Murcia sólo se encuentran edificaciones pertenecientes a las cuatro primeras clases.

En la Figura 2.16 se muestran varios mapas con la distribución de daño en edificios por entidad poblacional obtenida con la escala EMS-98.

Se observa que la gran mayoría de los edificios sufre los grados de daño D1 y D2, que representan grado de daño leve y moderado. Sin embargo, en algunas entidades, como en el caso de Lorca, la mayor parte de los edificios muestra grados de daño extenso y completo (D3 y D4).

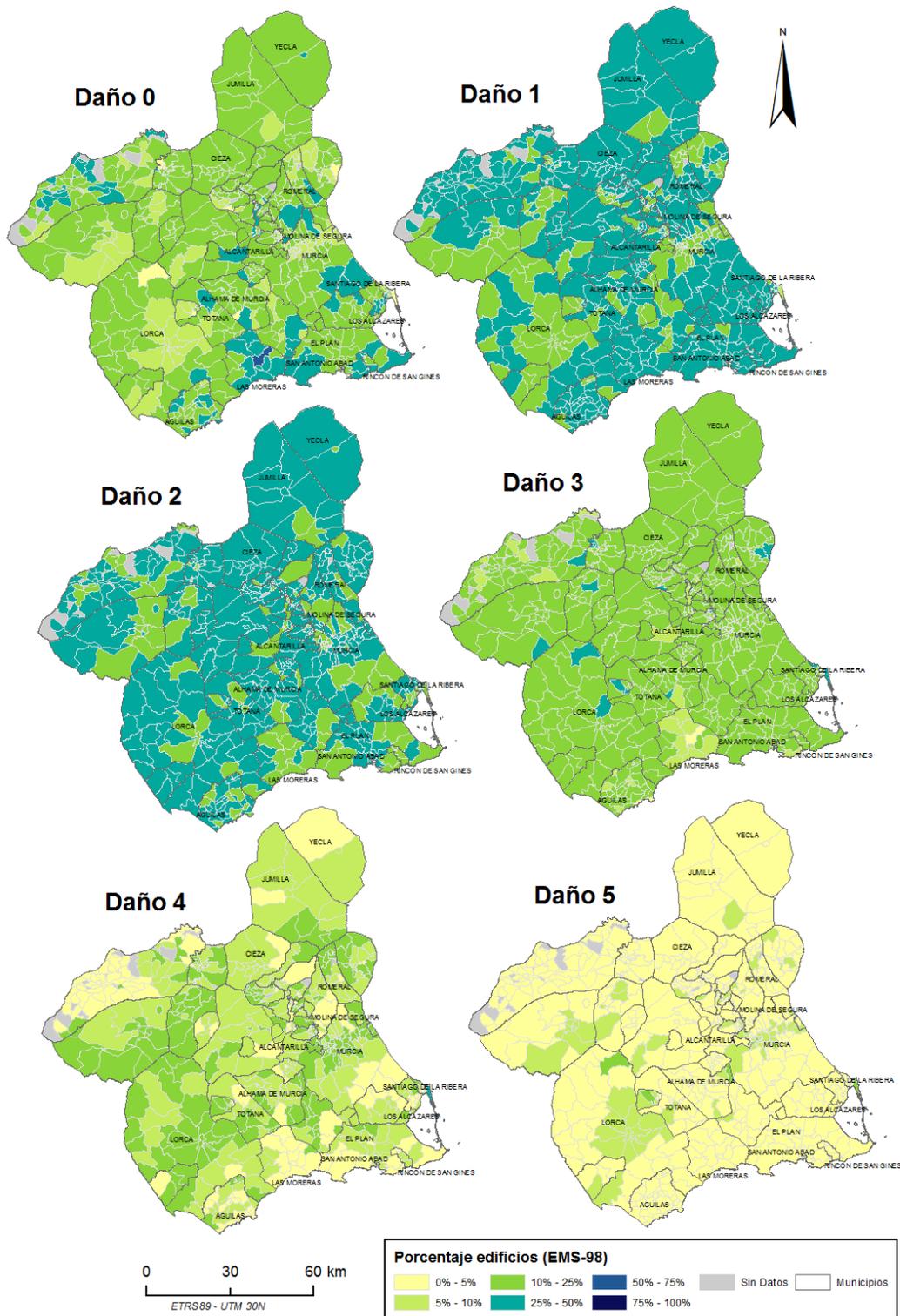


Figura 2.16. Distribución de daños estimada con la escala EMS-98 en la región de Murcia para el movimiento representado por la intensidad dada en el mapa de la Figura 2.15.

## 2.4.2 METODOLOGÍA RISK-UE (I-DCM)

### 2.4.2.1 FUNDAMENTO

El principal objetivo del proyecto Risk-UE (Risk-UE, 2003; Mouroux *et al.*, 2004) era proponer métodos avanzados de análisis de riesgo sísmico que permitieran incorporar las características de los edificios, del patrimonio cultural y de las sociedades urbanas típicas de Europa. Risk-UE desarrolla y aplica metodologías homogéneas y avanzadas para el estudio de la peligrosidad, de la vulnerabilidad y del riesgo sísmico en áreas urbanas europeas. El proyecto tuvo la virtud de involucrar a las autoridades municipales con responsabilidad en la protección civil y en la gestión del riesgo y se aplicó a 7 ciudades europeas, entre las que figuraba la ciudad de Barcelona.

Tal como establece el proyecto RISK-UE en su metodología propuesta LM-2, en este estudio se emplea un procedimiento analítico estático no lineal para estimar el daño en los edificios.

Partiendo de la clasificación de los edificios por tipología estructural, se calcula la probabilidad de que una determinada tipología alcance o supere diferentes grados de daño a partir del movimiento máximo esperado en esa localización. Para caracterizar la respuesta de las estructuras, se utilizará **el método de capacidad-demanda**, en el cual la demanda se identifica con la acción sísmica (mediante el espectro de respuesta) y la capacidad viene dada por la curva que refleja el comportamiento de la estructura (desde el régimen lineal hasta el punto de ruptura). Se determina entonces el punto de desempeño, que corresponde al desplazamiento espectral que se espera que sufra cada tipo de estructura a causa del movimiento sísmico de entrada (demanda). Se emplean después curvas de fragilidad que proporcionan la probabilidad de alcanzar o exceder cada grado de daño en función del desplazamiento espectral para el punto de desempeño. (Figura 2.17).

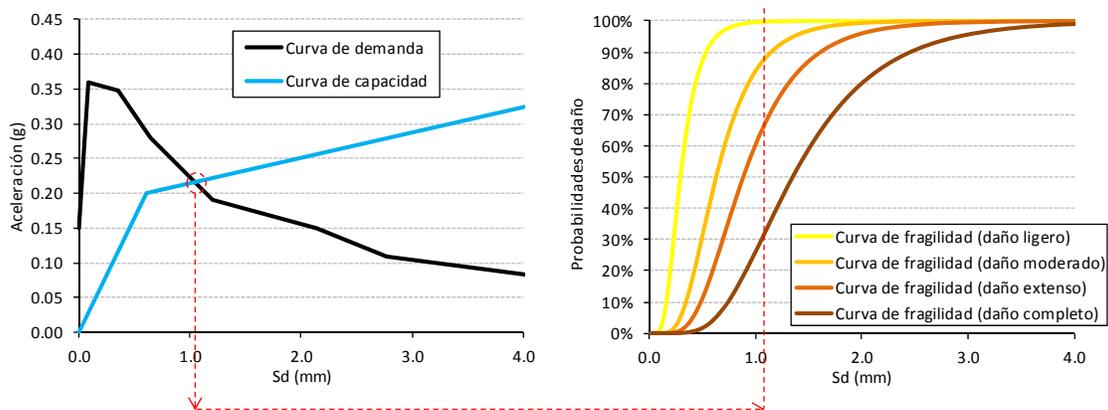


Figura 2.17. Esquema de las curvas de capacidad – demanda y fragilidad para estimar el daño en edificaciones

### 2.4.2.2 MÉTODO I-DCM

#### *Curvas de Capacidad – Demanda. Punto de desempeño*

Las curvas de capacidad relacionan la fuerza cortante aplicada en la base de un edificio con el desplazamiento que ésta produce en el techo del mismo. Representan la capacidad de una estructura a resistir una demanda sísmica.

Para calcular el punto de desempeño se emplea el método del coeficiente de desplazamiento mejorado, I-DCM (FEMA-273 y FEMA-440), que consiste en modificar la demanda de desplazamiento del sistema lineal de un grado de libertad (SDOF), equivalente a la estructura, multiplicándolo por una serie de coeficientes para estimar el desplazamiento máximo del oscilador no lineal. Este proceso se divide en las siguientes fases:

Calcular el periodo efectivo de la estructura ( $T_c$ ) a partir del punto de fluencia ( $A_y, D_y$ ) dado en su curva de capacidad:

$$T_c = 2 \pi (D_y/A_y)^{1/2} \quad [2.3]$$

Calcular la demanda de aceleración espectral del sistema lineal equivalente de un grado de libertad ( $S_a^{cl}$ ) a partir del espectro de respuesta específico (que representa la aceleración,  $S_a$ , en función del periodo,  $T$ )

Calcular la demanda máxima de desplazamiento espectral ( $S_d^{cl}$ ) del SDOF:

$$(S_d^{cl}) = (T_c)^2 / 4\pi^2 (S_a)^{cl} \quad [2.4]$$

Calcular el desplazamiento objetivo,  $\delta_1$ , mediante la relación:

$$\delta_1 = C_1 C_2 (S_d)^{cl} \quad [2.5]$$

donde

$C_1$  = Factor de modificación para relacionar el desplazamiento máximo esperado de un oscilador no lineal con propiedades histéricas elásticas-perfectamente-plásticas (EPP) con la demanda de desplazamiento máximo del oscilador lineal.

$C_2$  = Factor de modificación para representar el comportamiento histerético, con degradación debido a fallas cortantes y su degradación de rigidez en la respuesta de desplazamiento máximo.

Estos coeficientes pueden calcularse con las relaciones de aproximación siguientes:

$$C_1 = 1 + (R-1)/a (T_c)^2 \quad [2.6]$$

$$C_2 = 1 + 1/800 (R-1/T_c)^2 \quad [2.7]$$

Donde:

R = es la tasa de demanda de resistencia elástica con respecto a la capacidad de resistencia calculada:

$$R = (S_a)^{cl}/A_y \quad [2.8]$$

a = es la constante de la ecuación y es igual a 130, 90 y 60 para los tipos de suelo B, C y D del NEHRP, respectivamente.

La demanda máxima de desplazamiento espectral obtenido para el oscilador no lineal,  $\delta_1$ , se aplica a las funciones de fragilidad y a partir de ahí se obtienen las probabilidades de sufrir o exceder los distintos grados de daño para cada tipología estructural.

### *Curvas de Fragilidad*

Las curvas de fragilidad pueden definirse como “la representación gráfica de la función de distribución acumulada de la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño límite específico, dada una respuesta estructural ante una determinada acción sísmica” (Bonnet Díaz, 2003).

Éstas se obtienen utilizando una función lognormal definida por el valor medio del desplazamiento espectral correspondiente al umbral de daño asociado a un estado *DS* de daño (*DS Sd*) y por una desviación estándar  $\beta_{DS}$ .

$$P[D_s|S_d] = \Phi \left[ \frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{S_d}{\bar{S}_{d,DS}} \right) \right] \quad [2.9]$$

donde:

$P[D_s|S_d]$  es la probabilidad de que la estructura alcance o exceda el estado de daño  $D_s$  debido al desplazamiento  $S_d$ .

$\Phi$  es la función de distribución normal estándar acumulativa.

$\beta$  es la desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral del estado de daño  $D_s$ . Este valor se ha definido como función de la ductilidad ( $\mu$ ) de la curva de

capacidad, con el fin de obtener una dispersión en la distribución del daño equivalente a la resultante del daño observado (Braga et al. 1982)

$$\beta = 0,4 \ln \mu \quad [2.10]$$

$\bar{\xi}_{d, D_s}$  es el valor medio del desplazamiento espectral al que la estructura alcanza el umbral del estado de daño  $D_s$ .

### 2.4.2.3 ESTIMACIÓN DEL DAÑO

La clasificación de grados de daño de esta metodología se estima sobre daños estructurales en edificios ordinarios (de importancia normal) y en viviendas convencionales. Los diferentes grados de daño considerados son: **leve**, **moderado**, **extensivo** y **completo**, además del daño **nulo**. La descripción de cada uno de ellos, dada para cada tipología estructural, puede consultarse en Milutinovic y Trendafiloski (2003) (RISK-UE, W04) (Tabla 2.5).

Tabla 2.5. Grados de daño, según RISK-UE (Milutinovic&Trendafiloski, 2003).

GRADO DE DAÑO	DESCRIPCIÓN CUALITATIVA	DAÑO ESTRUCTURAL	DAÑO NO ESTRUCTURAL
1	Nulo	Sin Daños	Sin daños
2	Leve	Insignificante a Ligero	Ligero
3	Moderado	Ligero	Moderado
4	Extenso	Moderado	Severo
5	Completo	Muy Severo a Colapso	Muy Severo a Colapso

Aplicando las probabilidades de daño que ofrecen las curvas de fragilidad (en combinación con las de capacidad y demanda) y teniendo en cuenta el número de edificios y viviendas de cada entidad poblacional se puede estimar el número de edificios y viviendas que tendrán cada tipo de daño aplicando la siguiente expresión:

$$N_{dsj}^{Ti} = P_{dsj}^{Ti} \cdot N^{Ti} \quad [2.11]$$

donde:

$P_{dsj}^{Ti}$  es la probabilidad de que las estructuras tipo  $T_i$  sufran o superen el grado  $ds_j$  de daño.

$N^{Ti}$  es el número de edificios tipo  $T_i$  que hay en la referencia catastral.

$N_{dsj}^{Ti}$  es el número de edificios de la tipología  $T_i$  que se estima que han sufrido el grado  $ds_j$  de daño.

### 2.4.2.4 CUANTIFICACIÓN DEL DAÑO EN LA REGIÓN DE MURCIA

*Elección de las curvas de capacidad y fragilidad*

Como se mencionó anteriormente, la elección de las curvas que representen el comportamiento de los edificios que conforman el parque mobiliario de la región es fundamental para la estimación del daño físico mediante métodos analíticos en un estudio de riesgo. Sin embargo, existe una grave falta de curvas de capacidad y fragilidad disponibles de manera abierta para la realización de estudios de riesgo a gran escala.

Debido a esta necesidad, Lang and Jaiswal (2011) han presentado una propuesta para iniciar la recolección, recopilación y publicación de este tipo de información alrededor del mundo en una plataforma web, mediante un proyecto llamado WHE-PAGER. Este proyecto está bajo desarrollo actualmente.

Para analizar el comportamiento de las estructuras ante un movimiento sísmico, existen actualmente en la literatura curvas de capacidad y fragilidad desarrolladas por las metodologías Hazus (Fema-440, 2005) y Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003) para diferentes tipologías estructurales; la primera para edificaciones de los Estados Unidos de América y la segunda para edificaciones europeas. En el año 2006, Lagomarsino y Giovinazzi (en adelante L&G), miembros integrantes del grupo de trabajo del Proyecto Risk-UE, presentaron un estudio en el cual calibraron y estandarizaron las curvas del Risk-UE para los países europeos.

Con el fin de que el parque inmobiliario de la comunidad donde se ha llevado a cabo el estudio quedara lo mejor caracterizado posible, se ha establecido una correspondencia entre la clasificación de vulnerabilidad realizada para la base de datos del estudio, con la de la metodología Hazus y las dos que han sido especialmente diseñadas para edificios de Europa: la del método LM2 de Risk-UE y la de L&G (2006) (Tabla 2.6).

Tabla 2.6. Correspondencias entre los modelos de tipologías constructivas de Hazus, Risk-UE y L&G. (Nota: se han resaltados las tipologías empleadas en este estudio y se ha indicado su nomenclatura)

Descripción Hazus	Hazus	RISK-UE	L&G	Descripción Risk-UE y L&G
Madera, Marco ligero (<=5000 sq. ft.) Madera, mayor a 5000 sq. ft.	W1	W	-	Estructuras de madera
Marcos de acero resistentes a momento	S1	S1	-	Marcos de acero resistentes a momento
Marcos de acero diagonal	S2	S2	-	Marcos de acero diagonal
Marcos de acero ligero	S3	-	-	
Marcos de acero con muros cortantes de hormigón vaciado en sitio.	S4	S4	-	Marcos de acero con muros cortantes de hormigón vaciado en sitio.
Marcos de acero con paredes de mampostería sin reforzar	S5	S3	-	Marcos de acero con paredes de mampostería sin reforzar
Forjados de hormigón armado resistentes a momento.	C1	RC1	RC1	Forjados de hormigón armado resistentes a momento.
Muros cortantes de hormigón	C2	RC2	RC2	Muros cortantes de hormigón
<b>Forjados de hormigón con paredes de mampostería sin reforzar</b>	<b>C3</b>	<b>RC31</b>	-	<b>Marcos de Hormigón armado rellenos con paredes de mampostería sin reforzar.</b>
Paredes de hormigón pre-fabricado levantado en sitio.	PC1	RC5	-	Paredes de hormigón pre-fabricado levantado en sitio.
Forjados de concreto prefabricado con muros cortantes de hormigón.	PC2	RC6	-	Forjados de concreto prefabricado con muros cortantes de hormigón.

Muros portantes de mampostería reforzada con diafragmas de Madera o de láminas metálicas.	RM1	M4	M7	Mampostería reforzada o confinada
Muros portantes de mampostería reforzada con losas de concreto pre-fabricado.	RM2	M4	M7	Mampostería reforzada o confinada
<b>Muros portantes de mampostería sin reforzar</b>	<b>URM</b>	M2 M31, M32, M33	M2 M5	Adobe <b>Mampostería sin reforzar (todos los tipos de bloques)(M2)</b> <b>Mampostería sin reforzar (losas de hormigón armado)(M3)</b>
Casas móviles	MH	-	-	
	-	M11	M1	<b>Escombros de piedra (M1)</b>
	-	M12	M3	Piedra simple
	-	M13	M4	Bloques de Piedra
	-	S5	-	Sistemas de Acero y Hormigón armado.
	-	RC4	RC3	Sistemas duales de hormigón armado
	-	M5	-	Mampostería sobre-reforzada

No obstante, la comparación entre las curvas proporcionadas por las tres metodologías no es directa, dadas las diferencias que presentan en la clasificación de las tipologías.

En las tres metodologías, los edificios de mampostería y hormigón se clasifican según su altura en las clases de vulnerabilidad low, medium y high. Todas establecen la mampostería de 1-2 pisos como low, de 3-5 como medium y más de 6 pisos como high. En cuanto a los edificios de hormigón, Hazus y L&G establecen como low los de 1-3 plantas, medium de 4-7 plantas y high más de 8 plantas, pero Risk-UE mantiene el mismo número de pisos que en el caso de la mampostería.

Otra diferencia importante es que Hazus agrupa todos los tipos de mampostería sin reforzar en un solo modelo (URM), y presenta otros dos modelos para la mampostería reforzada (RM1 y RM2), mientras que Risk-UE y L&G dividen la mampostería de acuerdo al material utilizado o elementos estructurales que presentan los edificios (piedra, ladrillo, mampostería sin reforzar con forjados de madera, forjados de hormigón, etc.) y proponen un solo modelo para la mampostería reforzada y confinada (M4 y M7 respectivamente).

Para poder elegir cuales son las curvas que mejor se ajustan a la región, se ha realizado una simulación del terremoto de Lorca, aplicando diferentes curvas de capacidad y fragilidad, en concreto las publicadas por Lagomarsino y Giovinazzi (2006) y Risk-UE para los edificios de mampostería y las publicadas por Risk-UE y FEMA-440 para edificios de hormigón armado (Tabla 2.7)

Tabla 2.7. Origen de las curvas de capacidad y fragilidad analizadas.

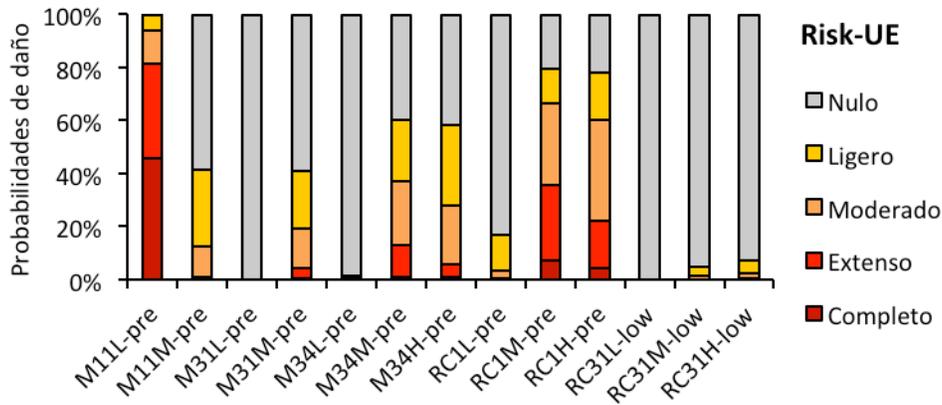
Edif. de Mampostería	Edif. Hormigón armado
Lagomarsino y Giovinazzi (2006) Risk-UE	Risk-UE FEMA-440

Las edificaciones existentes en la localidad estudiada pueden clasificarse en cuatro grupos de tipologías constructivas: tres tipos de mampostería y uno de hormigón armado. Éstos, a su vez, se subdividen de acuerdo a su altura y código de diseño, dando un total de trece tipologías constructivas que se describen en la Tabla 2.8.

**Tabla 2.8.** Tipologías estructurales presentes en el municipio de Lorca.

Tipología (nomenclatura del estudio)	Descripción	Número de pisos
M11	M11L	1-2
	M11M	3-5
M31	M31L	1-2
	M31M	3-5
	M34L	1-2
M34	M34M	3-5
	M34H	≥ 6
	RC31L-pre	1-3
	RC31M-pre	4-7
RC31	RC31H-pre	≥ 8
	RC31L-low	1-3
	RC31M-low	4-7
	RC31H-low	≥ 8

Antes de realizar la simulación, se analizaron las probabilidades de daño que ofrecían las distintas curvas de capacidad y fragilidad ante un mismo input sísmico. En estas probabilidades se observaron ciertas inconsistencias en las curvas RISK-UE para edificaciones de mampostería y hormigón. En la Figura 2.18 se muestra un ejemplo de las probabilidades de daño de varias tipologías para un mismo input sísmico.



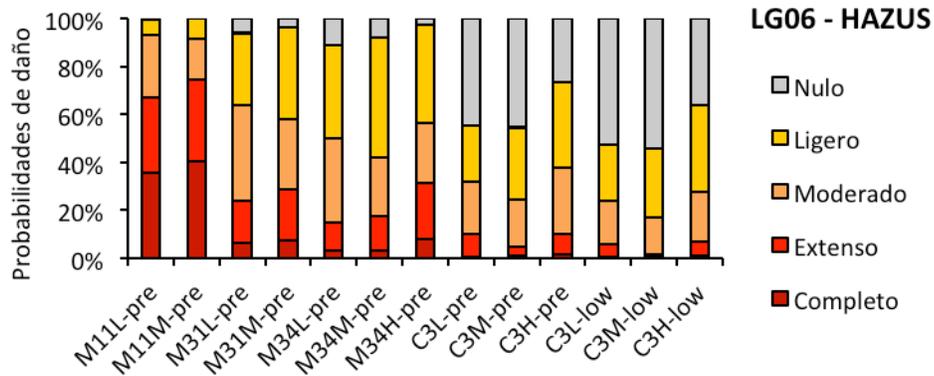


Figura 2.18. Probabilidades de daño para las tipologías constructivas existentes en Lorca, evaluadas para un mismo input sísmico.

Se observa que, para las curvas de Risk-UE, la tipología M11 presenta una diferencia de daños muy grande con respecto a la tipología M31, la cual presenta un resultado sin ningún tipo de daño, mientras que el hormigón armado presenta mayores probabilidades de daño que la mayor parte de los edificios de mampostería ante el mismo input sísmico, lo que a priori parece incongruente. Esto se debe a que las curvas de capacidad y fragilidad desarrolladas para la metodología de Risk-UE fueron elaboradas por las diferentes instituciones que participaron en el proyecto y esa heterogeneidad se pone aquí de manifiesto.

Por otro lado, HAZUS-MH no presenta en su clasificación tipologías que coincidan con algunas edificaciones de mampostería sin reforzar existentes en Europa, ya que estas tipologías constructivas no son prominentes en los Estados Unidos de América. Risk-UE y L&G (2006) presentan una clasificación más detallada para estos tipos de edificios.

En base a estas observaciones, se adoptaron las siguientes decisiones:

1. Utilizar las curvas de L&G para los edificios de mampostería, debido a su homogeneidad frente a las curvas proporcionadas por RISK-UE, y dado que fueron desarrolladas igualmente para edificaciones existentes en Europa,
2. Utilizar las curvas de HAZUS sólo para las edificaciones de hormigón armado, ya que L&G no tiene en su inventario los datos de capacidad desarrollada para edificios de hormigón armado con paredes de mampostería sin reforzar. Por otra parte, las edificaciones de hormigón armado no resultan tan diferentes en EEUU y Europa.

Para poder desarrollar la simulación del daño observado en el sismo de Lorca, se generaron diferentes simulaciones parciales del movimiento y efecto de sitio. En la Figura 2.19 se presenta un esquema con los pasos desarrollados.

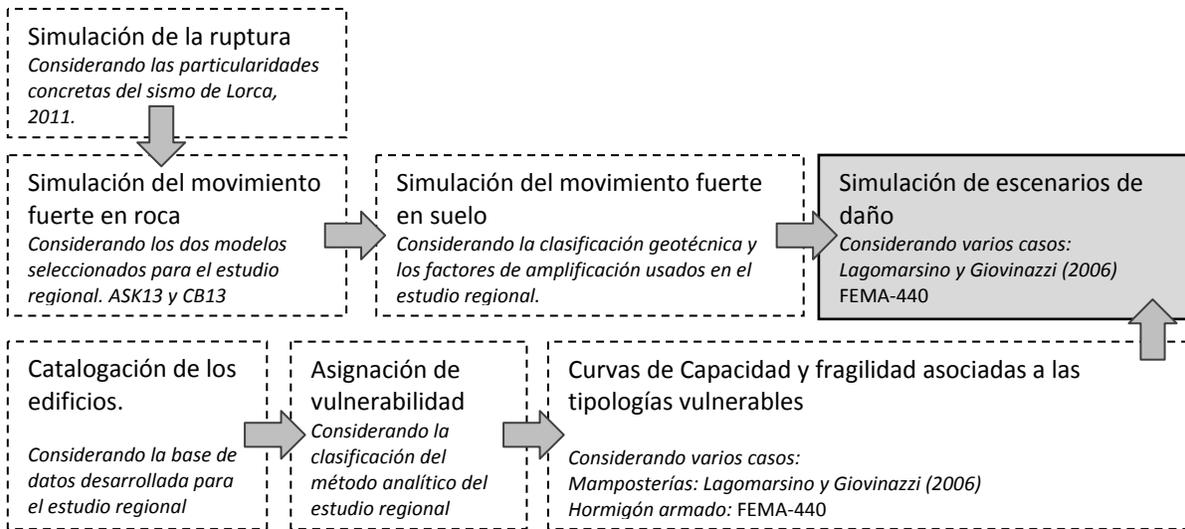
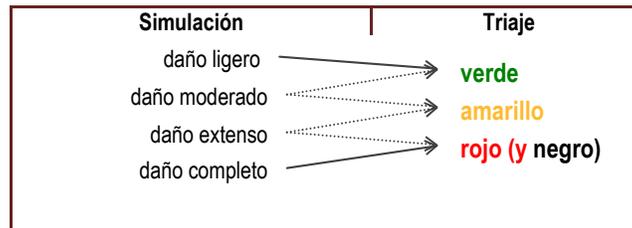


Figura 2.19. Esquema de los procesos desarrollados para hacer la simulación del escenario de daño de Lorca con diferentes curvas de capacidad y fragilidad.

Una vez desarrolladas las distintas simulaciones se compararon los datos obtenidos con la base de datos de los daños reales que ocurrieron en el terremoto, estableciendo relaciones entre los distintos grados de daño de la metodología analítica y el triaje realizado en Lorca tras el terremoto de 2011, diferenciando estados de daño según posible habitabilidad: Verde, Amarillo y Rojo (Tabla 2.9).

Tabla 2.9. Relaciones entre los diferentes grados de daño de las curvas de fragilidad y el triaje usado el Lorca tras el terremoto de 2011.



Para las edificaciones de **Hormigón armado**, los resultados de la simulación muestran menor probabilidad de daño moderado a completo que el observado en el terremoto real, y por consiguiente, una mayor probabilidad de daño leve o despreciable. Se aprecia un mayor ajuste en los resultados de la simulación con respecto a los del terremoto real en los edificios altos (mayores de 8 plantas). Se puede observar que la diferencia de probabilidades de daño para edificios de hormigón sin código de diseño sismorresistente con respecto a la de edificios con bajo nivel de diseño sismorresistente no es tan relevante. Sin embargo, si es relevante la diferencia en cuánto a la altura de los edificios, al estar relacionada con su periodo de natural de vibración. Esto significa que los daños ocasionados por el terremoto tienen mucho que ver con la frecuencia y la proximidad del epicentro. Al comparar los resultados, hay que tener en cuenta que las metodologías utilizadas no contemplan las particularidades de un terremoto concreto, lo que puede explicar gran parte de las diferencias encontradas. La Figura 2.20 muestra los porcentajes

de edificios de hormigón armado dañados como resultado de la simulación, con respecto a los porcentajes de edificios dañados evaluados en el triaje realizado después del terremoto de Lorca del 11 de mayo del 2011.

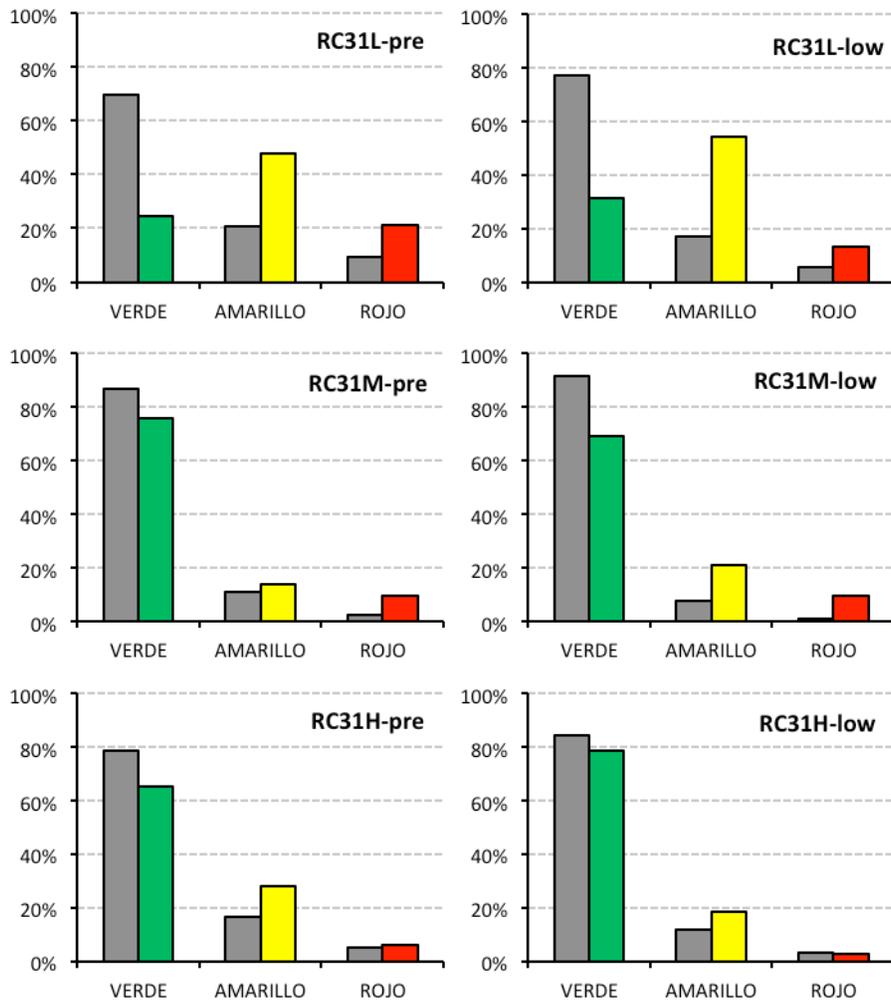


Figura 2.20. Porcentajes de daño de edificios de hormigón armado en Lorca para las tipologías constructivas existentes. Los daños resultantes de la simulación se muestran en color gris; los daños observados en el terremoto real se muestran con su correspondiente color representativo del daño según el triaje realizado tras el terremoto.

Para las edificaciones de Mampostería, se observa que para el caso de la mampostería de escombros de piedra (M11), la simulación muestra un alto porcentaje de edificios con daño completo, que es lo esperado cuando hay un daño considerable en edificios de hormigón armado, mientras que en la realidad se observó que para el caso de la mampostería de piedra de edificios de mediana altura el número de edificios con daño completo fue nulo o menor al de los edificios de hormigón. Esto pone de manifiesto nuevamente las características especiales del terremoto de

Lorca, posiblemente debido a factores como la directividad del movimiento y la resonancia del suelo, ajenos a los métodos existentes de estimación del daño de las estructuras. La mampostería tipo M34 presenta un mejor comportamiento tanto en la simulación como en lo ocurrido durante el terremoto; esto se debe a que este tipo de mampostería tiene mayor resistencia debido a que está constituida por forjados de hormigón. La Figura 2.21 muestra los porcentajes de edificios de mampostería dañados resultantes de la simulación con respecto a los porcentajes de edificios dañados evaluados en el triaje realizado tras el terremoto de Lorca del 11 de mayo del 2011.

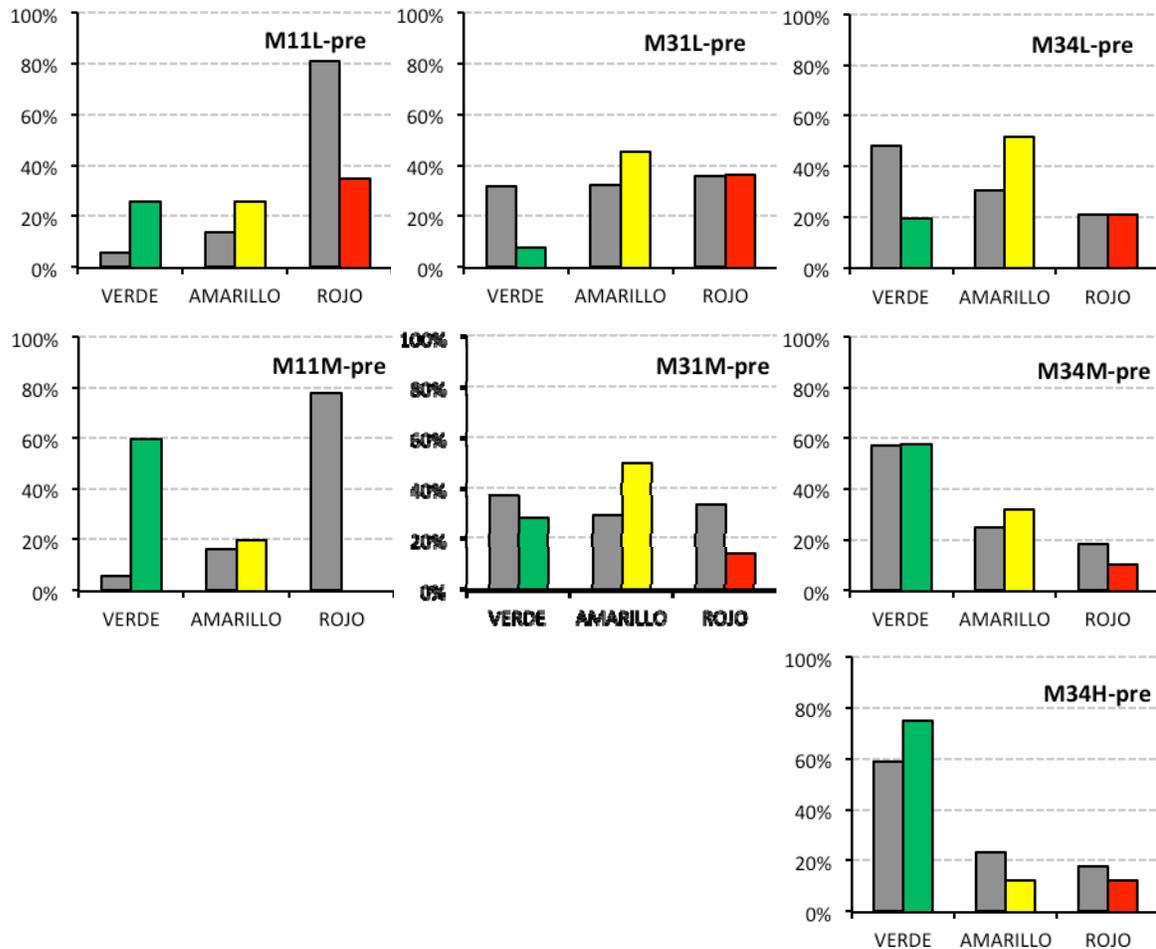


Figura 2.21. Porcentajes de daño de edificios de mampostería en Lorca para las tipologías constructivas existentes. Los daños resultantes de la simulación se muestran en color gris; los daños observados en el terremoto real se muestran con su correspondiente color representativo del daño en el triaje realizado tras el terremoto.

### *Daño por entidad poblacional*

El cálculo del daño esperado en cada entidad poblacional de la Región de Murcia se ha realizado para cada clase de vulnerabilidad (5 clases más diferentes números de plantas), considerando como nivel de movimiento de entrada los reflejados en los mapas de aceleración máxima esperada (PGA) y de las diferentes ordenadas espectrales estudiadas (periodo de retorno de 475 años).

Se adopta en el estudio la escala de daños y la clasificación de vulnerabilidad de Risk-UE, diferenciando 5 grados de daño (incluyendo daño nulo) y 5 clases de vulnerabilidad (3 de mampostería y 2 de hormigón armado).

En la Figura 2.22 se muestran varios mapas con la distribución de daño en edificios por entidad poblacional obtenida con la escala Risk-UE. Se observa que la mayoría de las entidades muestra más de un 50% de edificios con daño moderado. Además se observa que ciertas entidades al norte, como Yecla, Jumilla y Cieza, así como entidades con gran número de edificaciones al sur, como Rincón de San Ginés, San Antonio de Abad y Águilas, presentan casi todos los edificios sin daños ante la acción sísmica y un porcentaje casi nulo de daño completo. Las entidades que presentan mayor porcentaje de edificios con daño extenso a completo son las entidades de los municipios de Murcia, Lorca y Totana.

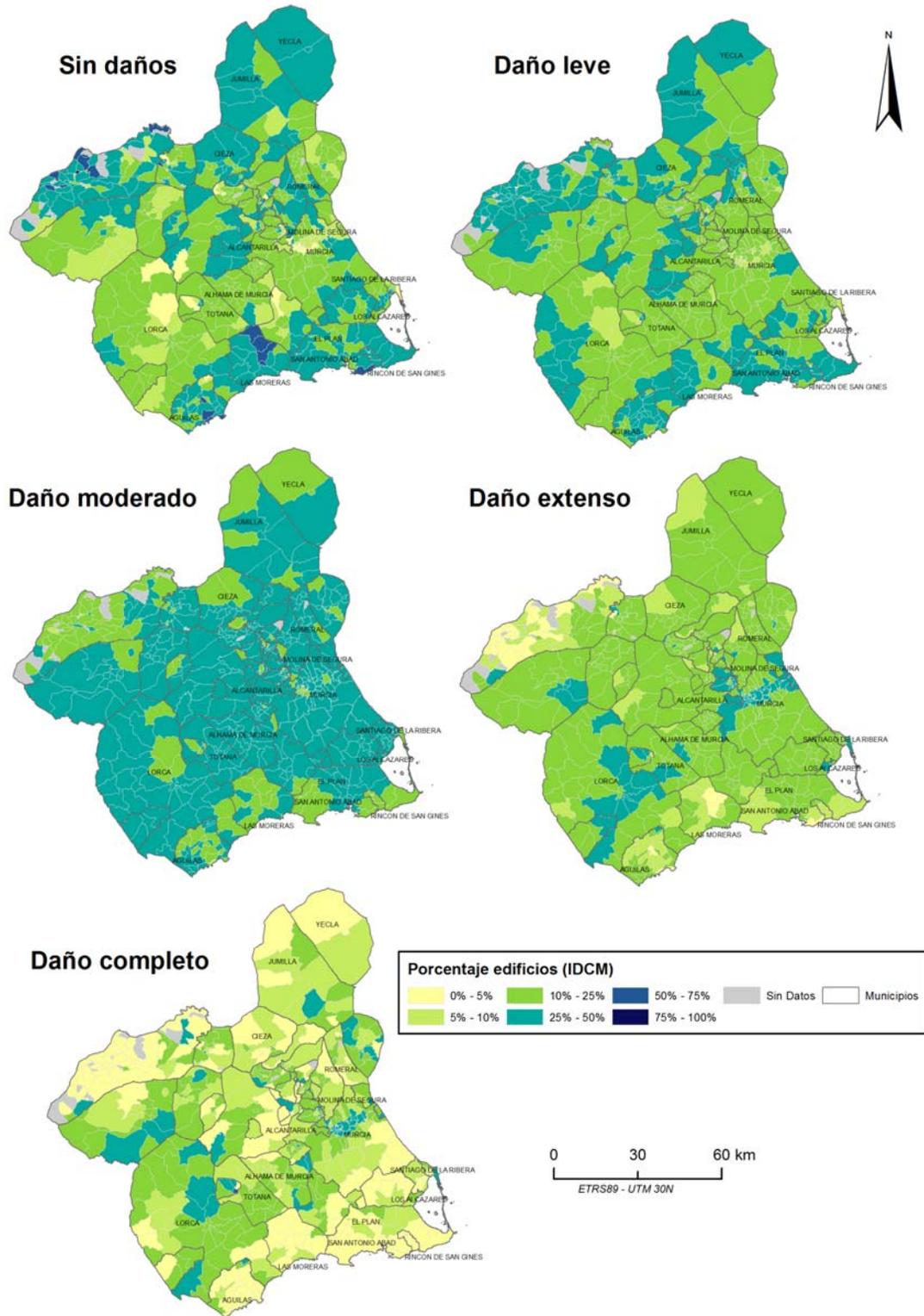


Figura 2.22. Distribución de daño estimada con la escala Risk-UE en la región de Murcia.

## 2.4.3. COMBINACIÓN DE METODOLOGÍAS.

### 2.4.3.1. RELACIÓN ENTRE PARÁMETROS DE DAÑO

El cálculo de las probabilidades de daño para todos los edificios de la Comunidad de la Región de Murcia fue realizado individualmente con las dos metodologías antes descritas y cuyos resultados se han mostrado en los apartados anteriores. Estas dos metodologías se combinan en un árbol lógico, con un mismo factor de ponderación, para la estimación del daño final y los demás parámetros de riesgo.

