

ACTUALIZACIÓN DE  
MAPAS DE  
PELIGROSIDAD SÍSMICA  
DE ESPAÑA  
2012



Mapa de  
Peligrosidad  
Sísmica



# Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España 2012



## **Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España 2012**

Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado

**<http://publicacionesoficiales.boe.es>**

Edición digital: Año 2017

### **Autor:**

Instituto Geográfico Nacional

### **Edita:**

Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG)

© Instituto Geográfico Nacional 2017

© de esta edición: Centro Nacional de Información Geográfica 2017

NIPO: 162-17-015-9

DOI: 10.7419/162.05.2017

[www.ign.es](http://www.ign.es)

[sismologia@fomento.es](mailto:sismologia@fomento.es)

## COORDINACIÓN Y EJECUCIÓN DE TRABAJO

### INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL

Martínez Solares, José Manuel  
Cabañas Rodríguez, Luis



### UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Benito Oterino, María Belén  
Rivas Medina, Alicia  
Gaspar Escribano, Jorge Miguel  
Ruíz Barajas, Sandra  
Rodríguez Zaloña, Óscar



## COLABORADORES ESPECIALES

<b>Bernal Riosalido, Alberto</b>	Universidad Politécnica de Madrid-ByA
<b>Crespo Álvarez, María José</b>	Universidad Politécnica de Madrid-Principia
<b>García Mayordomo, Julian</b>	Instituto Geológico y Minero de España
<b>Martínez Díaz, José</b>	Universidad Complutense de Madrid

## COMITÉ DE SEGUIMIENTO

<b>Alarcón Álvarez, Enrique</b>	Universidad Politécnica de Madrid
<b>Alguacil Alguacil, Lucrecia</b>	Dirección Gral. de Protección Civil y Emergencias
<b>Álvarez Cabal, Ramón</b>	Universidad Politécnica de Madrid
<b>Barbat, Alex</b>	Universidad Politécnica de Barcelona
<b>Bernal Riosalido, Alberto</b>	Universidad Politécnica de Madrid-ByA
<b>Carreño Herrero, Emilio</b>	Instituto Geográfico Nacional
<b>Capote del Villar, Ramón</b>	Universidad Complutense de Madrid
<b>Crespo Álvarez, María José</b>	Universidad Politécnica de Madrid-Principia
<b>De Vicente Muñoz, Gerardo</b>	Universidad Complutense de Madrid
<b>García Fernández, Mariano</b>	Consejo Superior de Investigaciones Científicas
<b>García Mayordomo, Julián</b>	Instituto Geológico y Minero de España
<b>Giner Caturla, José Juan</b>	Universidad de Alicante
<b>Goula Suriñach, Xavier</b>	Instituto Geológico de Cataluña
<b>Herraiz Sarachaga, Miguel</b>	Universidad Complutense de Madrid
<b>Izquierdo Álvarez, Aránzazu</b>	Instituto Geográfico Nacional
<b>Jiménez Santos, María José</b>	Consejo Superior de Investigaciones Científicas
<b>Jiménez Juan, Antonio</b>	Consejo de Seguridad Nuclear
<b>López Casado, Carlos</b>	Universidad de Granada
<b>Martín Martín, Antonio Jesús</b>	Instituto Geográfico Nacional
<b>Martínez Díaz, José</b>	Universidad Complutense de Madrid
<b>Molina Palacios, Sergio</b>	Universidad de Alicante
<b>Murphy Corella, Patrick</b>	BroadwayMalyan
<b>Pascual Santamaría, Gregorio</b>	Dirección Gral. de Protección Civil y Emergencias
<b>Peláez Montilla, José Antonio</b>	Universidad de Jaén
<b>Ramírez Rayo, Marisol</b>	Consejo de Seguridad Nuclear
<b>Sánchez Cabañero, José</b>	Consejo de Seguridad Nuclear
<b>Santoyo García Galiano, Miguel Angel</b>	Universidad Complutense de Madrid
<b>Vilanova, Susana</b>	Istituto Superior Tecnico-Lisboa

# Índice

Prólogo .....	11
Introducción y objetivos .....	13
<b>1. Confección del catálogo de proyecto .....</b>	<b>17</b>
1.1. Análisis de la sismicidad .....	17
1.2. Preparación preliminar del catálogo sísmico .....	19
1.2.1. Periodos temporales del catálogo del IGN .....	20
1.2.2. Filtrado de terremotos de bajas intensidades y magnitudes .....	23
1.2.3. Revisión de otros catálogos y referencias bibliográficas .....	23
1.2.4. Terremotos con epicentro en el mar .....	24
1.3. Homogeneización de los parámetros de tamaño .....	25
1.3.1. Datos utilizados para las relaciones con $M_w$ .....	25
1.3.2. Deducción de correlaciones con $M_w$ .....	26
1.3.3. Preparación y homogeneización del catálogo .....	30
1.4. Eliminación de réplicas, premonitores y otros agrupamientos .....	31
1.5. Completitud del catálogo .....	33
1.6. Catálogo final del Proyecto .....	37
<b>2. Definición y caracterización de fuentes sismogénicas: zonas y fallas .....</b>	<b>41</b>
2.1. Zonificaciones seleccionadas .....	41
2.1.1. Zonificación de García-Mayordomo <i>et al.</i> (2012) (GM12) .....	42
2.1.2. Zonificación de Bernal y asociados (ByA12) .....	45
2.2. Identificación de fallas activas .....	48
2.2.1. QAFI: Base de datos de fallas activas cuaternarias de Iberia .....	49
2.2.2. Utilización de las fallas activas en el cálculo de la peligrosidad .....	51
2.3. Caracterización sísmica de las fuentes .....	52
2.3.1. Metodología .....	52
2.3.2. Cálculo de los parámetros de sismicidad .....	53
2.3.3. Parámetros de sismicidad resultantes .....	55
<b>3. Ecuaciones de predicción del movimiento fuerte .....</b>	<b>65</b>
3.1. Introducción .....	65
3.2. Revisión y análisis de modelos actuales .....	66
3.3. Análisis de datos locales disponibles .....	68
3.4. Modelo propio .....	70
3.5. Calibración de modelos preseleccionados .....	73
3.6. Selección final de modelos .....	76

<b>4. Metodología de cálculo</b> .....	81
4.1. Definición y perspectiva histórica .....	81
4.2. Metodología seguida en el estudio: PSHA .....	82
4.2.1. Método zonificado .....	83
4.2.2. Método no zonificado .....	85
4.3. Tratamiento de incertidumbres .....	88
4.3.1. Incertidumbre aleatoria .....	88
4.3.2. Incertidumbre epistemológica .....	89
4.4. Especificaciones de cálculo .....	92
<b>5. Estudio específico en Canarias</b> .....	95
5.1. Introducción .....	95
5.2. Catálogo sísmico .....	95
5.2.1. Introducción .....	95
5.2.2. Catálogo sísmico de proyecto .....	96
5.3. Zonificación seleccionada .....	96
5.4. Ecuación de predicción del movimiento fuerte .....	99
5.5. Especificaciones de cálculo .....	100
<b>6. Resultados</b> .....	101
6.1. Incertidumbre de los resultados. Análisis de sensibilidad .....	111
<b>ANEXO I. Comparación de correlaciones con la magnitud desarrolladas en el estudio con otras publicadas</b> .....	113
<b>ANEXO II. Revisión de las zonificaciones utilizadas en la región en estudios recientes</b> .....	117
II.1. Zonificaciones desarrolladas para la península Ibérica .....	117
II.2. Zonificaciones desarrolladas en regiones del sur de España .....	118
II.3. Zonificaciones desarrolladas en regiones del norte de España .....	119
II.3.1. Cataluña y NE de la península Ibérica .....	119
II.3.2. Navarra y N de la península Ibérica .....	119
II.3.3. Galicia y NO de la península Ibérica .....	119
II.4. Zonificaciones desarrolladas para Portugal .....	120
II.5. Zonificaciones desarrolladas para Francia .....	120
II.6. Zonificaciones desarrolladas para el norte de África .....	120
<b>ANEXO III. Descripción sismotectónica y geológica de las zonificaciones seleccionadas en el estudio</b> .....	121
III.1. Zonificación de García-Mayordomo <i>et al.</i> (2012) .....	121
III.1.1. Descripción de las zonas sismogénicas .....	121
Zonas Noroccidentales: zonas 1, 2, 3, 4 y 5 .....	121
Zonas Atlántico-Portuguesas: zonas 6, 7, 8, 9 y 10 .....	123
Zonas Atlántico-golfo de Cádiz: zonas 13, 49, 50, 51, 52, 53 y 54 .....	123
Zonas Meseta Sur-Sierra Morena: zonas 11 y 12 .....	124
Zonas Béticas exteriores: zonas 28, 29, 30 y 31 .....	124
Zonas Béticas interiores: zonas 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39 y 55 .....	124
Zonas de Alborán, Rif y Tell: zonas 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47 y 48 .....	125
Zonas Mediterránea y golfo de Valencia: zonas 22, 23, 24, 27 y 32 .....	125

---

Zonas Cordillera Ibérica: zonas 25 y 26 .....	126
Zonas Pirenaicas: zonas 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 y 21 .....	126
III.1.2. Otras consideraciones .....	126
III.2. Zonificación de ByA12 .....	126
III.2.1. Regiones sismogénicas. Descripción general de la sismicidad .....	127
<b>ANEXO IV. Modelos de movimiento fuerte analizados en el estudio .....</b>	<b>139</b>
IV.1. Modelos preseleccionados no usados finalmente en el estudio .....	139
IV.1.1. Modelos publicados con datos españoles .....	139
IV.1.2. Modelos publicados con datos de otros lugares y utilizados en estudios de España .....	139
IV.1.3. Modelos aplicables para regiones de subducción o zonas profundas .....	140
IV.2. Modelos usados en el estudio .....	141
<b>ANEXO V. Mapa de peligrosidad sísmica en términos de intensidad macrosísmica .....</b>	<b>145</b>
V.1. Análisis de relaciones PGA-Intensidad .....	145
V.2. Selección de relaciones PGA-Intensidad .....	148
V.3. Resultados en intensidad convertida .....	150
<b>ANEXO VI. Resultados obtenidos y análisis relacionados con la Norma Sismorresistente NCSE-02 .....</b>	<b>153</b>
VI.1. Introducción .....	153
VI.2. Cálculo de la acción sísmica definida en la norma NCSE-02, haciendo uso del nuevo mapa de peligrosidad .....	154
VI.3. Valores de PGA (TR = 475) mayores o iguales que 0.04 g, obtenidos en el estudio, para las capi- tales de los términos municipales .....	155
<b>Bibliografía .....</b>	<b>257</b>



# Prólogo

*La reciente ocurrencia en España de terremotos de magnitud moderada próximos a zonas urbanas ha producido catastróficas consecuencias tanto a nivel social como económico. Una forma de estudiar medidas contra estos fenómenos naturales son los análisis de peligrosidad sísmica, concepto basado en la estimación de la frecuencia con la que una determinada amplitud del movimiento del suelo es excedida, durante un determinado período de tiempo, como consecuencia de la ocurrencia de terremotos. La actualización periódica de los mapas que representan la peligrosidad sísmica de España forma parte de una de las acciones más importantes que desarrolla el Instituto Geográfico Nacional en el marco de sus competencias en el campo de la sismología. El estudio que aquí se presenta es el resultado de un extenso proyecto iniciado en el año 2010 en el que han participado investigadores y técnicos de otras instituciones pertenecientes a los campos de la sismología, la ingeniería sísmica y la geología. La labor desarrollada por el grupo de trabajo interdisciplinar ha recogido las novedades en el conocimiento de la sismicidad regional de la península y en el avance de las técnicas para la elaboración de mapas de peligrosidad sísmica, junto con la información aportada por los recientes estudios sobre la actividad de fallas. Asimismo, el estudio se ha adecuado a la normativa europea, llevándose a cabo también una homogeneización con los países limítrofes.*

*Independientemente del aspecto científico del estudio, la cartografía sísmica obtenida tiene una evidente componente de servicio público toda vez que sirve de base al mapa sísmico contenido en las normas sismorresistentes de aplicación a los campos de la ingeniería y arquitectura en España y que como consecuencia deberán asimismo actualizarse. De igual forma, el estudio recoge la puesta al día del mapa incluido en la Directriz Básica de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico, de indudable interés a los efectos de planificación, tanto a nivel autonómico como a nivel local, cuya última modificación fue aprobada por Acuerdo de Consejo de Ministros de 16 de julio de 2004 y publicada por Resolución de la Subsecretaría de Interior de 17 de septiembre de 2004.*

AMADOR ELENA CÓRDOBA  
Director General  
del Instituto Geográfico Nacional



## Introducción y objetivos

Para cualquier país situado en un área de actividad sísmica de cierta importancia es indudable la necesidad de disponer de mapas de peligrosidad sísmica que determinen de forma precisa la posibilidad de ocurrencia de movimientos sísmicos con capacidad de generar daños personales y materiales. Estos mapas permitirán diseñar estructuras capaces de resistir la acción sísmica y también serán de gran utilidad para la planificación urbanística de las poblaciones.

El primer mapa de peligrosidad sísmica para España que podemos considerar como tal puede ser el de Gómez-Guillamón (1957), que el autor denominó de «Inestabilidad sísmica de la Península Ibérica» en el que divide la península en 17 zonas asignándole a cada una un grado sísmico máximo y una frecuencia respecto al total peninsular. Desde entonces se vienen realizando los estudios de peligrosidad encaminados fundamentalmente a la normativa antisísmica, donde las instrucciones o normas de los años 1962, 1968, 1974, 1994, 2002 y 2007 han tenido su correspondiente mapa sísmico. De forma paralela, diversos investigadores españoles han venido realizando trabajos de tesis doctorales o estudios específicos de peligrosidad sísmica desde 1983 (Muñoz, 1983; Martín, 1983) continuando hasta la actualidad (Crespo, 2011). Estos estudios han ido abarcando, o bien toda la Península, o se han limitado a zonas sismotectónicamente más reducidas.

El Instituto Geográfico Nacional (IGN) es la sede de la Comisión Permanente (previamente Interministerial) de Normas Sismorresistentes desde su creación en 1962. Como tal ha ido impulsado y desarrollando las diferentes normativas hasta la última ya señaladas de 2002 (NCSE-02) y 2007 (NCSP-07),

ambas incluyendo el mismo mapa de peligrosidad sísmica. Por otro lado, la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico (BOE de 25 de mayo de 1995 y de 2 de octubre de 2004), señala que para la estimación de la peligrosidad sísmica se utilizarán los mapas del Instituto Geográfico Nacional en su versión más actualizada.

Siguiendo por lo tanto las obligaciones asignadas al IGN y de acuerdo también con las funciones especificadas en el Real Decreto 452/2012 (BOE de 6 de marzo de 2012), el IGN acometió en el año 2009 el proyecto de actualización del mapa de peligrosidad sísmica de España. Para ello estableció en 2010 un convenio de colaboración con la Universidad Politécnica de Madrid, a través del Grupo de investigación en Ingeniería Sísmica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía. Con objeto de asegurar un acuerdo entre los técnicos e investigadores del resto de la comunidad científica en este tema, se formó un comité de seguimiento del proyecto (CSP) en el que participaron especialistas de diferentes universidades e instituciones. El grupo de trabajo del proyecto (GT), junto con este comité, han mantenido diversas reuniones de gran interés para la toma de decisiones, lo que ha permitido un consenso notable de los resultados obtenidos.

Entre los motivos para la revisión del actual mapa de peligrosidad, el incluido en las normas sísmicas actualmente en vigor de 2002 y 2007, conviene resaltar los más importantes. En primer lugar, el estado del arte ha ido mejorando en los últimos años y se han introducido nuevas metodologías y herramientas que permiten evaluar de forma más precisa la peligrosidad y sus incertidumbres. Por otro

lado, el catálogo sísmico ha sido revisado fundamentalmente en su periodo histórico, siendo éste el que recoge los terremotos de mayor tamaño de la península, lo que debe modificar sustancialmente el catálogo de proyecto que fue usado en 2002. También, se ha estimado necesario considerar la magnitud como parámetro de tamaño, en vez de la intensidad macrosísmica utilizada en los mapas anteriores. La disponibilidad actual de una mayor y más completa base de datos de registros de aceleración permite adecuar los modelos de predicción del movimiento fuerte a las características peninsulares. Asimismo, el conocimiento geológico de la Península ha experimentado un gran avance en los últimos años y específicamente, la aportación de una base de datos de fallas activas desarrollada por diferentes grupos de investigación españoles, hacía necesario llevar a cabo una nueva zonificación. Por último, siguiendo las recomendaciones del Eurocódigo 8, se ha considerado conveniente referir la aceleración de los mapas al valor máximo en suelo tipo roca firme (tipo I), en vez de estar asociada a suelo duro (tipo II) y también establecer una coherencia entre los valores de la peligrosidad obtenidos en España y los países limítrofes, Portugal y Francia, de forma que no hubiese discontinuidades entre ellos.

El cálculo de la peligrosidad se ha efectuado siguiendo una metodología probabilista, acorde con el estado actual del arte, en la línea conocida como PSHA (del inglés, *Probabilistic Seismic Hazard Assessment*). Ésta pone especial énfasis en la consideración de distintas hipótesis sobre la información básica y propone la cuantificación de las incertidumbres asociadas: *aleatorias* y *epistemológicas*. Ambos tipos de incertidumbre se presentan en las diferentes fases de estimación de la peligrosidad: definición de zonas sismogénicas, relaciones de recurrencia, leyes de atenuación, etc. Para cuantificar y calibrar la incertidumbre epistemológica se ha formulado un árbol lógico con cinco opciones de cálculo referentes al método (zonificado y no zonificado), la zonificación sísmica, el cálculo del parámetro  $b$  en grandes regiones o en zonas individuales, el método de ajuste para la obtención de la ley de recurrencia en cada zona y la ley de atenuación o modelo de movimiento fuerte, lo que ha llevado a un conjunto de ochenta combinaciones (ramas del árbol). La incertidumbre aleatoria se ha considerado mediante el análisis de la propagación de errores y

también por medio de procesos de simulación basados en el método de Montecarlo. El valor medio ponderado de todo el conjunto de resultados se ha tomado como la mejor estimación de la peligrosidad en cada punto.

El análisis, considerando la magnitud momento como parámetro característico del tamaño de los sismos, se ha realizado introduciendo modelos de movimiento fuerte (o ecuaciones de predicción del movimiento) en términos de aceleración pico (PGA) y aceleraciones espectrales ( $SA(T)$ ), en función de la magnitud y de la distancia. Como resultado, la peligrosidad se ha expresado por medio de estos parámetros, obteniéndose mapas de PGA y SA para periodos espectrales  $T$  de 0.1, 0.2, 0.5, 1 y 2 s y para periodos de retorno de 95, 475, 975 y 2475 años. Esto supone determinar los movimientos esperados con probabilidad de excedencia del 10% en diez años y del 10%, 5% y 2% en cincuenta años, respectivamente, tal como establecen la mayor parte de las normativas relacionadas con el diseño sismorresistente de estructuras convencionales y de especial importancia.

Aunque en todos los casos el cálculo se ha hecho siguiendo una metodología probabilista, se han adoptado dos variantes dependiendo de la consideración inicial de la sismicidad, que han llevado a diferenciar dos modelos: zonificado y no zonificado. Esta variación se ha contemplado en la primera rama del árbol lógico, asociada al método propiamente dicho. En el primero, la sismicidad se considera distribuida en zonas sismogénicas, de potencial sísmico uniforme espacial y temporalmente. En el segundo, basado en técnicas de estimación no paramétrica de la densidad de probabilidad de una muestra, se prescinde del modelo de zonas y se considera la sismicidad distribuida directamente a partir del catálogo, empleando algún método de suavizado. En cualquiera de los dos casos se requieren una serie de pasos destinados a preparar los datos de entrada para el cálculo de la peligrosidad, que han marcado el desarrollo del proyecto en cuatro fases, desglosadas en capítulos sucesivos:

1. Confección del catálogo de proyecto.
2. Definición y caracterización de las fuentes sismogénicas: zonas y fallas.
3. Ecuaciones de predicción del movimiento fuerte.
4. Metodología de cálculo.

Por otra parte, asumiendo las diferentes características sismotectónicas, el marco geográfico de actuación se dividió, a su vez en dos zonas: por un lado, la zona peninsular junto con las islas Baleares, Ceuta y Melilla, y por otro lado, las islas Canarias. En este último marco geográfico, el archipiélago Canario, el estudio se ha realizado de forma independiente, adaptado a los condicionantes sismotectónicos específicos para esta región. Este estudio específico se describe en el capítulo 5.

Los resultados obtenidos en todo el territorio nacional (capítulo 6), son una serie de mapas de peligrosidad para todos los parámetros de movimiento y periodos de retorno anteriormente indicados y para emplazamientos en roca firme.

Se incluyen también varios anexos con información complementaria referente a las correlaciones obtenidas para la magnitud momento  $M_w$  (Anexo I),

la revisión de zonificaciones usadas en estudios recientes de la región (Anexo II), la descripción de las zonificaciones utilizadas en este trabajo (Anexo III) y las ecuaciones de predicción del movimiento fuerte analizadas en el estudio (Anexo IV). Asimismo se presenta una conversión del mapa correspondiente al periodo de retorno de 475 años, inicialmente expresado en términos de aceleración, a intensidad macrosísmica, con el fin de satisfacer los requerimientos de Protección Civil para la elaboración de planes especiales de emergencia ante el riesgo sísmico (Anexo V).

Por último, el Anexo VI recoge los valores de la PGA para un periodo de retorno de 475 años en todas las capitales de los términos municipales que tengan valores iguales o superiores a 0.04 g y una recomendación para su posible uso en relación con la norma sismorresistente vigente NCSE-02.



## Confección del catálogo de proyecto

Para la elaboración del *catálogo sísmico de proyecto* que servirá para la evaluación de la peligrosidad sísmica de España, se ha partido del catálogo sísmico del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

A modo de resumen, las tareas realizadas sobre el catálogo de partida han sido las siguientes:

- Estudio de la sismicidad recogida en el catálogo (zona de influencia, profundidades, parámetros de tamaño y periodo temporal, etc).
- Revisión de terremotos a partir de la información de otros catálogos y estudios específicos.
- Proceso de homogeneización. Éste ha consistido en la conversión de los diferentes parámetros de tamaño del catálogo (intensidad, magnitudes  $m_D$ ,  $m_b$ ,  $m_{bLg}$ ) a magnitud  $M_w$ , mediante la aplicación de relaciones desarrolladas en el estudio.
- Proceso de detección y eliminación de réplicas y otros agrupamientos («declustering»).
- Análisis de completitud del catálogo de proyecto.

A continuación se describen con detalle todos estos procesos.

### 1.1. Análisis de la sismicidad

Como es bien sabido, la península Ibérica (o subplaca Ibérica) se encuentra en una zona de convergencia entre las placas de África y Eurasia. Esta convergencia, con tasas de movimiento de entre 2 y 5 mm/año y con direcciones desde NO-SE

a ONO-ESE, condiciona la sismotectónica general de la zona. La zona de fractura Azores-Gibraltar representa el límite más occidental entre esas dos grandes placas, aproximadamente desde el Mioceno inferior (24 millones de años). La sismicidad define en esta zona de contacto, desde el punto triple de Azores hasta la península Ibérica, cuatro sectores geodinámicos diferentes (Buforn *et al.*, 1988; De Vicente *et al.*, 2004; De Vicente *et al.*, 2008). En el primero, cerca de Azores en la dorsal de Terceira, se localiza una zona de divergencia oceánica o extensional. Desde el extremo sur de la dorsal de Terceira hasta aproximadamente la longitud 10° O, existe una zona transformante intraoceánica (falla transformante de Gloria). Más hacia el este (banco de Gorringe), se tiene una zona de convergencia oceánica, en la que existen estructuras tectónicas activas con cierta heterogeneidad en sus orientaciones y con un régimen de esfuerzos de tipo desgarre. Por último, en las proximidades del contacto entre el margen meridional ibérico y el continente africano (Gibraltar-N de Argelia) se localiza una zona de convergencia continental, junto con una zona de extensión E-O en el mar de Alborán que implica algún tipo de proceso de subducción o de delaminación litosférica, todavía no bien conocido (Serpelloni *et al.*, 2007; Buforn y Udías, 2010; Stich *et al.*, 2010). Esta zona de contacto continental presenta por ello una mayor complejidad. Una parte importante de la convergencia entre Eurasia, Iberia y África se amortiza en el interior peninsular, dando lugar a una sismicidad que se distribuye difusamente en una banda relativamente extensa, alrededor del supuesto contacto y en la que los terremotos ocurren a distancias significativas de las zonas del límite de placas.

De este modo, la sismicidad presenta características muy diferentes a lo largo de toda la región, poniendo de manifiesto la complejidad sismotectónica mencionada. Estas diferencias se manifiestan en la profundidad, en la magnitud, en las tasas de sismicidad y en los mecanismos focales de los correspondientes terremotos. Los grandes terremotos ocurren en las zonas del golfo de Cádiz-SO de cabo San Vicente, y NO de Argelia. Terremotos de menor magnitud tienen lugar en las zonas de Pirineos, S y SE de Iberia y N de Marruecos. La gran mayoría tienen focos superficiales ( $h < 50$  km), aunque también se generan un número importante de terremotos a profundidad intermedia (50-200 km) y algunos terremotos muy profundos (600-670 km). La sismicidad intermedia se localiza principalmente en las áreas del golfo de Cádiz, banco de Gorringe, Alto Atlas y en la zona Granada-Málaga-O de Alborán. Los terremotos profundos se sitúan en la provincia de Granada —sur de Dúrcal-mar de Alborán— (Molina, 1998; Buforn y Udías, 2007).

A grandes rasgos, el mecanismo focal de los terremotos superficiales muestra fallas inversas en la zona del golfo de Cádiz y en la zona del N de Arge-

lia, fallas de desgarre en el norte de Marruecos y fallas normales en el S de España y mar de Alborán (Buforn y Udías, 2007). Igualmente, en la parte E de España (costa de Valencia, cadena Ibérica y Pirineos) las fallas normales son los mecanismos predominantes. Sin embargo, en el límite E del dominio de Alborán predominan los mecanismos de desgarre, con cierta componente inversa en algunos casos. Ello se debe a la zona de cizalla (Béticas-Alborán) que, siguiendo la costa SE, cruza el mar hasta el margen de Marruecos. Ésta zona tiene una intensa actividad sísmica (Stich *et al.*, 2010) e incluye las fallas de Carboneras, Alhama de Murcia Carrascoy y Bajo Segura.

Un esquema de la distribución de mecanismos focales predominantes y de la distribución geográfica del factor de forma del tensor de deformaciones  $K'$ , junto con las principales características tectónicas de la región (De Vicente *et al.*, 2008) se muestran en la Figura 1 (A) y (B).

Desde el punto de vista de la peligrosidad sísmica de la península Ibérica y zonas próximas, tiene una gran trascendencia la sismicidad del periodo histórico, en el cual han sucedido los terremotos más

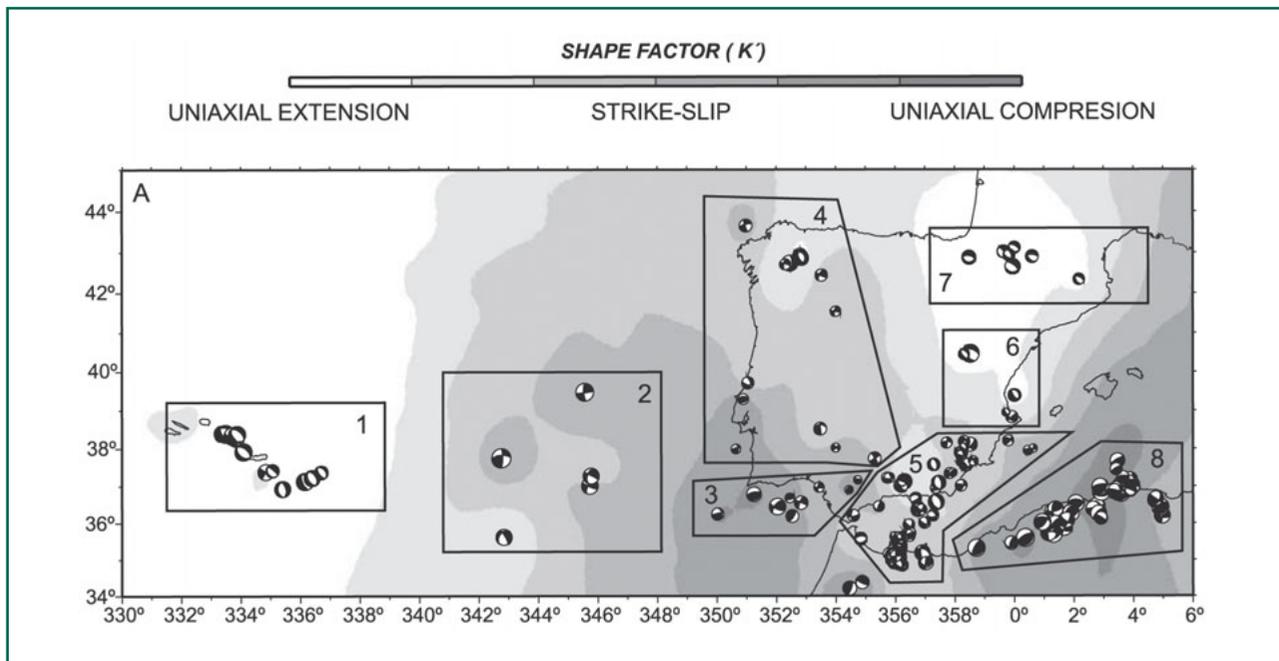


Figura 1 (A). Mecanismos focales y distribución del tipo de deformaciones (dado por el factor de forma  $K'$  escalado) para las zonas: 1-Dorsal de Terceira; 2-falla de Gloria; 3-Golfo de Cádiz; 4-Oeste de Iberia; 5-Centro y este de las Béticas, mar de Alborán y Rif; 6- Cadena Ibérica; 7- Pirineos y 8-Norte de Argelia.

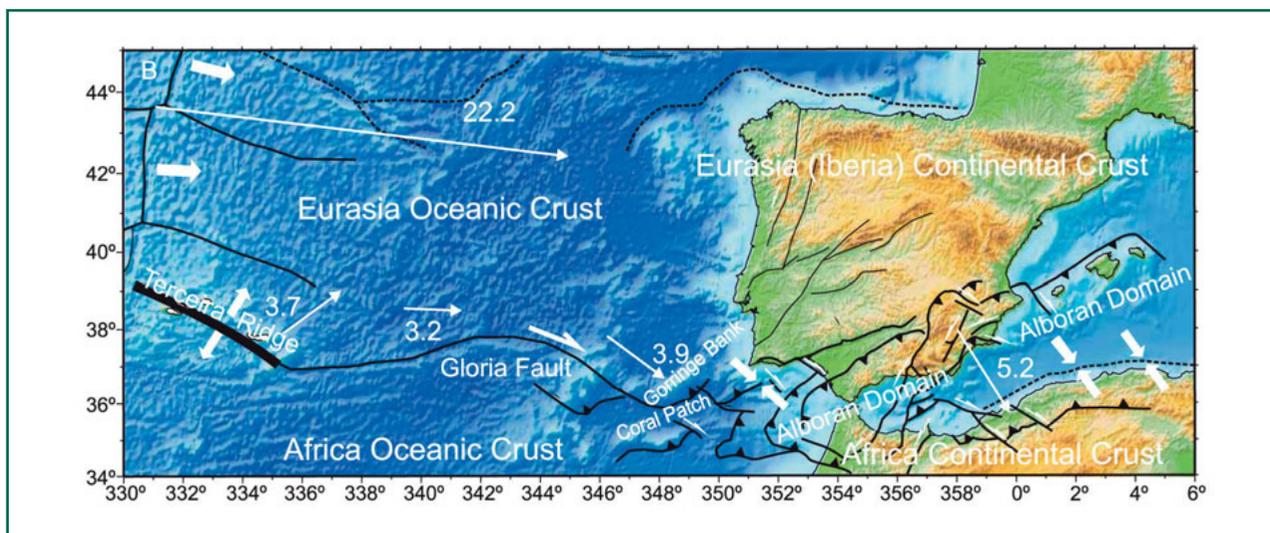


Figura 1 (B). Principales características tectónicas del límite occidental África-Eurasia. Las flechas delgadas en blanco indican velocidades locales de la placa euroasiática respecto a las de Norte América y África, según el modelo NUVEL-1A de DeMets *et al.* (1990). Adaptado de De Vicente *et al.* (2008).

destruictivos (Martínez Solares, 2003). Cabe citar entre otros: Querualbs, 1428; Carmona, 1504; Málaga, 1680; SW de cabo San Vicente, 1755; Torre vieja, 1829; Arenas del Rey, 1884, etc. Desde el comienzo de la época instrumental, se ha ido mejorando sucesivamente el nivel de detectabilidad y la precisión de la localización de los terremotos debido a los avances en instrumentación y al incremento de cobertura de las redes sísmicas. A pesar de los errores de localización asociados a la época histórica, la sismicidad instrumental se superpone bien con aquella, mostrando en general (salvo alguna excepción) que en los lugares donde ocurrieron los grandes terremotos pasados se continúa liberando energía y que el patrón de sismicidad no ha variado (Molina, 1998 y Martínez Solares, 2003). Dentro de la época pre-instrumental e instrumental, cabe mencionar entre otros terremotos de importancia, los terremotos de Benavente (Portugal), 1909; Adra, 1910; El Asnam (Argelia), 1954 y 1980; Atarfe, 1956; SW de cabo San Vicente, 1969; Triacastela, 1997; Alhucemas, 2004 y Lorca, 2011.

El catálogo del Instituto Geográfico Nacional (IGN) es la principal fuente para el estudio de la sismicidad de la región y por tanto para la evaluación de la peligrosidad sísmica, por lo que ha sido considerado como el más adecuado para constituir la información de partida.

## 1.2. Preparación preliminar del catálogo sísmico

El catálogo sísmico del IGN contiene del orden de 63.000 terremotos, desde el año 880 a.C. (primera referencia) hasta junio de 2011 (incluido), ocurridos entre los paralelos 26° N y 45° N y los meridianos 20° O y 6° E, como se muestra en la Figura 2.

Un primer filtrado de este extenso catálogo ha consistido en extraer los terremotos ocurridos dentro de la *zona de influencia* para la evaluación de la peligrosidad en la península Ibérica, Baleares, Ceuta y Melilla. Esta se ha delimitado a la zona comprendida entre las longitudes 13° O a 6° E y latitudes 34° N a 45° N, abarcando un radio de 300 km alrededor de la zona de estudio, como generalmente se establece en normativas. La confección del catálogo para la evaluación de la peligrosidad de Canarias se describe en el capítulo 5.

Además, se han filtrado aquellos terremotos en los que la profundidad hipocentral es mayor que 65 km, considerando que esos sismos no tienen influencia significativa en la peligrosidad, siendo ésta condicionada por la sismicidad más superficial. Esto significa eliminar del catálogo la sismicidad intermedia (profundidad focal entre 65 y 200 km) y la sismicidad profunda (600-670 km). Se descartan así del orden de 1.6% del total de terremotos del ca-

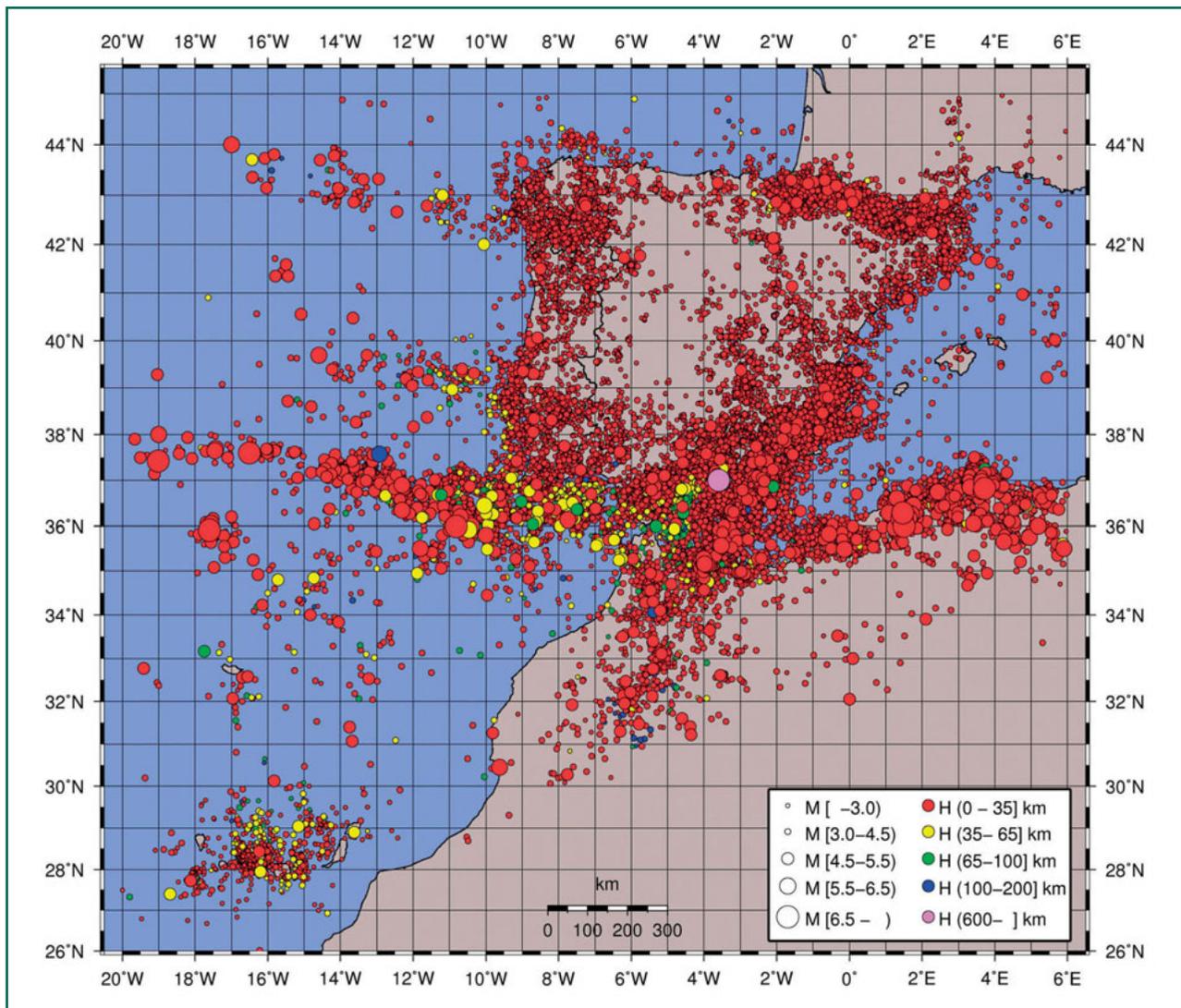


Figura 2. Representación de todos los epicentros contenidos en el catálogo sísmico del IGN hasta junio de 2011.

tálogo (aproximadamente 1.000 terremotos), de los cuales sólo cinco corresponden a terremotos profundos.

Dentro de la selección realizada, el primer terremoto finalmente tenido en cuenta corresponde al terremoto de Orihuela del año 1048, por ser éste el primero en tener una localización epicentral y una intensidad macrosísmica asignadas con una cierta fiabilidad. Tras esta primera selección, la serie temporal (hasta el 30 junio de 2011), contiene aproximadamente 56.000 terremotos. El procesado posterior del catálogo para su homogeneización ha sido realizado para este conjunto de datos.

### 1.2.1. *Periodos temporales del catálogo del IGN*

Siguiendo la exposición de Martínez Solares y Mezcua (2002), el catálogo sísmico del IGN puede dividirse en tres grandes periodos de tiempo, según el tipo de información que contiene. El primer periodo es el denominado *histórico* y comprende en principio hasta el año 1900. En este periodo, la información proviene solamente de textos que describen efectos de los terremotos, a partir de los cuales se asigna una intensidad macrosísmica al correspondiente evento. El segundo periodo es el deno-

minado *pre-instrumental* y abarcaría desde 1901 hasta 1962, año en el que se instalan las estaciones de la red sísmica global estándar (WWSSN, World-Wide Standard Seismographic Network). Este periodo comienza con la instalación de los primeros sismógrafos mecánicos en los diferentes observatorios de la época (San Fernando, Cartuja, Ebro, Fabra, Toledo, etc.). La información está dada por datos macrosísmicos y medidas instrumentales de magnitud, estas últimas más numerosas a partir de 1924. Es por esta razón que en este trabajo se ha considerado el periodo histórico extendiéndolo hasta 1923 y por tanto el periodo *pre-instrumental* desde 1924 hasta 1962. El tercer tramo temporal es el periodo denominado *instrumental*, comprendido entre 1963 y la actualidad y contiene datos instrumentales y datos macrosísmicos que los complementan. En este último periodo cabe distinguir al menos tres subdivisiones temporales en función de las fórmulas de magnitud empleadas. A continuación se resumen cada uno de estos periodos y subperiodos.

#### ***Periodo de Sismicidad histórica (periodo extendido hasta 1923)***

Para los terremotos históricos en los que el parámetro de tamaño es la intensidad, se han propuesto y aplicado distintos métodos para su conversión a magnitud. Cabe destacar, en este sentido, el estudio de Johnston (1996b) en el que se obtienen diversas relaciones entre el momento sísmico  $M_0$  y las áreas encerradas por distintas isosistas y también con el valor de la intensidad máxima,  $I_{m\acute{a}x}$ . En este caso la relación de tipo cuadrático obtenida entre  $\log(M_0)$  e  $I_{m\acute{a}x}$  tiene interés, ya que en algunos terremotos históricos este dato es el único del que se dispone.

Un método distinto fue el propuesto por Bakun y Wentworth (1997). Éste se basa en la utilización de los valores puntuales de intensidad en distintos emplazamientos para estimar la magnitud momento y también las coordenadas del epicentro. Para ello, primeramente se seleccionan un conjunto de terremotos de la zona de estudio para los que se dispone de la magnitud momento, su localización epicentral e información macrosísmica. Estos terremotos son los que se utilizan como entrenamiento y calibración del proceso. Se ajusta para ellos una relación

funcional, que expresa la intensidad observada en función de la magnitud y de la mediana de las distancias al epicentro para cada nivel de intensidad. Este método ha sido aplicado recientemente por Martínez Solares y Mezcua (2002) y Mezcua *et al.* (2004) a terremotos del catálogo del IGN. Algunos de los resultados obtenidos en estos trabajos han sido tenidos en cuenta para confeccionar el catálogo de proyecto.

#### ***Periodo pre-instrumental 1924-febrero de 1962***

Para este periodo, el catálogo sísmico actual del IGN contiene, en general, datos de intensidad macrosísmica y datos de magnitud, siendo estos más abundantes a medida que se avanza en el tiempo. Estas magnitudes corresponden a las estimadas por Mezcua y Martínez Solares (1983) en el trabajo de revisión y actualización del catálogo, en el cual se ajustaron tres fórmulas de magnitud en función de la duración del registro. Según los autores se decidió utilizar la duración por haber encontrado registros saturados y por la escasa y poco fiable información que se tenía sobre la respuesta instrumental.

Para el ajuste de las magnitudes duración,  $m_D$ , se utilizaron eventos registrados en Alicante, Toledo y Almería en el periodo 1961-1973, calibrándolas con la magnitud calculada a partir de las fórmulas obtenidas para magnitud  $m_{bLg}$ , también en Mezcua y Martínez Solares (1983). Las fórmulas de  $m_D$  se utilizaron para terremotos del periodo 1924-1962.

#### ***Periodo febrero 1962- febrero 1998***

Las fórmulas utilizadas para la magnitud en el catálogo del IGN, durante este periodo, son las de Mezcua y Martínez Solares (1983), que llamaremos en adelante  $m_{bLg}$  (MMS). Para su obtención se ajustó la magnitud en función de la razón  $A/T$  (amplitud/periodo, en general correspondiente al máximo del tren de ondas  $S$ ) y de la distancia, usando terremotos de la península Ibérica, del periodo 1962-1975, de los que se conocían las magnitudes calculadas por el USCGS. El resultado fue una expresión de dos fórmulas dependiendo de si la distancia epicentral era menor o mayor que  $3^\circ$ . Conviene indicar que la

magnitud definida correspondería a una  $m_{bLg}$ , aunque en los catálogos de esta época aparezcara denotada como  $m_b$ .

### **Periodo marzo 1998-febrero 2002**

Aproximadamente en el mes de marzo de 1998, se introduce la magnitud dada por la fórmula de Veith y Clawson (1972) para la magnitud de ondas internas  $m_b$  y es entonces cuando la expresión de Mezcua y Martínez Solares, que va a continuar utilizándose durante todo este periodo, pasa a denominarse  $m_{bLg}$ . La fórmula de ondas internas incluye un factor  $P$  de corrección de la amplitud o término de calibración, dependiente de la profundidad y de la distancia epicentral, dado en forma tabulada para distancias ( $\Delta$ ) de  $0^\circ$  a  $100^\circ$  y distintas profundidades. Estos valores se aplican para las amplitudes de la onda  $P$ , medidas pico a pico, en la componente vertical de un instrumento de corto periodo.

Es importante tener en cuenta que, durante este periodo, se calculan tanto magnitudes  $m_{bLg}$  (MMS) como  $m_b$  (VC) para la mayoría de los eventos con registros en estaciones analógicas de corto periodo. Sin embargo, sólo una de las dos magnitudes es la asignada en el catálogo del IGN para cada evento, en función del criterio de supervisión de los datos calculados.

### **Periodo marzo 2002-junio 2011**

En este periodo se mantiene la magnitud de ondas internas de Veith y Clawson,  $m_b$  (VC), aunque las medidas empiezan a realizarse en sismómetros de banda ancha, en lugar de los de corto periodo para los que se había determinado el factor de corrección  $P$ .

Por otro lado, desde el mes de marzo del año 2002 se tienen datos de magnitud  $m_{bLg}$  (L) con una nueva fórmula propuesta por C. López (aunque la fecha real de inicio de este cambio es junio de 2003, después se revisan magnitudes hacia atrás hasta un año antes, aproximadamente). La fórmula depende de la razón  $A/T$  (amplitud/periodo de la amplitud máxima de la fase  $Lg$ ) y de la distancia hipocentral. Su desarrollo completo puede ser consultado en López (2008). Esta magnitud puede considerarse una mag-

nitud local dependiente de la razón  $A/T$ , ya que por construcción ha sido calibrada con la escala de Richter para una distancia de referencia (100 km) y para un periodo de un segundo, e incluye un factor de corrección para otros periodos.

En este periodo es cuando se sistematiza la asignación de la magnitud  $m_b$  o  $m_{bLg}$ , asignando a cada evento tan sólo la magnitud más adecuada. El criterio para esta asignación es consecuencia de la observación de las distintas fases sísmicas. De forma resumida, se delimitan dos zonas de asignación según las siguientes distancias epicentro-estación y profundidades hipocentrales:

- $m_{bLg}$  (L): Para eventos corticales (prof.  $\leq 30$  km), en la zona peninsular y a distancias epicentrales menores de 200 km de la costa.
- $m_b$  (VC): Para los eventos no-corticales (prof.  $> 30$  km), situados en las zonas peninsulares y marítimas anteriores y para todos los eventos fuera de éstas (distancias epicentrales mayores de 200 km de la costa).

La idea es que en cada zona pueden determinarse y medirse con más claridad las fases correspondientes a cada definición de magnitud ( $P$ ,  $PKP$ , etc. para  $m_b$ ;  $S$ ,  $Lg$ ,  $LgX$  para  $m_{bLg}$ ). Algunos problemas se presentan cuando el epicentro del terremoto se sitúa próximo a los límites que marcan las fronteras de ambas zonas, en cuyo caso el criterio del analista y el criterio de supervisión posterior pueden llevar a distintas asignaciones, según el picado de fases que se realice. En estos casos, va a prevalecer generalmente la asignación resultante de esta supervisión.

Por último, a partir de 2002 la Red Sísmica Nacional comienza a utilizar la técnica de Dreger y Helmberger (1993) para el cálculo en tiempo casi real del tensor momento sísmico y de la magnitud momento  $M_w$ . Dicho cálculo se lleva a cabo mediante un *software* desarrollado por D. Dreger, Universidad de Berkeley, adaptado para la Red Sísmica Nacional (RSN) por Rueda y Mezcua (2005). Desde entonces se tiene una medida directa, en tiempo cuasi-real, de la magnitud  $M_w$  para los eventos más significativos.

Todas las expresiones de las fórmulas de magnitud indicadas anteriormente pueden consultarse en IGN (2012).

### 1.2.2. Filtrado de terremotos de bajas intensidades y magnitudes

Tras la elección de la zona geográfica de interés: [(13° O, 34° N)-(6° E, 45° N)] y la exclusión de terremotos con profundidad mayor que 65 km se ha realizado un filtrado de terremotos considerados potencialmente no peligrosos, eliminando los sismos por debajo de determinados umbrales de magnitud o intensidad, dependiendo del periodo, con los siguientes criterios:

- Anterior a 1962:  $I_0 < 3.5$  y  $m_D < 3.0$ .
- De 1962 a 1998:  $I_0 < 3.5$  y  $m_{bLg}$  (MMS)  $< 3.0$ .
- De 1998 a 2002:  $I_0 < 3.5$  y  $m_{bLg}$  (MMS)  $< 3.0$  y  $m_b$  (VC)  $< 4.0$ .
- De 2002 a 2011:  $I_0 < 3.5$  y  $m_{bLg}$  (L)  $< 3.0$  y  $m_b$  (VC)  $< 4.0$ .

Tras este filtrado se han revisado los eventos del periodo 1924-2010 en el que pueden encontrarse incompatibilidades entre las condiciones impuestas para los filtros por intensidad y por magnitud (por ejemplo, valores de Intensidad superiores al umbral y magnitud inferior al mínimo establecido). En estos casos se considera preferente el filtro por magnitud, eliminando así 58 terremotos más que verifican el criterio establecido aunque no cumplan el correspondiente para filtrado por intensidad.

### 1.2.3. Revisión de otros catálogos y referencias bibliográficas

A continuación se han comprobado e insertado datos complementarios y modificaciones procedentes de distintas compilaciones o estudios específicos. Éstas han consistido principalmente en:

- Inserción de magnitudes  $M_w$  (IAG) 1984-2008 (Stich *et al.*, 2003a, 2010).
- Inserción de magnitudes obtenidas por Martínez Solares y Mezcua (2002) y Mezcua *et al.* (2004) mediante el método de Bakun y Wentworth (1997), para terremotos históricos y preinstrumentales.
- Revisión e inserción de intensidades de terremotos de Cataluña (Susagna y Goula, 1999).

- Terremotos 15/3/1964, 5/5/1969, 6/9/1969, 14/8/1978 (ISC, NEIC, CSEM, catálogo IAG).
- Revisión de terremotos del norte de África, catálogos de Marruecos y Argelia (Peláez *et al.*, 2007; Hamdache *et al.*, 2010).
- Revisión de otros terremotos en ficheros del ISC, NEIC; Sisfrance.
- Revisión de terremotos con información de trabajos específicos:
  - Terremotos catalanes, siglos XIV y XV (Olivera *et al.*, 2006).
  - Terremoto de Lisboa de 1755 (Martínez Solares y López Arroyo, 2001; Johnston, 1996c).
  - Terremoto de Argel de 1856 (Harbi *et al.*, 2010).
  - Terremoto de Benavente (Portugal) de 1909 (Stich *et al.*, 2005).
  - Terremoto de Adra de 1910 (Stich *et al.*, 2003b).
  - Terremoto de Montilla de 1930 (Batlló *et al.*, 2010).
  - Terremotos de Jaén de 1951 (Batlló *et al.*, 2008).
  - Terremoto de 15/3/1964 (Udías y López Arroyo, 1970; Pondrelli *et al.*, 1999).
  - Terremoto del 28/2/1969 (López Arroyo y Udías, 1972; Fukao, 1973).

Todas las referencias consultadas y utilizadas con este fin (véase apartado de referencias bibliográficas), llevan una etiqueta asignada que a su vez consta en el fichero del catálogo.

Las últimas revisiones han sido realizadas en las últimas fases del proyecto, como consecuencia de las reuniones mantenidas con los expertos de la Comisión de Seguimiento del Proyecto (A. Bernal y J. A. Peláez) y tras algunos análisis preliminares de los parámetros de sismicidad de ciertas zonas sísmogenéticas. Estas revisiones incluyeron:

- Terremoto de 1356 del SW de cabo San Vicente: análisis individualizado de la atenuación y estimación de  $M_w$  (López Casado *et al.*, 2000; Martínez Solares y López Arroyo, 2004).
- Ciertos terremotos históricos anteriores a 1900, cuya magnitud fue obtenida por el método de Bakun y Wenworth (Martínez Solares y Mezcua, 2002; Mezcua *et al.*, 2004) en los que se ha considerado que puede existir informa-

ción dudosa, o bien tener valores de intensidad no suficientemente bien distribuidos. Entre estos están los terremotos de 1431 S de Granada, 1722 Tavira, 1804 mar de Alborán, 1817 Arnedillo, 1841 Huelva y 1883 Ceutí, en los cuales se modificó la localización epicentral, la magnitud resultante o ambas.

- Terremotos históricos del siglo xx, revisados en trabajos de A. Bernal (experto de la Comisión de Seguimiento) como por ejemplo los de Torres de Cotillas y Lorquí, 1911; Santa Fe, 1911 y Martes, 1923 a los que se ha rebajado la intensidad.
- Otros terremotos del siglo xx: Torre de la Ribera, 1907, localizado por error un grado hacia el Oeste (corregido) y Reocín, 1965, considerado un terremoto falso (eliminado).

#### 1.2.4. Terremotos con epicentro en el mar

Se ha llevado a cabo un tratamiento por separado de los terremotos históricos y preinstrumentales con epicentro marino, en los que sólo se dispone del valor de intensidad sentida en poblaciones próximas a la costa.

El tratamiento de este tipo de datos no es un tema bien resuelto en los estudios de sismicidad y peligrosidad, dados los errores que pueden comete-

erse en las localizaciones de los epicentros. Por ello, se ha efectuado un tratamiento previo de estos eventos, que ha consistido en:

- Seleccionar los terremotos con epicentros situados en el mar a una distancia mayor de 15 km de la costa.
- Eliminar directamente los terremotos considerados como réplicas.

Para la estimación de  $M_w$  de estos terremotos se ha aplicado una corrección a la intensidad máxima sentida por rangos de distancia. Esta corrección se basa en una discretización de las leyes de atenuación de la intensidad de López Casado *et al.* (2000) y se aplica a las distancias más próximas a la costa de cada uno de los epicentros, con el fin de tener una estimación de la intensidad epicentral lo más aproximada posible (Figura 3). Finalmente, la  $M_w$  se obtiene partir de la fórmula de conversión obtenida para  $I_0$ .

El total de terremotos calculados utilizando este procedimiento es de 77 (46 de la parte histórica y 31 de la parte pre-instrumental). En la Figura 4 se muestran las zonas de aplicación de las leyes de atenuación de la intensidad de López Casado *et al.* (2000), la localización de los terremotos marinos y las distancias (isolíneas) de los epicentros a la costa.

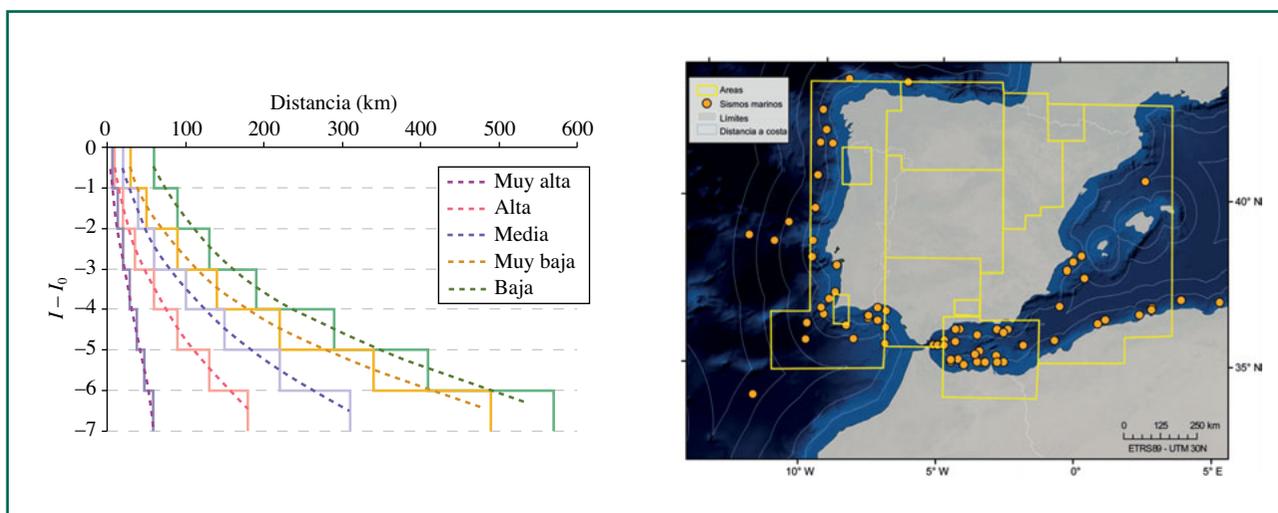


Figura 3. Correcciones por distancia aplicadas a los terremotos con epicentro marinos basada en las leyes de atenuación de la intensidad (izquierda) y zonas de aplicabilidad de dichas leyes (derecha), de acuerdo con de López Casado *et al.*, 2000.

En la Figura 4 se muestra un mapa con las intensidades epicentrales asignadas a los terremotos marinos después de aplicar la corrección por distancia.

### 1.3. Homogeneización de los parámetros de tamaño

Para tener una medida homogénea del tamaño de los terremotos se ha decidido utilizar la magnitud momento  $M_w$  (Hanks y Kanamori, 1979), como parámetro único de tamaño en el catálogo. La ventaja de esta escala de magnitud es que no está saturada para grandes terremotos y además tiene una relación directa con la física de la fuente, al derivar del momento sísmico escalar  $M_0$ . Para ello se han realizado distintos ajustes de regresión entre la magnitud  $M_w$  y los distintos parámetros de tamaño que constan en el catálogo del IGN, con el objetivo final de poder convertir cada parámetro de tamaño del catálogo a esta magnitud.

#### 1.3.1. Datos utilizados para las relaciones con $M_w$

Para poder mejorar la información de partida contenida en el catálogo del IGN, se ha decidido completar éste con las magnitudes  $M_w$  (IAG) estimadas por Stich *et al.* (2003a) y Stich *et al.* (2010) en el Instituto Andaluz de Geofísica (IAG). Estas magnitudes abarcan la zona de estudio y un periodo de tiempo más amplio (desde 1984 hasta 2008), que el de las  $M_w$  calculadas por el IGN (sólo disponibles desde 2002). Además han sido calculadas mediante técnicas de inversión del tensor momento sísmico.

Un análisis preliminar de estos datos permitió comprobar que existe una buena correlación lineal entre ambas estimaciones de magnitud, con una pendiente muy próxima a la unidad y que el valor promedio de las diferencias de valores entre  $M_w$  (IGN) y  $M_w$  (IAG) es  $-0.01 \pm 0.13$  unidades de magnitud. Estos resultados permiten asegurar una equivalencia entre ambos tipos de magnitud  $M_w$ , por lo que finalmente se ha considerado como un

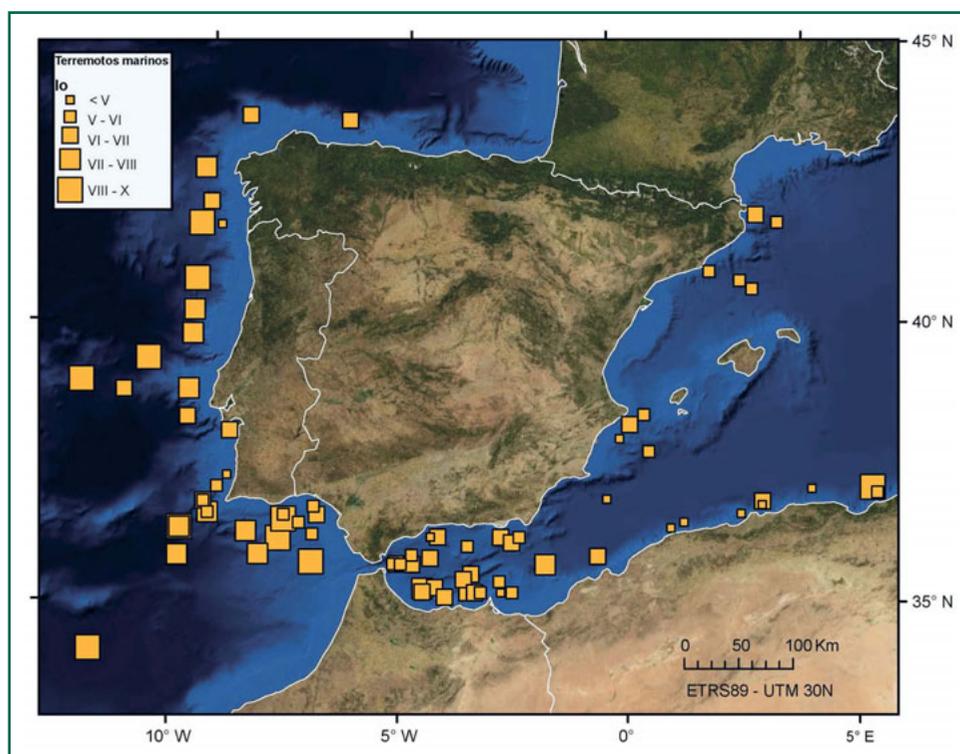


Figura 4. Mapa con los terremotos marinos analizados y la intensidad epicentral asignada.

conjunto de datos homogéneo para estimar las fórmulas de conversión a  $M_w$ , a partir de los otros parámetros de tamaño. En el ajuste de esas fórmulas los valores de  $M_w$  utilizados han sido:

- $M_w$  (IAG) en el periodo 1984-2002.
- El valor promedio de  $M_w$  (IGN) y  $M_w$  (IAG) si ambas existen, o bien  $M_w$  (IGN) o  $M_w$  (IAG) si solamente se tiene una de ellas, en el periodo 2002-2011.

Además de los datos anteriores, para los ajustes  $M_w$  vs  $I_0$  y  $M_w$  vs  $m_{bLg}$  (MMS), se han utilizado también otros valores de  $M_w$  (anteriores a 1984) obtenidos de diversos estudios específicos. Estos datos se detallan en los apartados correspondientes.

El análisis de las relaciones  $M_w - m_b$  y  $M_w - m_{bLg}$ , lleva implícito un cierto análisis por zonas geográficas del tipo del propuesto por Gaspar-Escribano *et al.* (2008). Los datos de  $m_{bLg}$  (MMS) constituyen la distribución más extendida, ya que esta fórmula era única durante su periodo de utilización y teóricamente aplicable a todo el rango de distancias considerado, mediante su fórmula de dos expresiones en función de la distancia epicentral. Las  $m_b$  (VC) caracterizan, fundamentalmente, los terremotos considerados lejanos de la zona de Azores-Gibraltar, parte del mar de Alborán y norte de África, donde el recorrido oceánico hace que la fase  $Lg$  sea difícil de determinar (*blockage* de la  $Lg$ ). También caracteriza terremotos de profundidades mayores que las corticales (hasta aproximadamente 30 km). Los datos con magnitudes  $m_{bLg}$  (L) corresponden en general a epicentros peninsulares y marítimos próximos. Aunque la limitación establecida por el IGN considera eventos con magnitudes  $m_{bLg}$  (L) asignadas hasta aproximadamente 200 km de las costas, en el conjunto de datos finalmente analizado en este estudio, se filtraron los datos situados más allá de, aproximadamente, 100 km de las costas.

### 1.3.2. Deducción de correlaciones con $M_w$

En los estudios de peligrosidad, con el fin de homogeneizar los catálogos sísmicos, la regresión lineal estándar (de mínimos cuadrados) ha sido el método más utilizado para obtener fórmulas de conversión entre magnitudes. Sin embargo, como argu-

mentan Castellaro *et al.* (2006) y Castellaro y Bormann (2007) la aplicación del método implica que el error en la variable independiente sea despreciable frente al de la variable dependiente, lo que no ocurre en el caso de las magnitudes, ya que ambas variables están afectadas por errores similares, introduciéndose entonces un error sistemático en las fórmulas de conversión. Es por ello que estos autores proponen utilizar un método de regresión ortogonal generalizada que tenga en cuenta los errores en las dos variables. Esto supone un tratamiento simétrico de las variables que intervienen en la regresión, en lugar de asimétrico como ocurre en el método de ajuste por mínimos cuadrados estándar. Entre los diferentes esquemas de regresión con un tratamiento simétrico de las variables se encuentran, entre otros, la regresión ortogonal generalizada (citada anteriormente), la regresión de la bisección y la regresión RMA (regresión de «eje mayor reducido»). Isobe *et al.* (1990) realizan un análisis de cinco diferentes esquemas de regresión lineal y proponen fórmulas analíticas para la obtención de los parámetros del ajuste y de sus incertidumbres. Éstos consideran el método de la bisección y el método RMA como los más adecuados, si bien critican que en este último la pendiente estimada es independiente del coeficiente de correlación entre  $x$  e  $y$  (excepto del signo) y sólo depende de la dispersión de los datos. Otros autores, sin embargo, alegan que la correlación da una medida de lo adecuado de la relación lineal y que por tanto el valor de la pendiente debería ser independiente de ésta.

Los análisis de regresión realizados han consistido, para cada uno de los subconjuntos de datos,  $M_w - I_0$ ;  $M_w - m_{bLg}$  (MMS);  $M_w - m_b$  (VC) y  $M_w - m_{bLg}$  (L), en un ajuste a una recta mediante una regresión RMA-«eje mayor reducido». En la regresión RMA se trata de ajustar la recta que minimiza la suma de los productos de los residuos vertical y horizontal de cada punto a la línea, es decir, se minimiza la suma de las áreas (salvo un factor 2), de los triángulos rectos formados en cada punto con la recta. Este método de regresión resulta adecuado cuando:

- Las variables  $x$  e  $y$  presentan errores de medida o una variabilidad equiparables, ya que en ese caso el ajuste por mínimos cuadrados ordinario parece subestimar la pendiente.

- Lo que se busca es la relación estructural entre ambas variables.
- La relación entre ambas variables es de carácter simétrico, se hace difícil decidir cual considerar como respuesta, esto es, cual es la variable dependiente y cual la independiente.

Las fórmulas inicialmente utilizadas para el cálculo de los parámetros de las rectas de regresión y sus errores están extraídas de Isobe *et al.* (1990). Después, con el fin de incluir en los ajustes de regresión las incertidumbres asignadas a los parámetro de tamaño y al mismo tiempo, obtener de forma empírica la covarianza de los parámetros  $a$  y  $b$  de las rectas (sin expresión analítica), se ha aplicado el método de Montecarlo (MMC). Los parámetros finales de los ajustes y sus incertidumbres son resultado de este proceso para el que se desarrolló un software específico.

La primera ecuación obtenida es la que correlaciona el valor de  $I_0$ , que representa la intensidad máxima en la zona epicentral y  $M_w$ , que es una variable para la que se tienen datos desde 1984 hasta 2011. El conjunto de datos consta de 99 puntos con un rango de  $I_0$  entre III y IX-X.

Para la correlación entre  $M_w$  y  $m_{bLg}$  (MMS), los datos de magnitud  $M_w$  cubren el periodo 1984-2002 y proceden del IAG pues entonces el IGN no proporcionaba estos datos. A éste conjunto se añadieron otros terremotos anteriores, cuyas magnitudes  $M_w$  fueron obtenidas de algunos estudios específicos. El conjunto así obtenido para el análisis de regresión tiene 56 puntos en total, con rangos para magnitud  $m_{bLg}$  (MMS) entre 3.1 y 7.3.

El conjunto de terremotos utilizado para la relación  $M_w - m_b$  (VC) contiene un total de 98 datos correspondientes al periodo 1998-2011. Incluye por tanto magnitudes  $M_w$  (IGN) y  $M_w$  (IAG). Los datos de magnitud  $m_b$  se sitúan en el rango de 3.7 a 6.3. Los datos se sitúan generalmente por debajo de la diagonal, lo que indicaría una sobrevaloración de los valores de  $m_b$  respecto a los de  $M_w$ .

Para la relación  $M_w - m_{bLg}$  (L) se utilizan un total de 89 terremotos para los ajustes de regresión, los cuales pertenecen al periodo 2002-2011 y disponen de magnitudes  $M_w$  (IGN) y/o  $M_w$  (IAG). El rango de magnitudes  $m_{bLg}$  (L) va desde 3.0 a 5.4. Los datos fueron restringidos a aquellos epicentros a una distancia menor de 100 km de las costas, con el fin de garantizar un mínimo bloqueo de la fase  $Lg$ .

Las correlaciones obtenidas en estos ajustes y los errores asociados a sus parámetros se resumen en la Tabla 1.

En la Figura 5 se muestra gráficamente la correlación realizada para la intensidad máxima y un diagrama de la distribución temporal del número de terremotos utilizados en la misma.

En la Figura 6 se muestran las correlaciones realizadas para las distintas magnitudes junto con los histogramas de diferencias de cada magnitud respecto a  $M_w$ . Los valores promedio de estas diferencias son de  $0.18 \pm 0.25$  y  $0.03 \pm 0.26$  para las magnitudes  $m_{bLg}$  (MMS) y  $m_{bLg}$  (L), respectivamente, mientras que para  $m_b$  (VC) muestran un desplazamiento hacia valores negativos, con un valor promedio de  $-0.50 \pm 0.35$  unidades de magnitud, lo que indicaría que esta magnitud puede estar sobreestimada respecto a  $M_w$ .

TABLA 1  
Correlaciones obtenidas (regresiones RMA)

$y = a + bx$	$\sigma_a$	$\sigma_b$	$\sigma_{ab}$	Rango de aplicación
$M_w = 1.656 + 0.545 I_{\text{máx}}$ [1]	0.144	0.030	-0.0001	III-(IX-X)
$M_w = 0.290 + 0.973 m_{bLg}$ (MMS) [2]	0.208	0.049	-0.0005	3.1-7.3
$M_w = -1.528 + 1.213 m_b$ (VC) [3]	0.385	0.077	-0.0001	3.7-6.3
$M_w = 0.676 + 0.836 m_{bLg}$ (L) [4]	0.202	0.052	-0.0001	3.0-5.1

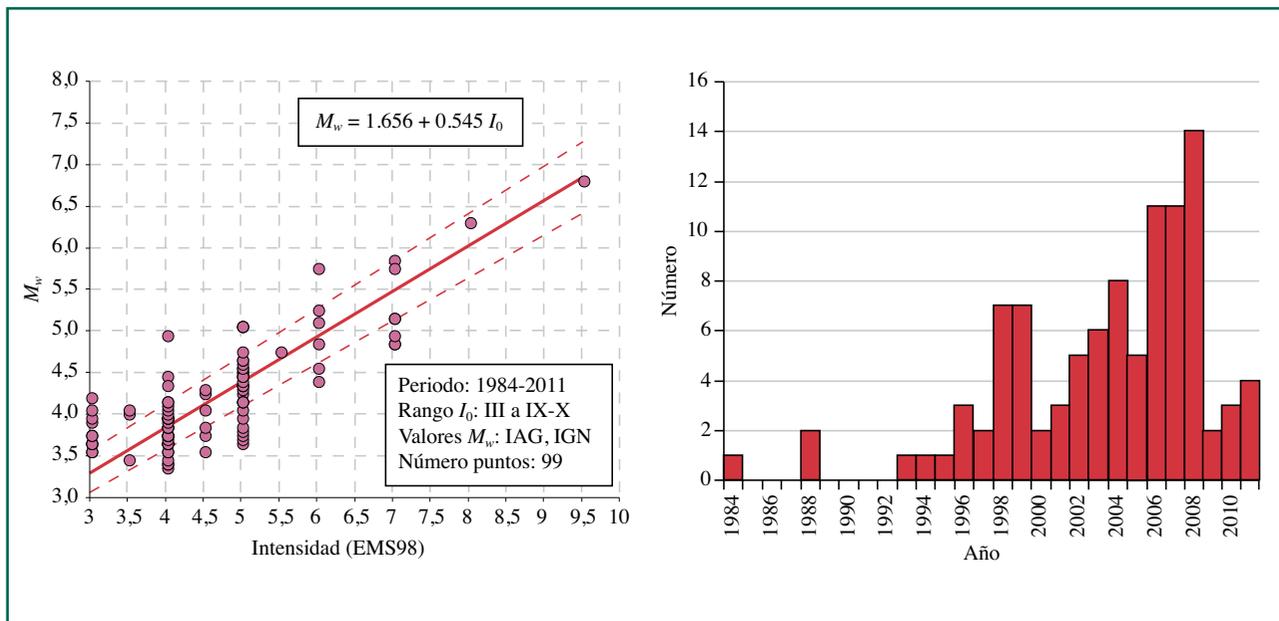


Figura 5. Correlación entre  $M_w$  y la intensidad máxima en la zona epicentral (izquierda) y distribución temporal de los terremotos con datos  $M_w$  e  $I_0$  (derecha).

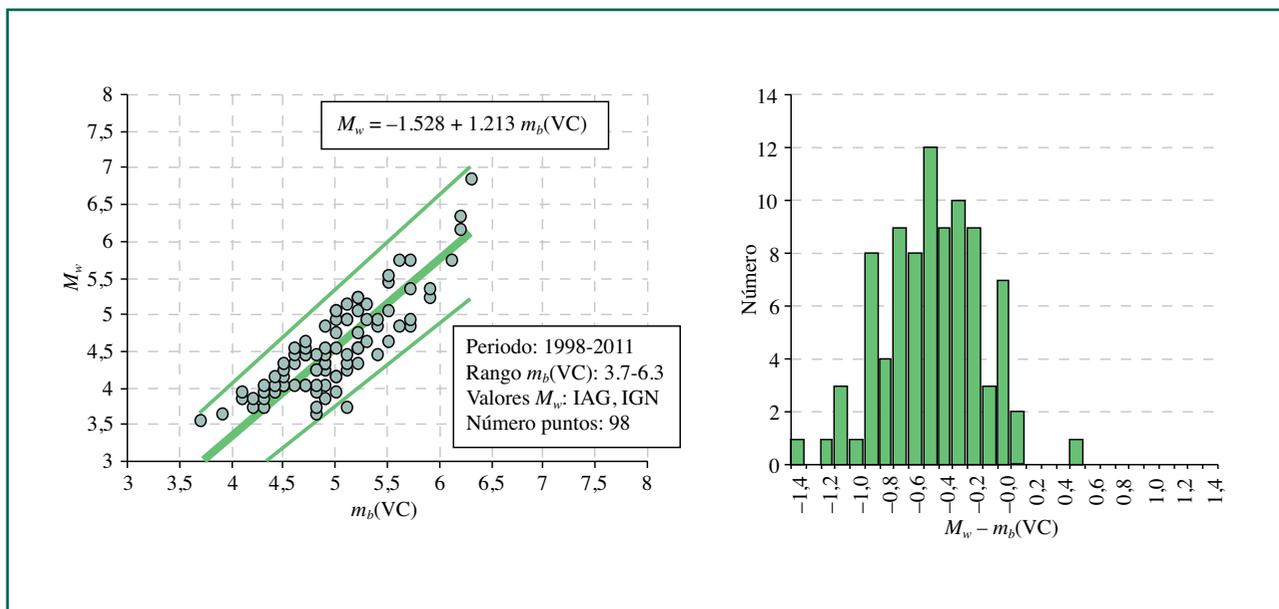


Figura 6. Correlaciones entre  $M_w$  y los distintos tipos de magnitud utilizados en el catálogo (izquierda) e histogramas de las diferencias ( $M_w - m_{bx}$ ) para cada una de las magnitudes (derecha).

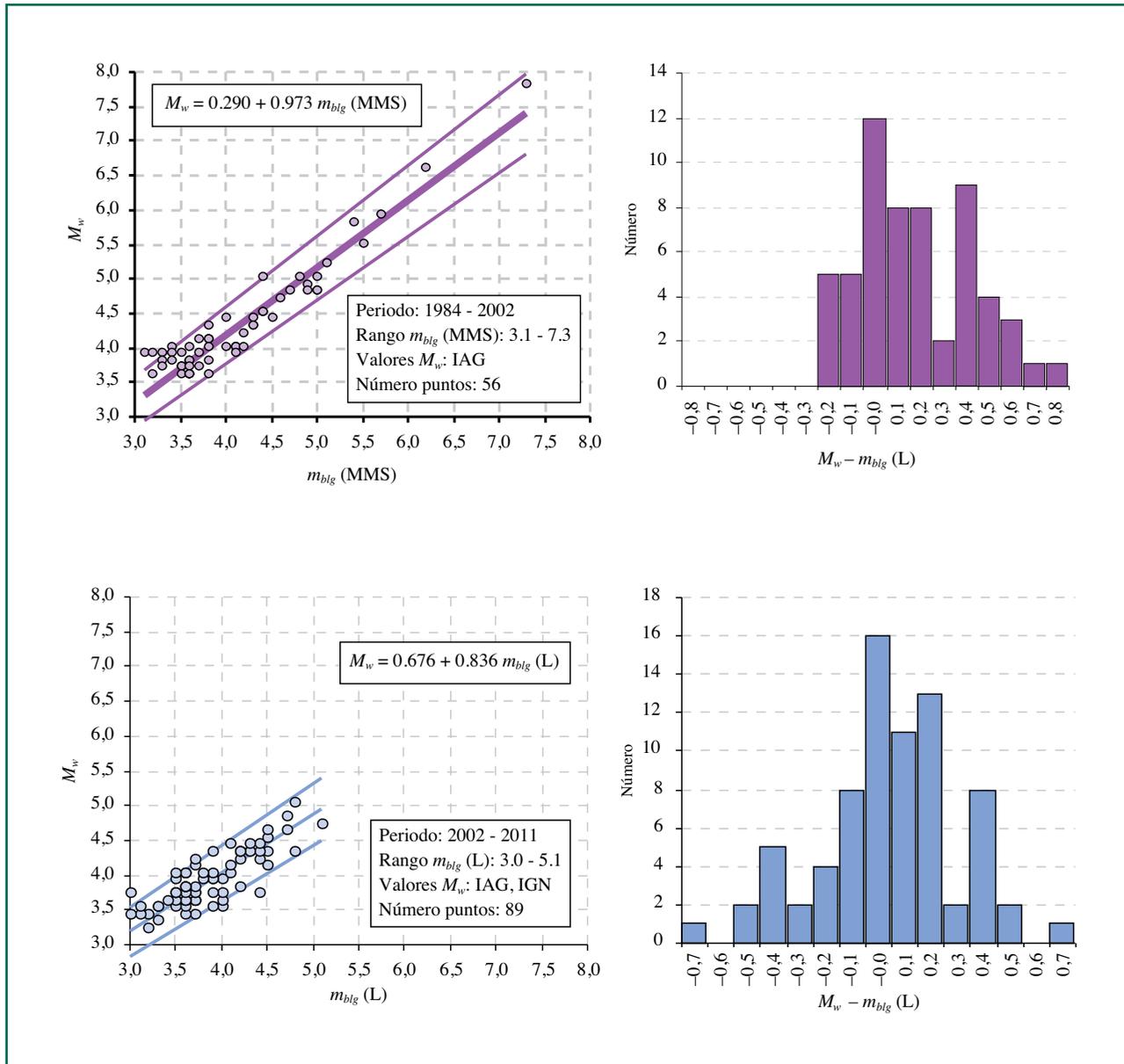


Figura 6 (continuación). Correlaciones entre  $M_w$  y los distintos tipos de magnitud utilizados en el catálogo (izquierda) e histogramas de las diferencias ( $M_w - m_{blg}$ ) para cada una de las magnitudes (derecha).