La metodología de la escala EMS-98 describe 6 grados de daño, que oscilan desde el Daño 0 al Daño 5, y representan a su vez los porcentajes de daño nulo (o edificios sin daño), daño leve, moderado, fuerte, muy fuerte y colapso, respectivamente, mientras que los grados de daño de la metodología RISK-UE, están clasificados en 5 estados de daño: Leve, Moderado, Extenso, Completo y Edificios Sin daños.

La manera en que se relacionan estos grados de daño ha sido evaluada y publicada en diversos estudios, entre los cuales destaca el estudio realizado por Hill & Rosetto (2008) y Milutinovic & Trendafiloski (2003) (RISK-UE, W04). Las relaciones se muestran en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Grados de daño y correspondencia entre diferentes escalas.

Grado de daño	EMS-98	Risk-UE (LM2)	Descripción
0 (D0)	Ninguno	Ninguno	Sin daños
1 (D1)	Leve	Leve	Daño ligero o despreciable
2 (D2)	Moderado	Moderado	Daño estructural leve, no estructural moderado.
3 (D3)	Fuerte	Extenso	Daño estructural moderado, no estructural fuerte.
4 (D4)	Muy fuerte	Completo	Daño estructural fuerte, no estructural muy fuerte.
5 (D5)	Colapso		Daño estructural muy fuerte, colapso total o cerca del colapso.

Esta diferencia en la escala de daño se tuvo en cuenta a la hora de calcular el número de edificios resultante para cada estado de daño, por lo que se agrupó el daño D4 y D5 de la metodología EMS-98 y se equiparó la agrupación al daño completo de RISK-UE, para poder relacionar los daños de ambas metodologías al introducirlos en el árbol lógico.

Por lo tanto, la escala de daño final EMS-98 tras la agrupación hecha distingue 5 tipos de daño (Nulo, Ligero, Moderado, Extremo y Completo), al igual que la escala de daño de Risk-UE.

En la Figura 2.23 se muestran los porcentajes de edificios con diferentes tipos de daño según la escala EMS-98, tras la agrupación hecha para equiparar los grados de daño a los de la escala RISK\_UE, de modo que puedan ser combinados ambos mapas en un árbol lógico para obtener los mapas finales de daños. En la Figura 2.24 se muestra la distribución de daño conjunta con ambas metodologías, obtenida combinando los mapas de las figuras 2.22 y 2.23. Se puede apreciar que al

combinar los resultados de ambas metodologías no se observan grandes cambios con respecto a los mapas resultantes al aplicar las metodologías por separado, es decir, que los resultados de las dos metodologías pueden considerarse bastante robustos.

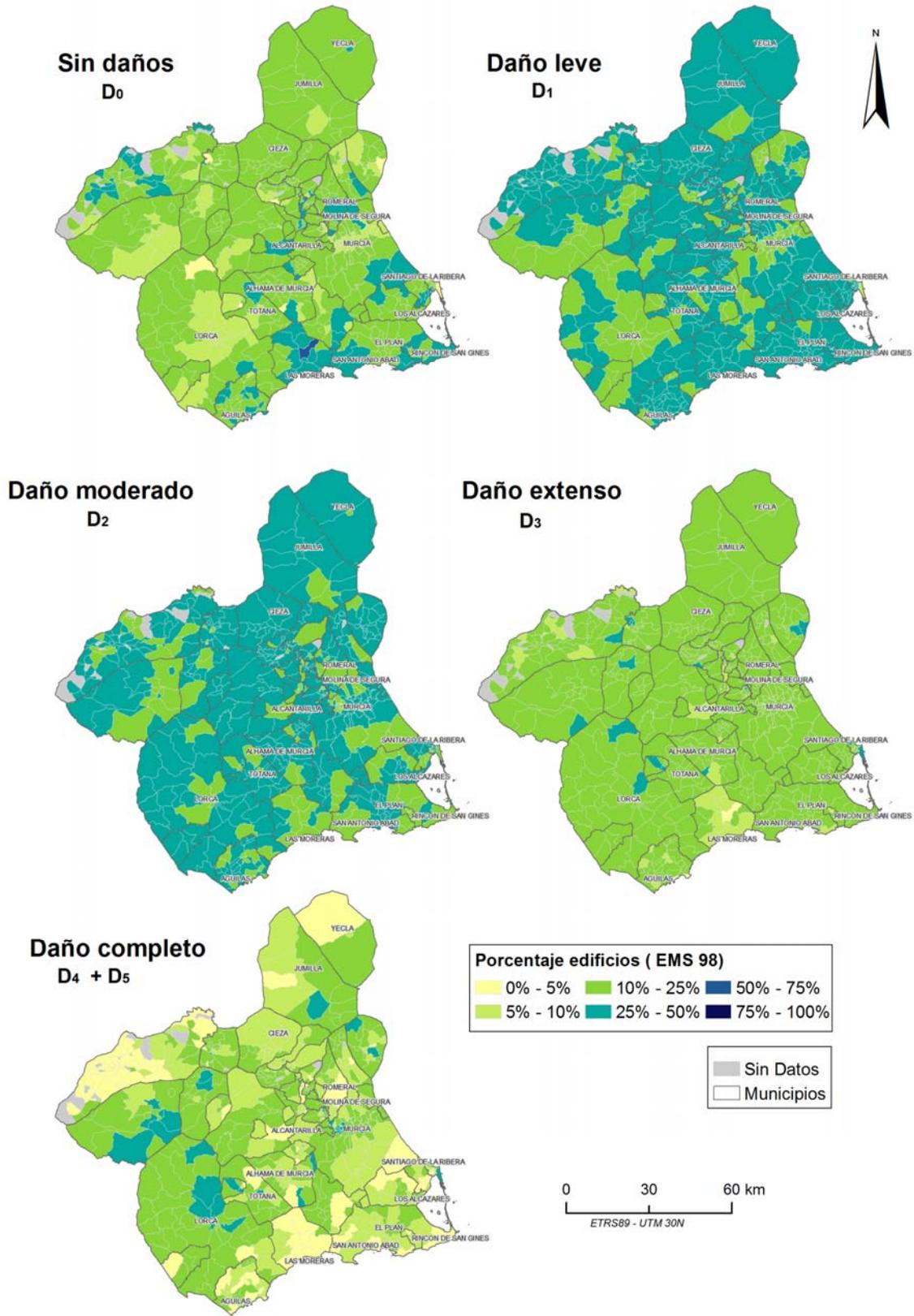


Figura 2.23. Mapas con la distribución de porcentaje de edificios con diferentes grados de daño con la escala RISK-UE-

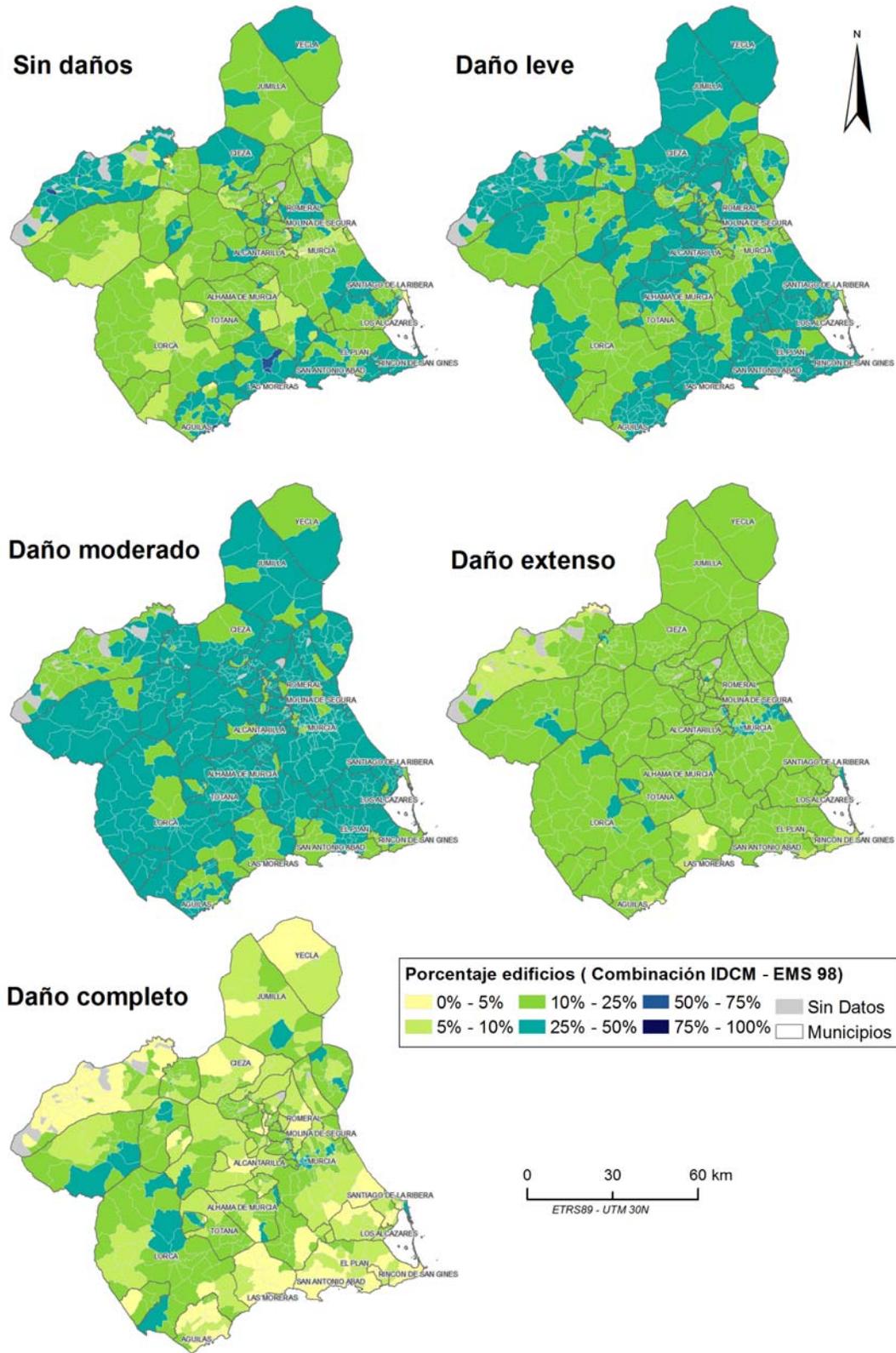


Figura 2.24. Mapas con la distribución de porcentaje de edificios con diferentes grados de daño , obtenidos por combinación de las metodologías EMS-98 y RISK-UE.

## 2.5 OTROS PARÁMETROS DE RIESGO

---

### 2.5.1 INTRODUCCIÓN

Ante un evento sísmico, además del daño físico que afecta a los edificios, existen otros factores de gran importancia en cuanto a los daños ocasionados por el sismo, debido a las consecuencias políticas y económicas que pueden traer estas pérdidas a la sociedad y al estado. Éstos factores son, principalmente, las personas afectadas, desde víctimas mortales hasta heridos que requerirán atención médica, las viviendas inhabitables y las personas que quedarían sin hogar, y finalmente las pérdidas económicas asociadas a los costes que supondrá la reconstrucción y reparación de las edificaciones dañadas.

Todos estos parámetros se pueden estimar aproximadamente, a partir de los resultados de distribución de daños y el porcentaje de edificios colapsados. Para esto se utilizan métodos que implican factores empíricos que han sido obtenidos a través del estudio de terremotos previos.

## 2.5.2 NÚMERO DE EDIFICIOS QUE ALCANZARÁN EL COLAPSO

El número de edificios que alcanzarán el colapso es un dato de gran interés en la gestión de la emergencia y en la estimación de otros parámetros de riesgo, como por ejemplo las pérdidas humanas. En el caso de la escala EMS-98, estos edificios corresponden al número de edificios con **Daño 5**. En el caso de la escala RISK-UE, hay que obtener este valor a partir del número de edificios con daño completo. En el caso de los edificios de mampostería, se seguirá la expresión propuesta por Lagomarsino & Giovinazzi (2006) (autores de las curvas utilizadas):

$$P_{S4} = P_3 + P_1 \quad [2.12]$$

donde  $P_{S4}$  representa el porcentaje de edificios con grado de daño completo,  $P_4$  el porcentaje de edificios que sufrirán daño fuerte y  $P_5$  el porcentaje de edificios colapsados.

El porcentaje de edificios que colapsarán, se calcula mediante la ecuación:

$$P_5 = 0.09 \sinh(0.6\mu_{DS})P_{S4} \quad [2.13]$$

donde  $\mu_{DS} = \sum_{k=1}^4 k P_{Sk}$

En el caso de edificios de hormigón armado, el número de edificios colapsados se estimó siguiendo la metodología propuesta por Hazus (autores de las curvas utilizadas), siendo este igual al 15% de los edificios con daño completo.

En la Figura 2.25 se muestra un mapa con el número de edificios que alcanzarían el colapso por entidad poblacional, ante el movimiento representativo de la peligrosidad sísmica para periodo de retorno de 475 años.

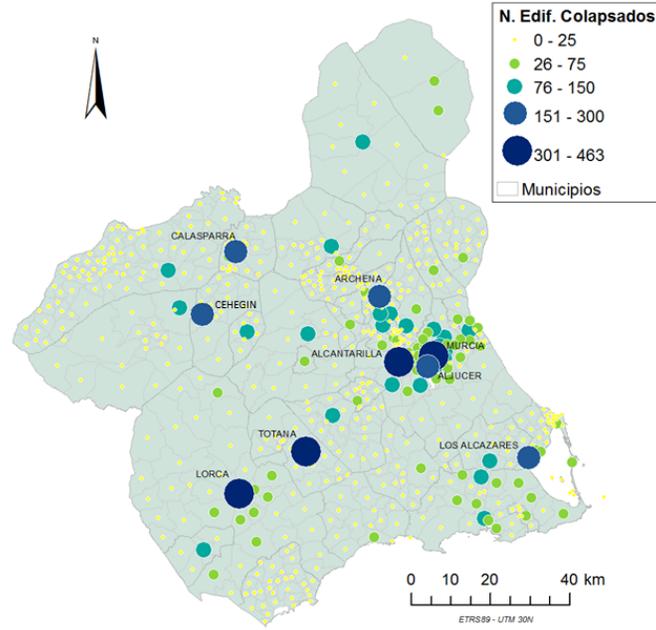


Figura 2.25. Mapa con el número de edificios que alcanzarían el colapso por entidad poblacional , ante el movimiento representativo de la peligrosidad sísmica para periodo de retorno de 575 años.

### 2.5.3 DAÑO MEDIO

El daño medio  $D_m$  es un parámetro de medida del daño en edificios que fue empleado en el estudio RISMUR I, que toma valores que varían entre 0 - 5, siendo 0 el equivalente a daño nulo (daño 0 en EMS-98) y 5 el equivalente a colapso (daño 5 en EMS-98). La expresión general utilizada en RISMUR I fue:

$$D_m = \sum_{i=0}^5 P_{ij} \times D_i \quad [2.14]$$

Para asemejar este parámetro a la nueva escala de daño, este se calculará mediante la expresión:

$$D_m = 0 \cdot D_{nulo} + 1 \cdot D_{daño1} + 2 \cdot D_{moderado} + 3 \cdot D_{extremo} + 4 \cdot D_{catastrófico} - Colapso + 5 \cdot Colapso \quad [2.15]$$

En la Figura 2.26 se muestra un mapa con la distribución de Daño medio ( $D_m$ ) por entidad poblacional. Como puede observarse, los valores más altos de este parámetro alcanzan el valor de 3 para entidades poblacionales con pocos edificios catalogados.

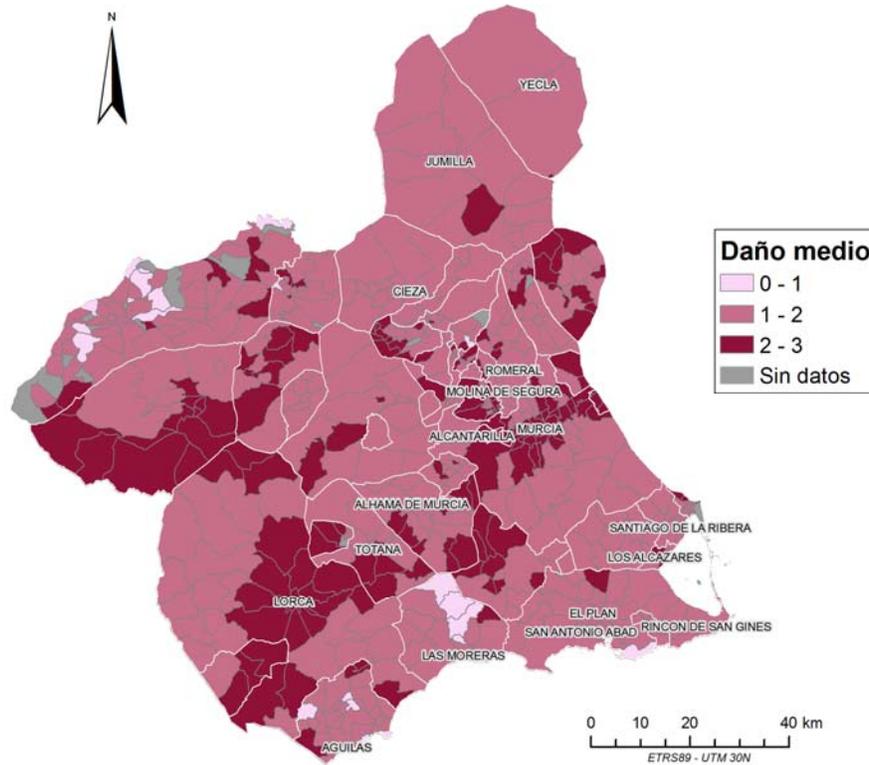


Figura 2.26. Mapa con la distribución de daño medio (Dm) por entidad poblacional.

## 2.5.4 VIVIENDAS INHABITABLES Y PERSONAS QUE QUEDARÍAN SIN HOGAR

Para poder cuantificar cómo puede afectar la acción sísmica esperada en la Región de Murcia a la infraestructura de habitabilidad de la región se ha estimado el número de viviendas que quedarían inhabitables, así como el número de personas que quedarían sin hogar.

Para estimar el número de viviendas inhabitables se ha considerado la siguiente expresión empírica (Vacareanu et al, 2004) (RISK-UE, W07, p18), donde se calcula el número de edificios inhabitables por tipología:

$$N_{viv\ inh} = N_{viv_u} \cdot PC + N_{viv_m} \cdot PC + N_{viv_m} \cdot PE \cdot 0,9 \quad [2.16]$$

donde:

$N_{viv\ inh}$  es el número de viviendas inhabitables

$N_{viv_u}$  y  $N_{viv_m}$  son el número de viviendas en edificios unifamiliares y multifamiliares que hay en cada entidad poblacional, respectivamente.

PC y PE son las probabilidades de daño completo y extensivo, respectivamente.

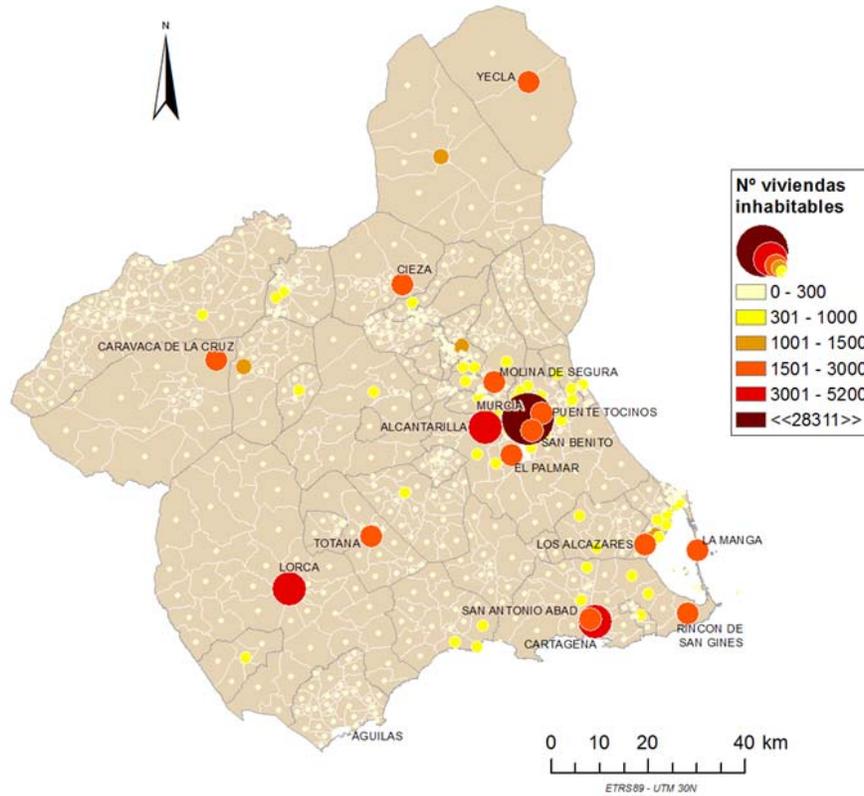


Figura 2.27. Mapa con la distribución del número de viviendas inhabitables por entidad poblacional.

Para estimar las personas que quedarían sin hogar se ha multiplicado el número de habitantes por vivienda por el número de viviendas inhabitables.

$$Hab\ SH = N_{viv\ inh} \cdot hab/viv \quad [2.17]$$

donde:

Hab SH habitantes que quedarían sin hogar

$N_{viv\ inh}$  es el número de viviendas inhabitables

$hab/viv$  es el número de habitantes por vivienda (medio en cada municipio).

Para hacer esta estimación se ha considerado la distribución y cuantificación de la población permanente, ya que la inhabilitación de una vivienda secundaria no conllevaría dejar a personas sin hogar.

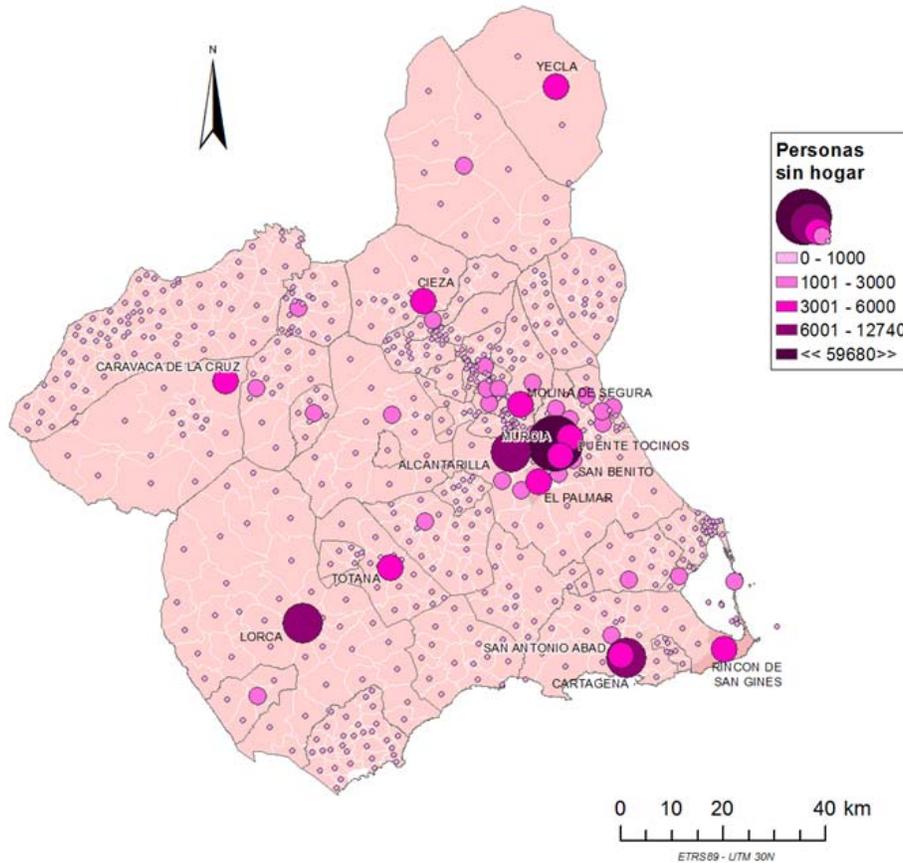


Figura 2.28. Mapa con la distribución de personas sin hogar por entidad poblacional.

## 2.5.5 PÉRDIDAS HUMANAS

En este apartado, se pretende hacer la estimación del número de víctimas esperadas en función del colapso de viviendas que resulta de la estimación del riesgo, la densidad de población y la intensidad esperada. Para ello se utilizará el modelo empírico de Coburn y Spence, 2002. Estos autores, establecieron una serie de coeficientes (M1 a M4) que reflejan los factores de los que depende el número final de muertos y heridos tras un terremoto. Esta metodología no supone que todas las personas que pueden encontrarse en un edificio colapsado mueren, sino que incluye una serie de factores implicados como la hora del día a la que suceda el sismo o la atención médica que reciben los heridos. Para ello se utiliza la expresión:

$$K_i = C * M1 * M2 * M3 * (M4 + M5 * (1 - M4)) \quad [2.18]$$

Donde:

$K_i$  = número de víctimas por tipología constructiva.

C = número total de viviendas colapsadas de tipología i.

**M1. Tasa de ocupación.** Número medio de personas por vivienda.

**M2. % de personas que se encuentran en su vivienda en la hora de ocurrencia del terremoto.** En este caso, al tratarse de un estudio probabilista se considerará una media de los diferentes porcentajes de ocupación.

**M3. % de personas atrapadas por colapso.** Este factor refleja el hecho de que no todas las personas que se encuentran en su vivienda cuando el edificio colapsa quedan atrapadas, debido a que el edificio puede no colapsar completamente o inmediatamente, o a que las personas puedan salir por sus propios medios o con ayuda de otras cercanas que hayan quedado ilesas. La Tabla 2.11 muestra estos porcentajes estimados en función del tipo de edificio y de la intensidad macrosísmica. En este estudio, se supondrá que la peligrosidad sísmica está dominada por sismos próximos (de acuerdo con los análisis de desagregación de la peligrosidad desarrollada en varios trabajos).

Tabla 2.11. Porcentaje medio de personas atrapadas por colapso, dependiendo de la intensidad del movimiento.

TIPO DE EDIFICIO	INTENSIDAD MACROSÍSMICA				
	VII	VIII		IX	X
<u>Edif. Mampostería (hasta 3 plantas)</u>					
No sismorresistentes	5	30		60	70
Sismorresistentes	-	10		30	60
<u>Estructuras de hormigón armado</u>					
Sismo próximo – corto periodo			70		
Sismo lejano – largo periodo			30		

**M4. % de víctimas por colapso.** Un porcentaje de las personas que quedan atrapadas en un edificio que alcanza el grado de daño completo muere y el resto sufren heridas de diferente gravedad, desde daños leves hasta muy graves. Esta distribución se muestra en la Tabla 2.12 y entra en el modelo de estimación de víctimas por medio del término M4.

Tabla 2.12 Porcentaje de víctimas por colapso en diferentes tipologías con distinto tipo de daño físico.

Categoría por tipo de heridos	Mampostería no reforzada	Mampostería	Hormigón armado
Muertos o insalvables	10	20	40
En estado de urgencia	20	30	10
Heridos que requieren hospitalización	30	30	40
Heridos leves	40	20	10

**M5. % de víctimas post-evento.** Las personas atrapadas entre los escombros de los edificios colapsados pueden ser rescatadas y atendidas, evitando así peores consecuencias, algo que depende de la efectividad de la acción post-evento. En la Tabla 2.13 se muestra el porcentaje de personas atrapadas en edificios colapsados que se estima morirán a posteriori en función de la capacidad de acción tras el terremoto. En este estudio, se partirá de una buena respuesta post-evento (tipo 4).

Tabla 2.13. Porcentaje de personas atrapadas entre los escombros que mueren en función de la respuesta post-evento

Tipo	Situación	Mampostería	Hormigón armado
1	Comunidad incapacitada	95	-
2	Comunidad capaz de organizar actividades de rescate	60	90
3	Comunidad con escuadrones de emergencia después de 12 horas	50	80
4	Comunidad con escuadrones de emergencia SAR después de 36 horas	45	70

Una de las particularidades de la región de estudio, debido a su amplia franja costera, es la diferencia de población que hay en algunas de las entidades poblacionales próximas al mar dependiendo de la época del año, llegando en algunos casos a triplicar la población habitual en época vacacional. Esta diferencia en la exposición se ha reflejado en los resultados de riesgo estimando dos estados de exposición máximos: el correspondiente a la ocupación solo de viviendas principales (estado permanente – época invernal) y el correspondiente a la ocupación de viviendas principales y secundarias (estado temporal – época vacacional).

En la Figura 2.29 y Figura 2.30 se muestran los mapas de resultados de víctimas, clasificados en heridos leves, heridos que requieren atención médica, heridos con carácter de urgencia y muertos, para las dos épocas antes mencionadas. Destaca en ambos casos la entidad de Murcia capital, debido a su elevado número de edificaciones y alto grado de peligrosidad sísmica, presentando así un número significativo de edificios colapsados, causante directo de muchas víctimas. En segundo lugar se encuentra la entidad poblacional de Lorca, seguida por Alcantarilla y Totana.

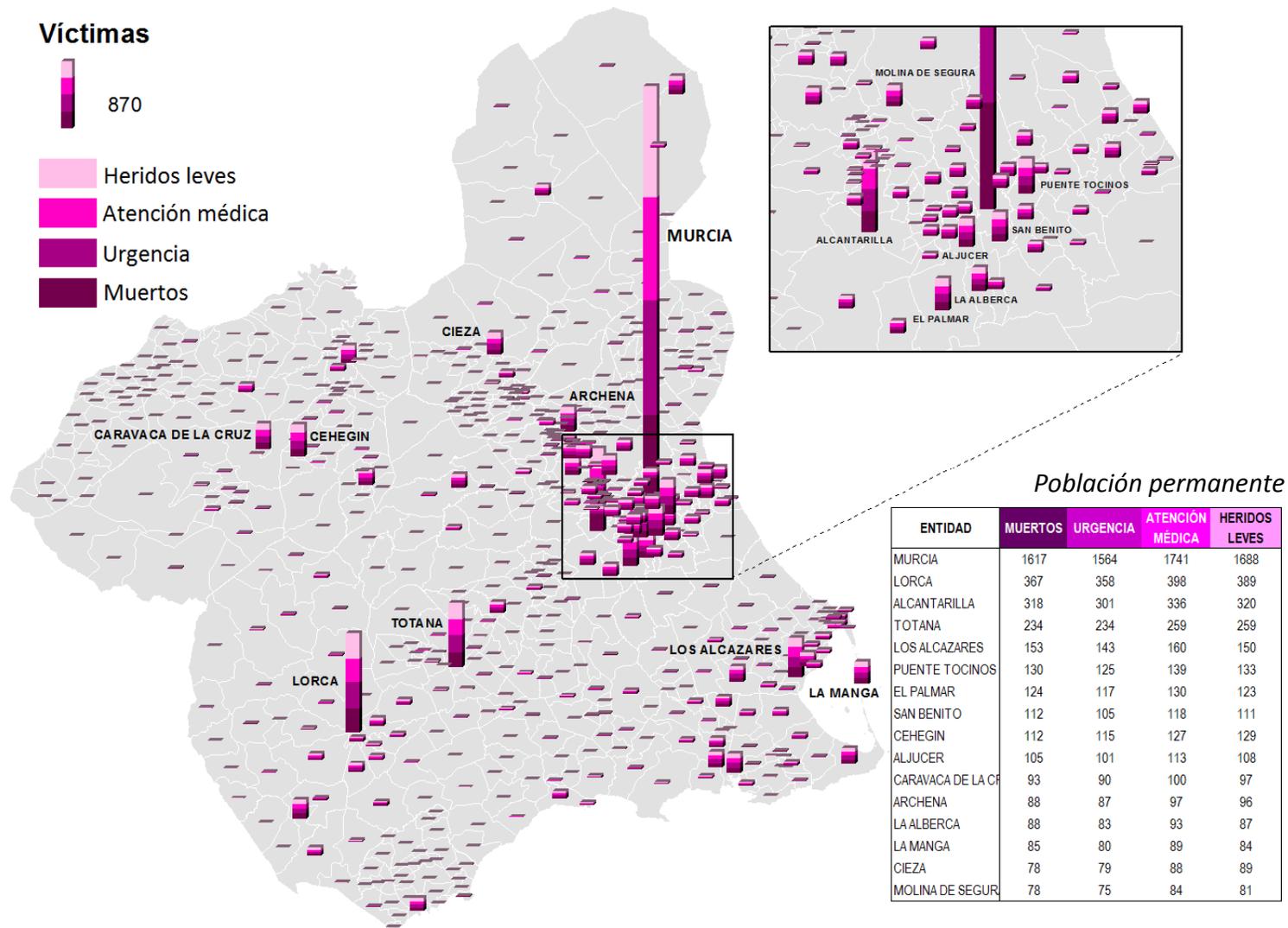


Figura 2.29. Mapa de resultado de víctimas tomando en cuenta la población permanente en cada entidad poblacional. Éstas se dividen en heridos leves, personas que requieren atención médica, heridos con carácter de urgencia y número de muertos.

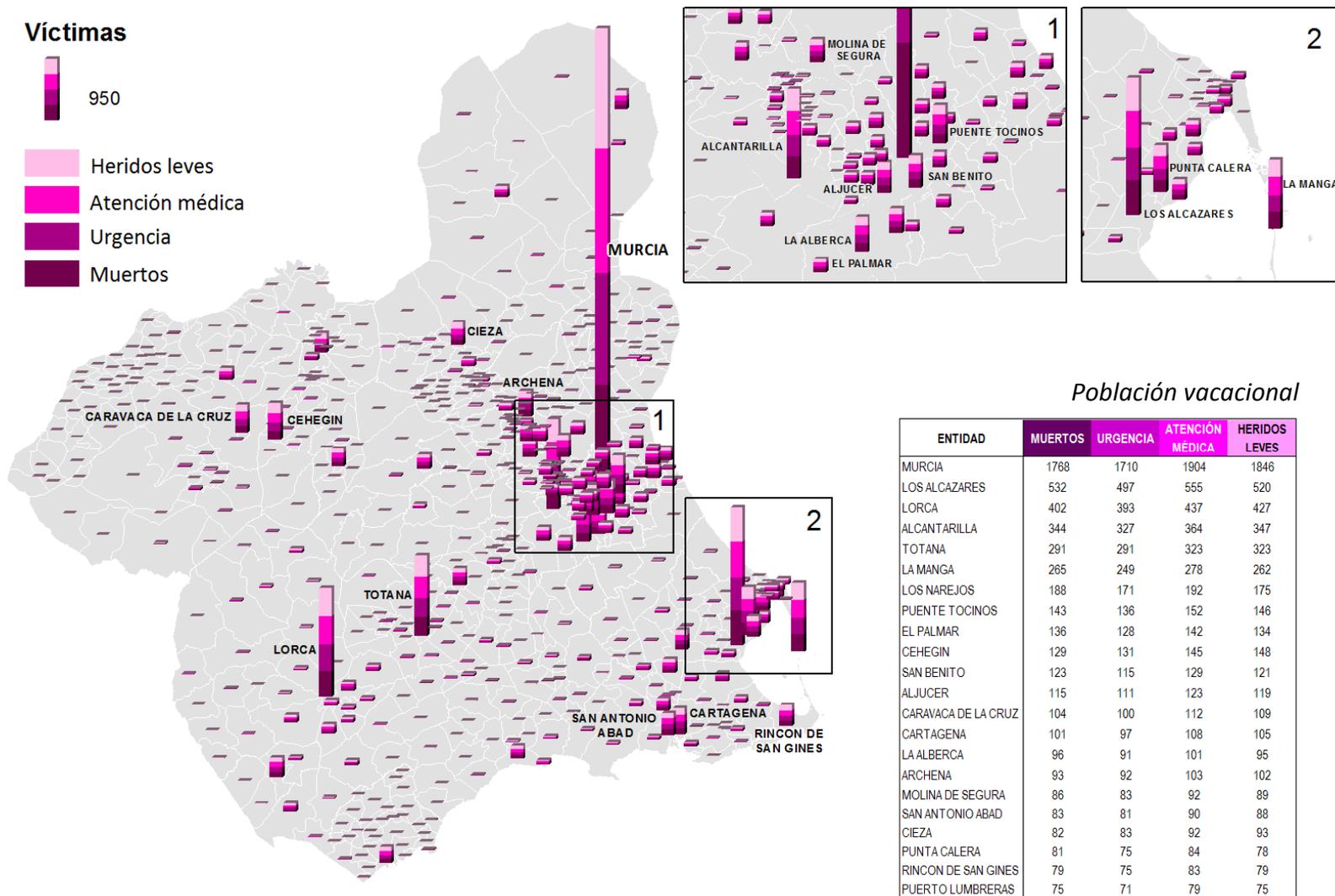


Figura 2.30. Mapa de resultado de víctimas tomando en cuenta la población vacacional en cada entidad poblacional. Éstas se dividen en heridos leves, personas que requieren atención médica, heridos con carácter de urgencia y número de muertos.

## 2.5.6 PÉRDIDAS ECONÓMICAS

Para estimar las pérdidas económicas que supondrían los diferentes grados de daño esperados por la acción sísmica de los próximos 50 años (10% de excedencia) se ha tomado como punto de partida el índice de costes estimados en el sismo de Lorca para reconstrucción y reparación de viviendas (Figura 2.31).

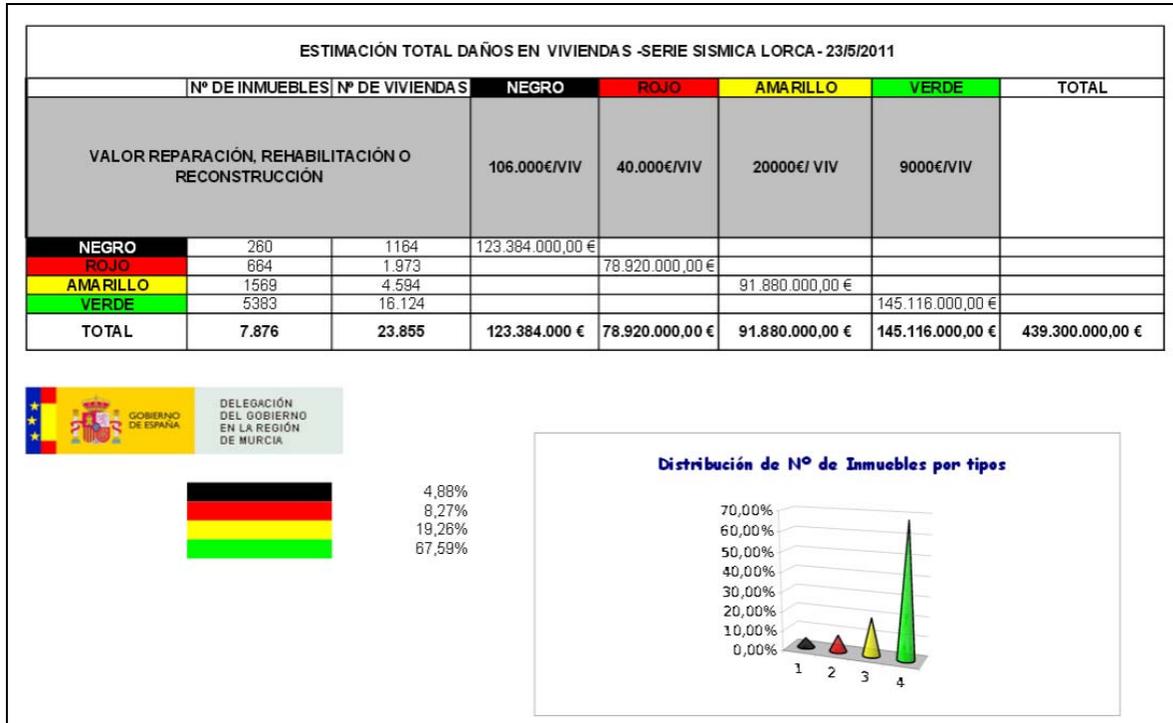


Figura 2.31. Estimación de costes del terremoto de Lorca. Fuente: Delegación del Gobierno en la Región de Murcia.

Estableciendo las relaciones entre los distintos tipos de daño y el triaje utilizado en la comparación entre la simulación del sismo de Lorca y los modelos empleados en este estudio (Tabla XX) se han establecido los diferentes costes esperados para los distintos tipos de daño y se han multiplicado por el número de viviendas con cada tipo de daño. Con este ejercicio se ha podido hacer una valoración global de las pérdidas esperadas en la región debido a la acción sísmica de los próximos 50 años, llegando a un total de 12.700 millones de euros en total.

En la Figura 2.32 se muestra la distribución de costes por entidad poblacional. Los mayores valores se observan en las entidades de Murcia, Lorca, Alcantarilla y Totana.

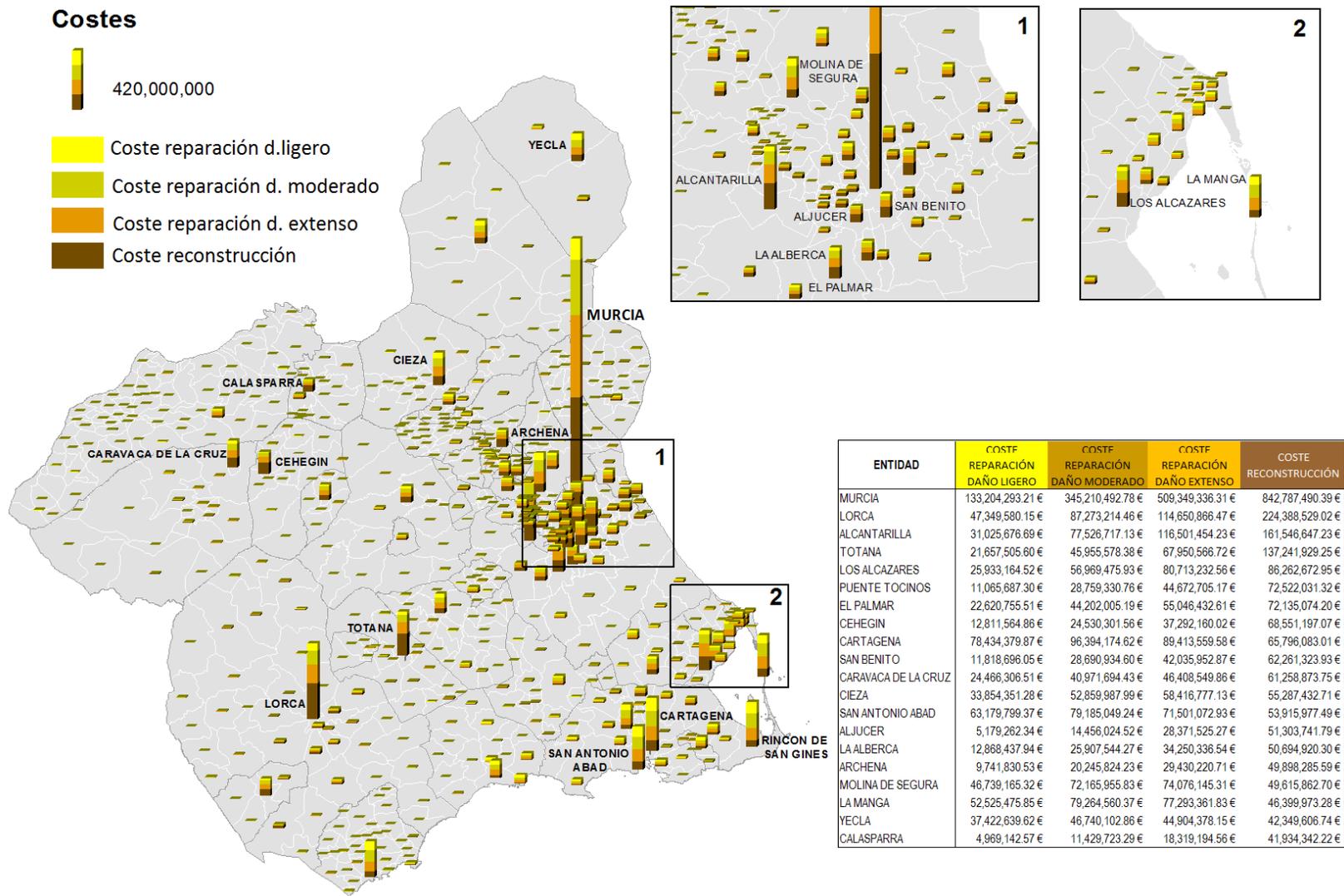


Figura 2.32. Mapa de resultado de costes para cada entidad poblacional de la Comunidad de Murcia.

## 2.6 CONCLUSIONES

---

Las conclusiones generales que se han deducido del Proyecto, pueden clasificarse en grandes bloques, atendiendo a las diferentes fases del trabajo. Se resumen a continuación.

### 2.6.1 SOBRE PELIGROSIDAD SÍSMICA EN SUELO GENÉRICO EN ROCA

- Se ha realizado un análisis de la peligrosidad sísmica en la Región de Murcia siguiendo las técnicas más novedosas del estado actual del arte y empleando la información más actualizada y completa disponible. Se ha empleado una metodología híbrida (MHFZ), considerando como fuentes sísmicas zonas sismogénicas y fallas activas de las que existe suficiente información para ser modelizadas como unidades independientes.
- Los resultados se han combinado en un árbol lógico con los del Nuevo mapa de peligrosidad sísmica de España NMPE para la revisión de la normativa sismorresistente. Como resultado final se han elaborado mapas de aceleración pico PGA y espectrales SA(T) para periodo de retorno de 475 años.
- El mapa de distribuciones de PGA en roca, Figura 1.33, muestra aceleraciones máximas en las zonas próximas a la falla de Alhama de Murcia, donde se alcanzan valores de hasta 0.26 g y en las zonas próximas a la falla de Carrascoy (próxima a la ciudad de Murcia) donde se alcanzan valores de 0.24 g. Otras contribuciones menos significativas de fallas pueden observarse en el extremo oeste de la región, en la falla La Junquera-Manchego, con valores de PGA de 0.18 g y en la parte central de los segmentos (2/3) y (3/3) de la falla Crevillente (sector Murcia). Las menores aceleraciones se esperan en los extremos Noroeste y Sureste de la región, con valores de 0.10 g.
- El mapa de aceleraciones espectrales SA (0.1 s) muestra una morfología muy similar a la del mapa de PGA, concentrándose los valores máximos en las zonas próximas a la falla de Alhama de Murcia y a la falla de Carrascoy. Estas aceleraciones espectrales (que coinciden generalmente con las máximas del espectro de peligrosidad uniforme UHS) alcanzan valores de 0.6 g en ambos casos. En el resto de la región las aceleraciones son menores hasta alcanzar mínimos en el extremo Noroeste con valores de 0.2 g.

- El mapa de SA (0.2 s), Figura 1.35, muestra una distribución de aceleraciones máximas muy similar a las de los mapas anteriores. En este caso las aceleraciones máximas son un poco inferiores que SA (0.1 s), siendo los máximos de 0.5 g en las zonas próximas a la falla de Alhama de Murcia y a la falla de Carrascoy.
- El mapa de distribuciones de SA (0.5 s), Figura 1.36, muestra valores de aceleración muy similares a los de PGA. Una vez más, los valores máximos se encuentran en las zonas próximas a la falla de Alhama de Murcia y falla de Carrascoy, donde se alcanzan valores de 0.28 g.
- El mapa de aceleraciones espectrales SA (1.0 s), Figura 1.37, muestra valores considerablemente menores que los mapas anteriores, algo que se explica porque las aceleraciones de T=1s corresponden ya a la parte mas baja del espectro UHS. Estas aceleraciones son las que afectan de forma más significativa a las edificaciones altas (próximas a 10 plantas) y estructuras más flexibles, con un periodo natural de vibración próximo a 1 s. En este caso las aceleraciones alcanzan valores de 0.12 g en las zonas próximas a la falla de Alhama de Murcia y a la falla de Carrascoy.
- El mapa de aceleraciones espectrales SA (2.0 s), Figura 1.38, muestra la distribución de aceleraciones para el mayor periodo estructural considerado en el estudio, que corresponde a la parte más baja del espectro UHS. Los valores máximos en este caso son de 0.04 g.
- Comparando las aceleraciones estimadas mediante metodología híbrida de zonas y fallas MHFZ, con las del nuevo mapa de peligrosidad sísmica de España, que no considera explícitamente las fallas como unidades independientes (Figura 1.39), se observa que con la primera metodología las aceleraciones son muy superiores en el entorno de las fallas, decreciendo bruscamente al separarnos de ellas, lo que coincide con observaciones de sismos recientes, entre ellos Lorca 2011. En algunos casos las aceleraciones llegan a duplicarse en el entorno de las fallas, lo que puede tener importante incidencia en el riesgo de poblaciones cercanas.

## 2.6.2 SOBRE PELIGROSIDAD SÍSMICA INCLUYENDO EL EFECTO LOCAL

- Los suelos de la Región de Murcia presentan comportamientos sísmicos muy variables, lo que hace que el efecto local cobre especial importancia en la predicción del movimiento del suelo. En este estudio se ha partido de la clasificación geotécnica que se realizó para el anterior estudio de RISMUR I, Figura 1.40, en el que la clasificación de los materiales está basada fundamentalmente en criterios geológicos y zonación geotécnica, distinguiéndose 6 clases (A,B,C,D,E,F).

- En la asignación de factores de amplificación en ese estudio RISMUR II se han empleado especificaciones del NEHRP (2009) sobre la PGA y sobre las ordenadas espectrales para largos y cortos periodos del movimiento y para cada tipo de suelo definido ( Tabla 1.20). Teniendo en cuenta el comportamiento no lineal del suelo, que amplifica proporcionalmente más los movimientos débiles que los fuertes, estos factores dependen de la aceleración de entrada. Sus valores oscilan, dependiendo de la clase de suelo, entre 1 y 2.5 para la PGA y ordenada espectral de corto periodo SA(0.1s) y entre 1 y 3.5 para la ordenada espectral de largo periodo , SA(1 s).
- La combinación de los mapas obtenidos previamente en roca, con el de clasificación geotécnica (Figura 1.40) ha llevado a obtener los mapas finales de peligrosidad incluyendo el efecto local. ( Figura 1.41 (PGA y SA(0.1s), Figura 1.42 (SA(0.2s) y SA(0.5s) ) y **Figura 1.43** (SA(1s) y SA(2s)). Comparando estos con los mapas en roca se aprecia una subida general de los valores de aceleración, pasando de máximos de 0.26 g para roca a 0.36 g con efecto local en el caso de la PGA. Esto mismo ocurre para el resto de ordenadas espectrales, llegando hasta valores máximos de aceleración de 0.90 g para el caso de SA de (0.1 s) y SA(0.2 s), de 0.70 g para SA (0.5 s) y de 0.36 g y 0.20 g para el caso de SA (1.0 s) y SA(2.0 s) respectivamente.
- Además de los mapas anteriores, se han calculado espectros de peligrosidad uniforme UHS en los núcleos de población de más de 30.000, que son mostrados en la Figura 1.44. Se observa que el UHS correspondiente a la ciudad de Alcantarilla supera para todos los periodos a los espectros de los otros núcleos de población considerados en la parte superior de la figura. En el caso de Cartagena, su espectro queda claramente por debajo de los demás para los cortos periodos, quedando próximo al espectro de Murcia para SA (1.0 s). Los UHS de las ciudades de Aguilas, Mazarrón y Yecla son prácticamente coincidentes y quedan claramente por debajo de los espectros de las demás ciudades representadas en la parte inferior de la figura. Esto es debido fundamentalmente al tipo de suelo considerado. El espectro en Totana es en este caso el espectro que queda por encima de los demás hasta periodos de 1.0s.

### 2.6.3 SOBRE LA EXPOSICION EN LA REGIÓN

- Según la información registrada en la Dirección de Catastro (fuente: ficheros CAT Tipo 15), la región de Murcia cuenta con un parque inmobiliario de 1.779.164 unidades. Estas unidades se han agrupado, según el código catastral, en 899.323 unidades constructivas (UC). En la Figura 2.5 se muestran gráficas con el uso de cada unidad (registrada) para entornos urbanos y rurales.

- Atendiendo al tipo de uso de las unidades constructivas (UC), se ha procedido a diferenciar “Viviendas” de “Edificios”. En total se han censado 777.917 viviendas y 392.168 edificios en la región de Murcia.
- La Figura 2.9 muestra el número de edificios y viviendas construidos por en la Comunidad de la Región de Murcia. En ambos casos se puede apreciar un incremento en la construcción de edificios urbanos a partir de la década de 1950. Sin embargo, en algunos municipios se observaron picos a inicios del siglo XX, como es el caso de Lorca, indicativo de que existe un importante número de edificaciones antiguas de mampostería.
- La Figura 2.10 muestra dos mapas con la distribución del número de edificios y del número de viviendas por entidad poblacional. En el caso de los edificios se observa que las entidades con mayor número de edificios se encuentran en el municipio de Cartagena, en particular en la entidad de Rincón de San Ginés, seguido por las entidades de Alcantarilla, Lorca, Murcia y Totana. Sin embargo, aunque Rincón de San Ginés presenta un elevado número de viviendas, la mayor concentración de las mismas se encuentra en la entidad de Murcia, debido a que ésta cuenta con edificios de mayor altura.
- En cuanto a la densidad de población, una de las particularidades de la zona de estudio, es la diferencia de población que se produce en las poblaciones costeras en época vacacional, llegándose a duplicar la población en casos extremos de núcleos costeros. Para establecer una proporción entre dichas densidades de población, se partió de la información proporcionada por el INE sobre viviendas principales y secundarias, y se hizo la suposición de que en época invernal solo están ocupadas las viviendas principales, mientras que en época vacacional están ocupadas las viviendas principales y las secundarias.
- En la Figura 2.11 se muestran los mapas con la población permanente y la población en época vacacional para todos los municipios de la Comunidad de la Región de Murcia. Se observa claramente como las entidades pertenecientes a la costa aumentan la densidad de población significativamente en época vacacional. Tal es el caso de las entidades de Rincón de San Ginés, La Manga, San Javier, Los Alcázares y El Plan, principalmente.

## 2.6.4 SOBRE VULNERABILIDAD EN LA REGIÓN

- La clasificación de vulnerabilidad se ha realizado siguiendo dos escalas y/o metodologías: la EMS98 (ya adoptada en RISMUR I) y la propuesta en el proyecto RISK-UE. La Figura 2.12 y Figura 2.13 ilustran las distribuciones de vulnerabilidad asignada por entidades poblacionales en ambas escalas.

### ESCALA EMS-98

- LA escala EMS-98 distingue 6 clases, de la A a la F (de más a menos vulnerable), de las cuales solo 4 se encuentran en la región. Globalmente, los porcentajes de vulnerabilidad observados disminuyen de la clase A a la D.
- Las clases más vulnerables, A y B, son dominantes en la región, con porcentajes entre el 25 y 50 % en la mayor parte de las entidades poblacionales, y en muchos casos superior al 50 %. Los mayores porcentajes de vulnerabilidad A se localizan en la mitad occidental de la región.
- La vulnerabilidad C se da en porcentajes muy inferiores, encontrándose sólo entidades aisladas con porcentajes entre 50 y 75% de esta clase, y entre 25 y 50 % fundamentalmente en la zona costera y en la parte Norte.
- La vulnerabilidad D se presenta entre 5 y 25 % en algunas entidades aisladas, entre ellas Lorca.

#### PROYECTO RISK-UE

- De las clases diferenciadas en el proyecto RISK-UE, en la región de Murcia se encuentran 3 correspondientes a mampostería, M11, M31 y M31 y dos correspondientes a hormigón armado, RC31 sin diseño sismorresistente (pre-code) y RC31 low, con bajo nivel de diseño (low-code) .
- La clase M31 es dominante en la mitad occidental de la región y la RC 31 pre se encuentra en porcentajes superiores al 25 % en la mayor parte de la provincia. La clase RC31 low se localiza solo en entidades aisladas con porcentajes del 25 al 50 %.

## 2.6.5 SOBRE DISTRIBUCIÓN DE DAÑOS Y PÉRDIDAS

- La evaluación del daño físico se ha realizado siguiendo también dos metodologías : la primera es empírica y basada en el modelo de vulnerabilidad descrito en la escala EMS-98, (utilizada en RISMUR I), y la segunda es una metodología analítica propuesta en el proyecto RISK-UE. La metodología de la escala EMS-98 describe 6 grados de daño, que van desde el Daño 0 al Daño 5, y representan los porcentajes de daño nulo o edificios sin daño, daño leve, moderado, fuerte, muy fuerte y colapso, respectivamente. Los grados de daño de la metodología RISK-UE, están clasificados en 5 niveles: Leve, Moderado, Extenso, Completo y Edificios sin daños.
- La distribución de daños obtenida según el método empírico y con la escala EMS-98 se muestra en la figura 2.16. Se observa que la gran mayoría de los edificios sufre los grados de daño D1 y D2, que representan daño leve y moderado. Sin embargo, en algunas

entidades, como en el caso de Lorca, la mayor parte de los edificios muestra grados de daño extenso y completo (D3 y D4).

- La distribución de daños obtenida por el método analítico de RISK-UE se muestra en la Figura 2.22. Se observa que la mayoría de las entidades presenta más de un 50% de edificios con daño moderado. Además ciertas entidades al norte, como Yecla, Jumilla y Cieza, así como entidades con gran número de edificaciones al sur, como Rincón de San Ginés, San Antonio de Abad y Águilas, presentan casi todos los edificios sin daños ante la acción sísmica y un porcentaje casi nulo de daño completo. Las entidades que presentan mayor porcentaje de edificios con daño extenso a completo están incluidas en los municipios de Murcia, Lorca y Totana.
- Los resultados de ambas metodologías han sido combinados en un árbol lógico, ponderados con igual peso. La Figura 2.24 muestra la distribución de daño resultante. Se puede apreciar que al combinar los resultados de ambas metodologías no se observan grandes cambios con respecto a los mapas resultantes de aplicar las metodologías por separado, es decir que ambas metodologías proporcionan resultados bastante consistentes.
- Además del daño en edificios y viviendas, se han estimado otros parámetros indicativos del riesgo, incluyendo pérdidas humanas y económicas. Concretamente se han estimado los siguientes indicadores, representados en los correspondientes mapas:
  - o Número de edificios que alcanzarían colapso por entidad poblacional. (Figura 2.25). Donde se observa que Murcia, Lorca, Totana y Alcantarilla son las únicas entidades de población con más de 300 edificios que alcanzarían en colapso, seguidos de Cehegín, Los Alcázares, Aljucer, Archena y Calasparra con entre 150 y 300 edificios.

NÚMERO DEL INE	ENTIDAD	MUNICIPIO	EDIFICIOS COLAPSADOS
30030000100	MURCIA	Murcia	463
30024000400	LORCA	Lorca	461
30039000400	TOTANA	Totana	441
30005000100	ALCANTARILLA	Alcantarilla	341
30017000800	CEHEGIN	Cehegín	271
30902000100	LOS ALCAZARES	Los Alcázares	189
30030040100	ALJUCER	Murcia	186
30009000300	ARCHENA	Archena	178
30013000100	CALASPARRA	Calasparra	158
30030350700	PUENTE TOCINOS	Murcia	145

- o Daño medio (Dm) por entidad poblacional. Los valores más altos de este parámetro alcanzan el valor de 3 para entidades poblacionales con pocos edificios catalogados. (Figura 2.26). Los resultados muestran que la mayoría de las

entidades de población tienen un daño medio entre 1 y 2, mostrando un número significativo de entidades con daño medio entre 2 y 3.

- Número de viviendas inhabitables por entidad poblacional. (Figura 2.27). La entidad de población con un mayor número de viviendas inhabitables es Murcia (28.311), quedando muy por encima del resto de entidades de población. Las siguientes serían Alcantarilla, Lorca y Cartagena.

NÚMERO DEL INE	ENTIDAD	MUNICIPIO	VIVIENDAS INHABITABLES
30030000100	MURCIA	Murcia	28311
30005000100	ALCANTARILLA	Alcantarilla	5185
30024000400	LORCA	Lorca	5130
30016000100	CARTAGENA	Cartagena	3573
30035000500	LA MANGA	San Javier	2939
30902000100	LOS ALCAZARES	Los Alcázares	2887
30039000400	TOTANA	Totana	2706
30016190000	RINCON DE SAN GINES	Cartagena	2354
30027001100	MOLINA DE SEGURA	Molina del Segura	2330
30030001700	EL PALMAR	Murcia	2144

- Personas sin hogar por entidad poblacional. (Figura 2.28). El número de personas que quedarían sin hogar sigue una distribución muy similar al de viviendas inhabitables, siendo también Murcia la entidad de población con un mayor valor (59.680 personas).

NÚMERO DEL INE	ENTIDAD	MUNICIPIO	PERSONAS SIN HOGAR
30030000100	MURCIA	Murcia	59680
30024000400	LORCA	Lorca	12737
30005000100	ALCANTARILLA	Alcantarilla	11396
30016000100	CARTAGENA	Cartagena	6658
30039000400	TOTANA	Totana	5847
30019000600	CIEZA	Cieza	5002
30027001100	MOLINA DE SEGURA	Molina del Segura	4952
30030001700	EL PALMAR	Murcia	4520
30030350700	PUENTE TOCINOS	Murcia	4396
30016190000	RINCON DE SAN GINES	Cartagena	4386

- Víctimas desglosadas en heridos leves, personas que requieren atención médica, heridos con carácter de urgencia y número de muertos. En este caso se ha tenido en cuenta la población permanente en cada entidad poblacional (Figura 2.29) y la población vacacional (Figura 2.30). Si se observan los mapas y tablas puede verse que, una vez más, en la entidad de población de Murcia se estiman el mayor número de víctimas por terremotos. Seguido de Lorca, Alcantarilla, Totana y Los Alcázares. En época vacacional, entidades de población como La Manga y Los Narejos aumentan significativamente el número de víctimas esperadas.

- Costes asociados a la actividad sísmica de la región, diferenciando entre costes de reconstrucción y de reparación de distintos tipos de daño (ligero, moderado y extenso) (Figura 2.32). Las entidades de población con mayor coste esperado siguen las tendencias de los parámetros anteriores, fijando la entidad de Murcia con el mayor valor de costes, seguido de Lorca, Alcantarilla, Totana y Los Alcazares.

En la Tabla 2.14 se muestra un listado con las entidades de población en las que mayor riesgo sísmico se ha obtenido según los parámetros antes detallados. Como puede observarse, la entidad de población de Murcia es la que más riesgo presenta, muy por encima del resto de entidades. Cabe destacar también las entidades de Lorca, Alcantarilla y Totana atendiendo al número de personas que quedarían sin hogar y las posibles víctimas.

Tabla 2.14. Tabla con las 20 entidades de población que mayor riesgo presentan según los parámetros mostrados.

NÚMERO DEL INE	ENTIDAD	MUNICIPIO	VIVIENDAS INHABITABLES	PERSONAS SIN HOGAR	COSTE TOTAL	VÍCTIMAS EN POBLACIÓN PERMANENTE	VÍCTIMAS EN ÉPOCA VACACIONAL
30030000100	MURCIA	MURCIA	28,311	59,680	<b>1,830,551,613 €</b>	1,617	1,768
30024000400	LORCA	LORCA	5,130	12,737	<b>473,662,190 €</b>	367	402
30005000100	ALCANTARILLA	ALCANTARILLA	5,185	11,396	<b>386,600,495 €</b>	318	344
30039000400	TOTANA	TOTANA	2,706	5,847	<b>272,805,580 €</b>	234	291
30016000100	CARTAGENA	CARTAGENA	3,573	6,658	<b>330,038,197 €</b>	74	101
30030001700	EL PALMAR	MURCIA	2,144	4,520	<b>194,004,268 €</b>	124	136
30027001100	MOLINA DE SEGURA	MOLINA DEL SEGURA	2,330	4,952	<b>242,597,129 €</b>	78	86
30030350700	PUENTE TOCINOS	MURCIA	2,085	4,396	<b>157,019,755 €</b>	130	143
30902000100	LOS ALCAZARES	LOS ALCÁZARES	2,887	2,102	<b>249,878,546 €</b>	153	532
30019000600	CIEZA	CIEZA	2,082	5,002	<b>200,418,549 €</b>	78	82
30035000500	LA MANGA	SAN JAVIER	2,939	2,370	<b>255,483,371 €</b>	85	265
30016190000	RINCON DE SAN GINES	CARTAGENA	2,354	4,386	<b>278,748,194 €</b>	58	79
30030420000	SAN BENITO	MURCIA	1,838	3,875	<b>144,806,907 €</b>	112	123
30016200300	SAN ANTONIO ABAD	CARTAGENA	2,102	3,916	<b>267,781,899 €</b>	60	83
30015000400	CARAVACA DE LA CRUZ	CARAVACA DE LA CRUZ	1,784	3,566	<b>173,105,425 €</b>	93	104
30017000800	CEHEGIN	CEHEGÍN	1,336	2,671	<b>143,185,224 €</b>	112	129
30043000400	YECLA	YECLA	1,688	3,748	<b>171,416,727 €</b>	70	72
30030020100	ALBERCA (LA)	MURCIA	1,273	2,683	<b>123,721,239 €</b>	88	96
30003000100	AGUILAS	AGUILAS	1,831	2,944	<b>224,894,788 €</b>	49	63

## REFERENCIAS

---

- Abrahamson N.A. and Silva W.J. (2008). Chiou–Youngs PEER-NGA empirical ground motion model for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters. *PEER Report Draft v2, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA.*
- Abrahamson N.A., Silva W.J. and Kamai R. (2013). Update of the AS08 Ground-Motion Prediction Equations Based on the NGA-West2 Data Set. *PEER 2013/04*
- Akkar S. and Boomer J.J. (2010). Empirical Equations for the Prediction of PGA, PGV, and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region, and the Middle East. *Seismological Research Letters*. 81: 195-206.
- Ambraseys N.N., Douglas J., Sarma S.K. and Smit P.M. (2005). 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. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 3: 1–53.
- Ambraseys N.N., Simpson K.A. and Bommer J.J. (1996). Prediction of Horizontal Response Spectra in Europe. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*. 25: 371-400.
- Anderson J. (1979). Estimating the seismicity from geological structure for seismic-risk studies. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 69: 135–158.
- Applied Technology Council (1985). Earthquake damage evaluation data for California, Report No. ATC–13, Redwood City, CA.
- Applied Technology Council (ATC), 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, volumes 1 and 2, Report No. ATC-40, Redwood City, CA.
- Applied Technology Council (2009). Guidelines for Seismic Performance Assessment of Buildings, Report ATC–58 50% Draft, April 2009, Redwood City, CA.
- Barbat, A. H., Yépez, F. y Canas, J. A. (1996). "Damage scenarios simulation for seismic risk assessment in urban zones". *Earthquake spectra* 12 (3): 371-394.
- Bâth M. (1978). A note on recurrence relations for earthquakes. *Tectonophysics*. 51: T23-T30.
- Benito, B., Gaspar-Escribano, J. M., Martínez-Díaz, J. J., García Rodríguez, M. J., Jiménez Peña, E., Canora, C., & Álvarez-Gómez, J. A. (2008). The RISMUR project: seismic risk assessment of the Murcia province (SE Spain). *Bolletino di Geofisica. Teroica e Applicata*, 49(1), 3-15.
- Berge-Thierry C., Cotton F., Scotti O., Griot-Pommerer D.A. and Fukushima Y. (2003). New Empirical Response Spectral Attenuation Laws for Moderate European Earthquakes. *Journal of Earthquake Engineering*. 7(2): 193-222.
- Bindi D., Pacor F., Luzi L., Puglia R., Massa M., Ameri G. and Paolucci, R. (2011). Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 9(6): 1899-1920.
- Bonett, R. L. (2003). Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada. *Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.*
- Boore D.M. and Atkinson G.M. (2008). Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods Between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*. 24: 99-138.
- Boore D.M., Stewart J.P., Seyhan E. and Atkinson G.M. (2013). NGA-West2 Equations for Predicting Response Spectral Accelerations for Shallow Crustal Earthquakes. *PEER 2013/05*
- Braga, F.; Dolce, M.; Liberatore, D. (1982). A Statistical Study on Damaged Buildings and Ensuing Review of the MSK-76 Scale. *Estratto da 7th ECEE, Athens, September 1982, Publicación II-394, 65-84 pp.*
- Braga, F.; Dolce, M.; Liberatore, D. (1986). Assessment of the Relationships between Macroseismic Intensity, Type of Building and Damage, based on the Recent Italy Earthquake Data, *Proceeding 8th ECEE, Lisbon, Portugal.*
- Brune J.N. (1968). Seismic moment, seismicity, and rate of slip along major fault zones. *Journal of Geophysical Research*. 73: 777–784.
- Cabañas, L., Carreño, E., Izquierdo, A., Martínez, J. M., Capote, R., Martínez, J., ... & Murphy, P. (2011). Informe del sismo de Lorca del 11 de mayo de 2011. IGN, UCM, UPM, IGME, AEIS.
- Campbell K.W. and Bozorgnia Y. (2008). NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear-elastic response spectra for periods ranging from 0.01 and 10s. *Earthquake Spectra*. 24: 139–71.
- Campbell K.W. and Bozorgnia Y. (2013). NGA-West2 Campbell-Bozorgnia Ground Motion Model for the Horizontal Components of PGA, PGV, and 5%-Damped

Elastic Pseudo-Acceleration Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s. *PEER 2013/06*

Chávez, J. (1998). Evaluación de la Vulnerabilidad y el Riesgo Sísmico a Escala Regional: Aplicación a Cataluña. *Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 343 pp.*

Chinnery M.A. and North R.G. (1975). The frequency of very large earthquakes. *Science*. 190: 1197–1198.

Chiou B. and Youngs R.R. (2008). Chiou–Youngs PEER-NGA empirical ground motion model for the average horizontal component of peak acceleration and pseudo-spectral acceleration for spectral periods of 0.01 to 10 seconds. *PEER Report Draft, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA*

Chiou B.S.J. and Youngs R.R. (2013). Update of the Chiou and Youngs NGA Ground Motion Model for Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *PEER 2013/07*

Chyi-Tyi Lee, Chin-Tung Cheng, Chi-Wen Liao and Yi-Ben Tsai (2000). Site Classification of Taiwan Free-field Strong-Motion Stations. [gis.geo.ncu.edu.tw/query/site/](http://gis.geo.ncu.edu.tw/query/site/)

Coburn A. y Spence R. (2002). Earthquake protection. 2nd edition. *Ed. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.*

Coppersmith, K. J., & Youngs, R. R. (1986, August). Capturing uncertainty in probabilistic seismic hazard assessments within intraplate tectonic environments. *In Proceedings of the Third US national conference on earthquake engineering (Vol. 1, pp. 301-312).*

Cornell C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 58: 1583-1606.

Cosentino P., Ficarra V. and Luzio D. (1977). Truncated Exponential Frequency Magnitude Relationship in Earthquake Statistics. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 67: 1615-1623

Dolce, M., Kappos, A., Zuccaro, G., and Coburn, A.W. (1995). State of the art Report of WG3 – Seismic Risk and Vulnerability, Proceedings of the 10th European Conference of Earthquake Engineering, Vienna, Austria, 3049–3077.

Electric Power Research Institute EPRI, 1987 DYNASTORE — A computer Model for Quantifying Dynamic Energy Storage Benefits. *EPRI AP-550 Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA*

Esteva, L. (1968). Bases para la formulación de diseño sísmico (Doctoral dissertation, PhD thesis, Faculty of Engineering, UNAM).

European Seismological Commission ESC (1998). "European Macroseismic Scale 1998" Conseil de L'Europe. *Cahiers du Centre Européen de*

*Géodynamique et de Séismologie. Vol. 15. Editor G. Grunthal. Luxembourg 1998.*

Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1999. HAZUSVR 99 – Earthquake Loss Estimation Methodology, Federal Emergency Management Agency and National Institute of Building Sciences, Washington, D.C.

Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2002a. HAZUSVR 99-SR2 (Service Release 2), HAZUS Technical Manual, Federal Emergency Management Agency, FEMA and National Institute of Building Sciences, NIBS, Washington, D.C., Vol. 1–3.

Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2002b. HAZUSVR99-SR2 (Service Release 2), Advanced Engineering Building Module, Technical and User's Manual, Federal Emergency Management Agency, FEMA and National Institute of Building Sciences, NIBS, Washington D.C.

Federal Emergency Management Agency (2003). HAZUS-MH MR4 Technical Manual. Washington, D.C.

Federal Emergency Management Agency (2005). Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, FEMA 440, Prepared by Applied Technology Council (ATC-55 Project), Washington, D.C., United States, June 2005.

Federal Emergency Management Agency (2008). HAZUS-MH Estimated annualized earthquake losses for the United States, FEMA 366, Report of the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, United States, 66 pp.

Frankel A. (1995). Mapping Seismic Hazard in the Central and Eastern United States. *Seismological Research Letters*. 66: 8-21.

García-Mayordomo J. and Giner-Robles J.L. (2006). Definición de zonas sismogénicas en base al gradiente geotérmico, resistencia y profundidad del límite frágil-dúctil en la corteza superior. Aplicación metodológica para el cálculo de la peligrosidad sísmica en el Sureste de España. *Geogaceta*. 39: 55-58.

García-Mayordomo J., Insua-Arévalo J., Martínez-Díaz J., Perea H., Álvarez-Gómez J.A., Martín-González F., González A., Lafuente P., Pérez-López R., Rodríguez-Pascua M.A., Giner-Robles J., Azañón J.M., Masana E. and Moreno X. (2010). Modelo integral de zonas sismogénicas de España. *Resúmenes de la 1ª Reunión Ibérica sobre Fallas Activas y Paleosismología, Sigüenza, España.*

García-Mayordomo J., Insua-Arévalo J.M., Martínez-Díaz J.J., Jiménez-Díaz A., Martín-Banda R., Martín-Alfageme S., Álvarez-Gómez J.A., Rodríguez-Peces M., Pérez-López R., Rodríguez-Pascua M.A., Masana E.,

- Perea H., Martín-González F., Giner-Robles J., Nemser E.S., Cabral J. and the QAFI Compilers. (2012a). La Base de Datos de Fallas Activas en el Cuaternario de Iberia (QAFI v.2.0). *Journal of Iberian Geology*, 38(1), 285-302.
- García-Mayordomo J., Martínez-Díaz J.J., Capote R., Martín-Banda R., Insua-Arévalo J.M., Álvarez-Gómez J.A., Perea H., González A., Lafuente P., Martín-González F., Pérez-López R., Rodríguez-Pascua M.A., Giner-Robles J., Azañón J.M., Masana E., Moreno X., Benito B., Rivas A., Gaspar-Escribano J.G., Cabañas L., Vilanova S., Fonseca J., Nemser E. and Baize S. (2012b). Modelo de Zonas Sismogénicas para el Cálculo de la Peligrosidad Sísmica en España. 7ª *Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Donostia 2012*.
- Gardner J.K. and Knopoff L. (1974). Is the Sequence of Earthquakes in Southern California, with Aftershocks Removed, Poissonian?. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 64: 1363-1367.
- Grünthal, G. (ed.) (1998) "European Macroseismic Scale 1998". *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 7, pp. 99. Luxembourg*.
- Grupo de Trabajo IGN-UPM (2013). Actualización de Mapas de Peligrosidad Sísmica de España 2012. *Editorial Centro Nacional de Información Geográfica, Madrid*. ISBN: 978-84-416-2685-0.
- Gutenberg B. and Richter C.F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 34: 185-188.
- Hanks T.C. and Kanamori H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*. 84: 23480-23500.
- Havskov J. and Ottemöller L. (1999). Seisan earthquake analysis software. *Seismological Research Letters*. 70: 532-534.
- Hazus-MH (2003), "Multi-hazard Loss Estimation Methodology". Technical manual. Federal Emergency Management Agency (FEMA), *Washington DC, USA*. pp. 712.
- Hill, M. y T. Rossetto. (2008). "Comparison of building damage scales and damage descriptions for use in earthquake loss modelling in Europe", *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 6, pp. 335-365.
- Idriss I.M. (2008). An NGA Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated by Shallow Crustal Earthquakes, *Earthquake Spectra*. 24: 217-242.
- Idriss I.M. (2013). NGA-West2 Model for Estimating Average Horizontal Values of Pseudo-Absolute Spectral Accelerations Generated by Crustal Earthquakes. *PEER 2013/08*
- Joyner, WB.; Fumal, TE. (1985). Predictive Mapping of Earthquake Ground Motion, in *Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Region – An Earth-Science Perspective*, J. E. Ziony (Editor), U.S. Geol. Surv. Profess. Pap. 1360, 203-220.
- Kaklamanos, J., Baise, L. G., & Boore, D. M. (2011). Estimating unknown input parameters when implementing the NGA ground-motion prediction equations in engineering practice. *Earthquake Spectra*, 27(4), 1219-1235.
- Kale, Ö., & Akkar, S. (2013). A new procedure for selecting and ranking ground-motion prediction equations (GMPEs): The Euclidean distance-based ranking (EDR) method. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2A), 1069-1084.
- Kappos, A.J., Pitilakis, K.D., Morfidis, K., and Hatzinikolaou, N. (2002). Vulnerability and risk study of Volos (Greece) metropolitan area, *Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering*, London, CD ROM Proceedings (Balkema), Paper 074.
- King, S. A., & Rojhan, C. (1997). ATC-38 Database on the Performance of Buildings Near Strong-Motion Recordings. In *Proceedings of Northridge Earthquake Research Conference*.
- Kramer, R. M. (1999). Trust and distrust in organizations: Emerging perspectives, enduring questions. *Annual review of psychology*, 50(1), 569-598.
- Lagomarsino, S. y S. Giovinazzi. 2006, "Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings". *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 4, pp. 415-443.
- Lang, D.H., and Jaiswal, K. (2011). Global Database on Seismic Vulnerability Information: Building on the WHE-PAGER Network, Project Proposal presented to Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (GFDRR), Washington, D.C., July 2011.
- López Arroyo, A. y Villacañas, J. (1999), "Metodología Simplificada para el análisis del Riesgo Sísmico". *Física de la Tierra*. pp 269-284
- Main I.G. and Burton P.W. (1981). Rates of crustal deformation inferred from seismic moment and Gumbel's third distribution of extreme magnitude values. In: Beavers, J.E. (Ed.), *Earthquakes and Earthquake Engineering: The Eastern United States*, London. 2: 937-951.
- Martín-Banda R. y García-Mayordomo J. 2013 Memoria explicativa sobre la revisión y actualización de la base de datos de fallas activas del cuaternario de la península Ibérica para la región de Murcia. *Informe interno*.
- Milutinovic, Z.V. y G.S. Trendafiloski (2003), "An advanced approach to earthquake risk scenarios with

applications to different European towns. *WP4: Vulnerability of current buildings". pp. 110.*

Mouroux, P., Bertrand, M., Bour, M., Brun, B. L., Depinois, S., Masure, P. y Risk-UEteam (2004). The European Risk-UE Project: an advanced approach to earthquake risk scenarios. *Proceedings of the 13th World Conference Earthquake Engineering, Vancouver B.C (Canadá), CD-ROM, Paper No. 3329.*

National Research Council. (1988). Frontiers in chemical engineering: research needs and opportunities. *Natl Academy Pr.*

NCSE-02 (2002). Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación Real Decreto 997/2002, de 27 de Septiembre. *Publicada en el BOE, Vol. 244, pp. 35898-35967.*

NEHRP (1997). Recommendation Provision for Seismic Regulation for New Buildings and Other Structures. *Building Seismic Safety Council, Washington, D. C Federal Emergency. FEMA*

NEHRP (2009). Council, B. S. S. (2009). NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures. *Federal Emergency Management Agency.*

Ordaz M., Martinelli F., D'Amico V. and Meletti C. (2013). CRISIS2008: A Flexible Tool to Perform Probabilistic Seismic Hazard Assessment. *Seismological Research Letters, 84-3: 495-504.*

Power M., Chiou B., Abrahamson N., Bozorgnia Y., Shantz T. and Roblee T. (2008). An Overview of the NGA Project. *Earthquake Spectra. 24-1: 3-21*

Risk-UE(2003), An advanced approach to earthquake RISK scenarios with applications to different European towns. European Commission 5FP - City of Tomorrow and Cultural Heritage. *CEC Contract Number: EVK4-CT-2000-00014. Duration: 44 Months (15/01/2001 30/09/2004), <http://www.risk-ue.net/> (último acceso 23 de marzo de 2007)*

Rivas-Medina A. 2014. Contribución metodológica para incorporar fallas activas en la modelización de la fuente dirigida a estimaciones de peligrosidad sísmica. Aplicación al sur de España. *Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.*

Rivas-Medina, A., Martínez-Cuevas, S., Quirós, L. E., Gaspar-Escribano, J. M., & Staller, A. (2014). Models for reproducing the damage scenario of the Lorca earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering, 1-19.*

Ruiz S., Cantero A., Rivas-Medina A., Gaspar-Escribano J.M. and Benito B. (2012). Desarrollo de un modelo de movimiento fuerte utilizando datos acelerométricos españoles y contraste de otros modelos mediante análisis estadístico de residuos con datos locales. *7ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Donostia 2012.*

Sabetta F. and Pugliese A. (1996). Estimation of Response Spectra and Simulation of Nonstationary Earthquake Ground Motions. *Bulletin of the Seismological Society of America. 86: 337-352.*

Scherbaum, F., Cotton, F., & Smit, P. (2004). On the use of response spectral-reference data for the selection and ranking of ground-motion models for seismic-hazard analysis in regions of moderate seismicity: The case of rock motion. *Bulletin of the Seismological Society of America, 94(6), 2164-2185.*

Scherbaum, F., Delavaud, E., & Riggelsen, C. (2009). Model selection in seismic hazard analysis: An information-theoretic perspective. *Bulletin of the Seismological Society of America, 99(6), 3234-3247.*

Seed, HB.; Murarka, R.; Lysmer, J. (1976). Relationships of Maximum Acceleration, Maximum Velocity, Distance from Source and Local Site Conditions for Moderately Strong Earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am., Vol 66, pp 1323-1342.*

Stepp J.C. (1972). Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effects on statistical estimates of earthquake hazard. *Proceedings of First Int. Conference on Microzonation. 2: 897-910.*

Stirling M.W., McVerry G.H. and Berryman K.R. (2002). A new seismic hazard model of New Zealand. *Bulletin of the Seismological Society of America. 92: 1878-1903.*

Stirling, M. W., M. C. Gerstenberger, N. J. Litchfield, G. H. McVerry, W. D. Smith, J. Pettinga, and P. Barnes (2008). Seismic hazard of the Canterbury region, New Zealand: New earthquake source model and methodology. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering. 41: 51-67.*

U.S. Nuclear Regulatory Commission, Department Of Energy- Electric Power Research Institute (NRC-DOE-EPRI), "Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts". *NUREG/CR-6372,1 and 2, 1997*

Vacareanu, R., Radoi, R., Negulescu, C., & Aldea, A. (2004, August). Seismic vulnerability of RC buildings in Bucharest, Romania. In Proceedings of the 13th world conference on earthquake engineering.

Wells D.L. and Coppersmith K.J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America. 84: 974-1002.*

Woo G. (1996). Kernel Estimation Methods for Seismic Hazard Area Source Modeling. *Bulletin of the Seismological Society of America. 86-2: 353-362.*

Wooddell, K. E., & Abrahamson, N. A. (2012). New earthquake classification scheme for mainshocks and aftershocks in the NGA-West2 ground motion

prediction equations (GMPes). *In Proceedings, 15th World Conference on Earthquake Engineering.*

*of the Geotechnical Engineering Division, 104(4), 433-446.*

Youd, T. L., & Perkins, D. M. (1978). Mapping liquefaction-induced ground failure potential. *Journal*





## ANEXO I. DETALLE DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA HÍBRIDA (ZONAS Y FALLAS) PARA EL CÁLCULO DE LA PELIGROSIDAD.

---

### *Tasa de momento sísmico y tasa de sismicidad en el rango de aplicación*

Una de las bases de esta metodología consiste en estimar la tasa de momento sísmico registrada en la región para así poder repartirla entre las fuentes contenidas en ella.

A su vez, una de las particularidades más importantes de la metodología propuesta concierne al periodo temporal en el que se realiza el reparto de sismicidad entre la zona y las fallas. Se considerará solo el rango de magnitudes del catálogo que puede haber sido observado de forma completa.

En este caso, el rango de magnitudes en que se realizará el reparto de potencial sísmico -por considerar un rango de magnitud observada completamente- será el que oscila entre una magnitud mínima de 4.0 y la magnitud máxima de completitud *MMC*. En el caso de la aplicación a la región de Murcia, *MMC* es inferior a 6.0, ya que las magnitudes mayores tienen periodos de recurrencia muy largos y nuestro intervalo de estudio puede no cubrir esos periodos, por lo que se falsearía la estimación de la tasa si se hiciera el cálculo a partir de dicho intervalo.

El siguiente paso será calcular la tasa de sismos. Puesto que la magnitud momento lleva asociada una incertidumbre en cada sismo, ésta debe ser incluida en la estimación de la tasa de momento sísmico. Para ello, a cada sismo se le asociará una probabilidad de que su magnitud sea una de las posibles dentro de su rango de incertidumbre, atendiendo a la función de densidad de probabilidad triangular adoptada para la magnitud.

En la Figura AI. 1 se muestra un ejemplo de la probabilidades que resultarían para distintas magnitudes, entorno a una magnitud *M<sub>w</sub>* 4.6, según la distribución triangular de la incertidumbre de este dato, con un valor de  $\sigma = \pm 0.3$ .

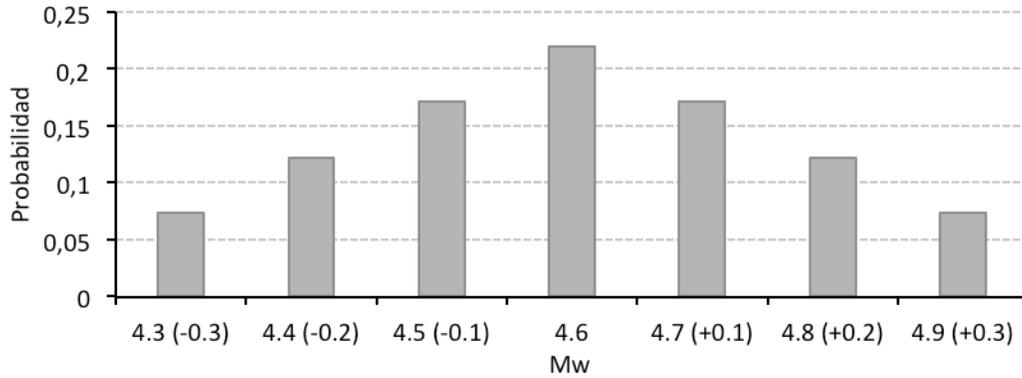


Figura AI. 1. Ejemplo de las probabilidades asociadas a las posibles magnitudes de un sismo con  $M_w = 4.6 \pm 0.3$ , según la distribución triangular adoptada para considerar la incertidumbre de la magnitud.