En el Anexo I se incluye una comparación entre las correlaciones obtenidas en este estudio y otras pro-

puestas en la literatura por diversos autores y usadas comúnmente en aplicaciones en la península Ibérica.

### 1.3.3. Preparación y homogeneización del catálogo

#### **Catálogo obtenido: conversión a $M_w$ e incertidumbres**

Las fórmulas de transformación a  $M_w$  finalmente aplicadas en cada periodo del catálogo son las desarrolladas en este trabajo y mostradas en la Tabla 1.

En la aplicación de esas fórmulas, cuando se ha dado el caso de coexistir varios parámetros de tamaño, se ha considerado solamente uno para realizar la conversión a  $M_w$ . En general, se ha preferido utilizar la magnitud frente a la intensidad y en el caso de magnitudes  $m_b$  y  $m_{bLg}$  se ha optado por aplicar la conversión a la designada como preferida (o más adecuada), de acuerdo con lo anteriormente descrito.

En lo referente a terremotos históricos se han mantenido los datos de magnitud obtenidos por Martínez Solares y Mezcua (2002) y Mezcua *et al.* (2004) mediante el método de Bakun y Wentworth (salvo las revisiones finales realizadas), equiparándolas a magnitud  $M_w$ . En el caso de la magnitud duración,  $m_D$ , (del periodo preinstrumental) no contemplada específicamente en estas relaciones por falta de datos, se ha decidido utilizar también la ex-

presión obtenida para  $m_{bLg}$  (MMS). La justificación se basa en que estas  $m_D$  fueron inicialmente calibradas con datos de  $m_{bLg}$  (MMS). Para las  $M_w$  obtenidas directamente,  $M_w$  (IGN) y  $M_w$  (IAG), se ha optado por mantener en el catálogo la primera cuando existen ambas y la segunda cuando solamente existe ésta.

Por otra parte, dado que no se dispone de incertidumbres de los datos originales de intensidad o magnitud para todos los terremotos considerados, se ha llevado a cabo una asignación de experto de las mismas, dependiente del tipo de parámetros de tamaño utilizados y también de su época (véase Tabla 2). A partir de éstas y mediante la aplicación de la fórmula de propagación de errores se ha estimado la incertidumbre de  $M_w$ . De esta forma la  $M_w$  final asignada a los registros del catálogo lleva consigo una incertidumbre, asociada a la incertidumbre propia del parámetro de entrada y a la incertidumbre de los parámetros de la correlación, aplicada para su transformación.

El catálogo final obtenido hasta este punto, consta de 10.350 terremotos.

En las Tablas 3 y 4 se muestran el número de datos de este catálogo, por parámetro de procedencia y por periodos temporales, respectivamente.

TABLA 2  
*Incertidumbres asignadas a las observaciones originales*

Parámetro origen	Incertidumbre asignada
$I_0$ -IGN (parámetro de calidad A,B,C)	$\sigma = 0.5$ (A); $\sigma = 1.0$ (B); $\sigma = 1.5$ (C)
$I_0$ marinos -IGN	Mayorada la intensidad sentida en 0.5 unidades
$I_0$ -IGC (parámetro de calidad 1 o 2)	$\sigma = 0.5$ (1); $\sigma = 1.0$ (2)
$m_D$ -(estimada en MMS83)	$\sigma = 0.4$
$m_{bLg}$ (MMS)	$\sigma = 0.3$ (<1985); $\sigma = 0.2$ (>1985)
$m_b$ (VC)	$\sigma = 0.2$
$m_{bLg}$ (L)	$\sigma = 0.2$
$M_w$ (IGN)	$\sigma = 0.1$
$M_w$ (IAG)	$\sigma = 0.1$
$M_w$ estudios específicos	$\sigma = 0.3$ (<1985); $\sigma = 0.2$ (>1985); $\sigma = 0.1$ (>2002)

TABLA 3  
Número de eventos desglosados por el parámetro de procedencia para la conversión a  $M_w$  final

Tipo	Origen	Número de terremotos
I (EMS)	IGN /IGC	2.503
I marinos	IGN	75
$m_D$	IGN	566
$m_{bLg}$ - MMS	IGN	5.217
$m_b$ - VC	IGN	1.213
$m_{bLg}$ - L	IGN	454
$M_w$	IGN/IAG/ISC/ Estudios específicos	322
<b>Total</b>		<b>10.350</b>

TABLA 4  
Número de datos del catálogo

Periodo	Número de terremotos
Histórico (hasta 1923)	1.717
1924-1962 (hasta 11/2)	1.392
1962-1998 (hasta 24/2)	5.042
1998-2002 (hasta 27/2)	481
2002-2011 (hasta 30/6)	1.718
<b>Total</b>	<b>10.350</b>

En la Figura 7 se muestra un mapa con el catálogo obtenido en magnitudes  $M_w$  convertidas.

#### 1.4. Eliminación de réplicas, premonitores y otros agrupamientos

Los modelos de sismicidad independientes del tiempo están basados en que la probabilidad de ocurrencia de terremotos en un periodo de tiempo dado sigue una distribución de Poisson. El establecimiento de estos modelos requiere un catálogo de sismos independientes, de manera que a partir del

conocimiento de los periodos de recurrencia medios de los mismos (o frecuencias medias de ocurrencia), puedan estimarse, sin errores sistemáticos, las tasas promedio de actividad de terremotos. Para obtener un catálogo de esas características es preciso identificar y eliminar la sismicidad dependiente del tiempo (*declustering*), es decir réplicas, premonitores y enjambres.

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. Los algoritmos más utilizados para llevar a cabo este proceso de identificación y eliminación de agrupamientos son los propuestos por Gardner y Knopoff (1974) y por Reasenberg (1985).

En el método de Gardner y Knopoff se fijan ventanas de extensión temporal y espacial de una secuencia de réplicas, en función de la magnitud del terremoto principal. Todos los terremotos subsiguientes y suficientemente próximos, que caen dentro de ambas ventanas se identifican como réplicas.

Aunque se realizaron algunas pruebas con el método de Reasenberg variando algunos de los valores de los parámetros, finalmente se ha optado por el método de Gardner y Knopoff, dada su mayor sencillez y claridad.

La definición de cada una de estas ventanas está dada por dos funciones logarítmicas, una de duración y otra de extensión espacial de los agrupamientos, en función de la magnitud y dependientes del logaritmo de la distancia espacial o temporal:

$$\log(L) = a_1 M + b_1 \quad [5]$$

$$\log(T) = a_2 M + b_2 \quad [6]$$

Donde  $L$  es la distancia espacial,  $T$  es la distancia temporal,  $M$  es la magnitud del terremoto principal (en este estudio se considerará  $M_w$ ) y  $a_1, a_2, b_1,$  y  $b_2$  son constantes numéricas. En el mismo trabajo, Gardner y Knopoff proponen ventanas espacio-temporales, construidas previamente a partir de los análisis de réplicas (clusters, en general) de catálogos concretos. Estas ventanas son consideradas como un límite superior mínimo o envolvente, bajo las cuales puede garantizarse la pertenencia de un evento a la secuencia o agrupamiento correspondiente. En el caso de la curva aplicada a las ventanas temporales, Gardner y Knopoff (1974) proponen utilizar dos pendientes distintas, siendo la pendiente a partir de

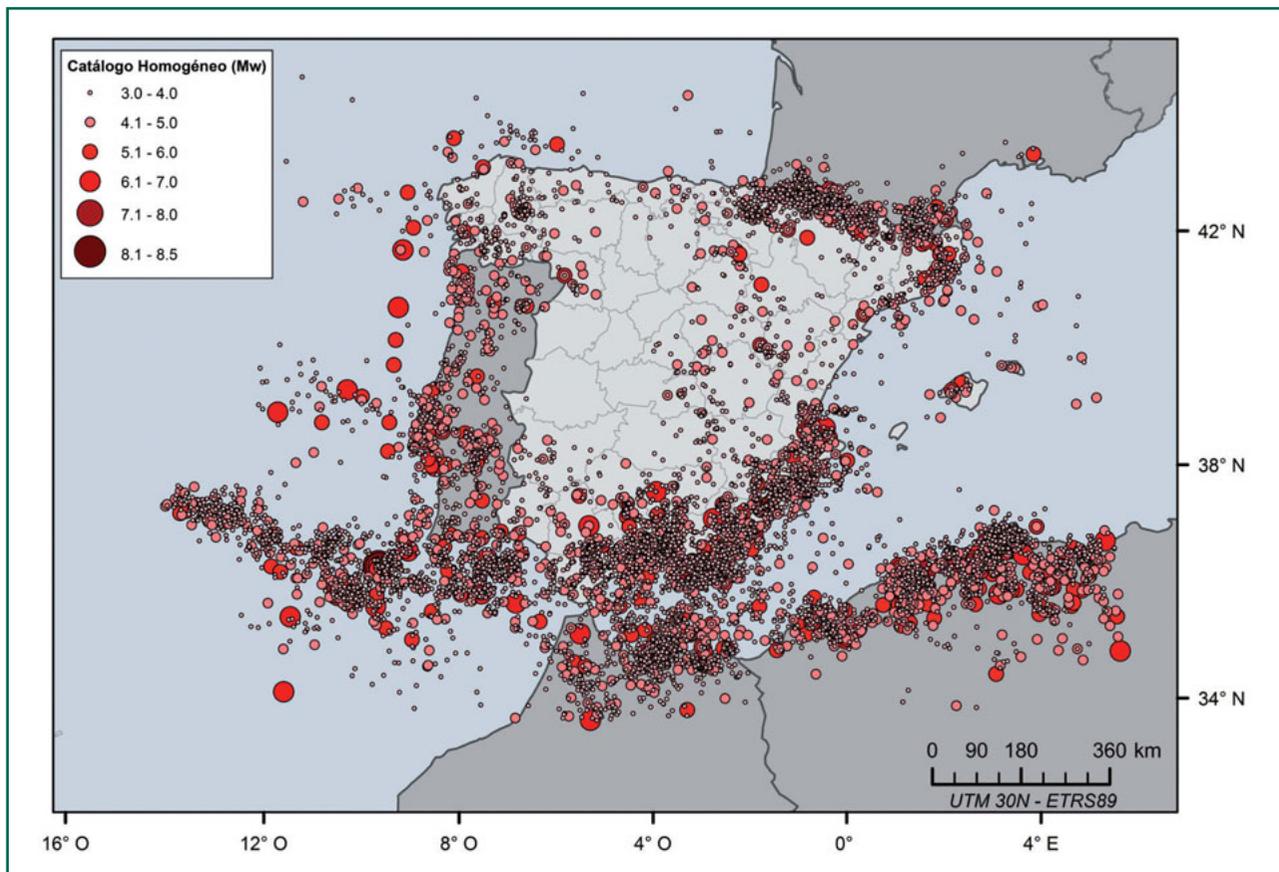


Figura 7. Catálogo homogéneo ( $M_w$ ).

magnitud 6.4 mucho menor que para las magnitudes menores. No es posible contrastar dicho cambio de pendiente con datos reales por falta de registros de esas magnitudes en España. Por ello, se considerará la pendiente propuesta.

Estas ventanas espacio-temporales han sido ajustadas a  $M_w$  para el N de África por Peláez *et al.* (2007), fijando valores para magnitudes  $M_w$  3.0 y 8.0 y considerando una casi equivalencia entre la magnitud utilizada por Gardner y Knopoff y la magnitud  $M_w$ . Crespo (2011) haciendo referencia a los anteriores, considera las ventanas espacio-temporales propuestas por Peláez *et al.* (2007) para aplicarlas a la península Ibérica. En este trabajo se han analizado dichas ventanas y se ha calibrado el límite inferior de las mismas con series españolas (a partir del año 2002), con terremotos principales de  $M_w$  próxima a 3.0. Los resultados obtenidos bajan los límites para la ventana espacial de esa magnitud,

a una distancia de 10 o 12 km, en lugar de 20 km como proponen Peláez *et al.* (2007) para el norte de África. Las curvas obtenidas tras esta calibración se muestran en la Figura 8.

Teniendo en cuenta que el método de depuración del catálogo considera diferentes ventanas espacio-temporales en función de la magnitud y que la magnitud  $M_w$  del catálogo de proyecto lleva asociada una incertidumbre  $\sigma$ , la catalogación final de un terremoto como el evento principal de una serie depende de dicha incertidumbre  $\sigma$ . Para considerar esta cuestión se ha diseñado un procedimiento basado en el método de Montecarlo, en el que a cada catálogo generado se le aplica un algoritmo de identificación de réplicas:

- Se considera que la magnitud de cada evento tiene asociada una incertidumbre que responde a una distribución de forma triangular, cuya

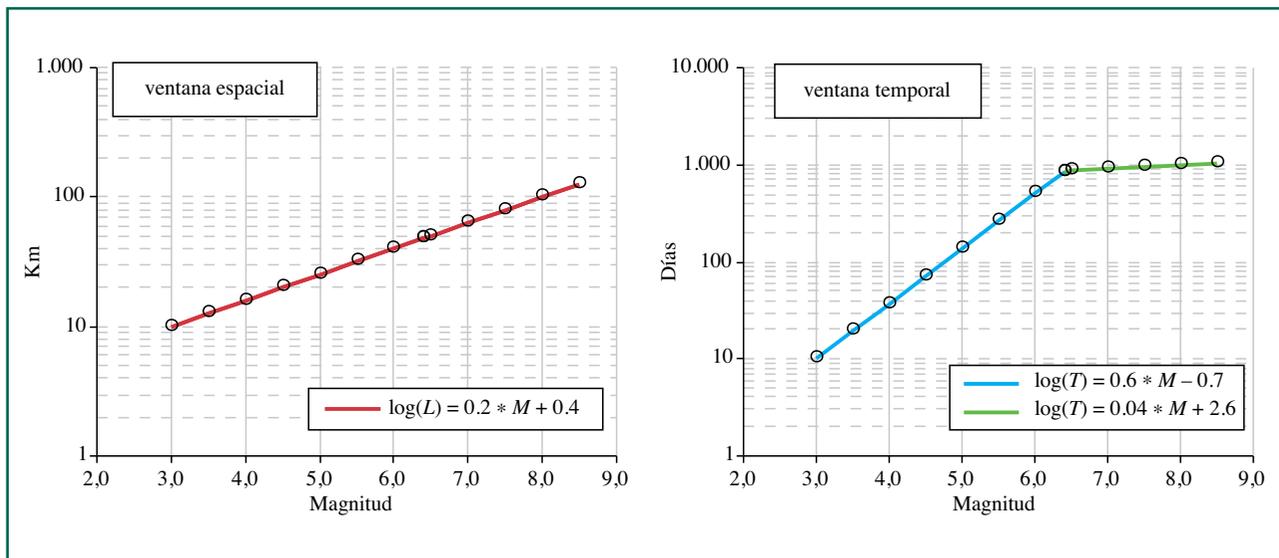


Figura 8. Ventanas espacial y temporal aplicadas en el estudio.

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.
- Para cada uno de estos catálogos se aplica un algoritmo de identificación de sismos 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* (Ligorria y Lindholm), 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 implementar todo el proceso de depuración del catálogo se ha desarrollado un programa interfaz que permite introducir como variables: las ven-

tanias espacio-temporales, el número de ejecuciones de Montecarlo y el rango de búsqueda de eventos dentro del catálogo.

Con el proceso indicado, el 32.4% de los registros resultan ser réplicas, premonitorios o dobles de enjambres, la mayoría correspondientes a sismos en el rango de magnitudes  $M_w$  entre 3.0 y 4.0 y ocurridos en los últimos treinta años. La Figura 9 muestra la distribución temporal (desde 1800) y de magnitudes de estos eventos.

En cuanto a la distribución geográfica de réplicas, premonitores y dobles detectados, la Figura 10 muestra que la mayor parte de estos eventos tienen su epicentro en Marruecos y Argelia, como también se puede apreciar en el mapa de la Figura 11.

### 1.5. Completitud del catálogo

El siguiente paso en la elaboración del catálogo de proyecto ha sido el análisis de completitud. Un catálogo sísmico se considera completo en una zona si contiene todos los sismos que han ocurrido en la misma y no sólo 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 de menor tamaño se hace cada vez más escasa, per-

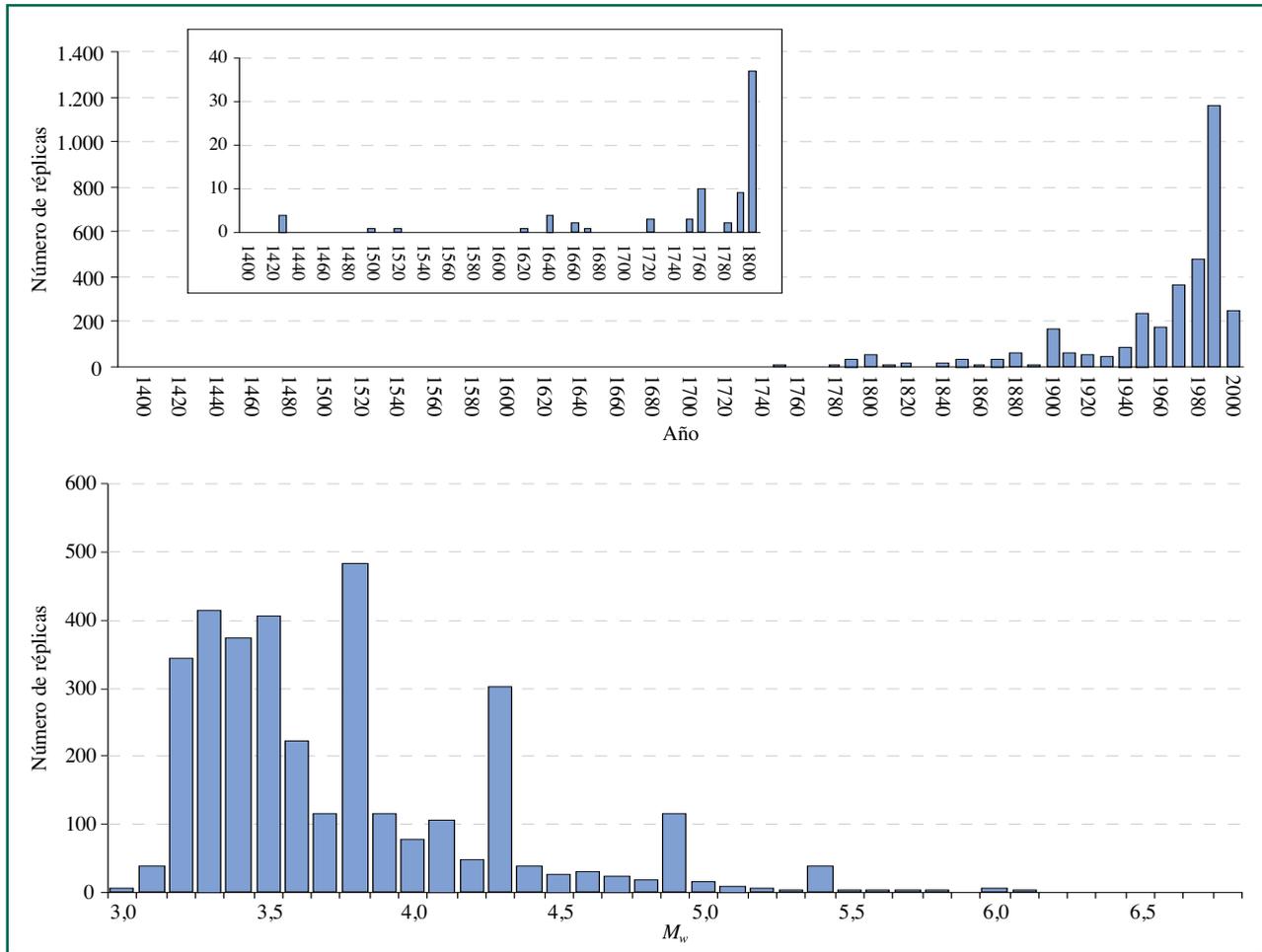


Figura 9. Número de réplicas, premonitorios y enjambres identificados en función del año (superior) y de la magnitud  $M_w$  (inferior).

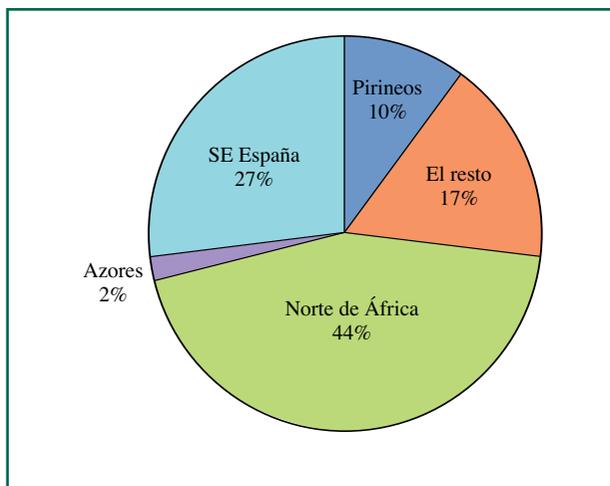


Figura 10. Porcentaje de réplicas, premonitorios y enjambres identificados según la localización del epicentro.

diéndose la certeza de que el catálogo contenga todos los terremotos realmente ocurridos en esa época. En general, cuanto menor sea la intensidad o magnitud, menor será el periodo en el que el catálogo pueda considerarse completo. 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 esa completitud.

En sentido estricto, estos años de referencia deberían ser obtenidos para cada una de las fuentes sísmicas (en el método zonificado) que van a ser utilizadas en la evaluación de la peligrosidad, ya que estos van a ser en general distintos dependiendo de la zona considerada. No obstante, puede simplificarse esta estimación considerando un número limitado de regiones (o grandes zonas) en las que puede suponerse que ha existido históricamente

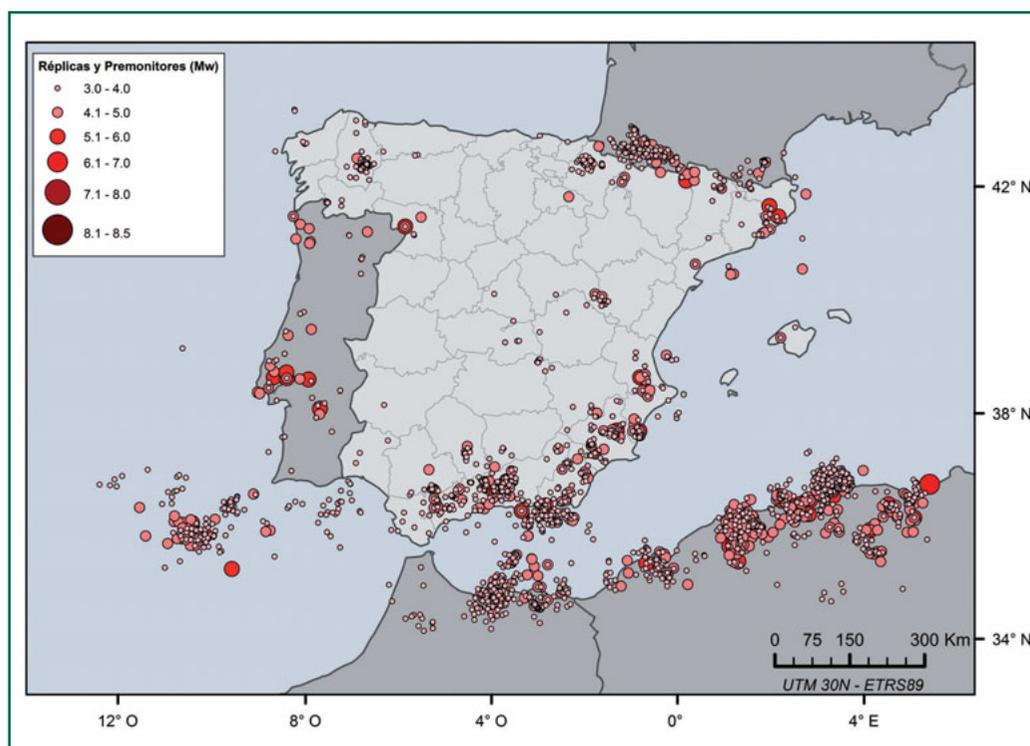


Figura 11. Mapa con las réplicas, premonitores y enjambres identificados en el catálogo.

un nivel de detección de terremotos similar. En la Figura 12 se indican a *grosso modo* las regiones inicialmente propuestas para fijar años de referencia comunes a todas las zonas dentro de la región.

El análisis de completitud se ha realizado, para cada una de las regiones diferenciadas de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Se determinan los años de referencia para cada intervalo de magnitud siguiendo el método de Stepp (1972) y considerando intervalos de 0.5 unidades de magnitud.
- Se señala el año de referencia a partir del cual el número acumulado de terremotos por año se puede considerar constante. Este año corresponde al punto a partir del cual la curva representada tiene pendiente constante. Para ayudar a la identificación de estos tramos se calcula la pendiente en cada punto de la curva.
- Se identifican los años de referencia para cada intervalo de magnitud y cada zona estudiada, que marcan el inicio del periodo para el que se puede aceptar que el catálogo es completo en el rango de magnitudes considerado.

Dado que la identificación del año de referencia es un tanto subjetiva, se decidió contar con el análisis de varias personas especializadas para que, de manera independiente, marcaran diferentes años de referencia. Esto ha permitido tener una aproximación de la incertidumbre introducida en la determinación de dichos años. Los casos de divergencias claras entre varios analistas se estudiaron de forma especial.

Dado que no se encontraron diferencias significativas entre los años de referencia derivados para las zonas de Pirineos y para la zona de la península Ibérica, se decidió no hacer ninguna distinción y tratar conjuntamente ambas zonas en las fases subsiguientes del estudio, en lo que a completitud se refiere.

Los años de referencia para las zonas finalmente diferenciadas se muestran en la Figura 13, en la que se aprecia que los periodos de completitud mayores se presentan en el SE de España y resto de la Península, y los menores en Azores. A partir de  $M_w$  6.0 los periodos de completitud se igualan con los periodos del catálogo de cada zona, por lo que no podría asegurarse que se trate de periodos completos.

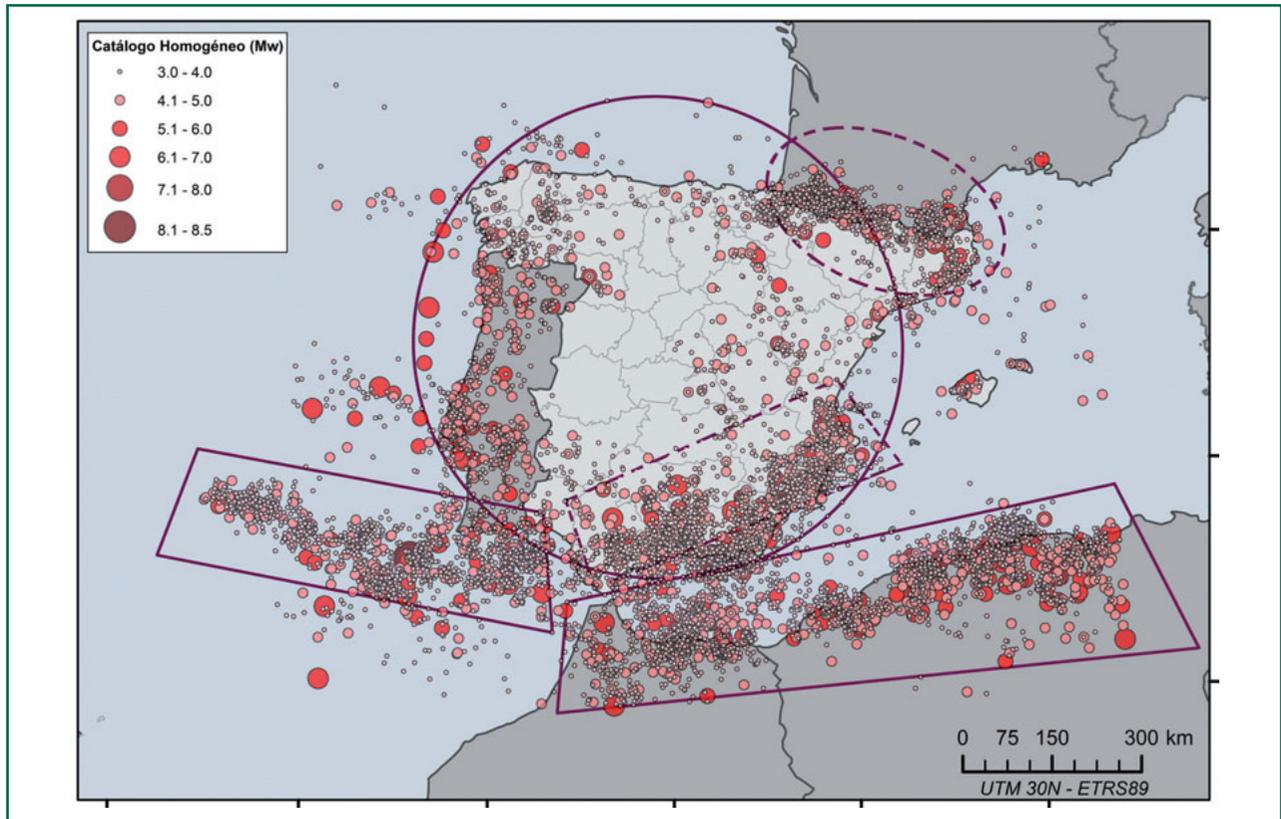


Figura 12. Zonas de años de referencia comunes.

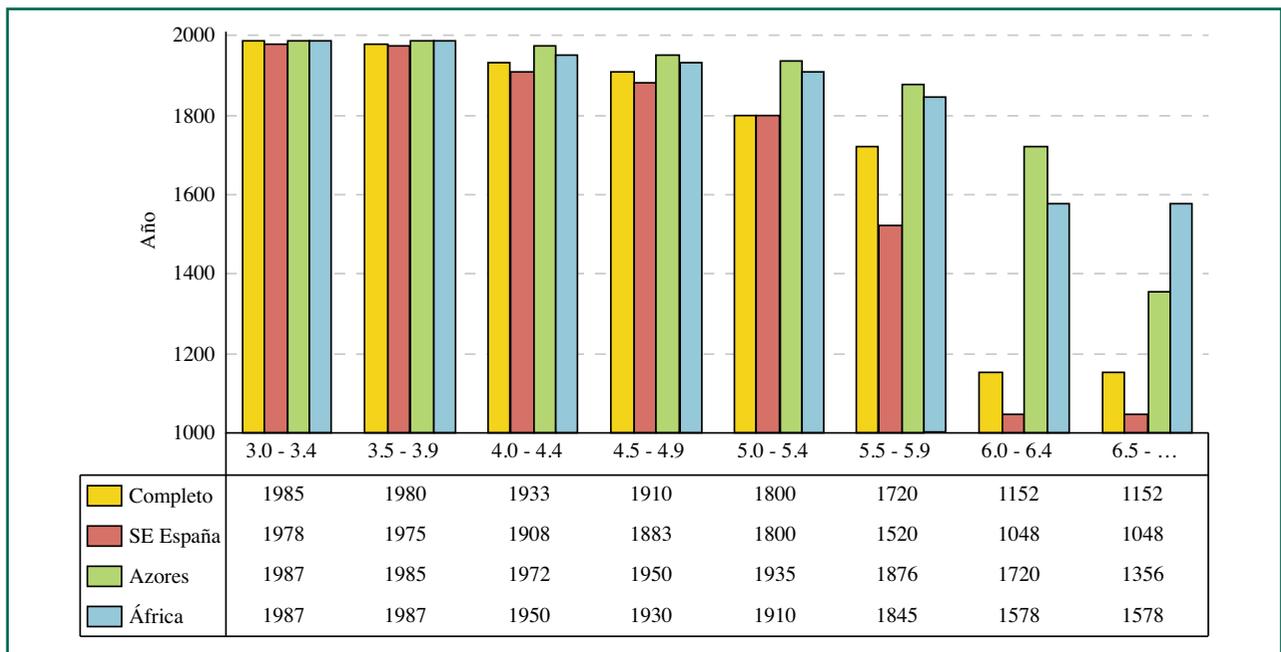


Figura 13. Años de referencia considerados finalmente para las zonas de estudio y los intervalos de magnitud.

La implicación que tendrá esto en el estudio de peligrosidad será la asignación de una tasa de ocurrencia de terremotos de esas magnitudes posiblemente superior de lo que cabe esperar en estas magnitudes altas.

### 1.6. Catálogo final del Proyecto

El catálogo final de proyecto, resultante de los procesos de homogenización, filtrado y corrección por falta de completitud, para una magnitud igual o superior a  $M_w$  3.5, contiene 6.999 eventos. Las Tablas 5 y 6 incluyen, respectivamente, las principales características de este catálogo de proyecto y los

campos o atributos que contiene. La distribución de eventos, según el parámetro de tamaño original se indica en la Tabla 7.

Las distribuciones temporales y por magnitud del número de terremotos contenidos en el catálogo se muestran en las Figuras 14 y 15, respectivamente. La distribución de magnitudes en función del tiempo se presenta en la Figura 16. Analizando estas figuras se comprueba que la mayor parte de los registros se concentra a partir de la década de los 80 y el 60 % de los terremotos tienen magnitud  $M_w$  igual o inferior a 4.0.

Finalmente, en la Figura 17 se muestra un mapa con el catálogo final de proyecto, homogéneo y depurado.

TABLA 5  
*Características del catálogo de proyecto*

<b>Número de terremotos</b>	6.999
<b>Periodo</b>	1048-30/06/2011
<b>Área</b>	long: desde -13° O hasta 6° E lat: desde 34° N hasta 45° N
<b>Tipo de magnitud</b>	Magnitud momento ( $M_w$ )
<b>Rango de magnitud</b>	3.5-8.5
<b>Profundidad</b>	0-65 km

TABLA 6  
*Principales atributos de la tabla que contiene el catálogo de proyecto*

<b>EVID</b>	Identificador único de cada registro
<b>Fecha</b>	Fecha de ocurrencia del evento
<b>Hora</b>	Hora de ocurrencia del evento
<b>Coordenadas</b>	Latitud y longitud del evento en el sistema de referencia: ETRS89
<b><math>h</math></b>	Profundidad del evento (km)
<b>Lugar</b>	Lugar del evento
<b><math>M_w</math></b>	$M_w$ final asignada
<b><math>\sigma M_w</math></b>	Incertidumbre de la $M_w$ asignada
<b>Correlación</b>	Código de la correlación aplicada
<b>Origen</b>	Origen del registro
<b>Tipo de datos</b>	Tipo de parámetro de tamaño origen
<b>OBS</b>	Observaciones /Notas aclaratorias

TABLA 7  
Distribución de terremotos por tipo de parámetro de tamaño origen

Tipo	Origen del dato	Número de terremotos	% de terremotos
$I$ (EMS)	IGN /IGC	1.654	24
$I$ marinos	IGN	69	1
$m_D$	IGN	467	7
$m_{bLg}$ -MMS	IGN	3.668	52
$m_b$ -VC	IGN	621	9
$m_{bLg}$ -L	IGN	299	4
$M_w$	IGN/IAG/ISC/Estudios específicos	221	3

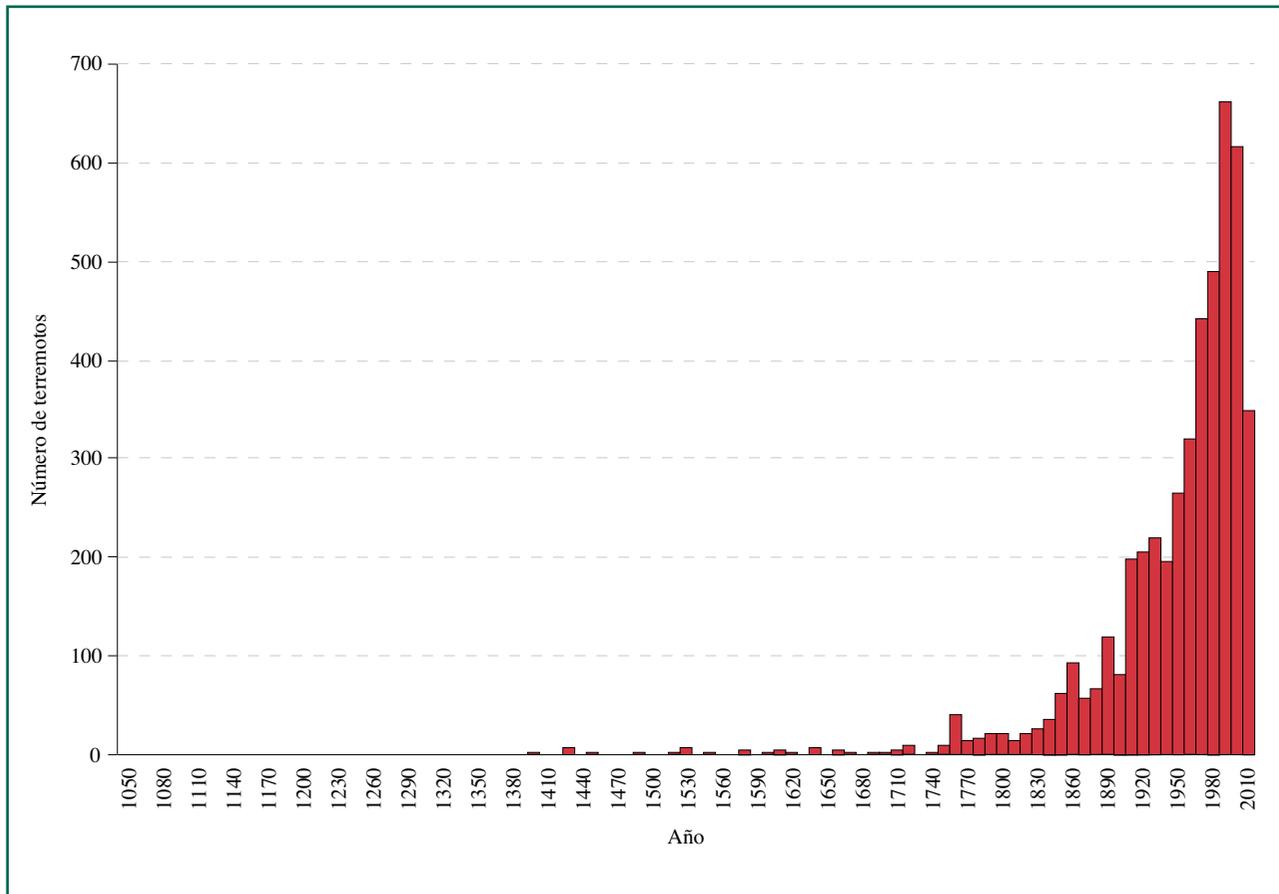


Figura 14. Distribución temporal del catálogo agrupando los registros por décadas.

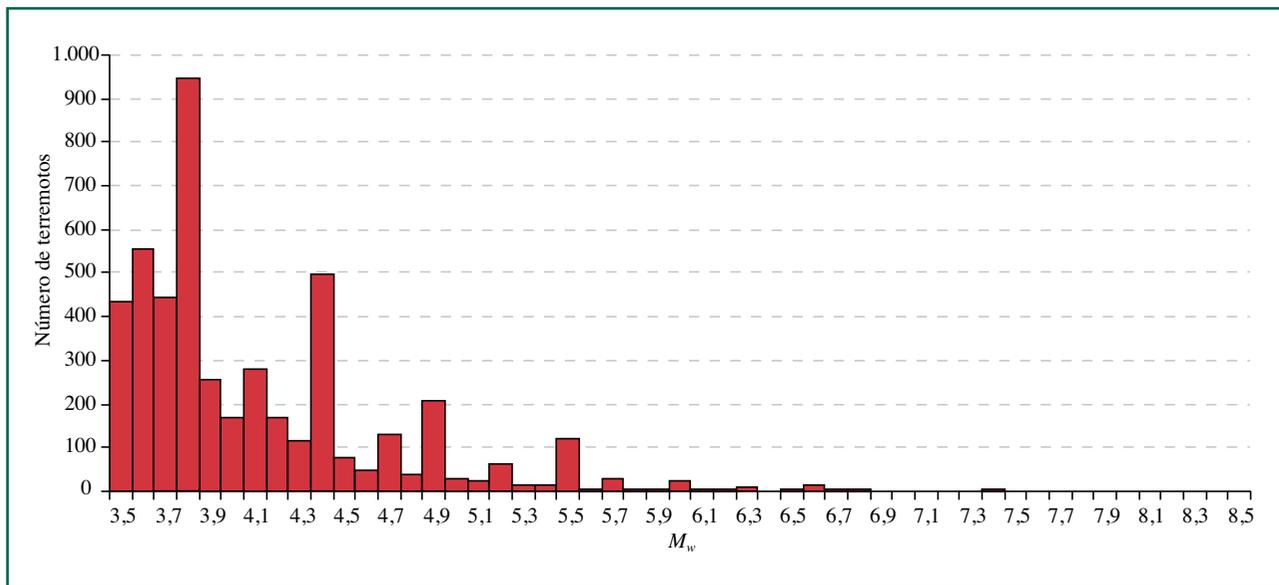


Figura 15. Distribución de terremotos por magnitud.

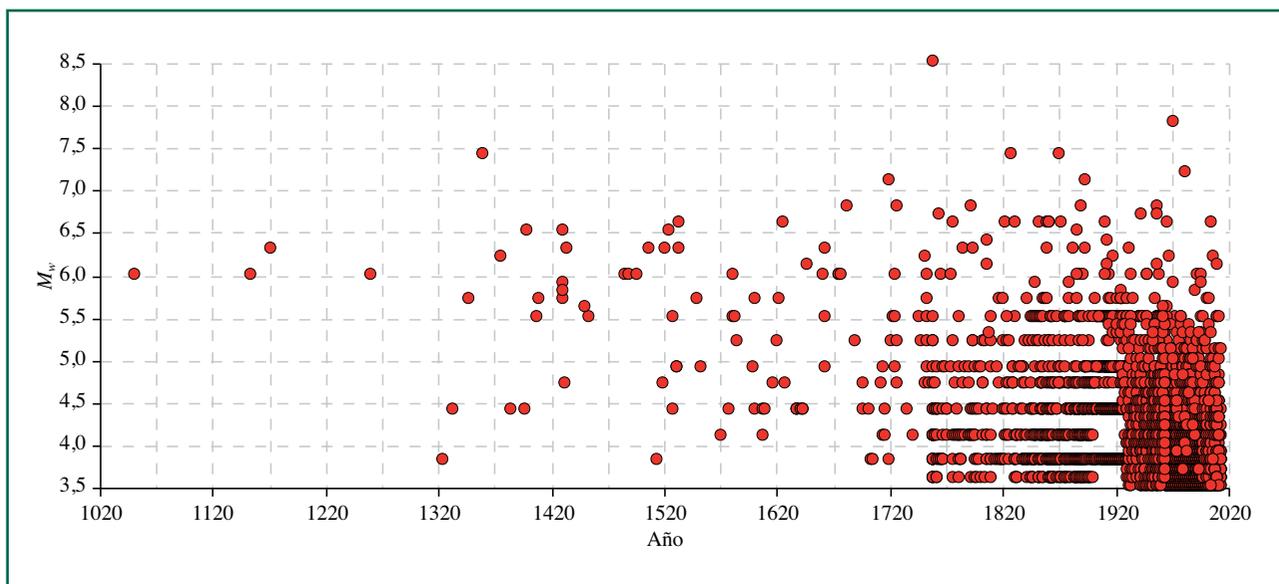


Figura 16. Distribución de magnitudes del catálogo final en función del tiempo.

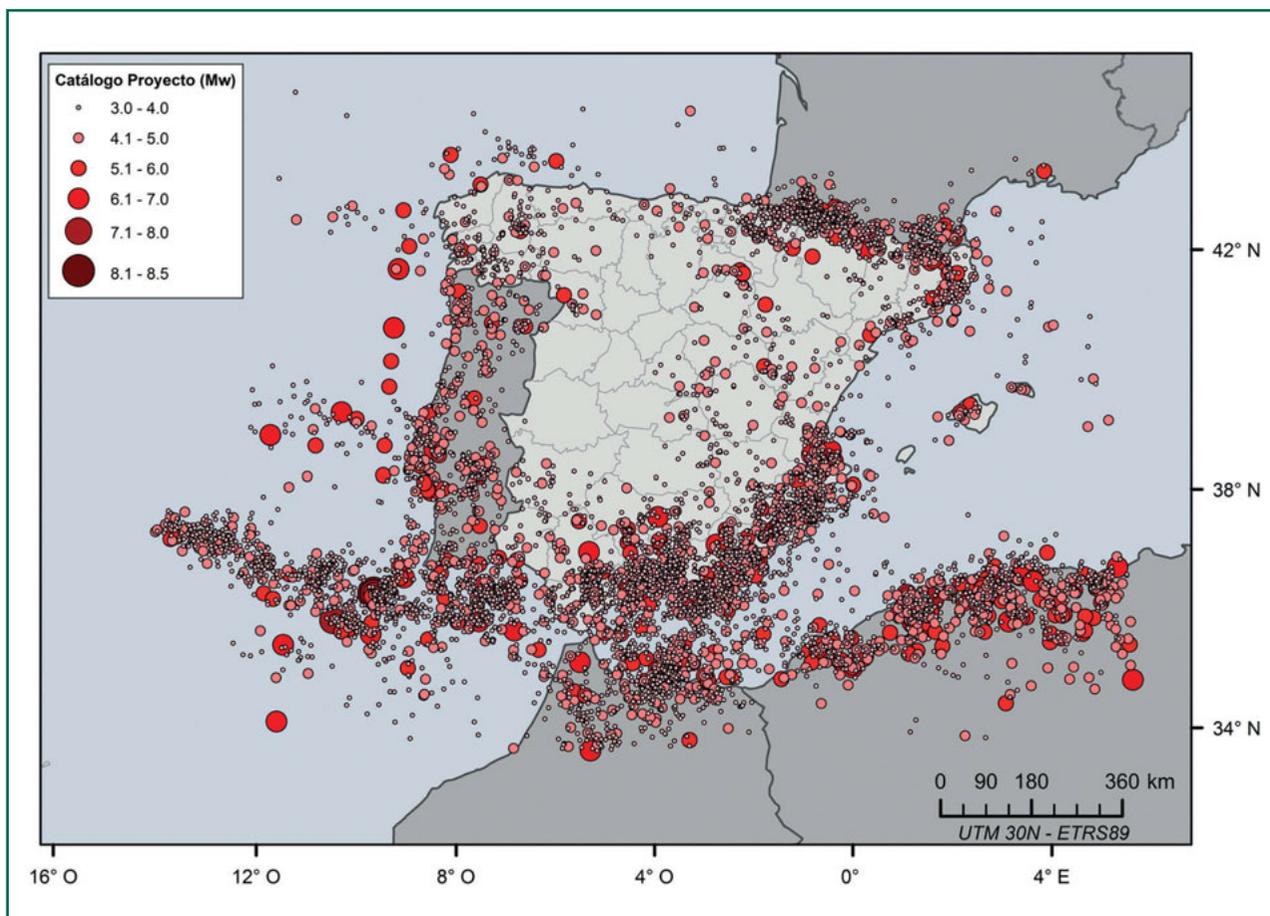


Figura 17. Mapa con el catálogo final del proyecto.

## Definición y caracterización de fuentes sismogénéticas: zonas y fallas

La peligrosidad sísmica trata de evaluar el nivel de movimiento del suelo que pueden producir terremotos futuros. Por ello, uno de los aspectos clave que constituye el segundo factor en la evaluación de peligrosidad es la definición y caracterización de las fuentes sísmicas que pueden afectar a un emplazamiento. Se consideran dos tipos generales de fuentes sísmicas: zonas sismogénéticas y fallas.

Las *zonas sismogénéticas* son áreas dentro de las cuales se asume que existe un potencial sísmico uniforme espacial y temporalmente, esto es, la probabilidad de ocurrencia de un evento de cierta magnitud es la misma en cualquier punto de la zona y en cualquier instante. La utilización de un modelo independiente del tiempo y uniforme en el espacio trata de representar el conocimiento actual sobre la sismicidad futura y sus características en esa área.

Las fuentes *tipo falla* corresponden a las estructuras tectónicas identificadas como capaces de producir terremotos. En este caso, la caracterización de las fallas de cara a un estudio de peligrosidad sísmica se basa en datos geológicos, geodésicos y sismológicos y en especial en investigaciones paleosismológicas, que proporcionan datos sobre posible segmentación, tasas de recurrencia, tasas de deslizamiento, magnitudes máximas producidas, profundidades, mecanismos, etc. Este tipo de fuentes no necesariamente tendrá distribuciones uniformes de frecuencia y localización de terremotos y en ellas se admiten diferentes modelizaciones de la sismicidad dependiendo de sus características (p.e. modelos dependientes del tiempo, sismo característico, etc).

En regiones de actividad sísmica moderada o baja la caracterización sísmica de fallas para ser consideradas como unidades independientes en el

cálculo de peligrosidad generalmente no es posible, y debe acudirse a la definición de zonas sismogénéticas para representar las fuentes sísmicas. La delimitación de estas zonas se basa en el análisis del entorno sismotectónico, en la sismicidad y sobre todo en las consideraciones sobre su estacionariedad temporal y espacial. Cada zona es caracterizada por una distribución de frecuencia de ocurrencia de sismos en función de la magnitud, representando la ley de recurrencia en la misma. A tal fin es habitual la adopción de una ley de Gutenberg y Richter, que es derivada explotando el catálogo de proyecto y realizando un ajuste lineal de la sismicidad para cada zona.

En el Anexo II se presenta una revisión breve de zonificaciones propuestas recientemente para estudios de peligrosidad en España, en regiones particulares de ésta y también en otras regiones o países colindantes como Portugal, Francia y norte de África.

Dos de las zonificaciones propuestas se han seleccionado para el presente estudio y son descritas detalladamente en este capítulo. Seguidamente, se incluye una descripción del conocimiento actual de las fallas activas de la península Ibérica y se expone su influencia en la zonificación. Por último se trata la caracterización y parametrización sísmica de cada una de las fuentes en cada una de las zonificaciones seleccionadas.

### 2.1. Zonificaciones seleccionadas

Tras la revisión de las distintas zonificaciones recopiladas, utilizadas en estudios previos de peligrosidad en la península Ibérica, finalmente se llegó

a un consenso general entre la Comisión de Seguimiento (CSP) y el Grupo de Trabajo (GT), decidiendo el uso de dos zonificaciones: la propuesta por García-Mayordomo y otros autores en 2012 (en adelante GM12) y la de Bernal y Asociados 2012 (en adelante ByA12). A continuación se describen ambas detalladamente.

### 2.1.1. Zonificación de García-Mayordomo et al. (2012) (GM12)

La zonificación GM12, se considera que es resultado de un trabajo actual, bien desarrollado y documentado y que hace uso de información geofísica relevante. El trabajo se realizó 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 y finalmente, objeto de revisiones y ajustes posteriores como consecuencia de las discusiones mantenidas en las reuniones con la CSP.

Según sus autores, este proceso, llevado a cabo durante el periodo 2010-2012, tiene dos etapas diferenciadas, de cada una de las cuales ha resultado un nuevo modelo con modificaciones o ajustes sobre la anterior versión. El modelo de zonificación final es por tanto el resultado de un largo proceso de trabajo y consenso (García-Mayordomo *et al.*, 2012a).

La primera etapa (2010 y 2011) dio lugar a un modelo de zonificación sismogenética inicial, denominado modelo *Iberfault* (García-Mayordomo *et al.*, 2010a) y a un segundo modelo denominado *Share* (desarrollado para el proyecto *SHARE-Seismic Hazard Harmonization in Europe*). En esta etapa participaron numerosos geólogos españoles y portugueses, especialistas del IST (*Istituto Superior Técnico*) portugués y del IRSN (*Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire*) francés. En la segunda etapa (mediados 2011-mediados 2012) y como consecuencia de la interacción con los expertos de la CSP y del GT del proyecto del Mapa de Peligrosidad de España, se realizaron una serie de modificaciones sobre el último modelo, para dar lugar al modelo final (GM12 en este estudio). Esta versión final, que presenta cambios importantes respecto a la versión inicial de 2010, ha sido la empleada para el cálculo de peligrosidad en este proyecto y se muestra en la Figura 18.

La zonificación original (modelo *Iberfault*) se basa en la metodología de zonificación propuesta por García-Mayordomo y Giner (2006), en la que se analizan seis temáticas diferentes: cartografía geológica y tectónica, morfología del relieve, espesor de corteza, flujo térmico y sismicidad histórica e instrumental, para definir las zonas sismotectónicas o bien para poder ajustar zonificaciones ya propuestas o publicadas. Además, conlleva un proceso de *elicitación* de expertos regionales en tectónica activa, paleosismicidad y sismotectónica, que permite producir finalmente un modelo integrado resultado de las opiniones y de los análisis realizados.

En el segundo modelo (*Share*), como resultado de la interacción con los expertos portugueses del IST, se introducen una serie de cambios en las zonas portuguesas, más notables en las zonas del Algarve y Lisboa y también en las zonas marinas del golfo de Cádiz y banco de Gorringe. Otros cambios incluyen las zonas transfronterizas del N de Portugal y Galicia. También se amplía la zona central ibérica, inicialmente dividida en dos. Después, haciendo uso de la primera versión de la base de datos de fallas activas en la península Ibérica en el Cuaternario QAFI (*Quaternary Active Faults of Iberia*; IGME 2012), se modifican algunas zonas que cortaban trazas de falla, como son las zonas de Alborán y cordilleras Béticas, las dos zonas Costero-Catalanas, la zona de la cordillera Ibérica y el cambio de la zona de Girona para diferenciarla del Pirineo y de la Costero-Catalana e incluir las fallas de Amer y Rosas (García-Mayordomo *et al.* 2012a). Posteriormente, la interacción con los expertos franceses del IRSN, produjo la modificación de las zonas de Pirineos y S de Francia. La principal modificación se realiza en la zona central del macizo donde se localiza la falla Norpirenaica y toda la sismicidad asociada.

El tercer modelo (GM12) es un reajuste final del modelo anterior, con cambios basados por una parte, en las discusiones mantenidas en las reuniones de la Comisión de Seguimiento entre diferentes expertos y por otra, en los ajustes debidos a la distribución de la sismicidad. En este modelo final, las modificaciones más importantes corresponden a:

- Zonas del golfo de Cádiz y del Algarve, debido principalmente a la irregular distribución de la sismicidad.

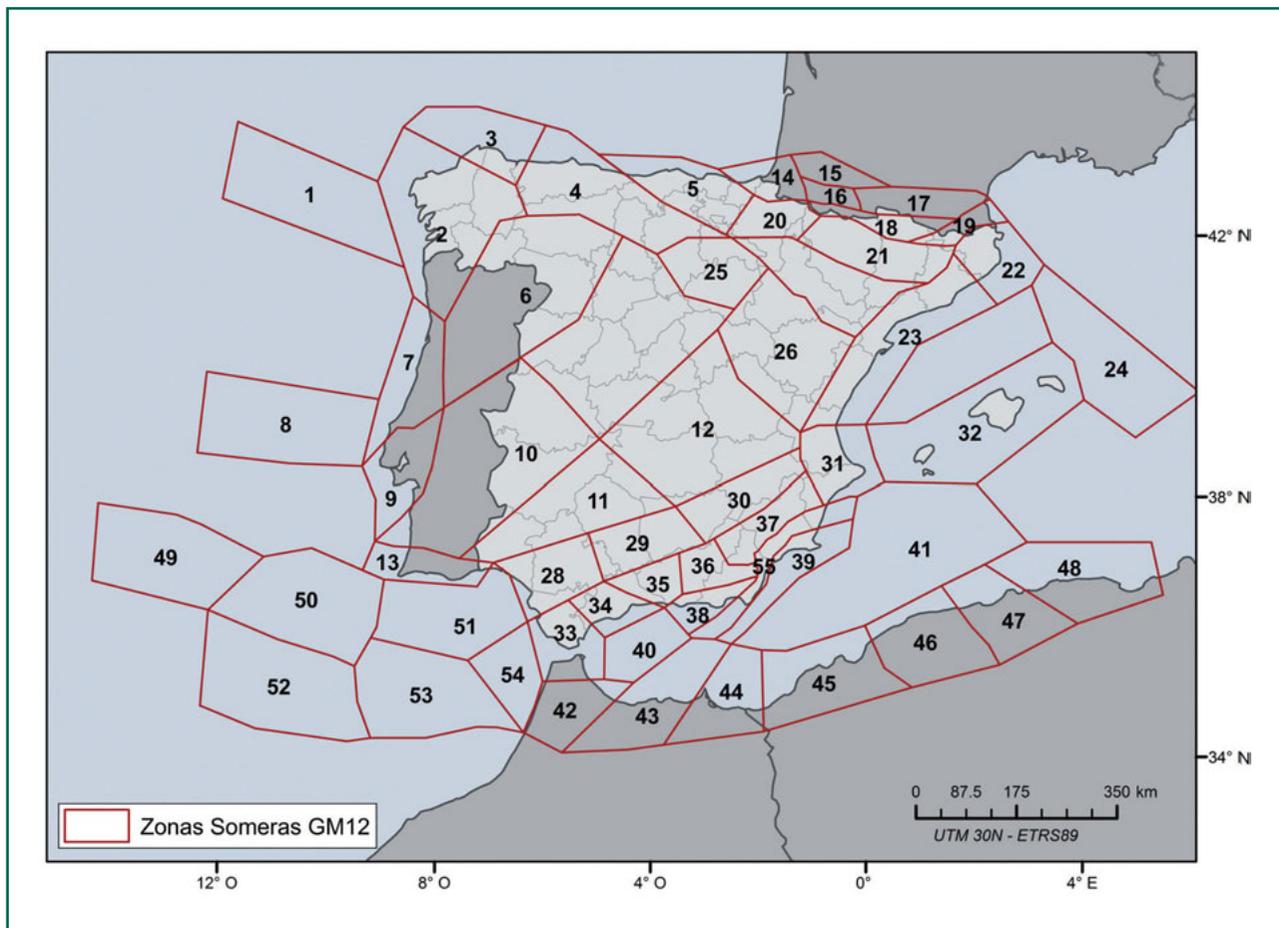


Figura 18. Modelo final de zonificación (GM12), de García Mayordomo *et al.* (2012). Zonas superficiales.

- Límite SO de la zona del sistema Central, a causa de la ubicación de las fallas de Plasencia y Ponsul.
- Cordillera Ibérica, para la que se separó el macizo de Cameros-Demanda.
- Cordilleras Costero-Catalanas, uniendo finalmente sus partes central y meridional (las zonas 23 y 27 originales se unen en una, denotada como zona 23) y quedando configurada como se muestra en la Figura 18.
- Inclusión de una zona nueva (zona 55), correspondiente a la zona de cizalla de las Béticas Orientales, que abarca los principales sistemas de fallas del SE de España: Carboneras, Palomares, Alhama de Murcia, Carrascoy y Bajo Segura. Este cambio final fue propuesto por García-Mayordomo y Martínez-Díaz, a partir

de algunos tests preliminares realizados en García-Mayordomo *et al.* (2012d), en los que el fin era afinar el cálculo en torno a esas fallas y poder dar de este modo más peso a su influencia.

El modelo final consta de un total de 55 zonas superficiales, (cuya denominación se muestra en la Tabla 8) y 4 zonas profundas situadas en el S y SO de la península Ibérica. Éstas últimas están planteadas para evaluar la peligrosidad asociada a fuentes sísmicas con profundidades entre 30 y 65 km (Figura 19).

Por último, una descripción completa de esta zonificación desde el punto de vista sismotectónico para cada una de las zonas puede encontrarse en el Anexo III de este informe, de acuerdo a la documentación proporcionada por sus autores.

TABLA 8  
Denominación zonas sismogénicas. Zonificación GM12

Número	Denominación Zona	Número	Denominación Zona
1	Banco de Galicia (O. Atlántico) <sup>(1)</sup>	27	Levante (C.Ibérica Oriental-C.C.Catalana Meridional)
2	Galicia Norte y Margen Cantábrico (Macizo Ibérico)	28	Guadalquivir Occidental (C. Bética)
3	Galicia (Macizo Ibérico)	29	Guadalquivir Central (C. Bética)
4	Cantábrica Occidental (C. Cantábrica-C. del Duero)	30	Cazorla-Segura y Prebético de Albacete (C. Bética)
5	Cantábrica Oriental (C. Cantábrica)	31	Plataforma Valenciana y Prebético de Alicante (C. Ibérica Sur-C.Bética)
6	Macizo Ibérico Norte (Macizo Ibérico-C. del Duero)	32	Islas Baleares (C. Bética)
7	Orla Occidental (Portugal) <sup>(1)</sup>	33	Arco de Gibraltar (C. Bética-Rif)
8	Promontorio da Estremadura (O. Atlántico) <sup>(1)</sup>	34	Béticas Internas Occidentales (C. Bética)
9	Bajo Tajo (Portugal) <sup>(1)</sup>	35	Cuenca de Granada (C. Bética)
10	Macizo Ibérico Central (Macizo Ibérico)	36	Sierra Nevada-Filábrides y C. de Guadix-Baza (C. Bética)
11	Macizo Ibérico Sur (Macizo Ibérico)	37	Prebético Murciano (C. Bética)
12	Meseta Sur (Macizo Ibérico-Cuenca del Tajo-C. Ibérica)	38	Béticas Internas Centrales (C. Bética)
13	Algarve (Portugal, Macizo Ibérico-Orla Algarvía) <sup>(1)</sup>	39	Béticas Internas Orientales (C. Bética)
14	Macizos Vascos (Pirineos)	40	Mar de Alborán Occidental
15	Antepaís Pirenaico Septentrional (Pirineos) <sup>(2)</sup>	41	Mediterráneo (C. Argelina-Balear)
16	Norpirenaica Oriental (Pirineos) <sup>(2)</sup>	42	Rif Occidental (Marruecos)
17	Norpirenaica Occidental (Pirineos) <sup>(2)</sup>	43	Cresta de Alborán-Rif Central (Marruecos)
18	Axial Pirenaica (Pirineos)	44	Rif Oriental (Marruecos)
19	Cerdanya (Pirineos)	45	Orán (Tell Occidental, Argelia) <sup>(3)</sup>
20	Surpirenaica Occidental (Pirineos)	46	Cheliff (Tell Central, Argelia) <sup>(3)</sup>
21	Surpirenaica Central y Oriental (Pirineos)	47	Algiers (Tell Central, Argelia) <sup>(3)</sup>
22	Costero-Catalana Norte (C.C.Catalana-Pirineos Orientales)	48	Bouira (Tell Oriental, Argelia) <sup>(3)</sup>
23	Costero-Catalana Central (C.C.Catalana)	49	Hirondelle II (O. Atlántico)
24	Mediterráneo Oriental	50	Gorringe-Horseshoe Norte (O. Atlántico)
25	Cameros-Demanda (C. Ibérica Norte-C. del Duero)	51	Golfo de Cádiz Norte (O. Atlántico)
		52	Coral Patch-Horseshoe Sur (O. Atlántico)
		53	Golfo de Cádiz Sur (O. Atlántico)
		54	Golfo de Cádiz Centro (O. Atlántico)
26	Cordillera Ibérica (Ramas Aragonesa y Castellana)	55	Zona de Cizalla de las Béticas Orientales (Mar de Alborán-C. Bética)

<sup>(1)</sup> Adaptado de la zonación del proyecto SHARE-Portugal (Vilanova *et al.*, 2010)

<sup>(2)</sup> Adaptado de la zonación oficial del IRSN-Francia (Baize *et al.*, en prensa).

<sup>(3)</sup> Modificado de Hamdache (1998) y Peláez Montilla *et al.* (2003)

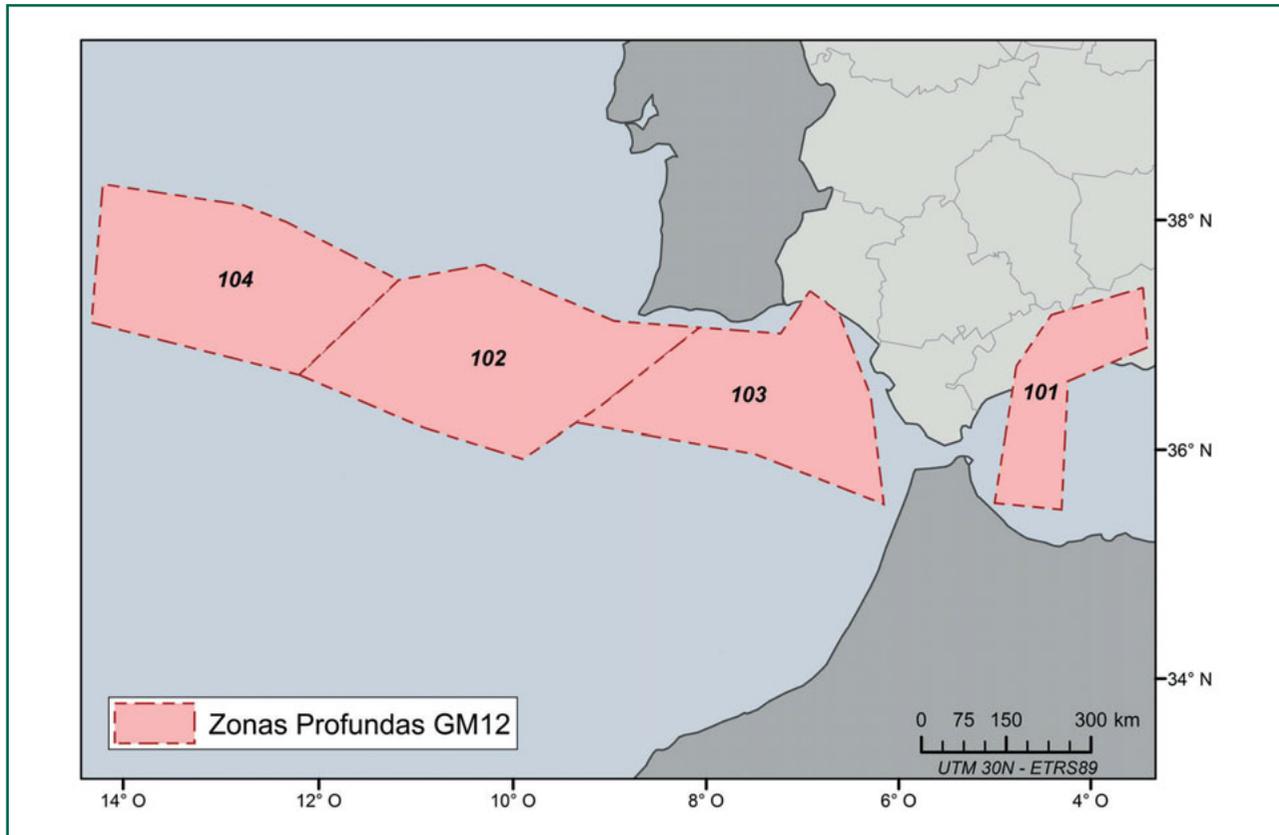


Figura 19. Zonificación de García Mayordomo *et al.* (2012). Zonas profundas.

### 2.1.2. Zonificación de Bernal y otros (ByA12)

La zonificación de ByA12 es el resultado de un largo proceso de elaboración basado en los diferentes trabajos de peligrosidad realizados por sus autores en ByA Estudio de Ingeniería S. L. a lo largo del periodo 1990-2009 (ByA09) y finalmente modificada durante la ejecución del proyecto (ByA12). Los criterios generales empleados se basan en la geología y tectónica de cada región, junto con un análisis pormenorizado de la sismicidad.

Según sus autores, la península Ibérica y las áreas marinas adyacentes pueden dividirse en varias regiones sismogénicas, cada una de las cuales engloba varias zonas o provincias sismotectónicas. Así, este modelo de zonificación se compone de ocho grandes regiones sismogénicas en las que se definen un total de 72 zonas sismotectónicas. Estas regiones corresponden al macizo Hespérico, los Pirineos, la cordillera Ibérica, la cordillera Costera-Catalana, Levante, la orla Mesozoica y Neógena

Occidental Portuguesa, las cordilleras Béticas y valle del Guadalquivir, y la zona del banco de Gorringe. El espacio que queda entre Pirineos y la cadena Ibérica corresponde a la depresión del Ebro, dividida en 2 zonas sismotectónicas (oriental y occidental), prácticamente asísmicas y en las que no existen accidentes tectónicos importantes. En la Figura 20 se muestra la zonificación original propuesta por los autores, destacando en la misma estas grandes regiones sismogénicas.

Una descripción completa de regiones y zonas puede encontrarse en el anexo III, extractada de la documentación aportada por A. Bernal. En esa documentación cada zona lleva asociada una descripción de los principales rasgos tectónicos (de acuerdo al conocimiento geológico de la época) y de la sismicidad, incluyendo detalles de los terremotos principales ocurridos en ellas y sometidos a una revisión previa en gran parte de los casos. Las regiones sismogénicas y las zonas o provincias sismotectónicas de esta zonificación se enumeran en la Tabla 9.

TABLA 9  
Resumen de zonas sismogénicas. Zonificación ByA12

Número	Zona Sismotectónica	Región Sismogénica
1	Rias Bajas	HESPÉRICO
2	Taboada-Celanova	HESPÉRICO
3	Zona Astur-Occidental Leonesa	HESPÉRICO
4	Zona Asturiana	HESPÉRICO
5	Bajo Duero	HESPÉRICO
6	Sistema Central	HESPÉRICO
7	Depresión del Tajo	HESPÉRICO
8	Altomira	HESPÉRICO
9	Zona Centro-Ibérica Sur	HESPÉRICO
10	Ossa Morena Noroccidental	HESPÉRICO
11	Ossa Morena Suroriental	HESPÉRICO
12	Flych Subportugues	HESPÉRICO
13	Cuenca del Duero	HESPÉRICO
14	Cuenca de Aquitania y Norpirenaica Oriental	PIRINEOS
15	Zona Norpirenaica Occidental	PIRINEOS
16	Macizo Cinco Villas	PIRINEOS
17	Zona Axial Pirenaica	PIRINEOS
18	Región de Olot	PIRINEOS
19	Prepirineo Occidental	PIRINEOS
20	Prepirineo Central	PIRINEOS
21	Segre	PIRINEOS
22	Prepirineo Oriental	PIRINEOS
23	Zona Cántabra	PIRINEOS
24	Depresion del Ebro Occidental	
25	Depresion del Ebro Oriental	
26	Costero Catalana Norte	COSTERO CATALANA
27	Bajo Llobregat	COSTERO CATALANA
28	Costero Catalana Sur	COSTERO CATALANA
29	Demanda y Cameros	IBÉRICA
30	Sierra de Neila	IBÉRICA
31	Cordillera Ibérica Aragonesa	IBÉRICA
32	Cordillera Ibérica Castellana	IBÉRICA
33	Alfambra-Turia	IBÉRICA
34	Maestrazgo	IBÉRICA
35	Transito Ibérica-Béticas	LEVANTE
36	Prebetico Externo Diapirico	LEVANTE

TABLA 9 (continuación)  
Resumen de zonas sismogénicas. Zonificación ByA12

Número	Zona Sismotectónica	Región Sismogénica
37	<i>Prebetico Externo Levantino</i>	LEVANTE
38	<i>Corredor Elche-Alicante</i>	LEVANTE
39	<i>Baleares</i>	LEVANTE
40	<i>Segura Medio</i>	LEVANTE
41	<i>Bajo Segura</i>	LEVANTE
42	<i>Corredor del Guadalentín</i>	LEVANTE
43	<i>Cartagena-Mar Menor</i>	LEVANTE
44	<i>Orla Mezoica del Algarve</i>	BÉTICAS
45	<i>Golfo de Cádiz-SE de Faro</i>	BÉTICAS
46	<i>Depresion del Guadalquivir</i>	BÉTICAS
47	<i>Subbético de Jaén</i>	BÉTICAS
48	<i>Sierra de Segura</i>	BÉTICAS
49	<i>Arco de Gibraltar</i>	BÉTICAS
50	<i>Antequera-Sierra de Grazalema</i>	BÉTICAS
51	<i>Loja-Sierra Gorda</i>	BÉTICAS
52	<i>Granada</i>	BÉTICAS
53	<i>Subbético de Huesca y N de la Depresion Guadix-Baza</i>	BÉTICAS
54	<i>Depresion de Baza</i>	BÉTICAS
55	<i>Corredor del Almanzora</i>	BÉTICAS
56	<i>Sierra Nevada y Filabres</i>	BÉTICAS
57	<i>Sierra de Tolox</i>	BÉTICAS
58	<i>Málaga</i>	BÉTICAS
59	<i>Motril</i>	BÉTICAS
60	<i>Adra-Sierra Alhamilla</i>	BÉTICAS
61	<i>Almería</i>	BÉTICAS
62	<i>Mar de Alborán Occidental</i>	BÉTICAS
63	<i>Mar de Alborán Oriental</i>	BÉTICAS
64	<i>Mediterráneo Sur</i>	BÉTICAS
65	<i>Rif Occidental</i>	BÉTICAS
66	<i>Rif Oriental</i>	BÉTICAS
67	<i>Cratón Africano</i>	BÉTICAS
68	<i>Región de Oran</i>	BÉTICAS
69	<i>Orla Mesozoica Occidental</i>	PORTUGAL
70	<i>Bajo Tajo y Sado</i>	PORTUGAL
71	<i>Gorringe</i>	GORRINGE
72	<i>Mar Balear</i>	LEVANTE

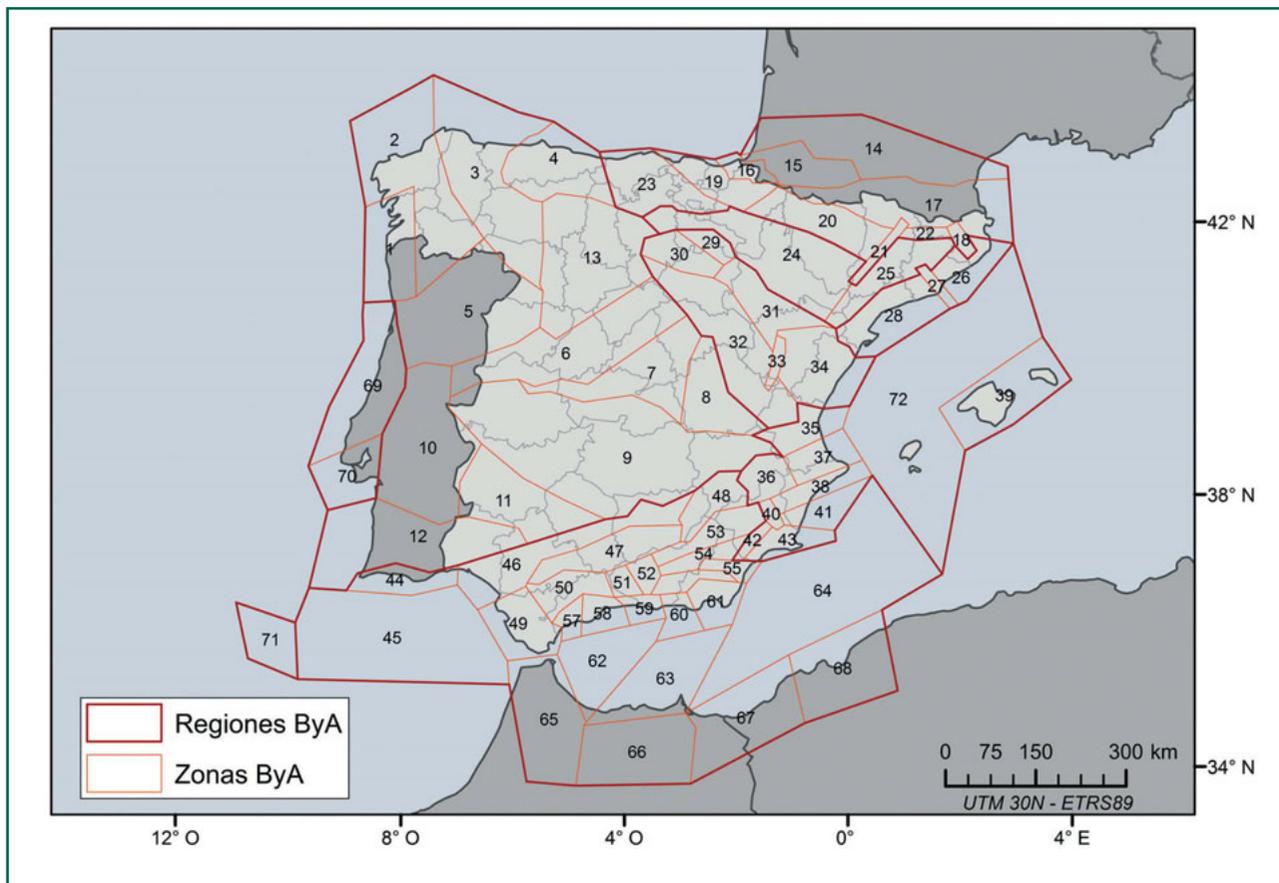


Figura 20. Zonificación original de ByA09

A diferencia de la zonificación anterior, ésta zonificación fue desarrollada para calcular el parámetro  $\beta$  de la ley de Gutenberg-Richter de forma regional. Tras los análisis previos de la sismicidad de estas zonas para el establecimiento de leyes de recurrencia, se tantearon algunos cambios de límites de zonas, con el objetivo de mejorar estos ajustes. Finalmente, tras algunas reuniones con el GT, los autores de la zonificación inicial modificaron algunos límites, llegando a la zonificación final adoptada y denominada ByA12, que se muestra en la Figura 21.

Los principales cambios introducidos respecto a la zonificación inicial corresponden a la eliminación (y al consecuente reajuste de zonas colindantes) de las zonas denominadas Segre (21) en Pirineos, bajo Llobregat (27) en la costero Catalana y Alfambra-Turia (33) en la cordillera Ibérica (resaltadas en gris en la Tabla 9). También se acortaron en su extensión hacia el mar las zonas Bajo Se-

gura (41) y Cartagena-Mar Menor (43) en la región de Levante.