Teniendo en cuenta el importante papel que juega la incertidumbre asociada a la magnitud de cada sismo, en lugar de calcular la tasa de sismicidad de una cierta magnitud, se utilizarán las tasas de *sismicidad probable entorno a esa magnitud* y en lugar de calcular las tasas de momento sísmico para cada magnitud registrada, se calcularán también las tasas de *momento sísmico probable*.

Una vez identificados los límites de magnitud ( $M_{min}$ ,  $MMC$ ) y los años de referencia  $AR(m)$  de cada magnitud, el siguiente paso será calcular los periodos de completitud  $PC(m)$ , es decir, los años durante los cuales se han detectado todos los sismos que han ocurrido en la región de una cierta magnitud. Este periodo se obtiene restando al año del último registro considerado en el catálogo (común a todas las magnitudes) el año de referencia de esa magnitud,  $AR(m)$ .

$$PC(m) = \text{Último año del catálogo} - AR(m) \quad [AI. 1]$$

Si se cuenta el número de sismos registrados de esa magnitud durante su periodo de completitud  $n(m)$  y se divide entre el número de años comprendidos en dicho periodo  $PC(m)$ , se obtiene la tasa anual de sismos registrados de una magnitud dada  $\dot{n}(m)$ :

$$\dot{n}(m) = \frac{n(m)}{PC(m)} \quad [AI. 2]$$

Como el catálogo de proyecto está homogeneizado a magnitud momento, una vez identificados los límites de magnitud ( $M_{min}$ ,  $MMC$ ) y los años de referencia  $AR(m)$  de cada magnitud, el siguiente paso será calcular los periodos de completitud  $PC(m)$ , es decir, los años durante los cuales se han detectado todos los sismos que han ocurrido en la región de una cierta magnitud. Este periodo se obtiene restando al año del último registro considerado en el catálogo (común a todas las magnitudes) el año de referencia (de esa magnitud)  $AR(m)$ .

$$PC(m) = \text{Último año del catálogo} - AR(m) \quad [AI. 3]$$

Si se cuenta el número de sismos registrados de esa magnitud durante su periodo de completitud  $n(m)$  y se divide entre el número de años comprendidos en dicho periodo  $PC(m)$ , se obtiene la tasa anual de sismos registrados de una magnitud dada  $\dot{n}(m)$ :

$$\dot{n}(m) = \frac{n(m)}{PC(m)} \quad [A1. 4]$$

Como la magnitud de los sismos viene expresada en Magnitud momento  $Mw$ , por medio de la expresión propuesta en Hanks y Kanamori 1979, se puede conocer el **momento sísmico  $Mo(m)$**  que se libera en cada terremoto de magnitud  $Mw$ .

$$Mw = \frac{2}{3} \cdot \log(Mo) - 10.7 \quad [A1. 5]$$

Si este valor de  $Mo(m)$  se multiplica por la tasa de sismos de esa magnitud, se obtiene la **tasa de momento sísmico  $\dot{M}o(m)$**  liberada en la región para dicha magnitud  $m$ .

$$\dot{M}o(m) = \dot{n}(m) \cdot Mo(m) \quad [A1. 6]$$

Si se suman todas las tasas de momento sísmico correspondientes a todas las magnitudes comprendidas entre los límites de magnitudes fijados ( $Mmin$ ,  $MMC$ ), se obtiene la tasa de momento sísmico total que se libera en la región en el intervalo de magnitudes registradas de forma completa.

$$\dot{M}o_{region} = \sum_{Mmin}^{MMC} \dot{M}o(m) = \sum_{Mmin}^{MMC} \dot{n}(m) \cdot Mo(m) \quad [A1. 7]$$

Las tasas así obtenidas en cada región (con fallas catalogadas en su interior) se incluyen en la Tabla AI. 1. La magnitud máxima de completitud  $MMC$  para cada región evaluada de forma independiente, será por tanto, la magnitud mayor registrada inferior a 6.0.

Tabla AI. 1. Tabla con las tasas de sismicidad y de momento sísmico observadas en cada región.

Región	Mmin	MMC	$\dot{n}(4.0)$	$\dot{M}o$ (Nm/año)
30	4.0	4.6	0.056	1.90E+21
31	4.0	5.7	0.239	4.70E+22
37	4.0	5.7	0.440	8.40E+22
38	4.0	5.4	0.534	5.72E+22
39	4.0	5.4	0.282	3.91E+22

### Estimación del parámetro beta de las zonas

Como se plantea en la metodología híbrida seguida, el parámetro libre que queda por determinar en la ley de recurrencia es el valor  $\beta$  de la zona. Para asignar ese valor, se puede proceder de varias formas.

En este caso, y siguiendo las recomendaciones de la autora, el valor del parámetro  $\beta$  que se asignará a la zona será igual al valor del parámetro  $\beta$  ajustado en la región por medio de la tasa de momento sísmico y de sismicidad (ajustando un modelo de recurrencia GR-modificada), por medio de la ecuación:

$$\dot{N}_{min} = \frac{\dot{M}_o \cdot (\alpha - \beta) (e^{-\beta(M_{min})} - e^{-\beta(M_{max})})}{\beta [e^{-\beta(M_{min})} \dot{M}_o(M_{max}) - e^{-\beta(M_{max})} \dot{M}_o(M_{min})]} \quad [A1. 8]$$

Donde se conoce la tasa acumulada de sismos de  $\dot{N}_{min}$  y la tasa de momento sísmico registrada  $\dot{M}_o$ , quedando únicamente como incógnita el valor de  $\beta$ .

Los valores obtenidos y que se utilizarán como valores de  $\beta$  de cada zona se presentan en la Tabla AI. 2.

Tabla AI. 2. Valores de  $\beta$  obtenidos en cada zona.

Región	Mmin	MMC	$\alpha(4.0)$	$\dot{M}_o$ (Nm/año)	$\beta$ región = $\beta$ zona
30	4.0	4.6	0.056	1.90E+21	2.200
31	4.0	5.7	0.239	4.70E+22	1.980
37	4.0	5.7	0.440	8.40E+22	2.025
38	4.0	5.4	0.534	5.72E+22	2.267
39	4.0	5.4	0.282	3.91E+22	1.760

### Reparto del potencial sísmico regional entre zonas y fallas

#### Tasa de momento sísmico de las fallas registradas en la región

Una de las claves más importantes de esta metodología es que el potencial sísmico de la falla, que se sustrae del potencial sísmico regional para obtener el de la zona, no será entonces el de toda la falla, sino solo aquel que corresponde al intervalo de magnitudes registradas de forma completa en el catálogo ( $M_{min}$ ,  $MMC$ ). Por lo tanto, el primer paso será identificar qué parte del potencial sísmico de la falla será utilizado para el reparto de tasas de momento sísmico.

Para calcular la tasa de momento sísmico registrada que debe ser asociada a la falla, primero se deben establecer los límites de registro completo en la misma. El límite inferior en magnitud será 4.0 y el límite superior dependerá del máximo sismo registrado en la región en un periodo completo conocido, tomándose la magnitud máxima observada en dicho periodo completo,  $MMC$  (Figura AI. 2).

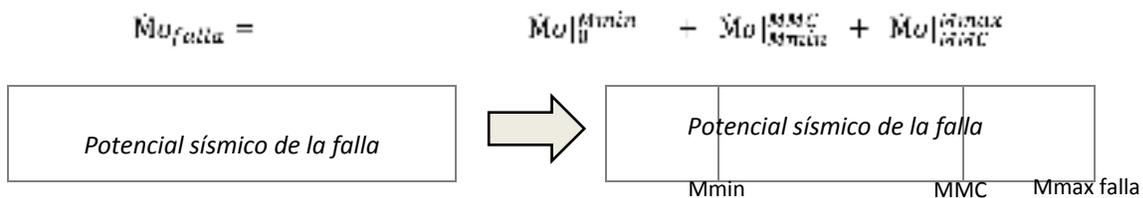


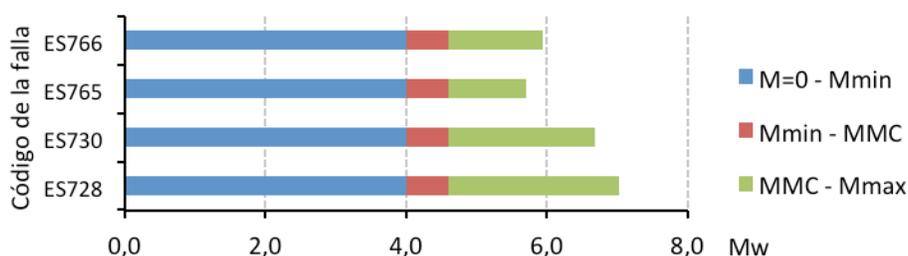
Figura AI. 2. Reparto de la tasa de momento sísmico de la falla en los intervalos de magnitud conocidos.

A continuación se presentará, para cada región, un sumario con las fallas contenidas en cada región y los diferentes rangos de magnitud identificados en cada falla. En azul: rango de magnitud inferior a 4.0, en rojo: rango de magnitud referente al periodo de observación completo de la región ( $M_{min}$ - $MMC$ ) y en verde: rangos de magnitud no observados de forma completa en la región ( $M_{max}$  (falla)- $MMC$ ).

**Región 30.** Esta región contiene cuatro fallas (o segmentos de falla) (Tabla AI. 3). Sin embargo, la sismicidad asociada a dicha región tiene una tasa de sismicidad y una magnitud máxima bajas (4.6), por lo que el rango de magnitud de la falla que ha sido observado en muy pequeño.

Tabla AI. 3. Fallas y segmentos de falla contenidos en la región 30, indicando las magnitudes máximas que pueden generar y la magnitud máxima de completitud de la zona.

ID	Nombre	MMC	Mmax
ES766	Sur de Revolcadores	4.6	5.9
ES765	Rambla del Puerto	4.6	5.7
ES730	Pozohondo	4.6	6.7
ES728	Socovos (1/2)	4.6	7.0

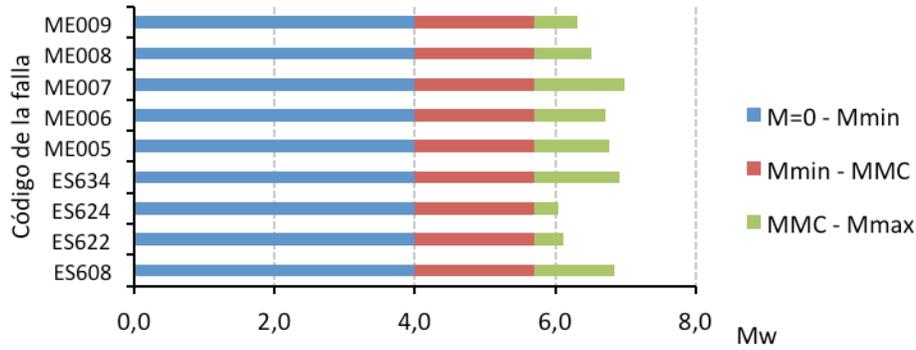


**Región 31.** Esta región contiene 9 fallas (o segmentos de falla) (Tabla AI. 4). La magnitud máxima observada en un periodo completo es de 5.7.

Tabla AI. 4. Fallas y segmentos de falla contenidos en la región 31, indicando las magnitudes máximas que pueden generar y la magnitud máxima de completitud de la zona.

ID	Nombre	MMC	Mmax
ME009	Southwest of Columbretas Basin	5.7	6.3
ME008	Cabo de Cullera Eastern Fault	5.7	6.5
ME007	Cabo de Cullera Central-Eastern Fault	5.7	7.0
ME006	Cabo de Cullera Central-Western Fault	5.7	6.7
ME005	Cabo de Cullera Western Fault	5.7	6.8
ES634	Jumilla (Sector Valencia) (1/2)	5.7	6.9
ES624	Benasau	5.7	6.0
ES622	Muro de Alcoy (o de Mariola)	5.7	6.1
ES608	Jumilla (Sector Valencia) (2/2)	5.7	6.9

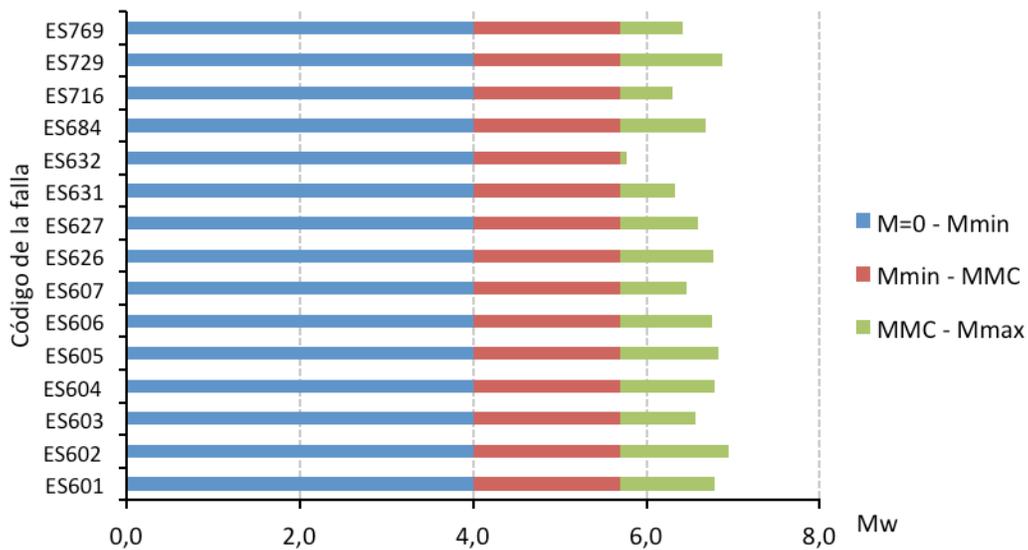
SERVICIO DE ACTUALIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE RIESGO SÍSMICO (RISMUR) EN LA REGIÓN DE MURCIA



**Región 37.** Esta región contiene 15 fallas (o segmentos de falla) (Tabla Al. 5). La magnitud máxima observada en su periodo completo es de 5.7.

Tabla Al. 5. Fallas y segmentos de falla contenidos en la región 37, indicando las magnitudes máximas que pueden generar y la magnitud máxima de completitud de la zona.

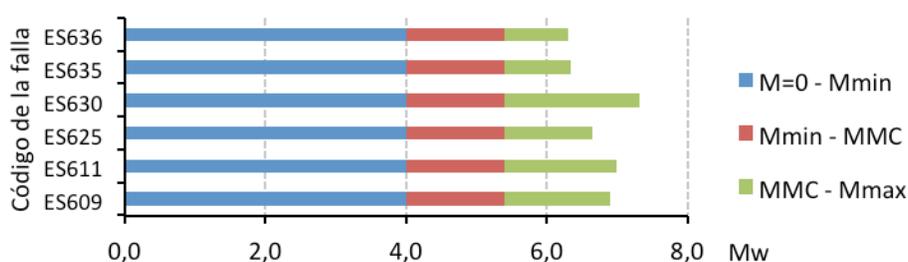
ID	Nombre	MMC	Mmax
ES769	La Junquera-Mancheño	5.7	6.4
ES729	Socovos (2/2)	5.7	6.9
ES716	Albox	5.7	6.3
ES684	Botardo-Alfahuara	5.7	6.7
ES632	Las Viñas	5.7	5.8
ES631	Amarguillo	5.7	6.3
ES627	Alhama de Murcia (2/4)	5.7	6.6
ES626	Alhama de Murcia (1/4)	5.7	6.8
ES607	Jumilla (Sector Murcia) (3/3)	5.7	6.5
ES606	Jumilla (Sector Murcia) (2/3)	5.7	6.8
ES605	Jumilla (Sector Murcia) (1/3)	5.7	6.8
ES604	Crevillente (Sector Alicante) (1/2)	5.7	6.8
ES603	Crevillente (Sector Murcia) (3/3)	5.7	6.6
ES602	Crevillente (Sector Murcia) (2/3)	5.7	6.9
ES601	Crevillente (Sector Murcia) (1/3)	5.7	6.8



**Región 38.** Esta región contiene 6 fallas (o segmentos de falla) (Tabla AI. 6), entre ellos, el segmento de falla de Carboneras (1/2), con la tasa de deslizamiento y tamaño mayor de todo el área de estudio. La magnitud máxima observada en su periodo completo es de 5.4.

Tabla AI. 6. Fallas y segmentos de falla contenidos en la región 38, indicando las magnitudes máximas que pueden generar y la magnitud máxima de completitud de la zona.

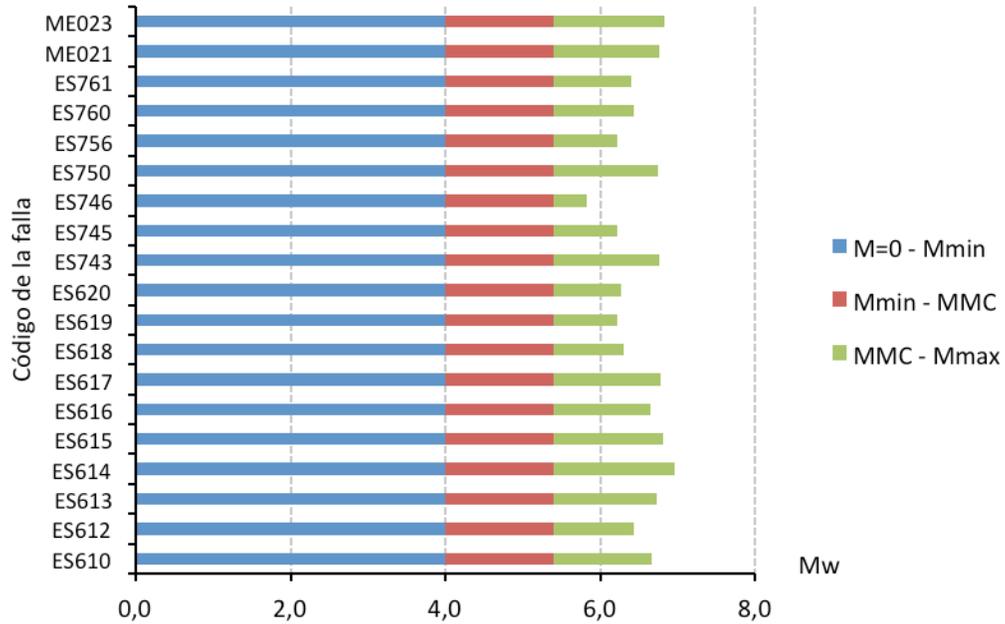
ID	Nombre	MMC	Mmax
ES636	Polopos fault zone (2/2)	5.4	6.3
ES635	Polopos fault zone (1/2)	5.4	6.3
ES630	Carboneras (1/2)	5.4	7.3
ES625	Alhamilla Sur	5.4	6.7
ES611	Corredor de Las Alpujarras (Sector Almería)	5.4	7.0
ES609	Palomares (1/2)	5.4	6.9



**Región 39.** Esta región contiene 19 fallas (y segmentos de falla) (Tabla AI. 7). La magnitud máxima observada en su periodo completo es de 5.4.

Tabla AI. 7. Fallas y segmentos de falla contenidos en la región 39, indicando las magnitudes máximas que pueden generar y la magnitud máxima de completitud de la zona.

ID	Nombre	MMC	Mmax
ME023	Santa Pola	5.4	6.8
ME021	Bajo Segura Offshore	5.4	6.8
ES761	Falla de Águilas	5.4	6.4
ES760	Los Tollos	5.4	6.4
ES756	La Galera	5.4	6.2
ES750	La Puebla	5.4	6.7
ES746	Garrovilla	5.4	5.8
ES745	El Cantal	5.4	6.2
ES743	West Cabezo Gordo (Murcia - Mar Menor)	5.4	6.8
ES620	Bajo Segura (3/3)	5.4	6.3
ES619	Bajo Segura (2/3)	5.4	6.2
ES618	Bajo Segura (1/3)	5.4	6.3
ES617	San Miguel de Salinas	5.4	6.8
ES616	Torreveja	5.4	6.6
ES615	Carrascoy	5.4	6.8
ES614	Las Moreras - Escarpe de Mazarrón (3/3)	5.4	6.9
ES613	Las Moreras - Escarpe de Mazarrón (2/3)	5.4	6.7
ES612	Las Moreras - Escarpe de Mazarrón (1/3)	5.4	6.4
ES610	Palomares (2/2)	5.4	6.7



*Modelo de recurrencia y valor de  $\beta$  de la falla.*

El modelo de recurrencia que se asignará a las fallas será el de GR modificado y se considerará que todas las fallas contenidas en una misma región tendrán igual valor de  $\beta$  (y ligeramente menor que el valor de  $\beta$  de la zona).

Para poder calcular el valor de  $\beta$  de las fallas que haga que el potencial sísmico de la región se mantenga, se utilizará la ecuación [AI 9] tal y como se detalla en el Capítulo 3, donde la  $\beta$  asociada a las fallas es la única incógnita de la igualdad.

$$N_{min} \int_{M_{min}}^{M_{max}} h(M) \rho_{falla}(\beta, \tau_{falla}) \cdot \tau_{falla}^{M_{max}} + \sum \rho(M) \rho_{falla}(\beta, \tau_{falla}) \cdot \tau_{falla}^{M_{max}} \quad [AI. 9]$$

Operando de este modo, se obtiene el valor de la  $\beta$  de las fallas de cada región, que se presenta en la Tabla AI. 8 y, al mismo tiempo, se van obteniendo las tasas de momento sísmico y sismicidad asociadas a la zona.

Tabla AI. 8. Valor de las betas de las fallas obtenidas.

Zona	$\beta$ -fallas
30	1.560
31	1.470
37	1.785
38	1.930
39	1.430

*Reparto del potencial sísmico.*

En la Tabla AI. 9 se muestra una tabla detallada con las tasas de sismicidad y de momento sísmico asociadas a las fallas de cada región.

Tabla AI. 9. Tasas de sismicidad y de momento sísmico de las fallas en el intervalo de magnitud completa (Mmin-MMC).  
 (%: porcentaje de tasa de momento sísmico de la falla que se ha observado en el intervalo de magnitudes (Mmin, MMC)  
 frente a la tasa de momento sísmico asociada a la falla (Mmin, Mmaxfalla): % =  $\dot{M}_o$  (Mmin-MMC) /  $\dot{M}_o$  (Mmin-Max).

Región	ID - Falla	Nombre	min (Mmin - MMC)	o (Mmin - MMC)	%
30	ES728	Socovos (1/2)	0.002	5.90E+19	1%
	ES730	Pozohondo	0.003	1.02E+20	1%
	ES765	Rambla del Puerto	0.000	4.53E+18	7%
	ES766	Sur de Revolcadores	0.000	7.32E+18	5%
31	ES608	Jumilla (Sector Valencia) (2/2)	0.003	6.96E+20	7%
	ES622	Muro de Alcoy (o de Mariola)	0.007	2.56E+20	1%
	ES624	Benasau	0.010	2.33E+21	44%
	ES634	Jumilla (Sector Valencia) (1/2)	0.003	7.11E+20	7%
	ME005	Cabo de Cullera Western Fault	0.002	4.17E+20	9%
	ME006	Cabo de Cullera Central-Western Fault	0.002	4.10E+20	11%
	ME007	Cabo de Cullera Central-Eastern Fault	0.001	3.01E+20	6%
	ME008	Cabo de Cullera Eastern Fault	0.001	2.55E+20	16%
ME009	Southwest of Columbretas Basin	0.001	2.38E+20	24%	
37	ES601	Crevillente (Sector Murcia) (1/3)	0.010	1.90E+21	13%
	ES602	Crevillente (Sector Murcia) (2/3)	0.011	2.12E+21	11%
	ES603	Crevillente (Sector Murcia) (3/3)	0.009	1.64E+21	18%
	ES604	Crevillente (Sector Alicante) (1/2)	0.007	1.33E+21	13%
	ES605	Jumilla (Sector Murcia) (1/3)	0.001	1.53E+20	13%
	ES606	Jumilla (Sector Murcia) (2/3)	0.001	1.46E+20	13%
	ES607	Jumilla (Sector Murcia) (3/3)	0.003	6.00E+20	21%
	ES626	Alhama de Murcia (1/4)	0.043	8.30E+21	13%
	ES627	Alhama de Murcia (2/4)	0.023	4.43E+21	18%
	ES631	Amarguillo	0.005	8.62E+20	29%
	ES632	Las Viñas	0.009	1.66E+21	67%
	ES684	Botardo-Alfahuara	0.003	6.00E+20	15%
	ES716	Albox	0.001	2.47E+20	29%
	ES729	Socovos (2/2)	0.022	4.12E+21	11%
	ES769	La Junquera-Mancheño	0.009	1.78E+21	25%
38	ES609	Palomares (1/2)	0.003	3.58E+20	8%
	ES611	Corredor de Las Alpujarras	0.006	6.57E+20	7%
	ES625	Alhambilla Sur	0.003	3.70E+20	10%
	ES630	Carboneras (1/2)	0.165	1.77E+22	4%
	ES635	Polopos fault zone (1/2)	0.002	2.00E+20	19%
	ES636	Polopos fault zone (2/2)	0.003	2.71E+20	19%
39	ES610	Palomares (2/2)	0.001	2.03E+20	6%
	ES612	Las Moreras - Escarpe de Mazarrón (1/3)	0.001	1.90E+20	10%
	ES613	Las Moreras - Escarpe de Mazarrón (2/3)	0.002	2.08E+20	6%
	ES614	Las Moreras - Escarpe de Mazarrón (3/3)	0.002	2.23E+20	4%
	ES615	Carrascoy	0.024	3.30E+21	5%
	ES616	Torre vieja	0.004	6.16E+20	7%
	ES617	San Miguel de Salinas	0.018	2.52E+21	5%
	ES618	Bajo Segura (1/3)	0.015	2.08E+21	12%
	ES619	Bajo Segura (2/3)	0.010	1.36E+21	15%
	ES620	Bajo Segura (3/3)	0.007	1.03E+21	12%
	ES743	West Cabezo Gordo (Murcia - Mar Menor)	0.003	4.07E+20	5%
	ES745	El Cantal	0.002	2.58E+20	15%
	ES746	Garrovilla	0.001	1.09E+20	34%
	ES750	La Puebla	0.003	3.78E+20	6%
	ES756	La Galera	0.002	2.58E+20	15%
	ES760	Los Tollos	0.004	6.06E+20	10%
	ES761	Falla de Águilas	0.001	1.48E+20	10%
	ME021	Bajo Segura Offshore	0.009	1.20E+21	5%
	ME023	Santa Pola	0.002	2.20E+20	5%

En la Tabla AI. 10 se presenta un resumen del reparto de potencial sísmico de cada región entre las fallas y las zonas.

SERVICIO DE ACTUALIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE RIESGO SÍSMICO (RISMUR) EN LA REGIÓN DE MURCIA

Tabla Al. 10. Reparto de las tasas de sismicidad y momento sísmico. (%: representa el porcentaje de tasa de momento sísmico de la región asociado a las fallas y a la zona en el intervalo de magnitudes registradas de forma completa en el catálogo (Mmin, MMC). %=  $\dot{M}_o$  (Mmin – MMC) falla o zona/  $\dot{M}_o$  (Mmin – MMC) región.

Región	Fuente	$\dot{M}_{min}$ (Mmin - MMC)	$\dot{M}_o$ (Mmin – MMC)	%
30	Zona	0.051	1.73E+21	91%
	$\Sigma$ Fallas	0.006	1.73E+20	9%
	<b>Total</b>	<b>0.056</b>	<b>1.90E+21</b>	
31	Zona	0.210	4.14E+22	88%
	$\Sigma$ Fallas	0.029	5.61E+21	12%
	<b>Total</b>	<b>0.239</b>	<b>4.70E+22</b>	
37	Zona	0.284	5.41E+22	64%
	$\Sigma$ Fallas	0.156	2.99E+22	36%
	<b>Total</b>	<b>0.440</b>	<b>8.40E+22</b>	
38	Zona	0.352	3.77E+22	66%
	$\Sigma$ Fallas	0.183	1.96E+22	34%
	<b>Total</b>	<b>0.534</b>	<b>5.72E+22</b>	
39	Zona	0.171	2.38E+22	61%
	$\Sigma$ Fallas	0.111	1.53E+22	39%
	<b>Total</b>	<b>0.282</b>	<b>3.91E+22</b>	

## ANEXO II. CALIBRACION DE MODELOS DE ATENUACION CON DATOS LOCALES

---

### *Análisis de residuos*

Una vez analizados los nuevos modelos NGA-West 2 se ha realizado un contraste de los mismos con acelerogramas locales de nuestra BDA. El fin último de este estudio es identificar qué modelos se ajustan mejor a nuestros datos y por tanto reproducen de forma más realista la atenuación en nuestra zona de aplicación. Estos modelos serán entonces los más idóneos para el posterior cálculo de la peligrosidad. Teniendo en cuenta la alta sensibilidad de los resultados a los modelos que se apliquen, la elección de los mismos tiene una importancia especial, por lo que se han aplicado las últimas metodologías propuestas para el contraste de modelos con significación estadística. Se han utilizado dos metodologías diferentes:

- Metodología propuesta por Scherbaum et al. (2004)
- Metodología propuesta por Kale & Akkar (2012)

### *Metodología de Scherbaum et al. (2004)*

Este método permite comprobar hasta qué punto una GMPE, desarrollada con una base de datos concreta, puede reproducir satisfactoriamente la atenuación que reflejan los datos de movimiento fuerte de otras regiones. Se establecen entonces criterios para seleccionar los modelos que mejor se ajustan nuestra muestra de datos.

Los autores de este método proponen una clasificación de las GMPE según su grado de adecuación a una base de datos de movimiento fuerte registrados basada en cuatro estimadores estadísticos: la mediana de LH y la media, la mediana y la desviación estándar de la distribución de residuos normalizados. Ambos estimadores son adimensionales.

$$z = \frac{\ln(\frac{Y_{observado}}{Y_{modelo}})}{\sigma_{modelo}} \quad \text{[AII. 1]}$$

$$LH(|z|) = Erf\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right) \# \quad \text{[AII. 2]}$$

Donde:



Además de los estimadores estadísticos obtenidos analíticamente, se han representado los histogramas de los residuos normalizados, así como la distribución de los residuos LH. A modo de ejemplo, se presentan en la Figura AII. 1 las gráficas obtenidas en la calibración con el modelo de Amrahamson et al. (2013), que es el modelo que ha proporcionado mejor ajuste a los datos locales para el caso de PGA y SA (0.1s). En ellas se muestra un caso en el que la distribución de residuos normalizados tiene una desviación parecida a la de la distribución normal estándar y además la distribución de LH tiene un pico acentuado en 0.1.

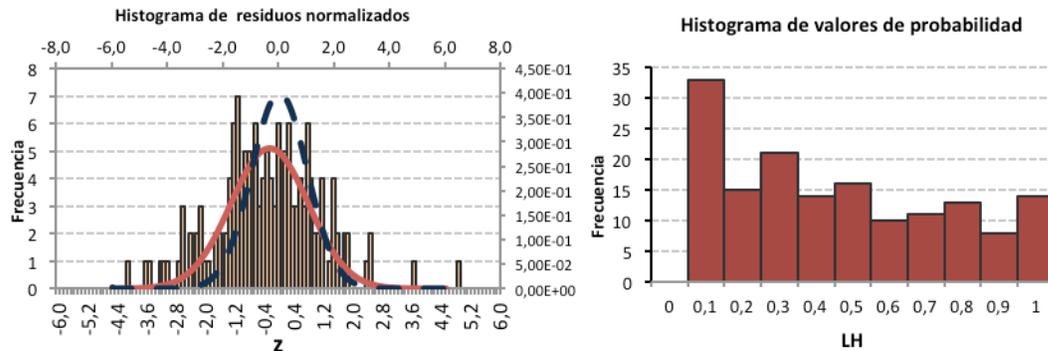


Figura AII. 1 Ejemplo de la distribución de residuos con el modelo de Amrahamson et al. (2013), según la metodología de Scherbaum et al. (2004). La distribución simétrica muestra un ajuste óptimo de los datos al modelo.

*Metodología Kale y Akkar (2012)*

En un trabajo más reciente, Kale y Akkar (2012) proponen una nueva metodología para el contraste de modelos existentes con datos locales, que surge como alternativa a los métodos anteriores propuestos por Scherbaum et al. (2004, 2009).

La metodología propuesta está basada en el uso de distancias euclidianas y pretende ser una alternativa que subsane los inconvenientes encontrados en los métodos de Scherbaum et al. (2004, 2009).

Tal y como exponen Kale y Akkar, la metodología de Scherbaum et al. 2004 presenta una gran dependencia con el tamaño de la base de datos y no considera la desviación estándar de las GMPE de una manera consistente. Esto significa que entre dos GMPE que proporcionan estimaciones medias similares, aquella que presente una sigma mayor, ofrecería mejores resultados al aplicar el test. Asimismo el método utiliza cuatro estimadores diferentes, no jerarquizados, que pueden establecer diferentes clases para un mismo modelo, haciendo que la decisión final siga siendo subjetiva.

La nueva metodología de Kale y Akkar (2012) pretende tener en cuenta la sigma de los movimientos estimados y medir la relación entre los datos observados y la media de los datos estimados, así como evitar que el método esté limitado al tamaño de la base de datos. El método está basado en el concepto de distancia euclidiana (Euclidean Distance, DE), definida como la diferencia absoluta entre los valores de aceleración observados y estimados.

$$DE^2 = \sum_{i=1}^N (p_i - q_i)^2 \quad [\text{AII. 4}]$$

Esta distancia es ligeramente modificada siguiendo una serie de reglas probabilísticas básicas para tener en consideración la sigma en el análisis:

$$MDE = \sum_{i=1}^N |d_i| \Pr(|D| < |d_i|) \quad [\text{AII. 5}]$$

De esta forma se considera que para cada dato observado, la GMPE candidata puede estimar un rango de valores debido a la desviación asociada al modelo que sigue por tanto una distribución de probabilidad, evaluando de este modo las diferencias entre el valor de aceleración observado y el rango de estimaciones de aceleración para un punto individual.

Finalmente para la selección y clasificación de los modelos de movimiento fuerte más idóneos, los autores proponen tres indicadores diferentes:

$$MDE = \sum_{i=1}^N |d_i| \Pr(|D| < |d_i|) \quad [\text{AII. 6}]$$

$$K = \frac{DE_{original}}{DE_{modificada}} \quad [\text{AII. 7}]$$

$$EDR = \sqrt{\left( k \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N MDE_i^2 \right)^{\#} \# \# \#} \quad [\text{AII. 8}] \#$$

Donde MDE (*Modified Euclidean Distance*) es el estimador que tiene en cuenta la sigma de los modelos,  $k$  representa la relación entre los datos observados y los estimados por el modelo y el estimador EDR es la combinación de los dos indicadores anteriores ( $k$ ,  $MDE$ ). Los propios autores proporcionan el código para MATLAB para el cálculo de EDR así como Kappas y MDE normalizada.

Pequeños valores de MDE Y EDR proporcionan una mejor representación de los datos por el modelo predictivo que se está calibrando y el valor óptimo del estimador  $K$  es 1.

Los resultados obtenidos en el contraste para cada uno de los modelos para PGA y SA 0.1s y SA 1.0s se muestran en la Tabla AII. 3, destacando aquellos modelos que se ajustan mejor a nuestros datos según los criterios dados por los autores y mencionados anteriormente. Además, en la Figura AII. 2, se muestra la representación de la distribución de los valores de los indicadores descritos y obtenidos con cada uno de los modelos.

Tabla AII. 3 Resultados de la calibración con el método de Kale y Akkar (2012)

Resultados de la calibración para PGA			
	MDE	Kappa	EDR
<b>ASK13</b>	<b>1.271</b>	<b>1.037</b>	<b>1.319</b>
<b>CB13</b>	<b>1.075</b>	<b>1.047</b>	<b>1.125</b>
CY13	1.380	1.210	1.670
BSSA13	1.597	1.291	2.062
ID13	2.065	1.286	2.656
Resultados de la calibración para SA (0.1 s)			
	MDE	Kappa	EDR
<b>ASK13</b>	<b>1.339</b>	<b>1.044</b>	<b>1.398</b>
<b>CB13</b>	<b>1.121</b>	<b>1.071</b>	<b>1.201</b>
CY13	1.940	1.371	2.661
BSSA13	2.283	1.480	3.380
I13	1.832	1.256	2.302
Resultados de la calibración para SA (1.0 s)			
	MDE	Kappa	EDR
ASK13	1.192	1.085	1.294
CB13	1.687	1.296	2.187
CY13	0.984	1.044	1.027
BSSA13	1.147	1.138	1.306
I13	2.296	1.39	3.210

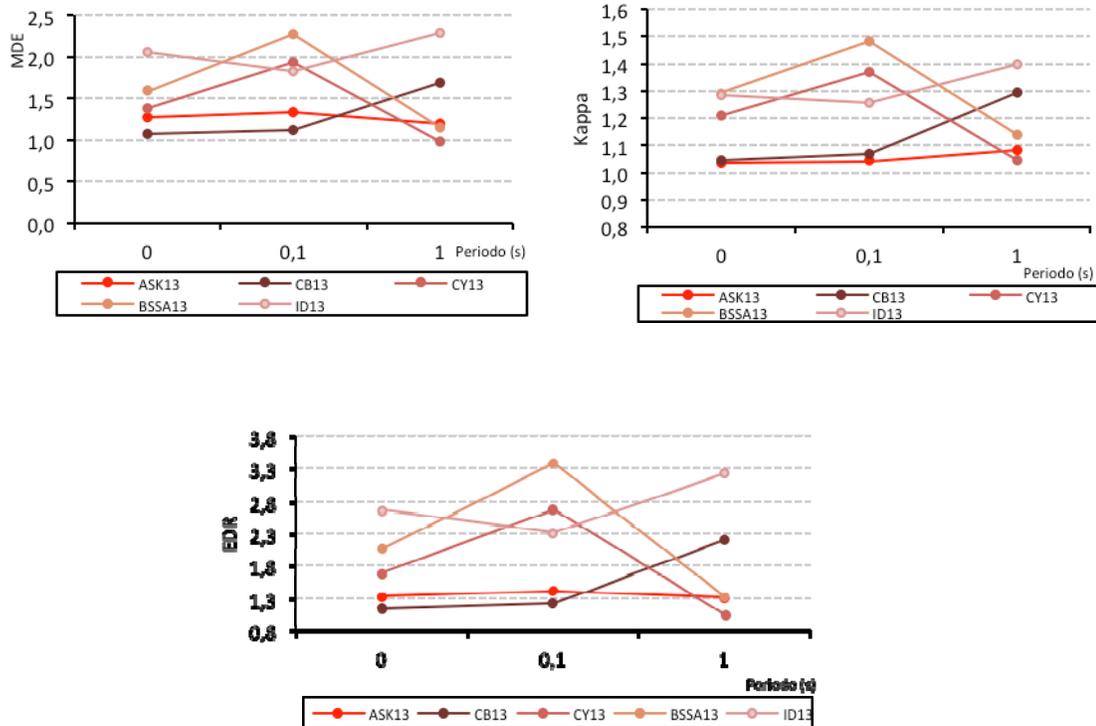


Figura AII. 2 Distribución de los valores de los indicadores descritos, obtenidos con cada uno de los modelos calibrados con nuestra base de datos acelerométrica.

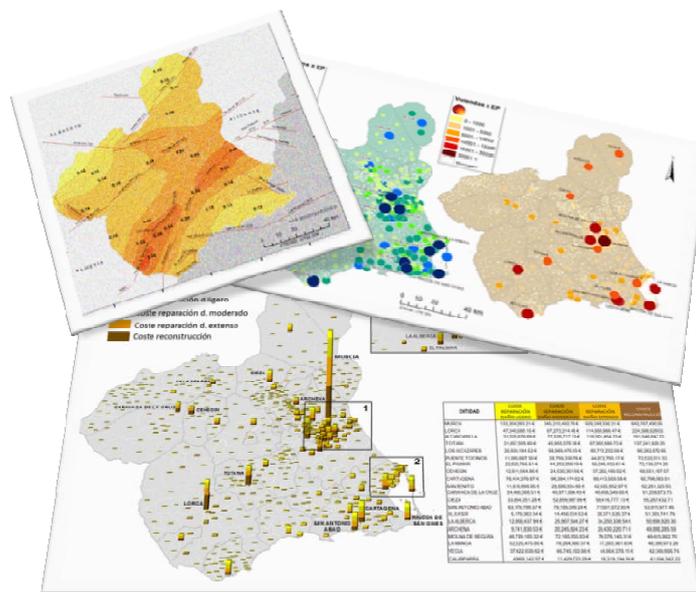




# SERVICIO DE ACTUALIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE RIESGO SÍSMICO (RISMUR) EN LA REGIÓN DE MURCIA

## Anejo

### VULNERABILIDAD DE LA REGIÓN DE MURCIA



#### Equipo de trabajo

Patrick Murphy Corella

Belén Benito Oterero

Alicia Rivas Medina

Mercedes Pérez Escalante

Ligia Elena Quirós

Sandra Ruiz Barajas

Jorge Gaspar Escribano

Román Hernández Rey

BroadwayMalyan<sup>BM</sup>





## Contenido

<b>1</b>	<b>DEFINICIONES Y PROCEDIMIENTOS</b> .....	<b>4</b>
1.1.1	DEFINICIÓN DE LA VULNERABILIDAD .....	5
1.1.2	CLASIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD.....	5
1.1.3	ESCALA MACROSÍSMICA EUROPEA EMS 98 .....	5
1.1.4	ÍNDICE DE VULNERABILIDAD DEL PROYECTO RISK UE .....	7
1.1.5	FEMA .....	7
<b>2</b>	<b>EL PARQUE INMOBILIARIO DE LA REGIÓN DE MURCIA</b> .....	<b>9</b>
2.1	FUENTES ESTADÍSTICAS .....	10
2.1.1	INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA INE.....	10
2.1.2	DIRECCIÓN GENERAL DE CATASTRO .....	10
2.2	EDIFICIOS, VIVIENDAS Y POBLACIÓN .....	15
2.2.1	EDIFICIOS.....	15
2.2.2	VIVIENDAS .....	16
2.2.3	POBLACIÓN.....	17
<b>3</b>	<b>LA VULNERABILIDAD DEL PARQUE INMOBILIARIO</b> .....	<b>18</b>
3.1	TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS DE LA REGIÓN DE MURCIA.....	19
3.1.1	M11 ESTRUCTURA MURARIA DE MAMPOSTERÍA SIN EFECTO DIAFRAGMA .....	19
3.1.2	M31 ESTRUCTURA MURARIA DE LADRILLO SIN EFECTO DIAFRAGMA .....	20
3.1.3	M34 ESTRUCTURA MURARIA DE LADRILLO CON EFECTO DIAFRAGMA.....	21
3.1.4	MC31-PRE ESTRUCTURA DE PÓRTICOS DE H.A. SIN DISEÑO SISMORRESISTENTE .....	22
3.1.5	MC31-LOW ESTRUCTURA DE PÓRTICOS DE H.A. CON DISEÑO SISMORRESISTENTE....	24
3.2	MATRIZ DE VULNERABILIDAD RISMUR II.....	25
3.2.1	LA VULNERABILIDAD Y LA EDAD DE LA EDIFICACIÓN .....	25
3.2.2	MATRIZ DE VULNERABILIDAD PARA LA REGIÓN DE MURCIA .....	25
3.3	RESULTADOS.....	26

3.3.1	RESULTADOS GLOBALES.....	26
3.3.2	DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LA VULNERABILIDAD .....	27
<b>4</b>	<b>EL TERREMOTO DE LORCA DE MAYO 2011 .....</b>	<b>29</b>
4.1	A: TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS Y CARACTERÍSTICAS URBANÍSTICAS DE LA CIUDAD DE LORCA .....	30
4.2	B: DAÑOS OBSERVADOS DURANTE EL TERREMOTO DE LORCA .....	48
4.3	C: ESTADÍSTICAS A DAÑOS A EDIFICIOS.....	71
4.4	D: CONCLUSIONES .....	78
	REFERENCIAS .....	84

# 1 DEFINICIONES Y PROCEDIMIENTOS

## 1.1.1 DEFINICIÓN DE LA VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad de una edificación es su fragilidad ante una acción sísmica determinada.

En la edificación tecnológica, ejecutada bajo el amparo de normas tecnológicas, las prestaciones sismorresistentes pueden ser obligatorias, definiéndose en dichas normas el tipo de estabilidad estructural prescrito para su emplazamiento.

En el caso de la edificación tradicional, ejecutada con anterioridad a las normas tecnológicas de obligado cumplimiento, se puede observar prestaciones sismorresistentes accidentales, fruto de la naturaleza compositiva de la construcción, o debido a buenas prácticas constructivas. Por otro lado, un mal comportamiento estructural puede observarse en edificios amparados por normas sismorresistentes que sin embargo presentan defectos de concepto o en su ejecución material.

## 1.1.2 CLASIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

Son varias las agencias y grupos de investigación, que desde mediados de los años 50 han ido desarrollando procedimientos para clasificar y evaluar la edificación para estimar su vulnerabilidad ante la acción sísmica. En la actualidad existen tres fuentes de clasificación que actualmente tienen amplia aceptación y arraigo en la literatura científica europea: La escala EMS 98, el método de Índice de Vulnerabilidad, y la clasificación del FEMA norteamericano. Dos son los factores que determinan la idoneidad de selección de una escala adecuada. La primera de ellas es lo bien descritas que aparecen las tipologías constructivas de la zona geográfica a considerar en la escala que estamos considerando. La segunda es la disponibilidad en la literatura científica de curvas de fragilidad para las clasificaciones de vulnerabilidad que define cada escala. En el caso concreto de esta revisión del Rismur II, se ha descartado la escala norteamericana FEMA por su escaso detalle a la hora de documentar estructuras tradicionales de muro de carga, tan representativas del parque inmobiliario de Murcia.

## 1.1.3 ESCALA MACROSÍSMICA EUROPEA EMS 98

En el año 1992 Grünthal et.al publicó la Escala Macrosísmica Europea 92, con su edición definitiva en 1998, conociéndose como la EMS 98. Esta escala viene a reemplazar la escala macrosísmica MSK, oficial en España hasta la entrada en vigor de la EMS 98 en ese año.

La EMS 98 determina 6 escalas de vulnerabilidad, identificadas por las primeras 6 letras del alfabeto, y ordenadas de mayor a menor vulnerabilidad, siendo la A la tipología más vulnerable, y la F la menos vulnerable.

La EMS 98 Asigna quince tipologías constructivas a las seis clases de vulnerabilidad, dedicando siete de ellas a la edificación en muro de carga, seis a estructuras de hormigón armado y una a estructuras metálicas y de madera respectivamente. (Fig. 1)

	Type of Structure	Vulnerability Class					
		A	B	C	D	E	F
MASONRY	rubble stone, fieldstone						○
	adobe (earth brick)					○	—
	simple stone						○
	massive stone						○
	unreinforced, with manufactured stone units						○
	unreinforced, with RC floors						○
	reinforced or confined						○
REINFORCED CONCRETE (RC)	frame without earthquake-resistant design (ERD)						○
	frame with moderate level of ERD						○
	frame with high level of ERD						○
	walls without ERD						○
	walls with moderate level of ERD						○
	walls with high level of ERD						○
STEEL	steel structures						○
WOOD	timber structures						○

Figura 1 Tipologías constructivas consideradas en la EMS 98

Los valores bajos D, E y F están reservados a aquellas estructuras que presentan diseño sismorresistente, reservándose las clases E y F a estructuras muy robustas, fruto de un emplazamiento con grandes exigencias sismorresistentes desde una perspectiva global, con el objetivo de que la escala sirva para clasificar edificios mundialmente, incluyendo emplazamientos de máxima sismicidad como la costa andina latinoamericana. En las condiciones de sismicidad moderada que prevalece en España, no es de esperar este tipo de prestaciones sismorresistentes avanzadas, limitándose el abanico de valores entre la A y la D.

El proyecto Rismur I, realizado en 2006 utilizó la EMS 98 para la clasificación de la vulnerabilidad de Murcia. En este trabajo se ha decidido seguir utilizando esta escala, incorporando además una segunda forma de clasificación, el de índice de vulnerabilidad.

## 1.1.4 ÍNDICE DE VULNERABILIDAD DEL PROYECTO RISK UE

Hacia finales de los 90 se completó un proyecto multidisciplinar financiado por el consejo europeo sobre la vulnerabilidad de la edificación en Europa, conociéndose esta metodología como el Índice de Vulnerabilidad.

Este método identifica 23 tipologías constructivas comunes en Europa, asignándoles un código y valor alfanumérico, siendo el valor 1 el de mayor vulnerabilidad y el 0 el de menor vulnerabilidad.

A diferencia de la escala EMS 98, el método de Índice de Vulnerabilidad permite el análisis de edificios singulares, permitiendo una clasificación a medida incorporando variables como irregularidades geométricas o deficiencias constructivas, si bien, también presenta valores característicos para cada tipología constructiva. (Fig 2)

Typology	Description	$V_I$ representative values				
		$V_{I,BEM}^{min}$	$V_{I,BEM}^{-}$	$V_{I,BEM}^{+}$	$V_{I,BEM}^{+}$	$V_{I,BEM}^{max}$
M1.1	Rubble stone, fieldstone	0.62	0.81	0.873	0.98	1.02
M1.2	Simple stone	0.46	0.65	0.74	0.83	1.02
M1.3	Massive stone	0.3	0.49	0.616	0.793	0.86
M2	Adobe	0.62	0.687	0.84	0.98	1.02
M3.1	Wooden slabs	0.46	0.65	0.74	0.83	1.02
M3.2	Masonry vaults	0.46	0.65	0.776	0.953	1.02
M3.3	Composite steel and masonry slabs	0.46	0.527	0.704	0.83	1.02
M3.4	Reinforced concrete slabs	0.3	0.49	0.616	0.793	0.86
M4	Reinforced or confined masonry walls	0.14	0.33	0.451	0.633	0.7
M5	Overall strengthened	0.3	0.49	0.694	0.953	1.02
RC1	Concrete Moment Frames	-0.02	0.047	0.442	0.8	1.02
RC2	Concrete shear walls	-0.02	0.047	0.386	0.67	0.86
RC3.1	Regularly infilled walls	-0.02	0.007	0.402	0.76	0.98
RC3.2	Irregular frames	0.06	0.127	0.522	0.88	1.02
RC4	RC Dual systems (RC frame and wall)	-0.02	0.047	0.386	0.67	0.86
RC5	Precast Concrete Tilt-Up Walls	0.14	0.207	0.384	0.51	0.7
RC6	Precast C. Frames, C. shear walls	0.3	0.367	0.544	0.67	0.86
S1	Steel Moment Frames	-0.02	0.467	0.363	0.64	0.86
S2	Steel braced Frames	-0.02	0.467	0.287	0.48	0.7
S3	Steel frame+unreinforced masonry infill walls	0.14	0.33	0.484	0.64	0.86
S4	Steel frame+cast-in-place shear walls	-0.02	0.047	0.224	0.35	0.54
S5	Steel and RC composite system	-0.02	0.257	0.402	0.72	1.02
W	Wood structures	0.14	0.207	0.447	0.64	0.86

Figura 2 tipologías constructivas consideradas en el Índice de Vulnerabilidad

Dado el mayor grado de detalle que presenta este método, y la relativa disponibilidad de curvas de fragilidad, y más actualizadas, se ha decidido como novedad en este estudio Rismur II analizar la vulnerabilidad de la Región de Murcia de acuerdo a este método, disponiendo así de la información siguiendo dos metodologías diferenciadas.

## 1.1.5 FEMA

La agencia norteamericana de emergencias (FEMA) propone un sistema de clasificación de 15 tipologías constructivas, diferenciándolas además por número de plantas. La desventaja de esta clasificación es la escasa representación de las tipologías tradicionales de estructura muraria, tan características de los edificios de la Región de Murcia. (Fig 3)

No.	Label	Description	Height			
			Range		Typical	
			Name	Stories	Stories	Feet
1	W1	Wood, Light Frame ( $\leq 5,000$ sq. ft.)		1 - 2	1	14
2	W2			All	2	24
3	S1L	Steel Moment Frame	Low-Rise	1 - 3	2	24
4	S1M		Mid-Rise	4 - 7	5	60
5	S1H		High-Rise	8+	13	156
6	S2L		Steel Braced Frame	Low-Rise	1 - 3	2
7	S2M		Mid-Rise	4 - 7	5	60
8	S2H		High-Rise	8+	13	156
9	S3		Steel Light Frame		All	1
10	S4L	Steel Frame with Cast-in-Place Concrete Shear Walls	Low-Rise	1 - 3	2	24
11	S4M		Mid-Rise	4 - 7	5	60
12	S4H		High-Rise	8+	13	156
13	S5L	Steel Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls	Low-Rise	1 - 3	2	24
14	S5M		Mid-Rise	4 - 7	5	60
15	S5H		High-Rise	8+	13	156
16	C1L	Concrete Moment Frame	Low-Rise	1 - 3	2	20
17	C1M		Mid-Rise	4 - 7	5	50
18	C1H		High-Rise	8+	12	120
19	C2L	Concrete Shear Walls	Low-Rise	1 - 3	2	20
20	C2M		Mid-Rise	4 - 7	5	50
21	C2H		High-Rise	8+	12	120
22	C3L	Concrete Frame with Unreinforced Masonry Infill Walls	Low-Rise	1 - 3	2	20
23	C3M		Mid-Rise	4 - 7	5	50
24	C3H		High-Rise	8+	12	120
25	PC1	Precast Concrete Tilt-Up Walls		All	1	15
26	PC2L	Precast Concrete Frames with Concrete Shear Walls	Low-Rise	1 - 3	2	20
27	PC2M		Mid-Rise	4 - 7	5	50
28	PC2H		High-Rise	8+	12	120
29	RM1L	Reinforced Masonry Bearing Walls with Wood or Metal Deck Diaphragms	Low-Rise	1-3	2	20
30	RM1M		Mid-Rise	4+	5	50
31	RM2L	Reinforced Masonry Bearing Walls with Precast Concrete Diaphragms	Low-Rise	1 - 3	2	20
32	RM2M		Mid-Rise	4 - 7	5	50
33	RM2H		High-Rise	8+	12	120
34	URML	Unreinforced Masonry Bearing Walls	Low-Rise	1 - 2	1	15
35	URMM		Mid-Rise	3+	3	35
36	MH	Mobile Homes		All	1	10

Figura 3 Tipologías estructurales consideradas por el FEMA

## 2 EL PARQUE INMOBILIARIO DE LA REGIÓN DE MURCIA

## 2.1 FUENTES ESTADÍSTICAS

---

La asignación de la vulnerabilidad a una región requiere la confección de una base estadística que contenga el número de edificios y viviendas que se someten a análisis. La información debe presentarse al nivel de detalle geográfico establecido al inicio del trabajo, siendo en este caso el de entidad poblacional, y ser la más actualizada posible. En España hay dos agencias estatales que poseen esta información, el Instituto nacional de Estadística (INE) y la dirección general de catastro.

### 2.1.1 INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA INE

El INE realiza campañas de documentación estadística de edificios y viviendas, recogiendo además abundante información complementaria como la edad de la edificación, número de plantas y estado de conservación de los edificios.

La desventaja de la información disponible desde el INE es lo espaciado de las campañas y el tiempo que transcurre hasta que dicha información se hace disponible. Así, el Rismur I se realizó con los datos del INE de la campaña del 2001, y a la hora de realizar esta revisión, se había realizado la campaña del 2011, pero sus datos no se hallaban disponibles en su totalidad.

Por este motivo, se decidió realizar la confección de la base estadística del parque inmobiliario con los datos disponibles de Catastro, actualizada al año 2013, usando el censo poblacional del INE para el año 2011.

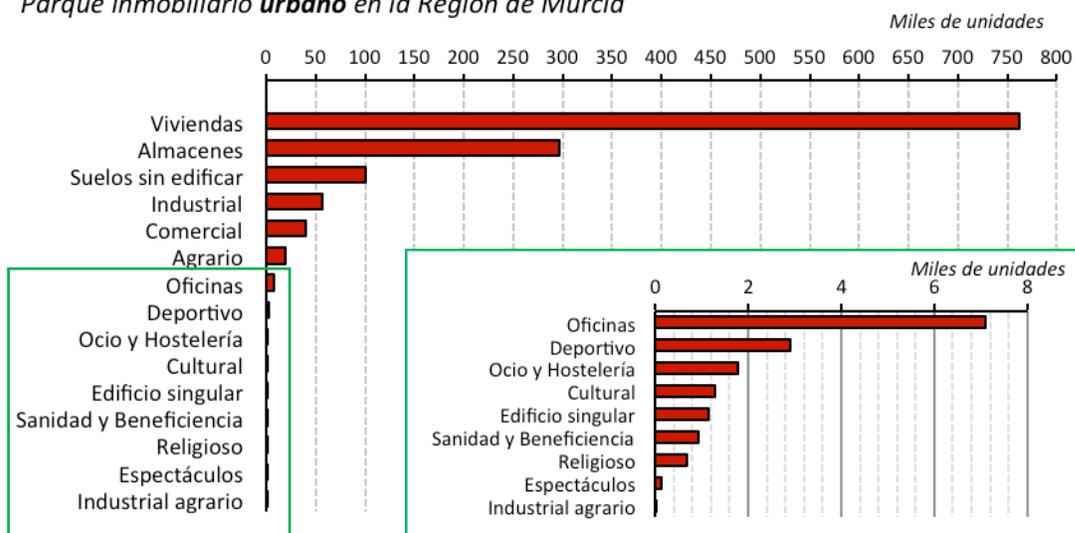
### 2.1.2 DIRECCIÓN GENERAL DE CATASTRO

La dirección general de catastro recoge información acerca de viviendas y edificios en unidades catastrales, si bien su vocación no es puramente estadística, por lo que los datos requieren cierta depuración para discernir el número de edificios y viviendas del corpus de datos de catastro. A

continuación de describe el procedimiento seguido para determinar el número de edificios y viviendas en la Región de Murcia a partir de los datos de catastro.

Según la información registrada en la Dirección de Catastro (*fuentes: ficheros CAT Tipo 15*), la región de Murcia cuenta con un parque inmobiliario de 1.779.164 unidades. Estas unidades pueden agruparse, según el código catastral, en 899.323 unidades constructivas (UC). En la Figura se muestra unas gráficas con uso de cada unidad (registrada) para entornos urbanos y rurales.

#### Parque inmobiliario **urbano** en la Región de Murcia



#### Parque inmobiliario **rural** en la Región de Murcia

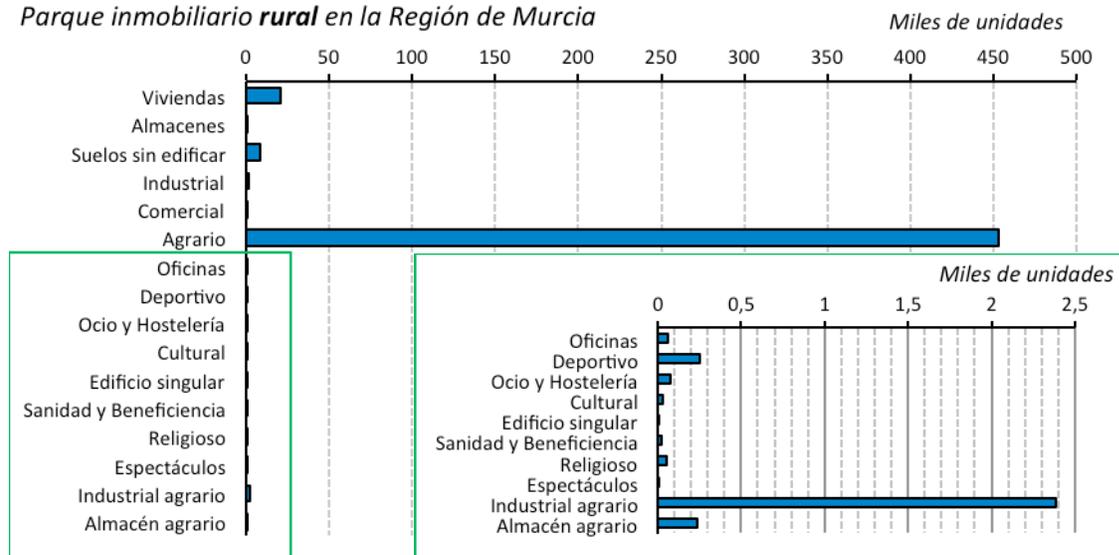


Figura 4. Parque inmobiliario en la Comunidad de la Región de Murcia para entorno urbano y rural

El tratamiento de la Base de Datos para la posterior asignación de vulnerabilidad ha requerido, en primer lugar, agrupar las unidades registradas en el catastro (referencias catastrales) en unidades constructivas (UC). En el caso de la cara con representación geográfica, se ha realizado una fusión

de los polígonos y se ha obtenido su centroide, dando como resultado una unidad geográfica más simple.

Atendiendo al tipo de uso de las unidades constructivas (UC), se ha procedido a la selección de aquellas unidades cuyo uso es “Vivienda”. En total se obtuvieron 295.476 UC. De estas UC, se han mantenido algunos atributos importantes para la asignación de la vulnerabilidad (el entorno (urbano o rural), número de plantas, año de construcción, número de viviendas, superficie del solar, superficie total construida y el código catastral único). En total se han censado 777.917 viviendas en la región de Murcia.

En la Figura se muestra un ejemplo de las UC (viviendas) catalogadas en un entorno rústico, diseminado y urbano.

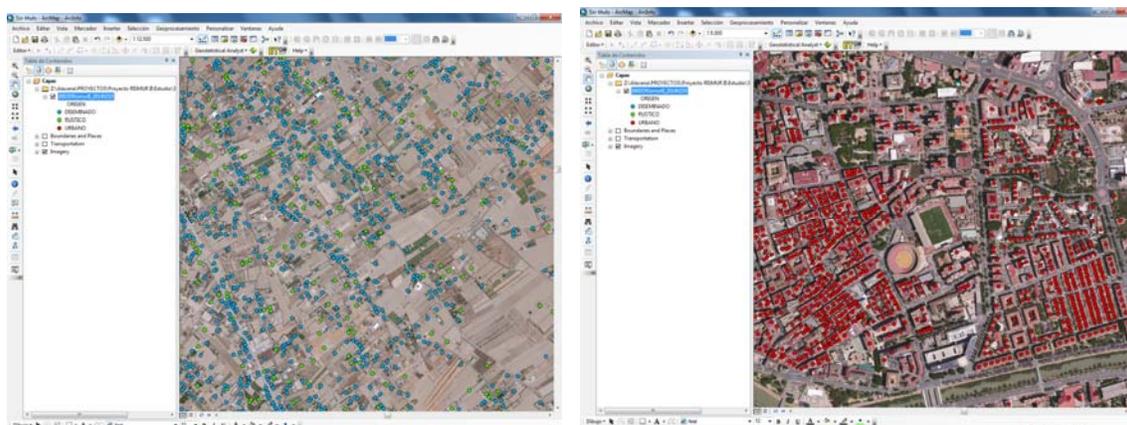


Figura 5. Ejemplo de una muestra de UC (vivienda) en un entorno rústico y diseminado (izda) y urbano (dcha).

### Edificios

Para obtener el número aproximado de edificios contenidos en el conjunto de unidades constructivas se establecieron diferentes indicadores de la base de datos como:

- 1) el número de años de construcción diferentes en cada unidad constructiva
- 2) la relación entre la superficie del solar y la superficie construida con el número de plantas
- 3) la relación entre el número de viviendas y el número de plantas.

Mediante relaciones estándar entre estos atributos fue posible obtener una cifra muy próxima a la aportada por otras fuentes de información, llegando a un total de 392.168 edificaciones. (389.965 edificios censados en el INE en 2011). No obstante, al aplicar las relaciones entre los distintos atributos de las unidades constructivas, se observaron ciertos errores en los datos de partida de la base de datos, en concreto se identificaron un número significativo de registros erróneos en el número de plantas de los edificios.

Los errores más comunes detectados fueron:

- Edificios con número de plantas muy superiores al de viviendas

- Edificios de gran altura con superficie construida muy inferior a los 1.000 m<sup>2</sup>
- Un gran número de edificios con 20 plantas
- 14 casos en los que el número de plantas era superior a las 33 alturas

Tras el análisis exhaustivo de estos indicios, se realizó un estudio en detalle de una muestra de 917 edificios cuyo número registrado de plantas era superior a 8 alturas. Se detectaron errores importantes en algunos de estos datos descargados del catastro. Aunque solo representan un 0.3% de la muestra poblacional final, se trata de los edificios más altos de la Región de Murcia y por tanto con incidencia significativa en el cálculo del riesgo, por lo que se han tratado de manera pormenorizada.

Para comprobar la calidad de los datos en casos donde se localizaron posibles anomalías y para poder subsanarlas, se revisaron las fuentes originales del catastro y, a través de la referencia catastral, se localizó la ubicación espacial de los registros anómalos. Esto se hizo con ayuda de imágenes satelitales gracias a la herramienta Google Earth (Figura ). Posteriormente, se hizo un chequeo del número de plantas real para cada edificio estudiado (Figura ) a partir de la vista Street View de la aplicación. En caso de no disponer de esta vista, se emplearon los datos del catastro para validar los datos en estos casos particulares.

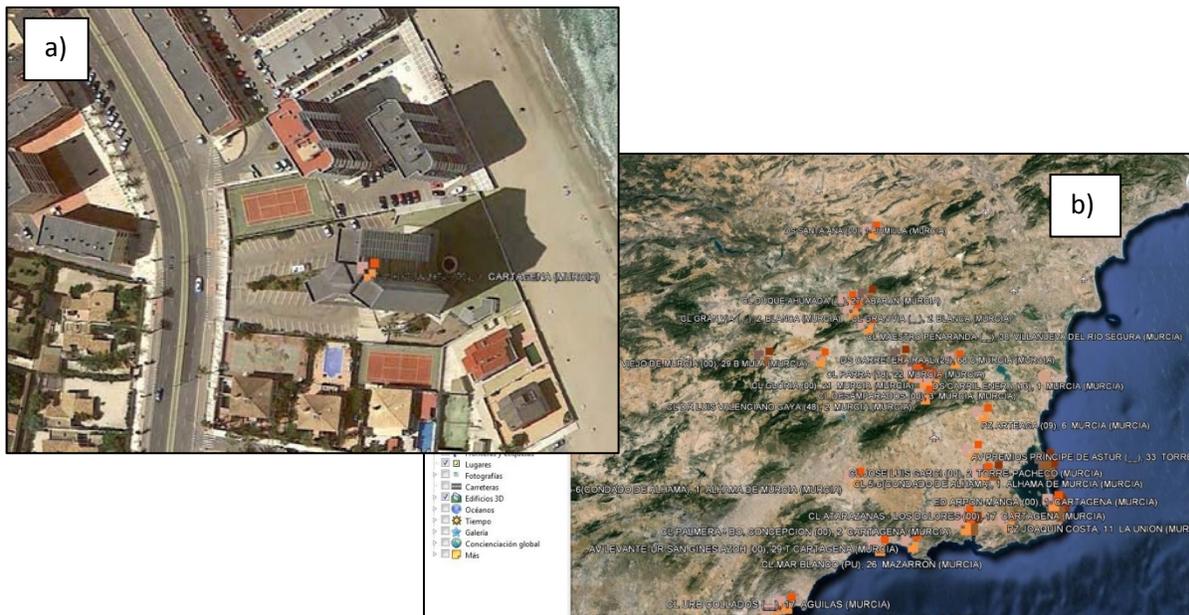


Figura 6 a) Vista del mosaico de ortoimágenes de la Región de Murcia y alrededores con algunas de las referencias catastrales analizadas señaladas sobre la misma con la herramienta Google Earth. b) Vista de ortofoto, con la herramienta Google Earth, que incluye una de las referencias catastrales a verificar dentro de los edificios con más de ocho alturas



Figura 7 Vista lateral de uno de los edificios estudiados con la herramienta Street View de Google.

### *Población*

Como ya se ha mencionado anteriormente, el número de habitantes total por municipio, se obtuvo a partir del Censo de Población y Viviendas de 2011, elaborado por el INE.

Concretamente se requiere una estimación del número de personas por vivienda en cada municipio, para poder estimar posteriormente el número de víctimas. Para ello se ha establecido el número de habitantes por vivienda en cada municipio a partir del censo del INE de 2011 y se ha realizado una extrapolación de la densidad resultante hasta 2013.

Una de las particularidades de la zona de estudio, es la diferencia de población que se produce en las poblaciones costeras en época vacacional, llegándose a duplicar la población en casos extremos de núcleos costeros.

Para establecer una proporción entre dichas densidades de población, se partió de la información proporcionada por el INE sobre viviendas principales y secundarias, y se hizo la suposición de que en época invernal solo están ocupadas las viviendas principales, mientras que en época vacacional están ocupadas las viviendas principales y las secundarias.

## 2.2 EDIFICIOS, VIVIENDAS Y POBLACIÓN

### 2.2.1 EDIFICIOS

Tras la confección de la base de datos de los edificios, vivienda y población Rismur II de la Región de Murcia, se obtuvo el número de edificios actualizados a fecha 2013, con un total de 392.168 edificios, suponiendo un 16% más de edificios con respecto al año 2001. En la figura 8 se ha ordenado el número de edificios de la Región de Murcia en edad de construcción, observándose el crecimiento mantenido hasta el 2009, con una fuerte caída en la etapa 2010 – 2013 coincidente con el ciclo económico actual.

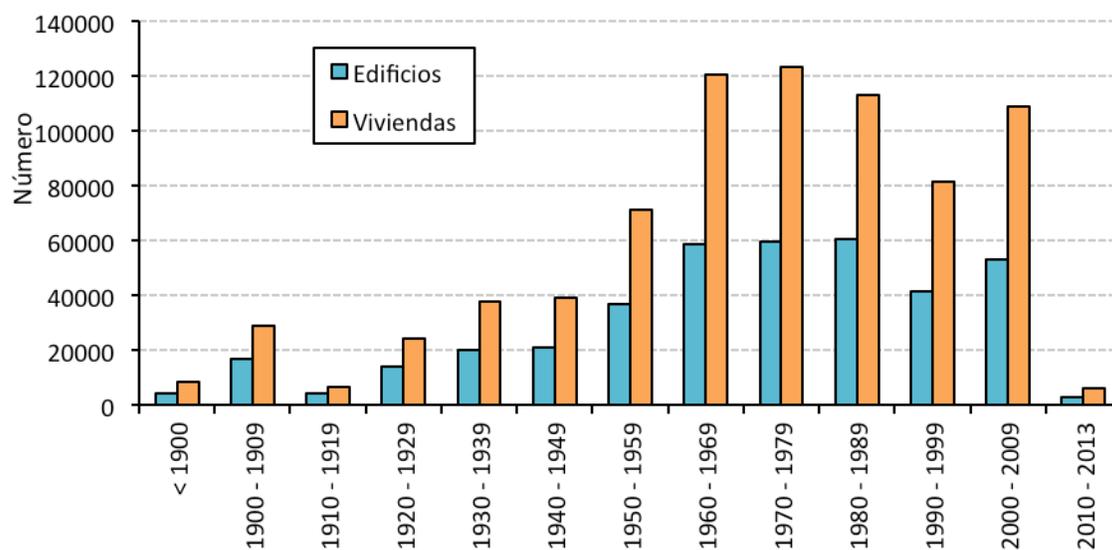


Figura 8 Edificios y viviendas de la Región de Murcia por año de edificación

## 2.2.2 VIVIENDAS

Tras la confección de la base de datos de los edificios, vivienda y población Rismur II de la Región de Murcia, se obtuvo el número de viviendas actualizados a fecha 2013, con un total de 777.917 viviendas, suponiendo un 31% más de edificios con respecto al año 2001.

De este crecimiento se puede deducir la importancia del edificio de vivienda colectiva en el crecimiento global del parque inmobiliario de Murcia en la última década.

El crecimiento del parque inmobiliario ha seguido el mismo patrón que apuntaba en Rismur I, con especial incidencia en la costa, la vega baja del Segura y el corredor del Guadalentín. El crecimiento en el interior de la comunidad ha sido más comedido. En la figura 9 presentamos la distribución espacial de edificios y viviendas de la base de datos Rismur II actualizado al año 2013.

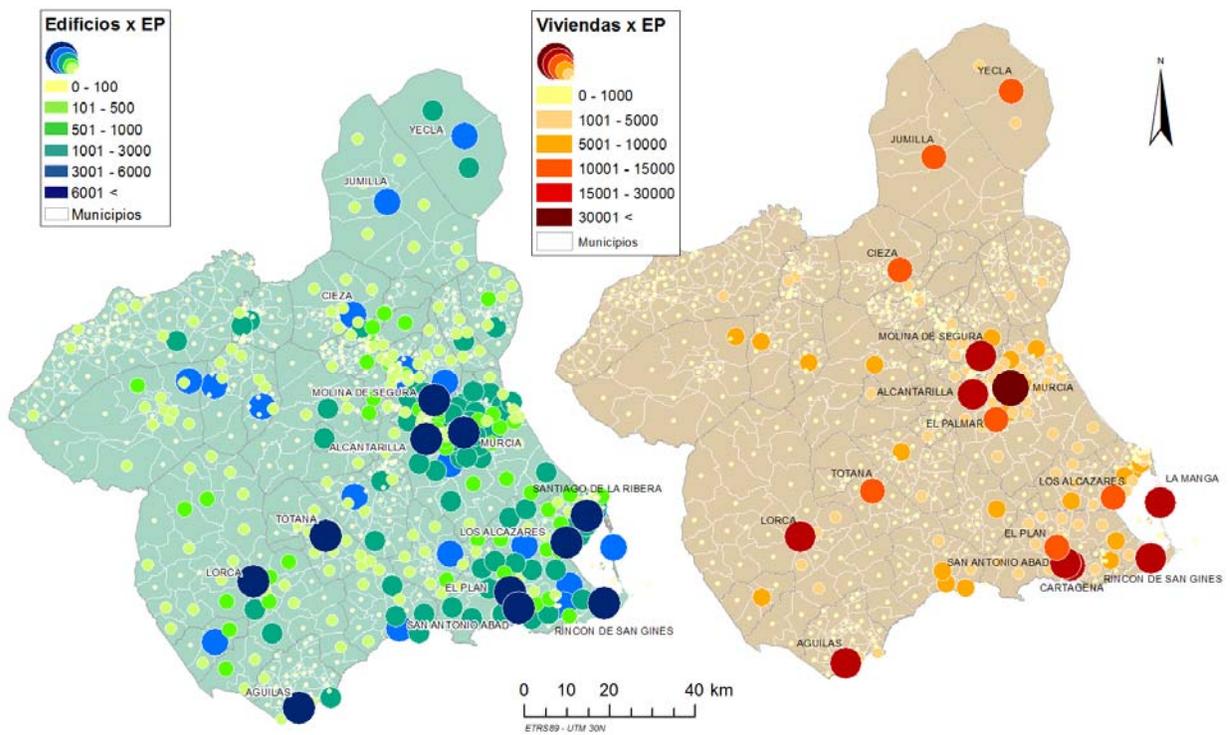


Figura 9 Distribución geográfica de edificios y viviendas en la Región de Murcia

## 2.2.3 POBLACIÓN

Para los datos de población, se tomó el censo del INE del 2011, correspondiente a 1.462.128 personas en total. Como novedad en esta revisión de Rismur II, se ha presentado el trabajo final de riesgo considerando dos épocas del año: época invernal o periodo permanente, tomando en consideración que es en esta cuando la población ocupa las viviendas principales, y época o periodo vacacional, que considera el movimiento de las personas hacia zonas vacacionales, ocupando así también las viviendas secundarias. Este cambio en la densidad de población se traduce en un mayor o menor número de víctimas en función de la zona y la época del año en que ocurra el evento sísmico.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los mapas con la población permanente y la población en época vacacional para todos los municipios de la Comunidad de la Región de Murcia. Se observa claramente como las entidades pertenecientes a la costa aumentan la densidad de población significativamente en época vacacional. Tal es el caso de las entidades de Rincón de San Ginés, La Manga, San Javier, Los Alcázares y El Plan, principalmente.

No se observan disminuciones significativas en otras entidades de la Comunidad para el periodo vacacional, lo que indica que el movimiento de las personas hacia la Costa de Murcia proviene principalmente de personas residentes en otras comunidades autónomas del país.

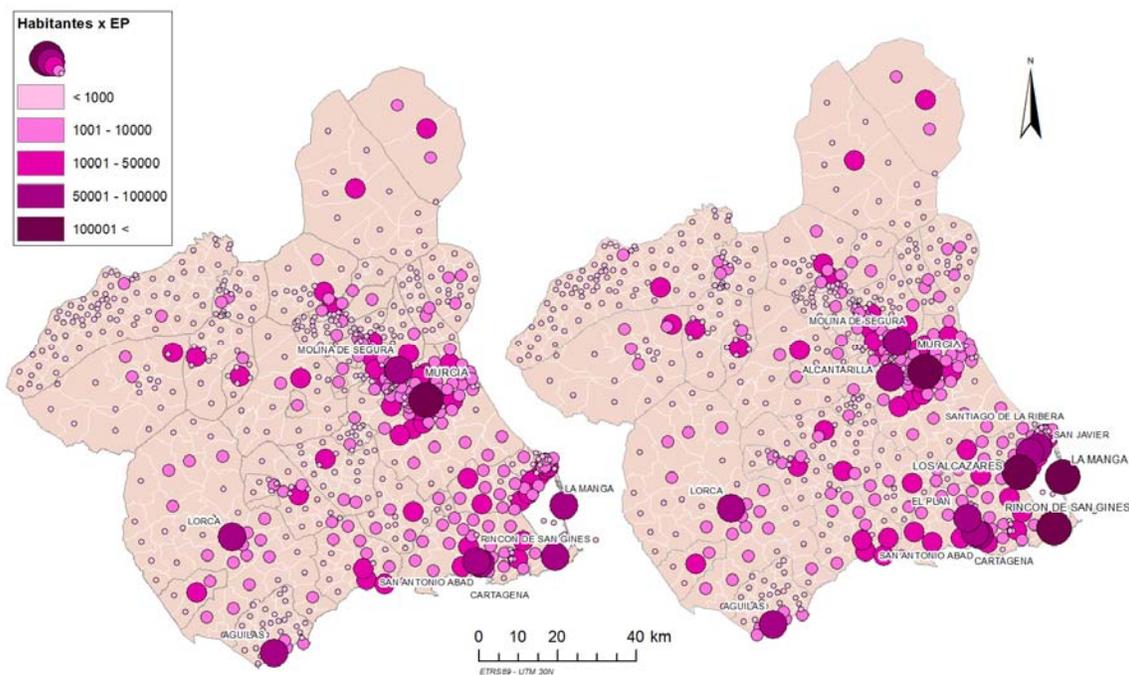


Figura 10 Población permanente y estacional de la Región de Murcia

### 3 LA VULNERABILIDAD DEL PARQUE INMOBILIARIO

## 3.1 TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS DE LA REGIÓN DE MURCIA

---

Como se ha comentado en apartados anteriores, la revisión de Rismur II ha considerado dos metodologías de clasificación de vulnerabilidad; la escala EMS 98 y el Índice de vulnerabilidad. Para esta clasificación se partió de la base del trabajo de campo realizado en el Rismur I, completándola con ocasión del detallado análisis de daños a la edificación tecnológica tras el terremoto de Lorca de 2011 realizado por este autor, y otro trabajo de campo realizado en septiembre de 2012.

Tras el análisis de edificación realizado, se han identificado seis tipologías de edificación que mejor representan el parque inmobiliario de la Región de Murcia, suponiendo una tipología más de las 5 utilizadas en el trabajo de Rismur I.

Para cada tipología constructiva, se ha modelizado sus características, asignándole a una de las 23 clasificaciones del Índice de Vulnerabilidad y a una de las 6 clasificaciones de la escala EMS 98, cuyos detalles se presentan en los siguientes apartados.

### 3.1.1 M11 ESTRUCTURA MURARIA DE MAMPOSTERÍA SIN EFECTO DIAFRAGMA

La edificación tradicional de muros de carga, realizados con mampostería ordinaria de piedra, y forjados de rollizos de madera se ha considerado perteneciente al tipo M1.1 del Índice de Vulnerabilidad, descrito en su versión original como *rubblestone, fieldstone masonry*. De acuerdo a la escala EMS 98, esta tipología corresponde a la clasificación A.

La mayor parte de los núcleos históricos de la Región de Murcia se compone de esta tipología constructiva. Se trata de edificios de muro de carga con crujías de entre 3 y 4m y hasta 3 pisos de alto. Los pisos suelen realizarse con rollizos o vigas de madera, sin que podamos considerar que presenta efecto diafragma rigidizante.

La vulnerabilidad de esta tipología viene determinada por la gran masa de su estructura, y el poco empotramiento o enlazado que esta técnica constructiva entre muros perpendiculares. El modelo de esta tipología se presenta en la figura 11.



Figura 11 Modelo del tipo M11 según el Índice de Vulnerabilidad

### 3.1.2 M31 ESTRUCTURA MURARIA DE LADRILLO SIN EFECTO DIAFRAGMA

Se trata de una tipología tradicional de muros de carga pero realizada con ladrillo cerámico aparejado con mortero. Hasta la aparición de las estructuras de hormigón a mediados del siglo XX esta tipología fue dominante en los ensanches urbanos del IX y XX de la Región de Murcia. Presenta crujías características de entre 3 y 5m y hasta 5 alturas. En la escala EMS 98 se considera tipo B.

La mampostería de ladrillo presenta menor masa e inercia a la acción sísmica con respecto de la mampostería de piedra ordinaria. El aparejo de ladrillo también permite un mejor empotramiento entre planos murarios perpendiculares. Hasta las primeras décadas del siglo XX, la realización de los forjados se realiza con vigas de madera con mejor empotramiento en los planos murarios, si bien las escalas de vulnerabilidad consideran que no es suficiente para que se consideren planos diafragma rigidizante.

En la edificación actual, se considera todavía vigente esta tipología en particular en la edificación informal rural, cuando las viguetas de hormigón o metálicas no se solidarizan con los planos murarios debido a la falta de zunchos perimetrales. En la figura 12 se presenta el modelo de esta tipología constructiva.



Figura 12 Modelo del tipo M31 según el Índice de Vulnerabilidad

### 3.1.3 M34 ESTRUCTURA MURARIA DE LADRILLO CON EFECTO DIAFRAGMA

En las primeras décadas del siglo XX se desarrollan los forjados de vigas metálicas o de hormigón, recibidos a zunchos estructurales sobre los planos murarios. Todas las escalas de vulnerabilidad valoran el efecto rigidizante de este desarrollo constructivo, todavía vigente, en particular en la pequeña edificación unifamiliar.

Presenta crujías murarias de entre 3 y 5m y hasta 5 alturas, y es clasificada por la EMS 98 como de tipo C. Es la tipología característica del Instituto Nacional de la Vivienda durante el periodo de la posguerra y muy dominante en los ensanches urbanos de la décadas 40 y 50, así como en la arquitectura institucional de la época. Se modeliza en la figura 13.



Figura 13 Modelo del tipo M34 según el Índice de Vulnerabilidad

### 3.1.4 MC31-PRE ESTRUCTURA DE PÓRTICOS DE H.A. SIN DISEÑO SISMORRESISTENTE

Cuando Le Corbusier presentó su proyecto de la Casa Dominó en 1912, divorciando la estructura de un edificio de sus particiones interiores y envolvente exterior, pasando éstas a ser elementos no-estructurales, no sospechó que en pocas décadas se convertiría en la tipología absolutamente dominante de la edificación actual.

Las estructuras tecnológicas se diferencian de las tradicionales en que por primera vez, la estructura se calcula para cargas definidas en normas tecnológicas en vez de ser producto de la reiteración de la buena práctica constructiva avalada por el buen resultado en el tiempo. A su vez, las fachadas pasan a ser planos no-estructurales a diferencia de las estructuras murarias de la edificación tradicional.

En España el arraigo de las labores de albañilería han determinado la prevalencia de estructuras de hormigón armado de forjado plano con particiones interiores y exteriores de albañilería, que presenta un especial reto en el comportamiento frente a sismo de estas tipologías.

Todas las escalas de vulnerabilidad favorecen la estructura de hormigón por su naturaleza continua y por el empotramiento intrínseco entre sus miembros estructurales. El optimismo hacia el hormigón era tal que la norma nacional PDS 74 las consideraba de suficientes prestaciones sismorresistentes intrínsecas hasta valores de peligrosidad superiores a MSK VIII.

Los grandes sismos urbanos de la década de los 80 como el de México de 1985 puso a prueba grandes parques inmobiliarios de hormigón armado aparecidas y generalizadas desde las dos décadas anteriores, poniendo en evidencia la fragilidad de esta tipología cuando existen fallos conceptuales o escasa redundancia estructural.

Por ello todas la escalas de vulnerabilidad diferencian la estructura de hormigón 'vintage' realizada en entornos normativos antiguos y permisivos de las estructuras realiza tras los últimos desarrollos normativos recientes.

En el caso de la Región de Murcia, se considera la estructura de hormigón realizada antes de la aparición de la norma NCSE 94 como 'pre-code', indicando que las exigencias de estabilidad que la gobiernan se basan en principios anticuados y desfasados por el desarrollo tecnológico y normativo. Así, se ha seleccionado la tipología MC-31 del Índice de Vulnerabilidad como el que mejor se ajusta a nuestra tipología de hormigón armado. (*Concrete frame with masonry infill panels*) Según la escala EMS 98, se trata del tipo C.