## 2.2. Identificación de fallas activas

Es un hecho incuestionable que los terremotos de la corteza terrestre, que son los más destructivos y en consecuencia los que influyen en la peligrosidad, son generados por fallas. El conocimiento actual de fallas activas en la península Ibérica se ha incrementado notablemente en los últimos años debido a diferentes iniciativas y proyectos, de carácter nacional e internacional, desarrollados por numerosos geólogos y paleosismólogos (IberFault, FaseGeo, Share, etc.).

Una de estas iniciativas, llevada a cabo por el IGME (Instituto Geológico y Minero de España), ha sido la base de datos de fallas activas durante el Cuaternario de Iberia (QAFI). Ésta es una herra-

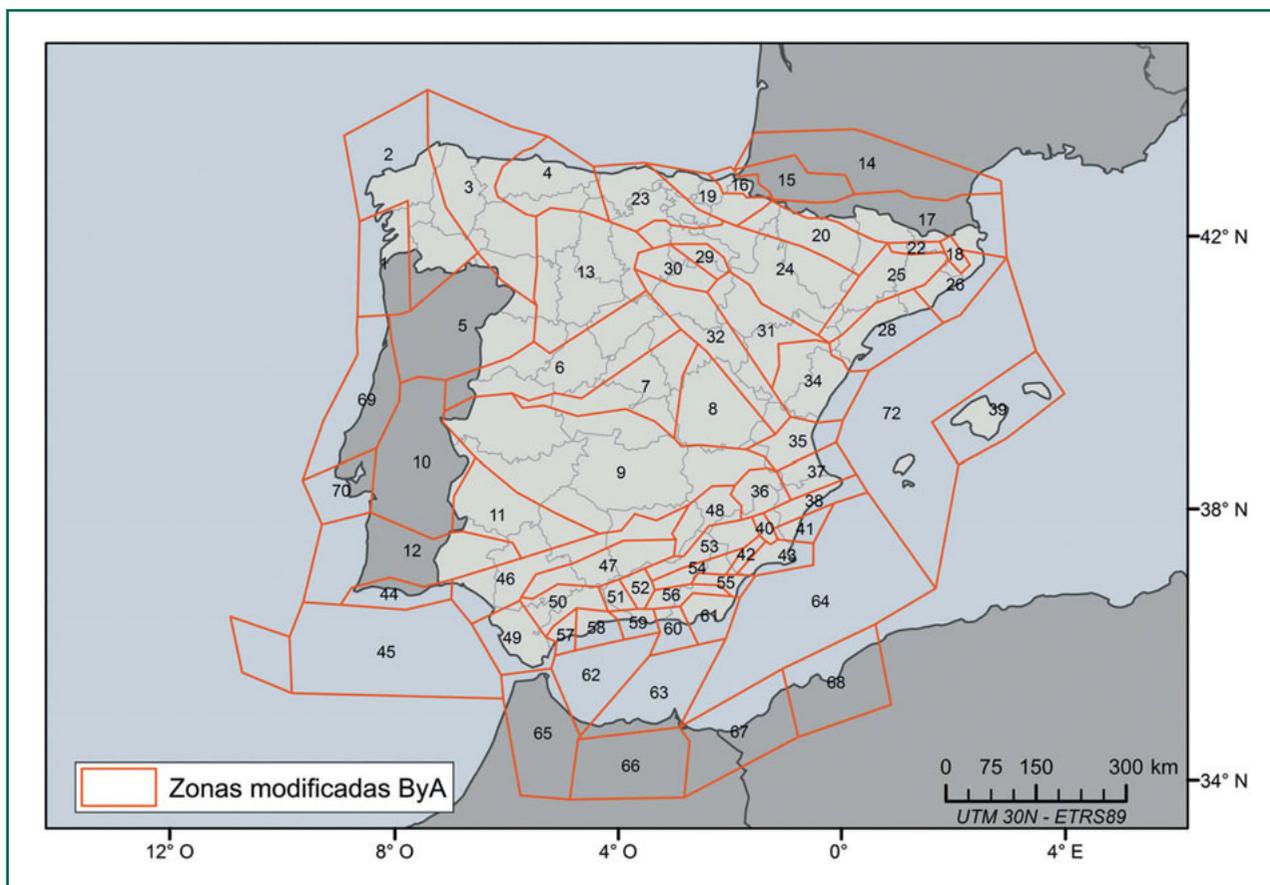


Figura 21 Zonificación final (ByA12) adoptada para el estudio

mienta y un repositorio de información de gran interés para disciplinas y aplicaciones geo-científicas y en particular para los estudios de peligrosidad sísmica.

Por otra parte, hasta ahora, no muchos estudios de peligrosidad han utilizado directamente en los cálculos las fallas como fuentes sísmicas independientes. Tan sólo algunos países con fallas bien identificadas y parametrizadas, en las que se dan altas tasas de deslizamiento y bajos periodos de recurrencia (Estados Unidos, Japón, Nueva Zelanda) han incluido en la evaluación de la peligrosidad fuentes tipo falla. Aunque en este estudio no se han utilizado finalmente las fallas como fuentes sísmicas individuales, la información contenida en la base de datos de fallas activas ha sido de gran utilidad para la realización del proyecto, en cuanto a la delimitación de zonas y la estimación de magnitudes máximas.

### 2.2.1. QAFI: Base de datos de fallas activas cuaternarias de Iberia

Esta base de datos es una iniciativa promovida por el IGME y por el grupo de trabajo IBERFAULT (García-Mayordomo *et al.* 2010b, 2012b, 2012c; IGME, 2012) en la que se pretende inicialmente llevar a cabo una actualización de las bases de datos de fallas con actividad neotectónica y la asignación de parámetros sísmicos a las fallas activas durante el Cuaternario, incluyendo sus rangos de incertidumbre. Su objetivo es, además, dar a esta información un carácter público y divulgativo.

La primera presentación de esta idea se realiza en la reunión de IBERFAULT 2010 (Primera Reunión Ibérica sobre Fallas Activas y Paleosismología). En ella se presenta una primera versión de esta BD y se invita a la contribución y recopilación

de trabajos específicos para incorporar más información en fases sucesivas.

Los objetivos de la base de datos QAFI se concretan en identificar y registrar sólo las fallas que presenten evidencias (geológicas y sismológicas) de actividad durante el Cuaternario, lo que corresponde a los últimos 2.6 millones de años (según los límites establecidos internacionalmente por la SQS-Subcommission on Quaternary Stratigraphy en 2009). Este límite temporal, más amplio que el considerado en otros países de actividad mayor, se considera especialmente adecuado para el contexto Ibérico, donde la velocidad de las fallas es menor y los ciclos sísmicos más largos.

La versión actual de esta base de datos es QAFI v2.0 (diciembre 2011) y contiene un total de 262 registros correspondientes a 241 fallas simples o segmentos de falla y a 21 fallas multisegmento.

Una representación de éstas puede verse en la Figura 22, donde se muestra una vista de la versión online.

Cada falla o segmento incorpora diferentes campos o parámetros (junto con su variabilidad y fuente de información), que están agrupados en las siguientes categorías:

- *Identificación-Compilación*: Coordenadas y nombre de la falla y/o segmento, datos del compilador de los datos, etc.
- *Geometría y cinemática*: Datos geométricos y de sentido de movimiento de la falla.
- *Actividad Cuaternaria*: Edad de la deformación, evidencias geomorfológicas, tasas de deslizamiento, datos paleosísmicos.
- *Parámetros sísmicos*: Máxima magnitud, periodo de recurrencia, fecha del último evento.



Figura 22. QAFI v2.0, versión online: [www.igme.es/infoigme/aplicaciones/QAFI](http://www.igme.es/infoigme/aplicaciones/QAFI). (Mapa de fondo de Google maps). Último acceso Octubre 2012.

- *Sismicidad asociada*: Datos de terremotos instrumentales y/o históricos asociados a la falla.
- *Referencias y datos complementario*: Fichero pdf conteniendo información adicional (fotos, mapas, figuras, etc) y listado de referencias.

Una visión general de los datos contenidos en QAFI y sus características puede obtenerse en los trabajos anteriormente citados (García-Mayordomo *et al.* 2012b, 2012c). A modo de resumen se destacan a continuación algunos aspectos relevantes:

- La mayoría de los registros pertenecen a las cordilleras Béticas (109). La cinemática más frecuente en la base de datos es normal pura, 47%; seguida de direccional, 39%; e inversa con el 14% de los registros. En la Figura 23 se muestra además del número de registros por región geológica, las frecuencias relativas de los mecanismos de falla que se dan en esas regiones.

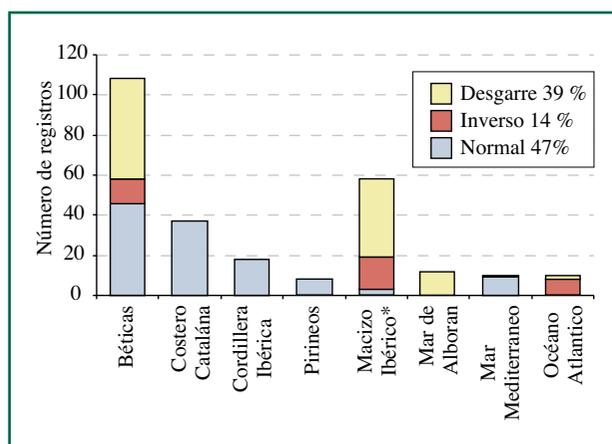


Figura 23.-Cinemática predominante de las fallas por región geológica según la base de datos QAFI. Los porcentajes indican las frecuencias relativas de cada tipo de mecanismo en esa región (adaptado de García-Mayordomo *et al.* 2012 c).

- El 70% de los registros de la base de datos son fallas, o segmentos de falla, de longitud menor de 30 km. El intervalo de longitud más frecuente (26%) es 5-10 km. Las fallas con longitudes mayores de 50 km son generalmente submarinas y se sitúan en la zona Atlántica. Las fallas más largas de la BD se localizan en el macizo Ibérico y orlas Portuguesas.

- Las tasas de deslizamiento han sido estimadas en su mayor parte por los compiladores. La tasa de deslizamiento vertical es el dato más frecuente. La tasa de deslizamiento promedio (vertical o neta) para toda la base de datos es 0.10 m/ka. Por otra parte, las tasas de deslizamiento más rápidas se dan en las fallas de Carboneras (1.10 m/ka), Alhama de Murcia (0.50 m/ka) y Carrascoy (0.54 m/ka). El error medio de todas las estimaciones de la tasa de deslizamiento es  $\pm 0.04$  m/ka, aunque en algunos casos este dato alcanza un valor de  $\pm 0.4$  m/ka.
- La magnitud máxima es un dato estimado, prácticamente en todos los registros, principalmente basado en las regresiones de la magnitud frente a longitud de la rotura superficial, empleando las relaciones de Wells y Coppersmith (1994) o bien de Stirling *et al.* (2002) y de Scholz (2002).
- Aproximadamente la mitad de los registros que proporcionan una magnitud máxima dan también su periodo de recurrencia. Éste es generalmente estimado a partir de la ecuación de Wesnousky (1986) que relaciona la tasa de deslizamiento y el momento sísmico del terremoto máximo (estimado generalmente por su magnitud momento). Además, en 10 registros se han estimado recurrencias por datación de eventos antiguos identificados mediante técnicas paleosismológicas.
- Finalmente, el 20% de los registros contiene asociaciones de la falla con eventos sísmicos concretos. El total de estos eventos es 83 y pertenecen mayoritariamente al periodo histórico (pre-1920).

### 2.2.2. Utilización de las fallas activas en el cálculo de la peligrosidad

En el presente estudio no se han considerado finalmente fuentes sísmicas tipo falla, sino tan sólo zonas. La razón principal está en las bajas tasas de deslizamiento y los altos periodos de recurrencia (de la magnitud máxima) en las fallas activas mejor identificadas y caracterizadas. Ello supone que van

a tener muy poca influencia para los periodos de retorno considerados en los mapas de peligrosidad, principalmente 475 y 975, y que por tanto la utilización de zonas va a resultar más conservadora. Sin embargo, se reconoce la necesidad de profundizar en estudios en los que puedan cuantificarse con más exactitud éstas estimaciones, que en última instancia dependen notablemente de la precisión en la estimación de los parámetros sísmicos de las fallas.

En este sentido, la inclusión de la zona 55 en la zonificación GM12, responde a la idea de acotar en una sola zona, casi tipo falla, todas las estructuras destacadas de la zona de cizalla de las Béticas Orientales en el SE de España (García-Mayordomo *et al.*, 2012d).

Por otra parte, en lo que respecta a la definición de zonas, como también se ha visto anteriormente, diferentes zonas fueron reajustadas, principalmente en la zonificación GM12 (en parte también en ByA12) en función del conocimiento actual aportado por la base de datos QAFI con el fin de que sus límites no cortaran estructuras catalogadas como activas.

Otra aplicación directa del conocimiento recopilado en la mencionada base de datos sobre las fallas activas ha sido la estimación de la magnitud máxima en las zonas sismogénicas donde existían fallas activas bien parametrizadas. En esos casos, este valor se ha obtenido a partir de las longitudes de los segmentos de falla catalogados mediante una relación entre la magnitud máxima y la longitud de rotura.

## 2.3. Caracterización sísmica de las fuentes

### 2.3.1. Metodología

Cuando se utiliza un método zonificado en el cálculo de peligrosidad, la sismicidad de cada zona se debe caracterizar por una ley de recurrencia que relacione el tamaño de sismos contenidos en dicha zona con su frecuencia, para expresar la distribución temporal de magnitudes. En el análisis probabilista de la peligrosidad sísmica (PSHA) se asume que la ley de recurrencia que se obtiene a partir de la sismicidad pasada es extrapolable para la predicción de sismicidad en el futuro.

El modelo de recurrencia que se va a emplear en este estudio se basa en el modelo de distribución ex-

ponencial de magnitudes de una región, propuesto por Gutenberg-Richter (Gutenberg y Richter 1944, Richter 1958). Éste establece una proporción constante entre el número de sismos grandes frente a pequeños, asumiendo que el logaritmo del número acumulativo de sismos que superan cada grado de magnitud varía linealmente con este parámetro.

$$\log N = a - b \cdot M \quad [7]$$

Donde  $M$  es la magnitud,  $N(M)$  es el número de sismos que tienen magnitud igual o mayor que  $M$ , y  $a$  y  $b$  son constantes. El parámetro  $b$  representa la proporción entre sismos grandes y pequeños en la zona, mientras que  $a$  es el logaritmo del número de terremotos con magnitud mayor o igual que cero. Es habitual expresar esa fórmula en términos de logaritmo neperiano, de modo que:

$$\ln N(M) = \alpha - \beta M \quad [8]$$

de donde  $N(M) = \exp(\alpha - \beta M)$ , siendo  $\beta = b \cdot \ln 10$  y  $\alpha = a \cdot \ln 10$ .

La tasa anual de ocurrencia de terremotos  $\tau(M)$  que superan una magnitud dada se obtiene dividiendo el número de terremotos  $N$  por el número de años  $TC$  (periodo de tiempo que cubre el catálogo empleado para el ajuste, en este caso desde 1048 hasta el 2011). De este modo, la ecuación [8] se puede expresar:

$$\tau(M) = \frac{N(M)}{TC} = \frac{e^{\alpha - \beta M}}{TC} \quad [9]$$

Como parámetros característicos de la sismicidad de una zona, en peligrosidad se suelen emplear, junto con la magnitud máxima esperable en la misma, otros dos parámetros de sismicidad: el parámetro  $\beta$  y la tasa de actividad  $\tau(M_{\min})$  o número de sismos por unidad de tiempo que superan la magnitud mínima de referencia considerada, (es decir la tasa  $\tau$  que se obtiene al hacer  $M = M_{\min}$  en la ecuación [9]). Por otra parte, la distribución de magnitudes se trunca en un valor superior  $M_{\max}$  basado en la idea de una limitación tectónica (o de geología estructural) para poder generar terremotos mayores que ese valor en esa zona.

Gutenberg y Richter usaron el método de los mínimos cuadrados para estimar los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$

en esta relación. Este método trata de minimizar la suma cuadrática de los residuos que se obtienen al ajustar a una recta el número acumulativo de sismos que superan diferentes grados de magnitud. Mediante el ajuste se obtienen los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ . Una de las ventajas más destacables de este método es su sencillez e inmediata aplicabilidad. Sin embargo, éste método también presenta algún inconveniente al aplicarlo en el caso específico de la ley de Gutenberg-Richter, como es la dependencia entre sí de los puntos que estamos ajustando, dado que las tasas de las magnitudes bajas incluyen eventos observados de magnitudes mayores.

Como alternativa, se ha comprobado que el método de máxima verosimilitud (Aki, 1965; Bender, 1983) es una técnica de mayor solidez que la de mínimos cuadrados y se acerca más al valor real de  $\beta$  cuando el número de sismos grandes es variable (Sha y Bolt, 1982). Éste método maximiza la probabilidad de ocurrencia conjunta de una serie de variables aleatorias independientes. Existen diferentes métodos para estimar los parámetros de sismicidad mediante la técnica de máxima verosimilitud. De todos ellos, este estudio se ha centrado en el método de Weichert (1980), el cual permite tener en cuenta diferentes periodos de completitud dependiendo de la magnitud y llegar a obtener, mediante un proceso iterativo, una buena aproximación del parámetro  $\beta$  y de su incertidumbre.

### 2.3.2. Cálculo de los parámetros de sismicidad

Cada una de las dos zonificaciones seleccionadas para éste estudio requiere una forma diferente de cálculo de los parámetros de sismicidad ( $\beta$  y tasa de cada zona  $\tau$ ). Estas dos alternativas permiten incorporar al cálculo de la peligrosidad sísmica la incertidumbre epistemológica, asociada a la caracterización de los parámetros sísmicos de la fuente, con dos criterios diferentes.

#### *$\beta$ y tasas ( $\tau$ ) por zonas*

En este caso se supone que los parámetros de sismicidad que caracterizan cada zona se basan única y exclusivamente en la sismicidad contenida en su interior. Eso significa que ninguna zona com-

parte parámetros de sismicidad con otras adyacentes. Son fuentes sísmicas independientes y la alta o baja sismicidad de la vecindad no altera los parámetros de la zona. Este procedimiento se ha aplicado a la zonificación GM12.

#### *$\beta$ por regiones y tasas ( $\tau$ ) por zonas*

El cálculo de los parámetros de sismicidad se hace en dos pasos: el parámetro  $\beta$  y su desviación estándar  $\sigma_\beta$  se realiza en regiones amplias que incluyen varias zonas sismogénicas. Seguidamente se calcula la tasa  $\tau$  y la magnitud máxima  $M_{\text{máx}}$  de cada zona individualmente, lo que hace que se tenga en cuenta específicamente el potencial sísmico de cada una de ellas. Este procedimiento se ha aplicado a la zonificación de ByA, desarrollada inicialmente en regiones y zonas para ser tratada de esta forma. Ésta contiene zonas pequeñas, a veces sin suficiente sismicidad para una modelización independiente, por lo que necesariamente el ajuste de  $\beta$  debe ser regional.

#### 2.3.2.1. Análisis de los ajustes de la recta de Gutenberg-Richter (GR)

Una vez identificada la metodología de cálculo de los parámetros de la recta de Gutenberg-Richter que caracterizarán la sismicidad de las zonas (para cada una de las dos zonificaciones utilizadas) se ha realizado un análisis de datos por zonas con el siguiente objetivo:

- Comprobar si en cada una de las zonas hay sismicidad suficiente para determinar los parámetros de la relación de Gutenberg-Richter.
- Comprobar si la distribución de magnitudes en cada zona se ajusta correctamente a una recta, proponiéndose soluciones alternativas en caso contrario.

Al realizar dicho análisis se comprobó que, por lo general, todas las zonas cumplían estos dos objetivos primordiales. Sin embargo, se detectaron algunos casos concretos a estudiar en ambas zonificaciones y en los cuales se han realizado algunos cambios para mejorar así el ajuste de la recta obtenida en cada caso. Se han encontrado en general dos tipos: por un lado, zonas en las cuales la recta

no se ajustaba correctamente a la distribución de magnitudes y por otro lado, casos en los que la distribución de la sismicidad se ajustaba mejor a una ley bilineal (zonas situadas en el banco de Gorringer).

### 2.3.2.2. Magnitud máxima esperada

La magnitud máxima esperada en cada zona no se ha considerado como un valor único, sino que se ha tenido en cuenta su incertidumbre por medio de una distribución normal (caracterizada por la magnitud máxima media  $MM_{med}$  y la desviación estándar) truncada con un valor mínimo (magnitud máxima mínima,  $MM_{mín}$ ) y un valor máximo (magnitud máxima máxima,  $MM_{máx}$ ) (Figura 24).

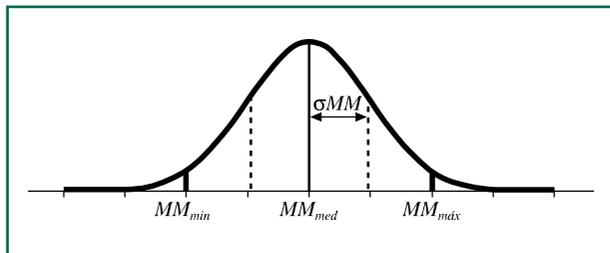


Figura 24. Función de distribución normal de la magnitud máxima esperada en una zona.

Para estimar esta distribución de magnitudes máximas, se han tomado como datos de partida las fallas activas que hay en cada zona y que están publicadas en la base de datos QAFI, (IGME, 2012; García-Mayordomo *et al.*, 2012c). Con esta base de datos, se han podido identificar todas las fallas activas contenidas en cada zona. Utilizando la longitud de la traza y la relación propuesta por Stirling *et al.* (2002) se ha estimado la magnitud máxima de cada zona. En este estudio, se han considerado las fallas divididas en los segmentos definidos por los compiladores de la base de datos.

No en todas las zonas de estudio se ha podido establecer la magnitud máxima a partir de las fallas activas debido a la falta de conocimiento de las mismas en la zona. En estos casos la magnitud máxima ha sido establecida partiendo de la máxima observada en el catálogo sísmico.

La información de partida para establecer la distribución de magnitud máxima de cada zona ha sido,

por tanto, la longitud de las fallas activas o bien los terremotos máximos derivados del catálogo sísmico, junto con la desviación estándar en cada caso.

A continuación se muestra la división en tipos de zona, el planteamiento seguido en cada una de ellas y un ejemplo gráfico del proceso realizado para determinar la correspondiente distribución. En todos los casos, independientemente del tipo de zona, la magnitud máxima mínima (o truncamiento inferior de la distribución) ha sido la máxima observada en el catálogo.

Todas las distribuciones normales de magnitud máxima han sido después analizadas desde un punto de vista experto y en algunos casos, la magnitud máxima de truncamiento ha sido disminuida, por considerar el valor asignado con el procedimiento descrito, excesivamente exagerado, por encima de las estimaciones más conservadoras.

#### *Zonas cuya magnitud máxima ha sido asignada con la tectónica*

Se han denominado así las zonas de las que se conocen suficientes fallas activas como para desarrollar una función de distribución gaussiana, con las magnitudes máximas esperadas en ellas.

La función de distribución normal se ha construido (Figura 25) identificando:

- *Magnitud máxima mínima:* Magnitud máxima observada en el catálogo ( $MMO$ ).
- *Magnitud máxima máxima:* Magnitud máxima esperada en las fallas activas de la zona ( $MMG$ ).
- *Magnitud máxima media:* Magnitud media de las fallas activas de la zona ( $MMmG$ ).
- *Desviación estándar:* Desviación estándar de las magnitudes de las fallas activas de la zona ( $\sigma G$ ).

#### *Zonas cuya magnitud máxima ha sido asignada con la sismicidad*

Son zonas en las que no se dispone de fallas activas o bien las magnitudes máximas extraídas a partir de las fallas son inferiores a las registradas por el catálogo. Para crear la función de distribución de magnitudes se ha considerado la magnitud

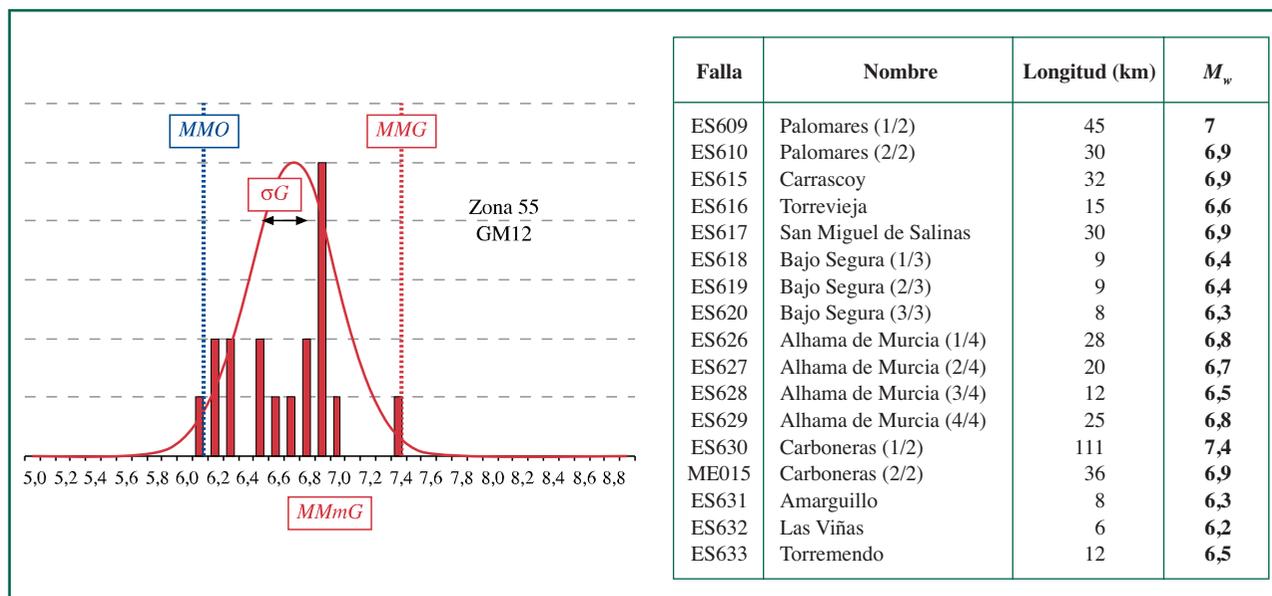


Figura 25. Gráfico con la función de distribución y el histograma de magnitudes en una zona en la que la función de distribución de la magnitud máxima esperada ha sido asignada a partir de datos de tectónica (izquierda) y lista de fallas activas de la zona con su longitud y  $M_w$  deducida (derecha).

máxima observada en el catálogo y la incertidumbre asociada a ella.

En este caso, la función de distribución se asumirá simétrica entre la magnitud máxima observada en el catálogo ( $MMO$ ) y la magnitud máxima observada en el catálogo más la incertidumbre asociada a esta ( $MMO + \sigma Mobs$ ) (Figura 26).

- *Magnitud máxima mínima*: Magnitud máxima observada en el catálogo ( $MMO$ ).
- *Magnitud máxima máxima*: Magnitud máxima observada más su incertidumbre ( $MMO + \sigma Mobs$ ).
- *Magnitud máxima media*: Magnitud máxima observada más la mitad de la incertidumbre asociada a ella ( $MMO + \sigma Mobs/2$ ).
- *Desviación estándar*: Mitad de la incertidumbre de la magnitud máxima observada ( $\sigma Mobs/2$ ).

*Zonas cuya magnitud máxima ha sido asignada con la sismicidad y la tectónica*

Son aquellas zonas en las que se tiene alguna información de fallas activas en su interior, pero no suficiente para desarrollar una función de distribu-

ción de magnitudes. En estos casos, la distribución se ha estimado con información de esas fallas complementada con el catálogo sísmico, cuya información es utilizada, pero el umbral superior de la magnitud máxima se estima por la información de las fallas activas (Figura 27).

- *Magnitud máxima mínima*: Magnitud máxima observada en el catálogo ( $MMO$ ).
- *Magnitud máxima máxima*: Magnitud máxima esperada por las fallas de la zona ( $MMG$ ).
- *Magnitud máxima media*: Magnitud máxima observada más la mitad de la incertidumbre asociada a ella ( $MMO + \sigma Mobs/2$ ).
- *Desviación estándar*: Mitad de la incertidumbre de la magnitud máxima observada ( $\sigma Mobs/2$ ).

### 2.3.3. Parámetros de sismicidad resultantes

En las Tablas 10 y 11 se muestran los parámetros de sismicidad resultantes de modelizar la recurrencia de las dos zonificaciones, con las variantes expuestas. Asimismo, en las Figuras 28, 29 y 30 se indican los valores de la tasa normali-

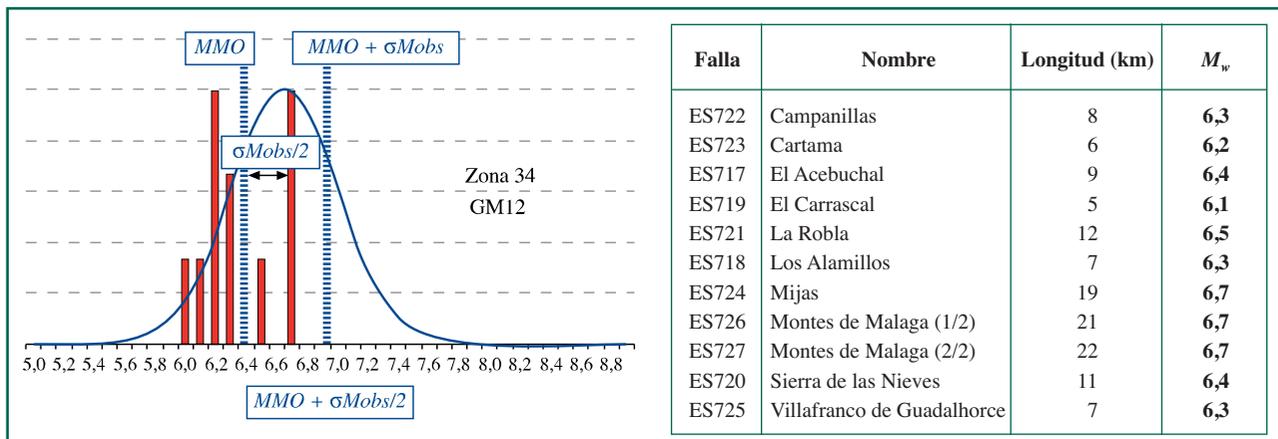


Figura 26. Gráfico con la función de distribución y el histograma de magnitudes en una zona en la que la función de distribución de la magnitud máxima esperada ha sido asignada a partir de datos de sismicidad (izquierda) y lista de fallas activas de la zona con su longitud y  $M_w$  deducida (derecha).

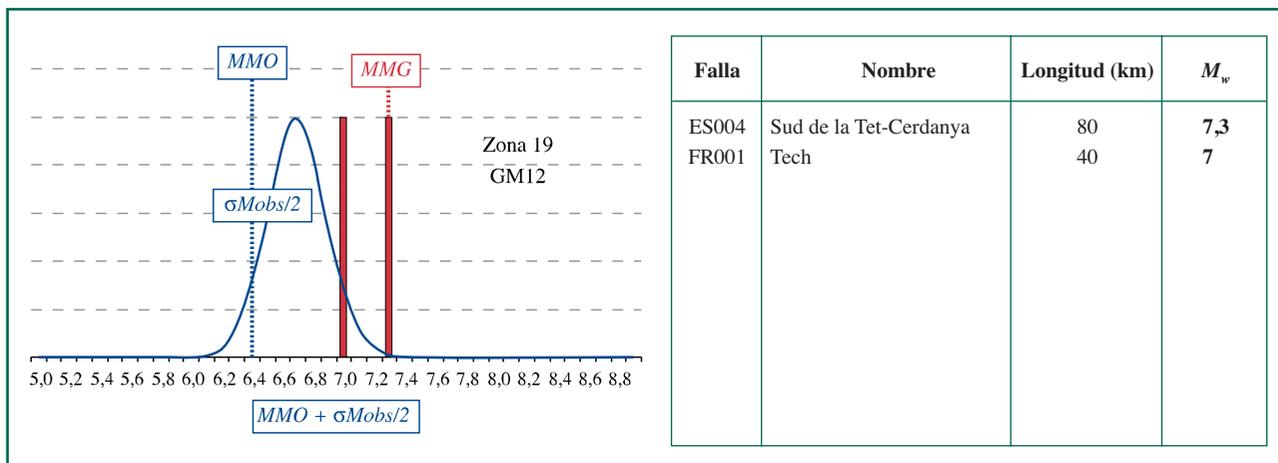


Figura 27. Gráfico con la función de distribución y el histograma de magnitudes en una zona en la que la función de distribución de la magnitud máxima esperada ha sido asignada a partir de datos de tectónica y de sismicidad (izquierda) y lista de fallas activas de la zona con su longitud y  $M_w$  deducida (derecha).

zada, la magnitud máxima media y cuál ha sido el criterio para determinar la magnitud máxima (tectónica o sismicidad) para las zonas de las dos zonificaciones empleadas. En estas tablas, las zonas

que carecen de terremotos suficientes como para desarrollar el ajuste de Gutenberg-Richter no dan los valores numéricos de los parámetros de sismicidad.

TABLA 10

*Parámetros de sismicidad de las zonas de la zonificación GM12 (tasa  $\tau(4.0)$ , beta de la ley de Gutenberg-Richter —valor medio  $\beta$  y desviación estándar  $\sigma_\beta$ — de los catálogos simulados, obtenidas mediante los dos tipos de ajuste —máxima verosimilitud y mínimos cuadrados— y parámetros de la función de distribución de la magnitud máxima —valor medio  $MM_{med}$ , desviación estándar  $\sigma_{MM}$  y límites mínimo  $MM_{mín}$  y máximo de truncamiento  $MM_{máx}$ —*

ZONAS SOMERAS										
Zona	Máxima verosimilitud			Mínimos cuadrados			Función de distribución de la magnitud máxima			
	$\tau(4.0)$	$\beta$	$\sigma_\beta$	$\tau(4.0)$	$\beta$	$\sigma_\beta$	$MM_{med}$	$\sigma_{MM}$	$MM_{mín}$	$MM_{máx}$
1	0.075	1.827	0.407	0.082	1.794	0.106	6.6	0.4	6.2	7.0
2	0.330	2.243	0.263	0.315	2.397	0.130	5.7	0.3	5.4	6.9
3	0.071	3.232	0.709	0.081	2.782	0.227	5.5	0.3	5.1	5.9
4	0.064	2.620	0.651	0.075	2.130	0.185	5.8	0.4	5.4	6.2
5	0.048	3.049	0.895	0.054	2.340	0.208	5.2	0.2	5.0	5.4
6	0.205	2.375	0.342	0.186	2.251	0.096	5.7	0.3	5.4	6.9
7	0.159	2.079	0.403	0.160	2.446	0.115	5.7	0.3	5.4	6.9
8	0.126	2.050	0.279	0.125	1.749	0.078	7.2	0.4	6.8	7.6
9	0.214	1.844	0.206	0.237	1.995	0.050	6.8	0.3	6.5	7.2
10	0.289	2.219	0.264	0.281	2.300	0.156	6.3	0.3	5.7	6.8
11	0.085	2.492	0.481	0.084	1.972	0.123	6.1	0.2	5.9	6.3
12	0.098	3.269	0.651	0.098	2.962	0.189	5.1	0.3	4.9	6.4
13	0.141	2.024	0.500	0.126	2.446	0.257	6.5	0.2	6.0	6.9
14	0.115	2.333	0.552	0.110	2.308	0.148	5.5	0.4	5.1	5.9
15	0.131	2.872	0.861	0.077	4.466	0.390	5.7	0.3	4.6	6.0
16	0.679	2.677	0.162	0.653	2.479	0.080	6.5	0.3	6.2	6.8
17	0.169	2.510	0.360	0.174	2.426	0.099	6.0	0.3	5.7	6.3
18	0.177	2.026	0.271	0.184	2.110	0.097	6.4	0.2	6.2	6.6
19	0.105	2.255	0.342	0.101	1.889	0.096	6.7	0.2	6.5	6.9
20	0.102	2.870	0.485	0.105	2.237	0.126	6.0	0.3	5.7	6.3
21	0.014	5.224	2.320	0.010	6.696	0.504	4.6	0.3	4.3	5.0
22	0.116	1.229	0.628	0.095	1.942	0.227	6.2	0.3	5.9	6.7
23	0.117	2.052	0.197	0.110	2.056	0.040	6.6	0.2	5.6	6.9
24	0.097	0.868	1.044	0.067	2.167	0.261	4.7	0.1	4.6	4.9
25	0.045	0.975	0.645	0.053	1.531	0.158	5.9	0.2	5.7	6.1
26	0.088	2.060	0.539	0.084	1.923	0.144	6.4	0.2	5.4	6.8
27							—			
28	0.192	2.755	0.278	0.186	2.524	0.106	6.7	0.2	6.3	6.9
29	0.184	2.494	0.272	0.191	2.346	0.075	6.6	0.4	6.2	6.9
30	0.074	2.273	0.884	0.060	2.912	0.214	5.0	0.4	4.6	6.3
31	0.237	1.821	0.181	0.259	2.058	0.060	6.6	0.4	6.5	7.1
32	0.061	1.261	0.684	0.060	1.683	0.211	5.8	0.4	5.4	6.5
33	0.084	2.103	0.528	0.081	2.158	0.111	5.8	0.4	5.4	6.4
34	0.188	2.360	0.249	0.198	2.314	0.056	6.6	0.3	6.3	7.0
35	0.531	2.529	0.151	0.576	2.577	0.073	6.8	0.3	6.5	7.1
36	0.141	2.405	0.302	0.141	2.265	0.065	6.6	0.4	6.2	7.0

TABLA 10 (continuación)

ZONAS SOMERAS										
	Máxima verosimilitud			Mínimos cuadrados			Función de distribución de la magnitud máxima			
Zona	$\tau(4.0)$	$\beta$	$\sigma_\beta$	$\tau(4.0)$	$\beta$	$\sigma_\beta$	$MM_{med}$	$\sigma MM$	$MM_{min}$	$MM_{max}$
37	0.381	2.297	0.225	0.390	2.670	0.118	6.8	0.2	5.4	7.0
38	0.324	2.305	0.179	0.317	2.210	0.050	6.7	0.2	6.5	6.9
39	0.079	2.932	0.693	0.081	3.095	0.200	6.7	0.1	4.9	6.9
40	0.132	2.210	0.299	0.133	2.158	0.068	6.5	0.3	6.0	6.8
41	0.138	2.764	0.616	0.126	3.101	0.179	6.5	0.4	4.7	6.9
42	0.220	2.150	0.294	0.226	1.977	0.067	6.8	0.3	6.5	7.1
43	0.837	2.270	0.167	0.889	2.460	0.065	7.0	0.2	6.2	7.3
44	0.289	1.851	0.284	0.300	2.071	0.068	6.4	0.4	6.0	7.4
45	0.586	1.968	0.158	0.577	1.837	0.042	7.3	0.5	6.8	7.9
46	0.752	1.752	0.123	0.791	1.791	0.038	7.5	0.3	7.2	7.9
47	0.898	1.775	0.112	0.947	1.775	0.040	7.6	0.4	7.3	8.1
48	0.748	2.404	0.168	0.709	2.165	0.061	6.8	0.1	6.6	7.1
49	1.127	2.526	0.079	1.148	2.956	0.065	6.0	0.1	5.9	6.2
50A*	1.048	2.604	0.089	1.026	2.753	0.090	8.7	0.2	8.5	8.9
50B*	0.020*	0.353	0.127	0.022	0.978	0.087	5.9	0.1	5.7	6.1
51	0.682	2.238	0.182	0.634	2.110	0.061	6.8	0.3	6.6	7.1
52	0.155	2.444	0.441	0.156	1.971	0.165	6.4	0.2	6.2	7.1
53	0.079	1.780	0.722	0.080	1.490	0.133	5.7	0.2	5.5	7.0
54	0.100	1.716	0.414	0.112	1.637	0.106	6.9	0.4	6.5	7.3
55	0.528	2.035	0.126	0.628	2.372	0.062	6.7	0.3	6.6	7.4
ZONAS PROFUNDAS										
	Máxima verosimilitud			Mínimos cuadrados			Función de distribución de la magnitud máxima			
Zona	$\tau(4.0)$	$\beta$	$\sigma_\beta$	$\tau(4.0)$	$\beta$	$\sigma_\beta$	$MM_{med}$	$\sigma MM$	$MM_{min}$	$MM_{max}$
101	0.100	3.411	0.213	0.106	2.878	0.275	5.8	0.1	5.5	6.0
102	0.452	2.500	0.116	0.450	2.447	0.053	6.3	0.1	6.1	6.6
103	0.348	2.669	0.160	0.340	2.784	0.146	5.7	0.1	5.4	5.9
104	0.169	0.375	0.387	0.115	2.175	0.195	5.0	0.1	4.8	5.3

\* Zona con ajuste bilineal.

50B corresponde a una recta truncada en  $M_{min} = 4.0$  y  $M_{max} = 5.7$ .

50A corresponde a una recta truncada en  $M_{min} = 5.7$  y  $M_{max} = 8.5$ . En la zona 50A la tasa es sobre su  $M_{min}$ ,  $\tau(5.7)$ .

TABLA 11

Parámetros de sismicidad de la zonificación ByA12 (tasa  $\tau(4.0)$ , beta de la ley de Gutenberg-Richter —valor medio  $\beta$  y desviación estándar  $\sigma_\beta$ — de los catálogos simulados, obtenidas mediante los dos tipos de ajuste —máxima verosimilitud y mínimos cuadrados— y parámetros de la función de distribución de la magnitud máxima —valor medio  $MM_{med}$ , desviación estándar  $\sigma_{MM}$  y límites mínimo  $MM_{min}$  y máximo de truncamiento  $MM_{max}$ —

Zona	$\tau(4.0)$	Región	Máxima verosimilitud		Mínimos cuadrados		Función de distribución de la magnitud máxima			
			$\beta$	$\sigma_\beta$	$\beta$	$\sigma_\beta$	$MM_{med}$	$\sigma_{MM}$	$MM_{min}$	$MM_{max}$
1	0.194	Hespérico	2.613	0.050	2.827	0.106	5.7	0.3	5.4	6.0
2	0.068						5.7	0.3	5.4	6.0
3	0.172						5.8	0.4	5.4	6.9
4	0.033						5.2	0.3	4.9	5.4
5	0.106						5.7	0.3	5.4	6.9
6	—						—	—	—	—
7	0.038						4.6	0.3	4.3	6.9
8	0.023						5.2	0.3	4.9	5.4
9	0.052						4.9	0.2	4.7	6.9
10	0.234						6.3	0.3	6.0	6.7
11	0.077						6.1	0.2	5.9	6.3
12	0.218						5.9	0.2	5.7	7.0
13	0.023						5.0	0.4	4.6	5.4
14	0.033	Pirineos	2.726	0.046	2.672	0.060	4.9	0.2	4.7	5.1
15	0.738						6.5	0.3	6.2	6.8
16	0.027						5.5	0.4	5.1	5.9
17	0.369						6.7	0.2	6.5	6.8
18	0.023						6.2	0.3	5.9	6.6
19	0.055						5.2	0.3	4.9	5.4
20	0.036						6.0	0.3	5.7	6.3
22	0.019						6.3	0.3	6.0	6.5
23	0.043						5.2	0.2	5.0	5.4
24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
26	0.113	Costero catalana	2.048	0.156	2.283	0.106	6.1	0.4	5.7	6.7
28	0.061						5.7	0.3	5.4	6.5
29	0.025	Ibérica	1.825	0.191	1.965	0.155	5.9	0.2	5.7	6.1
30	—						—	—	—	—
31	0.015						5.7	0.3	5.4	6.4
32	0.037						5.7	0.3	5.4	6.4
34	—						—	—	—	—
35	0.069	Levante	2.111	0.048	2.369	0.052	5.8	0.4	5.4	6.8
36	0.071						5.7	0.3	5.4	6.7
37	0.161						6.9	0.4	6.5	7.3
38	0.109						5.2	0.3	4.9	6.4

TABLA 11 (continuación)

Zona	$\tau(4.0)$	Región	Máxima verosimilitud		Mínimos cuadrados		Función de distribución de la magnitud máxima							
			$\beta$	$\sigma_\beta$	$\beta$	$\sigma_\beta$	$MM_{med}$	$\sigma MM$	$MM_{min}$	$MM_{max}$				
39	0.027	Levante	2.111	0.048	2.369	0.052	5.8	0.4	5.4	6.5				
40	0.151						6.0	0.3	5.7	6.8				
41	0.229						6.7	0.1	6.6	6.8				
42	0.078						6.4	0.4	6.0	6.8				
43	0.039						5.3	0.4	4.9	6.4				
44	0.101	Béticas	2.605	0.021	2.697	0.037	6.6	0.6	6.0	7.1				
45	1.590						6.9	0.2	6.7	7.5				
46	0.141						6.6	0.4	6.2	6.9				
47	0.146						6.7	0.4	6.3	6.9				
48	0.039						4.4	0.2	4.2	5.7				
49	0.091						5.2	0.3	4.9	6.4				
50	0.294						5.8	0.4	5.4	6.2				
51	0.209						6.6	0.1	6.5	6.7				
52	0.313						6.7	0.4	6.3	7.1				
53	0.160						5.7	0.3	5.4	6.6				
54	0.063						6.6	0.4	6.2	6.6				
55	0.141						6.6	0.4	6.2	7.0				
56	0.042						5.7	0.3	5.4	6.0				
57	0.008						5.2	0.3	4.9	6.4				
58	0.094						6.7	0.4	6.3	7.1				
59	0.086						6.7	0.4	6.3	7.1				
60	0.228						6.7	0.3	6.4	6.9				
61	0.298						6.7	0.2	6.5	6.8				
62	0.303						6.3	0.3	6.0	6.6				
63	0.693						6.5	0.3	6.2	7.0				
64	0.207						6.0	0.3	5.7	7.2				
65	0.330	6.8	0.3	6.5	7.1									
66	0.418	5.7	0.3	5.4	6.0									
67	0.211	5.8	0.0	5.7	7.2									
68	0.482	7.4	0.6	6.8	7.9									
69	0.216	Portugal	2.027	0.079	2.176	0.051	5.7	0.3	5.4	7.0				
70	0.148						6.9	0.4	6.5	6.9				
71A*	0.069*	Goringe	0.173	0.528	0.586	0.081	8.7	0.2	8.5	8.9				
71B*	0.359						2.033	0.334	2.642	0.174	5.6	0.1	5.3	5.8
72	0.030						5.2	0.3	4.9	6.4				

\* Zona con ajuste bilineal.

71B corresponde a una recta truncada en  $M_{min} = 4.0$  y  $M_{max} = 5.3$ .

71A corresponde a una recta truncada en  $M_{min} = 5.3$  y  $M_{max} = 8.5$ . En la zona 71A la tasa es sobre su  $M_{min}$ ,  $\tau(5.3)$ .

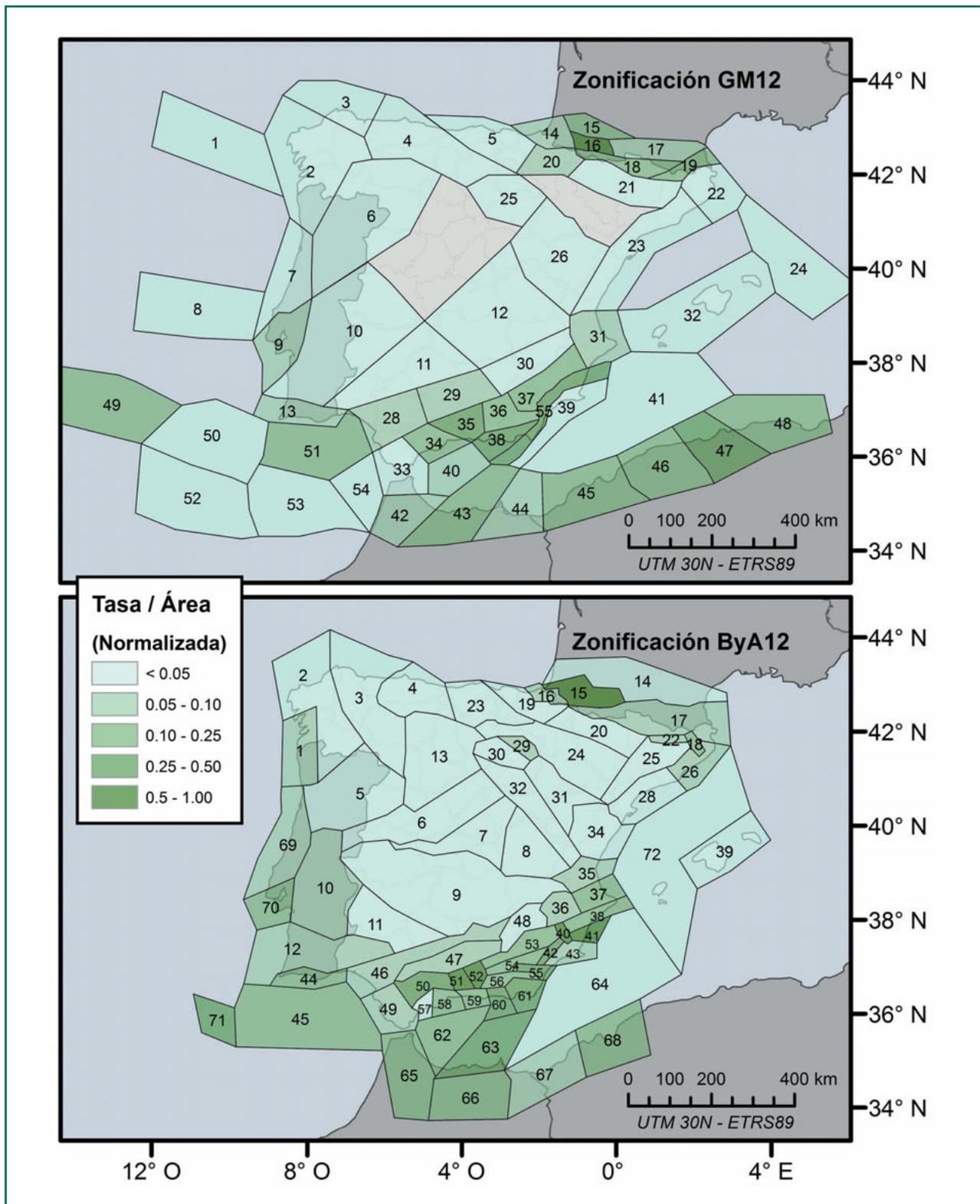


Figura 28. Tasa normalizada de ocurrencia de terremotos (por unidad de área) en cada una de las zonas de las zonificaciones GM12 y ByA12.

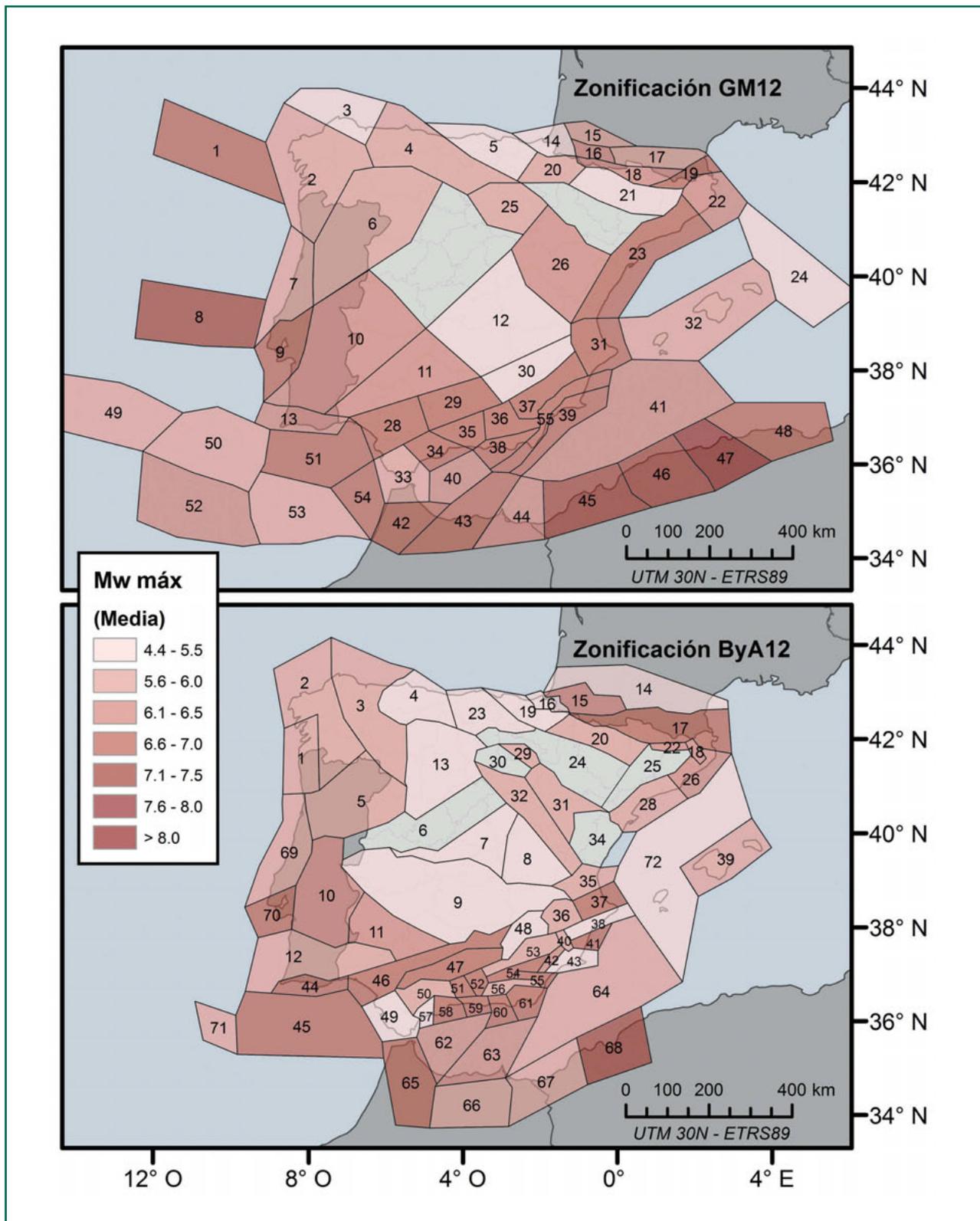


Figura 29: Magnitud máxima (media) de cada una de las zonas de las zonificaciones GM12 y ByA12.

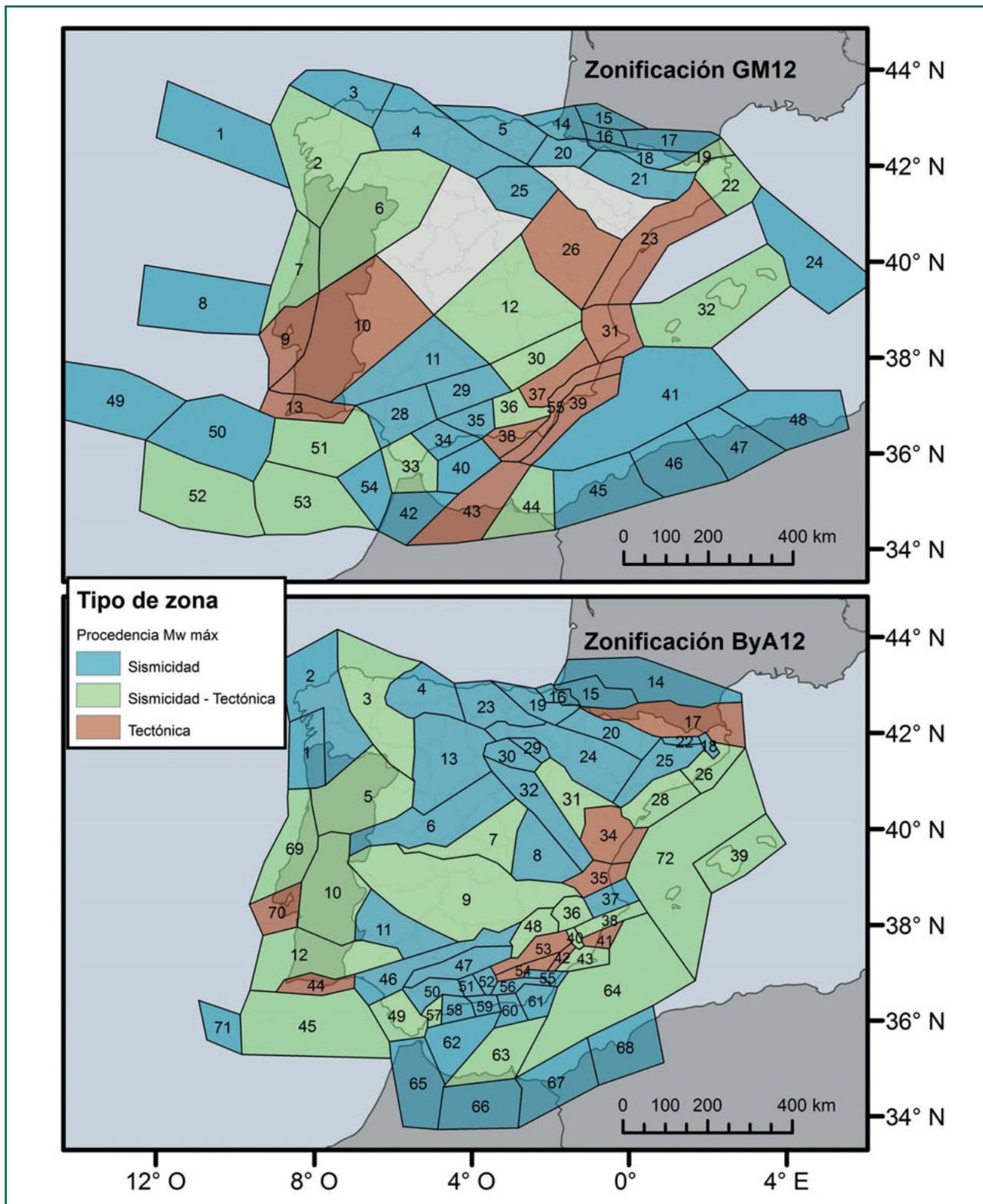


Figura 30. Tipo de zona en función del método seguido para definir la magnitud máxima en cada una de las zonas de las zonificaciones GM12 y ByA12.



# Ecuaciones de predicción del movimiento fuerte

## 3.1. Introducción

Uno de los factores determinantes en el cálculo de la peligrosidad sísmica es el modelo de movimiento fuerte, también denominado ley de atenuación o ecuación de predicción del movimiento fuerte (GMPE, *Ground Motion Prediction Equation*). El 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.

Muchos estudios de peligrosidad sísmica realizados hasta ahora en España, como por ejemplo el realizado para el actual mapa de la Norma NCSE-02, utilizaron como parámetro de movimiento fuerte la intensidad macrosísmica, obteniendo después la aceleración mediante el empleo de una correlación. Se incluyeron entonces leyes de atenuación en términos de intensidad, basadas en datos locales para diferentes regiones de la península Ibérica y zonas adyacentes (Martín, 1983). El planteamiento del presente estudio difiere sustancialmente, ya que el cálculo se realiza empleando la magnitud como parámetro de tamaño de los terremotos y estimando directamente las aceleraciones pico (PGA) y espectrales (SA(T)), asociadas a una probabilidad de excedencia. Ello requiere el empleo de modelos de movimiento fuerte de PGA y de SA(T), derivados de registros de aceleración.

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 sísmicos 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). Por ello, se hace inviable desarrollar un modelo 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. Este aspecto, que es tratado en este capítulo más adelante, ha requerido una revisión y análisis de modelos de movimiento publicados recientemente. Después de preseleccionar aquellos modelos que se consideran, en principio, más idóneos para reproducir la atenuación de la península Ibérica, se realiza con ellos un proceso de calibración, contrastando sus predicciones con los datos reales registrados. Este análisis, que va a permitir identificar los modelos que mejor se ajustan a los datos locales, se

lleva a cabo mediante el método de Scherbaum *et al.* (2004a).

Por otra parte, la evaluación de peligrosidad incluirá magnitudes a partir de  $M_w$  4.0, dado que estamos en una zona de sismicidad moderada en la cual los terremotos con  $M_w$  entre 4.0 y 5.0 presentan una importante contribución. La mayor parte de los modelos publicados para otras regiones del mundo y basados en extensas bases de datos, corresponden a rangos de magnitud por encima de 5.0. Al utilizarlos no deben ser extrapolados para magnitudes menores. En nuestro caso, aplicando estos modelos nos encontramos entonces con el problema de cómo cubrir este rango de magnitudes pequeñas, en las que sin embargo si tenemos registros acelerométricos. Por este motivo, tras la revisión de algunos modelos locales publicados anteriormente y tras un análisis de los datos disponibles se ha optado por desarrollar un nuevo modelo de movimiento fuerte empírico, denominado *modelo propio*, a partir de los datos acelerométricos registrados en España, procedentes de la base de datos del IGN. El fin de este modelo es ser utilizado en el rango de magnitudes  $M_w < 5.0$ .

### 3.2. Revisión y análisis de modelos actuales

Antes de aceptar un GMPE para su utilización en el estudio es esencial conocer sus características (parámetro predicho, forma funcional, rangos de distancia y magnitud, etc.) y su adecuación a las zonas de aplicación. Existen numerosos modelos de movimiento publicados y además muchos de estos van siendo mejorados o actualizados de manera constante, contando con nuevos datos o nuevas formas funcionales.

En el Anexo IV se describen diferentes modelos de movimiento considerados para el estudio, al menos de forma preliminar, clasificados según su procedencia, características y también utilización previa en otros trabajos.

El planteamiento general que ha guiado el estudio, en cuanto a la selección de ecuaciones GMPE se refiere, se ha basado en la siguiente estrategia:

- Para el caso de la Península y el norte de África se utilizará el modelo propio para  $M_w < 5.0$ , posiblemente en combinación con algún otro mo-

delo que pueda cubrir ese rango de magnitudes. Éstos tendrán que ser combinados con otros modelos inferidos para otras regiones y para un rango de magnitudes mayores, que se calibrarán con datos locales existentes en el intervalo de magnitudes  $M_w$  entre 5.0 y 5.5 con el fin de identificar los que mejor ajusten a nuestros datos. Los modelos seleccionados serán después utilizados para predecir el movimiento fuerte para magnitudes  $M_w \geq 5.0$ .

- Para el caso de la región del SO del cabo de San Vicente, se utilizarán modelos aplicables a altas magnitudes, hasta  $M_w$  8.5 y largas distancias, que contemplen una lenta atenuación como la observada en la zona. Al igual que antes, éstos se tratarán de calibrar a partir de registros de los terremotos ocurridos en esa región, si bien en este caso la muestra de observaciones para el contraste es muy reducida.

Para el primer caso se han revisado, por una parte, algunos modelos desarrollados con datos españoles o de la cuenca del Mediterráneo (Cabañas *et al.*, 1999; Tapia, 2006 y Mezcuca *et al.*, 2008), y también algunos otros modelos foráneos que se consideran aplicables para la zona y para magnitud  $M_w$  5.0) que serán calibrados con datos locales.

Por otra parte, en cuanto al rango de magnitudes más altas o bien al rango completo de éstas, se necesitan modelos aplicables a zonas corticales de actividad moderada, como las de la península Ibérica, que estén bien definidos para magnitudes elevadas. Entre los modelos más recientes que cumplen estos requisitos están los preseleccionados de Akkar y Bommer (2010); Ambraseys *et al.* (2005); Boore y Atkinson (2008); Berge-Thierry *et al.* (2003); Bragato y Slejko (2005); Bindi *et al.* (2011); Cotton *et al.* (2008) y Cauzzi y Faccioli (2008). Los modelos de Cotton *et al.* (2008) y Cauzzi y Faccioli (2008) han sido desarrollados fundamentalmente con datos corticales de gran calidad procedentes de Japón. Los de Berge-Thierry *et al.* (2003); Akkar y Bommer (2010) y Ambraseys *et al.* (2005) corresponden a datos europeos y de Oriente Próximo, con algunos datos de Estados Unidos. Los de Bragato y Slejko (2005) y de Bindi *et al.* (2011) se han desarrollado con datos de Italia y alrededores y los de Boore y Atkinson (2008) con datos americanos (mayoritariamente de EEUU), europeos y asiáticos.

En cuanto al segundo caso expuesto anteriormente, se han buscado modelos aplicables a zonas profundas y/o a largas distancias, con el fin de ser aplicados a las fuentes del SO del cabo San Vicente y a las fuentes profundas. Estos modelos se basan en bases de datos mundiales o en escenarios de subducción. Entre ellos se han considerado en el estudio los de Youngs *et al.* (1997); Gregor *et al.* (2002); García *et al.* (2005); Lin y Lee (2008); Zhao *et al.* (2006) y Atkinson y Boore (2003).

Las principales características de los GMPE's preseleccionados se resumen en las Tablas 12 y 13. En ellas se muestran el tipo y rango de magnitud de cada modelo, el tipo y rango de distancia, el tipo de parámetro de movimiento y la componente que se estima.

Sólo uno de los modelos preseleccionados (Boore y Atkinson, 2008) pertenece a los denominados modelos NGA (Next Generation Attenuation models). Estos modelos surgen de una iniciativa llevada a cabo en Estados Unidos, 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 (3.551 registros) pertenecientes a zonas activas de corteza superficial de todo el mundo, siendo una gran parte de éstos (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);

TABLA 12

*Modelos de movimiento fuerte pre-seleccionados para su posible inclusión en este trabajo para las zonas someras de la península Ibérica y el N de África, junto con sus principales características*

Modelo	Código	Rango de Mag.	Tipo de Mag.	Rango de Dist.	Tipo de Dist.	Componente horizontal	Tipo de mov.
Akkar & Bommer (2010)	AB10	5.0-7.6	$M_w$	$\leq 100$ km	Rjb	M geom.	ln (g)
Ambraseys et al (2005)	Amb05	$\geq 5.0$	$M_w$	$< 100$ km	Rjb	Max. Comp H	log (m/s <sup>2</sup> )
Boore & Atkinson (2008)	BA08	4.2-7.9	$M_w$	$< 200$ km	Rjb	M geom.	ln (g)
Berge-Thierry et al (2003)	BT03	4.0-7.9	$M_s$	4-330 km	Rhipo	Ambas*	log cm/s <sup>2</sup> )
Bragato & Slejko (2005)	BS05	2.5-6.3	$M_L$	$\leq 130$ km	Rjb	Max. Comp H	log (g)
Bindi et al.(2011)	B11	4.0-6.9	$M_w$	$> 200$ km	Rjb	M geom.	log cm/s <sup>2</sup> )
Lussou <i>et al.</i> (2001)	LU01	3.5-6.3	$M$ (JMA)	10-200 km	Rhipo	Ambas*	log(cm/s <sup>2</sup> )
Cotton <i>et al.</i> (2008)	CT08	4.0-7.3	$M_w$	$< 100$ km	Rjb	M geom.	log(cm/s <sup>2</sup> )
Cauzzi & Faccioli (2008)	CZ08	5.0-7.2	$M_w$	15-150 km	Rhipo	M geom.	log (m/s <sup>2</sup> )

(\*) Se usan ambas componentes horizontales en la regresión. Según Beyer y Bommer (2006), la aceleración predicha es muy parecida a la media geométrica.

TABLA 13

*Modelos de movimiento fuerte pre-seleccionados para su posible inclusión en este trabajo para las zonas profundas y SO de cabo San Vicente, junto con sus principales características*

Modelo	Código	Rango de Mag.	Tipo de Mag.	Rango de Dist.	Tipo de Distribución	Componente horizontal	Tipo de mov.
Youngs et al (1997)	Y97	5.0-8.2	$M_w$	10-500 km	Rrup	M geom.	ln (g)
Gregor et al (2002)	Gr02	8.0-9.0	$M_w$	$\geq 500$ km	Rrup	Max. Comp H	ln (g)
García et al. (2005)	G05	5.2-7.4	$M_w$	$\leq 400$ km	$R = \sqrt{(Rcld^2 + \Delta)}$	M Cuadrática	log (cm/s <sup>2</sup> )
P-S Lin & C-T Lee (2008)	LT08	5.3-8.1	$M_w$	15-630 km	D. Hipo	M geom.	ln (g)
Zhao <i>et al.</i> (2006)	Z06	5.0-8.2	$M_w$	10-300 km	Rrup	M geom.	ln (cm/s <sup>2</sup> )
Tavakoli <i>et al.</i> (2005)	Tav05	5.0-8.2	$M_w$	$\leq 1000$ km	Rrup	M geom.	ln (g)
Atkinson & Boore (2003)	AB03	5.0-8.3	$M_w$	10-400 km	Rjb	Comp. H Aleatoria	log (cm/s <sup>2</sup> )

Chiou y Youngs (2008) e Idriss (2008). Las principales novedades que presentan 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.

Todos los modelos se establecen para las mismas aceleraciones espectrales y para las mismas definiciones de variables: magnitud  $M_w$ , distancia a la ruptura (eventualmente distancia Joyner-Boore) y la misma definición de aceleración horizontal. Las diferencias entre los diversos modelos responden a los métodos de regresión usados, a la forma funcional empleada, a la consideración de algunos datos de otras zonas (como las réplicas del terremoto de Taiwán de 1999) o a la manera de incorporar o no

un determinado efecto. La abundancia de parámetros necesarios para llevar a la práctica estos modelos limita su aplicación en estudios de peligrosidad sísmica de áreas extensas con carácter probabilista. En este proyecto solamente se va a utilizar el modelo de Boore y Atkinson (2008) con su variante reciente (Atkinson y Boore 2011), que incorpora el efecto que produce a la hora de hacer la regresión la inclusión de datos de terremotos de baja magnitud sobre las estimaciones de aceleración.

### 3.3. Análisis de datos locales disponibles

La red de acelerómetros del IGN inicia su desarrollo 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 31) con cuyos registros acelerométricos

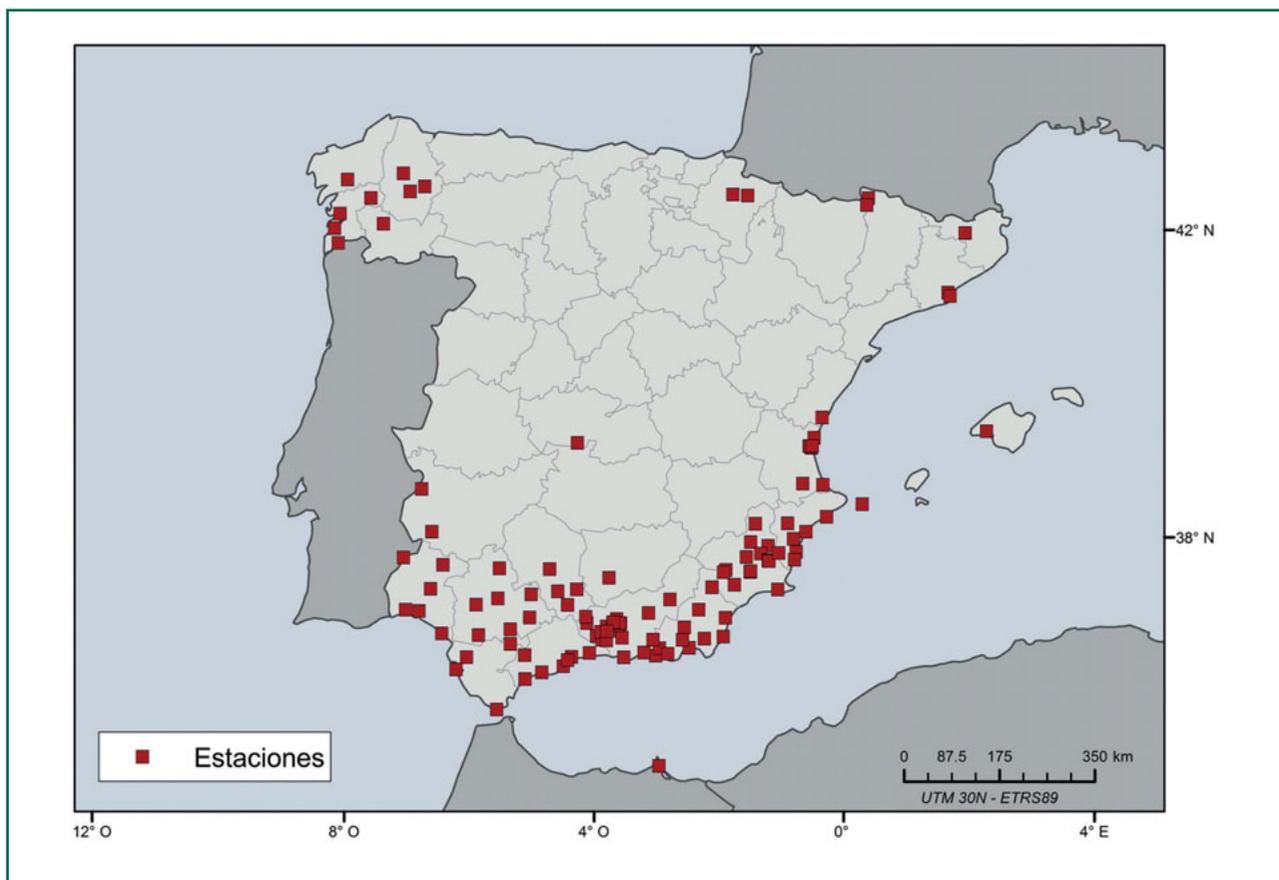


Figura 31. Red acelerométrica del IGN.

tricos se ha configurado una base de datos que abarca el periodo desde 1984 hasta la fecha actual (en adelante BDA-IGN).

La BDA-IGN contiene registros correspondientes a más de 530 eventos ocurridos en la Península Ibérica y zonas próximas, fundamentalmente repartidos por la zona sureste del país (Figura 32).

Las magnitudes de los sismos hasta ahora ocurridos están comprendidas en el rango de magnitud  $M$  de 1.3 a 6.3, donde dicha  $M$  corresponde a los distintos tipos de magnitud del catálogo sísmico español [ $m_{bLg}$ (MMS),  $m_b$ ,  $m_{bLg}$ (L),  $M_w$ ]. Las distancias varían en un rango de 0.5-650 km aproximadamente. En la Figura 33 se puede observar la relación entre magnitud y distancia de cada registro. La mayor parte de los datos se sitúa en distancias entre 5 y 100 km y magnitudes  $M$  entre aproximadamente 2.0 y 5.0. Los terremotos de las magnitudes

más altas están registrados sólo a grandes distancias, dado que éstos corresponden a las zonas del SO de cabo San Vicente y N de África.

En la BDA-IGN, los suelos de las estaciones se han clasificado en tres tipos (R-roca (11 estaciones), H-suelo duro (47 estaciones) y S-Suelo blando (65 estaciones). Generalmente cada estación ha registrado por cada evento en las tres componentes espaciales: componente horizontal en dirección NS, componente horizontal en dirección EO y componente vertical V.

Los rangos de aceleraciones máximas registradas (PGA), para las diferentes componentes son (incluyendo el terremoto de Lorca del 11/5/2011):

- Componente NS: 0.26-360  $\text{cm/s}^2$
- Componente EO: 0.24-151  $\text{cm/s}^2$
- Componente V: 0.22-183  $\text{cm/s}^2$

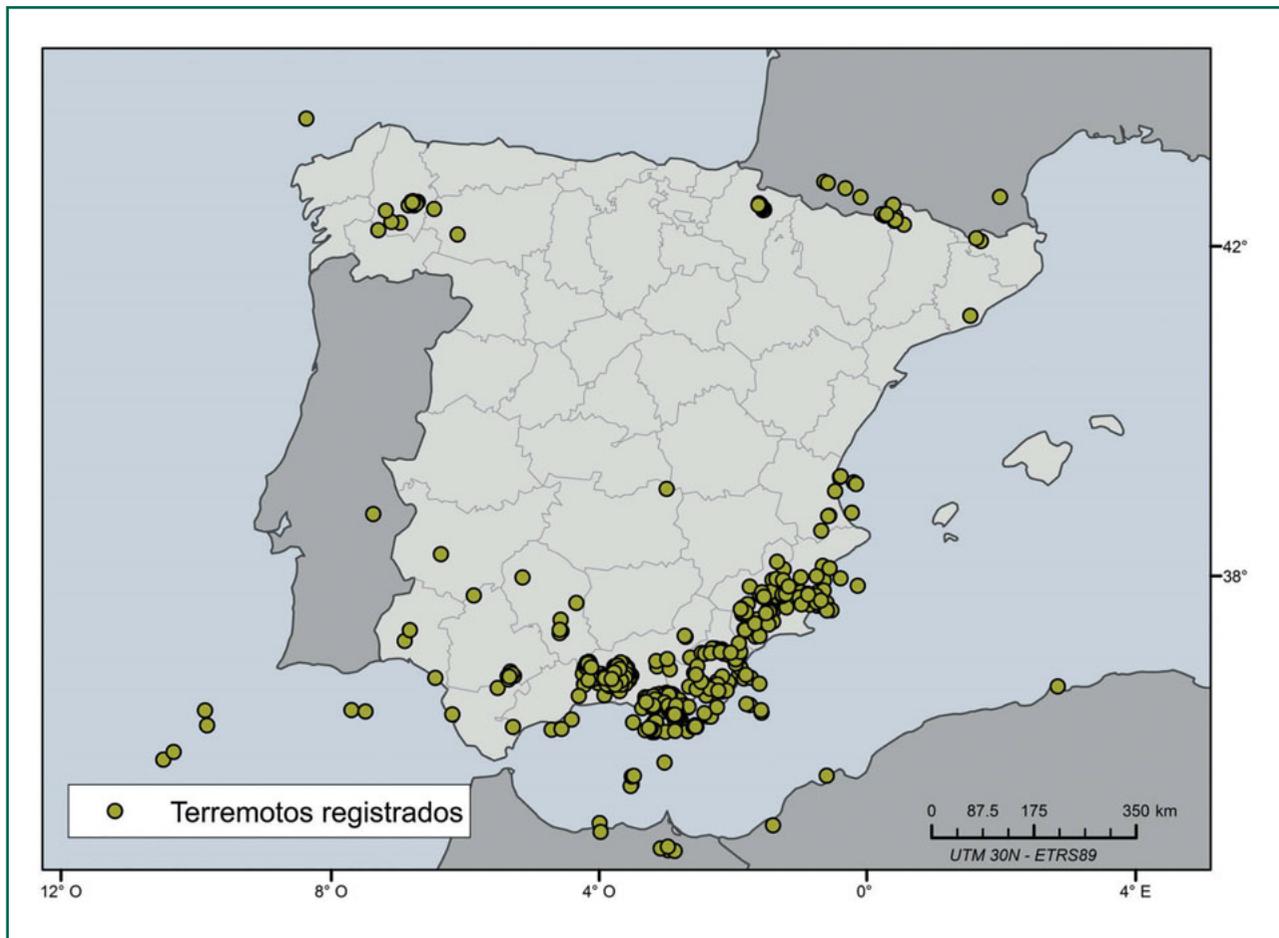


Figura 32. Terremotos con registros de aceleración en la base de datos del IGN.