Figura 14 Modelo del tipo MC31 - pre según el Índice de Vulnerabilidad

### 3.1.5 MC31-LOW ESTRUCTURA DE PÓRTICOS DE H.A. CON DISEÑO SISMORRESISTENTE

La publicación de la norma sismorresistente NCSE 94 supone en España una transformación de las prestaciones sismorresistentes del parque inmobiliario con la introducción de condiciones mínimas de ductilidad de obligado cumplimiento, así como la aparición de métodos más sofisticados de análisis estructural.

Si bien la tipología compositiva de estos edificios se ha mantenido estable, predominando el forjado plano y la partición interior y exterior de albañilería, se diferencian de los anteriores por el desarrollo normativo y tecnológico en la que se desarrollan.

Las prestaciones sismorresistentes dependen en gran medida del valor de peligrosidad de su emplazamiento, que define la magnitud de la acción sísmica en la que se debe garantizar la estabilidad estructural. Los valores moderados de peligrosidad del suelo murciano según las normas NCSE 94 y NCSE 02 corresponden a un entorno 'low code', siempre desde una perspectiva global, recordando que los edificios 'high code' están reservados a emplazamientos de máxima peligrosidad mundial, como el arco nipón. La escala EMS 98 considera estas estructuras como de tipo D.



Figura 15 Modelo del tipo MC31 - low según el Índice de Vulnerabilidad

## 3.2 MATRIZ DE VULNERABILIDAD RISMUR II

### 3.2.1 LA VULNERABILIDAD Y LA EDAD DE LA EDIFICACIÓN

El análisis de la edad de la edificación para clasificarlo de acuerdo al desarrollo tecnológico es la metodología preferida para ordenar la edificación en clases de vulnerabilidad. Este procedimiento permite determinar qué número de edificios se realizaron bajo las normas sismorresistentes PDS 74, NCSE 94 y NCSE 02.

En el caso de la edificación tradicional, el conocimiento de la prevalencia en el tiempo de una u otra tipología permite estimar la cantidad de edificios pertenecientes a dicha época, calibrado con los datos de campo realizados en 2006, 2011 y 2013.

### 3.2.2 MATRIZ DE VULNERABILIDAD PARA LA REGIÓN DE MURCIA

En la figura 16 se presenta la matriz de vulnerabilidad para clasificar el parque inmobiliario de la Región de Murcia en los cinco tipos del Índice de Vulnerabilidad seleccionados para este estudio. Para ello se ordenó la base de datos en franjas de edades anteriores a 1900; en periodos de 20 años entre 1901 y 1940; y en periodos de 10 años hasta 1996. A partir de entonces se ordenó en dos periodos comprendidos entre 1997 y 2004, y entre 2004 y la actualidad. (2013) Este desglose permite determinar con seguridad el número de edificios realizados tras la entrada en vigor de la NCSE 94 (enero 1997) y la NCSE 02. (Enero 2004) En el caso de la edificación tecnológica, la matriz establece la probabilidad de pertenencia a cada uno de los tipos de vulnerabilidad de los edificios contenidos en cada periodo.

TIPOS I <sub>v</sub>	<1900	1901 - 1920	1921 - 1940	1941 - 1950	1951 - 1960	1961 - 1970	1971 - 1980	1981 - 1996	1997 - 2004	2004 - 2013
M11	0.57	0.21	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M31	0.43	0.71	0.75	0.09	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M34	0.00	0.08	0.19	0.55	0.43	0.35	0.18	0.06	0.04	0.03
RC31 - pre	0.00	0.00	0.00	0.36	0.55	0.65	0.82	0.94	0.00	0.00
RC31 - low	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.97	0.97

Figura 16 Matriz de vulnerabilidad para los cinco tipos del Índice de Vulnerabilidad para la base estadística del RISMUR II

## 3.3 RESULTADOS

### 3.3.1 RESULTADOS GLOBALES

Los resultados globales de la vulnerabilidad del parque inmobiliario de la Región de Murcia según los tipos vulnerables del Índice de vulnerabilidad se muestran a continuación en la figura 17. De los 339.645 edificios de la Región de Murcia, un 26% se pueden considerar de factura tradicional, y el restante 74% los consideramos de factura tecnológica. De los tradicionales, el 3% corresponde al tipo M11, el 7% al tipo M31 y el restante 16% al tipo M34. En el caso de la edificación tecnológica, el 41% pertenecen al tipo RC31-pre, y el restante 34% al tipo RC31-low.

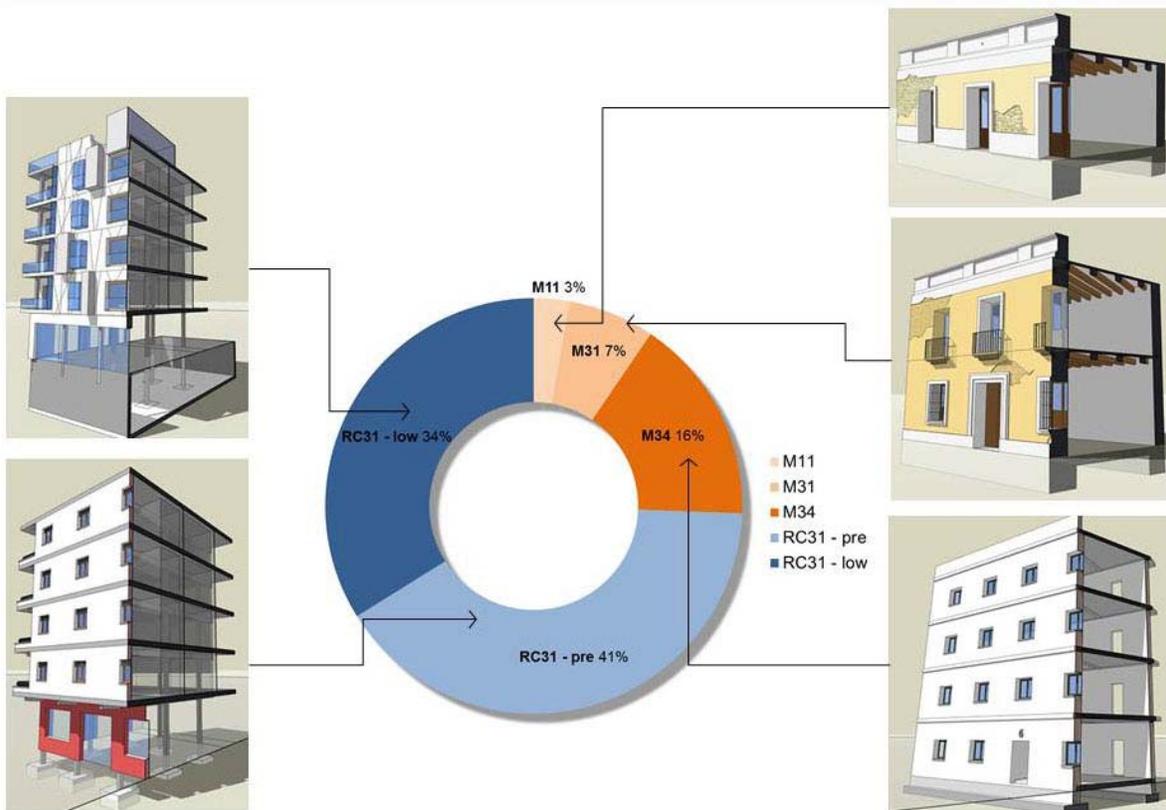


Figura 17 Tipos de vulnerabilidad en la Región de Murcia

### 3.3.2 DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LA VULNERABILIDAD

Escala EMS 98

La distribución de la vulnerabilidad de la Región de Murcia, adoptando la Escala EMS 98 (tipos A-D) se presenta en la figura 18. En ella se observa la prevalencia de altas vulnerabilidades en los municipios históricos del interior de la comunidad, particularmente visible en la distribución del tipo A. Esto se debe a la prevalencia de núcleos históricos antiguos con gran incidencia de estructuras murarias tradicionales realizadas con mampostería ordinaria de piedra. En el caso de la edificación con vulnerabilidades más bajas (tipos D) se observa su prevalencia en el corredor del Guadalentín, el Valle del Segura, y el campo de Cartagena, siendo éstas las zonas que se ha beneficiado del desarrollo urbanístico reciente.

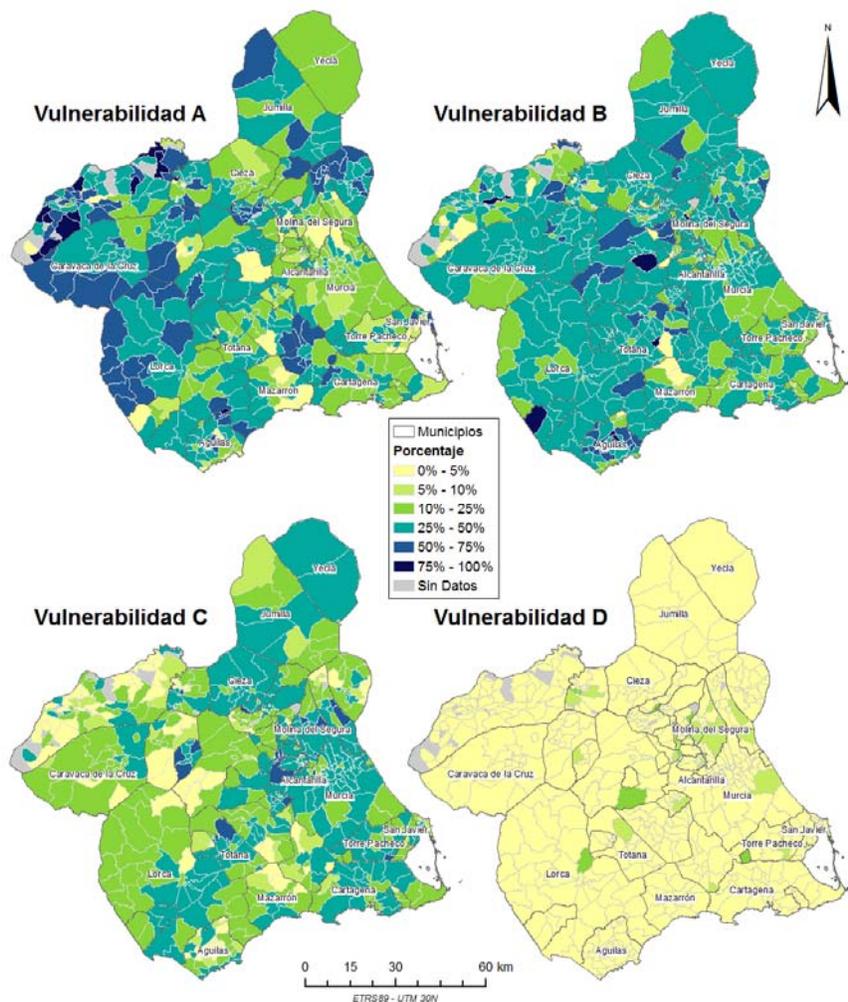


Figura 18 Mapas de distribución de edificios con vulnerabilidad A, B, C y D para la región de Murcia de acuerdo con la EMS-98, expresando la distribución en porcentaje.

## Índice de Vulnerabilidad

Como es de esperar, la distribución de los tipos de vulnerabilidad del Índice de Vulnerabilidad sigue un patrón similar al de la escala EMS 98, si bien el desglose del parque inmobiliario en cinco tipos en vez de 4 permite desglosar la distribución geográfica en mayor detalle.

Los tipos M11 y M31, ambas estructuras murarias tradicionales son dominantes en el parque inmobiliario del interior de la Región de Murcia, con una distribución parecida al tipo A de la Escala EMS 98. En el caso de la edificación tecnológica. Los tipos RC31 Pre y Low se distribuyen por toda la región, con preferencia en los valles del Guadalentín, Segura, y Campo de Cartagena, similar a la distribución de los tipos C y D de la EMS 98, si bien se permite determinar con mayor detalle que municipios del interior de Murcia tuvieron desarrollo urbanístico reciente. (Figura 19)

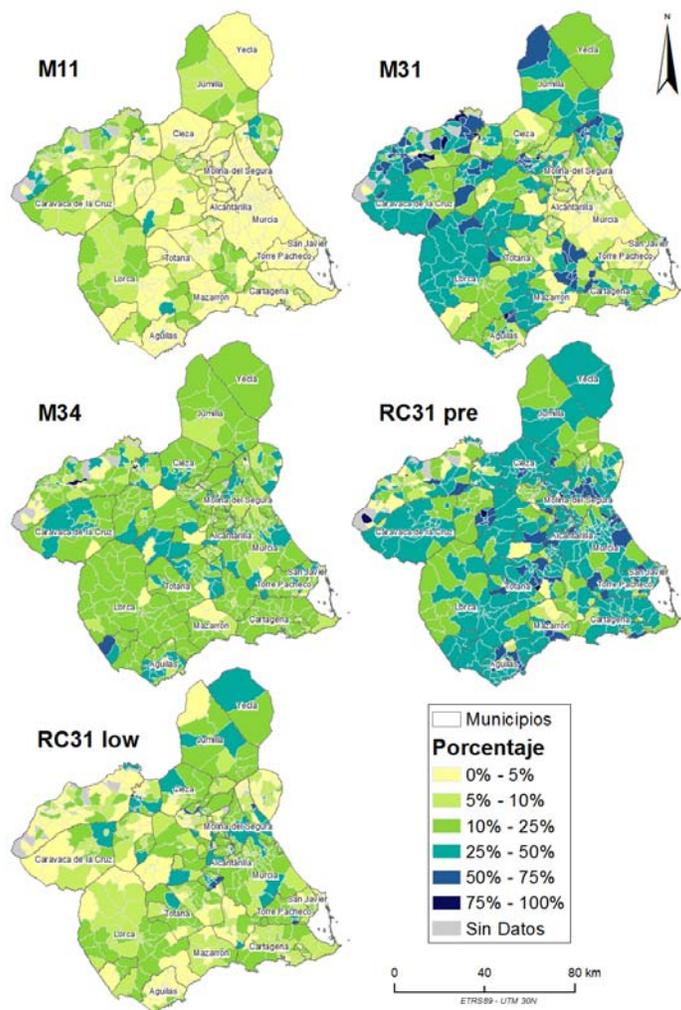


Figura 19 Mapas de distribución de las diferentes clases de vulnerabilidad de acuerdo con Risk-UE para la región de Murcia, expresando la distribución en porcentaje.

## 4 EL TERREMOTO DE LORCA DE MAYO 2011

## 4.1 A: TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS Y CARACTERÍSTICAS URBANÍSTICAS DE LA CIUDAD DE LORCA

---

### **Encuadre histórico**

El estrechamiento del Río Guadalentín, donde abandona la Cuenca Alta de Lorca a través de un paso en la Sierra de la Tercia ha sido un sitio escogido desde la antigüedad para vadear el río, convirtiéndose desde hace siglos en un punto privilegiado de comunicaciones. Debemos a la actividad de la Falla de Alhama de Murcia las condiciones privilegiadas de este emplazamiento, caracterizado por un escarpe elevado dotando de excelente visibilidad y seguridad a los habitantes primitivos del Neolítico.

La plaza de Lorca ha tenido una continua ocupación humana desde los últimos 5.000 años, datándose su primera referencia histórica tan sólo dos años después del inicio de la época hispanomusulmana en el año 713, cuando se hace referencia a la localidad de 'Lurqa.'

Durante la edad media, Lorca se benefició de su carácter estratégico como ciudad fronteriza entre los reinos hispanomusulmanes y cristianos hasta pasar definitivamente bajo administración castellana en el año 1244.

El terremoto de 1674 provocó cuantiosos daños a la ciudad pero marcó el inicio de un ambicioso programa de reconstrucción, dotando a la ciudad de importantes muestras de arte barroco que permanecen hasta nuestros días.

El municipio de Lorca cuenta con 92.694 habitantes de acuerdo al censo del Instituto Nacional de Estadística del año 2010.

### **Tipologías constructivas características del área de Lorca**

Al tratarse de una ciudad histórica, Lorca posee un parque inmobiliario variado donde conviven tipologías constructivas de edad y naturaleza variada. A la hora de analizar los distintos tipos de edificios, conviene diferenciar entre tipologías tradicionales de construcción, basadas en los principios empíricos de buena práctica constructiva heredada a través de la tradición, y la edificación tecnológica, que empieza a generalizarse en nuestro país a mediados del siglo XX.

### Edificación tradicional

El casco histórico de Lorca está compuesto principalmente por estructuras murarias de mampostería de piedra. Los forjados son de madera, sin que se pueda considerar un efecto diafragma rigidizante. Estas tipologías son consideradas de alta vulnerabilidad debido a la gran masa que poseen y el escaso empotramiento entre los planos murarios.

Los edificios singulares como los eclesiásticos y parte de la expansión del siglo XIX poseen fábrica de ladrillo que mejoran el empotramiento entre planos murarios y reducen la masa de la edificación, considerándose por ello menos vulnerables que la edificación de mampostería.

### Edificación tecnológica

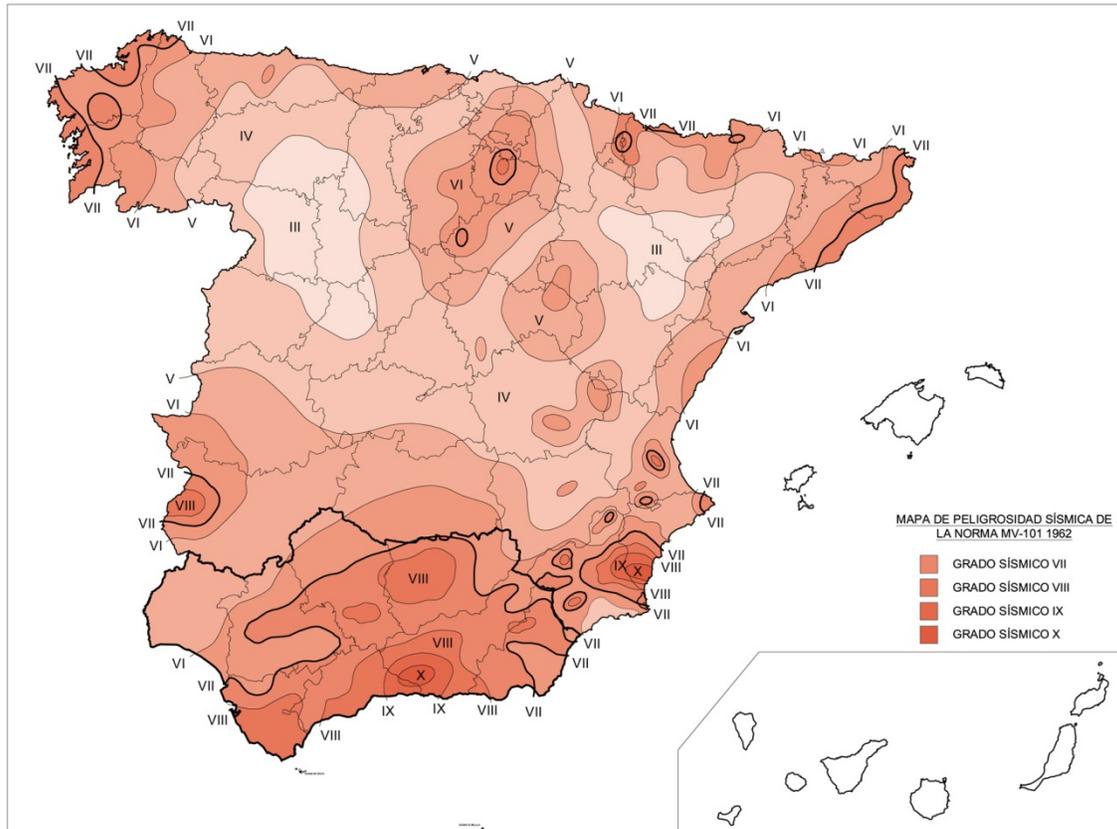
A partir de mediados del siglo XX aparecen las normas tecnológicas de obligado cumplimiento. Es una fecha conveniente para diferenciar la edificación tradicional, basada en buenas prácticas constructivas, de la edificación tecnológica donde se definen y calculan las solicitaciones sobre las estructuras. Asimismo, la aparición de este tipo de estructuras supone un cambio conceptual importante donde el cerramiento del edificio pasa a considerarse no estructural. Dado que el parque inmobiliario de Lorca posee edificios de todas las edades, el análisis de este tipo de estructuras obliga a considerar todas las normas sismorresistentes publicadas hasta el fecha.

### **Normas sismorresistentes nacionales**

La primera normal sismorresistente de ámbito nacional se publica en el año 1962, que adjudica a Lorca un valor de peligrosidad de grado VIII en la escala Mercalli. La norma es renovada en los años 1968; 1974; 1994 y 2002. En las figura A1 a la A11 se presentan los mapas de peligrosidad de todas las normas, así como el ámbito de aplicación de la norma para cada uno de ellos para edificios de normal importancia.

## NORMA SISMORRESISTENTE MV-101 1962

Fig A1 Mapa de peligrosidad de la norma sismorresistente MV-101 1962 (escala intensidad MM)



## COMENTARIO

Se trata de un mapa de clara vocación determinista.

La sismicidad histórica reciente tiene gran peso en la configuración del mapa; así, el mapa se puede considerar como la suma de intensidades máximas observadas. Se pueden identificar en Andalucía eventos específicos de la primera mitad del siglo XX que influyeron determinadamente en la elaboración del mapa, por ejemplo; Serie de Jaén de marzo y mayo de 1951, que provocó la incorporación de una gran zona de I=8 abarcando casi la totalidad de la mitad occidental de la provincia de Jaén, o el terremoto de Montilla de 1930, en el sur de la provincia de Córdoba.

También se observa para la región murciana terremotos individuales como el de Cehegín, (1948) en Lorca y la zona donde se produjeron los terremotos recientes de 2002 y 2005 en La Peca y Zarcilla.

Es notable que había que aplicar la norma ( $\geq 7_{MM}$ ) en localidades específicas de La Rioja y Álava, pueblos de Soria, la zona occidental de Badajoz y en algún punto muy aislado de los pirineos. Todos hacen referencia a terremotos en los siglos XIX y XX que captaron la atención de los sismólogos. También se observa el gran peso que tuvo los eventos de Torrevieja y Arenas del Rey, cuya prominencia en los mapas de peligrosidad ha perdurado hasta la actualidad.

En cambio no era de aplicación la norma en la totalidad de la provincia de Huelva, casi la totalidad de la de Sevilla y una parte importante de la provincia de Almería.

En esta primera norma el mapa no aportaba ninguna información acerca de los grupos insulares.

Lorca poseía un valor de peligrosidad de valor VIII en la escala MM. (Mercalli Modificada)

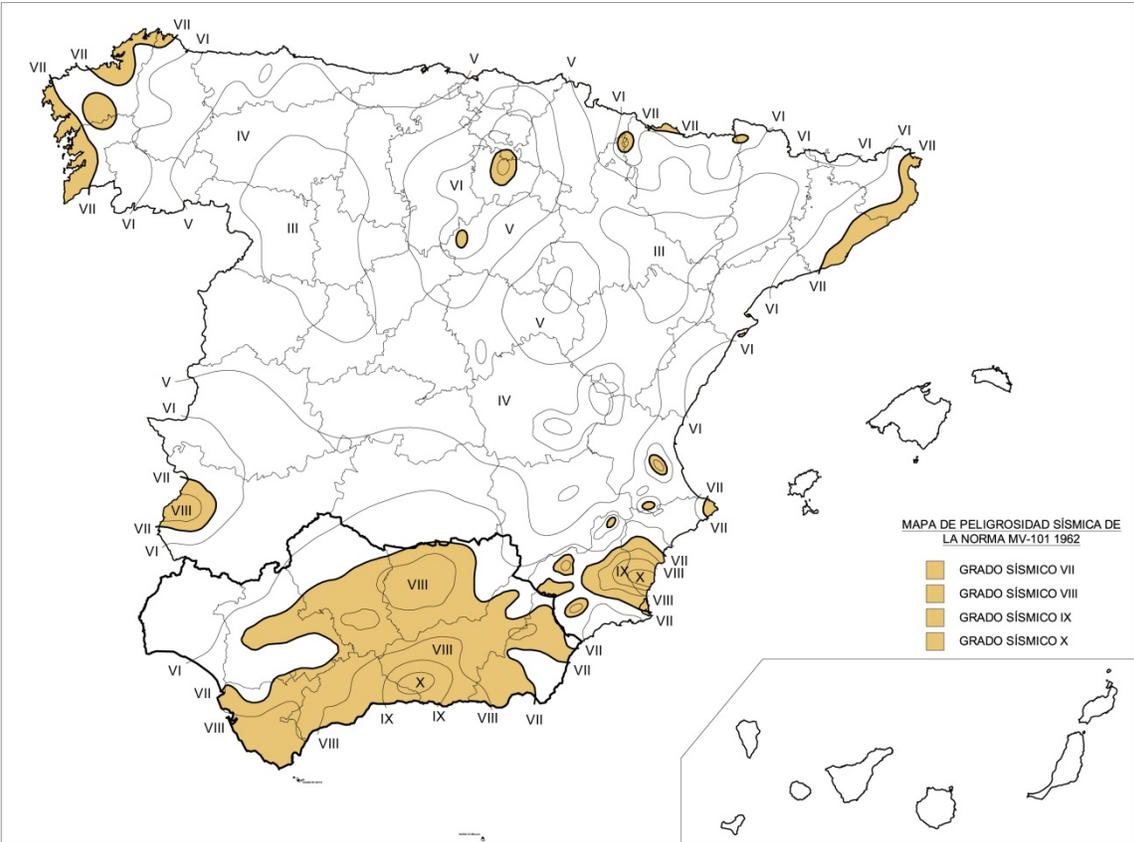
#### CARACTERÍSTICAS DE LA NORMA SISMORRESISTENTE MV-101 1962

##### PRESCRIPCIONES EN TÉRMINOS DE:

---

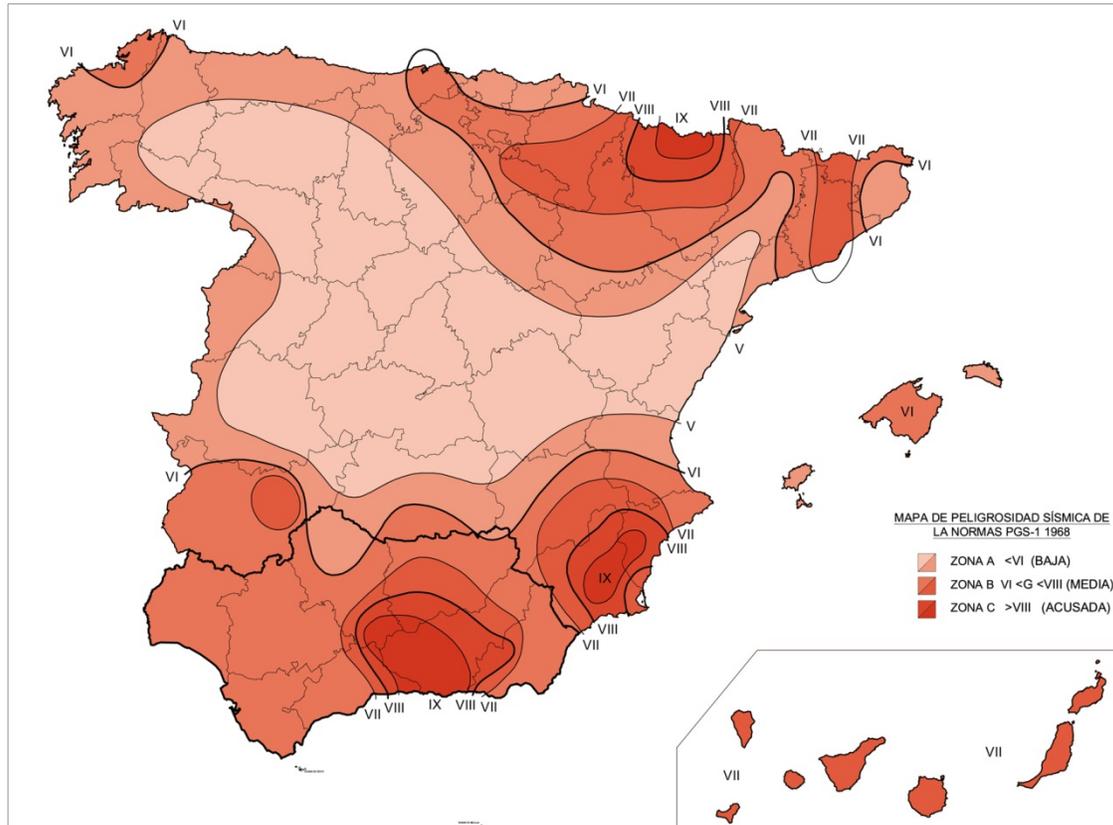
Diseño	<input type="checkbox"/>	No hay
Cálculo	<input checked="" type="checkbox"/>	Estático muy básico aplicado a elementos estructurales.
Construcción	<input type="checkbox"/>	No hay
Años de vigencia		1964 - 1969
Zona de aplicación		$>VII_{MM}$ ( $>0,03g$ )

Fig A2 Mapa de aplicación de la norma MV-101 1962 para edificios de normal importancia.



## NORMA SISMORRESISTENTE PGS-1 1968

Fig A3 Mapa de peligrosidad de la norma sismorresistente PGS-1 1968 (escala intensidad MSK)



### COMENTARIO

A diferencia del mapa de 1962, el de 1968 se basa cada vez más en información sísmológica instrumental.

Las curvas son más generales, definiendo zonas amplias de sismicidad y han desaparecido las referencias específicas a terremotos pequeños o moderados, si bien se mantiene la alta peligrosidad del bajo Segura y Sierra de Tejada. Se definen tres zonas básicas, denominadas de sismicidad Baja, Media y Acusada.

Como novedad con respecto al mapa de 1962 está la incorporación de una amplia zona del pirineo aragonés como zona de sismicidad acusada, y la incorporación de casi la totalidad de Andalucía a zona de sismicidad media.

En 1967 se produce un terremoto de mb 5.3 en Arette, causando daños y víctimas mortales en el pirineo francés, sintiéndose de forma generalizada en el tercio norte peninsular. Sin duda este terremoto influyó en que a partir de 1968 la norma era de aplicación ( $\geq 6_{MSK}$ ) en ciudades como Zaragoza, que en el mapa anterior eran de sismicidad muy baja ( $III_{MM}$ )

Por primera vez se aporta información sobre las Baleares y Canarias, donde es de aplicación la norma con la excepción de Ibiza y Menorca.



Daños en □ La población de Arette tras el terremoto de Agosto de 1967.

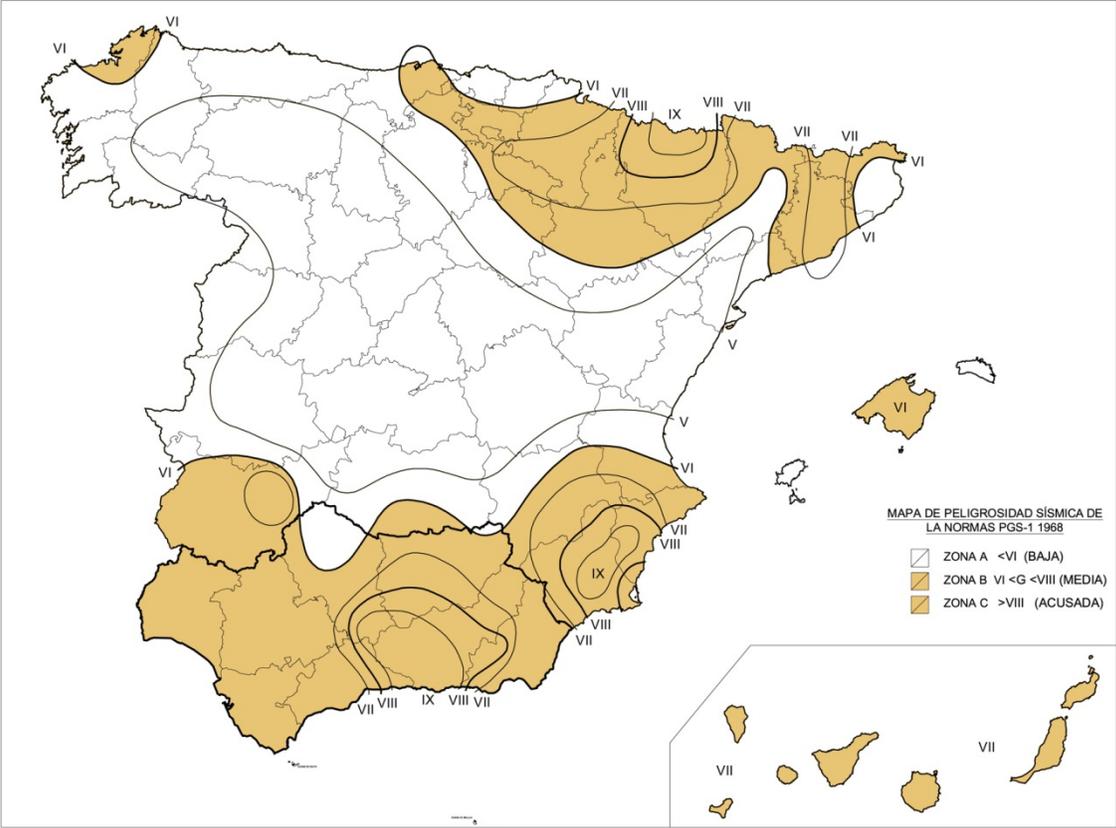
### NORMA SISMORRESISTENTE PGS-1 1968

PRESCRIPCIONES EN TÉRMINOS DE:

---

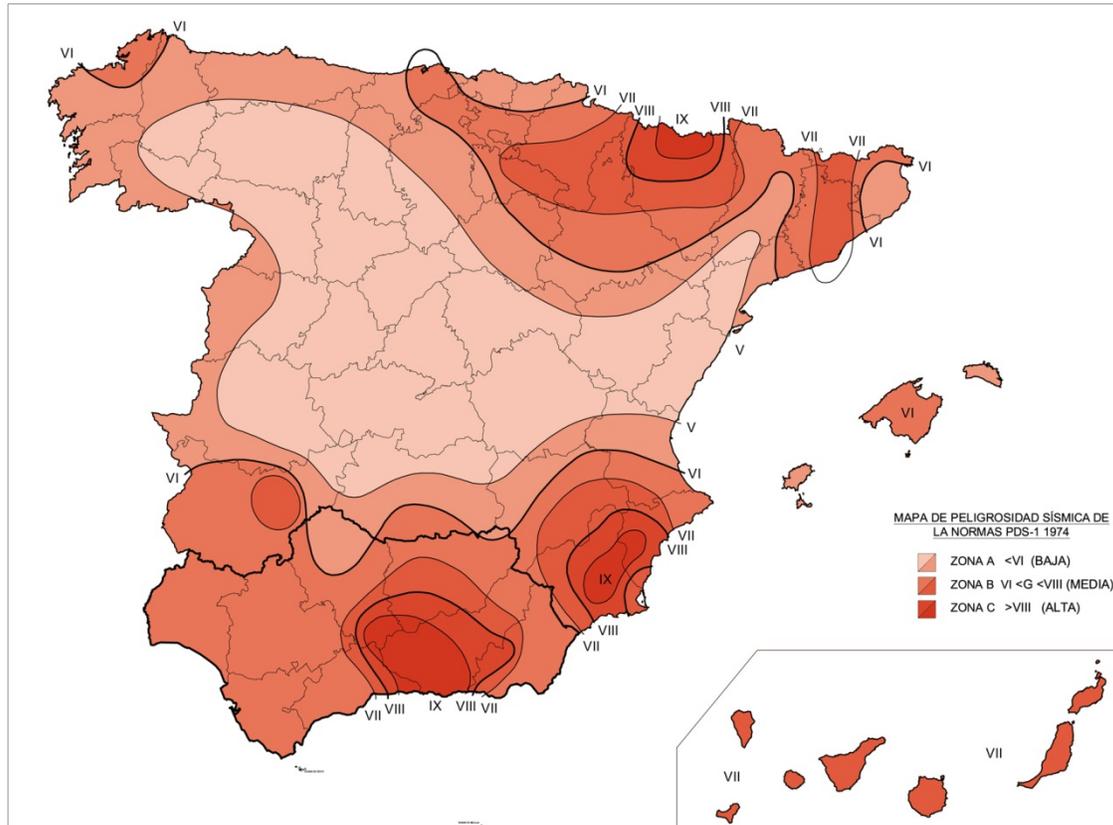
Diseño	<input type="checkbox"/>	No hay
Cálculo	<input checked="" type="checkbox"/>	Estático muy básico aplicado a elementos estructurales.
Construcción	<input checked="" type="checkbox"/>	Muy básicas; por ejemplo armadura 4Ø10 en encadenados de fábrica.
Años de vigencia		1970 - 1976
Zona de aplicación		$>VI_{MSK}$ ( $>0,04g$ )

Fig A4 Mapa de aplicación de la norma PGS-1 1968 para edificios de normal importancia.



## NORMA SISMORRESISTENTE PDS-1 1974

Fig A5 Mapa de peligrosidad de la norma sismorresistente PDS-1 1974 (escala intensidad MSK)



### COMENTARIO

Es esencialmente el mismo mapa que el de 1968, con la salvedad que las regiones sísmicas pasan a llamarse la zona primera (sismicidad baja); segunda (sismicidad media); y tercera, (sismicidad alta).

La gran diferencia radica en el ámbito de aplicación de la norma, que en el caso de tipos constructivos de hormigón armado o metálicas, evolucionó a ser de obligado cumplimiento únicamente a partir de la zona tercera (alta), si bien en la zona  $\geq 7_{MSK}$  hay que considerarla en los elementos puntuales como voladizos o marquesinas, etc., pero no en el cálculo estructural.

Con la norma se observa el optimismo de la década, y la gran confianza que se ponía en la edificación de hormigón que se hallaba en total expansión. Se consideraba que las sollicitaciones por sismo en zonas  $\geq 8_{MSK}$  (0.15g) eran

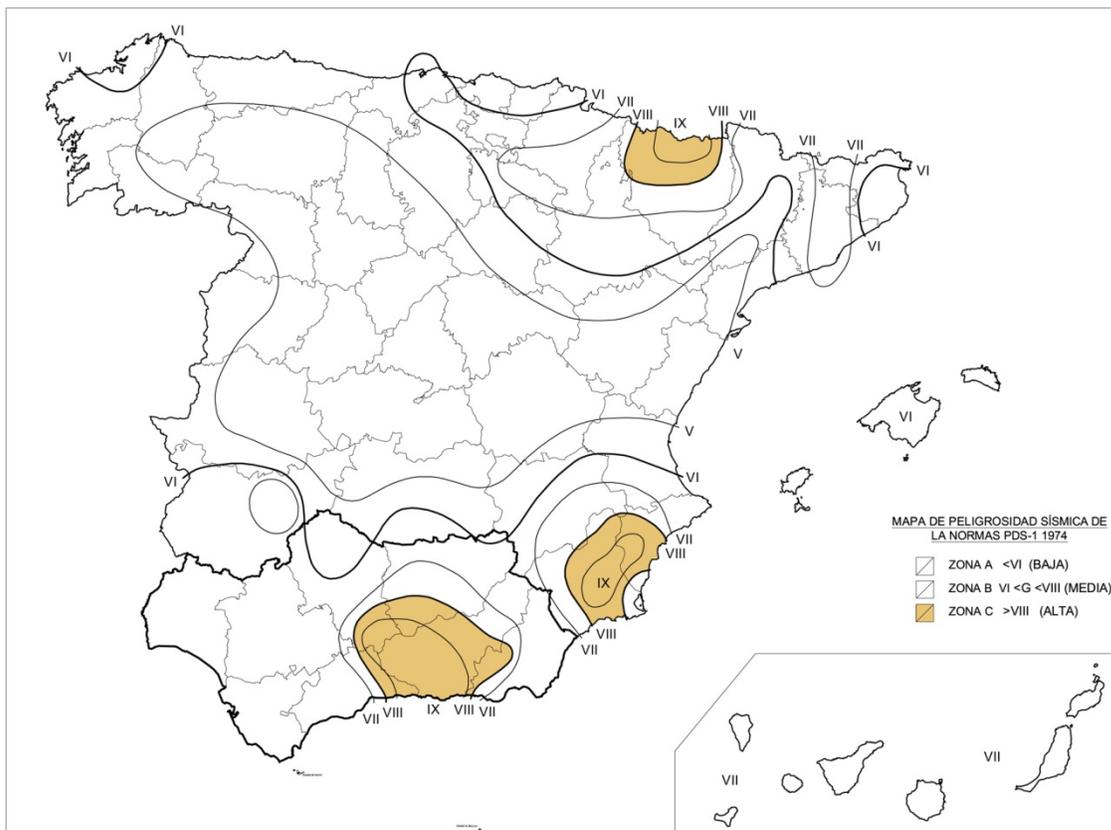
asimilables por otros requerimientos como viento u otras acciones accidentales de obligado cumplimiento.

Esta postura no era excepcional para la época, pero la vigencia de esta norma en el tiempo (20 años) fue excepcional y perjudicial en cuanto a la longevidad de una norma ciertamente desfasada ya al inicio de los años 80.

Sirva como ejemplo que en la ciudad de Almería, - que ha sufrido 5 terremotos destructores desde 1487 - no fue preceptivo calcular para sismo ningún edificio de importancia normal o bloque de viviendas realizado con estructura de hormigón entre los años 1976 – 1996 durante la vigencia de esta norma en un momento de gran expansión urbanística.

Durante el periodo de vigencia de esta norma, Lorca poseía un valor de peligrosidad VIII MSK.

Fig A6 Mapa de aplicación de la norma PDS-1 1974 para estructuras de hormigón armado y normal importancia.





El ámbito de aplicación es a partir de 0,06g para las edificaciones de importancia normal con lo cual grandes zonas de Andalucía vuelven a aplicar la norma. En el resto de zonas, la aplicación de la norma se reduce, desapareciendo de Galicia y retrocediendo en el Pirineo.