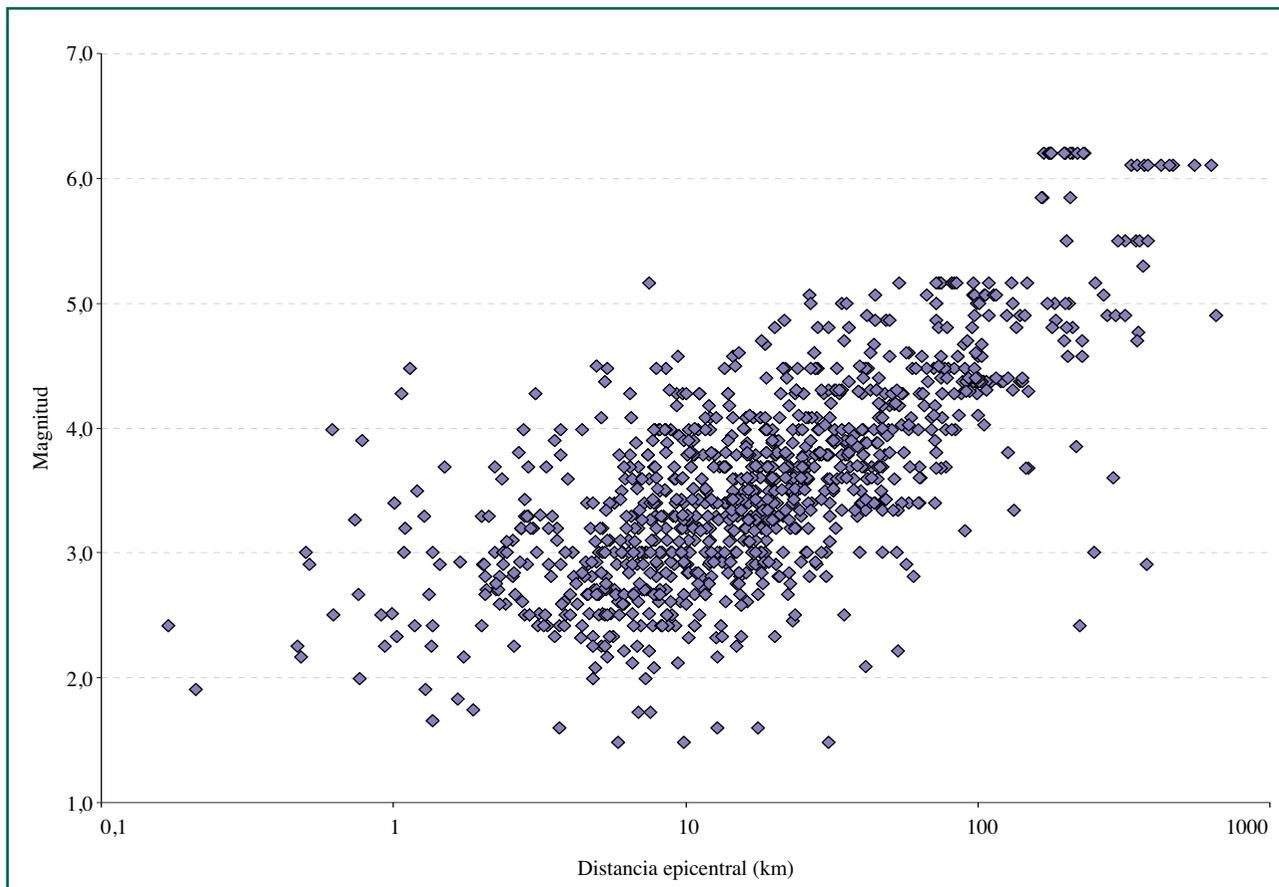


Figura 33. Distribución de magnitud ( $M$ ) y distancia epicentral (km) de la BDA-IGN.

La Figura 34 muestra los valores de PGA registrados en función de la distancia epicentral para cada una de las componentes, extraídos de la base de datos completa.

Estos datos han sido empleados tanto para la deducción del modelo propio (para magnitudes  $M_w \leq 5.0$ ) como para la calibración de modelos foráneos para la selección de los que mejor representen la atenuación de nuestra región, aplicables a las mayores magnitudes.

### 3.4. Modelo propio

El modelo propio se desarrolla para suelo duro o roca, dado que su aplicación final irá dirigida a estimación de la peligrosidad en esa condición de suelo.

De todos los registros acelerométricos disponibles, para la obtención de la nueva ecuación de

movimiento fuerte del suelo se han utilizado únicamente los datos registrados en la Península o norte de África, que tuvieran magnitudes momento comprendidas entre 4.0 y 5.5 (después de aplicar las correlaciones del apartado 1.3). Se han utilizado únicamente las aceleraciones registradas en las dos componentes horizontales, NS y EO, considerando la media geométrica de ambas componentes (denominada componente H) y no se han tenido en cuenta las aceleraciones registradas en la componente vertical. Por otro lado, el rango de distancias epicentrales cubierto por los registros es de 1 a 370 km, aproximadamente.

Con las consideraciones anteriores, se cuenta para el desarrollo de la nueva GMPE con un total de 140 registros acelerométricos, todos ellos registrados en un suelo calificado como tipo H o tipo R, es decir, suelo duro o roca. La distribución de los valores de PGA y magnitud de los registros final-

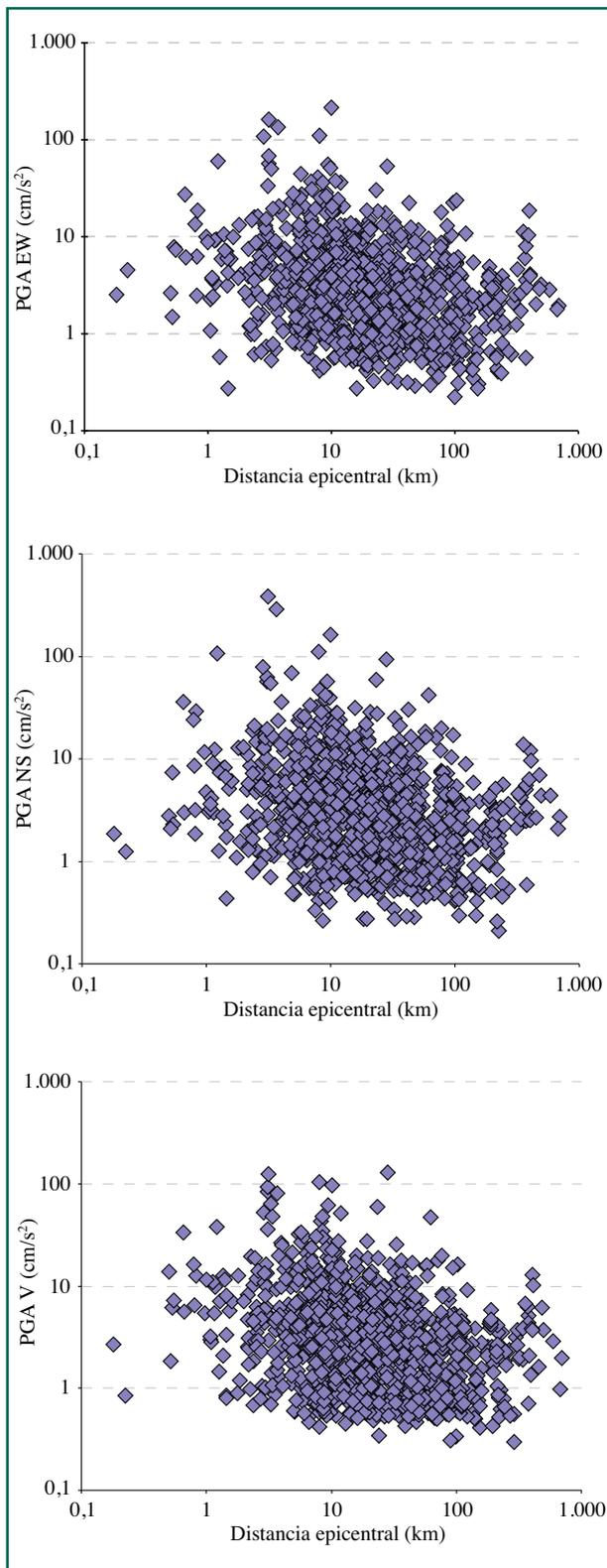


Figura 34. Valores de aceleración registrados en las tres componentes frente a la distancia epicentral (BDA-IGN).

mente utilizados, en función de la distancia, se muestra en las Figura 35.

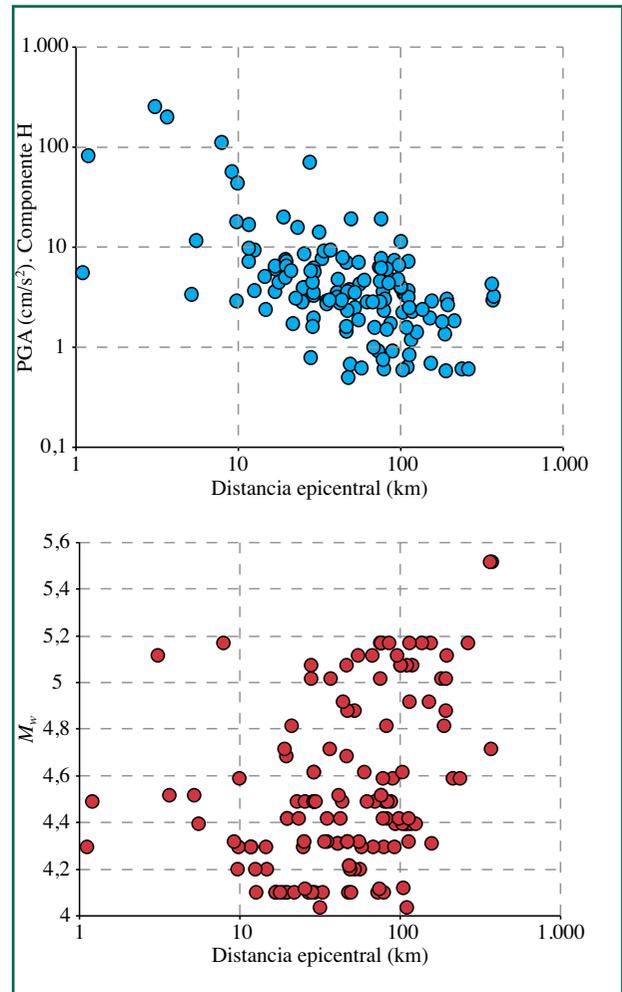


Figura 35. Distribuciones con la distancia de los valores de PGA (media geométrica de las componentes horizontales) (superior) y de magnitud  $M_w$  (inferior) de los registros empleados para la deducción del modelo propio.

El método utilizado para realizar el ajuste ha sido el llamado método de regresión de dos pasos, en el que se ha aplicado el algoritmo expuesto por Joyner y Boore (1993, 1994). Este método se basa en un ajuste de los datos a una forma funcional específica mediante máxima verosimilitud y ha sido empleado anteriormente por muchos otros autores que han desarrollado GMPE's.

En la ecuación 10 se presenta la forma funcional propuesta inicialmente para este método. En el primer paso, se ajustan aquellos coeficientes depen-

dientes de la distancia ( $c, h$ ) y en un segundo paso, aquellos que dependen únicamente de la magnitud o son independientes ( $a, b$ ).

$$\log A_n = a + b(M_n - 6) - \log(d_n^2 + h^2)^{1/2} + c(d_n^2 + h^2)^{1/2} + \sigma_r + \sigma_e \quad [10]$$

donde:

- $A_n$  es la aceleración para cada uno de los registros utilizados (PGA o SA (T)).
- $M_n$  es la magnitud momento de los terremotos correspondientes a los diferentes registros.
- $d$  es la distancia, en éste caso, distancia epicentral.
- $a, b, c, h$  son los coeficientes que se determinan en el ajuste.
- $\sigma_r$  es la desviación típica del primer paso del ajuste (variabilidad de los valores de los registros de un mismo evento en diferentes estaciones).
- $\sigma_e$  es la desviación típica del segundo paso del ajuste (variabilidad de los valores de los registros de diferentes terremotos obtenidos en una misma estación).

Para realizar el extenso cálculo matricial requerido en dicho ajuste se ha programado en Matlab un algoritmo para facilitar el cálculo iterativo y manejar de forma eficiente matrices de gran tamaño.

Antes de proponer un resultado definitivo, se realizaron diferentes pruebas variando la forma funcional original e incorporando nuevos términos

o parámetros, buscando en todo momento, la mejora en la bondad de los ajustes. Tales cambios se han centrado en la inclusión de un término cuadrático o parámetros que multiplican a la atenuación geométrica de la onda. Tras las pruebas realizadas y el consiguiente análisis de residuos, siguiendo el criterio de Scherbaum *et al.* (2004a), se comprobó que el mejor ajuste venía dado por la forma funcional original (ecuación [10]), la cual presentaba menores desviaciones respecto a los datos. Se optó entonces por esta ecuación para expresar el modelo local.

El modelo ha sido desarrollado, además de para PGA, para otras ordenadas espectrales, obteniendo los coeficientes de regresión que se muestran en la Tabla 14.

A partir del modelo inferido se ha analizado la distribución de residuos para la PGA, es decir, de las diferencias entre valores predichos por el modelo y los valores reales registrados en función de la distancia y de la magnitud (Figura 36). No se aprecia ninguna tendencia o patrón de variación de los residuos normalizados (residuos divididos por la sigma del modelo) en función de estas variables, cumpliéndose la hipótesis básica asumida en análisis de regresión: distribución normal de los residuos con media nula y varianza constante.

En la Figura 37 se muestra gráficamente como varía el modelo desarrollado en función de la distancia epicentral para una magnitud  $M_w = 5.0$ . Si comparamos el nuevo *modelo propio* con otros modelos españoles anteriormente publicados (Fi-

TABLA 14  
Coeficientes del modelo desarrollado para PGA y para varias ordenadas espectrales (donde  $\sigma = \sqrt{(\sigma_e^2 + \sigma_r^2)}$  es la desviación típica total)

Parámetro $\text{cm/s}^2$	$c$	$h$	$a$	$b$	$\sigma_e$	$\sigma_r$	$\sigma$
<b>PGA</b>	0.00030	3.921	2.745	0.409	0.361	0.314	0.478
<b>SA (0.1)</b>	0.00029	5.608	2.889	0.246	0.361	0.327	0.487
<b>SA (0.2)</b>	0.00032	4.252	3.249	0.570	0.342	0.301	0.456
<b>SA (0.3)</b>	0.00050	4.464	3.459	0.837	0.380	0.290	0.478
<b>SA (0.4)</b>	0.00070	4.171	3.467	0.968	0.372	0.334	0.500
<b>SA (0.5)</b>	0.00100	3.533	3.507	1.095	0.380	0.340	0.510
<b>SA (1.0)</b>	0.00200	5.542	3.297	1.240	0.379	0.313	0.492
<b>SA (2.0)</b>	0.00280	5.484	2.553	1.108	0.380	0.280	0.472

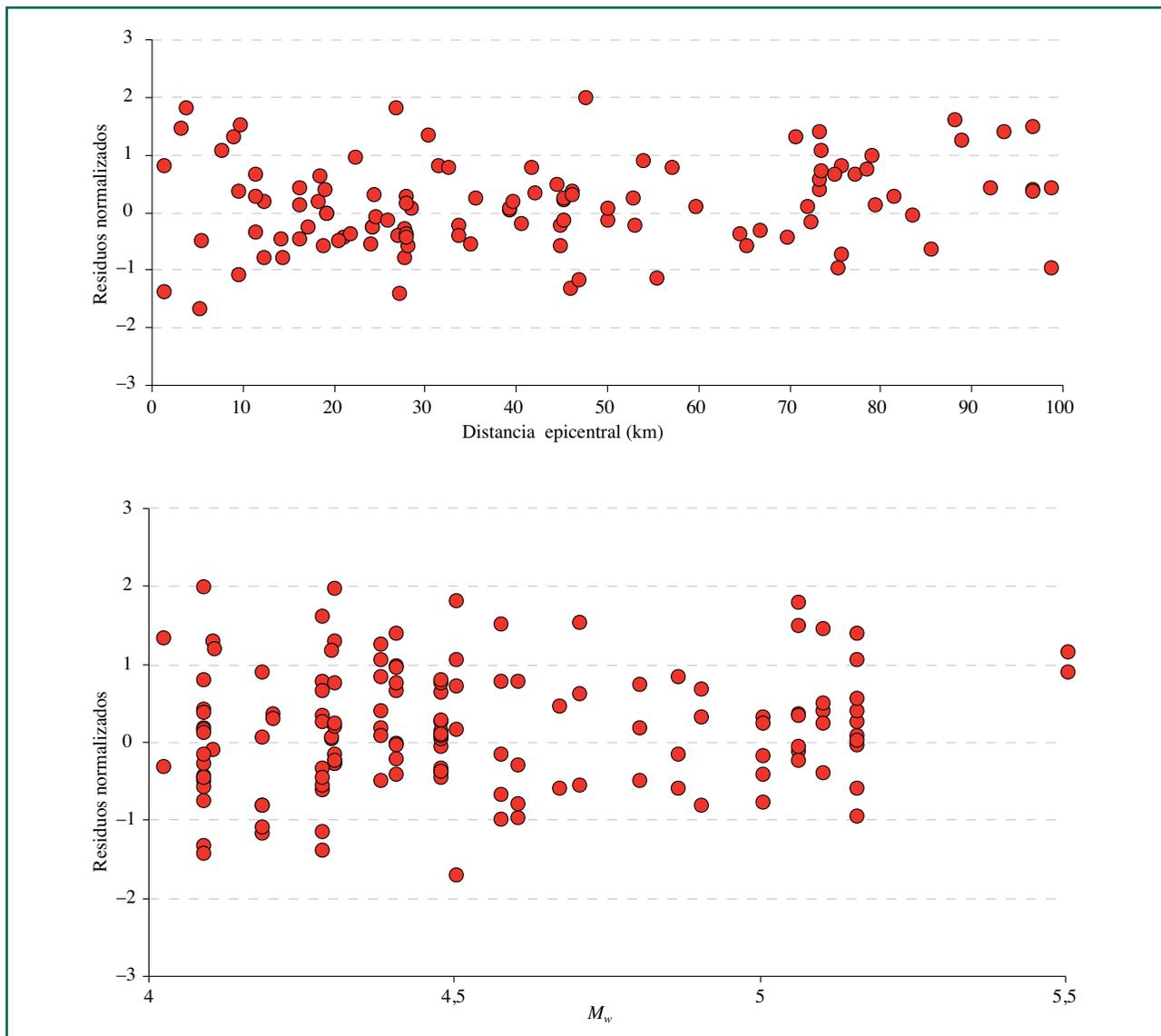


Figura 36. Distribución de residuos normalizados en función de la distancia (superior) y la magnitud (inferior).

gura 38), se puede observar como el primero presenta una atenuación menor para largas distancias. Esto es debido al valor del coeficiente  $c$  que acompaña al término no logarítmico de la distancia y que representa la atenuación anelástica, el cual resulta poco significativo (véase Tabla 14).

Si se hace la misma comparación anterior, pero incluyendo otros modelos desarrollados con datos europeos (Figura 39), se aprecia que el modelo propio, al igual que en general los modelos españoles, se encuentra siempre por debajo de los modelos europeos a cortas distancias.

### 3.5. Calibración de modelos preseleccionados

Los modelos preseleccionados anteriormente, se han calibrado también con datos locales. Para ello se ha realizado un análisis estadístico de residuos utilizando el método desarrollado por Scherbaum *et al.* (2004a). Este método permite comprobar hasta qué punto una GMPE, desarrollada con unos datos concretos, puede reproducir satisfactoriamente los datos de movimiento fuerte correspondientes a observaciones independientes. Los autores de éste

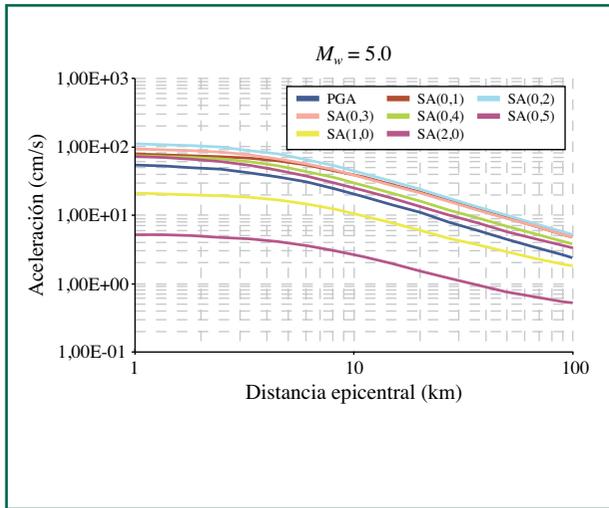


Figura 37. Modelo desarrollado para PGA y las ordenadas espectrales de SA (0.1s), (0.2s), (0.3s), (0.4s), (0.5s), (1.0s) y (2.0s). en función de la distancia epicentral, para  $M_w = 5.0$ .

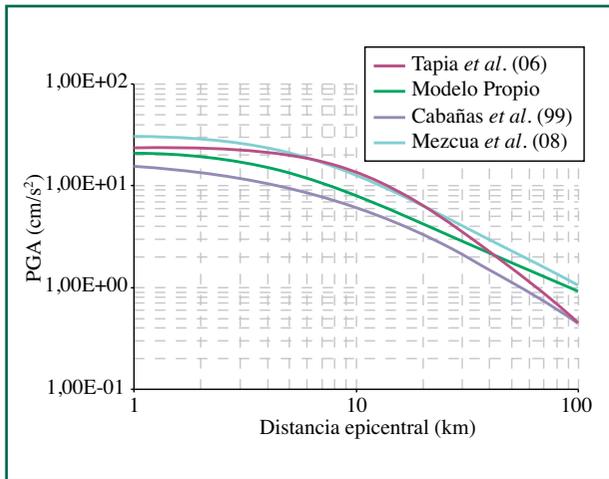


Figura 38. Comparación gráfica de diferentes modelos españoles con el modelo propio para  $M_w = 4.0$ .

método proponen una clasificación de los 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.

$$z = \frac{\ln y_{registro} - \ln y_{modelo}}{\sigma_{modelo}} \quad [11]$$

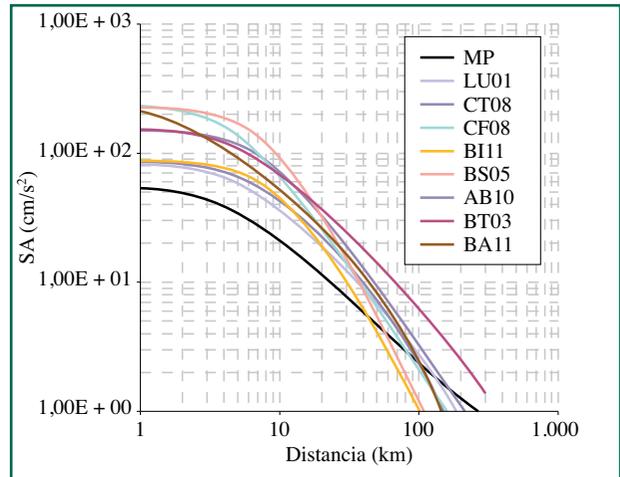


Figura 39. Comparación gráfica de diferentes modelos europeos y mundiales con el modelo propio desarrollado en este proyecto (MP), para  $M_w = 5.0$ .

$$LH(|z|) = Erf\left(\frac{|z|}{\sqrt{2}}, \infty\right) \quad [12]$$

donde:

$\ln y_{registro}$  es el logaritmo natural del valor del parámetro del movimiento registrado.

$\ln y_{modelo}$  es el logaritmo natural del valor del parámetro del movimiento predicho por el modelo.

$\sigma_{modelo}$  es la desviación estándar de  $\ln y_{modelo}$ .

$Erf$  es la función error, definida como:

$$Erf(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt \quad [13]$$

Así, se definen cuatro clases o categorías en función de los valores de los estadísticos considerados, representándose con la categoría A, aquellos modelos que mejor se ajustan a la base de datos y con la categoría D, los modelos que peor se ajustan (Tabla 15).

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 40 las gráficas obtenidas con el modelo de Bragato y Slejko (2005). En ellas se muestra un caso en el que la distribución

TABLA 15

Clasificación de modelos de movimiento fuerte en función de los rangos de los estimadores estadísticos propuestos según su ajuste a un conjunto de datos de movimiento fuerte, según el método de Scherbaum *et al.* (2004a)

Estimador estadístico	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D
Media de $z$	$<0,25$	$<0,5$	$<0,75$	$>0,75$
Mediana de $z$	$<0,25$	$<0,5$	$<0,75$	$>0,75$
Desviación estándar de $z$	$<1,125$	$<1,25$	$<1,5$	$>1,5$
Mediana de LH	$\geq 0,4$	$\geq 0,3$	$\geq 0,2$	$<0,2$

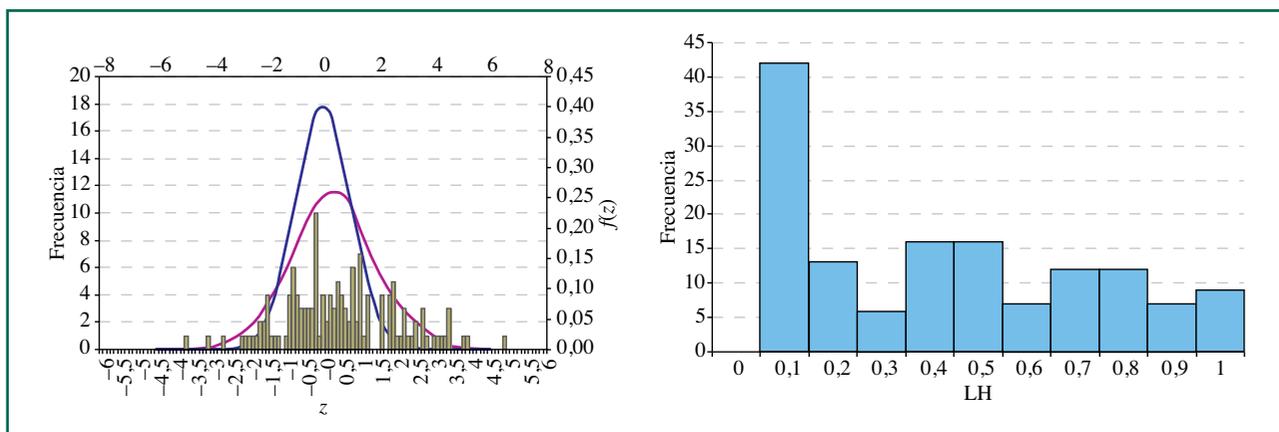


Figura 40. Distribución de residuos normalizados  $z$  (izquierda) y distribución de LH (derecha) para el modelo de Bragato y Slejko (2005).

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. Este caso entraría en la categoría B.

Este análisis estadístico de residuos se ha realizado independientemente para los distintos modelos preseleccionados (Tablas 12 y 13), utilizando para ello los datos que cubrieran los rangos de magnitudes que se indican en la Tabla 16, dependiendo de la zona geográfica de aplicación.

Los resultados obtenidos del análisis estadístico, para cada uno de los modelos, en las dos regiones consideradas, zonas someras de la península Ibérica y norte de África y zonas atlánticas (Azores-Gibraltar) y profundas, se muestran en las Tablas 16 y 17, respectivamente.

En el caso de los modelos contrastados con datos de Azores-Gibraltar, no se ha llegado a obtener un buen ajuste con ninguno de ellos, debido funda-

mentalmente al escaso número de registros disponible para hacer el contraste (únicamente 19 registros).

Como se ha podido comprobar, el método de Scherbaum *et al.* (2004a) presenta la ventaja de proponer parámetros estadísticos que permiten cuantificar la bondad de los ajustes de forma más objetiva que el método meramente gráfico. Sin embargo, dicho método plantea al mismo tiempo una serie de inconvenientes como es el hecho de utilizar cuatro estimadores diferentes, no jerarquizados, que pueden establecer categorías diferentes para un mismo modelo, dejando que la decisión final siga siendo un tanto subjetiva. A esto hay que añadir que, para el buen funcionamiento del método, se necesita contar con una base de datos de aceleración suficientemente grande, hecho que no siempre ocurre en España. Esto hace que las conclusiones extraídas no deban tomarse como definitivas, sino como una pri-

TABLA 16

Número de registros de la base de datos acelerométricos españoles con el que se ha realizado cada análisis de residuos dependiendo de la zona de aplicación y el rango de magnitudes

Zona	$M_w$		Número de registros
Península y norte de África	3.5-5.5	Bajas magnitudes	270
	5.0-6.2	Altas magnitudes	36
	3.5-6.2	Todo el rango de magnitudes	282
Azores-Gibraltar	4.3-6.1	Datos de España y Portugal	19

TABLA 17

Resultados del análisis de residuos para los modelos aplicables a las zonas someras de la península Ibérica y el norte de África

	Modelos	Mediana LH	Mediana z	Media z	Desviación z	Clase			
$M \leq 5.5$	Bindi <i>et al.</i> (2011)	0.39	0.28	0.47	1.51	B	B	B	D
	Modelo Propio	0.67	0.00	0.02	0.73	A	A	A	A
	Bragato & Slejko (2005)	0.42	0.06	0.27	1.48	A	A	B	C
	Berge-Thierry <i>et al.</i> (2003)	0.22	1.06	0.99	1.27	C	D	D	C
	Cotton <i>et al.</i> (2008)	0.31	0.86	1.20	0.90	B	D	D	D
	Lussou <i>et al.</i> (2001)	0.01	2.65	2.49	1.22	D	D	D	B
$M > 5.0$	Akkar & Bommer (2010)	0.27	0.59	0.65	1.30	C	C	C	C
	Boore & Atkinson (2008)	0.15	0.04	0.41	2.58	D	A	B	D
	Cauzzi & Faccioli (2008)	0.58	0.10	1.11	0.26	A	A	D	A
	Cotton <i>et al.</i> (2008)	0.50	0.01	1.75	0.52	A	A	D	A
	Ambraseys <i>et al.</i> (2005)	0.31	0.60	0.62	1.19	B	C	C	B
	Berge -Thierry <i>et al.</i> (2003)	0.24	0.68	0.35	1.41	C	C	B	C
Todo el rango de magnitudes	Boore & Atkinson (2008)	1.37	1.37	1.84	1.14	B	D	D	A
	Boore & Atkinson (2011)	0.70	0.70	2.15	0.36	A	C	A	A
	Cotton <i>et al.</i> (2008)	0.45	0.39	1.38	0.55	A	B	D	A
	Berge-Thierry <i>et al.</i> (2003)	0.22	1.06	0.96	1.29	C	D	D	C

mera aproximación en el proceso de selección de modelos a emplear en el cálculo de la peligrosidad.

### 3.6. Selección final de modelos

Para la selección final de los modelos a utilizar en el presente estudio se ha tenido en cuenta todo lo estudiado y analizado anteriormente, así como la información y conclusiones extraídas de otros trabajos recientemente publicados. Concretamente se

han tenido en cuenta dos trabajos europeos, enmarcados en el proyecto SHARE, que presentan un análisis pormenorizado de modelos para su aplicación en Europa (Delavaud *et al.*, 2012a y 2012b).

El primero de ellos presenta un análisis de distintas GMPE y de su aplicabilidad en Europa. Los autores realizan una preselección de GMPE aplicables a diferentes áreas tectónicas y las someten, por una parte, a un chequeo con una base de datos de registros europeos y no europeos, utilizando el método de Scherbaum *et al.* (2009). Por otra parte, re-

TABLA 18  
Resultados del análisis de residuos para los modelos aplicables a las zonas  
de Azores-Gibraltar y zonas profundas

Modelos	Mediana $L_h$	Mediana $z$	Media $z$	Desviación $z$	Clase			
					C	D	D	C
Atkinson & Boore (2003)	0.26	1.14	1.56	1.37	C	D	D	C
Gregor <i>et al.</i> (2002)	0.47	0.20	0.44	1.09	A	A	B	A
Youngs <i>et al.</i> (1997)	0.11	1.55	1.57	0.84	D	D	D	A
García <i>et al.</i> (2005)	0.00	2.64	2.26	2.16	D	D	D	D
Lin & Lee (2008)	0.06	1.88	2.24	1.68	D	D	D	D
Zhao <i>et al.</i> (2006)	0.03	2.21	2.18	1.14	D	D	D	B
Tavakoli & Pezecz (2005)	0.65	0.38	0.67	1.12	A	B	C	A

alizan un juicio de expertos, en el que se plantea a seis de ellos dar un peso a cada uno de los modelos en función de sus características y sus limitaciones. Con las conclusiones de ambos procesos se obtiene una clasificación de los modelos más idóneos a utilizar en cada zona tectónica y se realiza una propuesta de árbol lógico asignando los correspondientes pesos. Los modelos que finalmente resultan prioritarios son:

- Para las zonas de corteza superficial activa: Akkar & Bommer (2010) y Cauzzi & Faccioli (2008).
- Para zonas con focos profundos (subducción y no-subducción): Zhao *et al.* (2006); Atkinson & Boore (2003) y Youngs *et al.* (1997).

En el segundo trabajo se evalúa la capacidad de once modelos de movimiento fuerte para predecir el movimiento del suelo en diferentes regiones de corteza superficial activa de todo el mundo. Para ello se utiliza la base de datos global de Allen y Wald (2009), con la que se establece la calibración de modelos usando también el método de Scherbaum *et al.* (2009). Se concluye con una clasificación final de los modelos preseleccionados, siendo los que resultan más adecuados para PGA en Europa y Oriente Medio, los de Akkar y Bommer (2010) y Cauzzi y Faccioli (2008).

Considerando nuestro análisis particular descrito en el apartado previo y los trabajos posteriores descritos, hemos definido una serie de criterios a utilizar de forma combinada para la selección final de los modelos que se van a emplear en el cálculo de

la peligrosidad objeto de este estudio. Estos criterios consideran prioritarios aquellos modelos que:

- Mejor resultado ofrecen en el análisis estadístico de residuos de Scherbaum *et al.* (2004a) con datos españoles.
- Mejor resultado ofrecen en el análisis estadístico de residuos de Scherbaum *et al.* (2009) con datos europeos, según Delavaud *et al.* (2012a).
- Mejor resultado ofrecen en el análisis estadístico de residuos de Scherbaum *et al.* (2009) con datos no europeos, según Delavaud *et al.* (2012a).
- Son recomendados por los expertos para su empleo en Europa, según Delavaud *et al.* (2012a).
- Son recomendados por expertos españoles para aplicar en España y han sido utilizados en estudios españoles en los últimos años.
- Presentan características similares en los parámetros que utilizan: tipo de magnitud, tipo de distancia, componente acelerométrica, etc.

Combinando los criterios y resultados anteriores, los modelos que se identifican como más idóneos para su aplicación al cálculo de peligrosidad sísmica en las dos zonas de análisis se muestran en la Tabla 19.

Como los modelos elegidos cubren distintos rangos de magnitud y son aplicables a distintas zonas, en el cálculo final de peligrosidad es necesario combinar varios modelos en cada ejecución, según se muestra en la Tabla 20.

Por último, en esta elección final, se ha incluido el modelo de Tapia (2006), como modelo a utilizar en la Península y norte de África para el rango de

**TABLA 19**  
*Modelos más idóneos seleccionados para el proyecto en función de la zona de aplicación y del rango de magnitudes que cubren*

Península y norte de África	
$M_w < 5$	Modelo propio Bindi <i>et al.</i> (2011)
$M_w > 5$	Akkar & Bommer (2010) Cauzzi & Faccioli (2008)
<b>Rango completo de magnitudes</b>	Cotton <i>et al.</i> (2008) Boore & Atkinson (2008)
Azores y zonas profundas	
	Zhao <i>et al.</i> (2006) Youngs <i>et al.</i> (1997)

magnitudes más bajas. Por tanto dentro del árbol lógico se tendrá un total de 16 ramas configurando el nodo de modelos de atenuación o GMPE's.

En el caso en el que se utilicen dos modelos de atenuación para la predicción del movimiento generado por terremotos de bajas y altas magnitudes respectivamente, se plantea la cuestión de qué modelos utilizar en la zona de solape entre ámbos, correspondiente al rango de  $M_w$  (4.5-5.0). Las opciones son los definidos para bajas magnitudes, los de altas magnitudes o los valores promedio entre los dados por ámbos. Se ha optado por esta última opción, de modo que para  $M_w \leq 4.5$  se han usado los modelos de bajas magnitudes. Para  $M_w \geq 5.5$  se consideran los modelos de altas magnitudes y en la zona intermedia se calculan los parámetros de movimiento por interpolación entre los dos tipos de modelos. La Figura 41 ilustra este aspecto, indicando en gris las curvas de

**TABLA 20**  
*Combinación de los modelos seleccionados para el estudio, dependiendo de la zona de aplicación y rango de magnitudes que cubren*

Península y norte de África		Azores y zonas profundas
Boore & Atkinson (2008) Cotton <i>et al.</i> (2008)		Youngs <i>et al.</i> (1997)
Akkar & Bommer (2010)	Modelo propio	
	Bindi <i>et al.</i> (2011)	
	Tapia (2006)	
Cauzzi & Faccioli (2008)	Modelo propio	
	Bindi <i>et al.</i> (2011)	
	Tapia (2006)	
Boore & Atkinson (2008) Cotton <i>et al.</i> (2008)		Zhao <i>et al.</i> (2006)
Akkar & Bommer (2010)	Modelo propio	
	Bindi <i>et al.</i> (2011)	
	Tapia (2006)	
Cauzzi & Faccioli (2008)	Modelo propio	
	Bindi <i>et al.</i> (2011)	
	Tapia (2006)	
$M_w < 5.0$	$M_w > 5.0$	

atenuación resultantes de la interpolación en la zona de solape (correspondientes a magnitudes 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9) entre los modelos adecuados para bajas magnitudes (modelo desarrollado en el proyecto) y los de altas magnitudes (modelo de Akkar y Bommer, 2010).

La combinación de varios GMPE's en un árbol lógico que tienen en cuenta diferentes definiciones de las variables consideradas (parámetro de movi-

miento predicho, tipo de distancia, escala de magnitud, etc.) obliga a efectuar ciertas correcciones a fin de homogeneizar las estimaciones de aceleración resultantes de dicha combinación. Este tema ya ha sido tratado por autores como Scherbaum *et al.* (2004b); Bommer *et al.* (2005) y Beyer y Bommer (2006), incluyendo en sus trabajos pautas para efectuar las correcciones mencionadas, que han sido consideradas en este proyecto.

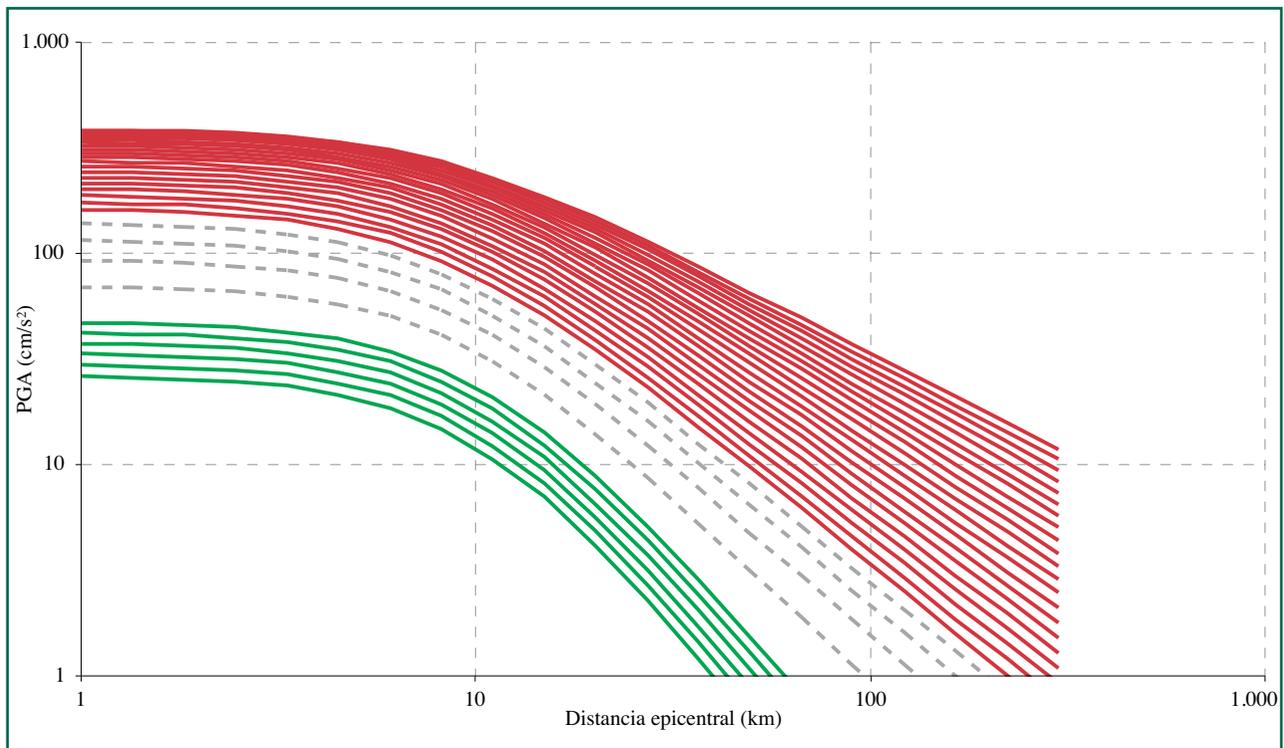


Figura 41. Curvas de atenuación (curvas discontinuas) consideradas en la zona de solape entre las obtenidas a partir de modelos adecuados para magnitudes bajas (curvas color verde) y para magnitudes altas (curvas color rojo).



## Metodología de cálculo

### 4.1. Definición y perspectiva histórica

La Peligrosidad Sísmica de un emplazamiento se define como la probabilidad de excedencia de 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 (por ejemplo, Schenk, 1989). Según esta definición, la peligrosidad es un concepto probabilista en el que se debe especificar qué nivel de movimiento del suelo se considera constitutivo de peligro potencial y durante qué período de tiempo se espera que ocurra un sismo que produzca tal movimiento.

Si denominamos genéricamente  $y$  al parámetro de movimiento con el que vamos a representar la peligrosidad,  $Y$  al valor umbral de dicho parámetro cuya probabilidad de excedencia se quiere determinar en el emplazamiento  $E$  y  $t$  al tiempo en años durante el cual se evalúa la peligrosidad  $H$  (del inglés *Hazard*), entonces ésta queda definida por la expresión:

$$H = P(y \geq Y; \text{ en } t \text{ años, en el emplazamiento } E) \quad [14]$$

La peligrosidad se expresa también como la probabilidad anual de excedencia del valor del parámetro de movimiento  $P(y > Y)$ , en lugar de probabilidad en un tiempo arbitrario  $t$ . El parámetro de movimiento  $y$  se identifica generalmente con la aceleración, velocidad o desplazamiento, bien por medio de sus valores pico o bien por medio de alguna ordenada espectral. Por último, es habitual expresar la peligrosidad en términos de periodo de retorno,  $T_r$ , definido como el inverso de la probabilidad anual de excedencia.

Existen varios métodos para estimar la peligrosidad sísmica, que difieren entre ellos fundamentalmente en la manera de considerar la sismicidad del área de influencia y en el hecho de estimar movimientos máximos o asociados a diferentes probabilidades de excedencia.

Los primeros propuestos durante la década de los años sesenta son métodos deterministas, mediante los cuales se estima el movimiento esperado en el emplazamiento debido al escenario sísmico más desfavorable (por ejemplo, ocurrencia del sismo de mayor tamaño en la zona-fuente más cercana). Estos no permiten determinar la probabilidad de excedencia de dicho movimiento, por lo que prácticamente se han dejado de emplear en la adopción de normativas sismorresistentes y su uso queda limitado a aplicaciones destinadas a instalaciones críticas.

Posteriormente, surgieron los métodos probabilistas (Cornell, 1968; Esteva, 1968) que tuvieron una amplia aceptación durante los años setenta por su capacidad de asociar probabilidades anuales de excedencia al parámetro del movimiento que se considerara representativo de la peligrosidad. En este período, la caracterización del movimiento fuerte con fines sismorresistentes se realizaba a través de un espectro de diseño basado en una forma espectral estándar de varios tramos (Newmark y Hall, 1973), construida como promedio de espectros derivados de una familia de acelerogramas representativa del movimiento, normalizados cada uno por el correspondiente valor de PGA. Esa forma espectral (adimensional) se escalaba después con el valor de la aceleración máxima, PGA, correspondiente al período de retorno establecido para el diseño de la es-

estructura (en función de su importancia), quedando así construido el correspondiente espectro de diseño. La peligrosidad se evaluaba entonces únicamente en términos de PGA, para una determinada probabilidad de excedencia previamente fijada. Este procedimiento ha sido seguido por la mayor parte de las normativas en las últimas décadas, con alguna excepción en la que, en lugar de tomar el valor de PGA para escalar la forma espectral, se han considerado los de las ordenadas correspondientes a varios periodos estructurales SA(T).

Con el desarrollo de leyes de atenuación o modelos de predicción del movimiento fuerte del suelo para parámetros espectrales (no sólo para valores pico) a lo largo de los años 80 se facilitó la construcción de espectros de diseño en los que se considerara la probabilidad de excedencia de todas las ordenadas espectrales para los periodos de interés en ingeniería sísmica. Surgieron así los espectros de peligrosidad uniforme (UHS, del inglés *Uniform Hazard Spectra*) que se construyen representando «punto a punto» las ordenadas espectrales con una misma probabilidad de excedencia o con un mismo periodo de retorno (por ejemplo, Trifunac *et al.*, 1987). Esto ha marcado otra evolución en la construcción de espectros de diseño en las normativas, que pueden ajustar mejor la forma del espectro en cada punto del territorio partiendo de mapas deducidos para diferentes ordenadas espectrales y no solo para la PGA (por ejemplo, Norma sismorresistente Italiana, NTC 2008).

#### 4.2. Metodología seguida en el estudio: PSHA

En el contexto descrito, se ha impuesto en las dos últimas décadas la metodología conocida como PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Assessment*), que ha sido adoptada en el presente estudio. Dicha metodología surge al considerar que el cálculo de la peligrosidad requiere asumir ciertas hipótesis para cuantificar la influencia de la fuente y del medio por el que se propagan las ondas, por lo que el proceso global de cálculo conlleva numerosas incertidumbres que derivan en un alto grado de dispersión en los resultados. Ante el desconocimiento de los modelos reales que regulan cada estado del proceso, se propone introducir distintas opciones sobre

la información básica (catálogos sísmicos, geometría de zonas fuente, modelos de recurrencia, ecuaciones de predicción del movimiento del suelo, etc.) y llevar a cabo un análisis de las incertidumbres asociadas (Bernreuter *et al.*, 1989, Budnitz *et al.*, 1997). La aplicación metodológica hace uso de herramientas como el juicio de expertos y el árbol lógico para fijar las opciones de cálculo y para evaluar sus correspondientes incertidumbres en los resultados.

Si se considera que la sismicidad que afecta a un emplazamiento se ajusta a un modelo de Poisson, entonces se puede suponer que el movimiento fuerte del suelo en dicho 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 frecuencia anual de excedencia  $\lambda$  o con el periodo de retorno  $Tr$ , mediante la expresión:

$$P(\text{al menos 1 excedencia en } t \text{ años}) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-t/Tr} \quad [15]$$

En la mayoría de las aplicaciones el exponente de esta ecuación es pequeño por lo que se puede hacer la aproximación siguiente:

$$P(\text{al menos 1 excedencia en } t \text{ años}) = \lambda t = t/Tr \quad [16]$$

Para un tiempo de exposición de un año ( $t = 1$ ), la probabilidad anual de excedencia de un nivel de movimiento dado se aproxima a la tasa anual de excedencia de dicho nivel:

$$P(\text{al menos 1 excedencia en un año}) = \lambda = 1/Tr \quad [17]$$

El método PSHA aplicado a un emplazamiento específico lleva entonces a determinar la tasa anual de excedencia (o frecuencia anual de excedencia) de diferentes valores o niveles del parámetro del movimiento en cuestión. De esta forma se obtiene una curva de peligrosidad sísmica del emplazamiento que representa las probabilidades anuales de excedencia de los distintos niveles del parámetro considerado. Esta curva también se puede expresar en términos de periodo de retorno.

Esto permite proporcionar, por ejemplo, una estimación de la aceleración pico del suelo PGA o de alguna aceleración espectral SA(T) para una probabilidad anual de excedencia o un periodo de retorno preestablecido, en un conjunto de puntos de todo un territorio, con el fin último de construir mapas de peligrosidad en términos de PGA o SA(T) para esa probabilidad o periodo de retorno.

Las normativas sismorresistentes adoptan generalmente un tiempo de exposición  $t$  de cincuenta años, y la probabilidad de excedencia  $P$  del movimiento que se asume es función de la importancia de la estructura. En el Eurocódigo 8 (EC-8), por ejemplo, se considera (en base a criterios de experiencia ingenieril) una probabilidad de excedencia del 10% durante un periodo de exposición de cincuenta años, para la acción sísmica de diseño en estructuras de importancia normal, (como viviendas convencionales) bajo el requerimiento de no colapso, lo que equivale a un periodo de retorno de 475 años<sup>1</sup>. También se considera una probabilidad de excedencia del 10% en 10 años para la acción sísmica que regula el mismo tipo de estructuras, bajo el requerimiento de daños limitados, lo cual equivale a un periodo de retorno de 95 años. Para estructuras de importancia especial, se recurre a un periodo de retorno de 975 años.

Los valores de los parámetros de diseño aumentan a medida que se eleva el periodo de retorno, lo que supone un diseño más conservador. Así, como ejemplo, de acuerdo con el *Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses*, con la *Norma NCSE-02* y con las recomendaciones de la *Guía Técnica de Seguridad de Presas*, las presas de categoría A situadas en zonas de sismicidad media o elevada requieren un espectro de diseño asociado a un sismo extremo (causante del movimiento esperado con un periodo de retorno de 1.000 años) y deberá hacerse una comprobación para un sismo extremo (asociado al movimiento esperado con un periodo de retorno de 3.000 a 5.000 años).

En la Tabla 21 se indica la equivalencia entre valores de probabilidad de excedencia  $P$ , periodo de retorno  $Tr$  asociado y tiempo de exposición  $t$ , ha-

TABLA 21  
Equivalencia entre nivel de probabilidad de excedencia ( $P$ ), tiempo de exposición ( $t$ ) y periodo de retorno ( $Tr$ )

$P$ años	0.1	0.1	0.05	0.02
$t$	10	50	50	50
$Tr$	95	475	975	2.475

bitualmente manejados en normativas, los cuales se obtienen a partir de la ecuación 15.

En el proceso de cálculo realizado en este trabajo se ha optado por llevar a cabo dos variantes diferentes del método probabilista: el método probabilista zonificado y el método probabilista no zonificado, que se diferencian en la forma de representar las fuentes sísmicas. A continuación se describen los dos métodos.

#### 4.2.1. Método zonificado

El método probabilista zonificado considera que el territorio se divide en distintas zonas sismogénicas, cada una de las cuales tiene un potencial sísmico uniforme. Esto significa que en todos los puntos de una misma zona existe la misma probabilidad de ocurrencia de un determinado terremoto, y que los valores de los parámetros sísmicos (la magnitud máxima esperable, el parámetro «b» o proporción entre terremotos grandes y pequeños y la tasa de ocurrencia de terremotos) son los mismos en todos los puntos de la zona. Asimismo, se considera habitualmente que la sismicidad sigue un modelo poissoniano, lo que implica que la ocurrencia de un terremoto es independiente de la ocurrencia de otro terremoto en el pasado y que la tasa de ocurrencia de terremotos se mantiene constante en el tiempo. En definitiva, los terremotos se consideran equiprobables espacial y temporalmente dentro de la zona. Esta asunción, ampliamente seguida en estudios de peligrosidad sísmica, obliga a depurar el catálogo sísmico de réplicas y de premonitores, que por definición están relacionados temporalmente con los terremotos principales, tal y como se describió en el apartado 1.4 de este texto.

La peligrosidad sísmica en un emplazamiento se calcula mediante la suma de las contribuciones al

<sup>1</sup> Esto equivale a una probabilidad anual de excedencia de 0.002, o bien, una probabilidad de 0.9 de que en cincuenta años no se supere el nivel de aceleración obtenido.

movimiento fuerte, en ese emplazamiento, debidas a la actividad de todas las zonas sismogénicas contenidas en la zona de influencia, con sus recurrencias asociadas. Para ello, primero debe modelizarse cada fuente sísmica, 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.

La ecuación 18 proporciona la peligrosidad sísmica debida a una sola fuente, dada como probabilidad anual de excedencia de un nivel del movimiento  $Y$ , del parámetro  $y$  que representa dicho movimiento. Asumiendo que la sismicidad de la fuente responde a un proceso poissoniano y que la tasa anual de excedencia  $\lambda$  en cada punto del territorio es pequeña ( $\leq 0.1$ ), la probabilidad anual de excedencia se puede aproximar a  $\lambda$ . Además, la tasa anual de ocurrencia de terremotos en la fuente ( $\tau$ ) es una constante (que por tanto aparece fuera de la integral).

$$\begin{aligned}
 P_{\text{anual}}(y > Y) &= \lambda_{\text{anual}}(y > Y) = \\
 &= \tau \iiint P(y > Y | m, r, \varepsilon) \cdot p(m) \cdot \\
 &\quad \cdot p(r) \cdot p(\varepsilon) \, dm \, dr \, d\varepsilon
 \end{aligned}
 \quad [18]$$

donde:

- $y$  representa el parámetro de movimiento con el que expresamos la peligrosidad (en nuestro caso aceleración pico PGA, o aceleración espectral SA ( $T$ )).
- $Y$  es el valor fijado de  $y$  cuya excedencia se evalúa.
- $p(m)$  se refiere a la función de densidad de probabilidad de la magnitud. Describe la probabilidad de que ocurra un terremoto de una determinada magnitud en esa fuente. Representa directamente el *efecto de la fuente* y se deriva de la ley de Gutenberg-Richter o del modelo de recurrencia que se considere para la sismicidad.
- $p(r)$  es la función de densidad de probabilidad de la distancia. Describe la probabilidad de que si se produce un terremoto en la fuente

considerada, su epicentro se encuentre a una distancia  $r$  del emplazamiento de cálculo. Esta función se relaciona con el *efecto de la atenuación* del movimiento sísmico a lo largo del trayecto entre la fuente y el emplazamiento.

- $p(\varepsilon)$  se relaciona con la distribución de valores de movimiento del suelo (valores de  $y$ ) que se obtienen para unos valores fijos de magnitud y distancia. Así, dadas una magnitud  $m$  y una distancia  $r$ , el parámetro de movimiento  $y$  puede tomar distintos valores (dada la aleatoriedad del movimiento) que se ajustan razonablemente bien a una distribución lognormal de  $y$ . El parámetro  $\varepsilon$  indica precisamente el número de desviaciones estándar que se consideran para estimar  $y$ .
- $P(y > Y | m, r, \varepsilon)$  es una función de probabilidad que refleja si se produce o no excedencia del nivel de movimiento prefijado  $Y$  al calcular el movimiento esperado y con los valores de  $m$ ,  $r$  y  $\varepsilon$  dados, por medio de la ecuación de predicción del movimiento considerada. Es por tanto un término que solo puede tomar dos valores: 1 cuando sí se produce excedencia y 0 en caso contrario. Por ello esta función de probabilidad se representa por una función de Heaviside o función escalón.

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.

Los modelos relativos a la fuente y a la trayectoria se derivan de los resultados de los capítulos anteriores. Si la peligrosidad se calcula en un emplazamiento genérico en roca, como es el caso que nos ocupa, el efecto local no se considera. Así, en los capítulos 1 y 2, respectivamente, se ha descrito cómo se ha elaborado el catálogo sísmico de proyecto y cuáles son las características de las zonificaciones escogidas para el cálculo. Asimismo, se ha explicado, en el apartado 2.3, cómo se caracterizan las fuentes sismogénicas de acuerdo con un modelo de recurrencia de Gutenberg-Richter truncado. Con estos datos queda modelizada la recurrencia de terremotos en las fuentes sísmicas, dada por la tasa  $\tau$  y la función  $p(m)$  de la zona. La función de densidad de probabilidad de  $r$  depende de la posición relativa entre la fuente considerada y el

emplazamiento de cálculo. Por tanto, la función  $p(r)$  no es uniforme para una misma zona y hay que calcularla para cada emplazamiento. Por último, la función  $p(\varepsilon)$  es una función normal estándar que toma valores que no dependen de la ecuación de predicción del movimiento, GMPE, sino de los límites (especialmente del límite superior) en los que se desee truncar dicha distribución. El término que sí depende de la GMPE elegida (incluyendo su desviación estándar) y además de manera decisiva para el cómputo de la peligrosidad, es  $P(y > Y|m, r, \varepsilon)$ .

$$P(y \geq Y|m, r, \varepsilon \text{ fijos}) = \begin{cases} 1 & y \geq Y \\ 0 & y < Y \end{cases} \quad [19]$$

El cálculo expuesto, se refiere a la peligrosidad en un único emplazamiento a causa de la contribución de una sola fuente. La peligrosidad total, debida a la actividad de todas las fuentes situadas en el área de influencia, es la suma de las contribuciones a la peligrosidad debidas a la actividad de cada fuente (suma de tasas anuales de excedencia del movimiento  $Y$  por las diferentes fuentes). En esta sumatoria, cada fuente tiene una función  $p(m)$  y una función  $p(r)$  diferente a la de las otras fuentes.

Como se ha indicado previamente, en este estudio se calcula la peligrosidad sísmica como la probabilidad de excedencia tanto de la PGA como de otras aceleraciones espectrales  $SA(T)$  para diversos periodos estructurales  $T$ . En este caso, las funciones  $p(m)$  de cada fuente y las funciones  $p(r)$  de cada combinación fuente-emplazamiento permanecen invariables ya que no dependen del parámetro de movimiento. Lo que varían son los valores de  $P(y > Y|m, r, \varepsilon)$  para cada combinación de  $m, r$  y  $\varepsilon$ , ya que el parámetro  $y$  se identificará con PGA o SA ( $T$ ), cuyos modelos de predicción viene dados por diferentes ecuaciones.

#### 4.2.2. Método no zonificado

El método no zonificado empleado está inspirado en las técnicas de Estimación de Densidad (de probabilidad) no paramétrica (EDNP). En la estimación de densidad no paramétrica el objetivo es encontrar

la función densidad de probabilidad de la que deriva una muestra dada, sin especificar a priori ninguna forma matemática para dicha función, como podrían ser, por ejemplo, la función de distribución normal o la función gamma; el objetivo es que la forma de la función la decida la propia muestra.

La unidad de trabajo son funciones densidad de probabilidad (y por lo tanto con integral unidad) que se posicionan en cada elemento de la muestra para a continuación sumarlas y normalizarlas de manera que la suma siga teniendo una integral unidad. Esta metodología fue inicialmente propuesta por Fix y Hodges (1951); Silverman (1986) presenta una descripción más reciente y de gran claridad sobre esta técnica de estimación de densidad de probabilidad.

La aplicación de la estimación de densidad no paramétrica a datos sísmicos fue propuesta por Vere-Jones (1992). Más tarde Gordon Woo presentó la forma de emplear funciones kernel para modelizar la tasa de actividad sísmica en el cálculo probabilista de peligrosidad sísmica (Woo, 1996a y 1996b).

La definición matemática de la densidad estimada con funciones kernel es la siguiente:

$$f_n(x) = \frac{1}{nH^2} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{H}\right) \quad [20]$$

donde:

- $n$  es el número de elementos de la muestra.
- $H$  es el ancho de banda, que es una medida de la separación entre elementos de la muestra.
- $K$  es la función kernel.
- $x_i$  es la posición del evento  $i$ .

Para construir la tasa de actividad sísmica  $\lambda_k$ , se introducen dos cambios en la expresión anterior:

- Se omite la normalización con respecto al número total de eventos  $n$ , de forma que el resultado se expresa en términos de número de eventos.
- Cada función kernel se divide por un período efectivo de detección  $T$ , de manera que la densidad de eventos es por unidad de tiempo.

Introduciendo estos dos cambios, la expresión de la tasa de actividad sísmica resulta:

$$\lambda_k(M, x) = \frac{1}{[H(M)]^2} \sum_{i=1}^n \frac{K\left(\frac{x-x_i}{H}\right)}{T(x_i)} \quad [21]$$

Como puede verse, esta tasa de actividad sísmica  $\lambda_k$  depende de la posición y de la magnitud (a través del ancho de banda). Se trata de un sumatorio de funciones kernel, centradas en cada evento del catálogo con coordenadas  $x_i$ . Cada función kernel se pondera con un período efectivo  $T$ , que es una medida de la probabilidad de detección de un evento de iguales características en épocas pasadas. El que la integral de cada una de las funciones kernel sea la unidad se consigue a través del ancho de banda, que a su vez depende la distancia relativa entre eventos como se verá más tarde. La función kernel  $K$ , el período efectivo  $T$  y el ancho de banda  $H$  son los tres elementos principales que influyen en la tasa de actividad sísmica.

Las funciones kernel que se han propuesto en la literatura para muestras de tipo sísmico son el kernel Gaussiano, el kernel IBQ (*Inverse Bi-Quadratic*) y un kernel finito que adopta valores nulos para distancias mayores que el ancho de banda. Los dos primeros tipos fueron propuestos por Vere-Jones (1992); más tarde, Woo (1996a) propuso emplear el kernel IBQ o el kernel finito. Estos tres tipos se muestran en la Figura 42.

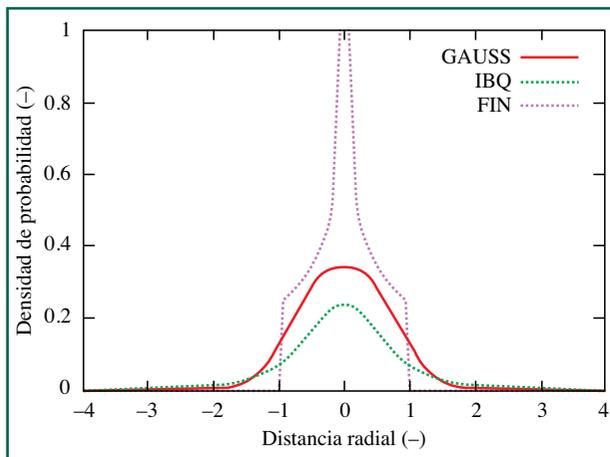


Figura 42. Tipos de función Kernel propuestas en la literatura par amodelizar la tasa de actividad sísmica.

El kernel IBQ, que es el originalmente propuesto por Woo (1996b) es el que se ha empleado aquí. Su expresión matemática es:

$$K_{IBQ}(x) = \left(\frac{\lambda_{IBQ} - 1}{\pi}\right) (1 + x^T x)^{-\lambda_{IBQ}} \quad [22]$$

donde  $\lambda_{IBQ}$  es un parámetro cuyo valor ha de ser mayor que la unidad y para el que Vere-Jones (1992) sugiere valores entre 1,5 y 2,0.

El periodo efectivo  $T$  tiene que definirse para cada terremoto del catálogo. Si el catálogo fuera completo este período efectivo sería igual al periodo de tiempo cubierto por los eventos; como en la mayoría de los casos, incluyendo este estudio, el catálogo no es completo, es necesario estimar periodos efectivos de detección: el objeto es capturar correctamente la tasa temporal de actividad sísmica sin tener que eliminar eventos de la parte no completa, pues esto afectaría a la distribución espacial de la tasa de actividad.

El ancho de banda  $H$  se asume que depende de la magnitud a través de una ley exponencial, en concreto la que propuso Woo (1996a):

$$H(M) = c \exp(dM) \quad [23]$$

donde:

- $c$  y  $d$  son parámetros que han de ajustarse a partir de los datos del catálogo.
- $M$  es la magnitud, o la medida empleada para cuantificar los terremotos.

Este tipo de dependencia entre la magnitud y el ancho de banda sigue la forma exponencial que se encuentra entre la magnitud y otros parámetros sísmicos como por ejemplo la longitud de la falla.

Una vez calculada la tasa de actividad sísmica, y habiendo seleccionado el modelo de atenuación, la tasa de ocurrencia de los diferentes niveles de aceleración  $y_j$  se estima de la siguiente forma:

$$\lambda_{y_j} = \int_{\Omega} \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} P[Y > y_j | M, x] \lambda_k(M, x) dM dx \quad [24]$$

La tasa de ocurrencia  $\lambda_{y_j}$  se calcula con la expresión anterior. La tasa  $\lambda_k$  sigue exactamente el suma-

torio expuesto en la ecuación [21]: el procedimiento es sencillo aunque muy intenso ya que para cada nivel de magnitud  $M$  hay que contabilizar las contribuciones de las funciones kernel posicionadas en cada uno de los eventos. La función kernel es la especificada en la ecuación [22] y la forma del ancho de banda  $H$  la de la ecuación [23]. Con estas cuatro expresiones matemáticas queda determinada la construcción de la tasa de actividad sísmica.

La tasa  $\lambda_k$  ha de calcularse para el área que es susceptible de generar terremotos relevantes para el área de estudio. La extensión de esta área depende, por un lado, del periodo de retorno más bajo para que se quiere calcular el movimiento de diseño, o alternativamente del nivel mínimo de movimientos del terreno para los que se quiere calcular la probabilidad excedencia; por otro lado, de las magnitudes máximas presentes en el catálogo, debido a la dependencia del ancho de banda de la magnitud, de acuerdo con la expresión [23].

La metodología fue originalmente implementada por Gordon Woo en el programa KERFRAC (Woo, 1996b). En el contexto del trabajo de Crespo (2011), el código fue modificado en varios aspectos que se explican en detalle en su trabajo. En cualquier caso los aspectos más relevantes, por afectar al algoritmo de cálculo son dos:

- Para cada nivel de magnitud, en el momento de compilar las contribuciones de todos los eventos, la decisión de si un sismo se considera o se descarta se realiza en función de la incertidumbre del evento, en concreto del número de desviaciones típicas que separan las magnitudes de integración y del evento. Este criterio tiene mayor impacto en los terremotos históricos, por tener una mayor incertidumbre.
- Se ha introducido la profundidad de los epicentros como variable de integración, y por lo tanto se puede tratar la incertidumbre asociada a la profundidad de los eventos como variable aleatoria. Este aspecto se puede aprovechar únicamente si la ley de atenuación tiene la profundidad como variable independiente.

La tasa de actividad sísmica se calcula de acuerdo a la expresión [21]. La función kernel empleada es de tipo IBQ (*Inverse Bi-Quadratic*).

Como se vio, la dependencia del ancho de banda

con la magnitud, se asume de la forma indicada en la expresión [23], tratándose de una dependencia exponencial comúnmente aceptada entre la magnitud y otros parámetros sísmicos.

Los valores de los parámetros  $c$  y  $d$  han de derivarse para cada cálculo de peligrosidad por ajuste de mínimos cuadrados siguiendo el siguiente proceso:

- Se clasifican los eventos en tramos de magnitud.
- Para cada sismo, se calcula el epicentro más cercano dentro de los clasificados en su mismo rango.
- Se hace la media de todas las distancias mínimas calculadas en un mismo rango de magnitud. Dicha media queda asignada al valor central de la magnitud dentro del tramo.
- Se hace el ajuste por mínimos cuadrados de las parejas distancia-magnitud obtenidas, de acuerdo con la expresión [23].

Este proceso se calcula de forma independiente para los terremotos superficiales y profundos.

Los períodos efectivos de detección  $T$ ,  $T(x_i)$  en la expresión [21], se calculan teniendo en cuenta si se trata de un evento superficial o profundo, y para los superficiales, a su vez se distingue entre epicentros terrestres y marinos.

Una vez clasificados los eventos de acuerdo a los criterios del párrafo anterior, el período efectivo se calcula teniendo en cuenta la magnitud y el año de ocurrencia de la siguiente forma:

- Se dividen los años en tramos de tiempo de manera que las fronteras entre tramos se deban a cambios en los medios de detección.
- Para cada intervalo de duración  $D_i$  y cada nivel de magnitud se estima una probabilidad de detección  $p_{im}$ .
- Se establece un año de referencia  $A_m$  para cada nivel de magnitud de la siguiente forma:

$$A_m = A_0 - \sum_i p_{im} D_i \quad [25]$$

donde:  $A_0$  es el año más reciente con registros de terremotos.

Es necesario asignar probabilidades de detección  $p_{im}$  para cada período de tiempo. Esto puede ha-

cerse por estimación directa de la probabilidad de detección de acuerdo con los medios disponibles en la época. En este caso, sin embargo, esta estimación se ha realizado comparando las tasas de actividad de cada tramo con la del periodo en el que el catálogo es completo para ese mismo nivel de magnitud. En el periodo de completitud la probabilidad es 1.0 y en el resto de periodos la probabilidad es proporcional a la relación de tasas detectadas.

Una vez definida la función kernel, el ancho de banda y los periodos efectivos se puede calcular la tasa de actividad de acuerdo a la ecuación [21]. La tasa resultante depende de la posición y de la magnitud.

### 4.3. Tratamiento de incertidumbres

Como ya se ha indicado, el cálculo de la peligrosidad sísmica involucra una serie de incertidumbres que es preciso conocer, acotar y cuantificar. Teniendo en cuenta la naturaleza de las mismas, normalmente se diferencia entre incertidumbre epistemológica e incertidumbre aleatoria, que se definen como:

- Incertidumbre epistemológica: asociada a los modelos asumidos de sismicidad, zonificación, predicción del movimiento, etc. Está es debida a la falta de conocimiento completo sobre las leyes que rigen cada proceso y sólo podría estimarse si se conociera el modelo real. En principio, una mejora en el conocimiento de esas leyes reduciría la incertidumbre epistemológica.
- Incertidumbre aleatoria: es la incertidumbre inherente a la naturaleza impredecible de eventos futuros y del movimiento que pueden causar. Se refiere, por tanto, a la variabilidad natural de los procesos relacionados con la generación del movimiento fuerte.

Por tanto, la incertidumbre aleatoria 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 cambio, la incertidumbre epistemológica no se puede cuantificar por medio de una distribución y para tratarla se recurre al for-

malismo del árbol lógico. Éste contiene diferentes nodos, que representan diferentes elementos que intervienen en el cálculo de la peligrosidad, de los que parten diferentes ramas u opciones alternativas, cada una de las cuales recibe un peso que refleja el grado de verosimilitud ofrecido por esa opción. En el cálculo de la peligrosidad sísmica, los diferentes estados se identifican, por ejemplo, con la definición de fuentes sísmicas, con su caracterización (ley de Gutenberg-Richter, terremoto característico, etc), con la ecuación de predicción del movimiento en el emplazamiento, etc. Para cada uno de ellos se define un nodo del árbol lógico, siendo las diferentes ramas las distintas opciones de zonificación, los diferentes modelos de sismicidad, los diferentes GMPE's, etc.

#### 4.3.1. Incertidumbre aleatoria

En este apartado se analizan tres fuentes principales de incertidumbre aleatoria, consideradas en el presente trabajo: la desviación  $\sigma$  de la GMPE, la magnitud de cada terremoto del catálogo y la magnitud máxima estimada de cada zona.

En todo estudio de peligrosidad sísmica, la incertidumbre aleatoria inherente al modelo de movimiento fuerte se tiene en cuenta a través de la  $\sigma$  dada en el modelo, que representa la variabilidad o dispersión de los datos que se ajustan al mismo. Éste generalmente proporciona estimaciones de la media o la mediana de los valores del parámetro de movimiento y (PGA o SA (T)) para una cierta magnitud  $m$  y distancia  $r$ . Pero los valores procedentes de los registros, suelen estar afectados de alto grado de dispersión ya que para una misma magnitud y distancia el movimiento registrado puede variar mucho, poniendo de manifiesto su carácter aleatorio. Lo que parece derivarse de las observaciones es que los valores de  $y$  siguen una distribución lognormal dependiente de la magnitud y de la distancia fuente-emplazamiento (y quizá de otras variables). La forma de esa distribución viene dada por la  $\sigma$  del modelo. Así, para un cierto par  $m$  y  $r$  podemos encontrar valores de  $y$  en la media del modelo  $\mu$ , en la media más-menos una desviación,  $\mu \pm \sigma$ , en la media más-menos dos desviaciones,  $\mu \pm 2\sigma$ , etc. El número de  $\sigma$  que se consideran en la predicción es precisamente el valor de la variable  $\varepsilon$ , definida an-

teriormente. Por tanto, la función densidad de probabilidad  $p(\varepsilon)$  que se incluye en el cálculo de la integral de peligrosidad sísmica da cuenta de la incertidumbre aleatoria inherente al modelo de movimiento fuerte.

En el caso de la magnitud máxima esperada, como ya se explicó en el apartado 2.3.2.2, no se considera en el cálculo como un valor único para cada zona, sino que se ha incluido como una función de distribución normal, obtenida a partir de la información que se tiene de fallas activas en la zona y del catálogo sísmico. Las fallas proporcionan información de las magnitudes máximas esperadas dependiendo de su longitud y el catálogo permite determinar la magnitud máxima registrada (o deducida) en la zona y la incertidumbre asociada a ella.

La consideración de la distribución de valores de magnitud máxima supone introducir un término más en la integral de peligrosidad. Si  $p(m_{máx})$  es la función de densidad de probabilidad de la magnitud máxima, entonces la ecuación [18] se transforma en:

$$\begin{aligned} P_{\text{anual}}(y > Y) &= \lambda_{\text{anual}}(y > Y) = \\ &= \tau \iiint P(y > Y | m, r, \varepsilon, m_{máx}) \cdot p(m) \cdot \\ &\cdot p(r) \cdot p(\varepsilon) \cdot p(m_{máx}) \, dm \, dr \, d\varepsilon \, dm_{máx} \end{aligned} \quad [26]$$

En lo referente a la magnitud de cada terremoto, en el apartado 1.3 se explicó que éste era un parámetro sujeto a una incertidumbre que dependía, 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. Dicho parámetro incluye, desde intensidad macrosísmica hasta diferentes escalas de magnitud ( $M_w$ ,  $m_b$ ,  $m_{bLg}$ , etc.) y obviamente la incertidumbre original es diferente, lo que se propaga hasta deducir la incertidumbre de la estimación final, que en el presente estudio se trata de una medida de la magnitud momento,  $M_w$ .

Como se comentó en el apartado 1.3, se considera que el valor de la magnitud sigue una distribución triangular simétrica, cuyo valor central es el propio valor  $M_w$  que aparece en el catálogo sísmico y cuya

base tiene una anchura dependiente del tipo de magnitud origen. Para los diferentes tipos de parámetro de tamaño original, se establecen unas incertidumbres asociadas y funciones de probabilidad de forma triangular (Tabla 2). En el proceso de homogeneización a magnitud momento  $M_w$ , se realiza la propagación de la incertidumbre hasta obtener un catálogo homogéneo expresado en términos de  $M_w + \sigma_{M_w}$ . A lo largo de las sucesivas fases del cálculo, se incorpora el efecto de la incertidumbre ( $\sigma_{M_w}$ ) en el valor de magnitud a través de un proceso de Montecarlo. En cada una de las simulaciones, cada registro del catálogo recibe un valor de  $M_w$ , escogido de manera aleatoria de acuerdo con la función de probabilidad asociada a la distribución triangular asumida. De este modo se construye una versión del catálogo consistente con los márgenes de incertidumbre establecidos. En total, se han generado 500 catálogos por este procedimiento. Así se garantiza que la distribución de magnitud resultante para cada terremoto, obtenida a partir del conjunto de 500 simulaciones, reproduce la forma de la distribución triangular originalmente concebida para cada evento.

La cuantificación de la incertidumbre aleatoria planteada en este estudio supone un avance cuantitativo y cualitativo en el estudio de la peligrosidad respecto a otros anteriormente desarrollados en España. Salto cuantitativo porque la confección de 500 catálogos sísmicos supone multiplicar por 500 todos los cálculos a realizar. Y salto cualitativo porque la incorporación del dato de incertidumbre en la magnitud repercute directamente en diferentes etapas del cálculo.

La inclusión de las incertidumbres en las magnitudes y su propagación hasta el cálculo de peligrosidad se hace siguiendo el desarrollo que se muestra en la Figura 43.

#### 4.3.2. Incertidumbre epistemológica

El árbol lógico es la herramienta utilizada para evaluar la incertidumbre epistemológica asociada a distintos estadios del proceso de cálculo, debido al desconocimiento de los modelos reales que regulan cada estado. El cuestionamiento de estos modelos nos lleva a entender esta fuente de incertidumbre. Por ejemplo ¿cuál es la zonificación sismogénica correcta? ¿qué modelo o ecuación de predicción

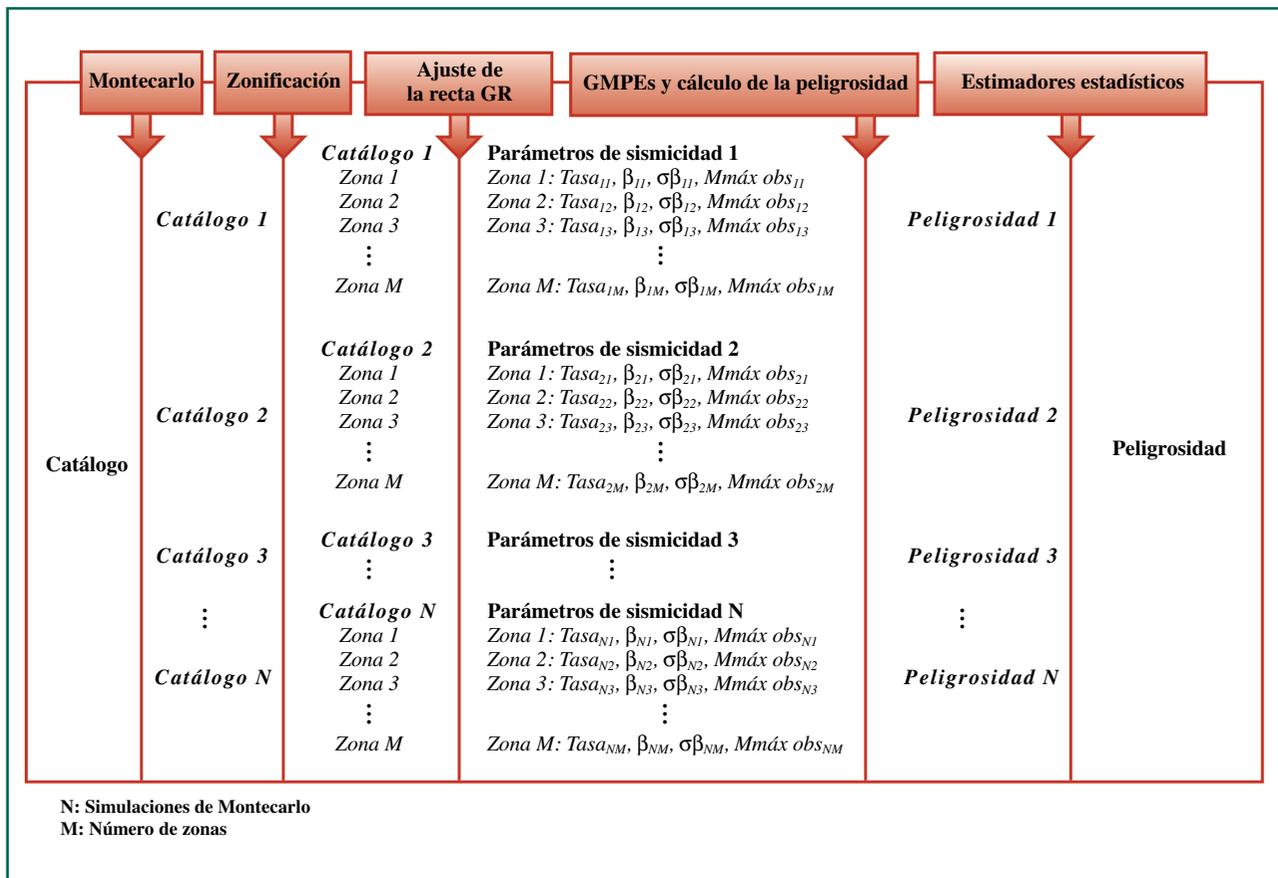


Figura 43. Esquema de procesos que se han desarrollado en cada rama del árbol lógico para incorporar la incertidumbre aleatoria procedente de la magnitud de los terremotos del catálogo.

del movimiento representa correctamente la atenuación de una zona? Cada pregunta admite diferentes respuestas posibles, y seguramente ninguna coincide exactamente con la real. Cada una representaría una opción de cálculo del correspondiente proceso. Al contemplar conjuntamente diferentes opciones se tiene en cuenta este tipo de incertidumbre, que no viene representada por una distribución. El árbol lógico se configura así con una serie de nodos que representan los diferentes estados (zonificación, modelo de recurrencia, atenuación, etc.) y una serie de ramas colgando de cada nodo que representan opciones concretas del mismo (modelo 1, modelo 2, etc.). Cada una de las opciones alternativas lleva asociada un peso (valor numérico entre cero y uno) que da cuenta de la verosimilitud relativa que se otorga a esa opción. Los pesos de todas las ramas que parten de un mismo nodo suman la unidad.

En este estudio, se ha configurado un árbol lógico con cinco nodos, que corresponden a (Figura 44):

1. *Método de estimación de la peligrosidad sísmica.*

Este nodo presenta las dos alternativas mencionadas: el método probabilista zonificado y el método probabilista no zonificado.

2. *Determinación del parámetro  $\beta$ , a escala regional o local.*

Algunos autores determinan el parámetro  $\beta$  de la relación de Gutenberg-Richter en zonas sismogénicas regionales, de mayor tamaño que las zonas en las que se calcula el parámetro  $\alpha$ . En este nodo se distingue entre este procedimiento y el que deriva los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  para cada zona individualmente.

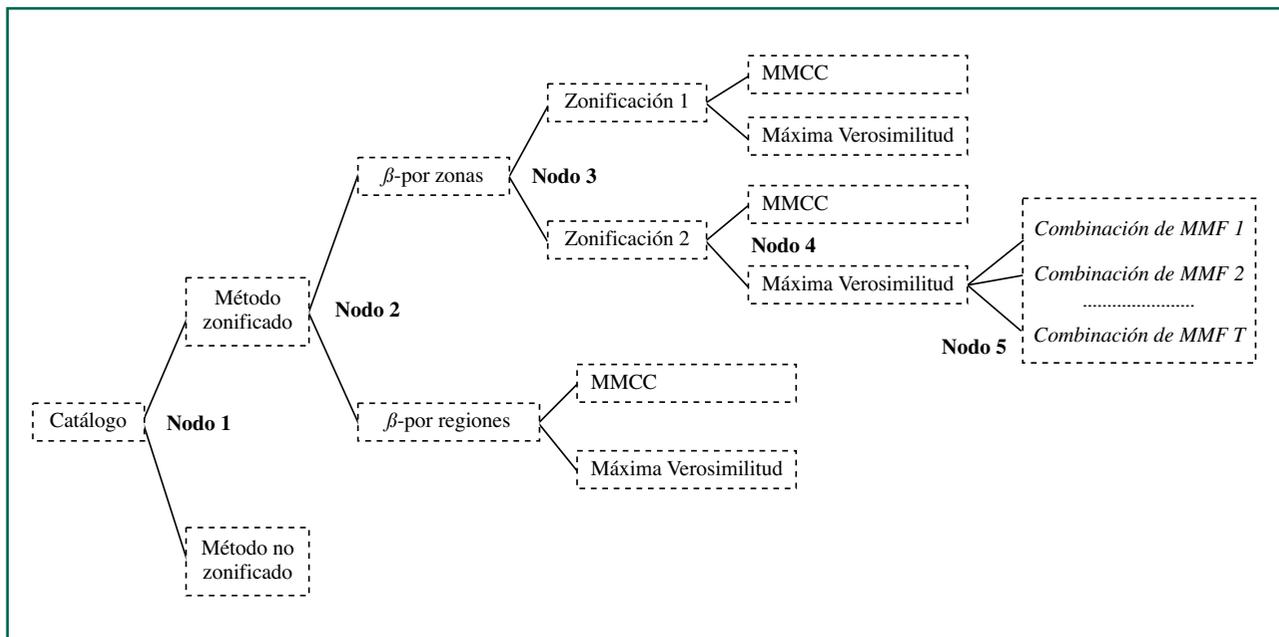


Figura 44. Árbol lógico utilizado en el proyecto.

### 3. Zonificación sismogénica.

En principio se consideran tres zonificaciones: dos en las que los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  de cada zona se calculan individualmente (la del mapa de la norma NCSE-02, que finalmente recibió un peso nulo, y la de García Mayor-domo *et al.*, 2012) y una diseñada para obtener el parámetro  $\beta$  de forma regional (la zonificación de ByA).

### 4. Método de obtención de los parámetros de la relación de Gutenberg-Richter.

Se usan dos métodos alternativos: mínimos cuadrados (utilizado en versiones anteriores de la norma) y máxima verosimilitud.

### 5. Combinación de modelos de movimiento fuerte, incluyendo modelos compuestos para diferentes rangos de magnitud.

Como se indicó en el capítulo 3, se distinguen dos tipos de modelos de movimiento fuerte según su zona de aplicación: los modelos que se aplican a zonas profundas y a la zona de SO del cabo San Vicente (modelos de Youngs *et al.*, 1997 y de Zhao *et al.*, 2006), y los modelos que se usan para el resto de las zonas (zonas superficiales de la Península y el norte de

África). Dentro de estos últimos, cabe distinguir entre modelos que tienen validez para todo el rango de magnitudes considerado (Cotton *et al.*, 2008 y Boore y Atkinson, 2008) y modelos compuestos a partir de dos modelos diferentes, uno desarrollado para magnitudes bajas (modelos de Tapia, 2006; Bindi *et al.*, 2011 y el modelo propio) y otro desarrollado para magnitudes altas (modelos de Akkar y Bommer, 2010 y de Cauzzi y Faccioli, 2008).

Tras las reuniones entre el Grupo de Trabajo y la Comisión de Seguimiento se propuso el esquema de ponderación del árbol lógico recogido en la Figura 45.

De alguna manera, el árbol lógico recoge una mayor versatilidad de opciones de cálculo que los mapas de peligrosidad de las normas precedentes. Para mantener una cierta continuidad, al método zonificado, habitualmente empleado en mapas anteriores, se le ha otorgado mayor peso que al método no zonificado. De modo similar, las zonificaciones en las que se calcula el parámetro  $\beta$  de forma individual reciben un peso mayor. Quizá el mayor cambio de tendencia se aprecia en el método de ajuste para la determinación de los coeficientes de la ecuación de Gutenberg-Richter, donde, de acuerdo

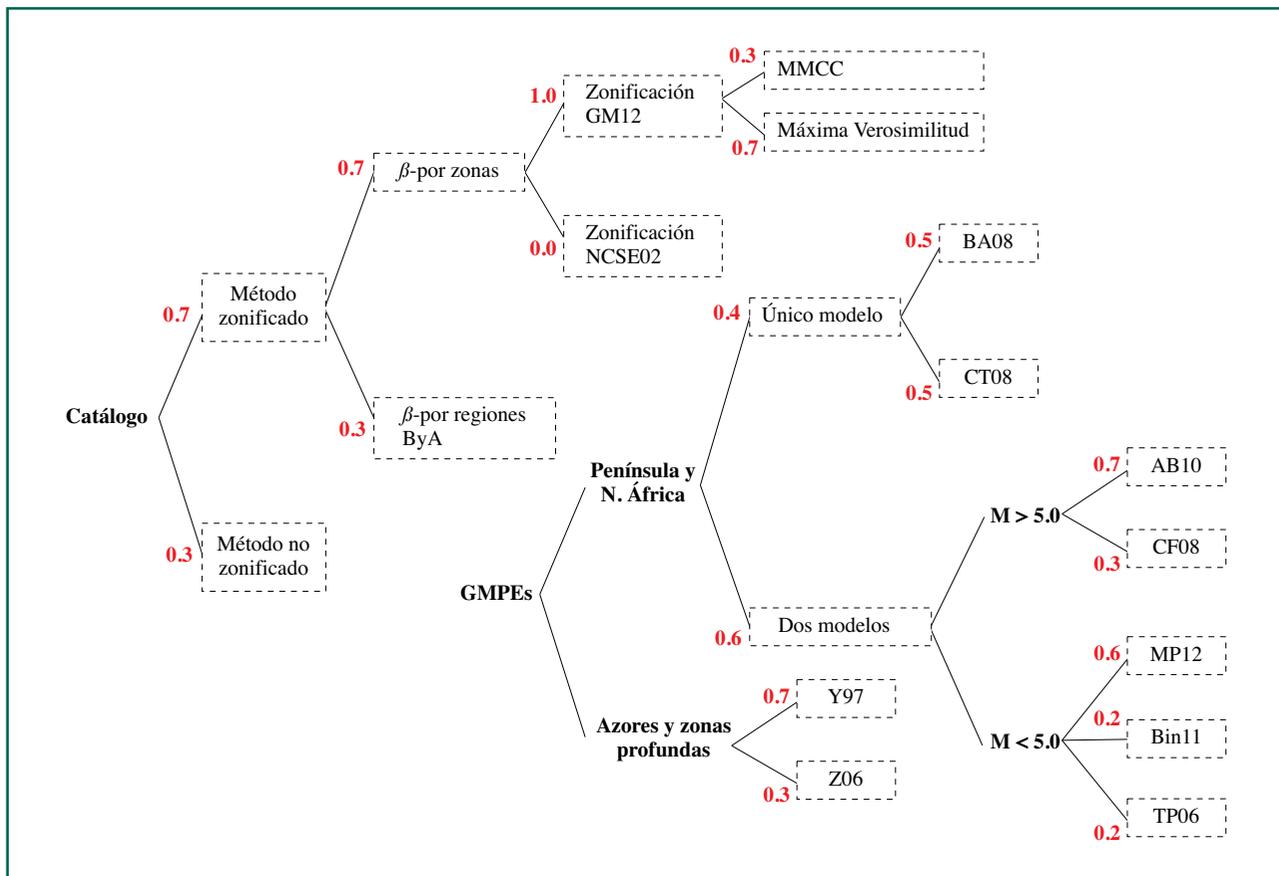


Figura 45. Árbol lógico con los pesos utilizados en el proyecto.

con la literatura especializada, se otorga mayor peso al método de máxima verosimilitud que al de mínimos cuadrados que se empleó en el pasado. Por último, aquellas combinaciones de modelos de movimiento fuerte que incorporan dos modelos para zonas superficiales (uno de ellos para magnitudes bajas desarrollado con datos locales) reciben un peso mayor.

#### 4.4. Especificaciones de cálculo

Para cada emplazamiento, la estimación final de peligrosidad sísmica, incorporando los dos tipos de incertidumbre antes citados, sigue la siguiente secuencia:

1. Se realizan 500 simulaciones sobre el catálogo de proyecto escogiendo aleatoriamente

el valor de magnitud de cada de acuerdo con la distribución de probabilidad de la magnitud definida previamente y se obtienen 500 catálogos sísmicos.

2. En el método zonificado, se determinan los 500 catálogos sintéticos correspondientes a cada zona de cada zonificación sismogénica y se calculan los parámetros de la distribución de Gutenberg-Richter truncada (de acuerdo con la manera de determinar el valor de  $\beta$  de forma regional o individual y con los dos métodos de ajuste).
3. La peligrosidad se calcula, a partir de cada catálogo, con las diversas combinaciones de modelos de movimiento fuerte adoptadas. Resultarán tantas estimaciones de peligrosidad como catálogos iniciales se hayan confeccionado (o sea, 500 estimaciones de peligrosidad).
4. Con la distribución de 500 estimaciones de

peligrosidad obtenidas se determinan sus parámetros estadísticos centrales y sus medidas de dispersión, resultando finalmente una estimación de peligrosidad unificada con su incertidumbre.

En el proyecto se ha calculado por este procedimiento la tasa anual de excedencia en una malla de puntos de cálculo compuesta por  $150 \times 90$  nodos, separados 0.1 grados de latitud y longitud, respectivamente (Figura 46). El software de cálculo utilizado ha sido CRISIS2007 (Ordaz *et al.*, 2007).

Según las especificaciones iniciales del proyecto, la peligrosidad (tasa anual de excedencia) se calcula para varios niveles y diferentes parámetros de movimiento. Concretamente, se consideran diez

niveles equiespaciados en escala logarítmica entre 10 y  $1.500 \text{ cm/s}^2$  para los parámetros PGA y SA (0.1), SA(0.2) y SA(0.5 s) y entre 10 y  $1.000 \text{ cm/s}^2$  para SA (1 s) y SA(2 s). En todos los casos el cálculo se desarrolla en suelo tipo roca.

Con estos pares de valores resultantes (nivel de movimiento-tasa anual de excedencia), se determina la curva de peligrosidad para cada parámetro de movimiento considerado (Figura 47). Una vez trazada la curva, se puede obtener cualquier valor de aceleración correspondiente a una tasa anual de excedencia o periodo de retorno fijado. En nuestro caso se han obtenido los valores de PGA y SA (T) para  $T = 0.1, 0.2, 0.5, 1$  y  $2$  s correspondientes a periodos de retorno de 95, 475, 975 y 2.475 años.

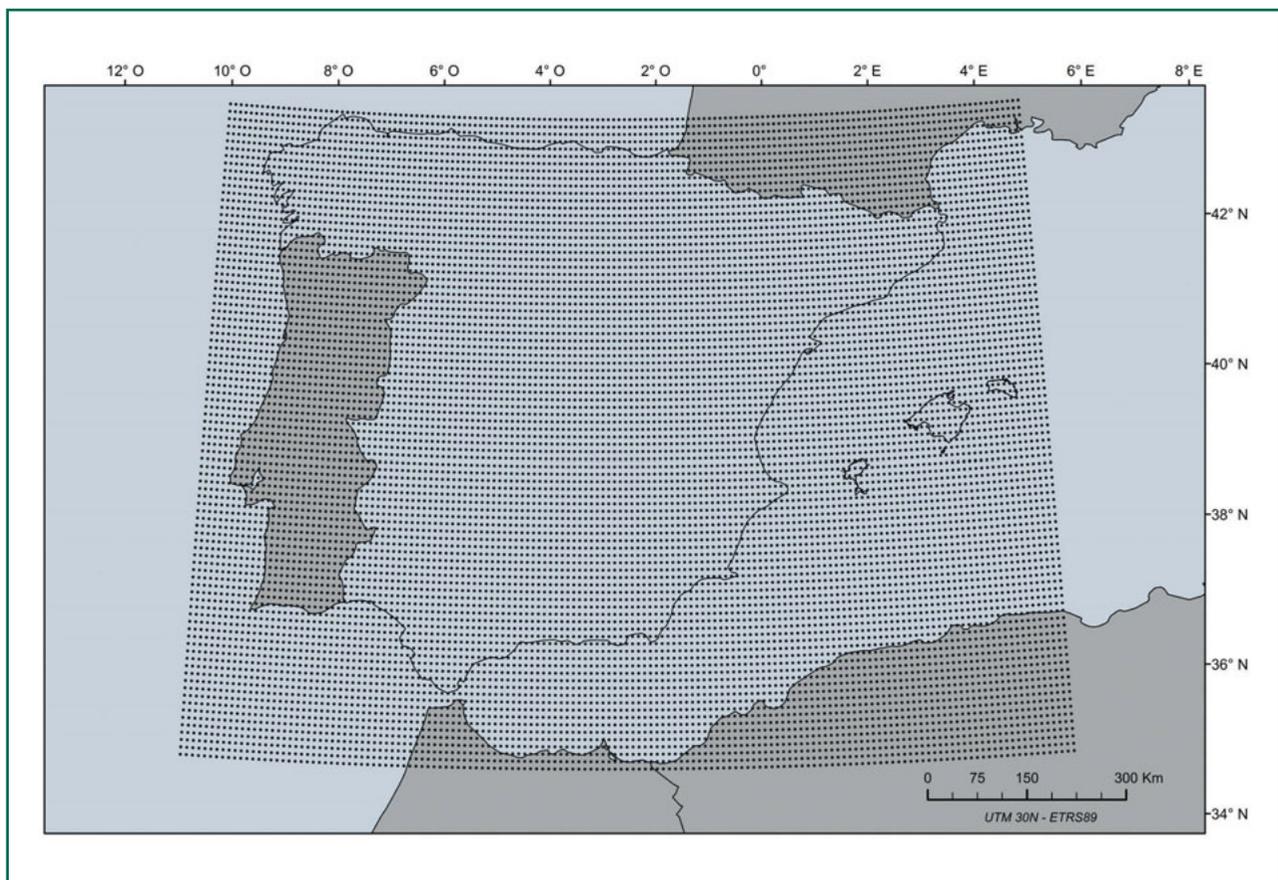


Figura 46. Malla de puntos de cálculo de la peligrosidad sísmica.

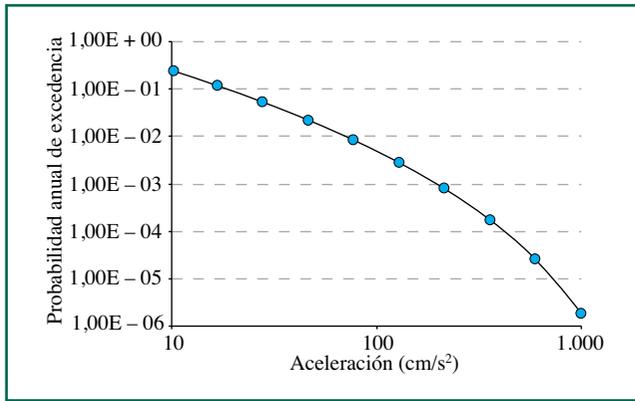


Figura 47. Ejemplo de curva de peligrosidad para PGA. con la zonificación GM12, la combinación de modelos de Akkar & Bommer (2010) y Modelo propio (2012) en un punto de latitud 37° N y longitud 3° W.

A partir de los valores de un determinado parámetro obtenidos en cada nodo de la malla de puntos considerada para un cierto periodo de retorno se ge-

nera finalmente, por interpolación, el correspondiente mapa de peligrosidad. Los resultados se muestran en el capítulo 6.

## Estudio específico en Canarias

### 5.1. Introducción

Para el estudio específico de la peligrosidad sísmica en las islas Canarias se han seguido, esencialmente, los pasos y la metodología desarrollada para la parte peninsular de España y zonas próximas. No obstante, dadas las particularidades de esta zona de islas volcánicas se han tenido en cuenta algunas consideraciones especiales.

### 5.2. Catálogo sísmico

#### 5.2.1. Introducción

Las islas Canarias forman un archipiélago volcánico intraplaca, próximo al margen continental africano Noroeste (borde de placa pasivo), situado sobre una corteza oceánica de edad jurásica, aunque se admite la posibilidad de que bajo las islas orientales esta corteza pueda tener un carácter transicional (oceánica-continental).

El carácter oceánico de la litosfera bajo las Canarias fue confirmado por distintos estudios de reflexión y refracción multicanal realizados a diferentes escalas (Bosshard y MacFarlane, 1970; Banda *et al.*, 1981; Watts *et al.*, 1997) y también por otros estudios gravimétricos (Dash y Bosshard 1969 y Carbó *et al.*, 2003).

Algunos de esos estudios (Dash y Bosshard, 1969; Bosshard y MacFarlane, 1970) y otros basados en el análisis de terremotos de la zona (Mezcua *et al.*, 1990, 1992), permitieron también identificar una importante fractura entre las islas de Gran Canaria y Tenerife en dirección NE-SO, con una longi-

tud estimada de 30 km y a la cual se ha asociado el terremoto del 9/5/1989 ( $m_{bLg}$  5.2), así como la importante concentración de sismicidad que se da en esta zona. Otros autores como Carbó *et al.* (2003) concluyen sin embargo, que no existe evidencia gravimétrica relacionada con esta gran factura y que los análisis de anomalías de Bouguer y la morfología submarina mostrada por la batimetría, indicarían otras direcciones para esta posible falla.

Desde el punto de vista geodinámico, la formación y evolución de las islas Canarias no está bien resuelta. Mientras algunos autores apoyan diversas variantes del modelo del punto caliente (o pluma térmica del manto), basados principalmente en las observaciones de la variación hacia el oeste de la edad del volcanismo, otros proponen modelos basados en la tectónica local y regional en conexión con la extensión marina de la zona de falla del S del Atlas. Entre éstos se encuentran el modelo de *fractura propagante*, el modelo de *ascenso de bloques* y el modelo *unificador* (Anguita y Hernán, 2000). Este último, trata de integrar aspectos considerados en los modelos precedentes. Por un parte, se reconoce del modelo de punto caliente que el origen del vulcanismo es debido a una anomalía térmica sublitosférica, aunque al no estar actualmente enraizada en el manto no conserva todas las características geofísicas y geoquímicas de un punto caliente. Por otra parte, se considera como un factor determinante del modelo la alternancia de periodos de compresión en el Atlas, seguidos de otros periodos distensivos con aumento del magmatismo y se explica la elevación de las islas mediante el levantamiento de bloques originado por fallas de cizalla en un régimen transpresivo (Hernán, 2004).

La sismicidad del archipiélago puede considerarse baja y dispersa y en gran parte asociada a procesos volcánicos. Una excepción a esta afirmación es la zona situada entre Gran Canaria y Tenerife, la cual presenta una mayor concentración de terremotos asociados a la zona de fractura mencionada. Esta baja sismicidad del archipiélago, ha condicionado el crecimiento de la red sísmica. En el año 1958 se instala la primera estación sísmica en Tenerife y posteriormente en el año 1975 se añaden dos más en La Palma y El Hierro (Mezcua *et al.*, 1990). En la actualidad las redes de alerta sísmica y vigilancia volcánica del IGN mantienen un total de 17 estaciones sísmicas permanentes en las siete Islas, así como algunas más de carácter temporal (incluidos acelerómetros).

En consecuencia el registro sísmico en Canarias no es tan extenso como en la península Ibérica y en él se hayan mezclados eventos de naturaleza tectónica y eventos asociados a episodios volcánicos.

### 5.2.2. Catálogo sísmico de proyecto

Para la preparación del catálogo de proyecto concerniente a esta región, se ha consultado en primer lugar el catálogo sísmico del IGN. La zona de explotación está comprendida entre los meridianos 20° O y 10° O y los paralelos 26° N a 30° N.

De esta primera consulta se extraen un total de 14.511 eventos, para el periodo que se extiende desde el año 1341, año para el que se consigna una posible erupción del Teide, hasta mediados de mayo de 2012. Una gran parte de estos eventos (del orden de 12.000) corresponde a terremotos muy pequeños pertenecientes a las sucesivas series sísmicas ocurridas en 2011-2012, en la isla de El Hierro y asociadas también a un proceso volcánico. Por otra parte, la primera asignación de intensidad que aparece registrada en el catálogo corresponde al año 1903, para un sismo en Santa Cruz de la Palma y la primera magnitud estimada corresponde al año 1964, para un terremoto localizado entre Tenerife y Gran Canaria.

Por tanto, el periodo histórico se considera desde 1903 hasta 1974, dado que hasta entonces los terremotos están caracterizados solamente por la intensidad (salvo alguna excepción). La máxima intensidad consignada para este periodo es VII.

El año 1975 puede considerarse el inicio del periodo instrumental, en el que los terremotos ya son caracterizados sistemáticamente por la magnitud. Las magnitudes utilizadas en este periodo corresponden a magnitudes duración,  $m_D$  hasta 1997 y posteriormente a magnitudes  $m_{bLg}$ ,  $m_b$  y  $M_w$  (Figura 48).

Un primer filtrado de los datos obtenidos en la consulta anterior, ha consistido en la eliminación de registros incompletos (sin localización o parámetro de tamaño), así como de intensidades epicentrales menores que III y magnitudes menores que 3.0.

Además, se ha realizado una revisión del catálogo del ISC (*International Seismological Center*), desde el año 1964 hasta la actualidad. Ésta ha permitido añadir un nuevo terremoto (22/1/1975) de  $m_b = 4.5$ , localizado al NO de La Palma, y ajustar la localización y magnitud de cuatro terremotos significativos de este periodo (Tabla 22). El número de terremotos que comprende el catálogo en la actualidad es de 372.

Los procesos seguidos a partir de este punto, al igual que se ha hecho para el catálogo peninsular, han consistido en la homogeneización a un parámetro de tamaño común,  $M_w$ , la detección y eliminación de la sismicidad no estacionaria, (premonitores, réplicas, dobletes y enjambres) y en un análisis de la completitud.

Para el proceso de homogeneización a  $M_w$  se han utilizado las relaciones desarrolladas en el apartado 1.2. Tras la homogeneización se han eliminado además 23 terremotos con  $M_w < 3.0$ .

Para la eliminación de réplicas y otros agrupamientos se han utilizado tanto las curvas como el software propuestos en el apartado 1.3. En este proceso se detectaron 18 series sísmicas y tras su eliminación, el catálogo final consta de 131 terremotos principales (Figura 49).

Finalmente, en el análisis de completitud, realizado siguiendo la metodología descrita en el apartado 1.4 se han obtenido los años de referencia que se muestran en la Tabla 23 para los diferentes rangos de magnitud  $M_w$ .

### 5.3. Zonificación seleccionada

Dada la sismicidad y la tectónica conocida del archipiélago se ha considerado adecuado utilizar la zonificación propuesta en el estudio de peligrosidad de

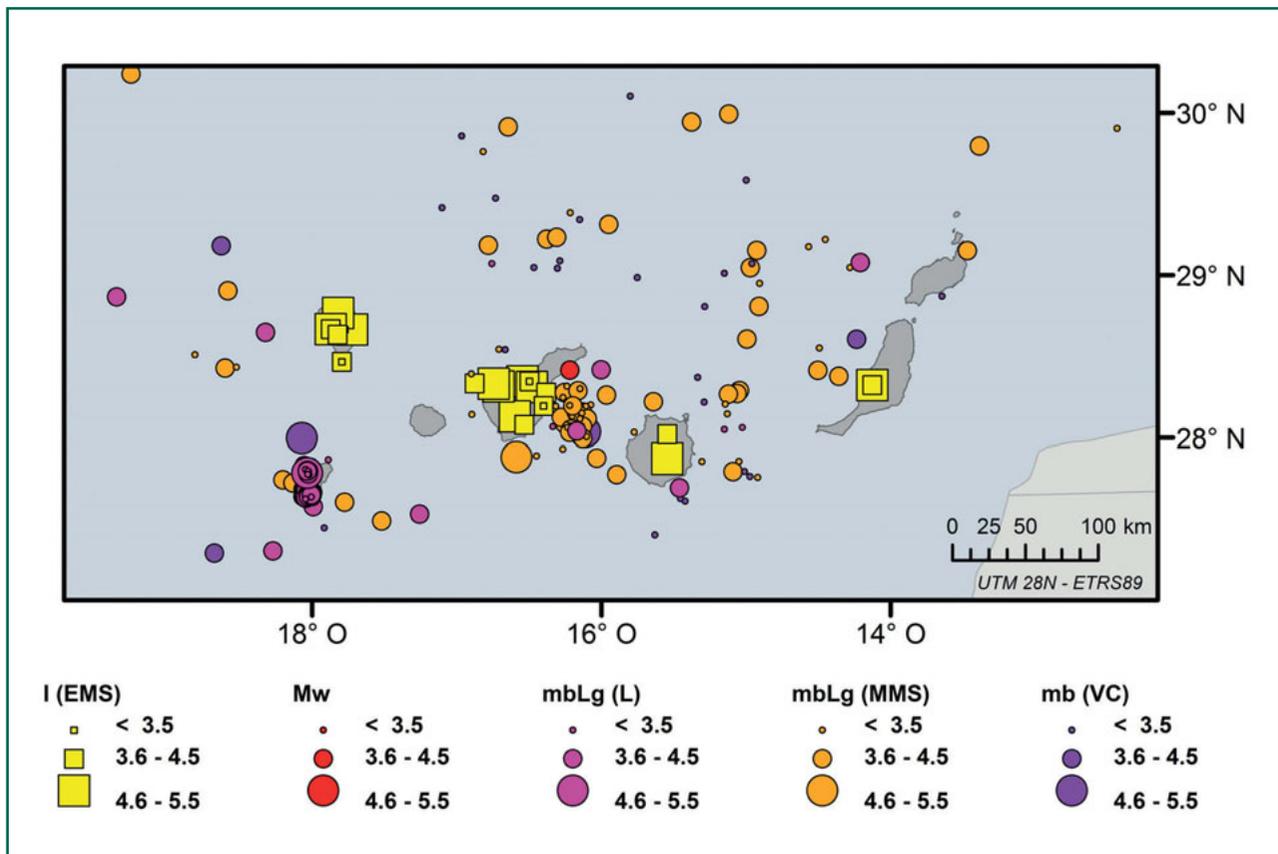


Figura 48. Sismicidad de Canarias representada con diferentes parámetros de tamaño, magnitud e intensidad.

TABLA 22  
Terremotos modificados en la revisión del catálogo ISC

Fecha	Hora	Longitud	Latitud	ISC-ID	M	Tipo	Observaciones
22/01/1975	00:26:36	-18.7006	29.1600	ISC-733467	4.5	$m_b$	No existe en catalogo IGN
09/05/1989	02:30:37	-16.1227	28.0606	ISC-404166	5.1	$m_b$	4.7 $M_S$ ; $M_0 = 4.1 \cdot 10^{16}$ Nm
21/03/1991	13:32:00	-18.6825	27.2699	ISC-339177	4.7	$m_b$	
06/06/1998	21:50:36	-14.2231	28.6326	ISC-1144236	4.3	$m_b$	3.5 $M_S$
06/05/2003	06:29:57	-18.0984	27.9923	ISC-6835772	5.1	$m_b$	

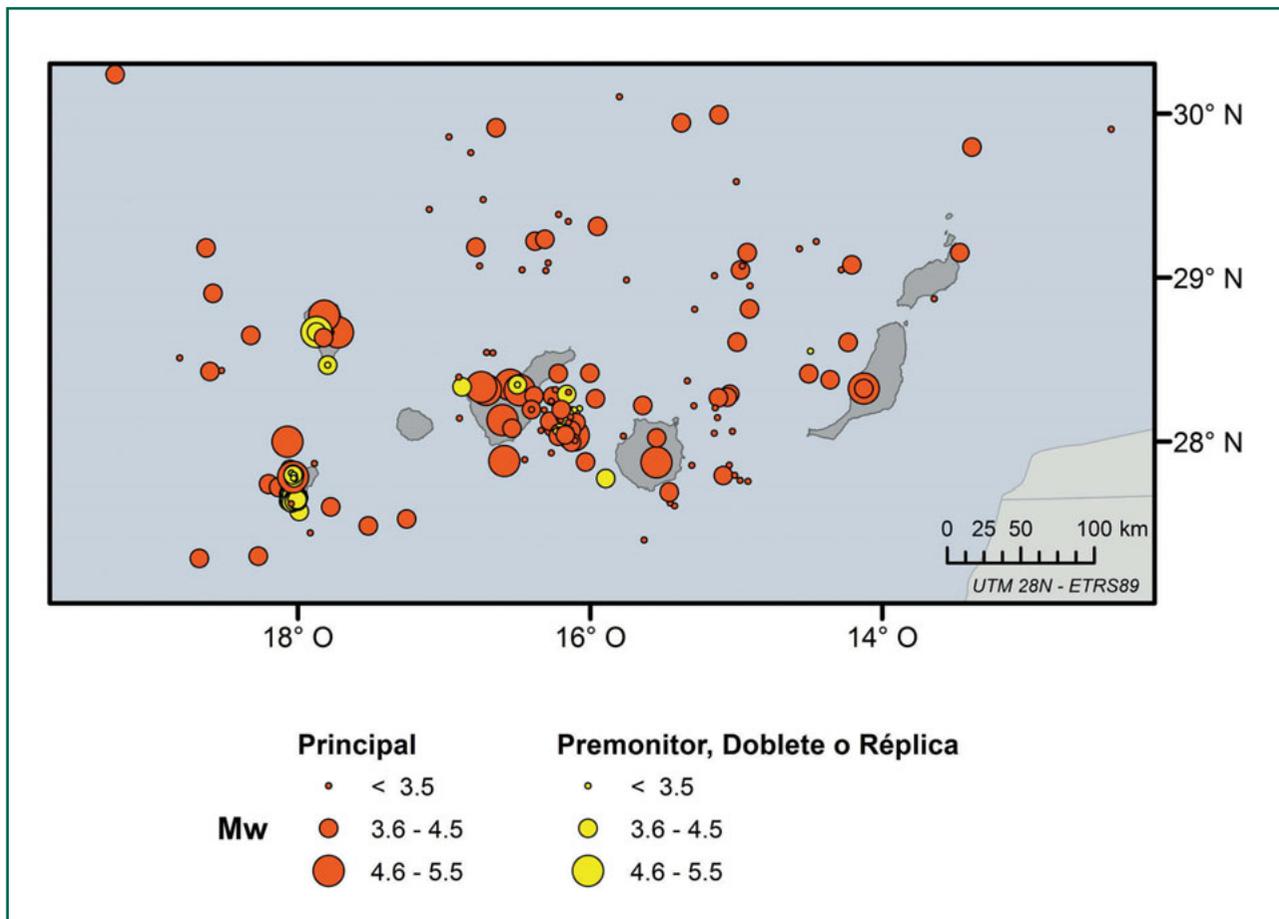


Figura 49. Catálogo sísmico de Canarias, distinguiendo entre sismos principales (en naranja) y réplicas, premonitores y enjambres (en amarillo).

TABLA 23  
Años de referencia para la magnitud  
en las islas Canarias

$M_w$	Año referencia
[3.0-3.4]	1982
[3.5-3.9]	1973
[4.0-4.4]	1964
[4.5-4.9]	1900
[5.0-5.5]	<1900

González de Vallejo *et al.* (2006). Esta zonificación se compone de tres zonas (Figura 50). Una de ellas incluye las islas más occidentales (Lanzarote y Fuerteventura) y otra el resto de islas, desde Gran Canaria hasta El Hierro. Se considera una tercera zona más pequeña y donde existe mayor densidad de terremotos entre Gran Canaria y Tenerife, que alberga la zona de fractura mencionada previamente.

Los parámetros de sismicidad del modelo de recurrencia de Gutenberg-Richter de las tres zonas consideradas han sido calculados siguiendo los métodos de máxima verosimilitud y de mínimos cuadrados, teniendo en cuenta la propagación de la incertidumbre en el parámetro de tamaño original (apartado 2.3.2). Los correspondientes valores se muestran en la Tabla 24, donde se indica la tasa  $\tau$  y la  $\beta$  de la ley de Gutenberg-Richter promedio de los catálogos simulados, obtenidas mediante los dos

tipos de ajuste (máxima verosimilitud y mínimos cuadrados) y también la función de distribución de la magnitud máxima con sus límites de truncamiento.

#### 5.4. Ecuación de predicción del movimiento fuerte

No existen suficientes datos de movimiento fuerte como para desarrollar una ecuación de predicción del movimiento fuerte aplicable a Canarias, ni tampoco para realizar un análisis de residuos que ayude a identificar los GMPE desarrollados por otros autores que resultan más idóneos para la zona de estudio. Por este motivo, se ha realizado una búsqueda en la literatura especializada para encontrar algún GMPE que pudiera ser adecuado para el

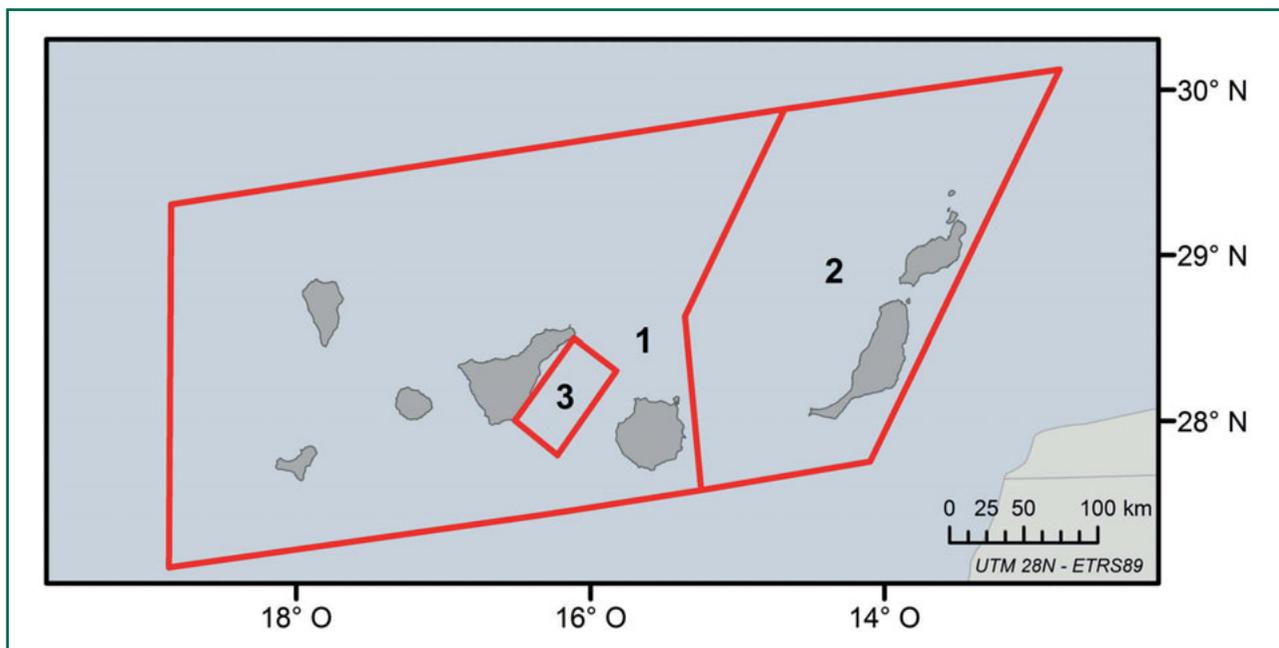


Figura 50. Zonificación sismogénica de Canarias (de González de Vallejo *et al.*, 2006).

TABLA 24  
Parámetros de sismicidad de las zonas de Canarias

ZONAS ISLAS CANARIAS										
	Máxima verosimilitud			Mínimos Cuadrados			Función de distribución de la magnitud máxima			
Zona	$\tau(4.0)$	$\beta$	$\sigma_\beta$	$\tau(4.0)$	$\beta$	$\sigma_\beta$	MM media	$\sigma_{MM}$	$MM_{\min}$	$MM_{\max}$
1	0.276	1.492	0.068	0.260	1.699	0.068	5.8	0.3	5.5	6.1
2	0.064	2.915	0.305	0.079	1.632	0.305	5.8	0.3	5.5	6.1
3	0.043	3.360	0.440	0.048	2.7205	0.440	5.0	0.3	4.7	5.3

estudio, como por ejemplo modelos desarrollados originalmente para zonas volcánicas.

Tras la recopilación y revisión de modelos con el criterio indicado, el modelo finalmente seleccionado y empleado para la estimación de la peligrosidad de las islas Canarias es el de Zhao *et al.* (2006) para zonas de subducción interplaca de Japón. Este es uno de los modelos mejor valorados de acuerdo con el trabajo de Delavaud *et al.* (2012a).

### 5.5. Especificaciones de cálculo

Las especificaciones del cálculo desarrollado para las islas Canarias son iguales que al caso general (territorio Peninsular, Ciudades Autónomas e islas Baleares), con las lógicas adaptaciones en las dimensiones de la malla de cálculo, el tratamiento del catálogo, de las zonas y de la selección de GMPE para el cálculo en las islas Canarias.

## Resultados

Los resultados obtenidos en el proyecto se muestran en las Figuras 51, 52, 53 y 54. Éstas muestran los mapas de aceleración pico horizontal media, PGA, esperada para periodos de retorno de 95, 475, 975 y 2475 años, respectivamente, en todos los puntos del territorio nacional y en zonas marinas próximas a la costa española. Todas ellas reflejan un patrón de variación similar pero con mayores valores esperados, como es lógico, para mayores periodos de retorno.

El mapa de periodo de retorno de 475 años muestra valores máximos en la zona SE de España (cuenca de Granada y Bajo Segura, donde se llega a 0.24 g) y a lo largo de la frontera hispano-francesa. Los mínimos valores, por debajo de 0.04 g, se obtienen en puntos de la Meseta Central, así como en puntos de la cuenca del Ebro y de las islas Baleares. La mayor parte de Andalucía, Murcia, la mitad sur de la Comunidad Valenciana, la parte norte de las provincias de Navarra, Huesca, Lérida, Gerona y Barcelona superan el valor esperado de PGA de 0.08 g (Figura 52). Los valores de la PGA, para este periodo de retorno, a partir de 0.04 g correspondientes a las capitales de los términos municipales de toda España aparecen reseñados en el Anexo VI.

El mapa de PGA esperada para periodo de retorno de 975 años presenta valores máximos de 0.28 g cerca de Murcia y Granada. Las zonas de mayor sismicidad (Málaga, Almería, Granada, Murcia, Alicante, sur de Valencia, norte de Gerona, de Lérida, de Barcelona, de Huesca y de Navarra) exceden el valor de 0.12 g, mientras que el valor de 0.08 g se supera en amplias zonas de Galicia, La Rioja y la mitad oriental del País Vasco (Figura 53).

El mapa de aceleración pico esperada para periodo de retorno de 2475 años aparece en la Figu-

ra 54. Los valores máximos rebasan los 0.40 g en el Bajo Segura y en la cuenca de Granada. La aceleración alcanza valores por encima de los 0.16 g en la mayor parte de las Béticas, de los Pirineos, del norte de la cadena Costero Catalana de Galicia y de las provincias de Badajoz, Logroño y Soria. De nuevo la meseta Central y el centro de la cuenca del Ebro presentan valores por de bajo de 0.08 g.

Los mapas de peligrosidad sísmica de otros parámetros de movimiento (aceleraciones espectrales) calculados en el proyecto se muestran en las Figuras 55, 56, 57 y 58. En ellos se indica el valor medio esperado, para un periodo de retorno de 475 años, de las aceleraciones espectrales SA(T) para los periodos T de 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 y 2.0 s, respectivamente.

Los diferentes mapas de aceleración esperada muestran que los máximos se alcanzan en las mismas zonas del sureste español: Béticas, cuencas de Granada y del Bajo Segura, etc., seguidos de otras zonas como las de Pirineos, el norte de la cadena Costero Catalana y Galicia, donde los valores obtenidos son relativamente elevados. Para aceleraciones espectrales de bajo periodo (0.1 y 0.2 s), las diferencias entre los valores máximos y mínimos de aceleración que se alcanzan se agudizan con respecto al mapa de PGA. Así, mientras que la diferencia entre valores máximos y mínimos de PGA entre las Béticas y la meseta central es de unos 0.20 g, dicha diferencias entre valores extremos de aceleraciones espectrales de 0.1 y 0.2 s es, respectivamente, de 0.52 g y 0.40 g.

Por su parte, los mapas de aceleración espectral de largo periodo (1.0 y 2.0 s) muestran valores más bajos y diferencias más suaves entre los valores de aceleración obtenidos en diferentes regiones de la

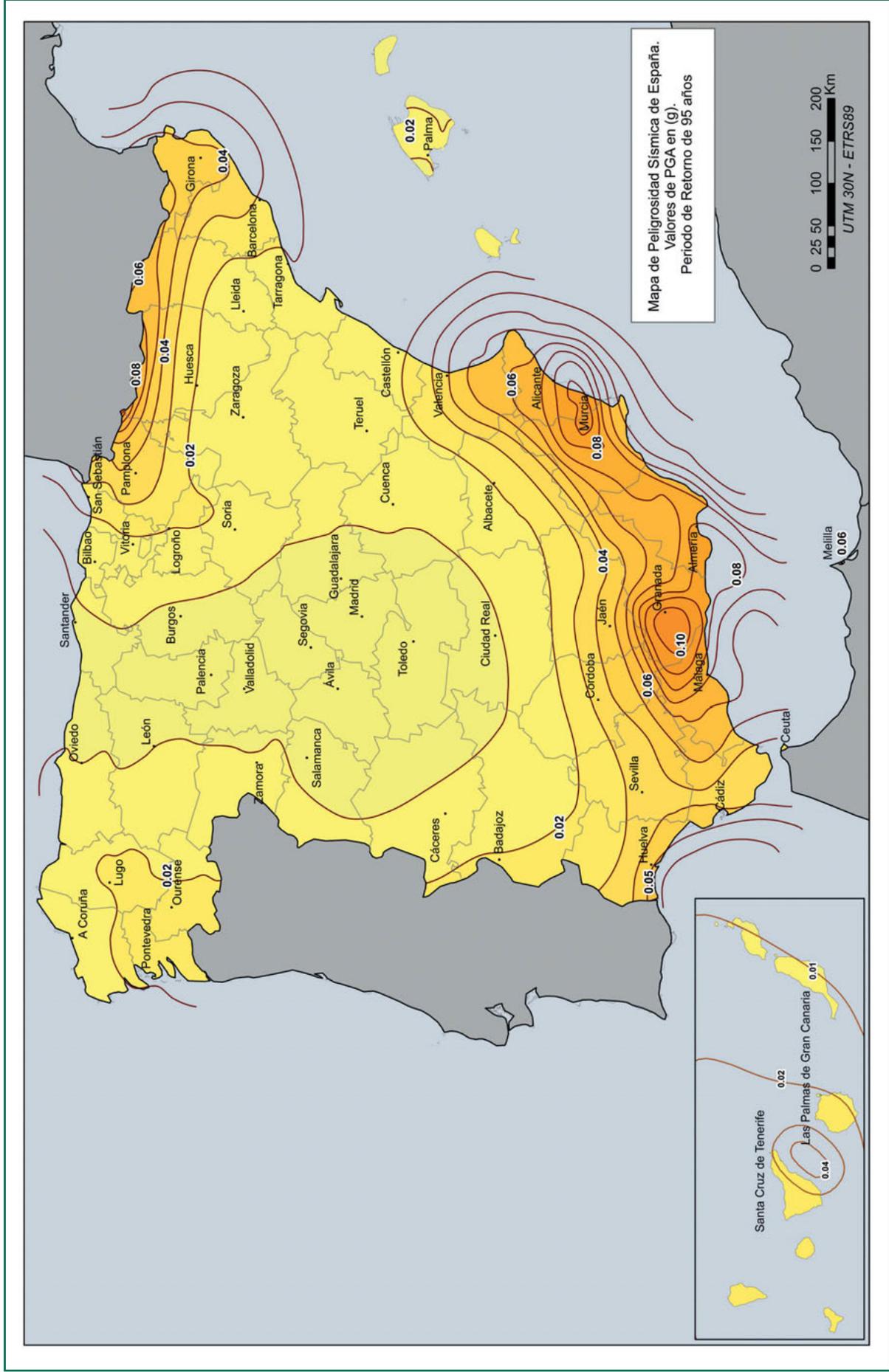


Figura 51. Mapa de aceleración pico del terreno (PGA) para un periodo de retorno de 95 años.

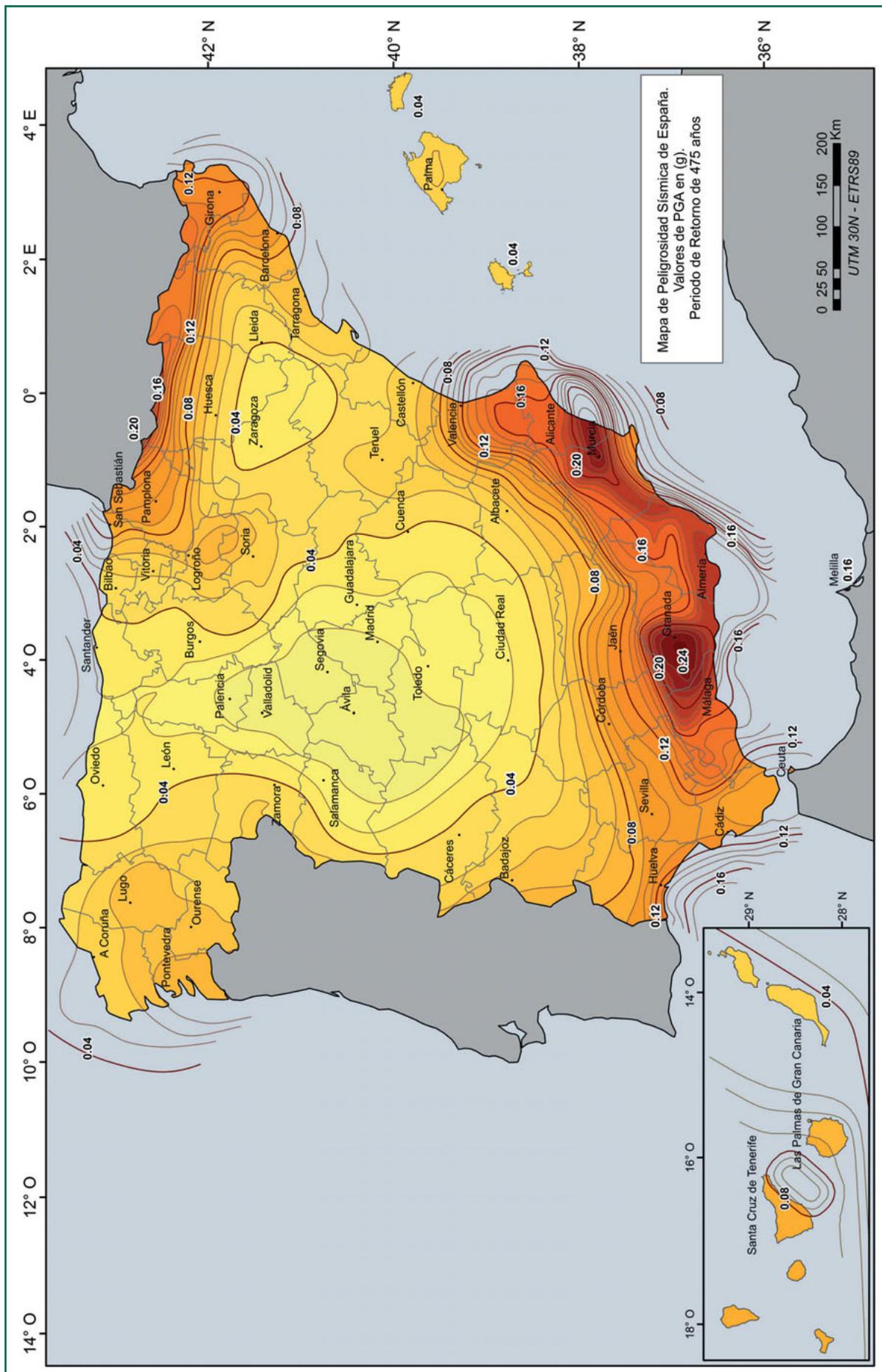


Figura 52. Mapa de aceleración pico del terreno (PGA) para un periodo de retorno de 475 años.

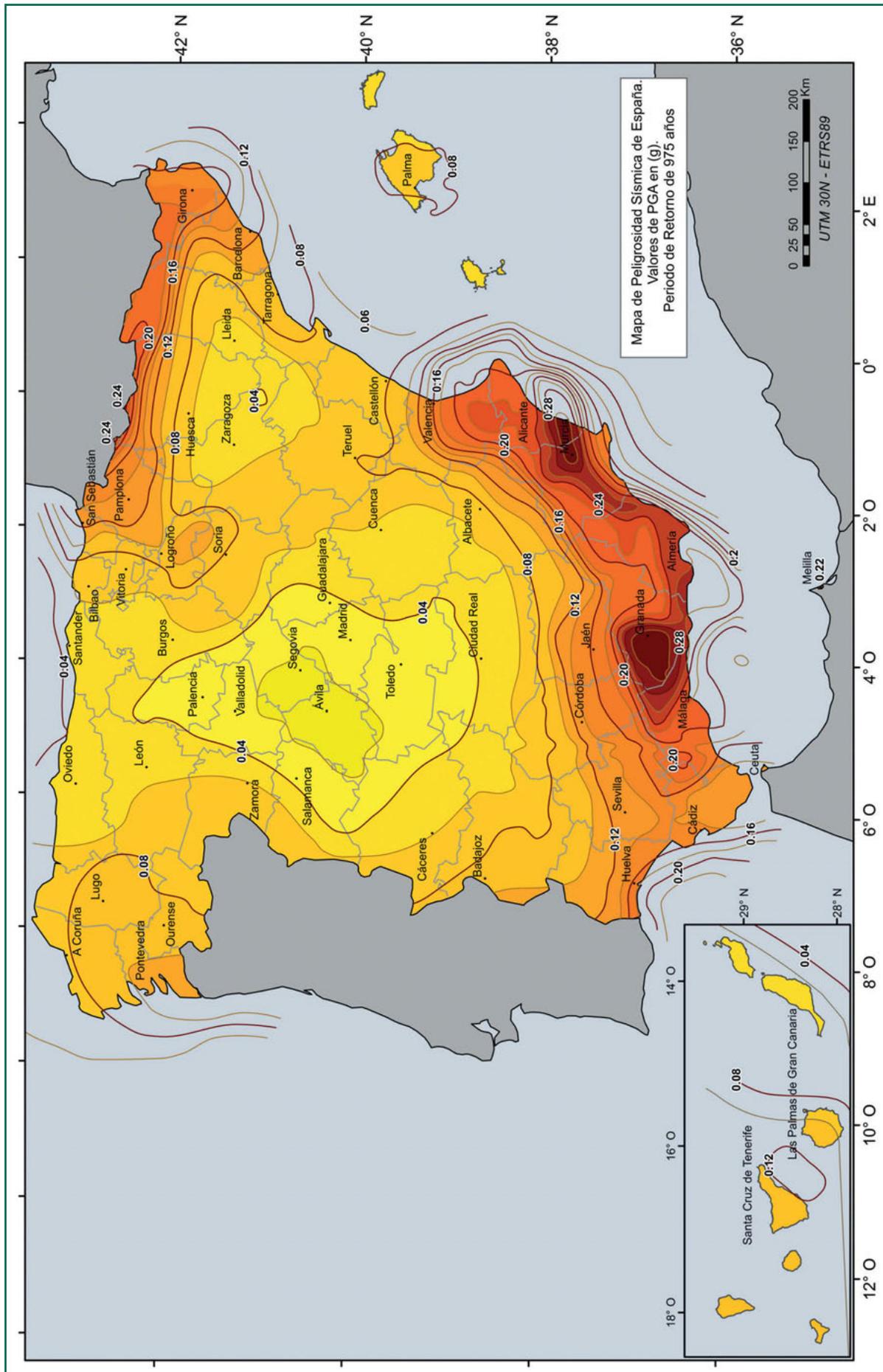


Figura 53. Mapa de aceleración pico del terreno (PGA) para un periodo de retorno de 975 años.



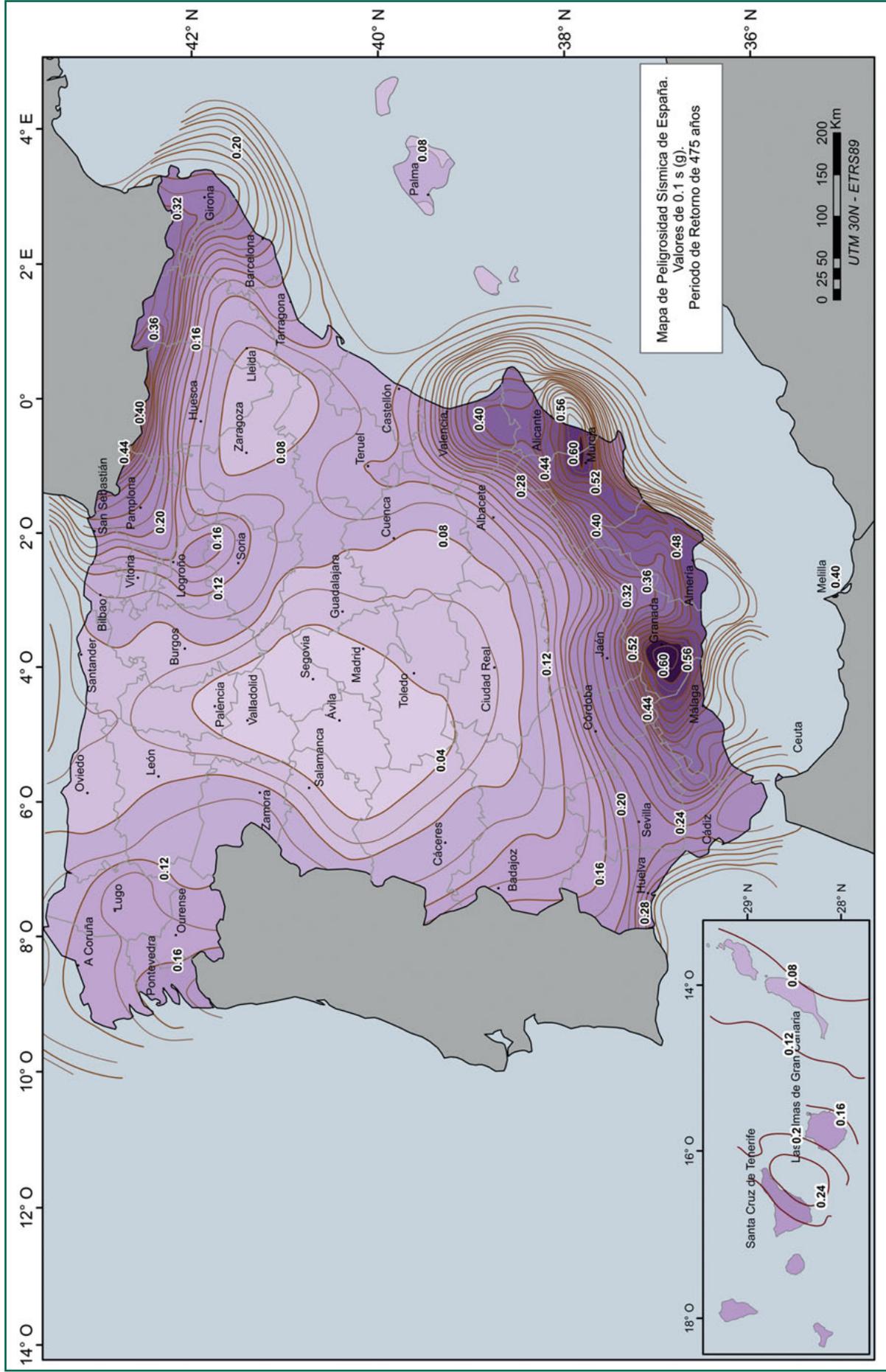


Figura 55. Mapa de aceleración espectral de periodo 0.1 segundos (SA(0.1s)) para un periodo de retorno de 475 años.

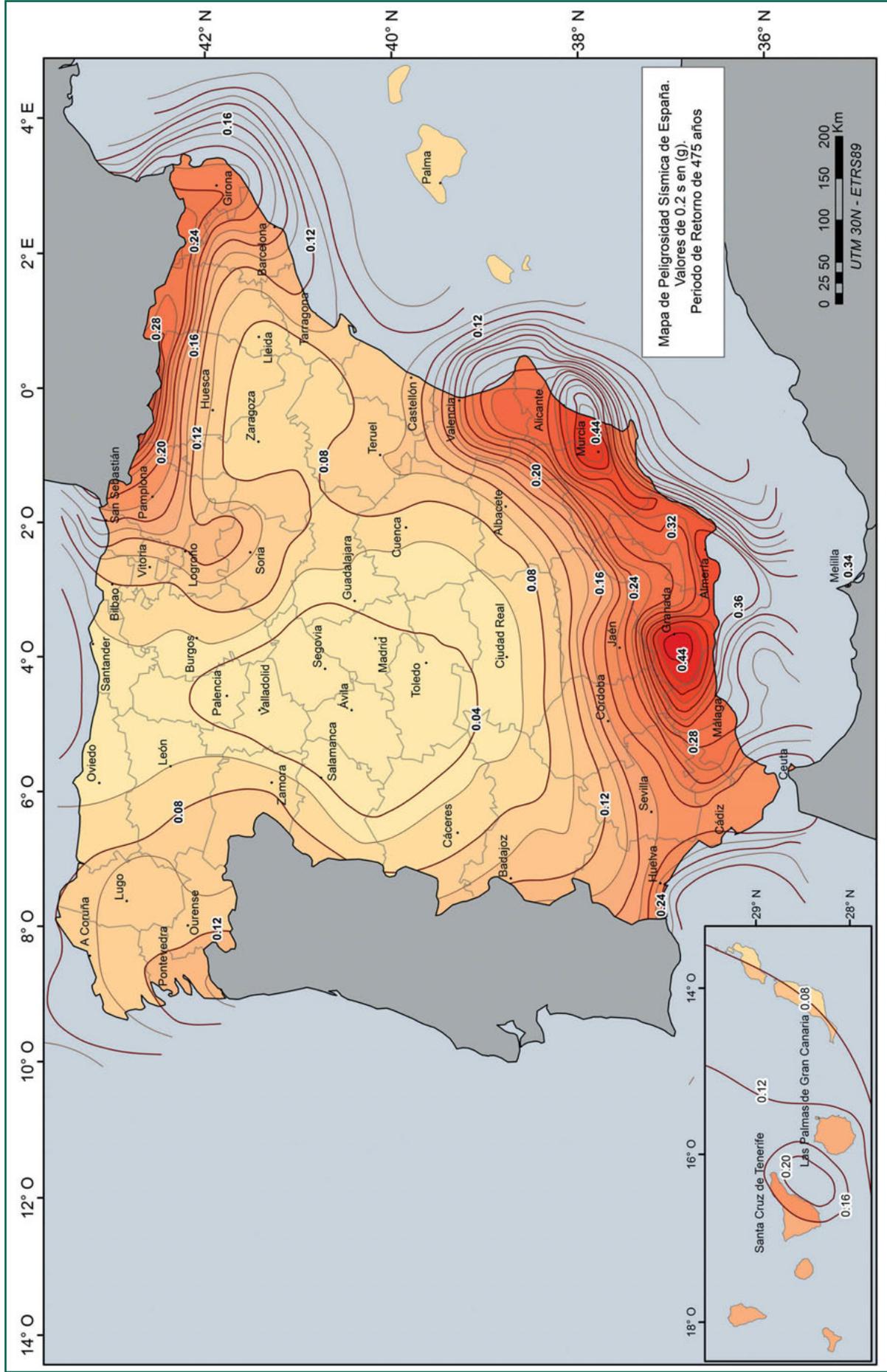


Figura 56. Mapa de aceleración espectral de periodo 0.2 segundos (SA(0.2s)) para un periodo de retorno de 475 años.



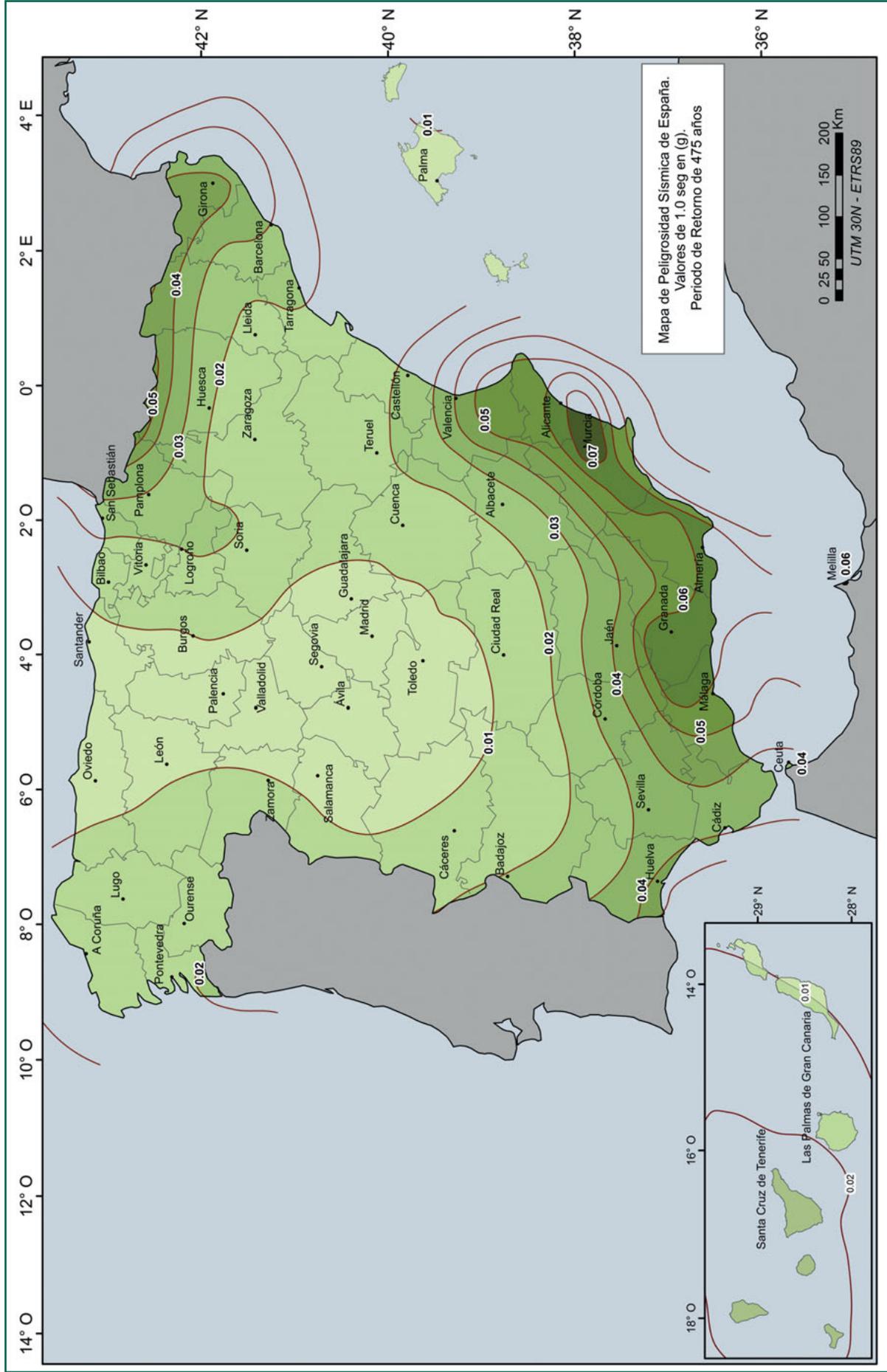


Figura 58. Mapa de aceleración espectral de periodo 1.0 segundos (SA(1.0s)) para un periodo de retorno de 475 años.

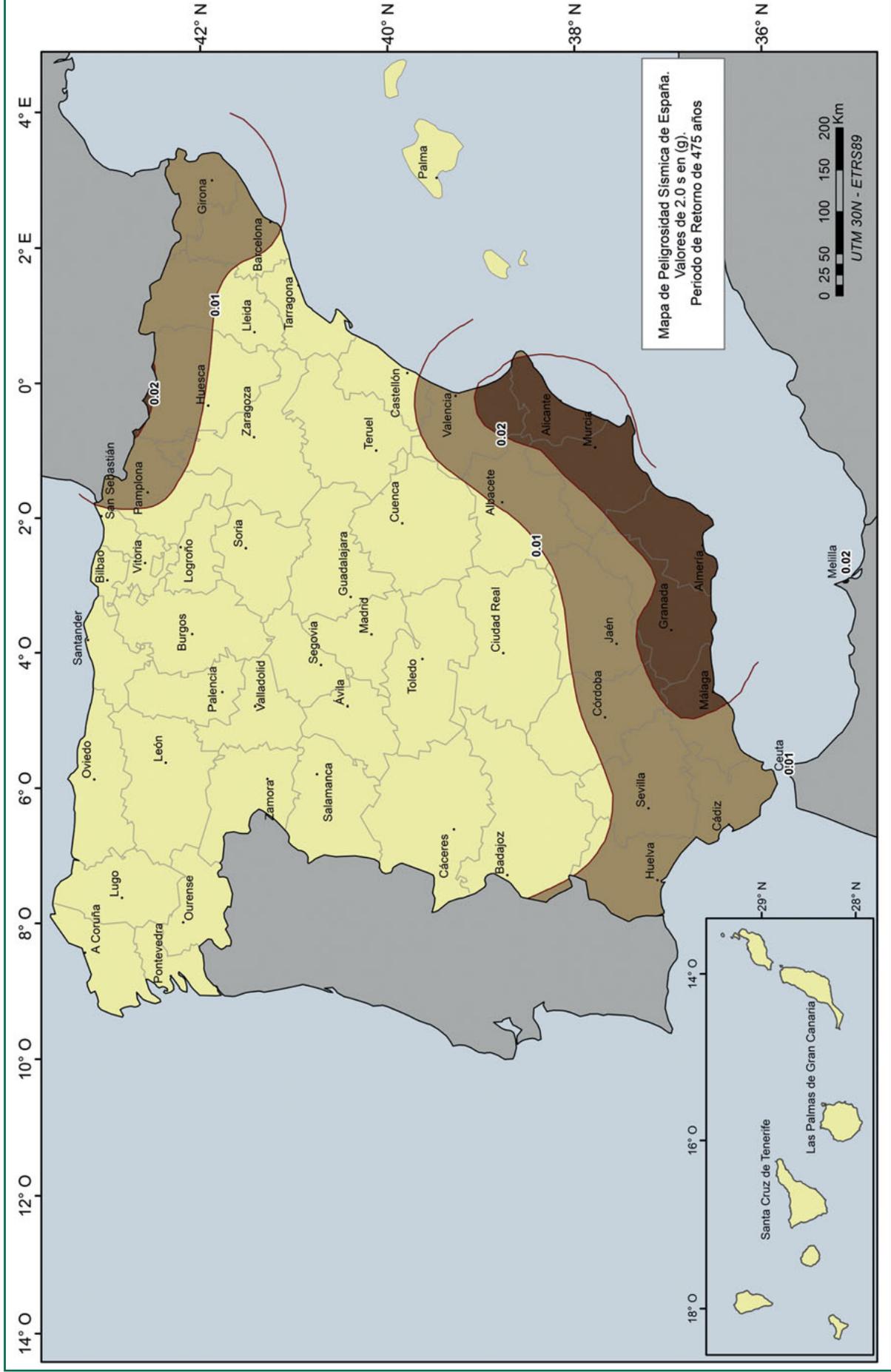


Figura 59. Mapa de aceleración espectral de periodo 2.0 segundos (SA(2.0s)) para un periodo de retorno de 475 años.

zona de estudio, de modo que todos los valores registrados en el territorio español se sitúan por debajo de los 0.08 g.

### **6.1. Incertidumbre de los resultados. Análisis de sensibilidad**

Los resultados de peligrosidad sísmica presentan una incertidumbre que ha sido incorporada adecuadamente en los cálculos. Cabe preguntarse cómo se refleja esa incertidumbre en los resultados finales. Una forma de estimar este efecto es analizar la variabilidad de los resultados ante diferentes alternativas incluidas en el cálculo. En principio, las zonas donde se observe una gran variabilidad de los resultados serán zonas donde exista mayor incertidumbre sobre los resultados finales.

Un indicador de la variabilidad de los resultados, en nuestro caso de un conjunto ponderado de estimaciones de peligrosidad, es el coeficiente de variación (COV), que se define como el valor de la desviación estándar de la distribución de resultados dividido entre el valor medio. En general, mayores valores de COV indican mayor variabilidad de los

resultados. En peligrosidad sísmica normalmente los valores de COV se sitúan entre 0.2 y 0.6.

Las zonas en las que los valores de COV son más pequeños, y por tanto, donde los resultados son más robustos ante opciones de cálculo alternativas, coinciden con las zonas de sismicidad y de peligrosidad más elevada. Por el contrario, las zonas de menor sismicidad o que muestran mayores gradientes horizontales de aceleración son las que presentan mayores valores de COV.

Para intentar desglosar más el valor COV y la influencia que tienen en él la consideración de las distintas fuentes y los modelos de movimiento fuerte, se ha estudiado por separado cada uno.

En este caso, el diferente tratamiento que hacen de la sismicidad los métodos zonificado y no zonificado por una parte, y la diferente división de la sismicidad postulada por las dos zonificaciones utilizadas por otro, explican los altos valores de COV observados. Por su parte, los valores de COV asociados a los modelos de atenuación empleados son relativamente bajos, evidenciando una menor variabilidad de los resultados al uso de diferentes combinaciones de modelos de movimiento fuerte que al uso de diferentes modelos de zonificación de las fuentes.



## Comparación de correlaciones de la magnitud desarrolladas en el estudio con otras publicadas

En la Figura I.1 se compara gráficamente la relación obtenida en este trabajo a partir de los datos de intensidad, con las relaciones obtenidas por Gutenberg y Richter (1956); García Blanco (2009); Stucchi

*et al.* (2010); Johnston (1996b) y Rueda y Mezcuca (2001).

Las expresiones correspondientes se muestran en la Tabla I.1.

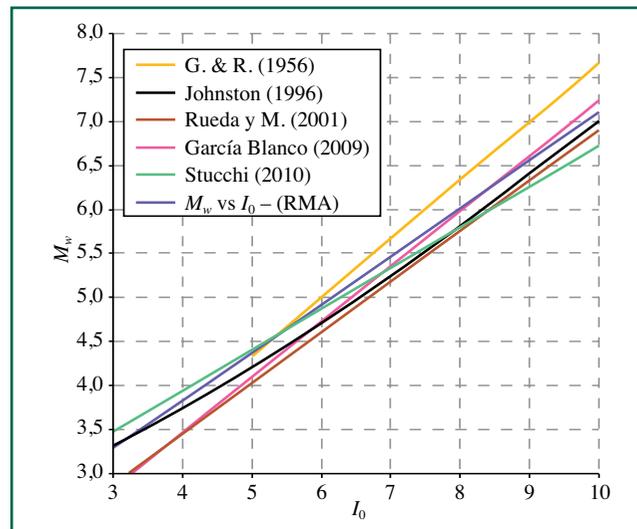


Figura I.1. Relaciones  $M_w$  vs  $I_0$  (intensidad máxima epicentral).

TABLA I.1  
Relaciones  $M_w$ - $I_{m\acute{a}x}$  comparadas en la Figura I.1

Autor	Expresión
Gutenberg y Richter (1956)	$M_w = 0.66 \cdot I_{m\acute{a}x} + 1.00$
Johnston (1996b)	$M_w = 2/3 \cdot (0.0244 \cdot I_{m\acute{a}x}^2 + 0.481 \cdot I_{m\acute{a}x} + 19.36) - 10.7$
Rueda y Mezcuca (2001)	$M_w = 0.575 \cdot I_{m\acute{a}x} + 1.150$
García Blanco (2009)	$M_w = 0.63 \cdot I_{m\acute{a}x} + 0.94$
Stucchi <i>et al.</i> (2010)	$M_w = 0.465 \cdot I_{m\acute{a}x} + 2.080$
Ecuación [1]	$M_w = 0.545 \cdot I_{m\acute{a}x} + 1.656$

La relación obtenida para la magnitud  $m_{bLg}$  (MMS) mediante la regresión tipo RMA, se compara en la Figura I.2, con las de Rueda y Mezcu

(2002); Johnston (1996 a) y Gaspar-Escribano *et al.* (2008) para la península Ibérica y el Mediterráneo. Estas relaciones se muestran en la Tabla I. 2.

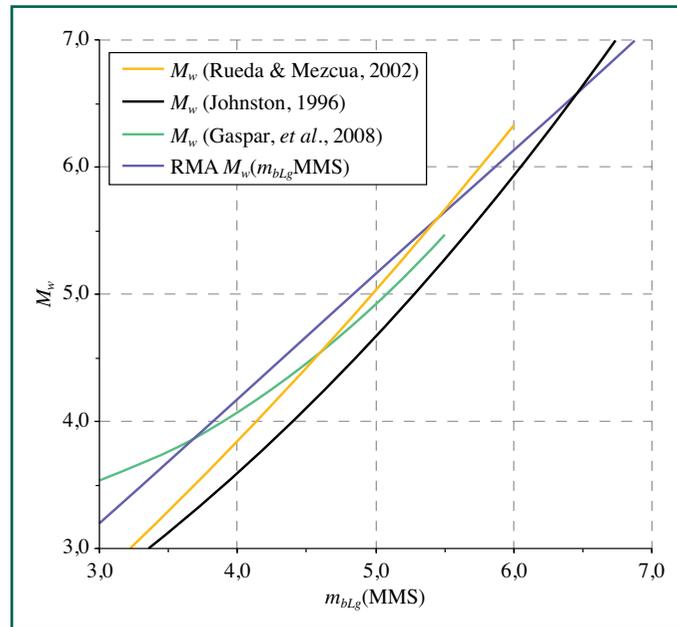


Figura I.2. Relaciones  $M_w$  vs.  $m_{bLg}$  (MMS).