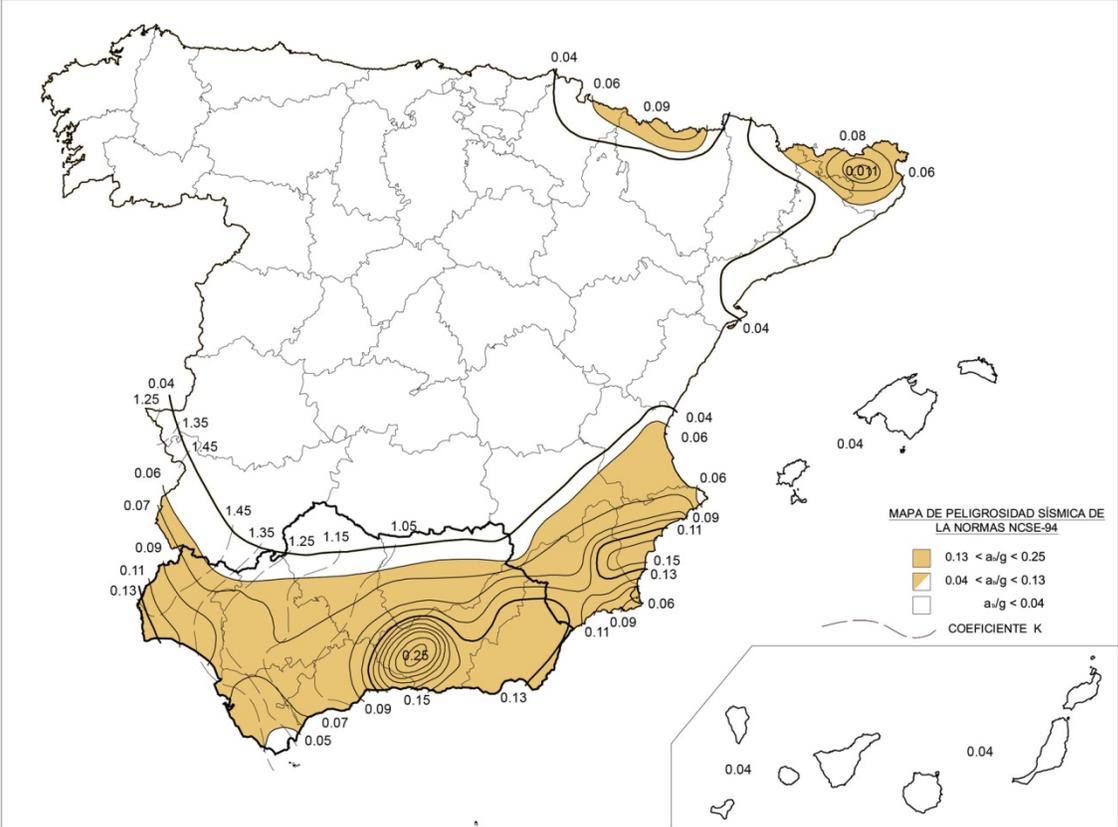
El gradiente de peligrosidad en Granada sigue siendo un elemento notable del mapa que establece una variabilidad de 0,08 a 0,25 en apenas 65kms. En términos de peligrosidad máxima, se producen los siguientes cambios a los valores de aceleración básica en las tres ciudades de mayor peligrosidad de España:

Lorca es asignado un valor de peligrosidad de 0,12g.

Es interesante también analizar los cambios de otras localidades importantes con respecto a la norma de 1974.

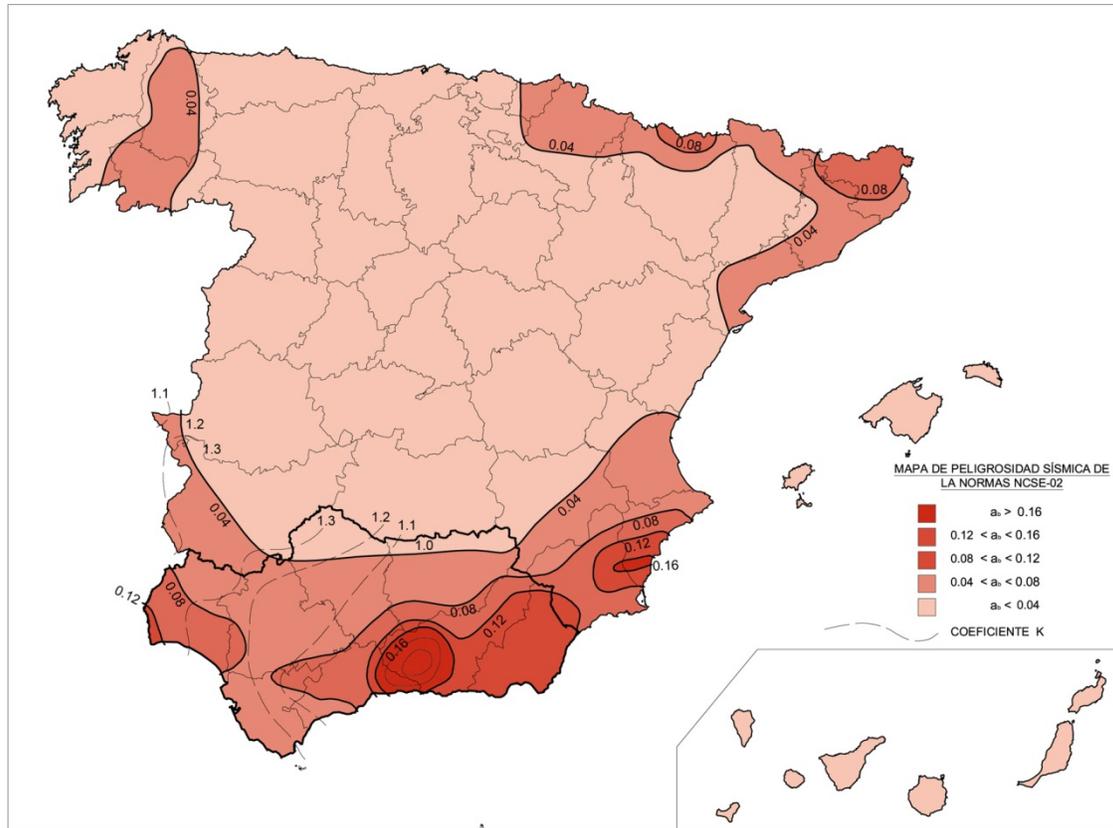
Localidad	Coef. sis. 1974	a <sub>c</sub> 1994
Granada	0,30	0,24
Murcia	0,30	0,15
Almería	0,06	0,13

Fig A8 Mapa de aplicación de la norma NCSE 94 en suelo firme para edificios de normal importancia.



## NORMA SISMORRESISTENTE NCSE-02

Fig A10 Mapa de peligrosidad de la norma sismorresistente NCSE-02



### COMENTARIO

A efectos de cálculo, la renovación de la NCSE-02 establece como ámbito de aplicación el valor de  $a_b \geq 0,08g$  para estructuras a base de pórticos de hormigón, actualmente dominantes en el panorama constructivo español, y  $a_b \geq 0,04g$  para edificaciones de fábrica. No se pueden dar otro tipo de construcciones ya que la mampostería ordinaria está proscrita en todo el ámbito de aplicación de la norma.

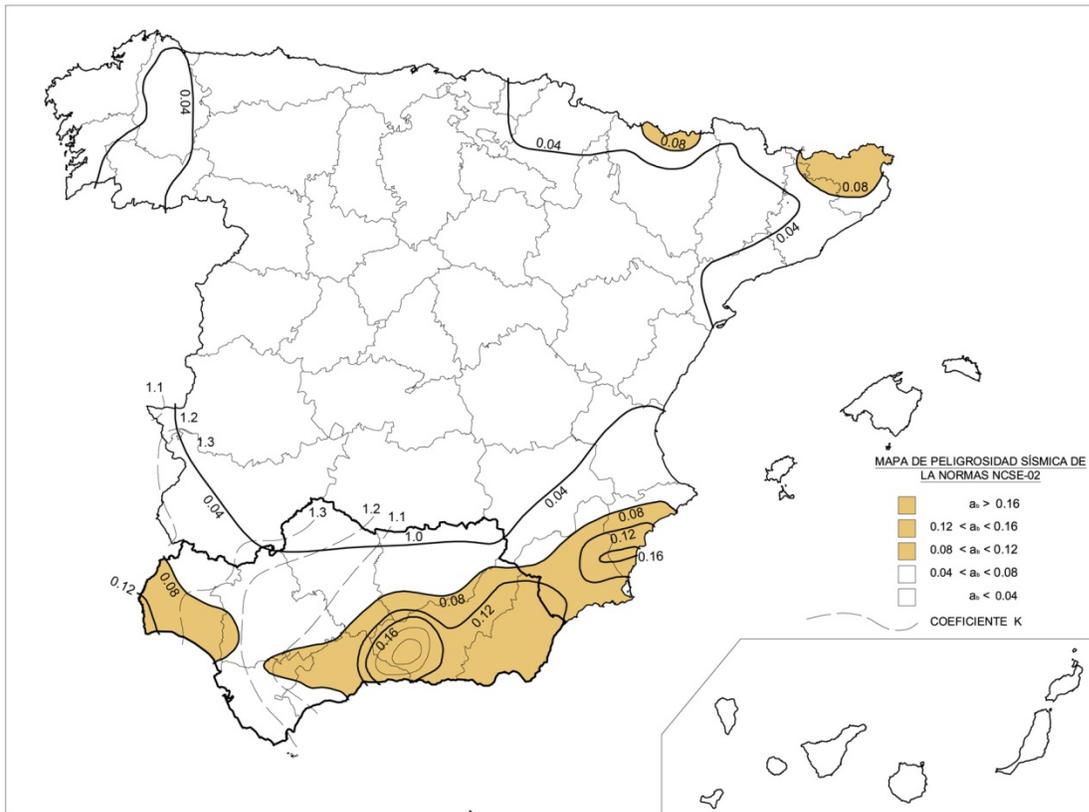
En Lorca, el valor de aceleración básica es de  $0,12g$ .

Además del valor de Lorca, se producen los siguientes cambios a los valores de aceleración básica en las tres

ciudades de mayor peligrosidad de España, si bien debe tenerse en cuenta que el mapa del año 2002 se refiere a suelo muy firme, y no roca como los mapas anteriores.

Localidad	Coef. sis. 1974	a <sub>c</sub> 1994	a <sub>c</sub> 2002
Granada	0,30	0,24	0,23
Murcia	0,30	0,15	0,15
Almería	0,06	0,13	0,14

Fig A11 Mapa de aplicación de la norma NCSE 02 en suelo firme para edificios de pórticos de normal importancia.



## Clasificación de tipologías constructivas en términos de vulnerabilidad

Las tipologías constructivas del área geográfica de Lorca a efectos de su vulnerabilidad a sismo han sido estudiados por Murphy (Proyecto Rismur 2006) y más recientemente en 2010. (Proyecto Sismozon)

Dado que cada edificio es único en su concepción, realización y posterior comportamiento a sismo, conviene agrupar los edificios en tipologías estructurales de acuerdo a las prestaciones sismorresistentes que se pueden esperar de ellos. Para la edificación tradicional, esto depende de la masa de la edificación y el grado de empotramiento entre distintos elementos de acuerdo a buenas prácticas constructivas. En la edificación tecnológica, consideraremos además la acción sísmica que las distintas normas sismorresistentes hayan exigido de acuerdo a sus periodos de vigencia en el tiempo.

Para Lorca identificamos 6 tipologías constructivas básicas, que en su totalidad describen la práctica totalidad del parque inmobiliario. Identificamos tres tipologías tradicionales de estructura muraria de carga, descrito por el código EM, y tres tipologías tecnológicas de Hormigón Armado descritas por el código EH y ordenadas de acuerdo a las tres renovaciones más importantes de las normas sismorresistentes españolas. Las tipologías se describen a continuación en la tabla A1.

Tabla A1 6 tipologías básicas de estructuras en Lorca.

Código	Descripción
EMM	Estructura Muraria de Mampostería Ordinaria + Forjados Madera sin efecto diafragma
EML	Estructura Muraria de fábrica de Ladrillo + Forjados Madera sin efecto diafragma
EMH	Estructura Muraria de fábrica de Ladrillo + Forjados de Hormigón Armado con efecto diafragma
EHP	Estructura de pórticos de Hormigón Armado <1996
EHP94	Estructura de pórticos de Hormigón Armado >1996 <2004 NCSE 94

Las tipologías consideradas también se pueden ordenar en el tiempo, dado que podemos estimar este dato en la edificación tradicional gracias a los trabajos de campo realizados, y en el caso de la edificación tecnológica sabemos la duración temporal de obligado cumplimiento de cada renovación de la norma.

En el caso de evaluar la vulnerabilidad de las estructuras a sismo, actualmente existe en la literatura científica tres metodologías ampliamente reconocidas y utilizadas mundialmente para estudios de peligrosidad y riesgo. Se trata de las clasificaciones de vulnerabilidad de la escala EMS 98, el Índice de vulnerabilidad del proyecto europeo RISK UE, y los índices de vulnerabilidad del método norteamericano FEMA. Las tipologías de proyecto identificadas en Lorca deben evaluarse de acuerdo a alguna – o en este caso – todas las metodologías de vulnerabilidad. En la tabla A2 se presentan las tipologías constructivas de Lorca ordenadas de acuerdo a los códigos de vulnerabilidad equivalentes usando los tres métodos de vulnerabilidad descritos anteriormente.

Tabla A2 Asignación de vulnerabilidad de los edificios de Lorca de acuerdo a las metodologías de la escala EMS, Índice de Vulnerabilidad y FEMA.

Tipología	Edad	Nº plantas	EMS	Iv	FEMA	Code
EMM	<1900	1-2	A	0.85 M11L	34 URML	Pre-code
		3-5	A	0.89 M11M	35 URMM	Pre-code
		+6	A	0.93 M11H	35 URMM	Pre-code
EML	1921 - 1940	1-2	B	0.72 M31L	34 URML	Pre-code
		3-5	B	0.76 M31M	35 URMM	Pre-code
		+6	B	0.80 M31H	35 URMH	Pre-code

EMH	1941 1964	-	1-2	C	0.59 M34L	31 RM2L	Pre-code
			3-5	C	0.61 M34M	32 RM2M	Pre-code
			+6	C	0.67 M34H	33 RM2H	Pre-code
EHP	1965 1996	-	1-2	C	0.59 M34L	31 RM2L	Pre-code
			3-5	C	0.60 RC1M	23 C3M	Pre-code
			+6	C	0.68 RC1H	24 C3H	Pre-code
EHP94	1997 2004	-	1-2	D	0.40 RC1L	22 C3L	Low-code
			3-5	D	0.44 RC1M	23 C3M	Low-code
			+6	D	0.48 RC1H	24 C3H	Low-code
EHP02	2005 2010	-	1-2	D	0.40 RC1L	22 C3L	Low-code
			3-5	D	0.44 RC1M	23 C3M	Low-code
			+6	D	0.48 RC1H	24 C3H	Low-code

## 4.2 B: DAÑOS OBSERVADOS DURANTE EL TERREMOTO DE LORCA

---

### Daños observados en la edificación tradicional.

Los daños a los edificios de estructura muraria bajo la acción sísmica siguen un patrón reconocido y ampliamente estudiado. Los planos murarios sometidos a esfuerzos de cortante se dañan en fisuras características en forma de aspa o X, mientras fuera de plano las estructuras muraras sufren deriva y pérdida de enlace con los muros de arrostramiento perpendicular.

Fig B1 Daños por cortante en forma de aspa en la torre de la iglesia de Santiago

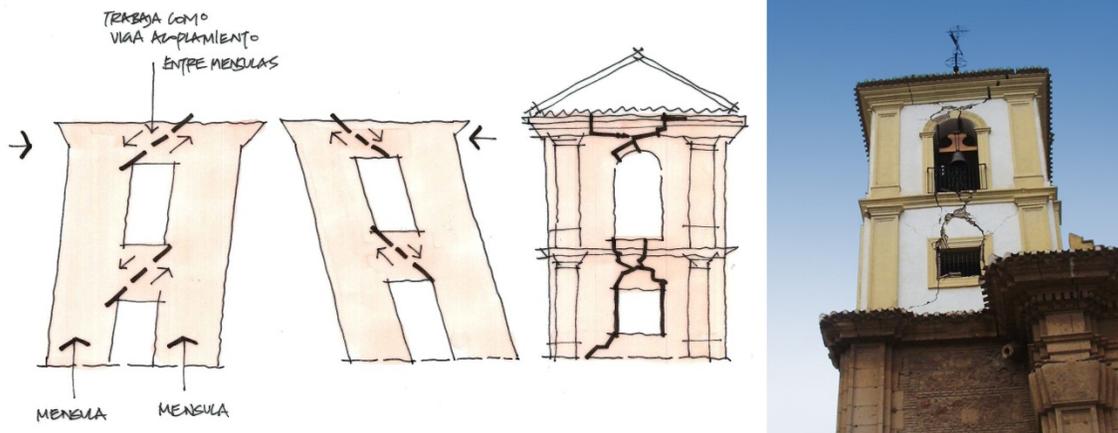


Fig B2 Daños por cortante en forma de aspa en la torre de la iglesia del paso azul.



Fig B3 Deriva de muro de carga en torre medieval de la muralla



Fig B4 Vuelco de estructura muraria de fábrica de ladrillo en la estación de Lorca



Fig B5 Derrumbamiento de la nave de crucero de la iglesia de Santiago



## Daños observados en la edificación tecnológica.

### Características de la edificación tecnológica

Explicar los daños observados en los edificios de Lorca obliga a un análisis de las características sismorresistentes de la tipología básica estructural más común, que detallamos a continuación.

La tipología constructiva que mejor describe la edificación actual de Lorca es el de estructura de pilares y forjados de hormigón armado. Cuando se trata de una finca urbana, es habitual que la planta baja se destine a local comercial o actividad terciaria, y las plantas superiores a vivienda. El forjado habitualmente se resuelve con cara inferior plano, compuesto de viguetas unidireccionales y vigas planas, forjados bidireccionales (reticular) o losa maciza.

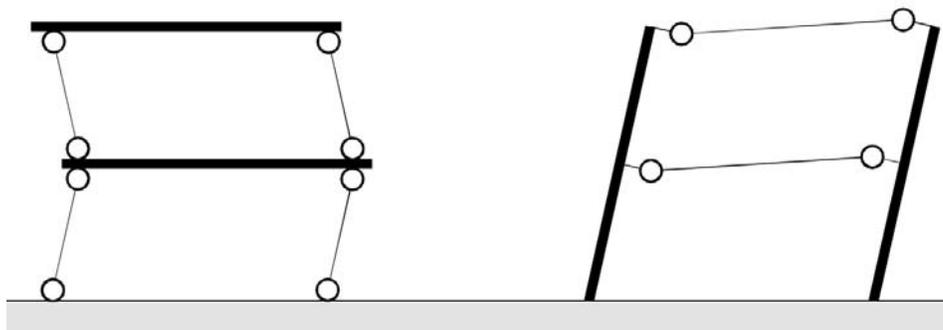
Esta solución constructiva está muy arraigada en nuestro territorio por las ventajas, rapidez, economía y sencillez del proceso de encofrado de losas planas y la ausencia de vigas de canto permite maximizar las alturas libres interiores.

Cuando no existe ningún elemento sismorresistente adicional, como sería el caso de una pantalla resistente, los esfuerzos horizontales a sismo se resisten por la rigidez del empotramiento entre pilares y forjado. Llamamos 'nudo rígido' a este estrategia de rigidez estructural.

### Prestaciones sismorresistentes

La tipología de losa masiva y pilar débil no es una tipología claramente reconocida como sismorresistente y su uso se encuentra limitado en zonas de mayor sismicidad en otros países como es el caso de EEUU. (ASCE-7) Asimismo esta tipología se encuentra ampliamente debatida. Esto se debe a que la combinación de pilar débil y forjado masivo fomenta la formación de mecanismos inestables de planta, resultado contrario al objetivo de las NNSS. La diferencia entre un mecanismo inestable e estable se muestra en figura B6.

Fig B6 Esquema de mecanismo inestable (izquierda) y estable (derecha)



### Plantas bajas diáfanas

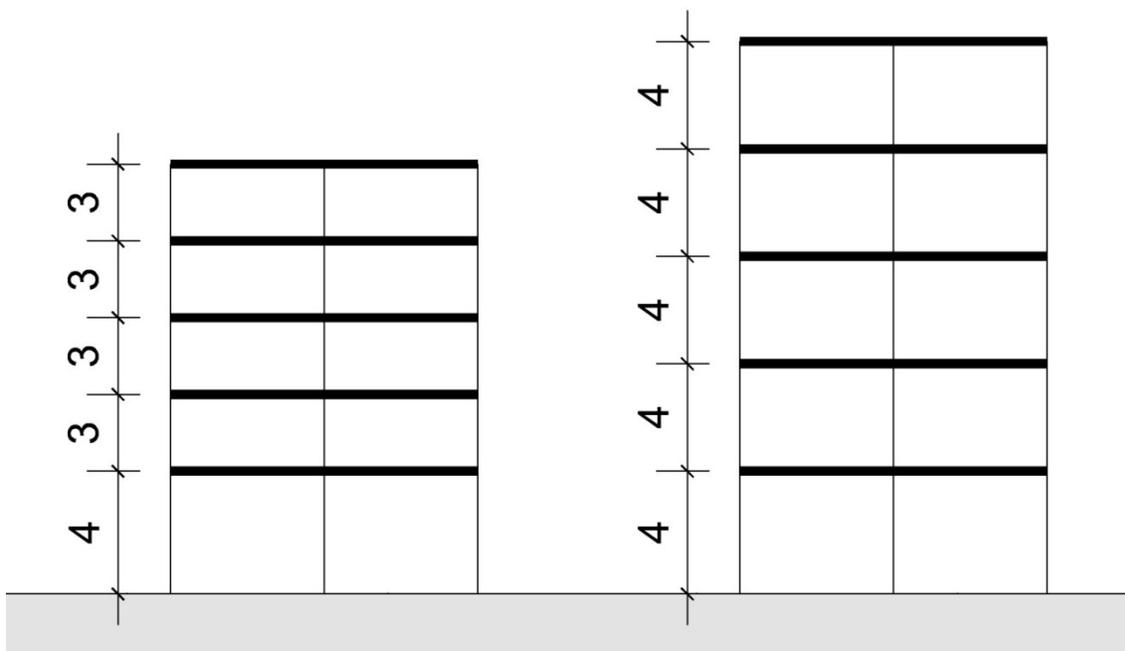
Se observa un comportamiento generalizado de planta baja diáfana en los edificios tecnológicos urbanos de Lorca. Esto se debe a la confluencia de varios factores que detallaremos a continuación.

### Irregularidad en altura.

Los edificios con plantas bajas de altura claramente distinta a las superiores poseen una irregularidad de rigidez. Esta situación está penalizada en la ASCE-7 y Eurocódigo 8. En la NCSE02 los edificios irregulares no podrán optar por el método de cálculo sencillo de fuerzas estáticas equivalentes.

El plan general de ordenación urbana de Lorca obliga a los locales de planta baja alturas libres mínimas superiores a los de plantas de viviendas. (3m locales comerciales; 3,2m locales hostelería y 2,5m viviendas) Esta obligación tiene gran relevancia al generalizar por cumplimiento urbanístico el fenómeno de planta baja diáfana. En la figura B7 se muestran edificios con irregularidad y regularidad en altura.

Fig B7 Edificio irregular (izquierda) y regular (derecha). El edificio de la izquierda posee una planta baja débil por el cambio de rigidez en esa planta relativa a las superiores

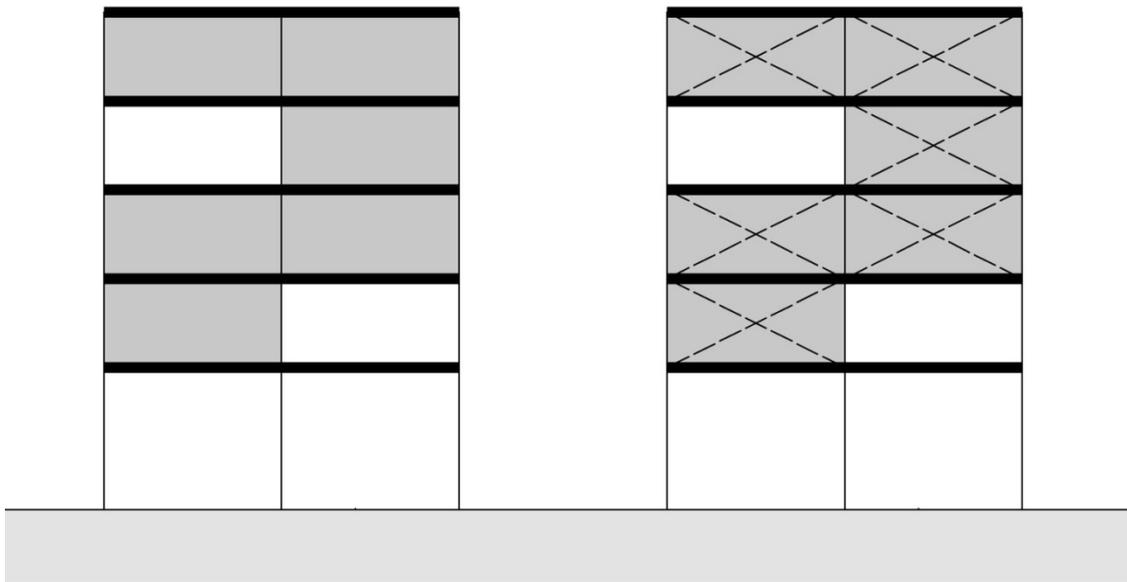


### Participación de elementos no estructurales

Los cerramientos y particiones de albañilería de los edificios son considerados elementos 'no estructurales' pero adquieren un claro carácter estructural durante un sismo. Cuando estos elementos son más rígidos que la estructura principal, la respuesta del sismo viene condicionada por estos elementos.

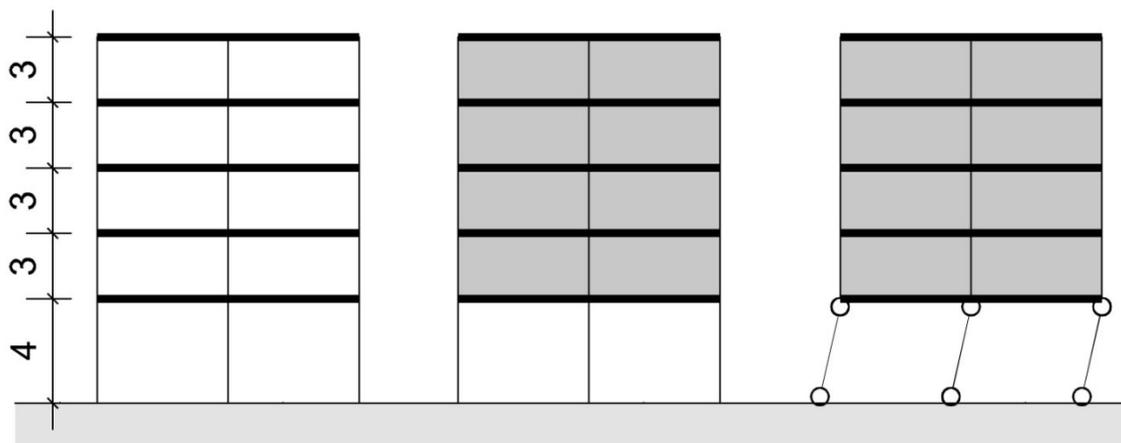
La rigidización de un pórtico por albañilería se puede asimilar al efecto de una cruz o tirante adicional de rigidización, ilustrado en la figura B8. Por este motivo la disposición irregular de cerramientos y particiones de albañilería se consideran en el ASCE 7 y EC8 una irregularidad estructural en altura.

Fig B8 Los muros no estructurales de albañilería participan en la rigidización del conjunto al no permitir la deformación de la estructura. Cuando los paños de albañilería son irregulares en su disposición en las plantas, se produce una irregularidad de rigidez en altura. La participación de los lienzos de cerramiento se puede modelizar como un tirante rigidizando el pórtico correspondiente



En ocasiones operan simultáneamente ambas casuísticas de generación de una planta baja diáfana, al concurrir una planta baja esbelta con irregularidades de compartimentación de albañilería, ilustrado en la figura B9.

Fig B9 Una planta esbelta e irregularidad de compartimentación de albañilería actuando conjuntamente para producir una planta baja diáfana inestable.



A continuación presentamos unas fotografías de edificios dañados donde observaremos la aplicación de los conceptos descritos anteriormente.

Fig B10 Daños a cerramientos de plantas bajas en un edificio de vivienda con locales comerciales de gran esbeltez (izquierda) y en el hospital Rafael Méndez. (derecha)



Fig B11 Daños por cortante en el cerramiento no estructural de planta baja de un edificio de viviendas. El cerramiento ha entrado en carga resistiendo los esfuerzos horizontales de la estructura, por lo que muestra los mismos mecanismos de daño que las estructuras murarias, fallando por cortante con grietas en forma de aspa.



Fig B11 Daño frágil por cortante en cabezas de pilares de plantas bajas observados en varios edificios. Esto es un mecanismo inestable de daño de gran peligrosidad.



### **Pilares cortos**

Las fuerzas sísmicas se consideran que actúan de manera dinámica sobre el cuerpo libre u oscilante del edificio, considerándose la base del edificio el plano de rasante del terreno del que emerge la estructura. Normalmente esto coincide con el nivel de planta baja cuando ésta se encuentra a nivel de la rasante del terreno. En los casos donde la planta baja se eleve respecto al terreno, se puede seguir considerando como la base oscilante cuando se encuentre perfectamente rigidizado, por ejemplo cuando los muros del sótano afloran en superficie hasta el forjado de planta baja. Cuando la planta baja se eleve sobre pilares cortos, el edificio adquiere un caso de irregularidad de rigidez en altura.

Fig B12 Formación de pilares cortos y su relación con la base oscilante del edificio.

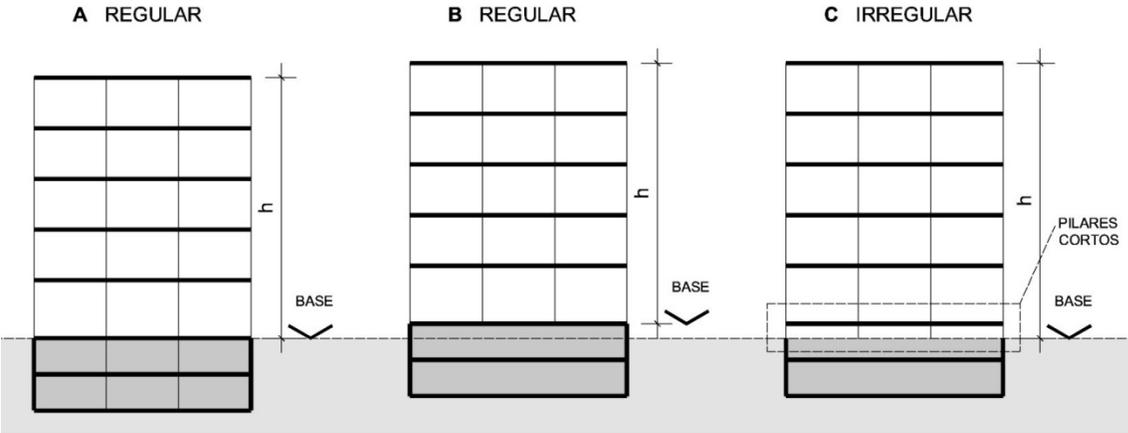


Fig B13 Dos tipos de pilares cortos dañados en edificios de Lorca



En la Calle Infante Juan Manuel nº 5 colapsó completamente un edificio de pórticos de Hormigón Armado de tres alturas. El edificio poseía una planta baja elevada con respecto de la rasante de la calle y pilares cortos en dos pórticos perimetrales. Un edificio gemelo colindante de la misma promoción (fig B13, izquierda) acusa graves deformaciones en los pilares cortos confirmando el mecanismo de colapso causado por el fallo de los pilares cortos perimetrales. (Figuras B14 – B17)

Fig B14 Edificio de tres plantas en la calle Infante Juan Manuel con pilares cortos en los pórticos perimetrales.

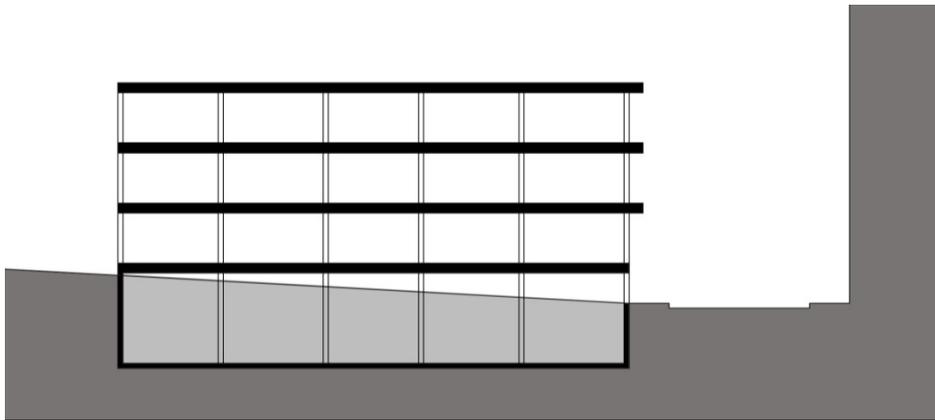


Fig B15 Bajo la acción del sismo, los pilares cortos del pórtico perimetral atraen gran parte de la carga sísmica debido a su gran rigidez con respecto al resto de pilares de su planta.

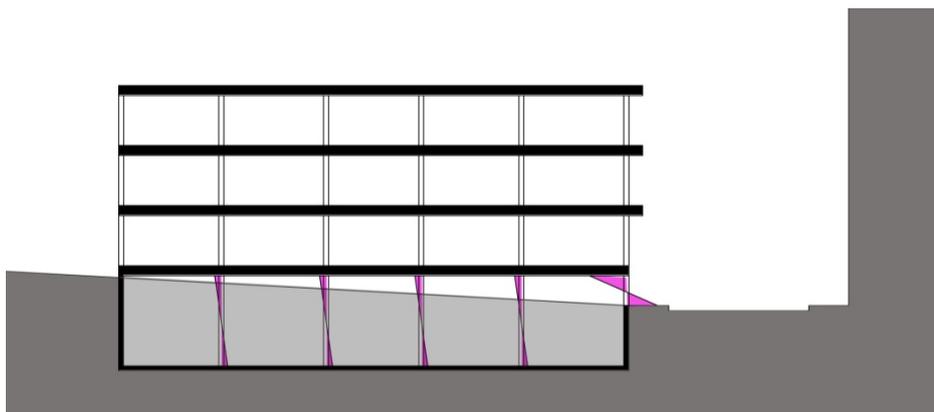
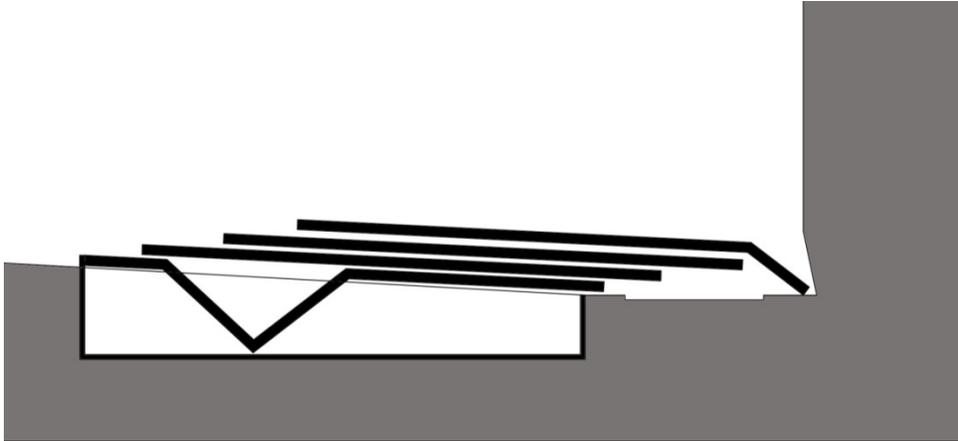


Fig B16 El fallo de los pilares cortos provoca el basculamiento y colapso del inmueble que invade la calle Talleres impactando y dañando el edificio de enfrente.



B17 El edificio colapsado en la Calle Infante Juan Manuel.



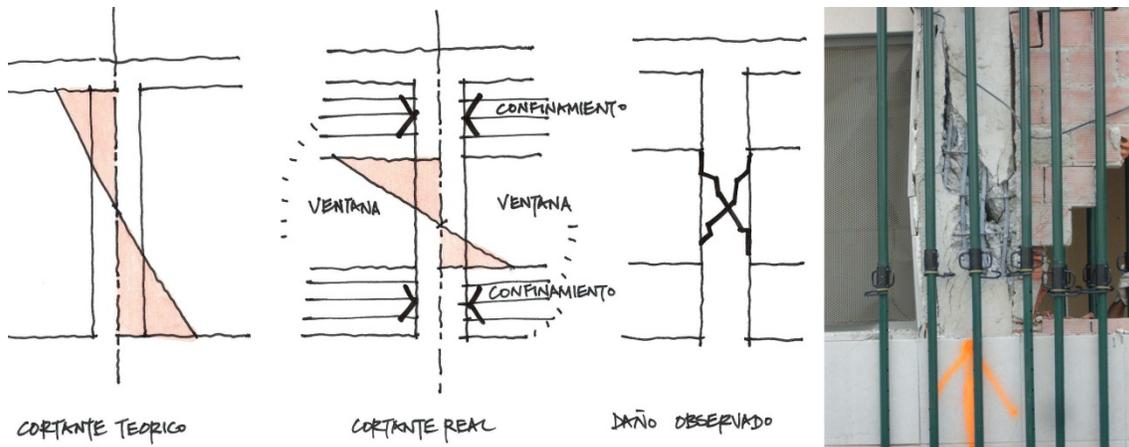
Fig B18 Detalle del encuentro pilar-forjado del edificio colapsado. Ver figura B6 para comprensión de un mecanismo inestable.



### **Pilares secuestrados**

Se observa en muchos edificios daños a la estructura de hormigón armado por la interacción con elementos no estructurales rigidizantes. Un caso típico y muy extendido son dos ventanas a ambos lados de un pilar, como ilustramos en la figura B19.

Fig B19 pilar secuestrado por el confinamiento de albañilería de un edificio de Lorca



### Embestimiento

La norma NCSE02 obliga a los edificios colindantes a retranquearse unos de otros una distancia equivalente al desplazamiento máximo calculado del edificio para evitar el embestimiento entre ellos, si bien las normas antiguas no exigían este retranqueo. La norma actual tiene el inconveniente además, de no limitar el desplazamiento máximo sea el edificio colindante o no. Si consideramos que la definición de la planta de un edificio se produce durante el proyecto básico, momento en el que se declara la ocupación en planta y el aprovechamiento urbanístico, y esta es una fase en la que no se suele realizar cálculos estructurales, concluimos que esta es una prescripción difícil de cumplir con posterioridad. El retranqueo del edificio además, supone renunciar a un porcentaje del aprovechamiento urbanístico, por lo que es una prescripción desfavorable para inversores y promotores. En Lorca se observan muchos daños por el embestimiento de edificios colindantes.

Fig B19 Los daños concentrados en la tercera planta de este edificio vienen motivados por el confinamiento del edificio colindante más bajo y rígido de la derecha. En edificios altos, el desplazamiento observado ha sido muy grande, indicado por los daños de impacto causados entre los edificios de la imagen de la derecha.



Fig B20 Daños por embestimiento en edificios de altura en Lorca.



### Torsión

La disposición irregular de los elementos de rigidez provoca una rotación del edificio sobre su eje vertical conocido como torsión. Los edificios en esquina son muy sensibles a este fenómeno dado que sus medianeras se hallan rigidizadas por albañilería en toda su altura, a diferencia de los alzados exteriores de esquina.

Fig B21 Torsión motivado por el efecto rigidizante de los muros medianeros de un edificio de esquina.

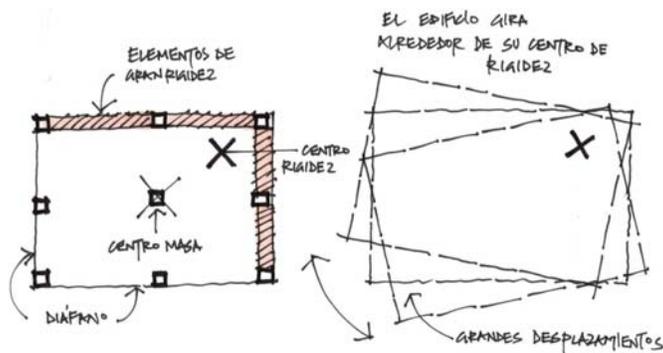


Fig B22 Torsión motivado por el efecto rigidizante de los muros medianeros de un edificio de esquina con grandes deformaciones permanentes en el pilar de la esquina más alejada del centro de rotación. Este edificio se derrumbó a los pocos días de realizar las fotografías.



### **Modelización de tipos de edificio y daños.**

El tipo de edificio y los daños observados se pueden resumir en una secuencia de modelizaciones ilustradas en las siguientes figuras.

Fig B23 La teoría: Edificio de planta baja comercial y vivienda en altura característica de nuestro entorno urbano actual. Bajo la acción del sismo imaginamos que las fuerzas se distribuyen por toda la estructura.

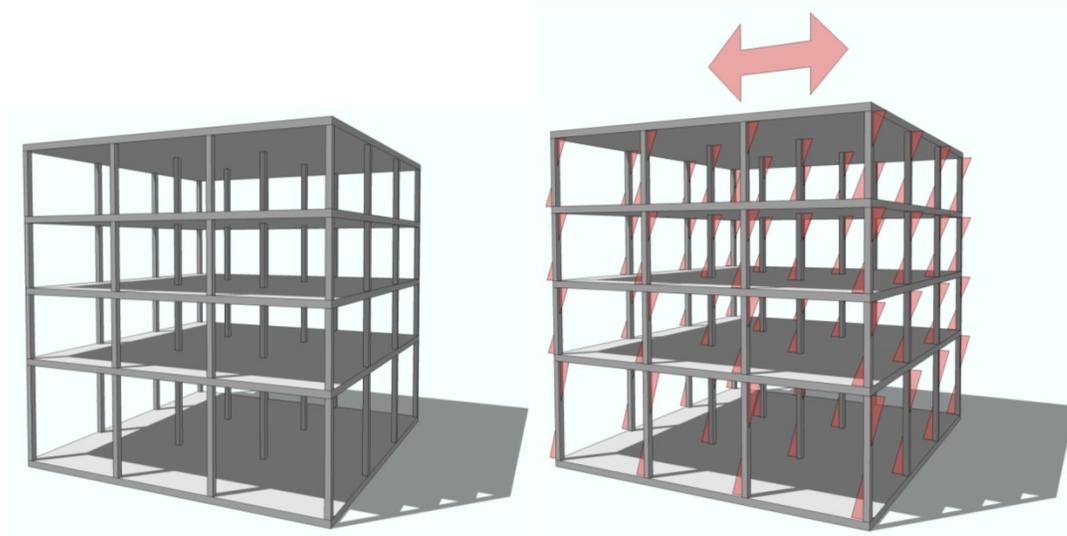
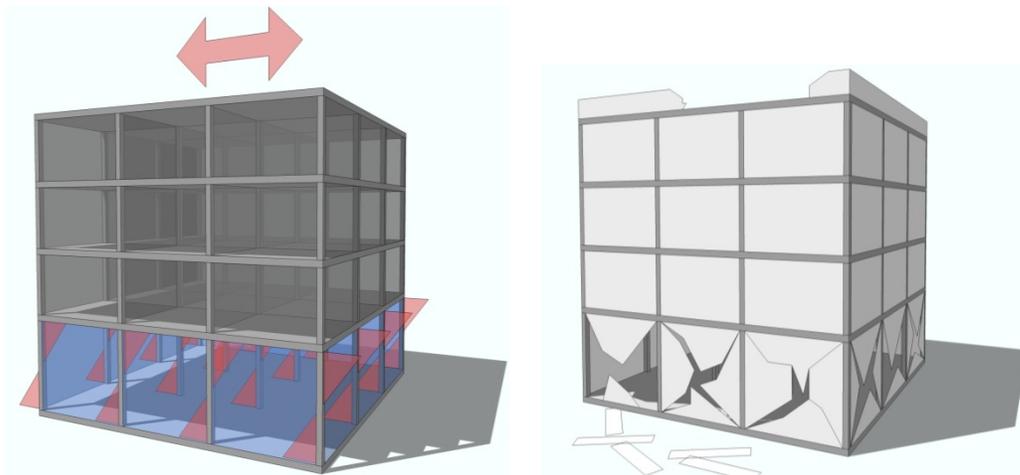


Fig B24 La realidad. Cuando consideramos la acción rigidizante de la albañilería en las plantas superiores y la planta baja diáfana, la deformación es distinta, obligando a la planta baja a grandes desplazamientos.