TABLA I.2  
Relaciones  $M_w$ - $m_{bLg}$  (MMS) comparadas en la Figura I.2 ( $m_{IGN}$  sin diferenciar)

Autor	Expresión
Johnston (1996a)	$M_w = 2/3 \cdot (17.76 + 0.360 \cdot m_{bLg} + 0.140 \cdot m_{bLg}^2) - 10.7$
Rueda y Mezcu (2002)	$M_w = 0.311 + 0.637 \cdot m_{bLg} \text{ (MMS)} + 0.061 \cdot m_{bLg}^2 \text{ (MMS)}$
Gaspar-Escribano <i>et al.</i> (2008)-Ib-Med	$M_w = 3.886 - 0.601 \cdot m_{IGN} + 0.162 \cdot m_{IGN}^2$
Ecuación [2]	$M_w = 0.973 m_{bLg} \text{ (MMS)} + 0.290$

En la Figura I.3 se compara la relación obtenida para la magnitud  $m_b$  (VC) en este estudio, con la de Johnston (1996b) para  $m_b$  y la de Rueda (2009) para  $m_b$  o  $m_{bLg}$  (L).

Puede observarse el notable desplazamiento entre las relaciones de Johnston y la regresión, que tiende a converger ligeramente para magnitudes altas (véase ecs. en Tabla I.3).

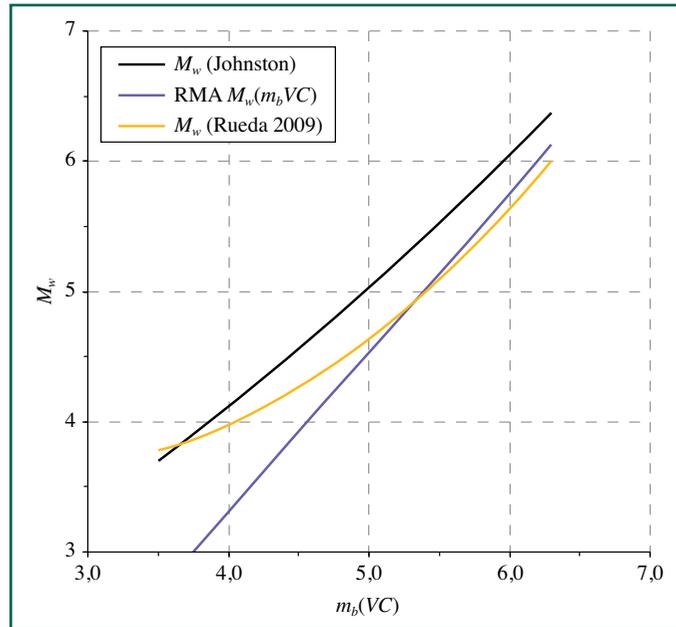


Figura I.3. Relaciones  $M_w$  vs.  $m_b$  (VC).

TABLA I.3  
Relaciones  $M_w$ - $m_b$  (VC) comparadas en la Figura I.3 ( $m_{IGN}$  sin diferenciar)

Autor	Expresión
Johnston (1996a)	$M_w = 2/3 \cdot (18.280 + 0.679 \cdot m_b + 0.077 \cdot m_{bLg}^2) - 10.7$
Rueda (2009)	$M_w = 4.74 - 0.87 \cdot m_{IGN} + 0.17 \cdot m_{IGN}^2$
Gaspar-Escribano <i>et al.</i> (2008)-Ib-Med	$M_w = 3.886 - 0.601 \cdot m_{IGN} + 0.162 \cdot m_{IGN}^2$
Ecuación [3]	$M_w = 1.213 \cdot m_b$ (VC) $- 1.528$

En la Figura I.4 se compara la relación obtenida para  $m_{bLg}$  (L) en el ajuste RMA, y las relaciones propuestas por Gaspar-Escribano *et al.* (2008), para

la zona de la península Ibérica y el Mediterráneo, y la de Rueda (2009), válidas también para  $m_{bLg}$  (L) (véanse las ecuaciones en Tabla I.4).

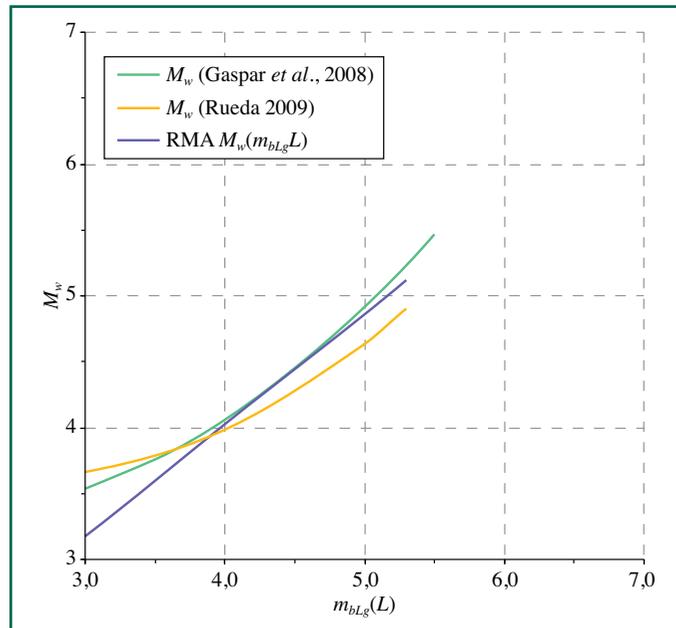


Figura I.4. Relaciones  $M_w$  vs.  $m_{bLg}$  (L).

TABLA I.4  
Relaciones  $M_w$ - $m_{bLg}$  (L) comparadas en la Figura I.4 ( $m_{IGN}$  sin diferenciar)

Autor	Expresión
Rueda (2009)	$M_w = 4.74 - 0.87 \cdot m_{IGN} + 0.17 \cdot m_{IGN}^2$
Gaspar-Escribano <i>et al.</i> (2008)-P.Ib.-Med.	$M_w = 3.886 - 0.601 \cdot m_{IGN} + 0.162 \cdot m_{IGN}^2$
Ecuación [4]	$M_w = 0.836 m_{bLg}(L) + 0.676$

## Revisión de las zonificaciones utilizadas en la región en estudios recientes

En este apartado se presenta una relación de modelos de zonación sismogenética, realizados para trabajos de peligrosidad sísmica en España y zonas cercanas, en las últimas décadas. Esta relación no pretende ser exhaustiva y tan sólo se han incluido los modelos más destacados en relación a este trabajo (una relación más completa puede ser consultada en los informes parciales del Proyecto y también en García-Mayordomo e Insua-Arevalo, 2010).

Cada modelo se acompaña de una breve descripción y en algún caso de comentarios complementarios, enviados por alguno de sus autores a través de la Comisión de Seguimiento del Proyecto (CSP), durante la ejecución del mismo. El mayor interés de esta revisión está en analizar cómo se ha resuelto la modelización de las fuentes sísmicas de tipo zona, por los distintos autores y en distintas épocas.

### II.1. Zonificaciones desarrolladas para la Península Ibérica

- *Zonificación de la NCSE-02.* La zonificación sismogenética utilizada en la actual Norma de Construcción Sismorresistente de España, NCSE-02, fue desarrollada por una comisión de expertos del IGN. Ésta es muy similar a la de la norma anterior, NCSE-94, a excepción de alguna modificación en las zonas del extremo NE de la Península (zona de Olot). Un precursor de estas zonificaciones fue la zonificación desarrollada por de A. J. Martín (1983). Ésta fue el primer modelo utilizado a nivel nacional para el cálculo de la peligrosidad

siguiendo el método de Cornell. Para su realización se contó con datos geológicos (grandes unidades geotectónicas de la península Ibérica) y sismológicos (distribución de epicentros, mapas de intensidades máximas, distribución espacial del parámetro  $b$ , orientación de isosistas y otros mapas geofísicos) y fue validada mediante un análisis de homogeneidad sísmica.

El modelo de la NCSE-02 abarca gran parte de la península Ibérica, incluyendo Portugal y las zonas marítimas del mar de Alborán y del SW del cabo San Vicente. Se incluye también una pequeña región del continente africano, en la que se encuentran las poblaciones de Ceuta, Melilla y Tánger. Se excluyen la meseta Central y la cuenca del Ebro, las zonas marítimas de la costa mediterránea oriental, el mar Cantábrico y el Atlántico al noroeste de Galicia y también los territorios insulares.

- *Zonificación de IPEEE.* El modelo del IPEEE (1993) fue elaborado en el contexto del estudio de peligrosidad sísmica para plantas nucleares españolas al comienzo de la década de los noventa. Se desarrollaron dos modelos de fuentes sismogenéticas tipo zona, basados en la sismicidad y en la tectónica. Ambos modelos eran complementarios: el modelo local tenía zonas de tamaño relativamente pequeño que cubrían el territorio peninsular y las islas Baleares; el modelo regional englobaba varias zonas del modelo local en zonas más amplias y añadía otras fuentes en zonas alejadas de la península como el SO del cabo San Vicente. Estas zonificaciones fueron posteriormente modifica-

das en algunas zonas (J. G. Sánchez Cabañero-comunicación CSP).

- *Zonificación de Molina (1998)*. La zonificación se extiende a todo el área Ibero-Magrebí, incluyendo España, Portugal, N de África y numerosas zonas Atlánticas. Se basa en la distribución de epicentros de la región, en la definición de grandes dominios tectónicos y tiene también en cuenta la información relativa a la distribución de mecanismos focales. Propone un modelo de grandes zonas y otro más detallado de zonas de menor tamaño. También diferencia entre las zonas de sismicidad superficial y las zonas de sismicidad intermedia-profunda.

La zonificación posterior de Peláez y López-Casado (2002) se basa en la de Molina (1998), considerando sólo las grandes zonas o dominios tectónicos, con ligeras modificaciones. Ésta fue utilizada para calcular la peligrosidad siguiendo el método de Frankel (1995).

- *Zonificación GSHAP(2003)*. La zonificación del proyecto GSHAP (Giardini *et al.*, 2003), tenía por objeto combinar las zonificaciones oficiales de diferentes países para obtener un mapa de peligrosidad mundial. El proyecto GSHAP fue actualizado por el proyecto SESAME, si bien la mayor parte de la zonificación del GSHAP permaneció inalterada. Dentro del territorio español tiene un gran parecido con la de la norma NCSE-94.

## II.2. Zonificaciones desarrolladas en regiones del Sur de España

En la zona sur se han desarrollado un importante número de zonificaciones, dada la actividad sísmica de la misma y la demanda de trabajos de peligrosidad regional en las últimas décadas. A continuación se citan y describen algunas de ellas.

- *D. Muñoz (1983)* propone un modelo para el S-SE de España, a partir del mapa de epicentros, teniendo en cuenta las características tectónicas más importantes de la región y tratando de disponer de un número estadísticamente significativo de epicentros en cada zona. Esta zonificación con un total de 8 zonas, incluía las

zonas marítimas del golfo de Cádiz y de Alborán, y también una zona en el N de Argelia.

- *Lopez-Casado et al. (1995)*, propusieron un modelo para la zona S-SE de España. Éste se basa en un trabajo previo de Sanz de Galdeano y López Casado (1988) en el que, tras un análisis de las relaciones entre distribuciones de epicentros y los sistemas de fallas de las cordilleras Béticas, se establece un esquema de zonas sismogénicas definidas principalmente sobre la base del sistema de fracturación predominante en cada una de ellas. Las zonas sismogénicas de este modelo son mucho más pequeñas que las definidas en el modelo de la NCSE-02.
- *García Mayordomo (2005)* y *García Mayordomo et al. (2007)*. Inicialmente propone una zonificación para el SE de la Península, restringido a las cordilleras Béticas orientales. Se trata de un modelo híbrido de zonas y grandes fallas. A partir de la información disponible sobre geofísica profunda el autor compartimenta este territorio en una serie de bloques corticales, en cada uno de los cuales se determina el gradiente geotérmico, la resistencia de la corteza superior y la profundidad de la transición de la deformación frágil a dúctil. Comparando las relaciones entre éstos parámetros con la profundidad media de la sismicidad en cada bloque, así como con el número de terremotos por unidad de volumen, se establece finalmente la existencia de cinco zonas sismogénicas diferentes, junto con una zona de tipo falla, con una anchura de 5 km a cada lado de la traza principal de las fallas, la cual considera las cuatro principales fallas de la región (Alhama de Murcia, Carrascoy, Bajo Segura y S. Miguel de Salinas). En el modelo de 2007, éste se complementó con una zonificación para el N de África, con el fin de considerar fuentes sísmicas lejanas en el estudio de peligrosidad realizado para la región de Murcia, proyecto RISMUR.

Otros modelos que pueden ser referenciados para esta región son los de Martín y Blázquez (1981) para la presa del Limonero en Málaga, el modelo de Muñoz y Udías (1992) para el S de España y el modelo de Giner (1996) desarrollado para la Comunidad Valenciana.

### II.3. Zonificaciones desarrolladas en regiones del Norte de España

En la zona norte de la Península se han realizado distintas zonificaciones, principalmente para los estudios de peligrosidad en Cataluña y Navarra. En ambos casos la región de Pirineos ha sido parte común y ha sido zonificada de diversas maneras. También Galicia, a partir de las series de terremotos de Sarria-Becerreá de 1995 y 1997, ha sido objeto de nuevas zonificaciones distintas a como se consideró inicialmente en la NCSE-94.

#### II.3.1. Cataluña y NE de la península Ibérica

- *Secanell et al. (2004)* y *Secanell et al. (2008)*. El primer modelo, que en realidad data de 1997, fue utilizado en el estudio de peligrosidad de Cataluña realizado por el ICC y que fue incorporado al Plan de Emergencia Sísmica (SISMICAT) del año 2002. Es un modelo de once zonas. El modelo de 2008 fue utilizado en el proyecto ISARD, con el fin de realizar un mapa transfronterizo de peligrosidad de los Pirineos. En este caso los autores consideran dos conjuntos de zonas denominadas USZ (*Unified Seimogenic Zonation*) y CFZ (*Critical Facilities Zonation*). La primera es una síntesis de trabajos anteriores de Fleta *et al.* (1996) y Secanell *et al.* (1999, 2004) y de Autran *et al.* (1998) para la parte francesa. La segunda se basa más en la zonación francesa utilizada para infraestructuras críticas. Tanto en el modelo de 2004 como en los de 2008, se trata de zonificaciones sismotectónicas basadas en primer lugar, en una zonación tectónica (Fleta *et al.*, 1996) y después en la incorporación de la distribución de la sismicidad para el ajuste o mejor definición de las zonas. La zonificación tectónica se basa en la síntesis de seis temas estructurales: Espesor de corteza, deformación hercínica, isobatas del basamento (antettriásico), deformación de la cobertura sedimentaria meso-cenozoica (alpina), tectónica neógena y distribución de niveles evaporíticos. La zonificación contó con la contribución de discusiones con el equipo

de Autran del BRGM francés (X. Goula, comunicación CSP).

#### II.3.2. Navarra y N de la península Ibérica

- *Nuclenor SA (1985)*, desarrolló una zonificación para el cálculo de la peligrosidad en emplazamiento de la CN de Santa María de Garroña (N de Burgos), cuyas zonas incluyen Navarra y los Pirineos occidentales, la costa Cantábrica y la cadena Ibérica.
- *Ingeniería y Prospección* desarrolló en 1992 una zonificación expresamente para el estudio de peligrosidad de Navarra. Se basó en la sismicidad pasada, fundamentalmente en datos de intensidad, y se restringe al cuadrante NE de la zona, incluyendo parte del sur de Francia.
- *Proyecto RISNA (2008)*. Esta zonificación fue expresamente desarrollada para el estudio de peligrosidad de Navarra. Se trata de una zonificación basada en la distribución espacial, cinemática y geometría de las fallas con actividad neotectónica, teniendo en cuenta la estructura de la corteza superior, la geología de superficie a partir de cartografías 1:200.000 y 1:1.000.000 del IGME y también la distribución de la sismicidad con magnitud  $M_w > 3.5$ . Consta de zonas más reducidas en el entorno de Navarra (Benito *et al.*, 2008b).

#### II.3.3. Galicia y NO de la península Ibérica

- *Rueda y Mezcuca (2001)* realizaron una zonificación sismogénica del NO de la península para un estudio de revisión de la peligrosidad sísmica de Galicia. Principalmente está basada en la geología y en la sismicidad más reciente de la región, con un total de siete zonas.
- *C. López-Fernández (2008)* realizó una nueva zonificación del NO peninsular basada en la caracterización de la actividad sísmica más reciente y en su relación con las distintas provincias tectónicas identificadas en esta región, a partir del análisis de estructuras heredadas y de la tectónica reciente y actual. Esta zonificación que se extiende hasta la costa Cantábrica consta de cinco zonas.

#### II.4. Zonificaciones desarrolladas para Portugal

- *Vilanova y Fonseca (2007)*. La zonificación realizada por estos autores consta de dos conjuntos de zonas (denominadas SA y SB). En cada caso la región es dividida en dos grandes zonas, según el criterio de Johnston (1989), correspondientes a la separación entre zona continental estable (SCR) y zona de corteza activa (ACR).

La zonificación SA contiene once zonas basadas en criterios de sismicidad. La zonación SB contiene ocho zonas y resulta de la adaptación de las zonas propuestas por Peláez y López-Casado (2002).

- *Zonificación utilizada para el Anexo Nacional del EC-8 (2008)*. La zonificación utilizada en Portugal para su Anexo Nacional del EC-8 (Campos-Costa *et al.*, 2008; Sousa y Campos-Costa, 2009), consta de once zonas sismogénicas adaptadas de Sousa y Oliveira (1997). Para su definición se tuvo en cuenta el entorno sismotectónico, pero principalmente la distribución de la sismicidad y el ajuste de las zonas a grandes unidades geológicas.

#### II.5. Zonificaciones desarrolladas para Francia

- *Autran et al. (1998)*. Basada en una zonificación sismotectónica. Contrastada con la distribución de epicentros para comprobar su aplicabilidad en estudios de peligrosidad. En ésta se basan otras zonificaciones posteriores Dominique *et al.* (2001) y Beauval (2003).
- *Marin et al. (2004)*. Esta zonación de Francia

propone primero un modelo sismotectónico con grandes zonas de sismicidad difusa, definidas en base a su comportamiento geodinámico y a las tasas de sismicidad. En este caso la región de los Pirineos es tomada como una única zona. Después, con el fin de analizar la influencia de la zonación en la peligrosidad y de acuerdo al conocimiento de la actividad sísmica, se propone un refinamiento del modelo, dividiendo la región de Pirineos en cinco zonas.

#### II.6. Zonificaciones desarrolladas para el norte de África

- *Aoudia et al. (2000)*. Esta zonificación sismogénica de la región del Atlas-Tell (Argelia) se realizó con el objetivo de estimar la peligrosidad sísmica siguiendo una metodología determinista. Consta de doce zonas cuyos límites se fijan sobre la base de datos geológicos, tectónicos y sísmicos y su interpretación, como son:
  - La distribución de fallas activas en las cuencas Neógenas;
  - El conocimiento de tectónica y cinemática de las unidades tectónicas;
  - Relaciones entre estructuras geológicas y terremotos;
  - Patrones de agrupamientos de epicentros.
- *Hamdache (1998)*. Es una zonificación sísmica del norte de Argelia teniendo en cuenta principalmente la tectónica de la región (mecanismos focales) y la sismicidad histórica e instrumental. El resultado es una zonificación compuesta por seis zonas.

# Descripción sismotectónica y geológica de las zonificaciones seleccionadas en el estudio

ANEXO



## III.1. Zonificación de García-Mayordomo *et al.* (2012)

La zonificación de García-Mayordomo *et al.* (2012) empleada en los cálculos para la actualización del mapa de peligrosidad sísmica de España es el resultado de la modificación de un modelo previo presentado en la Primera Reunión Ibérica sobre Fallas Activas y Paleosismicidad (IBERFAULT, 2010), posteriormente reajustado con la participación de expertos portugueses y franceses en el marco del proyecto Europeo SHARE (*Seismic Hazard Harmonization in Europe*, 2011) y modificado finalmente a partir de los comentarios críticos de la Comisión de Seguimiento del Proyecto y del grupo de trabajo encargado del mismo. Esta zonificación se presentó en la 7.<sup>a</sup> Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica (García-Mayordomo *et al.*, 2012). A continuación se incluye una descripción de las zonas basada en la documentación aportada por sus autores (J. García-Mayordomo y J. Martínez Díaz) y en la que se han incorporado las correcciones acordadas en las reuniones de la Comisión de Seguimiento del Proyecto.

### III.1.1. Descripción de las zonas sismogénicas

Se describen de forma resumida las características sismotectónicas y neotectónicas de cada una de las zonas agrupadas por regiones. Los polígonos de las zonas se representan sobre el mapa neotectónico de España en el que se muestran los materiales geológicos de edad neotectónica, así como las fallas con actividad neotectónica. También se proyectan en azul oscuro las trazas de las fallas de la base de

datos de fallas con actividad cuaternaria. Para mayor información consultar la leyenda del mapa que aparece bajo el mapa en la Figura III.1.

Para identificar cada zona se utilizará el número de referencia que aparece en el mapa. Para facilitar la explicación en las siguientes figuras se muestran ampliaciones de las distintas regiones del mapa de zonas en las que la información se proyecta sobre un modelo digital de elevaciones que permite identificar la expresión del relieve.

### Zonas Noroccidentales: Zonas 1, 2, 3, 4 y 5

Las zonas 2 a 5 engloban la terminación occidental de los relieves del sistema alpino Pirineos-cordillera Cantábrica y parte de los montes Galai-co-Portugueses. Todas las zonas se localizan en la terminación NO del macizo Varisco (Figura III.2). Para establecer los límites se ha considerado, además de la distribución de la sismicidad, una homogeneidad en la naturaleza de los sistemas de fracturación neotectónica. La zona 2 se caracteriza por un espesor de corteza menor que puede condicionar una mayor resistencia de la fallas de la zona. Predominan en ella mecanismos focales de tipo direccional a diferencia de los de las zonas 3, 4 y 5. Las fallas de la zona 2 presentan direcciones predominantes norteadas, mientras que en las 3, 4 y 5 predominan fallas más E-O y ONO-ESE. El límite entre la zona 4 y la 5 está controlado por la zona de falla de Ventaniella que es un accidente de escala cortical y que por tanto controla la repartición de la deformación entre los bloques que limita. Los límites de la zona 3 se basan fundamentalmente sobre todo en cambios de espesor de la corteza y en la naturaleza de la sis-

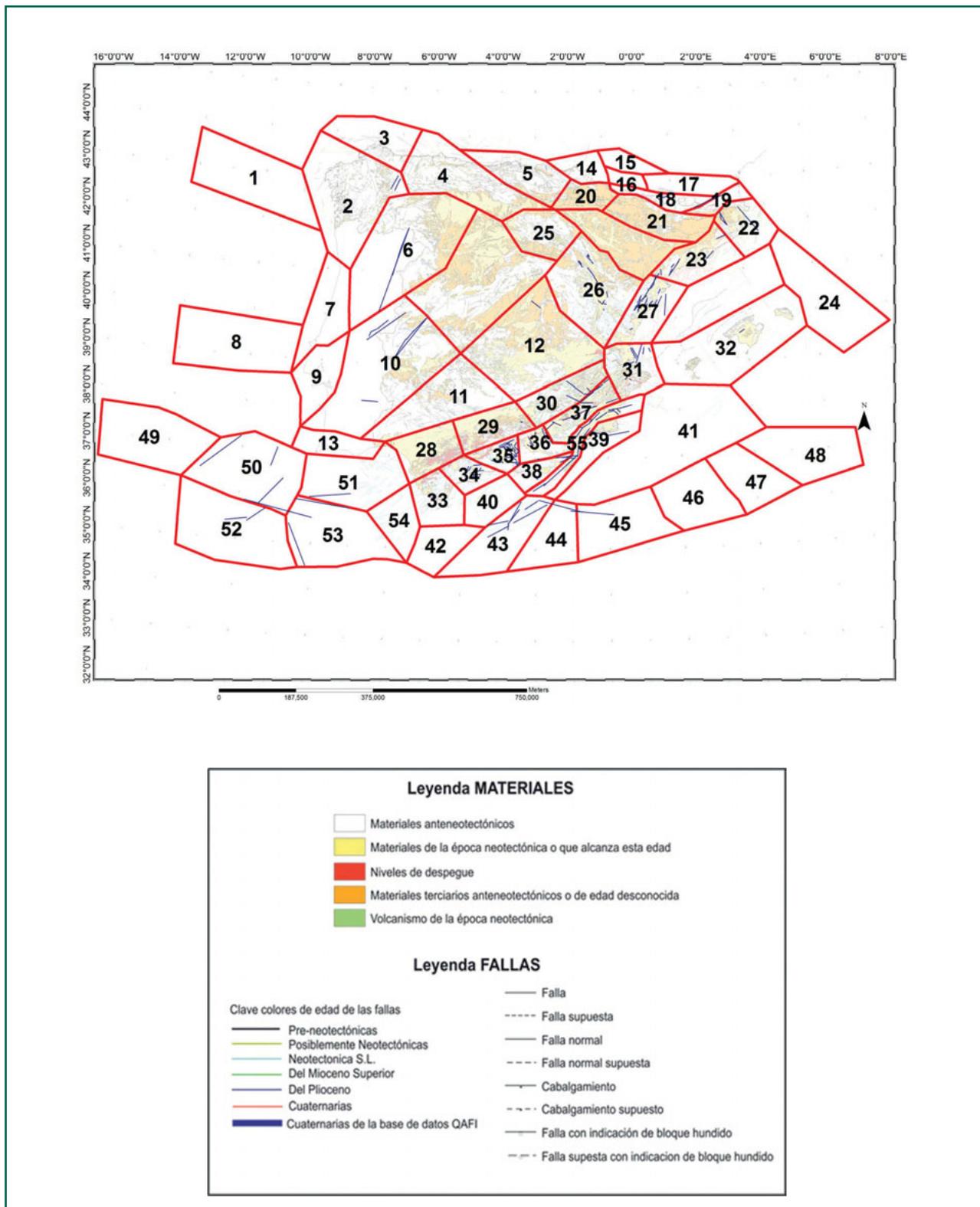


Figura III.1. Zonificación proyectada sobre el Mapa Neotectónico de España (IGME-ENRESA, 1998) y sobre fallas de la base de datos QAFI v.2.0.

micidad. Finalmente, la zona 1 que se sitúa en su totalidad en el océano Atlántico, se basa en criterios puramente sísmicos con el fin de considerar la contribución a la peligrosidad sísmica de la sismicidad de la zona.

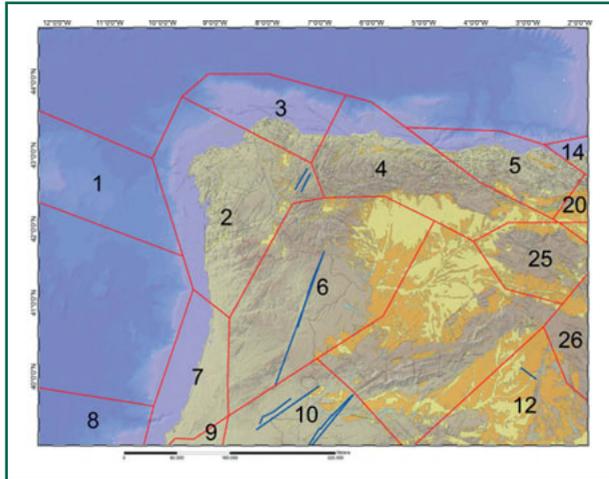


Figura III.2. Región Noroccidental (Zonas 1 a 5) proyectada sobre el modelo digital de elevaciones.

**Zonas Atlántico-Portuguesas: Zonas 6, 7, 8, 9 y 10**

Estas zonas se sitúan en el área de influencia del margen pasivo Atlántico cuyas estructuras de orientación N-S han condicionado la cinemática y evolución de las fallas tardihercínicas. Los límites entre las zonas han sido propuestos por los especialistas locales en neotectónica. Las zonas 7 y 9 (Figura III.3) incluyen las depresiones mesozoicas y terciarias del oeste de Portugal caracterizadas por bajos relieves. Las zonas 6 y 10 engloban los principales macizos y sierras de materiales rígidos limitados por fallas. Los límites entre las zonas 7-9 y 6-10 se basan en un cambio en las orientaciones estructurales coincidente con un cambio en los mecanismos focales predominantes en la zona, de direccionales al norte a inversos al sur, que puede apreciarse en los mapas de regímenes de esfuerzo-deformación de Olaiz *et al.* (2009). Finalmente, la zona 8 se ha definido con criterios fundamentalmente de sismicidad considerando la importancia de tener en cuenta la contribución de su abundancia frente a las costas de Lisboa.

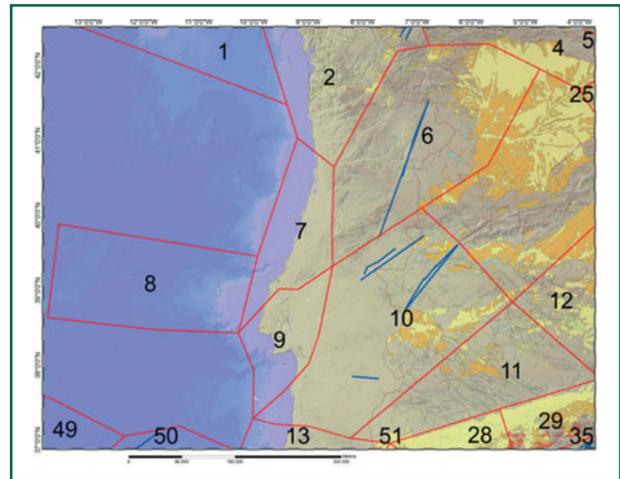


Figura III.3. Región Atlántico-Portuguesa (Zonas 6 a 10) proyectada sobre el modelo digital de elevaciones.

**Zonas Atlántico-Golfo de Cádiz: Zonas 13, 49, 50, 51, 52, 53 y 54**

Para la definición de las zonas de esta región se ha dado preponderancia a la segmentación sísmica y estructural que presenta el sistema Azores-Gibraltar, claramente observable tanto en la sismicidad como en las fallas estudiadas con métodos geofísicos en la zona oceánica. Los límites N-S entre las zonas se basan en cambios en la orientación y cinemática de las fallas principales, y los límites E-O están más controlados por la naturaleza de la sismicidad (Figura III.4).

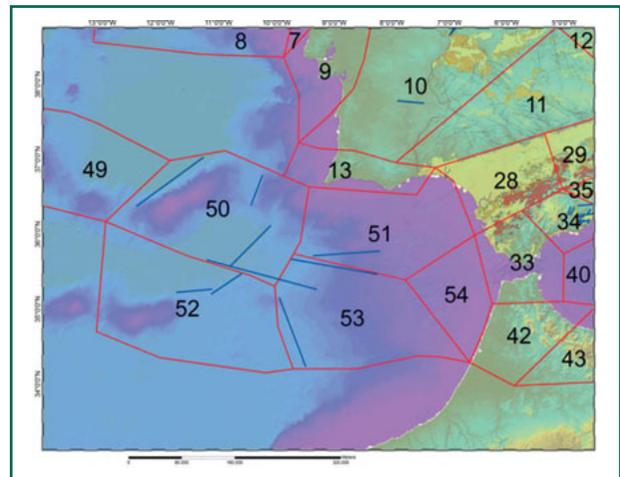


Figura III.4. Región Atlántica-Golfo de Cádiz (Zonas 13, 49, 50, 51, 52, 53 y 54) proyectada sobre el modelo digital de elevaciones.

La zona 49, ante la falta de datos estructurales, está basada fundamentalmente en la sismicidad. La zona del Algarve tiene un claro control reológico asociado a un mayor espesor cortical, mayor flujo térmico y a unos materiales mesozoicos muy diferentes a los de las zonas circundantes. Finalmente, la zona 54 se caracteriza por una alta densidad de fallas activas NE-SO que inducen una alta repartición de la deformación, coincidente con una mucho menor actividad sísmica que la zona 51, que presenta unas características estructurales similares.

### **Zonas Meseta Sur-Sierra Morena: Zonas 11 y 12**

Las zonas 11 y 12 (Figura III.5) abarcan buena parte del sector meridional del macizo Varisco caracterizado por un espesor de corteza bastante homogéneo, y una reología de la corteza controlada por rocas metamórficas cristalinas de alta rigidez. La división entre ambas zonas se basa en el cambio de las directrices estructurales de NO-SE en la zona 11 a más variadas y complejas en la zona 12, debido a la influencia del cambio de régimen tectónico que cambia de inverso al SO hacia desgarre al noreste asociado a las estructuras de la sierra de Altomira y la cercanía de la cordillera Ibérica. Este distinto régimen condiciona la formación de cuencas sedimenta-

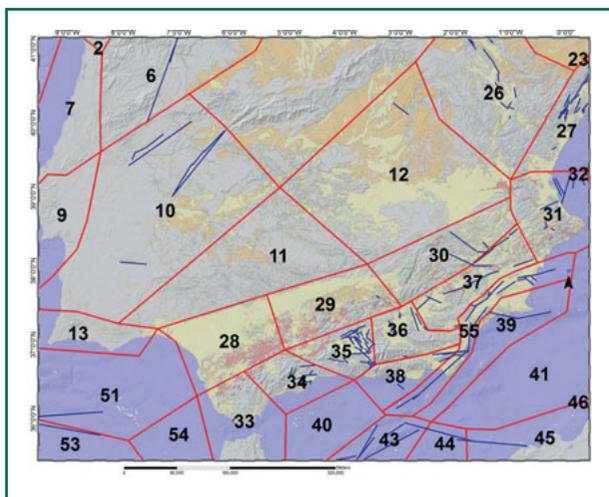


Figura III.5.-Región Meseta Sur-Sierra Morena (Zonas 11 y 12); Béticas Exteriores (Zonas 28 a 31) y Béticas Interiores (Zonas 33 a 39 y 55) proyectada sobre el modelo digital de elevaciones.

rias miocenas con fallas activas asociadas que no aparecen al SO. La distribución de la sismicidad es bastante homogénea en ambas zonas.

### **Zonas Béticas exteriores: Zonas 28, 29, 30 y 31**

Las zonas 28, 29, 30 y 31 (Figura III.6) abarcan las zonas más exteriores de la cadena Bética caracterizada por su escasa sismicidad, corteza ligeramente engrosada y elevada complejidad estructural. Las zonas 28 y 29 incluyen la cuenca del Guadalquivir y los depósitos marginales deformados, y el límite entre ellas está basado en la distribución de la sismicidad y el cambio de un aumento de los mecanismos focales de desgarre hacia el este. La zona 30 engloba el macizo de Cazorla y la zona 31 abarca buena parte del Prebético Alicantino, que se caracteriza por una sucesión de cuencas y sierras limitadas por fallas con componente de desgarre significativa y normales asociadas a la influencia del surco de Valencia que induce además una corteza más delgada que la de la zona 30. El límite con la zona 27 se basa en un cambio brusco de la tasa de sismicidad tanto histórica como instrumental.

### **Zonas Béticas interiores: Zonas 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39 y 55.**

Estas zonas (Figura III. 6) incluyen por un lado los sectores más rígidos de la cadena Bética debido a la presencia de los complejos de las Béticas Internas: Nevadofilábrides, Alpujarrides y Maláguides, y por otro lado las grandes cuencas intramontañosas de Granada, Guadix y Baza. Los límites norte y sur de las zonas son bastante claros tanto en cuanto a la distribución de la sismicidad como en el cambio de espesor de la corteza hacia Alborán. Los límites 36-35, 35-34 y 34-33 se basan en cambios en las directrices estructurales que dan cierta homogeneidad a las estructuras internas así como cambios en el espesor de la corteza. El límite 36-38 se basa en la posición de las fallas que limitan los macizos metamórficos que presentan una fracturación interna más o menos homogénea. En la última fase de ajuste de la zonificación para el proyecto se ha añadido la zona 55, obtenida a partir de las zonas 37,

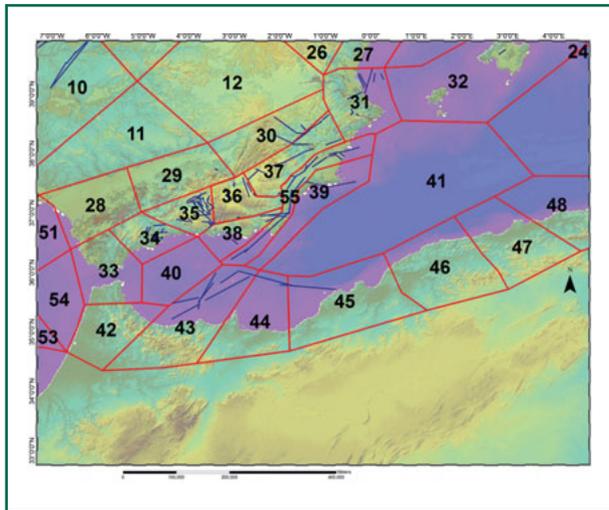


Figura III.6. Región de Alborán, Rif y Tell (Zonas 40 a 48) proyectada sobre el modelo digital de elevaciones.

38 y 39 iniciales. Esta zona está definida para abarcar la zona de deformación controlada por la actividad de las fallas de Carboneras, Palomares, Alhama de Murcia, Carrascoy y Bajo Segura. Éstas son las grandes fallas de desgarre que caracterizan tanto la morfología como la distribución de la sismicidad de las Béticas Orientales.

**Zonas de Alborán, Rif Y Tell: Zonas 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47 y 48**

Las zonas 40 y 41 (Figura III.6) básicamente representan las áreas más adelgazadas de la corteza del mar de Alborán, la primera recoge la sismicidad asociada a las estructuras de la zona interna del arco de Gibraltar, mientras que la 41 incluye la sismicidad somera, dispersa y homogéneamente distribuida de la corteza oceánica. Las zonas 42 a 48 recogen la actividad sismotectónica del borde norte de la placa africana en su interacción con la Euroasiática. Los límites norte y sur están definidos por cambios significativos en el espesor de la corteza, en la naturaleza de las estructuras tectónicas activas. Los límites laterales entre las zonas están basados fundamentalmente en la distribución segmentada de la sismicidad pero también en cambios de orientación y cinemática de las estructuras y en los mecanismos focales predominantes, así la zona 43 se caracteriza porque recoge las fallas de desgarre

de la terminación SO de la zona de desgarre Trans-Alborán, con toda su sismicidad asociada. Hacia el este los cambios en la sismicidad están directamente asociados a cambios en las fallas de la placa superior, que en las zonas 45 a 48 son predominantemente inversas.

**Zonas Mediterránea y golfo de Valencia: Zonas 22, 23, 24, 27 y 32**

Las zonas 22, 23 y 27 presentan una estructura cortical similar de transición hacia la corteza mediterránea, con una alta densidad de fracturación, muy distinta a las zonas circundantes. La separación en tres zonas (Figura III.7 y Figura III.8) se basa fundamentalmente en las diferencias de tasa de actividad sísmica, en la influencia en la zona 27 de la interacción con la cordillera Ibérica, que induce en esta zona algunas peculiaridades en cuanto a la presencia de estructuras NO-SE que interaccionan con las predominantes NNE-SSO, y en la influencia en la zona 22 del Pirineo, que induce una interferencia entre estructuras NE-SO y ONO-ESE muy evidente. Todas las zonas presentan regímenes tectónicos predominantes de tipo normal, al igual que la zona 32, cuyos límites se basan en la distribución de la sismicidad que se asocia a las estructuras que controlan los relieves asociados al archipiélago Balear.

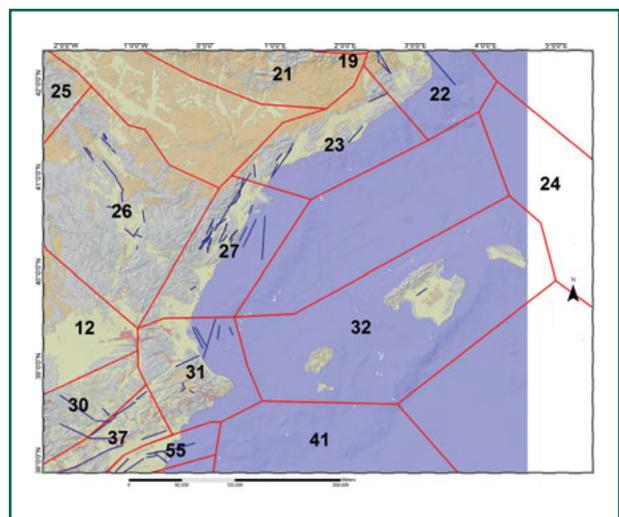


Figura III.7. Región Mediterránea y golfo de Valencia (Zonas 22, 23, 24, 27 y 32) proyectada sobre el modelo digital de elevaciones.

### Zonas cordillera Ibérica: 25 y 26

Las zonas 25 y 26 (Figura III.8) engloban el segmento de corteza estructurado por la cordillera Ibérica cuyos bordes estructurales son netos y controlan los límites exteriores definidos para las zonas. La separación entre ambas zonas separa el sector de la sierra de la Demanda al NO que presenta diferencias claras con el sector central y oriental de la Cordillera tanto en espesor medio de corteza, como en las directrices de las fallas. El régimen de deformación activo es de tipo normal en ambas zonas.

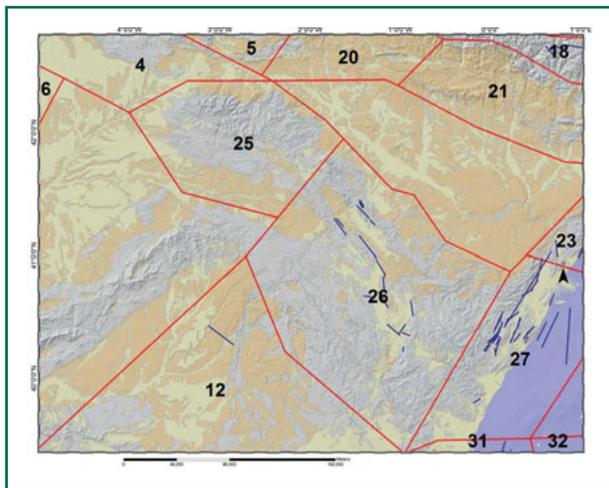


Figura III.8. Región de la cordillera Ibérica (Zonas 25 y 26) proyectada sobre el modelo digital de elevaciones.

### Zonas Pirenaicas: Zonas 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 y 21

Las zonas definidas en los Pirineos (Figura III.9) han sido consultadas y consensuadas con expertos franceses y básicamente reflejan los sectores externos, marginales e internos (axiales de la cadena). Los límites occidentales de las zonas 14 y 20 se definen a partir del cambio de tasa de actividad sísmica que coincide con un cambio de las directrices estructurales predominantes de NO-SE a E-O. Las zonas 20 y 21 definen la zona marginal del Prepirineo en su tránsito hacia la Cuenca del Ebro, y se separan en función de una clara diferencia en la densidad de la sismicidad y una mayor homogeneidad estructural de la zona 21. Las zonas 14, 16 y 18 incluyen la sismicidad asociada a la zona axial de la

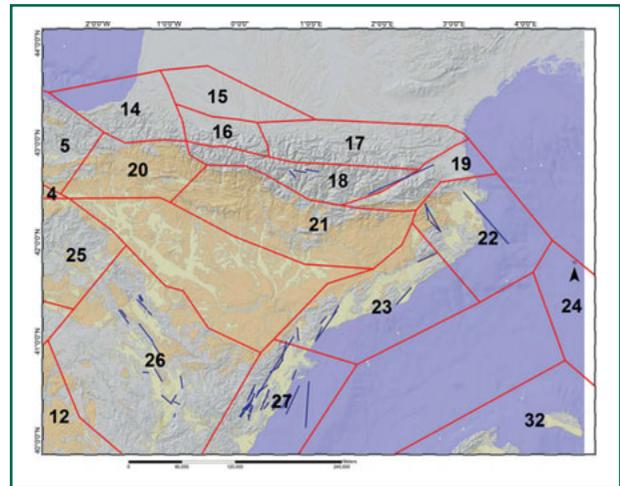


Figura III.9. Región Pirenaica (Zonas 14 a 21) proyectada sobre el modelo digital de elevaciones.

cadena con una reología mucho más rígida con abundancia de plutones graníticos y que controlan los relieves más altos de la cadena. Los límites entre ellas se basan en cambios de la actividad sísmica, presencia de fallas corticales y cambios en el espesor cortical. Las zonas 14 y 15 representan zonas donde la actividad sísmica disminuye debido a su carácter transicional hacia las zonas del Prepirineo septentrional y hacia las estructuras cantábricas, donde la corteza es de menor espesor.

### III.1.2. Otras consideraciones

En el proceso final de ajuste de la zonificación se consideró también la distribución espacial predominante de los regímenes de esfuerzo-deformación sísmicos calculados por Olaiz *et al.* (2009) utilizando mecanismos focales de terremotos, que ha servido para perfilar límites entre zonas y caracterizar el tipo de mecanismo predominante de cada una (Figura III.10). En la Figura III.11 se muestra el modelo de zonificación final especificando el mecanismo focal predominante en cada zona (inverso, desgarre o normal).

### III.2. Zonificación de ByA12

La zonificación de Bernal y otros es el resultado de diferentes trabajos de peligrosidad realizados por sus autores en ByA Estudio de Ingeniería S.L.

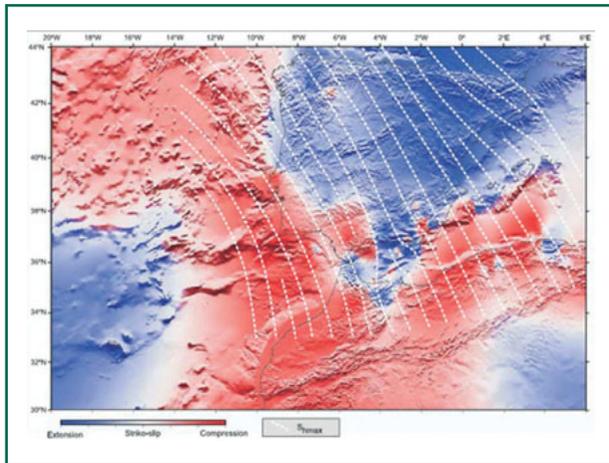


Figura III.10. Regímenes de esfuerzo-deformación actual para la península Ibérica obtenidos a partir de mecanismos focales de terremotos y parámetros tectónicos (tomado de De Vicente *et al.* (2008))

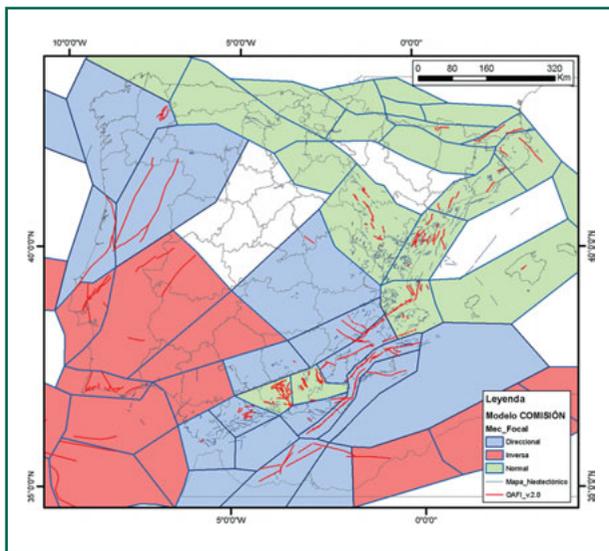


Figura III.11. Mecanismo focal predominante. Sobre el modelo final de zonificación se agrupan distintas zonas sismogénicas en función de los mecanismos focales resultantes: En rojo se incluyen las zonas en las que predominan los mecanismos de falla inversa; en azul los de falla en dirección y en verde los de falla normal.

A continuación se incluye un resumen de la documentación original de la zonificación, aportada por A. Bernal durante el desarrollo del proyecto. En éste se describen las grandes regiones sismogénicas y las provincias sismotectónicas en que han sido divididas.

### III.2.1. Regiones sismogénicas. Descripción general de la sismicidad

La península Ibérica y áreas marinas adyacentes pueden dividirse en varias regiones sismogénicas (Figura III.12), cada una de las cuales engloba varias zonas o provincias sismotectónicas, (ver tabla 6 en la memoria). Los principales rasgos de su sismicidad son los descritos a continuación.

#### Región 1. Macizo Hespérico-(Zonas 1 a 13)

Constituye una zona poco activa sísmicamente. Se trata del cratón hercínico sometido en la actualidad a esfuerzos principalmente de compresión en dirección próxima a la norte sur. En su centro la sismicidad es muy escasa, mientras que en su borde occidental atlántico es algo más abundante. La intensidad máxima sentida es de 7.

##### Zona 1. Rías Bajas

Los terremotos en esta zona, posiblemente estén relacionados con la familia de fracturas de desgarre de dirección próxima a N-S, siendo la más importante la que pasa cerca de la localidad de Braga y que condicionaron la sedimentación terciaria. Igualmente son áreas de debilidad las intersecciones entre dichas fracturas con otras de dirección N40/50E. El epicentro de mayor intensidad se sitúa en las cercanías de Pontevedra (26/11/1920) con intensidad máxima,  $I_0 = 7$ .

##### Zona 2. Taboada y Celanova

Los terremotos de mayor intensidad y magnitud se alinean según la dirección N150/160E y están localizados en las cercanías de Ourense y Cruces (La Coruña). Los sismos de Taboada pueden estar relacionados con rejugos en época reciente de la falla de Puentes de García Rodríguez. Los de Celanova, Allariz y Cortegana podrían relacionarse con puntos de intersección de fracturas de dirección próxima a N150/160E y N40/50E.

##### Zona 3. Zona Astur-Occidental Leonesa

Dentro de esta zona el foco más importante de terremotos se localiza al O de Sarriá. Además, existen

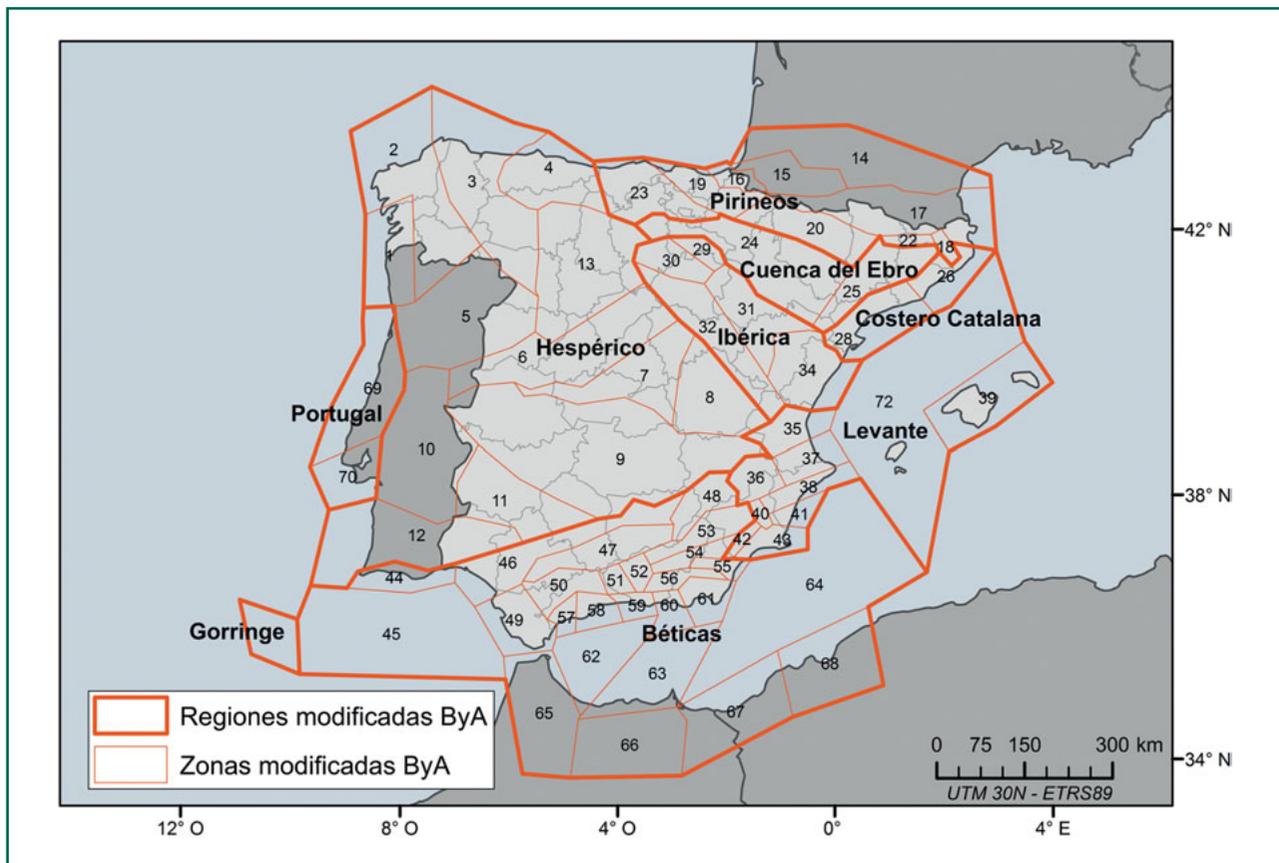


Figura III.12. Zonificación ByA 12. Regiones sismogénicas.

registrados algunos terremotos aislados como el del 10/2/1961 en las cercanías de Zamora, con  $I_0 = 6$  y  $M = 5.2$ . La sismicidad que afecta a esta zona se relaciona con valles tectónicos con fuertes escarpes de falla relacionándose con la familia de fallas NNE-SSO. Otra familia de fallas con las que puede existir relación, aunque no suficientemente clara, son las de dirección NNO-SSE a NO-SE.

#### **Zona 4. Zona Asturiana**

Dentro de esta zona se engloban todas las cuencas carboníferas del Norte de la Península. La actividad sísmica en esta zona es muy baja. Los sismos posiblemente estén ligados a reajuegos recientes de los cabalgamientos entre las diferentes unidades carboníferas. Con respecto a los sismos con focos localizados al O y S de Picos de Europa probablemente están relacionados con la actuación de frac-

turas de dirección NO-SE (sistema de Ventaniella) y, en menor medida con los de dirección NNE a NE al sur de Trubia.

#### **Zona 5. Bajo Duero**

Ocupa un sector importante del NE portugués. Los terremotos se concentran en tres áreas: Viseu, sur de Vila Real y SO del macizo de Morais. El de mayor intensidad es un terremoto sentido en França el 28/11/1347 con  $I_0 = 8$ . Otros cinco terremotos tienen  $I_0$  entre 6 y 7, destacando los de Folgoza (6) del 10/10/1856; Caldas de Moledo (7) del 11/1/1910 y Moncorvo (7) del 19/3/1858. La relación de los sismos con la tectónica parece estar clara con la familia de fallas de dirección N30E que cortan las estructuras del macizo de Morais (grandes fracturas de Vila Real y Puebla de Sanabria con movimiento de desgarre siniestro y gran desarrollo longitudinal).

### **Zona 6. Sistema Central**

Es una zona extensa y en ella el número de terremotos es escaso. Se trata de terremotos todos superficiales y de baja intensidad ( $I_0 \leq 4$ ) y magnitud ( $M < 3.3$ ). Posiblemente estén ligados a la actuación reciente de fallas de dirección N50E que se concentran en las sierras de los alrededores de Segovia.

### **Zona 7. Depresión del Tajo**

Es una zona de poca actividad sísmica. Caracterizada geológicamente por materiales casi exclusivamente de edad neógena y cuaternaria. Los dos terremotos localizados en Guadalajara, pueden estar relacionados con los sistemas de fracturas y cabalgamientos de dirección N-S que bordean la sierra de Altomira. No obstante, por tratarse esta zona de una de las depresiones terciarias continentales más importantes desarrolladas sobre un zócalo hercínico subsidente, aparecen lineaciones estructurales (lineación Toledo-Guadalajara y lineaciones O-E) en relación con grandes estructuras profundas que podrían haber actuado en época reciente.

### **Zona 8. Altomira**

La mayoría de los terremotos de esta zona se concentran en el sector S y están ligados, muy probablemente, a las fracturas y cabalgamientos con vergencia O de la sierra de Altomira. El sismo aislado de Motilla del Palancar, 3/3/1929,  $I_0 = 6$ , podría estar ligado a las estructuras cabalgantes y vergentes al S de dirección NO-SE de las estribaciones de la serranía de Cuenca.

### **Zona 9. Centro-Ibérica Sur**

Es una zona de baja densidad de epicentros y bajas intensidades. La mayor concentración de sismos se localiza en el borde S, cerca del contacto con la cuenca del Guadalquivir. Hacia el O la densidad de sismos es menor relacionables con fracturas con rejugio reciente y de dirección próxima a N120E.

### **Zona 10. Ossa-Morena Noroccidental**

La mayor concentración de sismos se da alrededor de Evora (Portugal). Destaca el terremoto de 28/2/1926, con  $I_0 = 7$ . Al N. de la zona, destaca el de Pedrogao (Portugal) en 1909, con  $I_0 = 7$ . De los

instrumentales, las intensidades máximas son  $\leq 5$  y las magnitudes están entre 4 y 5. El resto de los terremotos pueden asociarse a zonas de debilidad coincidentes con puntos de intersección de fracturas satélite y direcciones similares a las del dique de Alentejo-Plasencia con cabalgamientos (vergentes al S) y fracturas de direcciones N120/130E.

### **Zona 11. Ossa-Morena Sureste**

Es una zona de baja densidad de terremotos. Destaca el terremoto de Hornachuelos (Córdoba) el 11/11/1980,  $I_0 = 6$  y  $M = 4.1$ . El resto de terremotos se distribuyen de forma muy dispersa y podrían relacionarse con fracturas de dirección N120E con rejugos recientes.

### **Zona 12. Flych Subportugués**

Está formada por materiales devónicos y carboníferos. Incluye el complejo volcanoclástico del carbonífero inferior conocido como la faja pirítica. La densidad de sismos es media a baja repartida por la zona. Los terremotos importantes se concentran en dos zonas: una es el límite S coincidente con el contacto con los materiales terciarios y cuaternarios de la cuenca del Guadalquivir y otra se sitúa al S del dique-falla de Alentejo Plasencia (falla Messegana). En la primera destacan los terremotos próximos a la localidad de Ayamonte (en general  $I_0 \leq 6$ ,  $M \leq 5$ ). En la segunda zona son destacables los sismos de Beja ( $I_0 = 6$ ), Almodovar ( $I_0 = 6$ ) y Ourique ( $I_0 = 5$ ). Otro grupo importante son los sismos en los alrededores de Santiago do Cacem.

### **Zona 13. Cuenca del Duero**

Es una amplia zona muy baja actividad sísmica, considerándose una de las más estables de la Península.

## **Región 2. Pirineos (Zonas 14 a 23)**

Constituye una zona de amortización de corteza entre la placa ibérica y la europea. Hay tres zonas principales sismogénicas:

- la falla norpirenaica que separa los Pirineos de la cuenca de Aquitania, donde se distingue la

alineación mejor definida de sismos mayores y más abundantes;

- la zona axial, donde han ocurrido algunos sismos de gran tamaño, muy antiguos (siglos XIV y XV) y, por lo tanto, mal conocidos;
- la zona de Olot, donde hay también grandes sismos del siglo XV y alguna actividad reciente.

#### ***Zona 14. Cuenca de Aquitania y Norpirenaica Oriental***

Se caracteriza por una sismicidad baja a moderada y una tectónica de cobertera. La densidad de terremotos es muy baja dándose una mayor concentración en el sector SE, en las proximidades del macizo de Mouthoumet, ligada posiblemente a los cabalgamientos de dirección próxima EO y a fracturas de igual dirección y otras de dirección NNE-SSO. Destaca el terremoto de Amou (Francia),  $I_0 = 5$  y  $M = 4,1$ .

#### ***Zona 15. Zona Norpirenaica Occidental***

En esta zona en el Pirineo francés, se da una de las mayores concentraciones de epicentros (al sur de Pau y Tarbes). Destacan los terremotos del 21/6/1660 en Bagneres de Bigorre y del 24/5/1750 en Juncalas, ambos con  $I_0 = 9$  y el más reciente de 13/8/1967 en Arette (Francia) con  $M = 5,3$ . Los mecanismos focales se relacionan con movimientos de desgarre dextral producidos a lo largo de fallas cabalgantes subhorizontales, o de baja inclinación, de dirección aproximada E-O correspondiente a una dinámica de compresión NO y extensión NE. No obstante hay mecanismos que no siguen esta tendencia y se asocian a desgarres sinestrales.

#### ***Zona 16. Macizo Cinco Villas***

Destaca la presencia de materiales de edad Devónico-Carbonífero depositados en una cuenca intramontañosa rodeada de materiales de edad más recientes (Mesozoicos). La sismicidad es dispersa. Se da una mayor concentración en el contacto oriental, donde se localizan los terremotos de mayor intensidad y magnitud: Ustaritz, St. Jean Pied

Port y Larrau. Dentro de España destaca el de Elizondo (Navarra) del 1/1/1934 ( $I_0 = 5$ ;  $M = 3,9$ ). Los sismos están muy probablemente relacionados con las estructuras cabalgantes vergentes al SO de los materiales más recientes sobre los de edad Carbonífero.

#### ***Zona 17. Zona Axial Pirenaica***

La mayor concentración de sismos se localiza al O de Perpignan y al E de Puigcerdá, existiendo otras concentraciones importantes en las proximidades de Viella y al N de Sort. Destacan los terremotos históricos de Ribagorza (Huesca) del 3/3/1373 y el de Queralps (Gerona) del 2/2/1428, ambos con  $I_0 = 9$ . Estos terremotos se relacionan con la fosa de Puigcerdá, limitada por dos familias de fallas: una de dirección E-O y otra normal-dextral de dirección NE, ambas con actividad probada durante el Plioceno y configurando en conjunto una semifosa alargada en dirección ENE que puede seguirse fácilmente hasta las proximidades de Perpignan.

En esta zonificación actual se ha eliminado la zona 21-Segre.

#### ***Zona 18. Región de Olot***

En esta zona aparecen materiales volcánicos (vulcanitas básicas) de edad Plioceno-Holoceno indicando, junto con la existencia de otros factores (geotermismo, etc.), una actividad volcánica reciente. En relación con su tectónica cabe destacar la existencia y abundancia de fracturas de dirección NO-SE (dirección N160/170E) con indicios de actuación en épocas recientes. Existe una importante densidad de sismos en esta zona, como el del 15/5/1427 con  $I_0 = 9$  y otros tres con  $I_0 = 8$ . Su relación con los accidentes tectónicos descritos es clara.

#### ***Zona 19. Prepirineo Occidental***

Los sismos se sitúan en los alrededores de Pamplona y Estella. En esta área los sismos se relacionan con el accidente de Pamplona-Dax que produce un desplazamiento sinistral en la cobertera. Se trata de una importante zona de intersección de estructu-

ras cabalgantes ESE y fallas normales y estructura diapíricas NE.

### **Zona 20. Prepirineo Central**

En esta amplia zona los terremotos mayores son los de Martes del 10/7/1923,  $I_0 = 8$  y los de Villarreal de la Canal de fechas 30/11/1923 y 19/7/1924., con  $I_0 = 6$ . Desde el punto de vista geológico, los materiales aflorantes en esta zona son, mayoritariamente, de edad Eoceno medio-Plioceno y composición variable entre conglomerados, arenisca arcillas calizas y facies evaporíticas, estructurados en escamas con numerosos planos de cabalgamiento de dirección aproximada N30E, posiblemente, responsables de la actividad sísmica.

### **Zona 22. Prepirineo Oriental**

Es una zona de pequeña extensión y actividad sísmica media. El mayor terremoto catalogado,  $M = 5.1$ ,  $I_0 = 5$ , es el del 11/11/1962 en San Juan de las Abadesas. Estos sismos se relacionan con zonas de cruce de cabalgamientos de dirección aproximada E-O (y vergencia S y N) y fracturas posteriores de dirección próxima a N30/45E que afectan a los materiales calcáreos turbidíticos del Paleoceno-Eoceno.

### **Zona 23. Zona Cantabra**

Comprende materiales mesozoicos y terciarios. Los terremotos son dispersos y en general pequeños, alcanzando  $I_0 = 6$  los de Arredondo 16/10/1938 ( $M = 4.9$ ) y Santander 16/1/1899. La sismicidad se relaciona con importantes accidentes tectónicos. La falla de Arredondo (de dirección E-O a ENE-OSO) refleja, en superficie, a la prolongación oriental de la franja cabalgante del Escudo de Cabuérniga. Los terremotos de Corrales de Buelna pueden asociarse a la franja cabalgante del Besaya.

### **Región 3. Cordillera Ibérica (Zonas 29 a 34)**

Es una región de sismicidad media-baja, en la que la destaca la zona de las Sierras de la Demanda y Cameros.

En la versión actual se ha eliminado la zona 33-Alfambra-Turia.

### **Zona 29. Demanda y Cameros**

De pequeña extensión, posee una densidad media de terremotos, instrumentales e históricos, siendo el mayor el de Préjano de 1817, con  $I_0 = 8$ . Geológicamente, los terremotos están, posiblemente, ligados a los cabalgamientos de la Facies Weald sobre materiales del Mioceno inferior que configuran la cuenca del Ebro.

### **Zona 30. Sierra de Neila**

Es una zona de baja actividad sísmica (intensidades  $\leq 4$ ). No se puede establecer una relación entre accidentes tectónicos y terremotos.

### **Zona 31. Cordillera Ibérica-Aragonesa**

Es una zona con baja densidad de terremotos. Mencionar los de Calatayud 4/2/1944 ( $M = 3.8$ ;  $I_0 = 6$ ) y Used ( $M = 4.7$ ;  $I_0 = 7$ ) y los terremotos históricos de Monterde ( $I_0 = 6$ ) y Cimballa ( $I_0 = 7$ ). Todos los epicentros de estos terremotos se sitúan en los alrededores de Calatayud en materiales del Mioceno inferior de la cuenca del río Jiloca y muy probablemente relacionados con familias de fallas de dirección aproximada E-O y N45E que, desarrolladas en materiales paleozoicos (Cámbrico inferior) en el borde de la cuenca, afectan también a los materiales Miocenos.

### **Zona 32. Cordillera Ibérica Castellana**

Los terremotos de mayor intensidad se sitúan en las proximidades de Albarracín destacando el de 29/5/1880 con  $I_0 = 6$ . Igualmente destacan los dos sentidos en Tramacastilla el 19/7/1848 ( $I_0 = 5$ ) y el 3/10/1848 ( $I_0 = 6$ ). La actividad sísmica de esta zona se liga a dos familias de fallas, ambas con direcciones próximas a NO-SE si bien unas tienen un funcionamiento inverso y otras normal. No hay que descartar que algunos de los sismos puedan estar ligados a fenómenos de diapirismo.

### **Zona 34. Maestrazgo**

Es una zona de escasa actividad sísmica. La densidad de terremotos es baja. Las intensidades son bajas a excepción de los sentidos en Fortanete (Teruel) en 1928, y en Castellón de la Plana en 2001, ambos con  $I_0 = 5$ . La relación de estos terremotos con la tectónica es difícil de establecer (posiblemente ligados a zonas de cruce de fracturas de dirección aproximada N160E con otras de dirección N20E con cierta actividad en épocas recientes).

### **Región 4. Cordillera Costera-Catalana (Zonas 26 a 28)**

Es también una región de sismicidad media baja. En la versión actual (2012) sólo se consideran 2 zonas (26, 28), las cuales se reparten la antigua zona 27 del Bajo Llobregat.

#### **Zona 26. Cordillera Costero Catalana Norte**

Los terremotos se localizan, en su gran mayoría, en la franja costera, entre Barcelona, Arenys de Mar y N de Granollers. Otro sector de concentración de sismos es entre Lloret de Mar y San Feliu de Guixols. Entre los terremotos históricos, están los de Cardedeu, 24/5/1448 ( $I_0 = 8$ ) y San Celoni, 12/3/1927 ( $I_0 = 7$ ). Entre los recientes, el más destacado es el de Blanes el 26/3/1943 con  $I_0 = 5$ ,  $M = 4.4$ . Tectónicamente, los sismos se pueden asociar a fallas de dirección ENE que articulan el litoral catalán y limitan las fosas tectónicas en que se encuentra compartimentada esta zona y que presentan actividad, comprobada, desde el Mioceno hasta el Cuaternario. Los sismos del extremo NE de la zona podrían asociarse con la familia de fallas de dirección próxima a SE con importante actividad neotectónica comprobada. Los sismos distribuidos dentro de la franja Mediterránea, podrían estar relacionados con la prolongación de las fallas en la plataforma marina.

#### **Zona 28. Costero Catalana Sur**

En esta zona la actividad es reducida. A destacar los sismos de Tivisa, del 3/10/1845 con  $I_0 = 7$  y del

7/10/1845 con  $I_0 = 6$ . Los terremotos de esta zona se ligan a fallas normales de dirección N45E que compartimentan el sector S del sistema Costero Catalán y, asimismo, con cabalgamientos de igual dirección y vergentes al N con indicios de actividad neotectónica.

### **Región 5. Orla Mesozoica y Neógena Occidental Portuguesa (Zonas 69 y 70)**

Dentro del gradual incremento de sismicidad en el macizo Hespérico en dirección oeste, se alcanza el máximo en las orlas mesozoicas costeras portuguesas.

#### **Zona 69. Orla Mesozoica Occidental**

Está constituida por materiales mesozoicos y cenozoicos con fracturas de dirección dominante NNE-SSO, en algún caso con actividad reciente, y NNO-SSE. La densidad de terremotos es media a baja. La mayor concentración se da en la mitad Sur (Torres Vedras, Obidos). A destacar los terremotos de Nazaré (3/10/1940) y Aveiro (27/3/1752), ambos con  $I_0 = 7$ . Estos terremotos podrían estar relacionados con los accidentes de Coimbra (N30E) y sierra de Lousa (N40/50E) y con el cabalgamiento de Ferreira que continua hacia el N con dirección NS.

#### **Zona 70. Bajo Sado y Tajo**

La densidad de terremotos es relativamente alta y en ella se localizan los terremotos de mayor importancia de Portugal continental: Setúbal de 26/1/1531, Vilafranca de Xira de 11/11/1858 y Benavente de 23/4/1909. Los terremotos en esta zona se ligan con la apertura de la dorsal del Atlántico norte y sus grandes fracturas transformantes, que reactivan fracturas menores de esta zona.

### **Región 6. Levante (Zonas 35 a 43 y 72)**

Es una región de importantes terremotos y una de las regiones donde mejor se puede encontrar al-

guna correlación de la sismicidad con la tectónica, como en la falla del Segura Medio y en la falla del Guadalentín (Lorca-Alhama-Murcia).

#### **Zona 35.- Tránsito Ibérica-Béticas**

Se trata de una zona intermedia entre la cordillera Ibérica y las cordilleras Béticas. El terremoto de mayor intensidad ( $I_0 = 7$ ) es el de Carlet de 19/5/1872. Pueden reconocerse, al menos, tres eventos distensivos correspondientes al Mioceno inferior-medio, Plioceno superior y, probablemente, un tercero en el Pleistoceno medio, que es posible que continúe actualmente y que implique el rejuego de fracturas de dirección N60-70E, cuya máxima representación la constituyen los accidentes de Onteniente-Gandía y de Castalla-Denia. Con estos accidentes se relacionan la gran mayoría de sismos catalogados. No obstante, otros podrían estarlo con la facies Keuper del Trías actuando como diapiros que aprovechan zonas de debilidad.

#### **Zona 36. Prebético Externo Diapírico**

Constituida por materiales de origen evaporítico, está limitada al O por la falla de Caudete-Elda-Elche (NO-SE) y al S por el accidente Cádiz-Alicante. Tiene una densidad media de terremotos. Destacan los localizados en las provincias de Murcia (Yecla y Jumilla), Albacete (Hoya Gonzalo y Caudete) con  $I_0 = 6$ , y en Alicante (Salinas 28/11/1916) con  $I_0 = 7$ . Estructuralmente se caracteriza por tener directrices de plegamiento con direcciones NE-SO a NNE-SSO. En el sector SO se cartografían fallas inversas con vergencia hacia el N y a las que podrían relacionarse algunos de los sismos del sector. Otros sistemas de fallas importantes son los que siguen las direcciones N60-90E, NO-SE y NE-SO. Al primer sistema pertenece el accidente anteriormente aludido (Cádiz-Alicante) que junto con el de Chipiona-Gandía (situado al N del anterior), define una banda de intensa fracturación y direcciones subparalelas (N60-70E), que afectan a materiales del Mioceno superior. Los sismos sentidos en esta provincia se relacionan con estos sistemas y, principalmente con zonas de cruce de las fracturas, anteriormente descritas, con otras de dirección NO-SE, probablemente reactivadas por los movimientos ascendentes de las facies evaporíticas.

#### **Zona 37. Prebético Externo Levantino**

Esta zona tiene una complicada estructura de pliegues y cabalgamientos vergentes hacia el NO cortados por fallas que siguen las directrices características de las cordilleras Béticas (N60-90E, NO-SE, NE-SO). La sismicidad en esta zona es media-alta. Destacan los sismos Tabernes de Valldigna (Valencia) del 18/12/1396 y el de Muro de Alcoy (Alicante) del 19/6/1645, ambos con  $I_0 = 9$ . En la zona existen fracturas importantes generadas en el evento distensivo de edad Villafranquiense con dirección entre N70E y E-O y cartografiadas al N de Cofrentes afectando a los materiales pliocenos de la cuenca del Cabriel. A este sistema de fallas corresponden los accidentes de Onteniente-Gandía y flexura Castellón-Denia y otros que adoptan una dirección N45E, como ocurre con el accidente Jumilla-Caudete-Játiva. Todos ellos juegan, durante la época neotectónica, como fallas inversas con componentes de desgarre levógiros y están cortadas por otras de dirección NO-SE, como la falla de Elda.

#### **Zona 38. Corredor Elche-Alicante**

Comprende parte de la depresión de Elche o del Segura Bajo, limitada hacia el N por materiales pertenecientes al Subbético y Prebético y en contacto mecánico según la traza del accidente tectónico Cádiz-Alicante que aquí toma una orientación N45E. Tiene una densidad media a alta de terremotos. Los terremotos de mayor intensidad son los de Elche del 16/4/1730,  $I_0 = 7$  y el situado frente a la costa Mediterránea del 4/7/1946,  $I_0 = 6.5$ ;  $M = 4.2$ . Los terremotos sentidos en esta zona deben relacionarse con el accidente tectónico de Cádiz-Alicante y con los cabalgamientos y escamas tectónicas identificadas especialmente en el sector NO de la zona.

#### **Zona 39. Baleares**

Esta zona tiene una densidad de terremotos baja. La mayor concentración se da en Mallorca. Destacan los sismos de Selva 24/3/1721 y NE de Mallorca 15/5/1851, ambos con  $I_0 = 7$ . Los terremotos del N de Mallorca se pueden relacionar con los sistemas de cabalgamientos de dirección aproximada N45E y los terremotos del S de Mallorca y Me-

norca con los sistemas de fallas normales de dirección próxima a NNO-SSE.

#### **Zona 40. Segura Medio**

Tiene una densidad alta de terremotos alineados, la gran mayoría, según una dirección coincidente con la de la cuenca del río Segura: Murcia 3/9/1743,  $I_0 = 7$ ; Ceuti 16/1/1883,  $I_0 = 7$ ; Torres de Cotillas 21/1/1917,  $I_0 = 7$ ; y el de Lorqui 3/9/1930,  $I_0 = 7$ . La actividad sísmica se relaciona con sistemas de fallas conjugados de direcciones N30/45E y N133/150E que rejuegan frente a los esfuerzos de dirección norteada. De entre todos los accidentes cartografiados destaca la falla del Segura Medio (NO-SE), de 32 km de longitud, con surgencias termales y muy activa sobre todo en su intersección con el accidente tectónico de Cádiz-Alicante y con la falla de Lorca.

#### **Zona 41. Bajo Segura**

Se trata de un área subsidente desde el Pleistoceno en relación con fracturas que hunden el Bajo Segura y que tienen cierta componente de desgarre dextral. Estas familias de fracturas tienen direcciones N140/160E (falla de San Miguel de Salinas y de Torrevieja) y otras conjugadas que responden a eje de máxima compresión (northeastado) generalizado en las cordilleras Béticas. Además existe otra familia con dirección E-O. Todas estas fracturas han tenido reactivaciones frecuentes con las que se relacionan los sismos y su distribución. Posee una densidad de sismos media, si bien incluye alguno de los mayores terremotos peninsulares como el de Torrevieja de 1829,  $I_0 = 10$ .

#### **Zona 42. Corredor de Guadalentín**

Esta provincia sismotectónica está bien caracterizada ya que los terremotos se agrupan siguiendo la traza de la falla del Guadalentín (o de Alhama de Murcia), de dirección SO-NE, limitada por materiales pertenecientes al Bético s.s. (sierras de Almenara, Carrascoy, Estancias y Espuña) que entran en contacto con la depresión mediante grandes sistemas de fallas de dirección N45E/NNE-SSO y que

en general juegan como desgarres levógiros, los cuales a su vez están cortados por desgarres dextrógiros de dirección N120-160E. La zona tiene una densidad media de terremotos, que se asocian a estos sistemas de fracturas. Los de mayor intensidad se localizan en los alrededores de Lorca (30/1/1579 y 28/8/1674) ambos con  $I_0 = 8$ .

#### **Zona 43. Cartagena-Mar Menor**

Formada por materiales pertenecientes al complejo Nevadofilábride que aflora en la mitad sur (sierra de Cartagena), constituyendo un apilamiento de mantos de corrimiento de unidades alóctonas vergentes hacia el N, cortadas por fallas recientes con actividad neotectónica probada y de dirección variable según el sector: en el campo de Cartagena los sistemas más importantes de fracturas tienen dirección N12E y en las cuencas de edad Plioceno el sistema predominante es E-O cortado por otro sistema de dirección N140/160E. La actividad sísmica es escasa. El sismo de mayor intensidad  $I_0 = 6$ , ocurrió el 5/9/1983 y se localiza en el mar frente al cabo de la Nao.

#### **Zona 72. Mar Balear**

Tiene una densidad muy baja de sismos, todos ellos de muy baja intensidad. No es posible establecer una relación con la geología y tectónica.

### **Región 7. Cordilleras Béticas y Valle del Guadalquivir (Zonas 44 a 68)**

Es quizá la región peninsular de actividad más numerosa y tiene también importantes sismos máximos. La actividad sísmica registrada en el borde más meridional de la región se puede relacionar con la tectónica global de proximidad a la sutura de las placas Euroasiática y Africana.

#### **Zona 44. Orla Mesozoica del Algarve**

Está formada, mayoritariamente, por materiales sedimentarios de edad mesozoica con episodios volcánicos que se extienden hasta el Mioceno afec-

tando a materiales de dicha edad. Estructuralmente, la zona se caracteriza por flexiones de orientación general E-NE y E-O, asociados a cabalgamientos vergentes hacia el S. El número de terremotos en esta zona es medio y la mayor concentración se produce en el sector central. El mayor sismo es el de Tavira (Portugal) del 27/12/1722, con  $I_0 = 9$ . En los materiales más recientes (Neógeno) se cartografían familias de fallas N-NE y NE-SO que afectarían a la plataforma marina y a las que estarían ligados los sismos producidos. También, algunos de ellos podrían ligarse al fallamiento E-O paralelo a las flexiones antes aludidas.

#### **Zona 45. Golfo de Cádiz-SE de Faro**

Los materiales de esta zona son prolongación de los de la cuenca del Guadalquivir, golfo de Cádiz y NE de Marruecos. Su deformación, similar a la observada en los materiales continentales, estaría producida por fallas, vulcanismo y diapirismo que afectaría a materiales recientes de edad Mioceno Superior y Cuaternario. De los terremotos catalogados los mayores son los del 12/4/1773,  $I_0 = 9$  frente a la costa oeste africana y el del 15/3/1964,  $I_0 = 9$ ,  $M = 6.2$ .

#### **Zona 46. Depresión del Guadalquivir**

Es una zona de encuentro entre las cordilleras Béticas y el macizo Hespérico. Los materiales representados incluyen facies del Trías, Mesozoico, Neógeno y Cuaternario. Estos últimos formando un sistema de terrazas y aluviales. Algunas de estas terrazas están afectadas por fallas neotectónicas con sentido de movimiento normal, de dirección predominante OSO-ENE, a las que se podrían asociar los sismos sentidos en esta zona. De la actividad sísmica de la zona destaca la acumulación de sismos en los alrededores de Montilla con un máximo el 5/7/1930 con  $I_0 = 7$ ;  $M = 4.9$ . Sin embargo los de mayor intensidad son los terremotos históricos de Andujar de 1169 y el de Carmona de 1504 ambos de intensidad máxima o epicentral  $I_0 = 9$ .

#### **Zona 47. Subbético de Jaén**

Al S de la depresión del Guadalquivir tiene una gran complejidad litológica y estructural. La densidad de sismos es baja y los epicentros dispersos.

Únicamente se han sentido dos terremotos de intensidad media, los de Jaén de 1885 y el Alcaudete de 1951, ambos con  $I_0 = 7$ . En el sector O predominan las fracturas de dirección N70E/E-O, que afectan a materiales de edad Neógeno y Cuaternario, e inciden en la forma del relieve, lo que puede indicar una actividad tectónica reciente. En el sector E se cartografían familias de fracturas de dirección E-O y N70/80E, con funcionamiento en época neotectónica. A ambos sistemas de fracturas pueden atribuirse la mayor parte de los sismos sentidos en la zona.

#### **Zona 48. Sierra del Segura**

Su actividad sísmica es muy baja. El mayor de los terremotos tiene  $M = 4.1$ . En esta zona las estructuras tienen en general dirección NE-SO a NNE-SSO y forman un arco limitado al Norte por escamas y fallas inversas que pueden haber tenido rejuego en épocas recientes e inducido a los sismos sentidos.

#### **Zona 49. Arco de Gibraltar**

Está formada principalmente por las unidades alóctonas del campo de Gibraltar y algunos retazos de terrenos asimilables a formaciones de la depresión del Guadalquivir presentando gran complejidad tectónica de mantos de corrimiento y cabalgamientos desplazados desde el E y SE que enmascaran las estructuras con posible actividad neotectónica. Tiene una densidad de sismos de baja a media, con 3 terremotos de intensidad máxima epicentral  $I_0 = 6$ . La actividad sísmica se puede relacionar con reactivaciones de estructuras superficiales (mantos de corrimiento mencionados) asociada a la tectónica global de la zona.

#### **Zona 50. Antequera-Sierra de Grazalema**

De forma irregular, tiene gran complejidad tectónica, con mantos de corrimiento y cabalgamientos que ocultan fracturas con posible actividad neotectónica. La mayor concentración de terremotos se da en las proximidades de Olvera (Cádiz), Morón de la

Frontera (Sevilla) y Palenciana (Málaga). Otros terremotos importantes son el de Osuna, del 22/8/1862 y el de Grazalema de 10/2/1901, ambos con  $I_0 = 7$ . La actividad sísmica se puede relacionar con la reactivación de estructuras alpinas, dentro del contexto tectónico global.

### **Zona 51. Loja-Sierra Gorda**

Aquí se hallan representados materiales del complejo Alpujárride, del Prebético interno y materiales de la depresión de Granada. Tiene una alta densidad de sismos, marcándose una cierta alineación NNO-SSE coincidente con el eje de máxima distensión de esta zona. El sismo máximo es el terremoto de Arenas del Rey, 25/12/1884, con  $I_0 = 9$  y cuyas réplicas se desarrollaron durante un periodo de cerca de un año. Las estructuras a las que se asocian los sismos pertenecen a dos sistemas: uno de dirección N140/160E y otro de dirección N70E a E-O correlacionables con el gran accidente tectónico Cádiz-Alicante. Al Sur de la zona existe otro sistema de fallas de dirección NO-SE que actúan como fallas normales con cierta componente de desgarre.

### **Zona 52. Granada**

La depresión de Granada es una de las cuencas intramontañosas formadas durante el Neógeno con bordes limitados por accidentes tectónicos que presentan actividad neotectónica. Es una de las zonas de mayor densidad de epicentros, con terremotos de intensidad  $I_0 = 9$ , como el del 24/4/1431, al S de Granada. De las fallas que limitan la depresión, al norte se cartografía una familia de igual dirección que el accidente Cádiz-Alicante (N70E). En el borde sur predominan fallas transcurrentes dextrales de dirección E-O. A un lado y otro de la cuenca y en el substrato de la misma existe la cicatriz de la colisión entre el «Bloque de Alborán» y las Zonas Externas. Aparecen también importantes fallas rumbo-deslizantes levóginas de dirección NNE-SSO, sobre todo en la parte oriental de la cuenca. Todo este sistema está atravesado y, en parte desplazado, por familias de fallas NO-SE que en el sector de Granada se localizan, principalmente, en Sierra Elvira, Padul,

Durcal y pueblos colindantes. Todas son muy activas sísmicamente y responsables de los principales terremotos de la zona.

### **Zona 53. Subbético de Huescar**

Incluye parte de materiales pertenecientes al complejo Alpujárride y gran parte de los materiales miocenos y cuaternarios pertenecientes a la Depresión de Guadix-Baza. La intensidad epicentral máxima es  $I_0 = 7$  (25/11/1913, Huescar). Se destacan también los terremotos recientes de Mula,  $I_0 = 6$  y Calasparra,  $I_0 = 5$ , ambos de 1999. La Depresión de Guadix-Baza está sometida a compresiones NS durante el cuaternario y con reactivación de las familias de fallas de dirección N70E y NO-SE. La reactivación de estos sistemas de fracturación es la causante de la sismicidad de la zona, como causa local.

### **Zona 54. Depresión de Baza**

Materiales de características simiales al Subbético de Huéscar. La sismicidad histórica de esta zona es importante, Baza 1531,  $I_0 = 9$ ; Vélez Rubio 1751,  $I_0 = 7$ . La actividad sísmica está asociada a una serie de estructuras dispersas por toda la zona. Las direcciones de fallas más importantes son la N70E y las NO-SE. En su parte SE también se observan fallas de dirección NNE-SSO a las que se liga la subsidencia de la zona. Las familias de fracturas NO-SE están representadas aquí por la falla de Nacimiento-Mencal y de Baza-Quesada.

### **Zona 55. Corredor del Almanzora**

Están representados el complejo Nevado-Filábride al S y el complejo Alpujárride al N, ambos separados por una estrecha franja de terrenos miocenos y cuaternarios pertenecientes al corredor del Almanzora donde predominan familias de fallas de dirección N70E y E-O que actuaron como desgarres dextros antes de la época neotectónica. Igualmente se cartografían fracturas NO-SE y NNE-SSO que forman las paredes de este corredor y cortan a las anteriores siendo las primeras dextróginas y las se-

gundas levóginas y que han funcionado incluso en el Cuaternario. Hay una elevada densidad de terremotos alineados E-O según el corredor del río Almanzora. El más importante es el de Vera del 9/11/1518 con  $I_0 = 9$ . Se interpreta que han sido las fracturas con actividad neotectónica, de direcciones NO-SE y NNE-SSO, las responsables de estos sismos.

#### **Zona 56. Sierra Nevada y Filabres**

Pertenece casi exclusivamente al complejo Nevado-Filábride donde existen fallas de desgarre y normales de dirección NO-SE, con actividad cuaternaria. En el sector meridional se cartografían fallas de dirección E-O que corresponden a fallas trascurrentes dextrales y todos estos sistemas están atravesados y, en parte, desplazados por fallas NO-SE. Tiene una densidad baja de terremotos. Destacan el de Ocaña (Almería), 22/4/1912,  $I_0 = 7$ . Las fallas de desgarre y normales de dirección NO-SE, con actividad cuaternaria se consideran las responsables de la sismicidad de la zona.

#### **Zona 57. Sierra de Tolox**

Comprende materiales del complejo Maláguide y del complejo Alpujárride y materiales ígneos pertenecientes al plutonismo orogénico calcoalcalino (peridotitas) presente en algunos sectores de las cordilleras Béticas. La densidad y actividad sísmica de esta zona son bajas. Se cartografían fracturas pertenecientes a diferentes familias (N70E, E-O, NO-SE y NNE-SSO) estando, posiblemente, relacionada la sismicidad con la actuación reciente de las fracturas NO-SE y NNE-SSO.

#### **Zona 58. Málaga**

Comprende unidades pertenecientes al complejo Maláguide, complejo Alpujárride y materiales ígneos pertenecientes al plutonismo orogénico calcoalcalino (peridotitas) presente en algunos sectores de las cordilleras Béticas. La densidad de terremotos es moderada y la intensidad epicentral es puntualmente alta. Destaca el terremoto de Alhaurín el

Grande, 9/10/1680 con  $I_0 = 9$ . Se cartografían fracturas pertenecientes a diferentes familias (N70E, E-O, NO-SE y NNE-SSO) estando, posiblemente, relacionados los terremotos con la actuación reciente de las fracturas NO-SE y NNE-SSO y ligado a la interacción de la placa Ibérica y Africana.

#### **Zona 59. Motril**

Geoestructuralmente, se localiza en materiales pertenecientes casi en su totalidad al complejo Alpujárride con fracturas pertenecientes a familias de direcciones predominantes NO-SE además de otros sistemas característicos en estas cordilleras (N70E, E-O, NNE-SSO). La densidad de terremotos es relativamente baja. El terremoto de mayor intensidad ( $I_0 = 8$ ) se sitúa frente a la costa de Motril, el 13/1/1804. La actividad sísmica está ligada a la actuación reciente de las fracturas NO-SE que, asimismo afectan a la plataforma marina.

#### **Zona 60. Adra-Sierra Alhamilla**

En las sierras de Contraviesa y Gador predominan las fallas de dirección N70E y E-O con componentes de desgarre dextro antes de la época neotectónica. También aparecen fracturas NO-SE y NNE-SSO, al parecer posteriores, las primeras dextróginas y las segundas levóginas y que han funcionado incluso en el Cuaternario. Por criterios sísmicos se ha incorporado parte de la plataforma marina. Destaca el terremoto de Dalías (Almería), 25/8/1804,  $I_0 = 9$ . Al S de la sierra de Gador se extiende un área ocupada por terrenos pliocenos y cuaternarios (campo de Dalías) donde están reflejados todos los sistemas de fracturas activas (NO-SE y NNE-SSO), que se consideran responsables de los sismos catalogados.

#### **Zona 61. Almería**

Ocupa el núcleo paleozoico de la sierra de Alhamilla y el vulcanismo neógeno del cabo de Gata. Presenta una densidad media de terremotos dispersos, con mayor abundancia en la parte O, en torno a Almería. El mayor terremoto es el de 1522 en Al-

mería con  $I_0 = 9$ . Los terremotos, de manera idéntica a las zonas colindantes están relacionados con fallas de direcciones NO-SE y NNE-SSO.

#### **Zona 62. Mar de Alborán Occidental**

Es una zona de densidad baja a media de terremotos, con intensidades bajas a moderadas. Los sismos de esta zona se relacionan con la interacción entre las placas Africana e Ibérica y mar de Alborán.

#### **Zona 63. Mar de Alborán Oriental**

Las características geológico estructurales de esta zona son de gran complejidad, pues en ella coexisten unidades mesozoicas plegadas con mantos de corrimiento y cabalgamientos, junto con series sedimentarias con intercalaciones de rocas volcánicas recientes. Tiene una densidad relativamente alta de terremotos con un máximo de concentración en la zona de Alhucemas y con intensidades 8-8.5.

#### **Zona 64. Mediterráneo Sur**

Ésta es una amplia zona donde la mayor concentración de terremotos se sitúa en el sector SO. Por intensidad los más importantes son tres terremotos  $I_0 = 6$ , todos ellos en el mar.

#### **Zona 65. Rif Occidental**

Geoestructuralmente es muy semejante a la zona 49 (arco de Gibraltar), predominando en ambas las estructuras de bajo ángulo. Los terremotos máximos son los de Romara (1909), Aindefali (1930) y Alcazarquivir (1938) los tres con  $I_0 = 7$ . Los terremotos de esta zona se relacionan con sistemas de fracturas de direcciones similares a las desarrolladas en las cordilleras Béticas.

#### **Zona 66. Rif Oriental**

Geoestructuralmente es semejante a la zona anterior con predominio de estructuras de cabalgamiento. Tiene una densidad de media a baja de terremotos. Destaca el de Beni-Touzine (Marruecos), 24/12/1930 con  $I_0 = 7$  y  $M = 4.3$ . Los terremotos de

esta zona se relacionan, al igual que los de la anterior, con sistemas de fracturas de direcciones similares a las desarrolladas en las cordilleras Béticas.

#### **Zona 67. Cratón Africano**

Tiene una baja densidad de terremotos. Geoestructuralmente es una zona con sedimentos y vulcanismo recientes. El terremoto de mayor intensidad, Beni-Saf (Argelia), 22/12/1999 tiene  $I_0 = 7$ ,  $M = 4.2$ . De nuevo, los sismos sentidos se asocian a sistemas de fracturas de direcciones similares a las desarrolladas en las cordilleras Béticas.

#### **Zona 68. Región de Orán**

Aunque la densidad de terremotos es media, la gran mayoría son importantes destacando los sentidos en las cercanías de Orán (9 de octubre de 1790) y El Bordj (29 de noviembre de 1887), ambos con  $I_0 = 9.5$ . Los terremotos catalogados en esta zona al igual que en las zonas precedentes se relacionan con sistemas de fracturas de direcciones similares a las desarrolladas en las cordilleras Béticas y a la interacción de la placa Africana e Ibérica.

#### **Región 8. Banco de Goringe (Zona 71)**

Es la región de mayor interés sismológico dentro de las estudiadas. Constituye el extremo oriental hasta el que es interpretable la falla de Azores-Gibraltar y es origen de los mayores terremotos que afectan a la península Ibérica, comparables a los mayores terremotos del mundo, que hacen sentir sus efectos en toda (o casi toda) la península Ibérica y una buena parte del norte de África.

#### **Zona 71. Goringe**

Se sitúa al SO del cabo de San Vicente y aunque tiene dimensiones pequeñas presenta una alta densidad de terremotos. Dentro de ella se han dado los terremotos de mayor intensidad sentidos en la región estudiada destacando los de 24/8/1356 y 1/11/1755 (terremoto de Lisboa) para los que se estima  $I_0 = 12$ . Los terremotos del banco de Goringe se relacionan con la apertura de la dorsal del Atlántico norte y sus grandes fracturas transformantes.

## Modelos de movimiento fuerte analizados en el estudio

### IV.1. Modelos preseleccionados no usados finalmente en el estudio

#### IV.1.1. Modelos publicados con datos españoles.

##### *Cabañas et al. (1999)*

Este modelo proporciona estimaciones de PGA horizontal y vertical en función de diversas definiciones de magnitud ( $M_S$  y  $M_L$ ) y de distancia ( $R_{epi}$  y  $R_{hip}$ ). Hace distinción entre tipo de suelo y presenta ecuaciones para un conjunto de datos españoles y para un conjunto de datos de la cuenca mediterránea (incluyendo los españoles). A pesar de ser un modelo relativamente antiguo, sus estimaciones resultan de actualidad, pues desde que se generó el modelo solo el terremoto de Lorca de 2011 ha aportado algún dato fuera de los rangos de magnitud y distancia cubiertos por Cabañas *et al.* (1999) (véase comentario en Benito y Gaspar-Escribano, 2007).

##### *Mezcua et al. (2008)*

Este modelo da estimaciones de PGA horizontal para suelo firme. Además de su explicación en la publicación citada, el trabajo de García Blanco (2009) recoge con más detalle los pormenores del modelo. Incluye datos acelerométricos españoles registrados hasta marzo de 2006. El término de atenuación anelástica es despreciable y por tanto no aparece en la forma funcional final.

#### IV.1.2. Modelos publicados con datos de otros lugares y utilizados en estudios de España

##### *Sabetta y Pugliese (1996)*

Es un modelo desarrollado con datos italianos, que estima aceleraciones y velocidades pico horizontales y verticales, y para pseudovelocidad espectral (PSV amortiguamiento crítico 5%) para 14 frecuencias distribuidas entre 0.25 y 25 Hz, y para dos tipos de distancia (epicentral y Joyner-Boore). Los autores desarrollan también ecuaciones de predicción de la Intensidad de Arias (1970) y la duración de Vanmarcke y Lai (1980). Este modelo fue usado por Tapia (2006) para contrastar sus modelos de atenuación, por Peláez *et al.* (2005) para predecir la intensidad de Arias, por Benito *et al.* (2008, 2010) en el cálculo regional de la peligrosidad sísmica en Murcia y en Andalucía, respectivamente, y por Mezcua *et al.* (2011) para el estudio de peligrosidad de España.

##### *Ambraseys et al. (1996)*

Modelo empírico realizado a partir de 422 registros obtenidos Europa y Oriente Próximo que estima la aceleración pico y la aceleración espectral absoluta (SA amortiguamiento crítico 5%), para periodos entre 0.1 y 2 s. Se ha aplicado en Cataluña (Tapia, 2006), en Murcia constituyendo un nodo más de un árbol lógico (García Mayordomo *et al.*, 2007; Benito *et al.*, 2008a) y en Andalucía (Be-

nito *et al.*, 2010). También se utilizó este modelo para estudiar la peligrosidad sísmica en todo el Mediterráneo, (Jiménez *et al.*, 2001), para la evaluación de la susceptibilidad de laderas al sufrir inestabilidades inducidas por terremotos aplicado a la provincia de Alicante (Delgado *et al.*, 2006) y para el estudio del movimiento fuerte del suelo provocado por un terremoto en la zona central de la península Ibérica (Carreño *et al.*, 2008) entre otros.

#### ***Lussou et al. (2001)***

Modelo derivado a partir de datos de Japón, para aceleraciones espectrales entre 0.1 y 50 Hz. Ha sido utilizado en estudios regionales y locales en la zona de Pirineos (Drouet *et al.*, 2007; Benito *et al.*, 2008b; Rivas-Medina *et al.*, 2012).

#### ***Berge-Thierry et al. (2003)***

Modelo obtenido a partir de datos principalmente europeos (83%). Para completar la distribución de los datos más altos de magnitud 6, se añadieron algunos registros estadounidenses (17%). El modelo de atenuación elegido para la predicción del movimiento en términos de aceleración espectral considera la atenuación geométrica y anelástica, y la condición de sitio geológica. Los coeficientes disponibles para esta ley están comprendidos entre 0.1 y 34 Hz. En España, ha sido utilizado a nivel regional en la zona de Murcia, Andalucía y Navarra, (Benito *et al.*, 2008a, 2008b y 2010), para el cálculo de la peligrosidad sísmica. También se utiliza en el análisis de la peligrosidad en los Pirineos (Drouet *et al.*, 2007; Rivas-Medina *et al.*, 2012) y en el estudio de toda España de Mezcua *et al.* (2011).

#### ***Tavakoli y Pezeskh (2005)***

Modelo híbrido empírico-estocástico desarrollado para el este de Estados Unidos. El modelo estocástico sirve para derivar factores de modificación del movimiento fuerte en el oeste de Estados Unidos al movimiento fuerte en el este de Estados Unidos, constreñido por los datos empíricos del este de Estados Unidos. Este modelo ha sido utili-

zado en el estudio regional de la peligrosidad sísmica en Andalucía (Benito *et al.*, 2010) entre otros.

#### ***Kanno et al. (2005)***

Definen modelos de PGA, PGV y aceleraciones espectrales para fuentes corticales y asociadas al frente de subducción utilizando los datos registrados en Japón y algunos datos de otros países como Turquía o Estados Unidos. Este modelo ha sido empleado en el estudio regional de la peligrosidad sísmica en Andalucía (Benito *et al.*, 2010) entre otros.

#### ***Ambraseys et al. (2005)***

Modelo basado en registros de Europa y Oriente Próximo, es el sucesor del modelo de Ambraseys *et al.* (1996), pero incorpora un coeficiente de mecanismo focal y hace un estudio de residuos más detallado, encontrando que la desviación estándar del modelo es función de la magnitud. Este modelo ha sido utilizado por García-Mayordomo (2005) en el estudio de peligrosidad del sureste de España y por Crespo (2011) en su análisis de la peligrosidad sísmica en la península Ibérica.

#### ***Bragato y Slejko (2005)***

Modelo empírico desarrollado para la zona de los Alpes, que cubre adecuadamente el rango de las magnitudes bajas e intermedias. Ha sido empleado por Crespo (2011) en el estudio de la peligrosidad sísmica de España con un método basado en estimadores de densidad kernel.

### ***IV.1.3. Modelos aplicables para regiones de subducción o zonas profundas***

#### ***Gregor et al. (2002)***

Modelo derivado para la zona de Cascadia (Pacífico nororiental) y en el que se usa un modelo estocástico de falla finita para simular el movimiento fuerte debida a megaterremotos. Los resultados se validan con los datos de los terremotos

ocurridos en 1985 en Michoacán (México) y en Valparaíso (Chile).

**García et al. (2005)**

Modelo desarrollado con datos de terremotos de subducción *in slab* en México para la predicción de PGA, PGV y PSA de frecuencias entre 0.2 y 25 Hz. Los valores de aceleración predichos superan a los de terremotos de subducción *interface* en la zona epicentral, aunque su atenuación con la distancia es más rápida.

**Lin y Lee (2008)**

Utiliza datos de movimiento fuerte de Taiwán correspondientes a fuentes de subducción *in slab* e *interface* para derivar ecuaciones de predicción de PGA y aceleraciones espectrales para periodos entre 0.01 y 5 segundos. Las estimaciones obtenidas resultan inferiores a las que resultan de otros modelos de atenuación deducidos por regresión de otras zonas de subducción.

**Atkinson y Boore (2003)**

Modelo propuesto para la zona de Cascadia (Pacífico nororiental) en el que se incorporan datos de América Central, Japón y México. Se diferencian los terremotos de subducción *in slab* e *interface* y se calculan coeficientes para frecuencias desde 0.33 a 25 Hz.

## IV.2. Modelos usados en el estudio

**Akkar y Bommer (2010)**

Este modelo es una actualización de otro anterior (2007), en el que se mejora la estimación de la incertidumbre aleatoria. Estos autores toman la misma base de datos del modelo de Ambraseys *et al.* (2005), que cuenta con datos de Europa, de la región Mediterránea y de Oriente Próximo y Medio, y realizan pequeñas variaciones como proponer coeficientes no suavizados para PGV, PGA y

PSA en un rango de periodos espectrales más amplio, de hasta 4 segundos. Este modelo ha sido utilizado en el estudio de peligrosidad sísmica de España de Mezcua *et al.* (2011).

El tipo de mecanismo focal para falla normal e inversa se introduce a través de coeficientes específicos. El tipo de suelo se incorpora a través de tres categorías sencillas: suelo blando, suelo duro y roca, diferenciados por el valor de  $V_{S30}$ . La desviación estándar del modelo se hace independiente de la magnitud.

**Bindi et al. (2011)**

Este modelo presenta un conjunto de ecuaciones de predicción de movimiento fuerte (GMPEs) para la media geométrica de las componentes horizontales y para la vertical, obtenidas a partir de la base de datos de movimiento fuerte de Italia. Las regresiones se realizaron en el rango de magnitud 4.0-6.9 en términos de magnitud momento y distancias Joyner-Boore (o epicentral cuando la geometría de la fuente es desconocida, lo que ocurre generalmente para terremotos de magnitud inferior a 5.5) de hasta 200 km.

La forma funcional es similar a la de Boore y Atkinson (2008). Se predice PGA, PGV o SA (amortiguamiento de 5%) de periodos entre 0.04 y 2 segundos. El término de magnitud es lineal para magnitudes bajas y cuadrático para magnitudes altas. El tipo de suelo se introduce a través de categorías, según las definidas en el Eurocode 8. El modelo incluye diferentes coeficientes para fallas inversas, normales, de desgarre o desconocidas.

La desviación estándar total es alta, lo que corrobora la alta variabilidad del movimiento fuerte cuando se emplean bases de datos regionales con registros correspondientes a sismos de magnitudes bajas.

**Boore y Atkinson (2008)**

Este modelo, como se ha comentado, es uno de los cinco modelos de la primera generación de modelos de la NGA, basados fundamentalmente en datos del oeste de Estados Unidos y zonas corticales afines del resto del mundo. La base de datos del proyecto fue extendida con registros de estaciones no consideradas en el fichero original (correspondientes a los terremotos de Anza, Yorba Linda, Big

Bear City y Parkfield) los cuales sólo fueron utilizados en el primer paso de la regresión (coeficientes de distancia) según sus autores. Tampoco se consideraron en este conjunto las réplicas del terremoto de Taiwan de 1999. El total de registros usados fue de 1.574 correspondientes a 58 terremotos (Abrahamson *et al.* 2008). Las profundidades de los registros van de 2 a 31 km, siendo mayoritarios los de profundidad menor de 20 km. De los cinco modelos NGA, este es uno de los más sencillos a la hora de aplicar en un estudio probabilista por su simplicidad a la hora de modelizar la fuente sísmica (diferencia tres mecanismos: SS-falla de desgarre, PR-falla inversa, NS-falla normal y U para considerar mecanismo desconocido) y la geometría de la falla (distancia  $R_{jb}$ ). El modelo predice valores de PGA, PGV y PSA de periodos entre 0.01 y 10 segundos. Como todos los modelos de la NGA introduce el efecto de suelo a través del valor de  $V_{S30}$ .

Este modelo ha sido considerado en este estudio con las modificaciones publicadas en Atkinson y Boore (2011) para magnitudes bajas.

#### **Cauzzi y Faccioli (2008)**

Modelo desarrollado con 1155 registros digitales y 9 analógicos de 60 terremotos de todo el mundo, de las redes K-Net y Kik-Net de Japón principalmente, completado con datos de California, Italia, Islandia, Turquía e Irán. Da estimaciones para PGA o desplazamiento espectral DRS para periodos entre 0.05 y 20 s, pues está orientado al diseño basado en el desplazamiento y comportamiento de estructuras.

La forma funcional utilizada es sencilla. Usa las categorías de suelo del Eurocode8, diferenciadas en función del valor de  $V_{S30}$ . Asimismo, se distingue entre diferentes tipos de mecanismo falla fuente: normal, inversa y de desgarre, por medio de variables «dummy».

Se tiene especial cuidado en conservar el contenido espectral de largo periodo a la hora de hacer el procesado de los registros.

#### **Cotton *et al.* (2008)**

Trabajo basado en datos japoneses registrados entre 1996 y 2004, de terremotos de magnitud  $M_{JMA}$

superior a 4 (magnitudes convertidas a  $M_w$ ) y profundidades inferiores a 25 km, en el que se analiza en profundidad la variación del movimiento fuerte con la magnitud y la distancia. El modelo está basado en el algoritmo de regresión de Joyner y Boore (1993) que incorpora formas funcionales con términos relativos a la dependencia no lineal con la magnitud. Se predice la PSA en el fondo de pozos (sondeos) y en superficie, obteniéndose coeficientes para un conjunto de frecuencias que van desde 0.30 a 100 Hz. Se diferencian cuatro categorías de suelo, definidas por intervalos de valores de  $V_{S30}$ , para tener en cuenta el efecto local. No se tiene en cuenta el tipo de mecanismo focal.

#### **Youngs *et al.* (1997)**

Modelo para zonas de subducción, obtenido a partir de datos de todo el mundo, ofrece coeficientes para PGA, PGV y SA de periodos que llegan hasta 3 segundos. Diferencia fuentes *in slab* e *interface*, asociadas a fallas inversas y normales, respectivamente. La regresión se hace con 66 y 98 registros obtenidos en campo libre para fuentes *in slab* e *interface*, respectivamente. Destaca la menor tasa de atenuación de movimientos pico obtenida en comparación con las fuentes sísmicas corticales. Tiene en cuenta la profundidad y la desviación estándar depende de la magnitud. Usa categorías de suelo para tener en cuenta el efecto local, en función del espesor de la capa sedimentaria.

#### **Zhao *et al.* (2006)**

Modelo desarrollado con datos de Japón fundamentalmente, que diferencia entre zonas de corteza activa y de subducción (*in slab* e *interface* por separado). Los autores introducen un factor corrector por distancia para fuentes de subducción *in slab* independiente de la magnitud, (no necesario para terremotos corticales y de subducción *interface*). Además, se considera un factor específico para los eventos corticales con mecanismo inverso y un factor corrector por profundidad.

El efecto de sitio se introduce dependiente del periodo ( $T$ ) y usando las categorías establecidas por el NEHRP, que se basan en rangos de valores de  $V_{S30}$ .

El análisis de residuos muestra que éstos no están correlacionados con la magnitud ni con la distancia (especialmente para eventos corticales y de *interface*) incluso en el caso de que los coeficientes de magnitud, expansión geométrica y atenuación anelástica sean los mismos para las diferentes fuentes.

### **Tapia (2006)**

Este es un modelo para la vertiente oeste del Mediterráneo, desarrollado a partir de datos de aceleración de registros de Francia, España, Argelia y Marruecos (una serie de registros de Italia fueron excluidos por presentar diferentes características de atenuación geométrica).

Las magnitudes, consideradas o convertidas a  $M_w$ , se sitúan en el rango 3.8-5.2, con profundida-

des mayoritariamente inferiores a 15 km y con rangos de distancia epicentral entre 6 y 542 km.

El modelo está integrado por una ecuación para la PGA máxima horizontal y una serie de ecuaciones para las aceleraciones espectrales SA para frecuencias entre 0.3 y 25 Hz (Tapia *et al.*, 2007). En su desarrollo no se han hecho consideraciones sobre el tipo de suelo.

Tras el análisis de residuos en el que no se observa tendencia alguna respecto a las unidades del modelo, la autora concluye adoptando un valor del término de profundidad a cortas distancias,  $h_0 = 10$  km, como más adecuado a las características sísmicas y tectónicas del área. Asimismo, para las ecuaciones de las aceleraciones espectrales el coeficiente de expansión geométrica se fija en 1 (expansión esférica) con el fin de reducir los coeficientes del ajuste conjunto. En el caso de la ecuación de PGA, para este coeficiente se obtiene 1.6.



## Mapa de peligrosidad sísmica en términos de intensidad macrosísmica

La obtención de un mapa de peligrosidad sísmica expresado en valores de intensidad, para un periodo de retorno de 500 años, tiene un interés muy concreto, desde el punto de vista legislativo, para la protección civil ante el riesgo sísmico. La Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico (acuerdo del Consejo de Ministros 7/4/1995) y su más reciente modificación (acuerdo del Consejo de Ministros 16/7/2004), establecen la obligación de elaborar planes especiales de emergencia ante el riesgo sísmico, en aquellas comunidades autónomas donde existan áreas con intensidades esperadas mayores o iguales que VI (para periodo de retorno de 500 años) según el mapa de peligrosidad sísmica de España de la Norma de Construcción Sismorresistente en vigor. Además, en aquellas poblaciones donde la intensidad esperada sea mayor o igual que VII (periodo de retorno 500 años), será necesario elaborar catálogos de elementos en riesgo, incluidas construcciones de singular importancia.

Como ya ha sido explicado, este estudio de peligrosidad ha sido realizado utilizando la magnitud para la caracterización de la sismicidad y la aceleración máxima del suelo y la aceleración espectral como parámetros de movimiento. Por ello, para la obtención del mapa de valores de intensidad macrosísmica se ha considerado, como método más adecuado, utilizar correlaciones para la conversión de algunos de estos parámetros a intensidad. Otra posibilidad hubiera sido considerar en la evaluación inicial la intensidad epicentral o máxima, como parámetro de tamaño de los terremotos para caracterizar la sismicidad, con leyes de atenuación de la intensidad para la propagación de los efectos del terremoto a cada punto y entonces utilizar la intensidad

sentida en el emplazamiento, como parámetro de movimiento del suelo para el cálculo de las probabilidades de excedencia. Sin embargo, este camino para la evaluación de la peligrosidad está desaconsejado, principalmente porque al final se hace necesario convertir la intensidad a valores cuantitativos del movimiento del suelo (aceleración y otros parámetros), que deberán ser establecidos en la normativa sismorresistente y por ende aplicables al cálculo de estructuras.

En este anexo se incluye una revisión de las relaciones más actuales entre aceleración máxima del suelo (PGA) e intensidad macrosísmica, y una propuesta de aplicación de las mismas para obtener un mapa de peligrosidad expresado en intensidades.

### V.1. Análisis de relaciones PGA-Intensidad

Tras una recopilación inicial de leyes de conversión entre aceleración máxima del suelo e intensidad, publicadas en distintas épocas, el estudio se ha centrado en algunas de las relaciones más actuales, desarrolladas principalmente, para su aplicación en mapas de sacudida del suelo en tiempo cuasi-real (*shakemaps*). En general, estas relaciones están obtenidas con una mayor cantidad de datos y con técnicas de ajuste más elaboradas que aquellas otras que se utilizaron en el pasado.

Un interesante informe relacionado con esta cuestión es el publicado por Cua *et al.* (2010) dentro del proyecto GEM (*Global Earthquake Model*), donde se analizan algunas de las relaciones publicadas recientemente, señalando las que consideran preferentes. Las relaciones preseleccionadas para

este estudio han sido las de Atkinson y Kaka (2007) [AK07]; Tselentis y Danciu (2008) [TD08]; Faenza y Michelini (2010) [FM10] y Worden *et al.* (2012) [W12]. Todas ellas están desarrolladas para amplios conjuntos de datos, que generalmente contienen los utilizados en desarrollos anteriores en sus respectivas regiones, por otros autores. En la Tabla V. 1 se muestran sus ecuaciones y en la Tabla V. 2 se resumen sus características más destacables.

En cada una de estas relaciones, sus autores han elegido diferentes maneras de tratamiento y ajuste de los datos. Las relaciones desarrolladas en Estados Unidos optan por realizar un ajuste en dos tramos (bilineal), dado que las tendencias de los datos parecen indicar dos pendientes distintas, situándose la zona de cambio entre las intensidades 4 y 6. En ambos casos los datos de intensidad proceden de cuestionarios automáticos vía web que asignan un valor real discreto (en intervalos de 0.1 unidades) a la intensidad, la cual es después promediada para el área de un distrito postal.

En el caso AK07 se realiza un ajuste ordinario de mínimos cuadrados (OLS) de los valores de intensidad (agrupados en intervalos de una unidad de intensidad y de 0.5 unidades alrededor de  $I = 5$ ) frente a los valores promedio del  $\log(PGA)$  asignados a cada nivel de intensidad. Además se incluye una corrección de residuales basada en la distancia y la magnitud con el fin de eliminar diferencias regionales. En el caso W12 se realiza un ajuste de mínimos cuadrados total (TLS) en el que se tiene en cuenta los errores en ambas variables, lo cual permite que la ecuación obtenida sea invertible. Los datos ajustados en este caso corresponden a los valores de intensidad en intervalos de 0.1 unidades y a los valores de movimiento agrupados en 150 intervalos (equiespaciados en escala logarítmica) que cubren seis órdenes de magnitud ( $PGA: 10^{-3}$  a  $10^3$   $cm/s^2$ ), para los que se toma la mediana del intervalo.

En el caso de las relaciones europeas los ajustes tienen una pendiente única. Los datos de intensidad utilizados en TD08 proceden de cuestionarios ma-

TABLA V.1  
Ecuaciones de las relaciones Intensidad vs PGA preseleccionadas

Relación	Ecuación	$\sigma_i$
AK07	$I_{MM} = 2.65 + 1.39 \cdot \log(PGA)$ para $\log(PGA) \leq 1.69$ $I_{MM} = -1.91 + 4.09 \cdot \log(PGA)$ para $\log(PGA) \geq 1.69$	0.89
TD08	$I_{MM} = -0.946 + 3.563 \cdot \log(PGA)$	0.73
FM10	$I_{MCS} = 1.68 + 2.58 \cdot \log(PGA)$	0.35
W12	$I_{MM} = 1.78 + 1.55 \cdot \log(PGA)$ para $\log(PGA) \leq 1.57$ $I_{MM} = -1.60 + 3.70 \cdot \log(PGA)$ para $\log(PGA) > 1.57$	0.73

TABLA V.2  
Principales características de las relaciones Intensidad vs PGA- preseleccionadas

Relación	Tipo rel/ajuste	M	D (km)	I	Tipo I	Región
AK07	bilineal/OLS	2.5-7.4	<618	2-9	MM	California y CENA
TD08	lineal/OLS	4.0-6.9	<141	4-8	MM	Grecia
FM10	lineal/ODR	3.0-6.9	<200	2-8	MCS	Italia
W12	bilineal/TLS	3.0-7.3	<400	2-9	MM	California

crossísmicos recopilados en terremotos registrados en Grecia. El ajuste de los datos en TD08 se realiza por mínimos cuadrados ordinarios (OLS) para valores enteros de intensidad y los valores promedio del  $\log(PGA)$ . En el caso FM10, los datos de intensidad proceden de las bases de datos italianas, resultado de una extensa recopilación de observaciones macrosísmicas. El método de ajuste utilizado, para los valores de intensidad en intervalos de 0.5 unidades y para el promedio del  $\log(PGA)$  correspondiente a cada nivel, ha sido el de mínimos cuadrados ortogonales generalizado (ODR-Orthogonal Distance Regression), con el fin de obtener también una relación invertible.

En todos los casos, la distribución de datos del movimiento para cada grado de intensidad ajusta mejor a una distribución de frecuencias lognormal,

es decir normal para  $\log(PGA)$ . Por ello los ajustes fueron realizados para la media aritmética del  $\log(PGA)$  correspondiente a cada nivel de intensidad, lo cual supone considerar la media geométrica de  $PGA$  para ese nivel.

En la Figura V.1 se muestra una representación gráfica de estas cuatro relaciones. La dispersión existente entre las mismas puede atribuirse a diferentes fuentes de variabilidad, difíciles de cuantificar, entre las que cabría destacar: la variabilidad regional, la asignación subjetiva de intensidad, diferencias entre escalas de intensidad, incertidumbre aleatoria debida a conjuntos de datos incompletos, diferentes aproximaciones en la preparación de los pares intensidad-movimiento (distancias, valores asignados), método de regresión, etc.

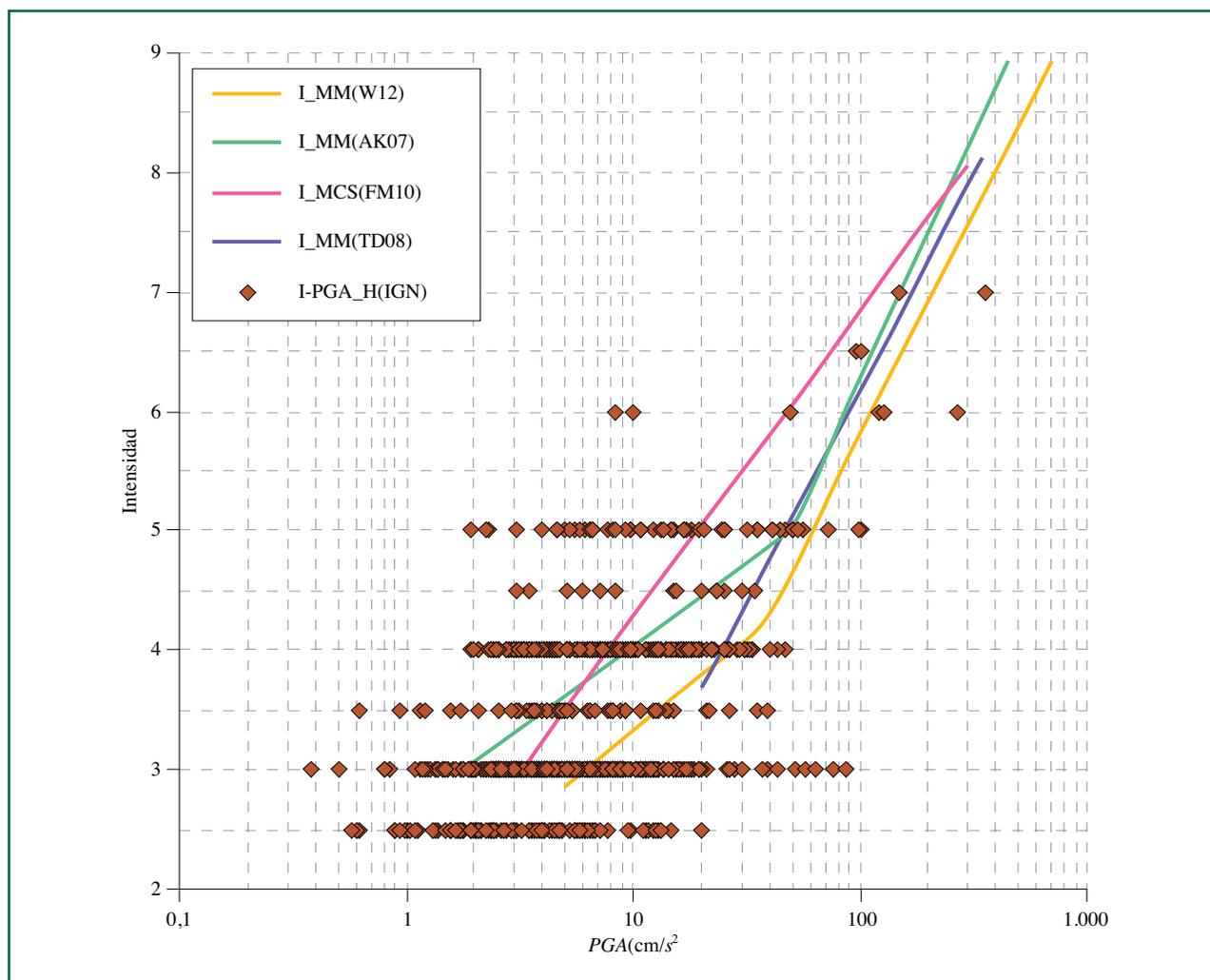


Figura V.1. Relaciones analizadas y datos I-PGA de la base de datos del IGN

En cuanto a las diferentes escalas de intensidad utilizadas, algunos autores (Faccioli y Cauzzi 2006, Musson *et al.*, 2010) minimizan el problema proponiendo una práctica equivalencia entre las distintas escalas MM, MCS y EMS-98, si bien los últimos advierten sobre la no conveniencia de conversión entre diferentes escalas si no es estrictamente necesario y que sus análisis están basados en las definiciones dadas para los distintos grados de intensidad y no en la comparación de datos empíricos.

## V.2. Selección de relaciones PGA-Intensidad

Para la selección final de las relaciones a utilizar, se ha considerado en primer lugar un análisis de residuos a partir de un conjunto de datos Intensidad-*PGA* obtenido de las bases de datos del IGN. Este conjunto no es suficientemente extenso como para desarrollar una nueva relación intensidad-aceleración, pero sí para chequear en parte el comportamiento de las relaciones estudiadas. Los datos obtenidos pertenecen a terremotos ocurridos en España, para los que se tienen registros de aceleración y asignación de valores de intensidad en la localidad de la estación acelerométrica. Las magnitudes de este conjunto están comprendidas entre 2.0 y 6.2, las distancias entre 1 y 629 km y el rango de intensidad EMS98 se sitúa entre II y VII. Los datos *PGA* corresponden a las dos componentes horizontales. En la Figura V.1 se representan estos datos junto con las relaciones anteriores preseleccionadas.

Para cada nivel de intensidad, los residuos entre las observaciones y los valores estimados, normalizados por la desviación estándar de cada uno de los modelos, se muestran en la Figura V.2. Se muestra también el valor medio de los residuos de cada nivel.

El análisis gráfico de estos residuos, indica en primer lugar que existe una notable dispersión en estas relaciones. En general, para una intensidad dada, la aceleración máxima (*PGA*) abarca un amplio rango de valores, en algunos casos extendiéndose a más de un orden de magnitud.

De las relaciones consideradas, los residuos de W12 y TD08 muestran que los valores observados de intensidad son en general mayores que los predichos por estas relaciones. Los residuos de las relaciones AK07 y FM10 muestran una mejor distribución en

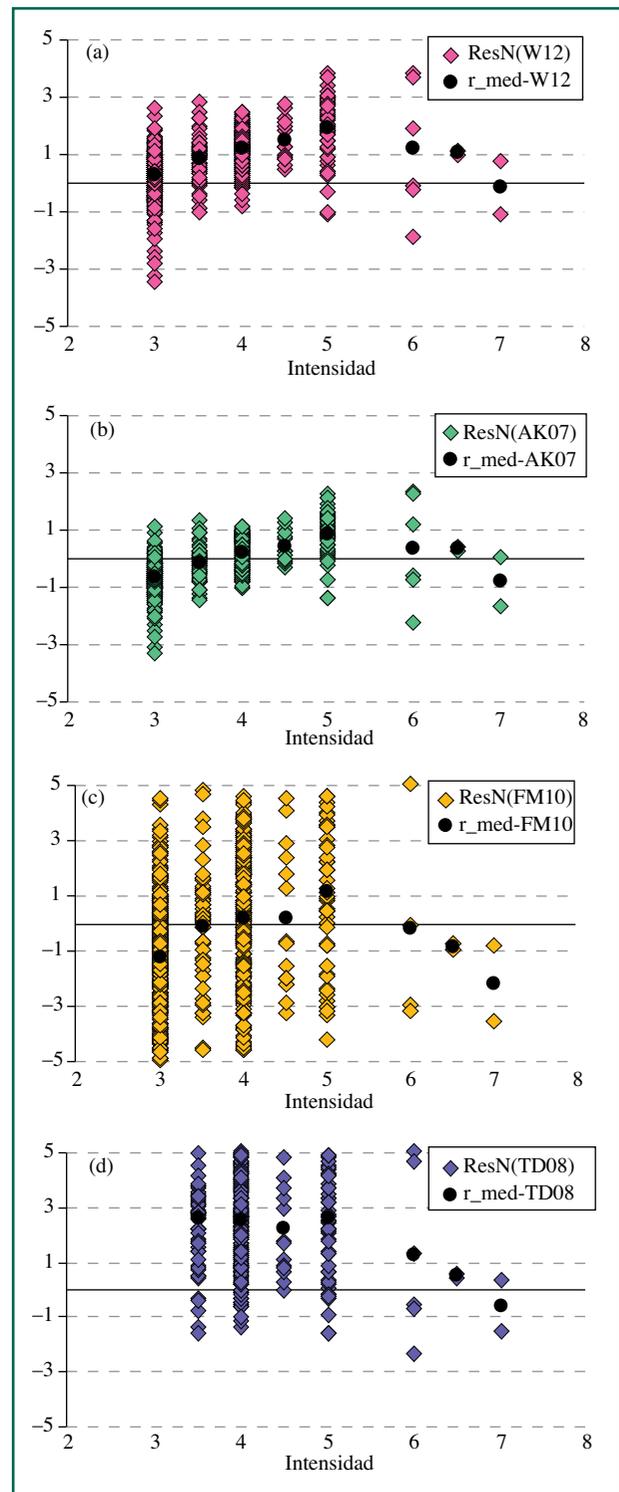


Figura V. 2. Residuos (valor observado – valor predicho) normalizados por la desviación estándar de cada modelo, para el conjunto de datos IGN: (a) Worden *et al.* (2012), (b) Atkinson y Kaka (2007), (c) Faenza y Michelini (2010), (d) Tselentis y Daciu (2008).

torno al valor cero, como puede verse también en los valores medios de los mismos, lo que indicaría que la predicción se aproxima mejor a los valores observados. No obstante, la relación FM10 presenta una alta dispersión respecto a los datos IGN analizados, mientras que esta dispersión es menor para la relación AK07.

El análisis anterior se ha repetido para el agregado de datos formado por los datos IGN más los datos italianos obtenidos de la publicación de Faenza y Michelini (2010). El conjunto total de datos y las relaciones se muestran ahora en la Figura V.3.

El nuevo análisis de residuos muestra ahora resultados muy similares a los anteriores, para las

cuatro relaciones, con algo más de completitud en los grados más altos. Las relaciones W12 y TD08 con residuos en general mayores que cero tienden a subestimar los valores observados. Los residuos de AK07 y FM10, aunque con una alta dispersión esta última debido a la normalización, tienen menos tendencia, y son en promedio más próximos a cero. En la Figura V.4 se muestran los residuos correspondientes a estas dos últimas para el conjunto agregado de datos.

Por tanto este análisis indicaría que las relaciones AK07 y FM10 serían las más adecuadas para realizar la conversión de valores PGA a intensidad y éstas han sido las finalmente seleccionadas.

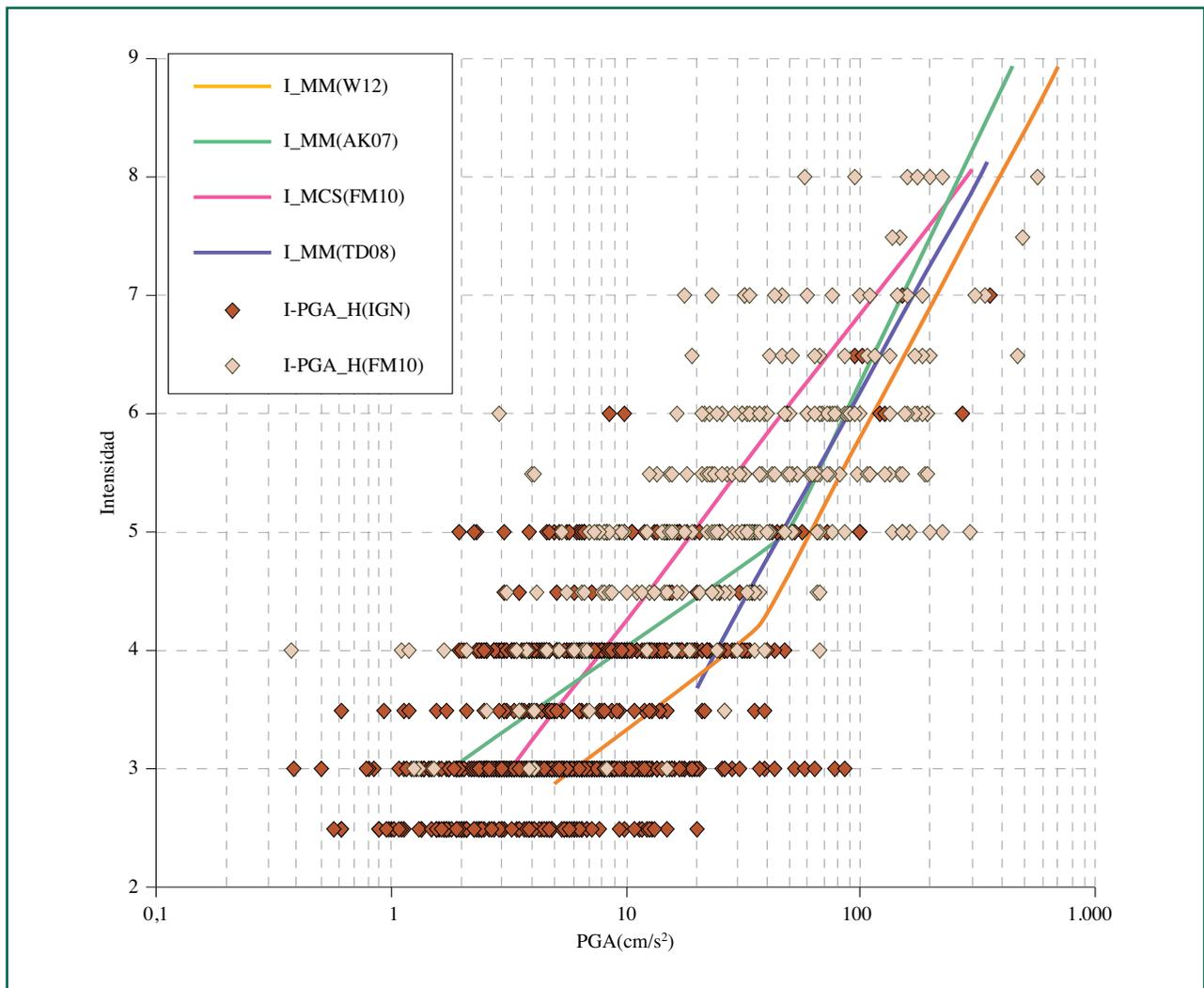


Figura V.3. Relaciones analizadas y datos I-PGA del IGN y de Italia (obtenidos de Faenza y Michelini, 2010).

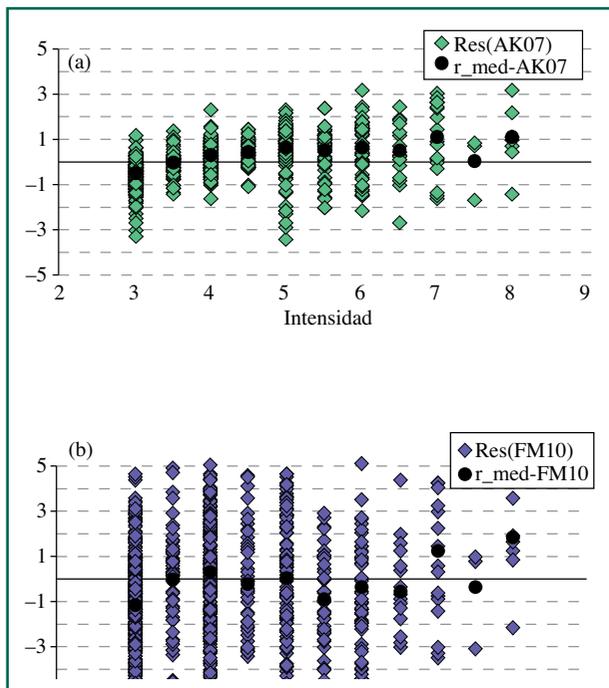


Figura V. 4.- Residuos (valor observado – valor predicho) normalizados por la desviación estándar de cada modelo, para el conjunto de datos agregado IGN y FM10: (a) Atkinson y Kaka (2007), (b) Faenza y Michelini (2010).

### V.3. Resultados en intensidad convertida

Dada la incertidumbre epistemológica que conlleva este proceso, parece razonable la combinación de más de un modelo emulando un esquema de árbol lógico. Finalmente se ha considerado que una propuesta adecuada para este mapa en intensidades, convertido a partir de valores PGA, es la obtenida a partir de una combinación lineal con pesos iguales

de las relaciones AK07 y FM10. Esta combinación ha sido aplicada para cada valor de PGA obtenido en la malla original de cálculo (para el periodo de retorno de 475 años). Después estos valores han sido interpolados y agrupados en contornos en los cuales la intensidad obtenida (considerada como una variable continua), ha sido redondeada al valor entero de intensidad más próximo. A modo de ejemplo, la superficie o contorno de intensidad VI corresponde a los valores comprendidos entre 5.50 y 6.49.

En la Tabla V. 3 se indican los valores mínimos de PGA a partir de los cuales se incrementa en una unidad la intensidad estimada, al utilizar la combinación de relaciones AK07 y FM10 con igual peso. Los resultados obtenidos se muestran en el mapa de la Figura V.5.

TABLA V.3

*Valores mínimos de PGA a partir de los cuales se obtiene un incremento de una unidad en Intensidad para la combinación de relaciones AK07 y FM10*

$I = 0.5 \cdot AK07 + 0.5 \cdot FM10$	
PGA(g)	I (EMS98)_conv.
$\geq 0.005$	4
$\geq 0.015$	5
$\geq 0.049$	6
$\geq 0.098$	7
$\geq 0.196$	8
$\geq 0.392$	9

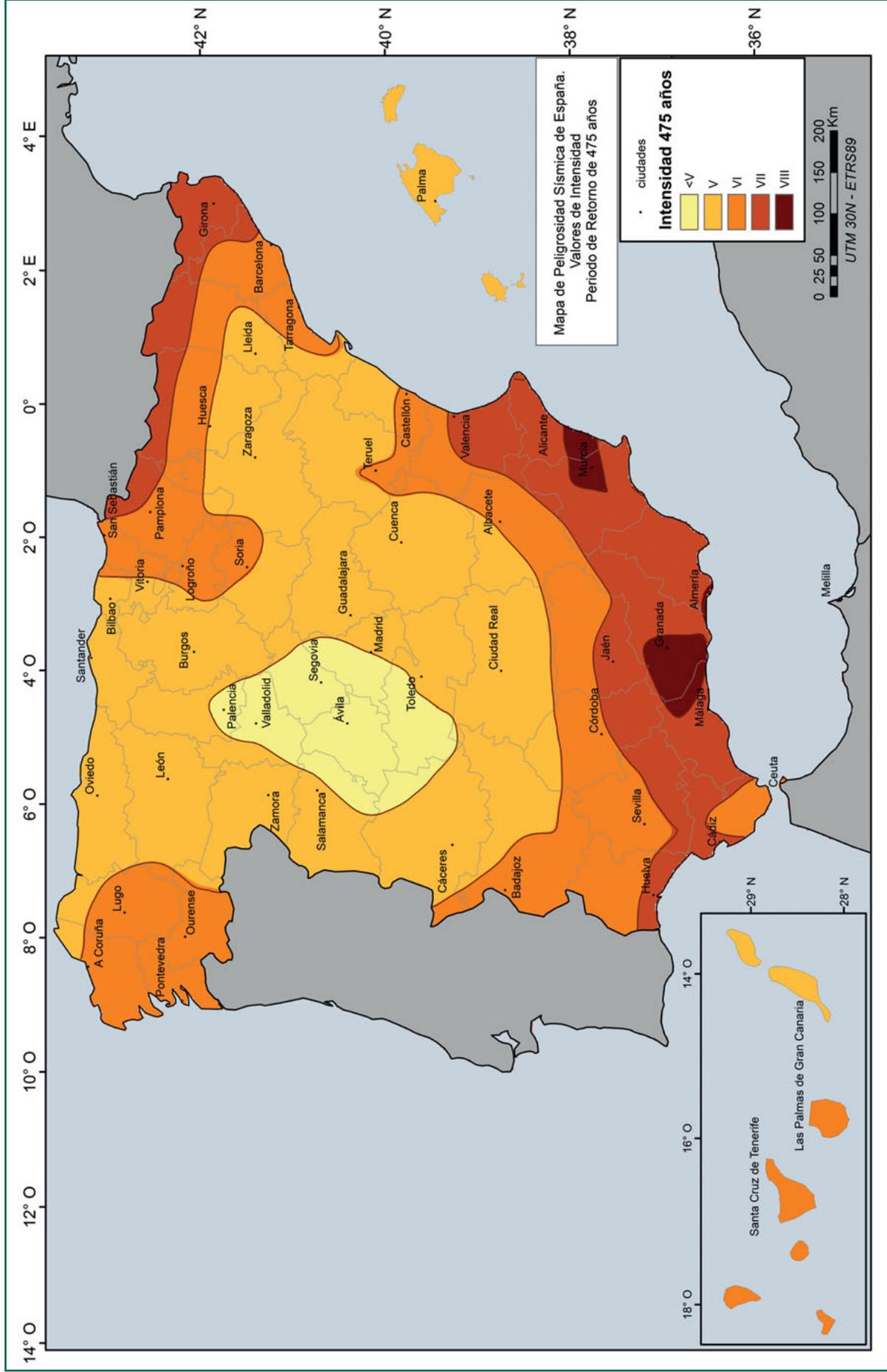


Figura V. 5.- Mapa de peligrosidad en intensidad EMS98 (convertida a partir de valores PGA) para TR = 475.



# Resultados obtenidos y análisis relacionados con la norma sismorresistente NCSE-02

## VI.1. INTRODUCCIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio de peligrosidad no son directamente comparables con el mapa de peligrosidad sísmica adoptado en la norma sismorresistente actualmente vigente NCSE-02 (RD 997/2002, de 27 de septiembre). En esta norma el mapa define la peligrosidad del territorio, para un periodo de retorno de 500 años, a partir del valor de aceleración sísmica básica  $a_b$ , y el coeficiente de contribución  $K$ .

La aceleración sísmica básica  $a_b$  fue definida como una aceleración característica en la superficie del terreno para suelos tipo II (roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros). Obtenido este valor  $a_b$  a partir del mapa de peligrosidad citado, la aceleración de cálculo,  $a_c$ , con la que se construye el espectro elástico de diseño que representará la acción sísmica para cualquier tipo de terreno, se define como:

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b$$

donde  $S$  es el coeficiente de amplificación del terreno y  $\rho$  es el llamado factor de riesgo o de importancia. En este caso, el suelo tipo II es el que se toma como referencia por lo que su coeficiente  $S$  varía entre 1.04 (aceleraciones bajas) y 1.0.

El nuevo mapa de peligrosidad de España que se ha obtenido es en realidad una colección de mapas para distintos parámetros, aceleración pico y aceleraciones espectrales —PGA y  $SA(T_i)$ — calculados para varias probabilidades de excedencia o periodos de retorno.

No es una cuestión trivial comparar los resultados de PGA, para un periodo de retorno de 475 años ( $T_R = 475$ ), obtenidos en este estudio con los valores de aceleración básica  $a_b$  que se obtuvieron en el mapa de 2002. La diferencia de procedimientos y datos en ambos casos hace que no sea sencillo establecer un factor único que relacione ambas aceleraciones. Hay que tener en cuenta que la aceleración sísmica básica procede del cálculo de peligrosidad realizado en intensidad macrosísmica y de su posterior conversión a valores de aceleración del terreno mediante una correlación específica intensidad-aceleración. Las fuentes sísmicas, las leyes de atenuación y también los periodos de tiempo utilizados en ese trabajo son diferentes a los utilizados en el mapa actual, como se ha explicado en esta memoria.

El mapa de peligrosidad obtenido en este estudio para PGA ( $T_R = 475$ ) corresponde a la aceleración máxima horizontal de un suelo rígido o roca. Este parámetro podría ser utilizado como aceleración de referencia, en ese tipo de terreno (tipo I), respecto al que definir la acción sísmica de los otros tipos de suelo. En ese caso, siguiendo la NCSE-02, además de sustituir la aceleración básica por esta nueva aceleración de referencia, sería necesario reformular los coeficientes  $S$  de amplificación del terreno. Esta utilización estaría de acuerdo con las recomendaciones del Eurocódigo 8, en su versión actual, para la definición de la acción sísmica. A continuación se detalla cómo se llevarían a cabo estos ajustes.

En todo caso, conviene tener en cuenta que la próxima actualización de la normativa por la Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes, tendrá que revisar las definiciones de aceleración de

cálculo (o de referencia), espectros de respuesta elástica (incluyendo la posibilidad de considerar las nuevas ordenadas espectrales calculadas), el factor de contribución  $K$ , etc., por lo que será esta Comisión quien determine la utilización definitiva de los parámetros obtenidos en el presente estudio de peligrosidad.

## VI.2. CÁLCULO DE LA ACCIÓN SÍSMICA DEFINIDA EN LA NORMA NCSE-02, HACIENDO USO DEL NUEVO MAPA DE PELIGROSIDAD

La Norma NCSE-02 en su apartado 1.2.1 recoge lo siguiente:

*El proyectista o director de obra podrá adoptar, bajo su responsabilidad, criterios distintos a los que se establecen en esta Norma, siempre que el nivel de seguridad y de servicio de la construcción no sea inferior al fijado por la Norma, debiéndolo reflejar en el proyecto.*

Esto posibilita, con los límites especificados en el artículo anterior, hacer uso del nuevo mapa de peligrosidad, PGA ( $T_R = 475$ ), para el cálculo de las acciones sísmicas. En efecto, nada se opone, e incluso es recomendable, que en los cálculos con las normas NCSE-02 y NCSP-07 se sustituya la aceleración sísmica básica dada para el emplazamiento de la construcción en estas normas, por la correspondiente aceleración máxima del suelo dada por el nuevo mapa, siempre que el valor de la aceleración sísmica de cálculo,  $a_c$ , resulte superior, ya que con ello se habrá incrementado la seguridad.

La aceleración de referencia está dada en la NCSE-02 y NCSP-07 por la ya mencionada acele-

ración sísmica básica  $a_b$  (NCSE-02, art. 2.1). Esta aceleración de referencia condiciona, en función de su valor, del coeficiente de riesgo  $\rho$  y del coeficiente del terreno  $C$ , el coeficiente de amplificación del terreno  $S$ , con el que se determina la aceleración de cálculo (definida en NCSE-02, art 2.2). Debido a que el nuevo mapa modifica sustancialmente la aceleración de referencia, la cual se corresponde ahora con la máxima del suelo en terreno tipo I, es necesario, consecuentemente, modificar también el coeficiente  $S$ .

Por tanto, en el caso de tomar como aceleración de referencia la PGA ( $T_R = 475$ ) obtenida en el nuevo mapa, referenciada a un suelo tipo I, el nuevo coeficiente de amplificación del terreno  $S$  a aplicar vendrá dado —siguiendo el mismo criterio de la NCSE— por los siguientes valores:

Para  $\rho \cdot a_r \leq 0.1g$

$$S = C$$

Para  $0.1g < \rho \cdot a_r < 0.4$

$$S = 1 + 3.33 (1 - C) [(\rho \cdot a_r/g) - 0.4]$$

Para  $0.4 g \leq \rho \cdot a_r$

$$S = 1.0$$

Siendo:

- $C$  el coeficiente de terreno, dependiente de las características geotécnicas del terreno de cimentación (NCSE-02, art. 2.4).
- $a_r$  la nueva aceleración de referencia PGA ( $T_R = 475$ ).

**VI.3. VALORES DE PGA (TR = 475) MAYORES O IGUALES QUE 0.04 g, OBTENIDOS EN EL ESTUDIO, PARA LAS CAPITALES DE LOS TÉRMINOS MUNICIPALES**

PROVINCIA DE ÁLAVA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Alegría-Dulantzi	0.05	Laudio/Llodio	0.04
Amurrio	0.04	Arraia-Maeztu	0.05
Aramaio	0.05	Moreda de Álava/Moreda Araba	0.06
Artziniega	0.04	Navaridas	0.05
Armiñón	0.04	Okondo	0.04
Arrazua-Ubarrundia	0.05	Oyón-Oion	0.06
Asparrena	0.06	Peñacerrada-Urizaharra	0.05
Ayala/Aiara	0.04	Erriberagoitia/Ribera Alta	0.04
Baños de Ebro/Mañueta	0.05	Ribera Baja/Erribera Beitia	0.04
Barrundia	0.05	Añana	0.04
Berantevilla	0.04	Salvatierra/Agurain	0.06
Bernedo	0.05	Samaniego	0.05
Campezo/Kanpezu	0.06	San Millán/Donemiliaga	0.06
Zigoitia	0.05	Urkabustaiz	0.04
Kripan	0.05	Valdegovía/Gaubea	0.04
Kuartango	0.04	Harana/Valle de Arana	0.06
Elburgo/Burgelu	0.05	Villabuena de Álava/Eskuernaga	0.05
Elciego	0.05	Legutio	0.05
Elvillar/Bilar	0.05	Vitoria-Gasteiz	0.05
Iruraiz-Gauna	0.05	Yécora/Lekora	0.06
Labastida/Bastida	0.04	Zalduondo	0.06
Lagrán	0.05	Zambrana	0.04
Laguardia	0.05	Zuia	0.04
Lanciego/Lantziego	0.06	Iruña Oka/Iruña de Oca	0.04
Lapuebla de Labarca	0.06	Lantarón	0.04
Leza	0.05		

PROVINCIA DE ALBACETE			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Abengibre	0.06	Elche de la Sierra	0.07
Alatoz	0.07	Férez	0.08
Albacete	0.05	Fuensanta	0.04
Albatana	0.10	Fuente-Álamo	0.10
Alborea	0.06	Fuentealbilla	0.05
Alcadozo	0.07	La Gineta	0.04
Alcalá del Júcar	0.06	Golosalvo	0.05
Alcaraz	0.05	Hellín	0.09
Almansa	0.11	La Herrera	0.04
Alpera	0.09	Higueruela	0.08
Ayna	0.07	Hoya-Gonzalo	0.07
Balazote	0.05	Jorquera	0.06
Balsa de Ves	0.08	Letur	0.08
El Balletero	0.04	Lezuza	0.04
Barrax	0.04	Liétor	0.07
Bienservida	0.05	Madrigueras	0.05
Bogarra	0.06	Mahora	0.05
Bonete	0.09	Masegoso	0.05
El Bonillo	0.04	Molinicos	0.06
Carcelén	0.08	Montalvos	0.04
Casas de Juan Núñez	0.06	Montealegre del Castillo	0.10
Casas de Lázaro	0.05	Motilleja	0.05
Casas de Ves	0.07	Munera	0.04
Casas-Ibáñez	0.06	Navas de Jorquera	0.05
Caudete	0.15	Nerpio	0.09
Cenizate	0.05	Ontur	0.10
Corral-Rubio	0.09	Paterna del Madera	0.06
Cotillas	0.06	Peñascosa	0.05
Chinchilla de Monte-Aragón	0.06	Peñas de San Pedro	0.06

PROVINCIA DE ALBACETE			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Pétrola	0.08	Tarazona de la Mancha	0.04
Povedilla	0.04	Tobarra	0.09
Pozo Cañada	0.07	Valdeganga	0.05
Pozohondo	0.07	Vianos	0.05
Pozo-Lorente	0.06	Villa de Ves	0.08
Pozuelo	0.05	Villalgordo del Júcar	0.04
La Recueja	0.06	Villamalea	0.05
Riópar	0.06	Villapalacios	0.05
Robledo	0.04	Villatoya	0.06
La Roda	0.04	Villavaliante	0.06
Salobre	0.05	Villaverde de Guadalimar	0.06
San Pedro	0.05	Viveros	0.04
Socovos	0.09	Yeste	0.07

PROVINCIA DE ALICANTE			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Adsubia	0.15	Benimantell	0.15
Agost	0.17	Benimarfull	0.16
Agres	0.16	Benimassot	0.16
Aigües	0.16	Benimeli	0.15
Albatera	0.21	Benissa	0.14
Alcalalí	0.15	Benitachell/el Poble Nou de Benitatxell	0.14
Alcocer de Planes	0.16	Biar	0.16
Alcoleja	0.16	Bigastro	0.23
Alcoy/Alcoi	0.16	Bolulla	0.15
Alfafara	0.16	Busot	0.16
L'Alfàs del Pi	0.15	Calp	0.14
Algorfa	0.23	Callosa d'En Sarrià	0.15
Algueña	0.18	Callosa de Segura	0.22
/Alicante/Alacant	0.18	El Campello	0.16
Almoradí	0.22	Campo de Mirra/el Camp de Mirra	0.16
Almudaina	0.16	Cañada	0.16
L'Alqueria d'Asnar	0.16	Castalla	0.16
Altea	0.14	Castell de Castells	0.15
Aspe	0.18	Catral	0.22
Balones	0.16	Cocentaina	0.16
Banyeres de Mariola	0.16	Confrides	0.15
Benasau	0.16	Cox	0.22
Beneixama	0.16	Crevillent	0.20
Benejúzar	0.23	Quatretondeta	0.16
Benferri	0.21	Daya Nueva	0.22
Beniarbeig	0.14	Daya Vieja	0.22
Beniardá	0.15	Dénia	0.14
Beniarrés	0.16	Dolores	0.22
Benigembla	0.15	Elche/Elx	0.20
Benidoleig	0.14	Elda	0.17
Benidorm	0.15	Facheca	0.15
Benifallim	0.16	Famorca	0.15
Benifato	0.15	Finestrat	0.15
Benijófar	0.22	Formentera del Segura	0.22
Benilloba	0.16	Gata de Gorgos	0.14
Benillup	0.16	Gaianes	0.16

PROVINCIA DE ALICANTE			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Gorga	0.16	El Ràfol d'Almúnia	0.15
Granja de Rocamora	0.21	Redován	0.22
El Castell de Guadalest	0.15	Relleu	0.15
Guardamar del Segura	0.22	Rojales	0.22
El Fondó de les Neus/Hondón de las Nieves	0.18	La Romana	0.18
Hondón de los Frailes	0.19	Sagra	0.15
Ibi	0.16	Salinas	0.16
Jacarilla	0.23	Sanet y Negrals	0.14
Xaló	0.14	San Fulgencio	0.22
Jávea/Xàbia	0.14	Sant Joan d'Alacant	0.17
Jijona/Xixona	0.16	San Miguel de Salinas	0.22
Lorcha/L'Orxa	0.15	Santa Pola	0.22
Llíber	0.14	San Vicente del Raspeig/ Sant Vicent del Raspeig	0.17
Millena	0.16	Sax	0.16
Monforte del Cid	0.18	Sella	0.15
Monóvar/Monòver	0.17	Senija	0.14
Mutxamel	0.17	Tàrbena	0.15
Murla	0.15	Teulada	0.14
Muro de Alcoy	0.16	Tibi	0.16
Novelda	0.17	Tollos	0.16
La Nucia	0.15	Tormos	0.15
Ondara	0.14	Torremanzanas/La Torre de les Maçanes	0.16
Onil	0.16	Torrevieja	0.2
Orba	0.15	La Vall d'Alcalà	0.15
Orxeta	0.15	La Vall d'Ebo	0.15
Orihuela	0.22	Vall de Gallinera	0.15
Parcent	0.15	La Vall de Laguar	0.15
Pedreguer	0.14	El Verger	0.14
Pego	0.15	Villajoyosa/La Vila Joiosa	0.15
Penàguila	0.16	Villena	0.16
Petrer	0.16	Els Poblets	0.14
El Pinós/Pinoso	0.17	Pilar de la Horadada	0.17
Planes	0.16	Los Montesinos	0.22
Polop	0.15	San Isidro	0.21
Rafal	0.22		

PROVINCIA DE ASTURIAS			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Boal	0.04	Pesoz	0.04
Castropol	0.04	San Martín de Oscos	0.04
Coaña	0.04	Santa Eulalia de Oscos	0.04
Degaña	0.04	San Tirso de Abres	0.04
El Franco	0.04	Tapia de Casariego	0.04
Grandas de Salime	0.04	Taramundi	0.04
Ibias	0.05	Vegadeo	0.04
Illano	0.04	Villanueva de Oscos	0.04
Navia	0.04	Villayón	0.04

PROVINCIA DE ALMERÍA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Abla	0.15	Cantoria	0.16
Abrucena	0.15	Carboneras	0.17
Adra	0.19	Castro de Filabres	0.15
Albánchez	0.16	Cóbdar	0.16
Alboloduy	0.17	Cuevas del Almanzora	0.19
Albox	0.17	Chercos	0.15
Alcolea	0.17	Chirivel	0.15
Alcóntar	0.15	Dalías	0.19
Alcudia de Monteagud	0.15	El Ejido	0.19
Alhabia	0.18	Enix	0.19
Alhama de Almería	0.18	Felix	0.19
Alicún	0.18	Fines	0.16
Almería	0.19	Fiñana	0.14
Almócita	0.17	Fondón	0.17
Alsodux	0.18	Gádor	0.18
Antas	0.18	Los Gallardos	0.18
Arboleas	0.17	Garrucha	0.18
Armuña de Almanzora	0.16	Gérgal	0.16
Bacares	0.15	Huécija	0.18
Bayárcal	0.15	Huércal de Almería	0.19
Bayarque	0.16	Huércal-Overa	0.18
Bédar	0.17	Illar	0.18
Beires	0.17	Instinción	0.18
Benahadux	0.19	Laroya	0.16
Benitagla	0.15	Láujar de Andarax	0.16
Benizalón	0.15	Líjar	0.16
Bentarique	0.18	Lubrín	0.16
Berja	0.19	Lucainena de las Torres	0.18
Canjáyar	0.17	Lúcar	0.16

PROVINCIA DE ALMERÍA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Macael	0.16	Serón	0.16
María	0.15	Sierro	0.16
Mojácar	0.18	Somontín	0.16
La Mojonera	0.19	Sorbás	0.17
Nacimiento	0.16	Suflí	0.16
Níjar	0.19	Tabernas	0.17
Ohanes	0.16	Taberno	0.17
Olula de Castro	0.15	Tahal	0.15
Olula del Río	0.16	Terque	0.18
Oria	0.16	Tíjola	0.16
Padules	0.17	Las Tres Villas	0.15
Partaloa	0.17	Turre	0.18
Paterna del Río	0.16	Turrillas	0.18
Pechina	0.19	Uleila del Campo	0.16
Pulpí	0.18	Urrácal	0.16
Purchena	0.16	Veleftique	0.15
Rágol	0.18	Vélez-Blanco	0.15
Rioja	0.19	Vélez-Rubio	0.16
Roquetas de Mar	0.19	Vera	0.19
Santa Cruz de Marchena	0.17	Viator	0.19
Santa Fe de Mondújar	0.18	Vícar	0.19
Senés	0.15	Zurgena	0.17

PROVINCIA DE BADAJOZ			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Aceuchal	0.05	La Codosera	0.06
Ahillones	0.05	Cordobilla de Lácara	0.04
Alange	0.05	Corte de Peleas	0.06
La Albuera	0.06	Cristina	0.04
Alburquerque	0.05	Cheles	0.07
Alconchel	0.07	Don Álvaro	0.05
Alconera	0.05	Don Benito	0.04
Aljucén	0.04	Entrín Bajo	0.06
Almendral	0.06	Esparragalejo	0.05
Almendralejo	0.05	Esparragosa de la Serena	0.04
Arroyo de San Serván	0.05	Feria	0.06
Atalaya	0.05	Fregenal de la Sierra	0.06
Azuaga	0.05	Fuente de Cantos	0.05
Badajoz	0.06	Fuente del Arco	0.05
Barcarrota	0.06	Fuente del Maestre	0.05
Benquerencia de la Serena	0.04	Fuentes de León	0.06
Berlanga	0.05	La Garrovilla	0.05
Bienvenida	0.05	Granja de Torrehermosa	0.05
Bodonal de la Sierra	0.06	Guadiana del Caudillo	0.05
Burguillos del Cerro	0.06	Guareña	0.04
Cabeza la Vaca	0.06	La Haba	0.04
Calamonte	0.05	Higuera de la Serena	0.04
Calera de León	0.06	Higuera de Llerena	0.05
Calzadilla de los Barros	0.05	Higuera de Vargas	0.06
Campillo de Llerena	0.04	Higuera la Real	0.06
Carmonita	0.04	Hinojosa del Valle	0.05
El Carrascalejo	0.04	Hornachos	0.05
Casas de Reina	0.05	Jerez de los Caballeros	0.06
Castuera	0.04	La Lapa	0.06