## Elementos no estructurales

### Cerramientos

Los cerramientos de albañilería se consideran elementos no estructurales pero indudablemente desarrollan rigidez y entran en carga durante un sismo al intentar deformarse la estructura. Los fallos por cortante en forma de aspa o cruz evidencia este proceso.

Fig B25 Grietas por cortante en forma de aspa en el cerramiento de un edificio público de muy reciente construcción en Lorca. A la derecha aspas de cortante en el hospital Rafael Méndez



Fig B26 Fallo de cerramientos no estructurales bloqueando las salidas de edificios o locales



### **Parapetos y antepechos**

El desprendimiento de elementos no estructurales fue la principal causa de mortalidad durante el terremoto de Lorca. Antepechos y parapetos de fábrica de ladrillo en las coronaciones de los edificios fueron lanzados a la vía pública destrozando automóviles y matando a transeúntes.

La actual norma obliga a confinar los antepechos con enzunchados de hormigón a partir de una peligrosidad de 0,12g. Es decir, desde el año 2004 todos los edificios de Lorca deberían haber cumplido con este requisito. En la norma anterior, con un periodo de vigencia entre 1996 y 2004, este requisito sólo era obligatorio en zonas con peligrosidad superior a 0,16g. Es de suponer que son los edificios construidos con anterioridad a 2004 los principales causantes del daño.

Fig B27 Caída de antepecho de bloque sin armar en un edificio dotacional de Lorca.



Fig B28 La Calle Galicia de Lorca donde varios vecinos perecieron debido a la caída de los parapetos de cubierta. Las calles estrechas con edificios altos presentan gran vulnerabilidad



Fig B29 Un automóvil dañado por la caída de parapetos de cubierta en la Calle Galicia



### Otros efectos

Fig B30 Torres de iglesia nuevas y viejas dañadas por el terremoto



Fig B31 Rotación y giro del obelisco de la Carrera y giro de pináculos de la colegiata de San Patricio.



Fig B32 Daños a productos en supermercados y tiendas de Lorca



## 4.3 C: ESTADÍSTICAS A DAÑOS A EDIFICIOS

---

### **Triage técnico de edificios**

Desde el mismo instante del terremoto, un equipo de arquitectos y arquitectos técnicos voluntarios se encargaron del triaje, o evaluación de emergencia del parque inmobiliario de Lorca, tarea en la que participó el autor. El objeto del triaje corresponde al de una primera evaluación básica de seguridad y habitabilidad de los edificios, por lo que los datos deberán tomarse como orientativos. Un total de 7839 edificios se habían analizado por los arquitectos al finalizar la primera semana del sismo. Estos datos han sido incorporados a la planimetría municipal para disponer de datos de daños georreferenciados.

Los edificios se evaluaron de acuerdo a las etiquetas verde; amarillo y rojo. La clasificación de verde significa seguridad de utilización, si bien el edificio puede ostentar daños ligeros como fisuras, grietas o pequeños desprendimientos. La clasificación amarilla significa edificio con daños y el acceso al mismo está condicionado a la eliminación del riesgo, - por ejemplo el derribo de techos o parapetos dañados – o bien se permite su utilización con precaución. Estos edificios pueden o no tener además daños estructurales. La etiqueta roja significa edificio dañado estructuralmente y es necesario prohibir el acceso al inmueble. La mayoría de las etiquetas rojas emitidas se refieren a edificios con daños a los pilares similares a la indicada en la figura B11. Debe recalarse que sólo se han identificado los edificios con daños amarillo o rojo, siendo los demás de calificación verde, si bien estos pueden presentar daños ligeros, por lo que este estudio no es capaz de identificar aquellos edificios con daños ligeros o muy ligeros. El mapa de daños se presenta en las figuras C1 y C2.

### **Datos de daños**

En el área municipal analizado con un total de 5155 edificios, 889 de ellos o el 13% del total han obtenido la calificación de daño amarillo o rojo. Es llamativa la incidencia de daños en algunos distritos censales del barrio de la Viña como son los números 1013; y 1024 con porcentajes de edificios dañados del 41% y 40% sobre el total de edificios de su distrito.

El distrito censal 1004, representativo del casco histórico sufre daños amarillos o rojos a un 16% del total de edificios de su distrito.

Al igual que en el Barrio de la Viña. El barrio de la avenida de las fuerzas armadas representado por el distrito 1027 tiene daños al 40% del total de edificios. Los datos pormenorizados por distrito censal se presentan en la tabla C1.

El mapa de daños se ha superpuesto sobre las características de suelo del municipio de Lorca realizado en el proyecto Sismozon donde se caracterizan 4 tipo de suelos de firme a blando denominados IA; IB II y III. Un análisis de la incidencia de daños sobre el total de edificios por cada tipo de suelo muestra un claro aumento de daños en el suelo tipo III, correspondiendo a los depósitos sedimentarios del Guadalentín, como indicamos en la tabla

Fig C1 Daños en Lorca indicando edificios declarados amarillo (daños moderados) y rojo (daños graves) por distrito censal y tipo de suelo con datos del 20 de mayo. Se indican también aquellos edificios que ya se hallaban en ruina antes del sismo. El parque inmobiliario del área censal estudiado en este trabajo es de 5155 edificios.

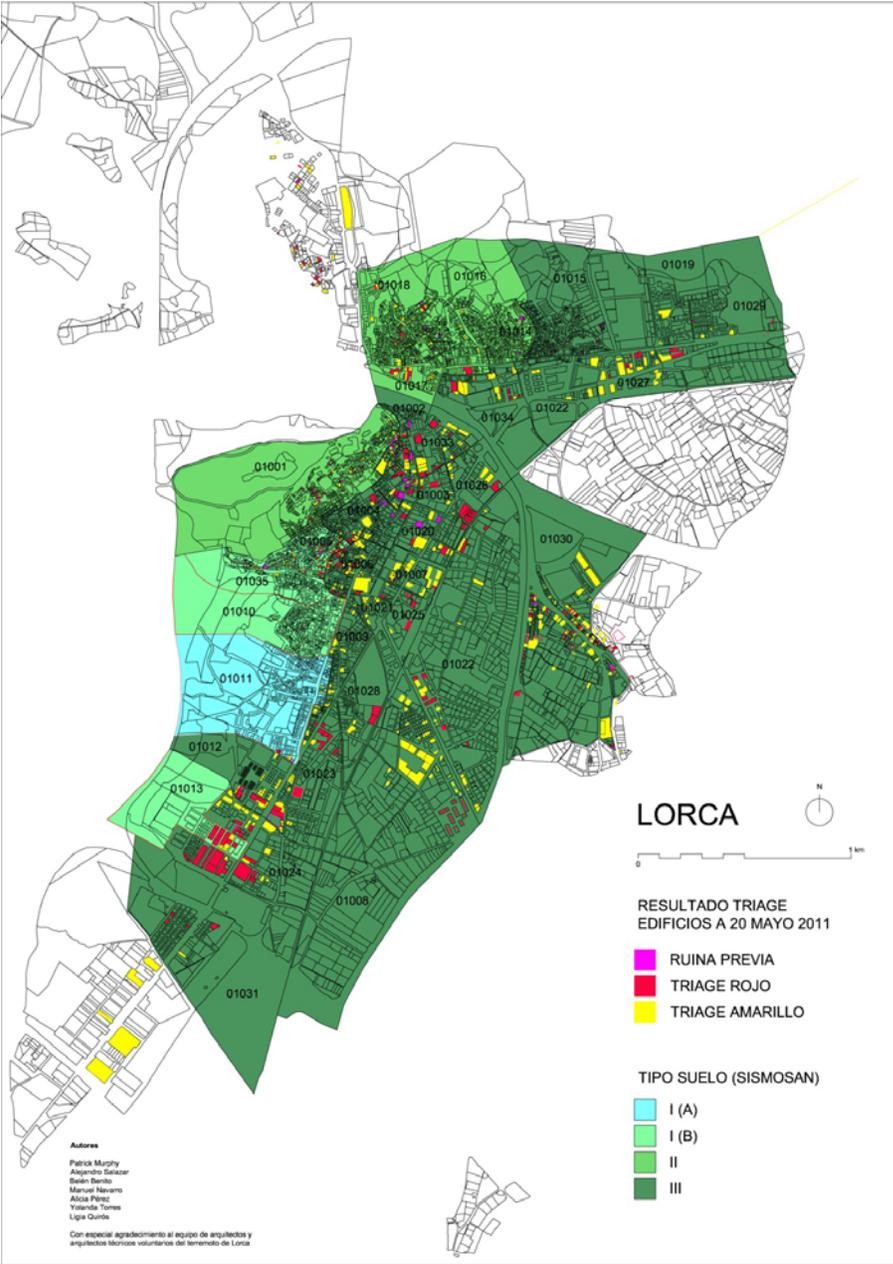


Fig C2 Daños en Lorca indicando edificios declarados amarillo (daños moderados) y rojo (daños graves) por distrito censal y tipo de suelo con datos del 1 de junio. Se indican las demoliciones (19 edificios) realizadas con posterioridad al sismo.

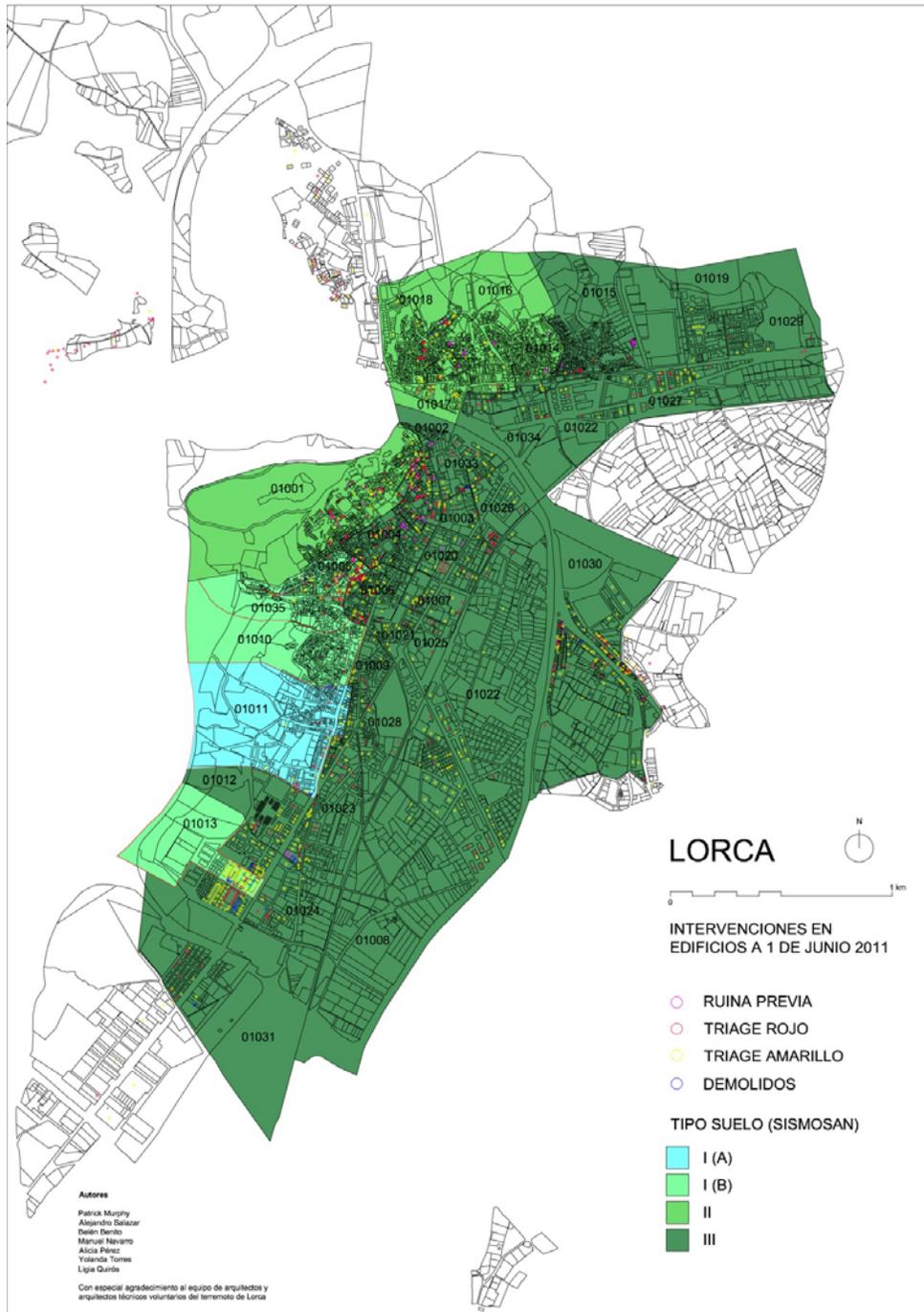


Tabla C1 indicando daños a edificios de Lorca por distrito censal

distrito censal	Triage		Edificios Demolidos	Total Dañados	Tipo Suelo	Nº Edif. Tradicionales	Nº Edif. Tecnológicos	Total Edificios	% daños sobre total
	Amarillo	Rojo							
1001	28	26	1	55	II	527	57	584	9,4%
1002	33	29		62	III	164	56	220	28,2%
1003	9	6	1	16	III	25	37	62	25,8%
1004	21	19		40	III	201	48	249	16,1%
1005	22	29		51	IB	304	48	352	14,5%
1006	38	21		59	III	161	83	244	24,2%
1007	14	5		19	III	17	28	45	42,2%
1008	28	10		38	III	93	43	136	27,9%
1009	12	3		15	III	67	76	143	10,5%
1010	2	3	1	6	IB	333	57	390	1,5%
1011	13	10	1	24	IA	228	141	369	6,5%
1012	35	9	1	45	III	177	31	208	21,6%
1013	14	3	2	19	IB y III	21	25	46	41,3%
1014	0	1		1	II	318	26	344	0,3%
1015	1	7		8	III	376	34	410	2,0%
1016	5	3		8	II	315	46	361	2,2%
1017	21	6		27	II	275	50	325	8,3%
1018	21	14	1	36	II	365	34	399	9,0%
1019	8	0		8	III	19	56	75	10,7%
1020	10	1		11	III	25	26	51	21,6%
1021	8			8	III	6	26	32	25,0%
1022	18	5		23	III	129	73	202	11,4%
1023	14	13		27	III	45	71	116	23,3%
1024	22	8	3	33	III	31	50	81	40,7%
1025	3	5		8	III	14	24	38	21,1%
1026	7	6		13	III	25	32	57	22,8%
1027	17	11		28	III	20	50	70	40,0%
1028	4	4		8	III	38	23	61	13,1%
1029	5	5		10	III	28	23	51	19,6%
1030	70	32	1	103	III	277	57	334	30,8%
1031	14	7	1	22	III	177	38	215	10,2%
1032	4	2		6	III	42	32	74	8,1%
1033	12	10		22	III	44	27	71	31,0%
1034	9	4		13	III	50	33	83	15,7%
1035	8	9		17	IB	218	46	264	6,4%
<b>Total</b>	<b>550</b>	<b>326</b>	<b>13</b>	<b>889</b>		<b>5155</b>	<b>1607</b>	<b>6762</b>	<b>13,1%</b>

Tabla C2 Daños a los edificios de Lorca por tipo de suelo

<b>Tipo Suelo</b>	<b>Total Edificios</b>	<b>Total Dañados</b>	<b>% daños sobre total</b>
IA	369	24	6,50%
IB	1006	74	7,36%
II	2013	127	6,31%
III	3374	664	19,68%



## 4.4 D: CONCLUSIONES

---

Es la primera vez en varias décadas que un extenso parque inmobiliario de una ciudad española se somete a un movimiento de suelo fuerte. Dada la variada edad de la edificación en Lorca, se puede observar el comportamiento de edificios realizados bajo las normas del 62, 68, 74, 94 y 2002, todas ellas de aplicación y obligado cumplimiento en Lorca.

Dado que no poseemos legislación que obligue al *retrofitting* estructural, la puesta en día o actualización de las prestaciones sismorresistentes de un edificio, es de esperar una respuesta variado de los edificios. Todos los estudios de vulnerabilidad y riesgo apuntan a la prevalencia de daños y edificios antiguos y mayor seguridad en edificios jóvenes.

Sin embargo en Lorca no se observa una reducción de la vulnerabilidad con los edificios tecnológicos. En algunos distritos censales como el 1027, la mayoría de edificios dañados son tecnológicos de reciente edificación.

Esto puede deberse a la propia expansión urbana cuyos ensanches modernos abandonan el suelo duro de la orografía más alta para ocupar los suelos blandos del valle del Guadalentín, donde el movimiento es amplificado. Sin embargo la norma obliga a considerar el suelo en el cálculo sísmico por lo que estos edificios deberían poseer mayores prestaciones sismorresistentes.

La tipología constructiva de los edificios tecnológicos actuales en Lorca es un problema desde el punto de vista sismorresistente.

Sólo aproximadamente un 34% del territorio peninsular posee una peligrosidad sísmica superior al 0,04g, valor umbral para la aplicación de la norma. Sin embargo los edificios de 'pórticos de hormigón armado bien arriostrados entre sí' hasta 6 plantas de altura no tienen la obligación de aplicar la norma hasta un valor de peligrosidad de 0,08g. Dado que la inmensa proporción de construcciones que se realizan actualmente son inferiores a 8 plantas y el hormigón armado es la tipología constructiva dominante en nuestro territorio,

se puede considerar que la norma empieza a aplicarse realmente a partir de 0,08g que representa sólo el 12% del territorio peninsular.

Este dato puede ayudarnos a comprender la contaminación en zonas sísmicas de tipologías estructurales de concepción estática que no son adecuadas para resistir esfuerzos horizontales.

Este es el caso de la tipología de losa, viga plana, losa unidireccional o bidireccional sobre pilares, donde se confía la rigidez al sismo únicamente por el empotramiento entre estos elementos. La práctica totalidad de los edificios de hormigón armado construido actualmente son de este tipo. Este esquema estructural tiene un mecanismo inestable de fallo y su uso en zonas sísmicas de otros países está limitado, aparte de ser una tipología ampliamente cuestionada en foros de ingeniería sísmica internacionales.

Estas tipologías poseen una escasa rigidez y por ello presentan importantes desplazamientos bajo la acción sísmica. Una de las omisiones de nuestra norma NCSE-02 es *no limitar en valores absolutos (cm) el desplazamiento máximo de un edificio*. En las normas internacionales de referencia consultadas, (EC8 y ASCE7) el desplazamiento máximo es uno de los principales limitadores de diseño y la verificación de la seguridad estructural de un proyecto.

España posee una cultura constructiva basada en la albañilería y la mayor parte de los elementos no estructurales de nuestros edificios como cerramientos o particiones se componen de estos materiales. Dado que no vamos a cambiar esta tendencia – tampoco hay porque hacerlo – se trata de divulgar las tipologías constructivas que sean compatibles con ella.

El EC8 y la literatura actual sobre sismorresistencia recomienda –por no obligar- que los edificios con particiones y cerramientos de albañilería se rigidicen con pantallas de hormigón armado. El motivo es dotar a la estructura de una rigidez superior a la de los elementos no estructurales, permitiendo entrar en carga la estructura sin verse secuestrado por estos elementos.

Cuando no es así, nuestras estructuras están sometidas a los caprichos rigidizantes de los elementos no estructurales.

El uso de pantallas rigidizantes no es habitual en nuestros edificios sencillamente porque no hemos desarrollado una cultura constructiva sismorresistente.

El uso de pantallas permite seguir usando cerramientos de albañilería y forjados planos porque libera a estos elementos de la necesidad de resistir esfuerzos horizontales. Por eso es una tipología a potenciar y divulgar en nuestro territorio.

La proliferación de graves irregularidades prosísmicas como plantas bajas diáfanas o pilares cortos debe interpretarse como el resultado de displicencia profesional o ignorancia frente a las acciones sísmicas en las edificaciones. También pone de manifiesto el escaso labor pedagógico de la norma sismorresistente y el poco interés o divulgación de principios de diseño sismorresistente entre nuestros profesionales.

Se podría resumir que en España existe cálculo sismorresistente, comúnmente realizado por programas informáticos y no siempre de manera transparente, pero no existe diseño ni concepto sismorresistente en nuestras estructuras.

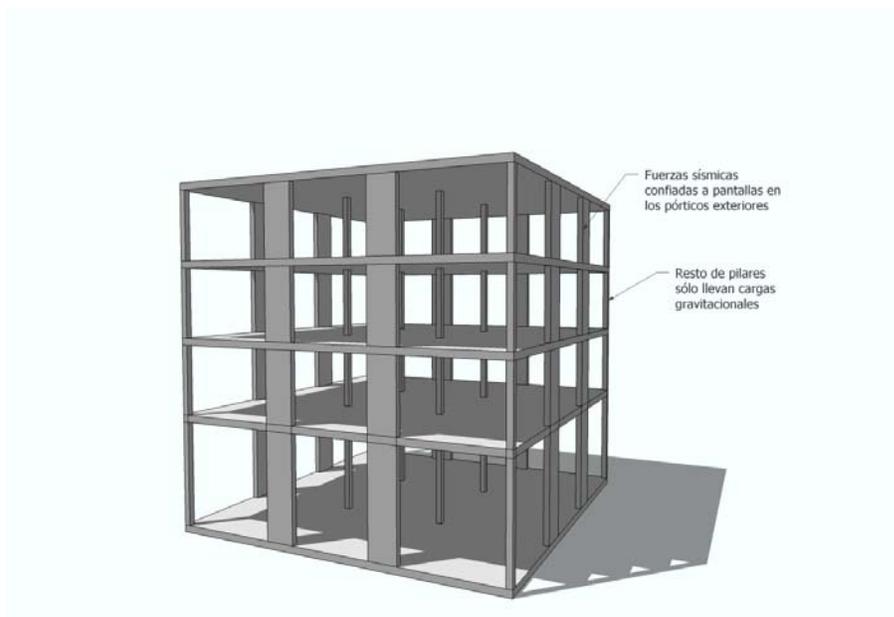
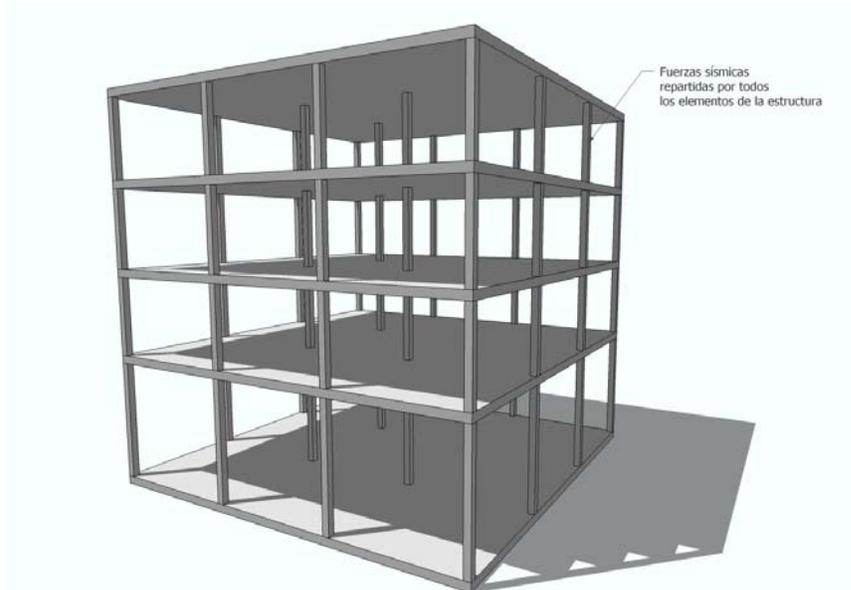
Una nota de optimismo puede ser la ilustración de una torre de 12 plantas en Lorca (fig D1) que no sufrió daños. Poseía pilares apantallados en dos direcciones ortogonales desarrollando una gran rigidez de conjunto, superior a la de los elementos de albañilería de cerramiento. El antepecho de cubierta está realizado en hormigón armado perfectamente confinado por el forjado de cubierta.

Fig D1 Torre de viviendas de 12 plantas sin daños en Lorca



Finalmente, volviendo a nuestro esquema en la figura B23 del tipo de estructura de viviendas que observamos en Lorca, ilustramos conceptualmente la inserción de pantallas rigidizantes para una perfecta comprensión de la tipología constructiva que podríamos potenciar en zonas sísmicas de nuestro país.

Fig D2 integrando un concepto sismorresistente (imagen inferior) en una estructura tipo de forjado plano y pilar débil (imagen superior)





# REFERENCIAS

---

- Abrahamson N.A. and Silva W.J. (2008). Chiou–Youngs PEER-NGA empirical ground motion model for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters. *PEER Report Draft v2, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA.*
- Abrahamson N.A., Silva W.J. and Kamai R. (2013). Update of the AS08 Ground-Motion Prediction Equations Based on the NGA-West2 Data Set. *PEER 2013/04*
- Akkar S. and Boomer J.J. (2010). Empirical Equations for the Prediction of PGA, PGV, and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region, and the Middle East. *Seismological Research Letters.* 81: 195-206.
- Ambraseys N.N., Douglas J., Sarma S.K. and Smit P.M. (2005). 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. *Bulletin of Earthquake Engineering.* 3: 1–53.
- Ambraseys N.N., Simpson K.A. and Bommer J.J. (1996). Prediction of Horizontal Response Spectra in Europe. *Earthquake Engineering Structural Dynamics.* 25: 371-400.
- Anderson J. (1979). Estimating the seismicity from geological structure for seismic-risk studies. *Bulletin of the Seismological Society of America.* 69: 135–158.
- Applied Technology Council (1985). Earthquake damage evaluation data for California, Report No. ATC–13, Redwood City, CA.
- Applied Technology Council (ATC), 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, volumes 1 and 2, Report No. ATC-40, Redwood City, CA.
- Applied Technology Council (2009). Guidelines for Seismic Performance Assessment of Buildings, Report ATC–58 50% Draft, April 2009, Redwood City, CA.
- Barbat, A. H., Yépez, F. y Canas, J. A. (1996). "Damage scenarios simulation for seismic risk assessment in urban zones". *Earthquake spectra* 12 (3): 371-394.
- Bâth M. (1978). A note on recurrence relations for earthquakes. *Tectonophysics.* 51: T23-T30.
- Benito, B., Gaspar-Escribano, J. M., Martínez-Díaz, J. J., García Rodríguez, M. J., Jiménez Peña, E., Canora, C., & Álvarez-Gómez, J. A. (2008). The RISMUR project: seismic risk assessment of the Murcia province (SE Spain). *Bolletino di Geofisica. Teroica e Applicata,* 49(1), 3-15.
- Berge-Thierry C., Cotton F., Scotti O., Griot-Pommerer D.A. and Fukushima Y. (2003). New Empirical Response Spectral Attenuation Laws for Moderate European Earthquakes. *Journal of Earthquake Engineering.* 7(2): 193-222.
- Bindi D., Pacor F., Luzi L., Puglia R., Massa M., Ameri G. and Paolucci, R. (2011). Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database. *Bulletin of Earthquake Engineering.* 9(6): 1899-1920.
- Bonett, R. L. (2003). Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada. *Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.*
- Boore D.M. and Atkinson G.M. (2008). Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods Between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra.* 24: 99-138.
- Boore D.M., Stewart J.P., Seyhan E. and Atkinson G.M. (2013). NGA-West2 Equations for Predicting Response Spectral Accelerations for Shallow Crustal Earthquakes. *PEER 2013/05*
- Braga, F.; Dolce, M.; Liberatore, D. (1982). A Statistical Study on Damaged Buildings and Ensuing Review of the MSK-76 Scale. *Estratto da 7th ECEE, Athens, September 1982, Publicación II-394, 65-84 pp.*
- Braga, F.; Dolce, M.; Liberatore, D. (1986). Assessment of the Relationships between Macroseismic Intensity, Type of Building and Damage, based on the Recent Italy Earthquake Data, *Proceeding 8th ECEE, Lisbon, Portugal.*
- Brune J.N. (1968). Seismic moment, seismicity, and rate of slip along major fault zones. *Journal of Geophysical Research.* 73: 777–784.
- Cabañas, L., Carreño, E., Izquierdo, A., Martínez, J. M., Capote, R., Martínez, J., ... & Murphy, P. (2011). Informe del sismo de Lorca del 11 de mayo de 2011. IGN, UCM, UPM, IGME, AEIS.
- Campbell K.W. and Bozorgnia Y. (2008). NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear-elastic response spectra for periods ranging from 0.01 and 10s. *Earthquake Spectra.* 24: 139–71.
- Campbell K.W. and Bozorgnia Y. (2013). NGA-West2 Campbell-Bozorgnia Ground Motion Model for the Horizontal Components of PGA, PGV, and 5%-Damped

- Elastic Pseudo-Acceleration Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s. *PEER 2013/06*
- Chávez, J. (1998). Evaluación de la Vulnerabilidad y el Riesgo Sísmico a Escala Regional: Aplicación a Cataluña. *Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 343 pp.*
- Chinnery M.A. and North R.G. (1975). The frequency of very large earthquakes. *Science*. 190: 1197–1198.
- Chiou B. and Youngs R.R. (2008). Chiou–Youngs PEER-NGA empirical ground motion model for the average horizontal component of peak acceleration and pseudo-spectral acceleration for spectral periods of 0.01 to 10 seconds. *PEER Report Draft, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA*
- Chiou B.S.J. and Youngs R.R. (2013). Update of the Chiou and Youngs NGA Ground Motion Model for Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *PEER 2013/07*
- Chyi-Tyi Lee, Chin-Tung Cheng, Chi-Wen Liao and Yi-Ben Tsai (2000). Site Classification of Taiwan Free-field Strong-Motion Stations. [gis.geo.ncu.edu.tw/query/site/](http://gis.geo.ncu.edu.tw/query/site/)
- Coburn A. y Spence R. (2002). Earthquake protection. 2nd edition. *Ed. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.*
- Coppersmith, K. J., & Youngs, R. R. (1986, August). Capturing uncertainty in probabilistic seismic hazard assessments within intraplate tectonic environments. *In Proceedings of the Third US national conference on earthquake engineering (Vol. 1, pp. 301-312).*
- Cornell C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 58: 1583-1606.
- Cosentino P., Ficarra V. and Luzio D. (1977). Truncated Exponential Frequency Magnitude Relationship in Earthquake Statistics. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 67: 1615-1623
- Dolce, M., Kappos, A., Zuccaro, G., and Coburn, A.W. (1995). State of the art Report of WG3 – Seismic Risk and Vulnerability, Proceedings of the 10th European Conference of Earthquake Engineering, Vienna, Austria, 3049–3077.
- Electric Power Research Institute EPRI, 1987 DYNASTORE — A computer Model for Quantifying Dynamic Energy Storage Benefits. *EPRI AP-550 Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA*
- Esteva, L. (1968). Bases para la formulación de diseño sísmico (Doctoral dissertation, PhD thesis, Faculty of Engineering, UNAM).
- European Seismological Commission ESC (1998). "European Macroseismic Scale 1998" Conseil de L'Europe. *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. Vol. 15. Editor G. Grunthal. Luxembourg 1998.*
- Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1999. HAZUSVR 99 – Earthquake Loss Estimation Methodology, Federal Emergency Management Agency and National Institute of Building Sciences, Washington, D.C.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2002a. HAZUSVR 99-SR2 (Service Release 2), HAZUS Technical Manual, Federal Emergency Management Agency, FEMA and National Institute of Building Sciences, NIBS, Washington, D.C., Vol. 1–3.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2002b. HAZUSVR99-SR2 (Service Release 2), Advanced Engineering Building Module, Technical and User's Manual, Federal Emergency Management Agency, FEMA and National Institute of Building Sciences, NIBS, Washington D.C.
- Federal Emergency Management Agency (2003). HAZUS-MH MR4 Technical Manual. Washington, D.C.
- Federal Emergency Management Agency (2005). Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, FEMA 440, Prepared by Applied Technology Council (ATC-55 Project), Washington, D.C., United States, June 2005.
- Federal Emergency Management Agency (2008). HAZUS-MH Estimated annualized earthquake losses for the United States, FEMA 366, Report of the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, United States, 66 pp.
- Frankel A. (1995). Mapping Seismic Hazard in the Central and Eastern United States. *Seismological Research Letters*. 66: 8-21.
- García-Mayordomo J. and Giner-Robles J.L. (2006). Definición de zonas sismogénicas en base al gradiente geotérmico, resistencia y profundidad del límite frágil-dúctil en la corteza superior. Aplicación metodológica para el cálculo de la peligrosidad sísmica en el Sureste de España. *Geogaceta*. 39: 55-58.
- García-Mayordomo J., Insua-Arévalo J., Martínez-Díaz J., Perea H., Álvarez-Gómez J.A., Martín-González F., González A., Lafuente P., Pérez-López R., Rodríguez-Pascua M.A., Giner-Robles J., Azañón J.M., Masana E. and Moreno X. (2010). Modelo integral de zonas sismogénicas de España. *Resúmenes de la 1ª Reunión Ibérica sobre Fallas Activas y Paleosismología, Sigüenza, España.*
- García-Mayordomo J., Insua-Arévalo J.M., Martínez-Díaz J.J., Jiménez-Díaz A., Martín-Banda R., Martín-Alfageme S., Álvarez-Gómez J.A., Rodríguez-Peces M., Pérez-López R., Rodríguez-Pascua M.A., Masana E.,

- Perea H., Martín-González F., Giner-Robles J., Nemser E.S., Cabral J. and the QAFI Compilers. (2012a). La Base de Datos de Fallas Activas en el Cuaternario de Iberia (QAFI v.2.0). *Journal of Iberian Geology*, 38(1), 285-302.
- García-Mayordomo J., Martínez-Díaz J.J., Capote R., Martín-Banda R., Insua-Arévalo J.M., Álvarez-Gómez J.A., Perea H., González A., Lafuente P., Martín-González F., Pérez-López R., Rodríguez-Pascua M.A., Giner-Robles J., Azañón J.M., Masana E., Moreno X., Benito B., Rivas A., Gaspar-Escribano J.G., Cabañas L., Vilanova S., Fonseca J., Nemser E. and Baize S. (2012b). Modelo de Zonas Sismogénicas para el Cálculo de la Peligrosidad Sísmica en España. *7ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Donostia 2012*.
- Gardner J.K. and Knopoff L. (1974). Is the Sequence of Earthquakes in Southern California, with Aftershocks Removed, Poissonian?. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 64: 1363-1367.
- Grünthal, G. (ed.) (1998) "European Macroseismic Scale 1998". *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 7, pp. 99. Luxembourg*.
- Grupo de Trabajo IGN-UPM (2013). Actualización de Mapas de Peligrosidad Sísmica de España 2012. *Editorial Centro Nacional de Información Geográfica, Madrid*. ISBN: 978-84-416-2685-0.
- Gutenberg B. and Richter C.F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 34: 185-188.
- Hanks T.C. and Kanamori H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*. 84: 23480-23500.
- Havskov J. and Ottemöller L. (1999). Seisan earthquake analysis software. *Seismological Research Letters*. 70: 532-534.
- Hazus-MH (2003), "Multi-hazard Loss Estimation Methodology". Technical manual. Federal Emergency Management Agency (FEMA), *Washington DC, USA*. pp. 712.
- Hill, M. y T. Rossetto. (2008). "Comparison of building damage scales and damage descriptions for use in earthquake loss modelling in Europe", *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 6, pp. 335-365.
- Idriss I.M. (2008). An NGA Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated by Shallow Crustal Earthquakes, *Earthquake Spectra*. 24: 217-242.
- Idriss I.M. (2013). NGA-West2 Model for Estimating Average Horizontal Values of Pseudo-Absolute Spectral Accelerations Generated by Crustal Earthquakes. *PEER 2013/08*
- Joyner, WB.; Fumal, TE. (1985). Predictive Mapping of Earthquake Ground Motion, in *Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Region – An Earth-Science Perspective*, J. E. Ziony (Editor), U.S. Geol. Surv. Profess. Pap. 1360, 203-220.
- Kaklamanos, J., Baise, L. G., & Boore, D. M. (2011). Estimating unknown input parameters when implementing the NGA ground-motion prediction equations in engineering practice. *Earthquake Spectra*, 27(4), 1219-1235.
- Kale, Ö., & Akkar, S. (2013). A new procedure for selecting and ranking ground-motion prediction equations (GMPEs): The Euclidean distance-based ranking (EDR) method. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2A), 1069-1084.
- Kappos, A.J., Pitilakis, K.D., Morfidis, K., and Hatzinikolaou, N. (2002). Vulnerability and risk study of Volos (Greece) metropolitan area, *Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering*, London, CD ROM Proceedings (Balkema), Paper 074.
- King, S. A., & Rojhan, C. (1997). ATC-38 Database on the Performance of Buildings Near Strong-Motion Recordings. *In Proceedings of Northridge Earthquake Research Conference*.
- Kramer, R. M. (1999). Trust and distrust in organizations: Emerging perspectives, enduring questions. *Annual review of psychology*, 50(1), 569-598.
- Lagomarsino, S. y S. Giovinazzi. 2006, "Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings". *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 4, pp. 415-443.
- Lang, D.H., and Jaiswal, K. (2011). Global Database on Seismic Vulnerability Information: Building on the WHE-PAGER Network, Project Proposal presented to Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (GFDRR), Washington, D.C., July 2011.
- López Arroyo, A. y Villacañas, J. (1999), "Metodología Simplificada para el análisis del Riesgo Sísmico". *Física de la Tierra*. pp 269-284
- Main I.G. and Burton P.W. (1981). Rates of crustal deformation inferred from seismic moment and Gumbel's third distribution of extreme magnitude values. In: Beavers, J.E. (Ed.), *Earthquakes and Earthquake Engineering: The Eastern United States*, London. 2: 937-951.
- Martín-Banda R. y García-Mayordomo J. 2013 Memoria explicativa sobre la revisión y actualización de la base de datos de fallas activas del cuaternario de la península Ibérica para la región de Murcia. *Informe interno*.
- Milutinovic, Z.V. y G.S. Trendafiloski (2003), "An advanced approach to earthquake risk scenarios with

applications to different European towns. *WP4: Vulnerability of current buildings*". pp. 110.

Mouroux, P., Bertrand, M., Bour, M., Brun, B. L., Depinois, S., Masure, P. y Risk-UEteam (2004). The European Risk-UE Project: an advanced approach to earthquake risk scenarios. *Proceedings of the 13th World Conference Earthquake Engineering, Vancouver B.C (Canada), CD-ROM, Paper No. 3329*.

National Research Council. (1988). Frontiers in chemical engineering: research needs and opportunities. *Natl Academy Pr*.

NCSE-02 (2002). Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación Real Decreto 997/2002, de 27 de Septiembre. *Publicada en el BOE, Vol. 244, pp. 35898-35967*.

NEHRP (1997). Recommendation Provision for Seismic Regulation for New Buildings and Other Structures. *Building Seismic Safety Council, Washington, D. C Federal Emergency. FEMA*

NEHRP (2009). Council, B. S. S. (2009). NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures. *Federal Emergency Management Agency*.

Ordaz M., Martinelli F., D'Amico V. and Meletti C. (2013). CRISIS2008: A Flexible Tool to Perform Probabilistic Seismic Hazard Assessment. *Seismological Research Letters*, 84-3: 495-504.

Power M., Chiou B., Abrahamson N., Bozorgnia Y., Shantz T. and Roblee T. (2008). An Overview of the NGA Project. *Earthquake Spectra*. 24-1: 3-21

Risk-UE(2003), An advanced approach to earthquake RISK scenarios with applications to different European towns. European Commission 5FP - City of Tomorrow and Cultural Heritage. *CEC Contract Number: EVK4-CT-2000-00014. Duration: 44 Months (15/01/2001 30/09/2004), <http://www.risk-ue.net/> (último acceso 23 de marzo de 2007)*

Rivas-Medina A. 2014. Contribución metodológica para incorporar fallas activas en la modelización de la fuente dirigida a estimaciones de peligrosidad sísmica. Aplicación al sur de España. *Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid*.

Rivas-Medina, A., Martínez-Cuevas, S., Quirós, L. E., Gaspar-Escribano, J. M., & Staller, A. (2014). Models for reproducing the damage scenario of the Lorca earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-19.

Ruiz S., Cantero A., Rivas-Medina A., Gaspar-Escribano J.M. and Benito B. (2012). Desarrollo de un modelo de movimiento fuerte utilizando datos acelerométricos españoles y contraste de otros modelos mediante análisis estadístico de residuos con datos locales. *7ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Donostia 2012*.

Sabetta F. and Pugliese A. (1996). Estimation of Response Spectra and Simulation of Nonstationary Earthquake Ground Motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 86: 337-352.

Scherbaum, F., Cotton, F., & Smit, P. (2004). On the use of response spectral-reference data for the selection and ranking of ground-motion models for seismic-hazard analysis in regions of moderate seismicity: The case of rock motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(6), 2164-2185.

Scherbaum, F., Delavaud, E., & Riggelsen, C. (2009). Model selection in seismic hazard analysis: An information-theoretic perspective. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(6), 3234-3247.

Seed, HB.; Murarka, R.; Lysmer, J. (1976). Relationships of Maximum Acceleration, Maximum Velocity, Distance from Source and Local Site Conditions for Moderately Strong Earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol 66, pp 1323-1342.

Stepp J.C. (1972). Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effects on statistical estimates of earthquake hazard. *Proceedings of First Int. Conference on Microzonation*. 2: 897-910.

Stirling M.W., McVerry G.H. and Berryman K.R. (2002). A new seismic hazard model of New Zealand. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 92: 1878-1903.

Stirling, M. W., M. C. Gerstenberger, N. J. Litchfield, G. H. McVerry, W. D. Smith, J. Pettinga, and P. Barnes (2008). Seismic hazard of the Canterbury region, New Zealand: New earthquake source model and methodology. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*. 41: 51-67.

U.S. Nuclear Regulatory Commission, Department Of Energy- Electric Power Research Institute (NRC-DOE-EPRI), "Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts". *NUREG/CR-6372,1 and 2, 1997*

Vacareanu, R., Radoi, R., Negulescu, C., & Aldea, A. (2004, August). Seismic vulnerability of RC buildings in Bucharest, Romania. In Proceedings of the 13th world conference on earthquake engineering.

Wells D.L. and Coppersmith K.J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 84: 974-1002.

Woo G. (1996). Kernel Estimation Methods for Seismic Hazard Area Source Modeling. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 86-2: 353-362.

Wooddell, K. E., & Abrahamson, N. A. (2012). New earthquake classification scheme for mainshocks and aftershocks in the NGA-West2 ground motion

prediction equations (GMPes). *In Proceedings, 15th World Conference on Earthquake Engineering.*

Youd, T. L., & Perkins, D. M. (1978). Mapping liquefaction-induced ground failure potential. *Journal*

*of the Geotechnical Engineering Division, 104(4), 433-446.*