PROVINCIA DE BADAJOZ			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Lobón	0.05	Puebla del Prior	0.05
Llera	0.05	Puebla de Obando	0.04
Llerena	0.05	Puebla de Sancho Pérez	0.05
Magacela	0.04	Pueblonuevo del Guadiana	0.05
Maguilla	0.05	Quintana de la Serena	0.04
Malcocinado	0.05	Reina	0.05
Malpartida de la Serena	0.04	Rena	0.04
Manchita	0.04	Retamal de Llerena	0.04
Medellín	0.04	Ribera del Fresno	0.05
Medina de las Torres	0.05	La Roca de la Sierra	0.05
Mengabril	0.04	Salvaleón	0.06
Mérida	0.05	Salvatierra de los Barros	0.06
Mirandilla	0.04	San Pedro de Mérida	0.04
Monesterio	0.06	Santa Amalia	0.04
Montemolín	0.05	Santa Marta	0.06
Monterrubio de la Serena	0.04	Los Santos de Maimona	0.05
Montijo	0.05	San Vicente de Alcántara	0.05
La Morera	0.06	Segura de León	0.06
La Nava de Santiago	0.04	Solana de los Barros	0.05
Nogales	0.06	Talavera la Real	0.05
Oliva de la Frontera	0.06	Táliga	0.06
Oliva de Mérida	0.04	Torre de Miguel Sesmero	0.06
Olivenza	0.07	Torremayor	0.05
Palomas	0.05	Torremejía	0.05
La Parra	0.06	Trasierra	0.05
Peraleda del Zaucejo	0.04	Trujillanos	0.04
Puebla de la Calzada	0.05	Usagre	0.05
Puebla de la Reina	0.05	Valdetorres	0.04
Puebla del Maestre	0.05	Valencia de las Torres	0.05

<b>PROVINCIA DE BADAJOZ</b>			
<b>Municipio</b>	<b>PGA (<math>T_R = 475</math>)</b>	<b>Municipio</b>	<b>PGA (<math>T_R = 475</math>)</b>
Valencia del Mombuey	0.07	Villagonzalo	0.04
Valencia del Ventoso	0.06	Villalba de los Barros	0.05
Valverde de Burguillos	0.06	Villanueva de la Serena	0.04
Valverde de Leganés	0.06	Villanueva del Fresno	0.07
Valverde de Llerena	0.05	Villar del Rey	0.05
Valverde de Mérida	0.04	Villar de Rena	0.04
Valle de la Serena	0.04	Zafra	0.05
Valle de Matamoros	0.06	Zahínos	0.06
Valle de Santa Ana	0.06	Zalamea de la Serena	0.04
Villafranca de los Barros	0.05	La Zarza	0.05
Villagarcía de la Torre	0.05	Valdelacalzada	0.05

PROVINCIA DE BALEARES			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Alaró	0.05	Manacor	0.04
Alaior	0.04	Mancor de la Vall	0.04
Alcúdia	0.04	Maria de la Salut	0.04
Algaida	0.05	Marratxí	0.05
Andratx	0.04	Es Mercadal	0.04
Ariany	0.05	Es Migjorn Gran	0.04
Artà	0.04	Montuïri	0.05
Banyalbufar	0.04	Muro	0.04
Binissalem	0.05	Palma de Mallorca	0.04
Búger	0.04	Petra	0.05
Bunyola	0.04	Pollença	0.04
Calvià	0.04	Porreres	0.04
Campanet	0.04	Sa Pobla	0.04
Campos	0.04	Puigpunyent	0.04
Capdepera	0.04	Sant Antoni de Portmany	0.04
Es Castell	0.04	Sencelles	0.05
Ciutadella de Menorca	0.04	Sant Josep de sa Talaia	0.04
Consell	0.05	Sant Joan	0.05
Costitx	0.05	Sant Joan de Labritja	0.04
Deyá	0.04	Sant Llorenç des Cardassar	0.04
Escorca	0.04	Sant Lluís	0.04
Esporles	0.04	Santa Eugènia	0.05
Estellencs	0.04	Santa Eulalia del Ríu	0.04
Felanitx	0.04	Santa Margalida	0.04
Ferrerías	0.04	Santa María del Camí	0.05
Formentera	0.04	Santanyí	0.04
Fornalutx	0.04	Selva	0.04
Eivissa	0.04	Ses Salines	0.04
Inca	0.05	Sineu	0.05
Lloret de Vistalegre	0.05	Sóller	0.04
Lloseta	0.05	Son Servera	0.04
Llubí	0.04	Valldemossa	0.04
Llucmajor	0.04	Vilafranca de Bonany	0.04
Maó	0.04		

PROVINCIA DE BARCELONA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Abrera	0.08	Cabrera d'Anoia	0.07
Aguilar de Segarra	0.06	Cabrera de Mar	0.10
Alella	0.10	Cabrils	0.10
Alpens	0.10	Calaf	0.05
L'Ametlla del Vallès	0.10	Caldes d'Estrac	0.10
Arenys de Mar	0.11	Caldes de Montbui	0.10
Arenys de Munt	0.11	Calders	0.08
Argençola	0.05	Calella	0.11
Argentona	0.10	Calonge de Segarra	0.05
Artés	0.07	Calldetenes	0.10
Avià	0.08	Callús	0.06
Avinyó	0.07	Campins	0.11
Avinyonet del Penedès	0.07	Canet de Mar	0.11
Aiguafreda	0.10	Canovelles	0.10
Badalona	0.09	Cànoves i Samalús	0.10
Badia del Vallès	0.09	Canyelles	0.07
Bagà	0.12	Capellades	0.07
Balenyà	0.09	Capolat	0.08
Balsareny	0.07	Cardedeu	0.10
Barberà del Vallès	0.09	Cardona	0.06
Barcelona	0.09	Carme	0.06
Begues	0.07	Casserres	0.07
Bellprat	0.06	Castellar del Riu	0.09
Berga	0.09	Castellar del Vallès	0.09
Bigues i Riells	0.10	Castellar de n'Hug	0.13
Borredà	0.10	Castellbell i el Vilar	0.07
El Bruc	0.07	Castellbisbal	0.08
El Brull	0.10	Castellcir	0.09
Les Cabanyes	0.07	Castelldefels	0.07

PROVINCIA DE BARCELONA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Castell de l' Areny	0.10	Font-rubí	0.07
Castellet i la Gornal	0.07	Les Franqueses del Vallès	0.10
Castellfollit del Boix	0.06	Gallifa	0.09
Castellfollit de Riubregós	0.05	La Garriga	0.10
Castellgalí	0.07	Gavà	0.08
Castellnou de Bages	0.07	Gaià	0.07
Castellolí	0.07	Gelida	0.08
Castellterçol	0.09	Gironella	0.08
Castellví de la Marca	0.07	Gisclareny	0.11
Castellví de Rosanes	0.08	La Granada	0.07
Centelles	0.09	Granera	0.09
Cercs	0.09	Granollers	0.10
Cervelló	0.08	Gualba	0.11
Collbató	0.08	Sant Salvador de Guardiola	0.07
Collsuspina	0.09	Guardiola de Berguedà	0.11
Copons	0.06	Gurb	0.09
Corbera de Llobregat	0.08	L'Hospitalet de Llobregat	0.08
Cornellà de Llobregat	0.08	Igualada	0.06
Cubelles	0.07	Jorba	0.06
Dosrius	0.10	La Llacuna	0.06
Esparreguera	0.08	La Llagosta	0.09
Esplugues de Llobregat	0.08	Llinars del Vallès	0.10
L'Espunyola	0.08	Lliçà d'Amunt	0.10
L'Estany	0.08	Lliçà de Vall	0.10
Fígols	0.10	Lluçà	0.09
Fogars de Montclús	0.11	Malgrat de Mar	0.11
Fogars de la Selva	0.12	Malla	0.09
Folgueroles	0.10	Manlleu	0.10
Fonollosa	0.06	Manresa	0.07

PROVINCIA DE BARCELONA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Marganell	0.07	La Nou de Berguedà	0.10
Martorell	0.08	Òdena	0.06
Martorelles	0.10	Olvan	0.08
Les Masies de Roda	0.10	Olèrdola	0.07
Les Masies de Voltregà	0.10	Olesa de Bonesvalls	0.07
El Masnou	0.10	Olesa de Montserrat	0.08
Masquefa	0.07	Olivella	0.07
Matadepera	0.09	Olost	0.09
Mataró	0.10	Orís	0.10
Mediona	0.07	Oristà	0.08
Molins de Rei	0.08	Orpí	0.06
Mollet del Vallès	0.10	Òrrius	0.10
Montcada i Reixac	0.09	Pacs del Penedès	0.07
Montgat	0.09	Palafolls	0.11
Monistrol de Montserrat	0.07	Palau-solità i Plegamans	0.10
Monistrol de Calders	0.08	Pallejà	0.08
Muntanyola	0.09	La Palma de Cervelló	0.08
Montclar	0.07	El Papiol	0.08
Montesquiu	0.11	Parets del Vallès	0.10
Montmajor	0.07	Perafita	0.09
Montmaneu	0.05	Piera	0.07
Figaró-Montmany	0.10	Els Hostalets de Pierola	0.07
Montmeló	0.10	Pineda de Mar	0.11
Montornès del Vallès	0.10	El Pla del Penedès	0.07
Montseny	0.11	La Pobla de Claramunt	0.07
Moià	0.08	La Pobla de Lillet	0.12
Mura	0.08	Polinyà	0.09
Navarces	0.07	El Pont de Vilomara i Rocafort	0.07
Navàs	0.07	Pontons	0.06

PROVINCIA DE BARCELONA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
El Prat de Llobregat	0.08	Sant Bartomeu del Grau	0.09
Els Prats de Rei	0.06	Sant Boi de Llobregat	0.08
Prats de Lluçanès	0.08	Sant Boi de Lluçanès	0.10
Premià de Dalt	0.10	Sant Celoni	0.11
Premià de Mar	0.10	Sant Cebrià de Vallalta	0.11
Puigdàlber	0.07	Sant Climent de Llobregat	0.08
Puig-reig	0.07	Sant Cugat del Vallès	0.09
Pujalt	0.05	Sant Cugat Sescarrigues	0.07
La Quar	0.09	Sant Esteve de Palautordera	0.11
Rajadell	0.06	Sant Esteve Sesrovires	0.08
Rellinars	0.08	Sant Fost de Campsentelles	0.10
Ripollet	0.09	Sant Feliu de Codines	0.09
La Roca del Vallès	0.10	Sant Feliu de Llobregat	0.08
Rupit i Pruit	0.12	Sant Feliu Sasserra	0.08
Roda de Ter	0.10	Sant Fruitós de Bages	0.07
Rubí	0.09	Vilassar de Dalt	0.10
Rubió	0.06	Sant Hipòlit de Voltregà	0.10
Sabadell	0.09	Sant Jaume de Frontanyà	0.11
Sagàs	0.09	Sant Joan Despí	0.08
Sant Pere Sallavinera	0.06	Sant Joan de Vilatorrada	0.07
Saldes	0.11	Sant Julià de Cerdanyola	0.11
Sallent	0.07	Sant Julià de Vilatorrada	0.10
Santpedor	0.07	Sant Just Desvern	0.08
Sant Iscle de Vallalta	0.11	Sant Llorenç d'Hortons	0.08
Sant Adrià de Besòs	0.09	Sant Llorenç Savall	0.09
Sant Agustí de Lluçanès	0.10	Sant Martí de Centelles	0.09
Sant Andreu de la Barca	0.08	Sant Martí d'Albars	0.09
Sant Andreu de Llavaneres	0.10	Sant Martí de Tous	0.06
Sant Antoni de Vilamajor	0.10	Sant Martí Sarroca	0.07

PROVINCIA DE BARCELONA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Sant Martí Sesgueioles	0.05	Santa Perpètua de Mogoda	0.09
Sant Mateu de Bages	0.06	Santa Susanna	0.11
Sant Pere de Ribes	0.07	Sant Vicenç de Castellet	0.07
Sant Pere de Riudebitlles	0.07	Sant Vicenç dels Horts	0.08
Sant Pere de Torelló	0.11	Sant Vicenç de Montalt	0.10
Sant Pere de Vilamajor	0.10	Sant Vicenç de Torelló	0.11
Sant Pol de Mar	0.11	Cerdanyola del Vallès	0.09
Sant Quintí de Mediona	0.07	Sentmenat	0.09
Sant Quirze de Besora	0.11	Seva	0.10
Sant Quirze del Vallès	0.09	Sitges	0.07
Sant Quirze Safaja	0.09	Sobremunt	0.10
Sant Sadurní d'Anoia	0.07	Sora	0.11
Sant Sadurní d'Osormort	0.11	Subirats	0.07
Santa Cecília de Voltregà	0.10	Súria	0.06
Santa Coloma de Cervelló	0.08	Tavèrnoles	0.10
Santa Coloma de Gramenet	0.09	Tagamanent	0.10
Santa Eugènia de Berga	0.10	Talamanca	0.08
Santa Eulàlia de Riuprimer	0.09	Taradell	0.10
Santa Eulàlia de Ronçana	0.10	Terrassa	0.09
Santa Fe del Penedès	0.07	Tavertet	0.11
Santa Margarida de Montbui	0.06	Teià	0.10
Santa Margarida i els Monjos	0.07	Tiana	0.09
Santa Maria de Besora	0.12	Tona	0.09
Santa Maria de Corcó	0.11	Tordera	0.12
Santa Maria de Merlès	0.08	Torelló	0.10
Santa Maria de Martorelles	0.10	La Torre de Claramunt	0.07
Santa Maria de Miralles	0.06	Torrelavit	0.07
Santa Maria d'Oló	0.08	Torrelles de Foix	0.07
Santa Maria de Palautordera	0.11	Torrelles de Llobregat	0.08

PROVINCIA DE BARCELONA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Ullastrell	0.08	Viladecans	0.08
Vacarisses	0.08	Vilanova del Camí	0.06
Vallbona d'Anoia	0.07	Vilanova de Sau	0.11
Vallcebre	0.10	Vilassar de Mar	0.10
Vallgorguina	0.11	Vilobí del Penedès	0.07
Vallirana	0.08	Vilafranca del Penedès	0.07
Vallromanes	0.10	Vilalba Sasserra	0.11
Veciana	0.05	Vilanova i la Geltrú	0.07
Vic	0.10	Viver i Serrateix	0.07
Vilada	0.10	Vilanova del Vallès	0.10
Viladecavalls	0.08		

PROVINCIA DE BURGOS			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Altable	0.04	Contreras	0.04
Ameyugo	0.04	Coruña del Conde	0.04
Arandilla	0.04	Covarrubias	0.04
Arauzo de Miel	0.04	Cubo de Bureba	0.04
Arauzo de Salce	0.04	Cuevas de San Clemente	0.04
Arauzo de Torre	0.04	Encío	0.04
Arlanzón	0.04	Espinosa de Cervera	0.04
Barbadillo de Herreros	0.04	Espinosa del Camino	0.04
Barbadillo del Mercado	0.04	Fresneda de la Sierra Tirón	0.04
Barbadillo del Pez	0.04	Fresneña	0.04
Bascuñana	0.04	Fresno de Río Tirón	0.04
Belorado	0.04	La Gallega	0.04
Berberana	0.04	Hacinas	0.04
Bozoó	0.04	Hontoria del Pinar	0.04
Brazacorta	0.04	Hortigüela	0.04
Bugedo	0.04	Huerta de Arriba	0.04
Cabezón de la Sierra	0.04	Huerta de Rey	0.04
Caleruega	0.04	Ibrillos	0.04
Campolara	0.04	Jaramillo de la Fuente	0.04
Canicosa de la Sierra	0.04	Jaramillo Quemado	0.04
Carazo	0.04	Junta de Traslaloma	0.04
Carrias	0.04	Junta de Villalba de Losa	0.04
Cascajares de la Sierra	0.04	Jurisdicción de Lara	0.04
Castildelgado	0.04	Jurisdicción de San Zadornil	0.04
Castrillo de la Reina	0.04	Mambrillas de Lara	0.04
Cerezo de Río Tirón	0.04	Mamolar	0.04
Cerratón de Juarros	0.04	Mecerreyes	0.04
Ciruelos de Cervera	0.04	Miranda de Ebro	0.04
Condado de Treviño	0.05	Miraveche	0.04

PROVINCIA DE BURGOS			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Monasterio de la Sierra	0.04	Santa Gadea del Cid	0.04
Moncalvillo	0.04	Santa María Rivarredonda	0.04
Monterrubio de la Demanda	0.04	Santibáñez del Val	0.04
Neila	0.05	Santo Domingo de Silos	0.04
Palacios de la Sierra	0.04	San Vicente del Valle	0.04
Palazuelos de la Sierra	0.04	Tejada	0.04
Pancorbo	0.04	Tinieblas de la Sierra	0.04
Pineda de la Sierra	0.04	Torrelara	0.04
Pinilla de los Barruecos	0.04	Tosantos	0.04
Pinilla de los Moros	0.04	Valmala	0.04
Pradoluengo	0.04	Vallarta de Bureba	0.04
La Puebla de Arganzón	0.04	Valle de Mena	0.04
Puentedura	0.04	Valle de Oca	0.04
Quintanar de la Sierra	0.04	Valle de Tobalina	0.04
Quintanilla del Coco	0.04	Valle de Valdelaguna	0.04
Quintanilla San García	0.04	Valluércanes	0.04
Rabanera del Pinar	0.04	Viloria de Rioja	0.04
Rábanos	0.04	Vilviestre del Pinar	0.04
Redecilla del Camino	0.04	Villaespasa	0.04
Redecilla del Campo	0.04	Villafranca Montes de Oca	0.04
Regumiel de la Sierra	0.04	Villagalijo	0.04
Retuerta	0.04	Villambistia	0.04
La Revilla y Ahedo	0.04	Villamiel de la Sierra	0.04
Revilla del Campo	0.04	Villanueva de Carazo	0.04
Riocavado de la Sierra	0.04	Villanueva de Teba	0.04
Salas de los Infantes	0.04	Villasur de Herreros	0.04
San Adrián de Juarros	0.04	Villoruebo	0.04
San Millán de Lara	0.04	Vizcaínos	0.04
Santa Cruz del Valle Urbión	0.04	Valle de Losa	0.04

PROVINCIA DE CÁCERES			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Acebo	0.04	Miajadas	0.04
Acehúche	0.04	Montánchez	0.04
Alagón del Río	0.05	Moraleja	0.04
Albalá	0.04	Navas del Madroño	0.04
Alcántara	0.04	Perales del Puerto	0.04
Alcuéscar	0.04	Pescueza	0.04
Aldea del Cano	0.04	Piedras Albas	0.04
Aliseda	0.04	Plasenzuela	0.04
Almoharín	0.04	Portaje	0.04
Arroyo de la Luz	0.04	Portezuelo	0.04
Arroyomolinos	0.04	Robledillo de Trujillo	0.04
Benquerencia	0.04	Ruanes	0.04
Botija	0.04	Salorino	0.05
Brozas	0.04	Salvatierra de Santiago	0.04
Cáceres	0.04	San Martín de Trevejo	0.04
Cachorrilla	0.04	Santa Ana	0.04
Carbajo	0.05	Santiago de Alcántara	0.05
Casar de Cáceres	0.04	Santiago del Campo	0.04
Casas de Don Antonio	0.04	Sierra de Fuentes	0.04
Casas de Don Gómez	0.04	Torre de Santa María	0.04
Casillas de Coria	0.04	Torremocha	0.04
Ceclavín	0.04	Torreorgaz	0.04
Cedillo	0.06	Torrequemada	0.04
Cilleros	0.04	Valdefuentes	0.04
Eljas	0.04	Valdemorales	0.04
Escurial	0.04	Valencia de Alcántara	0.05
Garrovillas de Alconétar	0.04	Valverde del Fresno	0.04
Herrera de Alcántara	0.05	Villa del Rey	0.04
Herreruela	0.04	Villamesías	0.04
Hoyos	0.04	Villamiel	0.04
Huélaga	0.04	Zarza de Montánchez	0.04
Malpartida de Cáceres	0.04	Zarza la Mayor	0.04
Mata de Alcántara	0.04	Vegaviana	0.05
Membrío	0.05		

PROVINCIA DE CÁDIZ			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Alcalá de los Gazules	0.09	Medina-Sidonia	0.09
Alcalá del Valle	0.14	Olvera	0.14
Algar	0.11	Paterna de Rivera	0.09
Algeciras	0.09	Prado del Rey	0.13
Algodonales	0.14	El Puerto de Santa María	0.10
Arcos de la Frontera	0.10	Puerto Real	0.10
Barbate	0.09	Puerto Serrano	0.12
Los Barrios	0.09	Rota	0.11
Benaocaz	0.14	San Fernando	0.10
Bornos	0.11	Sanlúcar de Barrameda	0.11
El Bosque	0.13	San Roque	0.10
Cádiz	0.11	Setenil de las Bodegas	0.15
Castellar de la Frontera	0.10	Tarifa	0.09
Conil de la Frontera	0.09	Torre Alháuquime	0.14
Chiclana de la Frontera	0.10	Trebujena	0.10
Chipiona	0.11	Ubrique	0.13
Espera	0.11	Vejer de la Frontera	0.09
El Gastor	0.14	Villaluenga del Rosario	0.14
Grazalema	0.14	Villamartín	0.12
Jerez de la Frontera	0.10	Zahara	0.14
Jimena de la Frontera	0.10	Benalup-Casas Viejas	0.09
La Línea de la Concepción	0.10	San José del Valle	0.09

PROVINCIA DE CANTABRIA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Castro-Urdiales	0.04	Valle de Villaverde	0.04
Guriezo	0.04		

PROVINCIA DE CASTELLÓN DE LA PLANA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Atzeneta del Maestrat	0.05	Borriana/Burriana	0.06
Aín	0.06	Cabanes	0.05
Albocàsser	0.04	Càlig	0.04
Alcalà de Xivert	0.04	Canet lo Roig	0.04
L'Alcora	0.05	Castell de Cabres	0.04
Alcudia de Veo	0.06	Castellfort	0.04
Alfondeguilla	0.06	Castellново	0.06
Algimia de Almonacid	0.06	Castellón de la Plana/Castelló de la Plana	0.05
Almazora/Almassora	0.05	Castillo de Villamalefa	0.05
Almedíjar	0.06	Catí	0.04
Almenara	0.07	Caudiel	0.06
Alquerías del Niño Perdido	0.06	Cervera del Maestre	0.04
Altura	0.06	Cinctorres	0.04
Arañuel	0.05	Cirat	0.05
Ares del Maestrat	0.04	Cortes de Arenoso	0.05
Argelita	0.05	Costur	0.05
Artana	0.06	Les Coves de Vinromà	0.04
Ayódar	0.05	Culla	0.04
Azuébar	0.06	Chert/Xert	0.04
Barracas	0.05	Chilches/Xilxes	0.06
Betxí	0.06	Chodos/Xodos	0.05
Bejís	0.06	Chóvar	0.06
Benafer	0.06	Eslida	0.06
Benafigos	0.04	Espadilla	0.05
Benasal	0.04	Fanzara	0.05
Benicarló	0.04	Figueroles	0.05
Benicasim/Benicàssim	0.05	Forcall	0.04
Benlloch	0.05	Fuente la Reina	0.05
Borriol	0.05	Fuentes de Ayódar	0.05

PROVINCIA DE CASTELLÓN DE LA PLANA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Gaibiel	0.06	Rosell	0.04
Geldo	0.06	Sacañet	0.06
Herbés	0.04	La Salzadella	0.04
Higueras	0.05	Sant Joan de Moró	0.05
La Jana	0.04	Sant Jordi/San Jorge	0.05
Jérica	0.06	Sant Mateu	0.04
Lucena del Cid	0.05	San Rafael del Río	0.05
Ludiente	0.05	Santa Magdalena de Pulpis	0.04
La Llosa	0.07	Sarratella	0.04
La Mata de Morella	0.04	Segorbe	0.06
Matet	0.06	Sierra Engarcerán	0.04
Moncofa	0.06	Soneja	0.06
Montán	0.05	Sot de Ferrer	0.06
Montanejos	0.05	Sueras/Suera	0.06
Morella	0.04	Tales	0.06
Navajas	0.06	Teresa	0.06
Nules	0.06	Tírig	0.04
Olocau del Rey	0.04	Todolella	0.04
Onda	0.05	Toga	0.05
Oropesa del Mar/Orpesa	0.05	Torás	0.06
Palanques	0.04	El Toro	0.05
Pavías	0.05	Torralba del Pinar	0.05
Peñíscola/Peñíscola	0.04	Torreblanca	0.04
Pina de Montalgrao	0.05	Torrechiva	0.05
Portell de Morella	0.04	La Torre d'En Besora	0.04
Puebla de Arenoso	0.05	La Torre d'en Doménec	0.04
La Pobla de Benifassà	0.04	Traiguera	0.04
La Pobla Tornesa	0.05	Useras/Les Useres	0.05
Ribesalbes	0.05	Vallat	0.05

PROVINCIA DE CASTELLÓN DE LA PLANA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Vall d'Alba	0.05	Vilar de Canes	0.04
Vall de Almonacid	0.06	Vila-real	0.05
La Vall d'Uixó	0.06	La Vilavella	0.06
Vallibona	0.04	Villores	0.04
Vilafamés	0.05	Vinaròs	0.05
Villafranca del Cid/Vilafranca	0.04	Vistabella del Maestrazgo	0.04
Villahermosa del Río	0.05	Viver	0.06
Villamalur	0.05	Zorita del Maestrazgo	0.04
Vilanova d'Alcolea	0.05	Zucaina	0.05
Villanueva de Viver	0.05		

PROVINCIA DE CIUDAD REAL			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Albaladejo	0.04	Santa Cruz de los Cáñamos	0.04
Alcubillas	0.04	Santa Cruz de Mudela	0.04
Almedina	0.04	Solana del Pino	0.05
Almuradiel	0.04	Terrinches	0.04
Castellar de Santiago	0.04	Torre de Juan Abad	0.04
Cózar	0.04	Torrenueva	0.04
Fuencaliente	0.05	Villahermosa	0.04
Fuenllana	0.04	Villamanrique	0.05
Mestanza	0.04	Villanueva de la Fuente	0.04
Montiel	0.04	Villanueva de los Infantes	0.04
Puebla del Príncipe	0.05	Viso del Marqués	0.04
San Lorenzo de Calatrava	0.05		

PROVINCIA DE CÓRDOBA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Adamuz	0.08	Fuente Palmera	0.09
Aguilar de la Frontera	0.12	Fuente-Tójar	0.13
Alcaracejos	0.05	La Granjuela	0.04
Almedinilla	0.15	Guadalcázar	0.10
Almodóvar del Río	0.09	El Guijo	0.04
Añora	0.05	Hinojosa del Duque	0.04
Baena	0.12	Hornachuelos	0.08
Belalcázar	0.04	Iznájar	0.19
Belmez	0.05	Lucena	0.13
Benamejí	0.16	Luque	0.12
Los Blázquez	0.04	Montalbán de Córdoba	0.11
Bujalance	0.10	Montemayor	0.11
Cabra	0.13	Montilla	0.11
Cañete de las Torres	0.10	Montoro	0.09
Carcabuey	0.14	Monturque	0.12
Cardeña	0.06	Moriles	0.12
La Carlota	0.10	Nueva Carteya	0.12
El Carpio	0.09	Obejo	0.06
Castro del Río	0.11	Palenciana	0.16
Conquista	0.05	Palma del Río	0.09
Córdoba	0.09	Pedro Abad	0.09
Doña Mencía	0.12	Pedroche	0.04
Dos Torres	0.04	Peñarroya-Pueblonuevo	0.05
Encinas Reales	0.16	Posadas	0.09
Espejo	0.11	Pozoblanco	0.05
Espiel	0.06	Priego de Córdoba	0.14
Fernán-Núñez	0.11	Puente Genil	0.12
Fuente la Lancha	0.04	La Rambla	0.11
Fuente Obejuna	0.05	Rute	0.16

PROVINCIA DE CÓRDOBA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
San Sebastián de los Ballesteros	0.10	Villaharta	0.06
Santaella	0.11	Villanueva de Córdoba	0.05
Santa Eufemia	0.04	Villanueva del Duque	0.05
Torrecampo	0.04	Villanueva del Rey	0.05
Valenzuela	0.11	Villaralto	0.04
Valsequillo	0.04	Villaviciosa de Córdoba	0.06
La Victoria	0.10	El Viso	0.04
Villa del Río	0.09	Zuheros	0.13
Villafranca de Córdoba	0.09		

PROVINCIA DE LA CORUÑA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Abegondo	0.05	Coristanco	0.05
Ames	0.06	A Coruña	0.05
Aranga	0.05	Culleredo	0.05
Ares	0.05	Curtis	0.05
Arteixo	0.05	Dodro	0.06
Arzúa	0.06	Dumbría	0.05
A Baña	0.06	Fene	0.05
Bergondo	0.05	Ferrol	0.05
Betanzos	0.05	Fisterra	0.05
Boimorto	0.06	Frades	0.06
Boiro	0.06	Irixoa	0.05
Boqueixón	0.06	Laxe	0.05
Brión	0.06	A Laracha	0.05
Cabana de Bergantiños	0.05	Lousame	0.06
Cabanas	0.05	Malpica de Bergantiños	0.05
Camariñas	0.05	Mañón	0.04
Cambre	0.05	Mazaricos	0.05
A Capela	0.05	Melide	0.06
Carballo	0.05	Mesía	0.05
Cariño	0.04	Miño	0.05
Carnota	0.05	Moeche	0.05
Carral	0.05	Monfero	0.05
Cedeira	0.04	Mugardos	0.05
Cee	0.05	Muxía	0.05
Cerceda	0.05	Muros	0.06
Cerdido	0.04	Narón	0.05
Cesuras	0.05	Neda	0.05
Coirós	0.05	Negreira	0.06
Corcubión	0.05	Noia	0.06

PROVINCIA DE LA CORUÑA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Oleiros	0.05	San Sadurniño	0.05
Ordes	0.05	Santa Comba	0.05
Oroso	0.06	Santiago de Compostela	0.06
Ortigueira	0.04	Santiso	0.06
Outes	0.06	Sobrado	0.06
Oza dos Ríos	0.05	As Somozas	0.05
Paderne	0.05	Teo	0.06
Padrón	0.06	Toques	0.06
O Pino	0.06	Tordoia	0.05
A Pobra do Caramiñal	0.06	Touro	0.06
Ponteceso	0.05	Trazo	0.06
Pontedeume	0.05	Valdoviño	0.04
As Pontes de García Rodríguez	0.05	Val do Dubra	0.05
Porto do Son	0.06	Vedra	0.06
Rianxo	0.07	Vilasantar	0.05
Ribeira	0.07	Vilarmaior	0.05
Rois	0.06	Vimianzo	0.05
Sada	0.05	Zas	0.05

PROVINCIA DE CUENCA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Alcalá de la Vega	0.05	Garaballa	0.05
Algarra	0.05	Graja de Campalbo	0.05
Aliaguilla	0.05	Graja de Iniesta	0.04
Almodóvar del Pinar	0.04	Henarejos	0.05
Arcos de la Sierra	0.04	El Herrumblar	0.05
Arguisuelas	0.04	Huélamo	0.04
Beamud	0.04	Huérquina	0.05
Beteta	0.04	Huerta del Marquesado	0.04
Boniches	0.04	Iniesta	0.04
Buenache de la Sierra	0.04	Laguna del Marquesado	0.04
Campillo de Altobuey	0.04	Lagunaseca	0.04
Campillos-Paravientos	0.05	Landete	0.05
Campillos-Sierra	0.04	Ledaña	0.05
Cañada del Hoyo	0.04	Las Majadas	0.04
Cañete	0.04	Mariana	0.04
Carboneras de Guadazaón	0.04	Masegosa	0.04
Cardenete	0.04	Minglanilla	0.05
Casas de Benítez	0.04	Mira	0.05
Casas de Garcimolina	0.05	Monteagudo de las Salinas	0.04
Casasimarro	0.04	Motilla del Palancar	0.04
Castillejo de Iniesta	0.04	Moya	0.05
Castillejo-Sierra	0.04	Narboneta	0.05
La Cierva	0.04	Pajarón	0.04
Cueva del Hierro	0.04	Pajaroncillo	0.04
Enguárdanos	0.04	Palomera	0.04
Fresneda de la Sierra	0.04	Paracuellos	0.04
Fuenteespino de Moya	0.05	El Peral	0.04
Fuertescusa	0.04	La Pesquera	0.05
Gabaldón	0.04	El Picazo	0.04

PROVINCIA DE CUENCA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Portilla	0.04	Valdemeca	0.04
Poyatos	0.04	Valdemorillo de la Sierra	0.04
Pozorrubielos de la Mancha	0.04	Valdemoro-Sierra	0.04
Puebla del Salvador	0.04	Valhermoso de la Fuente	0.04
Quintanar del Rey	0.04	Valsalobre	0.04
Reíllo	0.04	Vega del Codorno	0.04
Salinas del Manzano	0.05	Villagarcía del Llano	0.04
Salvacañete	0.05	Villalba de la Sierra	0.04
San Martín de Boniches	0.04	Villalpardo	0.05
Santa Cruz de Moya	0.05	Villanueva de la Jara	0.04
Santa María del Val	0.04	Villar del Humo	0.04
Solera de Gabaldón	0.04	Villarta	0.05
Sotorribas	0.04	Víllora	0.04
Talayuelas	0.05	Yémeda	0.04
Tejadillos	0.05	Zafrilla	0.05
Tragacete	0.04	Zarzuela	0.04
Uña	0.04		

PROVINCIA DE GERONA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Agullana	0.12	Cabanelles	0.12
Aiguaviva	0.12	Cadaqués	0.11
Albanyà	0.12	Caldes de Malavella	0.12
Albons	0.11	Calonge	0.11
El Far d'Empordà	0.12	Camós	0.12
Alp	0.13	Campdevàdol	0.13
Amer	0.12	Campelles	0.14
Anglès	0.12	Campllong	0.12
Arbúcies	0.11	Camprodon	0.14
Argelaguer	0.13	Canet d'Adri	0.12
L'Armentera	0.11	Cantallops	0.12
Avinyonet de Puigventós	0.12	Capmany	0.12
Begur	0.11	Queralbs	0.14
Banyoles	0.12	Cassà de la Selva	0.12
Bàscara	0.12	Castellfollit de la Roca	0.13
Bellcaire d'Empordà	0.11	Castelló d'Empúries	0.11
Besalú	0.12	Castell-Platja d'Aro	0.11
Bescanó	0.12	Celrà	0.12
Beuda	0.12	Cervià de Ter	0.12
La Bisbal d'Empordà	0.11	Cistella	0.12
Biure	0.12	Siurana	0.12
Blanes	0.12	Colera	0.11
Bolvir	0.14	Colomers	0.12
Bordils	0.12	Cornellà del Terri	0.12
Borrassà	0.12	Corçà	0.11
Breda	0.11	Crespìà	0.12
Brunyola	0.12	Cruïlles, Monells i Sant Sadurní de l'Heura	0.11
Boadella i les Escaules	0.12	Darnius	0.12
Cabanes	0.12	Das	0.13

PROVINCIA DE GERONA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
L'Escala	0.11	Llanars	0.14
Espinelves	0.11	Llançà	0.11
Espolla	0.12	Llers	0.12
Esponellà	0.12	Llívia	0.14
Figueres	0.12	Lloret de Mar	0.12
Flaçà	0.12	Les Llosses	0.11
Foixà	0.12	Madremanya	0.12
Fontanals de Cerdanya	0.14	Maià de Montcal	0.12
Fontanilles	0.11	Meranges	0.14
Fontcoberta	0.12	Masarac	0.12
Forallac	0.11	Massanes	0.12
Fornells de la Selva	0.12	Maçanet de Cabrenys	0.12
Fortià	0.11	Maçanet de la Selva	0.12
Garrigàs	0.12	Mieres	0.13
Garrigoles	0.12	Mollet de Peralada	0.12
Garriguella	0.11	Molló	0.14
Ger	0.14	Montagut i Oix	0.13
Girona	0.12	Mont-ras	0.11
Gombrèn	0.13	Navata	0.12
Gualta	0.11	Ogassa	0.14
Guils de Cerdanya	0.14	Olot	0.13
Hostalric	0.12	Ordis	0.12
Isòvol	0.13	Osor	0.12
Jafre	0.12	Palafrugell	0.11
La Jonquera	0.12	Palamós	0.11
Juià	0.12	Palau de Santa Eulàlia	0.12
Lladó	0.12	Palau-saverdera	0.11
Llagostera	0.12	Palau-sator	0.11
Llambilles	0.12	Palol de Revardit	0.12

PROVINCIA DE GERONA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Pals	0.11	Salt	0.12
Pardines	0.14	Sant Andreu Salou	0.12
Parlavà	0.11	Sant Climent Sescebes	0.12
Pau	0.11	Sant Feliu de Buixalleu	0.12
Pedret i Marzà	0.11	Sant Feliu de Guíxols	0.11
La Pera	0.12	Sant Feliu de Pallerols	0.12
Peralada	0.11	Sant Ferriol	0.13
Les Planes d'Hostoles	0.12	Sant Gregori	0.12
Planoles	0.14	Sant Hilari Sacalm	0.11
Pont de Molins	0.12	Sant Jaume de Llierca	0.13
Pontós	0.12	Sant Jordi Desvalls	0.12
Porqueres	0.12	Sant Joan de les Abadesses	0.13
Portbou	0.11	Sant Joan de Mollet	0.12
Les Preses	0.13	Sant Julià del Llor i Bonmatí	0.12
El Port de la Selva	0.11	Sant Julià de Ramis	0.12
Puigcerdà	0.14	Sant Llorenç de la Muga	0.12
Quart	0.12	Sant Martí de Llémena	0.12
Rabós	0.11	Sant Martí Vell	0.12
Regencós	0.11	Sant Miquel de Campmajor	0.12
Ribes de Freser	0.14	Sant Miquel de Fluvià	0.12
Riells i Viabrea	0.11	Sant Mori	0.12
Ripoll	0.12	Sant Pau de Segúries	0.14
Riudarenes	0.12	Sant Pere Pescador	0.11
Riudaura	0.13	Santa Coloma de Farners	0.12
Riudellots de la Selva	0.12	Santa Cristina d'Aro	0.11
Riumors	0.11	Santa Llogaia d'Àlguema	0.12
Roses	0.11	Sant Aniol de Finestres	0.13
Rupià	0.11	Santa Pau	0.13
Sales de Llierca	0.13	Sant Joan les Fonts	0.13

PROVINCIA DE GERONA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Sarrià de Ter	0.12	Vallfogona de Ripollès	0.13
Saus, Camallera i Llampaiés	0.12	Vall-llobrega	0.11
La Selva de Mar	0.11	Ventalló	0.12
La Cellera de Ter	0.12	Verges	0.11
Serinyà	0.12	Vidrà	0.12
Serra de Daró	0.11	Vidreres	0.12
Setcases	0.14	Vilabertran	0.12
Sils	0.12	Vilablareix	0.12
Susqueda	0.12	Viladasens	0.12
La Tallada d'Empordà	0.11	Viladamat	0.11
Terrades	0.12	Vilademuls	0.12
Torrent	0.11	Viladrau	0.11
Torroella de Fluvià	0.11	Vilafant	0.12
Torroella de Montgrí	0.11	Vilaür	0.12
Tortellà	0.13	Vilajuïga	0.11
Toses	0.13	Vilallonga de Ter	0.14
Tossa de Mar	0.04	Vilamacolum	0.11
Ultramort	0.11	Vilamalla	0.12
Ullà	0.11	Vilamaniscle	0.11
Ullastret	0.11	Vilanant	0.12
Urús	0.13	Vila-sacra	0.11
La Vajol	0.12	Vilopriu	0.12
La Vall d'en Bas	0.13	Vilobí d'Onyar	0.12
La Vall de Bianya	0.13		

PROVINCIA DE GRANADA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Agrón	0.23	Cádiar	0.17
Alamedilla	0.13	Cájar	0.23
Albolote	0.23	Calicasas	0.23
Albondón	0.19	Campotéjar	0.19
Albuñán	0.14	Caniles	0.14
Albuñol	0.19	Cáñar	0.19
Albuñuelas	0.22	Capileira	0.18
Aldeire	0.14	Carataunas	0.19
Alfacar	0.23	Cástaras	0.18
Algarinejo	0.19	Castilléjar	0.14
Alhama de Granada	0.23	Castril	0.10
Alhendín	0.23	Cenes de la Vega	0.23
Alicún de Ortega	0.12	Cijuela	0.23
Almegíjar	0.18	Cogollos de Guadix	0.15
Almuñécar	0.19	Cogollos de la Vega	0.22
Alquife	0.14	Colomera	0.22
Arenas del Rey	0.23	Cortes de Baza	0.13
Armillá	0.23	Cortes y Graena	0.15
Atarfe	0.23	Cúllar	0.14
Baza	0.13	Cúllar Vega	0.24
Beas de Granada	0.21	Chauchina	0.23
Beas de Guadix	0.15	Chimeneas	0.23
Benalúa	0.14	Churriana de la Vega	0.23
Benalúa de las Villas	0.20	Darro	0.15
Benamaurel	0.14	Dehesas de Guadix	0.13
Bérchules	0.16	Deifontes	0.22
Bubión	0.18	Diezma	0.16
Busquístar	0.18	Dílar	0.23
Cacín	0.23	Dólar	0.14

PROVINCIA DE GRANADA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Dúdar	0.21	Jete	0.20
Dúrcal	0.22	Jun	0.23
Escúzar	0.23	Juviles	0.17
Ferreira	0.14	La Calahorra	0.14
Fonelas	0.14	Láchar	0.23
Freila	0.13	Lanjarón	0.20
Fuente Vaqueros	0.23	Lanteira	0.15
Galera	0.14	Lecrín	0.22
Gobernador	0.14	Lentegí	0.21
Gójar	0.23	Lobras	0.18
Gor	0.13	Loja	0.22
Gorafe	0.13	Lugros	0.15
Granada	0.23	Lújar	0.19
Guadahortuna	0.14	La Malahá	0.24
Guadix	0.14	Maracena	0.23
Gualchos	0.19	Marchal	0.15
Güejar Sierra	0.20	Moclín	0.22
Güevéjar	0.23	Molvízar	0.20
Huélogo	0.14	Monachil	0.23
Huéneja	0.14	Montefrío	0.21
Huéscar	0.13	Montejícar	0.14
Huétor de Santillán	0.22	Montillana	0.18
Huétor Tájar	0.22	Moraleda de Zafayona	0.23
Huétor Vega	0.23	Motril	0.19
Illora	0.23	Murtas	0.19
Itrabo	0.20	Nigüelas	0.22
Iznalloz	0.21	Nívar	0.23
Jayena	0.23	Ogíjares	0.23
Jerez del Marquesado	0.15	Orce	0.14

PROVINCIA DE GRANADA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Órgiva	0.19	Torvizcón	0.18
Otívar	0.21	Trevélez	0.16
Otura	0.23	Turón	0.19
Padul	0.23	Ugíjar	0.17
Pampaneira	0.18	Válor	0.16
Pedro Martínez	0.14	Vélez de Benaudalla	0.20
Peligros	0.23	Ventas de Huelma	0.23
La Peza	0.16	Villanueva de las Torres	0.13
Pinos Genil	0.22	Villanueva Mesía	0.22
Pinos Puente	0.23	Víznar	0.22
Píñar	0.17	Zafarraya	0.22
Polícar	0.15	La Zubia	0.23
Polopos	0.19	Zújar	0.13
Pórtugos	0.18	La Taha	0.18
Puebla de Don Fadrique	0.11	El Valle	0.22
Pulianas	0.23	Nevada	0.16
Purullena	0.15	Alpujarra de la Sierra	0.16
Quéntar	0.21	Las Gabias	0.24
Rubite	0.19	Los Guajares	0.21
Salar	0.22	Valle del Zalabí	0.14
Salobreña	0.19	Villamena	0.23
Santa Cruz del Comercio	0.23	Morelábor	0.15
Santa Fe	0.23	El Pinar	0.21
Soportújar	0.19	Vegas del Genil	0.23
Sorvilán	0.19	Cuevas del Campo	0.12
Torre-Cardela	0.14	Zagra	0.21

PROVINCIA DE GUADALAJARA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Ablanque	0.04	Morenilla	0.04
Adobes	0.04	Olmeda de Cobeta	0.04
Alcolea del Pinar	0.04	Orea	0.04
Alcoroches	0.04	Pardos	0.04
Algar de Mesa	0.04	El Pedregal	0.04
Alustante	0.04	Peñalén	0.04
Anguita	0.04	Peralejos de las Truchas	0.04
Anquela del Ducado	0.04	Pinilla de Molina	0.04
Anquela del Pedregal	0.04	Piqueras	0.04
Baños de Tajo	0.04	El Pobo de Dueñas	0.04
Campillo de Dueñas	0.04	Poveda de la Sierra	0.04
Castellar de la Muela	0.04	Prados Redondos	0.04
Castilnuevo	0.04	Riba de Saelices	0.04
Ciruelos del Pinar	0.04	Rillo de Gallo	0.04
Cobeta	0.04	Rueda de la Sierra	0.04
Corduente	0.04	Saelices de la Sal	0.04
Checa	0.04	Selas	0.04
Chequilla	0.04	Setiles	0.04
Embid	0.04	Sotodosos	0.04
Esplegares	0.04	Taravilla	0.04
Establés	0.04	Tartanedo	0.04
Fuembellida	0.04	Terzaga	0.04
Fuentelsaz	0.04	Tierzo	0.04
Herrería	0.04	Tordellejo	0.04
Hombrados	0.04	Tordesilos	0.04
Hortezuela de Océn	0.04	Torre Cuadrada de Molina	0.04
Huertahernando	0.04	Torremocha del Pinar	0.04
Iniéstola	0.04	Torremochuela	0.04
Luzaga	0.04	Torrubia	0.04
Luzón	0.04	Tortuera	0.04
Maranchón	0.04	Traíd	0.04
Mazarete	0.04	Valhermoso	0.04
Megina	0.04	Villel de Mesa	0.04
Milmarcos	0.04	La Yunta	0.04
Mochales	0.04	Zaorejas	0.04
Molina de Aragón	0.04		

PROVINCIA DE GUIPÚZCOA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Abaltzisketa	0.07	Deba	0.06
Aduna	0.08	Donostia/San Sebastián	0.08
Aizarnazabal	0.07	Eibar	0.05
Albiztur	0.07	Elduain	0.08
Alegia	0.07	Elgoibar	0.06
Alkiza	0.07	Elgeta	0.05
Altzaga	0.07	Errezil	0.07
Altzo	0.07	Errenteria	0.09
Amezketza	0.07	Eskoriatza	0.05
Andoain	0.08	Ezkio-Itsaso	0.06
Anoeta	0.08	Hondarribia	0.10
Antzuola	0.06	Gaintza	0.07
Arama	0.07	Gabiria	0.06
Aretxabaleta	0.05	Gaztelu	0.08
Arrasate/Mondragón	0.05	Getaria	0.07
Asteasu	0.08	Hernani	0.09
Astigarraga	0.09	Hernialde	0.07
Ataun	0.07	Ibarra	0.08
Aia	0.07	Idiazabal	0.06
Azkoitia	0.06	Ikaztegieta	0.07
Azpeitia	0.06	Irun	0.10
Baliarrain	0.07	Irura	0.08
Beasain	0.06	Itsasondo	0.07
Beizama	0.07	Larraul	0.07
Belauntza	0.08	Lasarte-Oria	0.08
Berastegi	0.08	Lazkao	0.07
Bergara	0.05	Leaburu	0.08
Berrobi	0.08	Legazpi	0.06
Bidegoian	0.07	Legorreta	0.07

PROVINCIA DE GUIPÚZCOA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Leintz-Gatzaga	0.05	Soraluze-Placencia de las Armas	0.06
Lezo	0.09	Segura	0.06
Lizartza	0.08	Tolosa	0.07
Mendaro	0.06	Urnieta	0.08
Mutriku	0.06	Usurbil	0.08
Mutiloa	0.06	Urretxu	0.06
Oiartzun	0.09	Villabona	0.08
Olaberria	0.06	Zaldibia	0.07
Oñati	0.05	Zarautz	0.07
Ordizia	0.07	Zegama	0.06
Orendain	0.07	Zerain	0.06
Orexa	0.08	Zestoa	0.07
Orio	0.08	Zizurkil	0.08
Ormaiztegi	0.06	Zumarraga	0.06
Pasaia	0.09	Zumaia	0.07

PROVINCIA DE HUELVA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Alájar	0.06	Chucena	0.09
Aljaraque	0.12	Encinasola	0.06
El Almendro	0.09	Escacena del Campo	0.09
Almonaster la Real	0.07	Fuenteheridos	0.06
Almonte	0.10	Galaroza	0.06
Alosno	0.08	Gibraleón	0.10
Aracena	0.06	La Granada de Río-Tinto	0.07
Aroche	0.07	El Granado	0.09
Arroyomolinos de León	0.06	Higuera de la Sierra	0.06
Ayamonte	0.12	Hinojales	0.06
Beas	0.09	Hinojos	0.10
Berrocal	0.07	Huelva	0.12
Bollullos Par del Condado	0.10	Isla Cristina	0.13
Bonares	0.10	Jabugo	0.06
Cabezas Rubias	0.07	Lepe	0.12
Cala	0.06	Linares de la Sierra	0.06
Calañas	0.07	Lucena del Puerto	0.10
El Campillo	0.07	Manzanilla	0.09
Campofrío	0.07	Los Marines	0.06
Cañaveral de León	0.06	Minas de Riotinto	0.07
Cartaya	0.12	Moguer	0.11
Castaño del Robledo	0.06	La Nava	0.06
El Cerro de Andévalo	0.07	Nerva	0.07
Corteconcepción	0.06	Niebla	0.10
Cortegana	0.07	La Palma del Condado	0.09
Cortelazor	0.06	Palos de la Frontera	0.12
Cumbres de Enmedio	0.06	Paterna del Campo	0.09
Cumbres de San Bartolomé	0.06	Paymogo	0.08
Cumbres Mayores	0.06	Puebla de Guzmán	0.08

PROVINCIA DE HUELVA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Puerto Moral	0.06	Trigueros	0.10
Punta Umbría	0.13	Valdelarco	0.06
Rociana del Condado	0.10	Valverde del Camino	0.08
Rosal de la Frontera	0.07	Villablanca	0.11
San Bartolomé de la Torre	0.09	Villalba del Alcor	0.09
San Juan del Puerto	0.10	Villanueva de las Cruces	0.08
Sanlúcar de Gadiana	0.09	Villanueva de los Castillejos	0.09
San Silvestre de Guzmán	0.10	Villarrasa	0.09
Santa Ana la Real	0.07	Zalamea la Real	0.07
Santa Bárbara de Casa	0.08	Zufre	0.06
Santa Olalla del Cala	0.06		

PROVINCIA DE HUESCA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Abiego	0.05	Azlor	0.05
Abizanda	0.06	Baélls	0.04
Adahuesca	0.05	Bailo	0.08
Agüero	0.06	Baldellou	0.04
Aisa	0.11	Banastás	0.05
Albelda	0.04	Barbastro	0.05
Albero Alto	0.04	Barbués	0.04
Albero Bajo	0.04	Barbuñales	0.04
Alberuela de Tubo	0.04	Bárcabo	0.06
Alcalá de Gurrea	0.04	Benabarre	0.06
Alcalá del Obispo	0.04	Benasque	0.14
Alcampell	0.04	Beranuy	0.09
Aínsa-Sobrarbe	0.08	Berbegal	0.04
Alerre	0.05	Bielsa	0.13
Almudévar	0.04	Bierge	0.05
Almunia de San Juan	0.04	Biescas	0.11
Almuniente	0.04	Binaced	0.04
Alquézar	0.05	Binéfar	0.04
Altorricón	0.04	Bisaurri	0.11
Angüés	0.05	Biscarrués	0.05
Ansó	0.12	Blecua y Torres	0.04
Antillón	0.04	Boltaña	0.08
Aragüés del Puerto	0.12	Bonansa	0.11
Arén	0.08	Borau	0.11
Argavieso	0.04	Broto	0.11
Arguis	0.06	Caldearenas	0.07
Ayerbe	0.05	Campo	0.09
Azanuy-Alins	0.04	Camporrélls	0.05
Azara	0.05	Canal de Berdún	0.10

PROVINCIA DE HUESCA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Canfranc	0.13	Huesca	0.05
Capella	0.06	Ibieca	0.05
Casbas de Huesca	0.05	Igriés	0.05
Castejón del Puente	0.04	Ilche	0.04
Castejón de Sos	0.12	Isábena	0.07
Castiello de Jaca	0.11	Jaca	0.09
Castigaleu	0.07	Jasa	0.11
Castillazuelo	0.05	Labuerda	0.09
Castillonroy	0.04	Laluenga	0.04
Colungo	0.05	Laperdiguera	0.04
Chía	0.12	Lascellas-Ponzano	0.04
Chimillas	0.05	Lascuarre	0.06
Estada	0.05	Laspaúles	0.12
Estadilla	0.05	Laspuña	0.09
Estopiñán del Castillo	0.05	Loarre	0.06
Fago	0.11	Loporzano	0.05
Fanlo	0.11	Loscorrales	0.05
Fiscal	0.09	Lupiñén-Ortilla	0.05
Fonz	0.05	Monesma y Cajigar	0.07
Foradada del Toscar	0.09	Monflorite-Lascasas	0.04
La Fueva	0.08	Montanuy	0.12
Gistaín	0.12	Monzón	0.04
El Grado	0.06	Naval	0.06
Grañén	0.04	Novalés	0.04
Graus	0.06	Nueno	0.06
Gurrea de Gállego	0.04	Olvena	0.05
Hoz de Jaca	0.13	Palo	0.07
Hoz y Costean	0.05	Panticosa	0.14
Huerto	0.04	Las Peñas de Riglos	0.06

PROVINCIA DE HUESCA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Peralta de Alcofea	0.04	Santaliestra y San Quílez	0.07
Peralta de Calasanz	0.05	Secastilla	0.06
Peraltilla	0.04	Seira	0.10
Perarrúa	0.07	Sesa	0.04
Pertusa	0.04	Sesué	0.12
Piracés	0.04	Siétamo	0.05
Plan	0.12	Sopeira	0.09
Pozán de Vero	0.05	La Sotonera	0.05
La Puebla de Castro	0.06	Tamarite de Litera	0.04
Puente de Montañana	0.06	Tardienta	0.04
Puente la Reina de Jaca	0.09	Tella-Sin	0.12
Puértolas	0.10	Tierz	0.05
El Pueyo de Araguás	0.08	Tolva	0.06
Pueyo de Santa Cruz	0.04	Torla	0.11
Quicena	0.05	Torre la Ribera	0.09
Sabiñánigo	0.08	Torres de Alcanadre	0.04
Sahún	0.13	Torres de Barbués	0.04
Salas Altas	0.05	Tramaced	0.04
Salas Bajas	0.05	Valle de Bardají	0.10
Salillas	0.04	Valle de Hecho	0.12
Sallent de Gállego	0.16	Valle de Lierp	0.08
San Esteban de Litera	0.04	Veracruz	0.09
Sangarrén	0.04	Viacamp y Litera	0.06
San Juan de Plan	0.12	Vicién	0.04
San Miguel del Cinca	0.04	Villanova	0.12
Santa Cilia	0.09	Villanúa	0.12
Santa Cruz de la Serós	0.08	Yebra de Basa	0.08
Santa María de Dulcis	0.05	Yésero	0.11

PROVINCIA DE JAÉN			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Albánchez de Mágina	0.11	Frailas	0.16
Alcalá la Real	0.16	Fuensanta de Martos	0.12
Alcaudete	0.13	Fuerte del Rey	0.11
Aldeaquemada	0.05	Génave	0.06
Andújar	0.09	La Guardia de Jaén	0.12
Arjona	0.10	Guarromán	0.08
Arjonilla	0.10	Lahiguera	0.10
Arquillos	0.07	Higuera de Calatrava	0.11
Baeza	0.09	Hinojares	0.11
Bailén	0.09	Hornos	0.07
Baños de la Encina	0.08	Huelma	0.13
Beas de Segura	0.06	Huesa	0.10
Begíjar	0.10	Ibros	0.09
Bélmez de la Moraleda	0.12	La Iruela	0.08
Benatae	0.06	Iznatoraf	0.07
Cabra del Santo Cristo	0.12	Jabalquinto	0.10
Cambil	0.12	Jaén	0.12
Campillo de Arenas	0.15	Jamilena	0.12
Canena	0.09	Jimena	0.11
Carboneros	0.07	Jódar	0.11
La Carolina	0.07	Larva	0.11
Castellar	0.06	Linares	0.09
Castillo de Locubín	0.14	Lopera	0.10
Cazalilla	0.10	Lupión	0.10
Cazorla	0.08	Mancha Real	0.11
Chiclana de Segura	0.06	Marmolejo	0.09
Chilluévar	0.08	Martos	0.12
Escañuela	0.11	Mengíbar	0.10
Espelúy	0.09	Montizón	0.06

PROVINCIA DE JAÉN			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Navas de San Juan	0.07	Torre del Campo	0.11
Noalejo	0.16	Torredonjimeno	0.11
Orcera	0.06	Torreperogil	0.08
Peal de Becerro	0.09	Torres	0.11
Pegalajar	0.12	Torres de Albánchez	0.06
Porcuna	0.11	Úbeda	0.09
Pozo Alcón	0.11	Valdepeñas de Jaén	0.14
Puente de Génave	0.06	Vilches	0.07
La Puerta de Segura	0.06	Villacarrillo	0.07
Quesada	0.09	Villanueva de la Reina	0.10
Rus	0.09	Villanueva del Arzobispo	0.07
Sabiote	0.08	Villardompardo	0.11
Santa Elena	0.06	Los Villares	0.12
Santiago de Calatrava	0.11	Villarrodrigo	0.05
Santisteban del Puerto	0.06	Cárcheles	0.13
Santo Tomé	0.08	Bedmar y Garcéz	0.11
Segura de la Sierra	0.06	Villatorres	0.10
Siles	0.06	Santiago-Pontones	0.08
Sorihuela del Guadalimar	0.06	Arroyo del Ojanco	0.06
Torreblascopedro	0.10		

PROVINCIA DE LAS PALMAS			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Agate	0.07	San Bartolomé	0.04
Agüimes	0.06	San Bartolomé de Tirajana	0.06
Antigua	0.04	Aldea de San Nicolás, La	0.07
Arrecife	0.04	Santa Brígida	0.06
Artenara	0.07	Santa Lucía de Tirajana	0.06
Arucas	0.06	Santa María de Guía de Gran Canaria	0.07
Betancuria	0.04	Teguise	0.04
Firgas	0.06	Tejeda	0.06
Gáldar	0.07	Telde	0.06
Haría	0.04	Teror	0.06
Ingenio	0.06	Tías	0.04
Mogán	0.06	Tinajo	0.04
Moya	0.06	Tuineje	0.04
Oliva, La	0.04	Valsequillo de Gran Canaria	0.06
Pájara	0.04	Valleseco	0.06
Palmas de Gran Canaria, Las	0.06	Vega de San Mateo	0.06
Puerto del Rosario	0.04	Yaiza	0.04

PROVINCIA DE LEÓN			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Alija del Infantado	0.04	Corullón	0.05
La Antigua	0.04	Cubillos del Sil	0.04
Arganza	0.05	Destriana	0.04
Astorga	0.04	Encinedo	0.05
Balboa	0.05	Fabero	0.04
La Bañeza	0.04	Folgosos de la Ribera	0.04
Barjas	0.05	Hospital de Órbigo	0.04
Bembibre	0.04	Igüeña	0.04
Benavides	0.04	Laguna Dalga	0.04
Benuza	0.05	Laguna de Negrillos	0.04
Bercianos del Páramo	0.04	Lucillo	0.04
Berlanga del Bierzo	0.04	Luyego	0.04
Borrenes	0.05	Magaz de Cepeda	0.04
Brazuelo	0.04	Molinaseca	0.04
Bustillo del Páramo	0.04	Noceda del Bierzo	0.04
Cabañas Raras	0.04	Oencia	0.05
Cacabelos	0.05	Palacios de la Valduerna	0.04
Camponaraya	0.05	Palacios del Sil	0.04
Candín	0.05	Páramo del Sil	0.04
Carracedelo	0.05	Peranzanes	0.04
Carrizo	0.04	Pobladura de Pelayo García	0.04
Carucedo	0.05	Ponferrada	0.04
Castrillo de Cabrera	0.04	Pozuelo del Páramo	0.04
Castrillo de la Valduerna	0.04	Priaranza del Bierzo	0.05
Castroalbón	0.04	Puente de Domingo Flórez	0.05
Castrocontrigo	0.04	Quintana del Castillo	0.04
Castropodame	0.04	Quintana del Marco	0.04
Cebrones del Río	0.04	Quintana y Congosto	0.04
Congosto	0.04	Regueras de Arriba	0.04

PROVINCIA DE LEÓN			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Riego de la Vega	0.04	Truchas	0.04
Roperuelos del Páramo	0.04	Turcia	0.04
San Adrián del Valle	0.04	Urdiales del Páramo	0.04
Sancedo	0.04	Valdefuentes del Páramo	0.04
San Cristóbal de la Polantera	0.04	Valderrey	0.04
San Esteban de Nogales	0.04	Val de San Lorenzo	0.04
San Justo de la Vega	0.04	Vega de Espinareda	0.04
San Pedro Bercianos	0.04	Vega de Valcarce	0.05
Santa Colomba de Somoza	0.04	Toral de los Vados	0.05
Santa Elena de Jamuz	0.04	Villafranca del Bierzo	0.05
Santa María de la Isla	0.04	Villagatón	0.04
Santa María del Páramo	0.04	Villamejil	0.04
Santa Marina del Rey	0.04	Villamontán de la Valduerna	0.04
Santiago Millas	0.04	Villaobispo de Otero	0.04
Sobrado	0.05	Villarejo de Órbigo	0.04
Soto de la Vega	0.04	Villares de Órbigo	0.04
Toreno	0.04	Villazala	0.04
Torre del Bierzo	0.04	Zotes del Páramo	0.04
Trabadelo	0.05		

PROVINCIA DE LÉRIDA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Abella de la Conca	0.07	Baix Pallars	0.11
Àger	0.05	Balaguer	0.04
Agramunt	0.04	Barbens	0.04
Els Alamús	0.04	La Baronia de Rialb	0.05
Alàs i Cerc	0.13	La Vall de Boí	0.14
L'Albagés	0.04	Bassella	0.06
Albesa	0.04	Bausen	0.14
L'Albi	0.04	Belianes	0.04
Alcanó	0.04	Bellaguarda	0.04
Alcoletge	0.04	Bellcaire d'Urgell	0.04
Alfarràs	0.04	Bell-lloc d'Urgell	0.04
Alfés	0.04	Bellmunt d'Urgell	0.04
Algerri	0.04	Bellpuig	0.04
Alguaire	0.04	Bellver de Cerdanya	0.13
Alins	0.13	Bellví	0.04
Almenar	0.04	Benavent de Segrià	0.04
Alòs de Balaguer	0.05	Biosca	0.05
Alt Àneu	0.14	Bovera	0.04
Naut Aran	0.14	Es Bòrdes	0.14
Anglesola	0.04	Les Borges Blanques	0.04
Arbeca	0.04	Bossòst	0.14
El Pont de Bar	0.13	Cabanabona	0.05
Arres	0.14	Cabó	0.09
Arsèguel	0.13	Camarasa	0.04
Artesa de Lleida	0.04	Canejan	0.14
Artesa de Segre	0.05	Castell de Mur	0.06
La Sentiu de Sió	0.04	Castellar de la Ribera	0.06
Aspa	0.04	Castelldans	0.04
Les Avellanes i Santa Linya	0.04	Castellnou de Seana	0.04

PROVINCIA DE LÉRIDA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Castelló de Farfanya	0.04	La Granadella	0.04
Castellserà	0.04	Granyanella	0.05
Cava	0.12	Granyena de Segarra	0.05
Cervera	0.05	Granyena de les Garrigues	0.04
Cervià de les Garrigues	0.04	Guimerà	0.05
Ciutadilla	0.05	La Guingueta d'Àneu	0.14
Clariana de Cardener	0.06	Guissona	0.05
El Cogul	0.04	Guixers	0.08
Coll de Nargó	0.08	Ivars de Noguera	0.04
La Coma i la Pedra	0.09	Ivars d'Urgell	0.04
Conca de Dalt	0.08	Ivorra	0.05
Corbins	0.04	Isona i Conca Dellà	0.06
Cubells	0.04	Josa i Tuixén	0.10
L'Espluga Calba	0.04	Juncosa	0.04
Espot	0.14	Juneda	0.04
Estaràs	0.05	Lleida	0.04
Esterri d'Àneu	0.14	Les	0.14
Esterri de Cardós	0.13	Linyola	0.04
Estamariu	0.13	Lladorre	0.13
Farrera	0.13	Lladurs	0.07
Fígols i Alinyà	0.08	Llavorsí	0.13
La Floresta	0.04	Lles de Cerdanya	0.13
Fondarella	0.04	Llimiana	0.06
Foradada	0.04	Llobera	0.06
La Fuliola	0.04	Maldà	0.04
Fulleda	0.05	Massoteres	0.05
Gavet de la Conca	0.06	Menàrguens	0.04
Golmés	0.04	Miralcamp	0.04
Gósol	0.11	La Molsosa	0.06

PROVINCIA DE LÉRIDA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Mollerussa	0.04	La Portella	0.04
Montgai	0.04	Prats i Sansor	0.13
Montellà i Martinet	0.13	Preixana	0.04
Montferrer i Castellbò	0.12	Preixens	0.04
Montoliu de Segarra	0.05	Prullans	0.13
Montornès de Segarra	0.05	Puiggròs	0.04
Nalec	0.05	Puigverd d'Agramunt	0.04
Navès	0.06	Puigverd de Lleida	0.04
Odèn	0.08	Rialp	0.13
Oliana	0.06	Ribera d'Ondara	0.05
Oliola	0.05	Ribera d'Urgellet	0.11
Olius	0.06	Riner	0.06
Les Oluges	0.05	Riu de Cerdanya	0.13
Els Omellons	0.04	Rosselló	0.04
Els Omells de na Gaia	0.05	Salàs de Pallars	0.07
Organyà	0.09	Sanauja	0.05
Os de Balaguer	0.04	Sant Guim de Freixenet	0.05
Ossó de Sió	0.05	Sant Llorenç de Morunys	0.08
El Palau d'Anglesola	0.04	Sant Martí de Riucorb	0.04
Els Plans de Sió	0.05	Sant Ramon	0.05
Penelles	0.04	Sant Esteve de la Sarga	0.06
Peramola	0.06	Sant Guim de la Plana	0.05
Pinell de Solsonès	0.06	Sarroca de Bellera	0.11
Pinós	0.05	Senterada	0.10
El Poal	0.04	La Seu d'Urgell	0.13
La Pobla de Cérvoles	0.05	Sidamon	0.04
La Pobla de Segur	0.08	El Soleràs	0.04
Ponts	0.05	Solsona	0.06
El Pont de Suert	0.11	Soriguera	0.12

PROVINCIA DE LÉRIDA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Sort	0.13	Vall de Cardós	0.13
Talarn	0.07	Vallbona de les Monges	0.05
Talavera	0.05	Les Valls d'Aguilar	0.11
Tàrrega	0.05	Les Valls de Valira	0.13
Tarrés	0.05	Vallfogona de Balaguer	0.04
Tarroja de Segarra	0.05	La Vansa i Fòrnols	0.10
Térmens	0.04	Verdú	0.05
Tírvia	0.13	Vielha e Mijaran	0.14
Tiurana	0.05	Vilagrassa	0.04
Torà	0.05	Vilaller	0.13
Els Torms	0.04	Vilamòs	0.14
Tornabous	0.04	Vilanova de l'Aguda	0.05
Torrebesses	0.04	Vilanova de Bellpuig	0.04
La Torre de Cabdella	0.13	Vilanova de la Barca	0.04
Torrefarrera	0.04	Vilanova de Meià	0.05
Torrefeta i Florejacs	0.05	Vilanova de Segrià	0.04
Torregrossa	0.04	Vila-sana	0.04
Torrelameu	0.04	El Vilosell	0.05
Torre-serona	0.04	Vinaixa	0.05
Tremp	0.07		

PROVINCIA DE LA RIOJA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Ábalos	0.05	Bezares	0.06
Agoncillo	0.07	Bobadilla	0.06
Aguilar del Río Alhama	0.06	Brieva de Cameros	0.05
Ajamil de Cameros	0.07	Briñas	0.04
Albelda de Iregua	0.06	Briones	0.05
Alberite	0.06	Cabezón de Cameros	0.07
Alcanadre	0.06	Calahorra	0.06
Aldeanueva de Ebro	0.05	Camprovín	0.05
Alesanco	0.05	Canales de la Sierra	0.05
Alesón	0.05	Canillas de Río Tuerto	0.05
Alfaro	0.05	Cañas	0.05
Almarza de Cameros	0.06	Cárdenas	0.05
Anguciana	0.04	Casalarreina	0.04
Anguiano	0.06	Castañares de Rioja	0.04
Arenzana de Abajo	0.05	Castroviejo	0.06
Arenzana de Arriba	0.05	Cellorigo	0.04
Arnedillo	0.07	Cenicero	0.05
Arnedo	0.06	Cervera del Río Alhama	0.06
Arrúbal	0.07	Cidamón	0.04
Ausejo	0.06	Cihuri	0.04
Autol	0.06	Cirueña	0.05
Azofra	0.05	Clavijo	0.07
Badarán	0.05	Cordovín	0.05
Bañares	0.04	Corera	0.06
Baños de Rioja	0.04	Cornago	0.07
Baños de Río Tobía	0.05	Corporales	0.04
Berceo	0.05	Cuzcurrita de Río Tirón	0.04
Bergasa	0.06	Daroca de Rioja	0.06
Bergasillas Bajera	0.07	Enciso	0.07

PROVINCIA DE LA RIOJA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Entrena	0.06	Logroño	0.06
Estollo	0.05	Lumbreras	0.06
Ezcaray	0.05	Manjarrés	0.05
Foncea	0.04	Mansilla de la Sierra	0.05
Fonzaleche	0.04	Manzanares de Rioja	0.05
Fuenmayor	0.06	Matute	0.05
Galbárruli	0.04	Medrano	0.06
Galilea	0.06	Munilla	0.07
Gallinero de Cameros	0.06	Murillo de Río Leza	0.06
Gimileo	0.04	Muro de Aguas	0.07
Grañón	0.04	Muro en Cameros	0.07
Grávalos	0.06	Nájera	0.05
Haro	0.04	Nalda	0.07
Herce	0.07	Navajún	0.07
Herramélluri	0.04	Navarrete	0.06
Hervías	0.04	Nestares	0.06
Hormilla	0.05	Nieva de Cameros	0.06
Hormilleja	0.05	Ocón	0.07
Hornillos de Cameros	0.07	Ochánduri	0.04
Hornos de Moncalvillo	0.06	Ojacastro	0.05
Huércanos	0.05	Ollauri	0.04
Igea	0.06	Ortigosa de Cameros	0.06
Jalón de Cameros	0.07	Pazuengos	0.05
Laguna de Cameros	0.06	Pedroso	0.06
Lagunilla del Jubera	0.07	Pinillos	0.06
Lardero	0.06	Pradejón	0.06
Ledesma de la Cogolla	0.06	Pradillo	0.06
Leiva	0.04	Préjano	0.07
Leza de Río Leza	0.07	Quel	0.06

PROVINCIA DE LA RIOJA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Rabanera	0.07	Torrecilla sobre Alesanco	0.05
El Rasillo de Cameros	0.06	Torre en Cameros	0.07
El Redal	0.06	Torremontalbo	0.05
Ribafrecha	0.07	Treviana	0.04
Rincón de Soto	0.05	Tricio	0.05
Robres del Castillo	0.07	Tudelilla	0.06
Rodezno	0.04	Uruñuela	0.05
Sajazarra	0.04	Valdemadera	0.07
San Asensio	0.05	Valgañón	0.04
San Millán de la Cogolla	0.05	Ventosa	0.06
San Millán de Yécora	0.04	Ventrosa	0.05
San Román de Cameros	0.07	Viguera	0.07
Santa Coloma	0.06	Villalba de Rioja	0.04
Santa Engracia del Jubera	0.07	Villalobar de Rioja	0.04
Santa Eulalia Bajera	0.07	Villamediana de Iregua	0.06
Santo Domingo de la Calzada	0.04	Villanueva de Cameros	0.06
San Torcuato	0.04	El Villar de Arnedo	0.06
Santurde de Rioja	0.04	Villar de Torre	0.05
Santurdejo	0.05	Villarejo	0.05
San Vicente de la Sonsierra	0.05	Villarroya	0.07
Sojuela	0.06	Villarta-Quintana	0.04
Sorzano	0.06	Villavelayo	0.05
Sotés	0.06	Villaverde de Rioja	0.05
Soto en Cameros	0.07	Villoslada de Cameros	0.06
Terroba	0.07	Viniegra de Abajo	0.05
Tirgo	0.04	Viniegra de Arriba	0.05
Tobía	0.05	Zarratón	0.04
Tormantos	0.04	Zarzosa	0.07
Torrecilla en Cameros	0.06	Zorraquín	0.05

PROVINCIA DE LUGO			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Abadín	0.05	Muras	0.05
Alfoz	0.04	Navia de Suarna	0.05
Antas de Ulla	0.06	Negueira de Muñiz	0.04
Baleira	0.06	As Nogais	0.06
Baralla	0.06	Ouroil	0.04
Barreiros	0.04	Outeiro de Rei	0.06
Becerreá	0.06	Palas de Rei	0.06
Begonte	0.06	Pantón	0.06
Bóveda	0.06	Paradela	0.06
Burela	0.04	O Páramo	0.06
Carballedo	0.06	A Pastoriza	0.05
Castro de Rei	0.06	Pedrafita do Cebreiro	0.06
Castroverde	0.06	Pol	0.06
Cervantes	0.06	A Pobra do Brollón	0.06
Cervo	0.04	A Pontenova	0.05
O Corgo	0.06	Portomarín	0.06
Cospeito	0.05	Quiroga	0.05
Chantada	0.06	Ribadeo	0.04
Folgoso do Courel	0.06	Ribas de Sil	0.05
A Fonsagrada	0.05	Ribeira de Piquín	0.05
Foz	0.04	Riotorto	0.05
Friol	0.06	Samos	0.06
Xermade	0.05	Rábade	0.06
Guitiriz	0.05	Sarria	0.06
Guntín	0.06	O Saviñao	0.06
O Incio	0.06	Sober	0.06
Xove	0.04	Taboada	0.06
Láncara	0.06	Trabada	0.04
Lourenzá	0.04	Triacastela	0.06
Lugo	0.06	O Valadouro	0.04
Meira	0.05	O Vicedo	0.04
Mondoñedo	0.05	Vilalba	0.05
Monforte de Lemos	0.06	Viveiro	0.04
Monterroso	0.06		

PROVINCIA DE MÁLAGA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Alameda	0.16	El Borge	0.19
Alcaucín	0.22	El Burgo	0.14
Alfarnate	0.22	Campillos	0.16
Alfarnatejo	0.22	Canillas de Aceituno	0.22
Algarrobo	0.19	Canillas de Albaida	0.21
Algatocín	0.13	Cañete la Real	0.15
Alhaurín de la Torre	0.16	Carratraca	0.15
Alhaurín el Grande	0.15	Cartajima	0.14
Almáchar	0.19	Cártama	0.16
Almargen	0.15	Casabermeja	0.19
Almogía	0.17	Casarabonela	0.15
Álora	0.15	Casares	0.12
Alozaina	0.14	Coín	0.15
Alpandeire	0.14	Colmenar	0.20
Antequera	0.19	Comares	0.20
Árchez	0.21	Cómpeta	0.21
Archidona	0.21	Cortes de la Frontera	0.14
Ardales	0.15	Cuevas Bajas	0.17
Arenas	0.20	Cuevas del Becerro	0.15
Arriate	0.15	Cuevas de San Marcos	0.17
Atajate	0.14	Cútar	0.19
Benadalid	0.14	Estepona	0.12
Benahavís	0.13	Faraján	0.13
Benalauría	0.13	Frigiliana	0.20
Benalmádena	0.15	Fuengirola	0.15
Benamargosa	0.20	Fuente de Piedra	0.17
Benamocarra	0.19	Gaucín	0.12
Benaoján	0.14	Genalguacil	0.13
Benarrabá	0.13	Guaro	0.14

PROVINCIA DE MÁLAGA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Humilladero	0.18	Rincón de la Victoria	0.17
Igualeja	0.13	Riogordo	0.21
Istán	0.14	Ronda	0.15
Iznate	0.18	Salares	0.21
Jimera de Líbar	0.14	Sayalonga	0.20
Jubrique	0.13	Sedella	0.21
Júzcar	0.13	Sierra de Yeguas	0.16
Macharaviaya	0.18	Teba	0.15
Málaga	0.16	Tolox	0.14
Manilva	0.11	Torrox	0.19
Marbella	0.14	Totalán	0.17
Mijas	0.15	Valle de Abdalajís	0.17
Moclinejo	0.18	Vélez-Málaga	0.19
Mollina	0.18	Villanueva de Algaidas	0.19
Monda	0.14	Villanueva del Rosario	0.21
Montejaque	0.14	Villanueva del Trabuco	0.21
Nerja	0.19	Villanueva de Tapia	0.21
Ojén	0.14	Viñuela	0.21
Parauta	0.14	Yunquera	0.14
Periana	0.22	Torremolinos	0.16
Pizarra	0.15	Villanueva de la Concepción	0.19
Pujerra	0.13		

PROVINCIA DE MURCIA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Abanilla	0.19	Librilla	0.20
Abarán	0.19	Lorca	0.19
Águilas	0.14	Lorquí	0.21
Albudeite	0.20	Mazarrón	0.13
Alcantarilla	0.22	Molina de Segura	0.22
Los Alcázares	0.13	Moratalla	0.12
Aledo	0.19	Mula	0.18
Alguazas	0.22	Murcia	0.23
Alhama de Murcia	0.20	Ojós	0.20
Archena	0.21	Pliego	0.18
Beniel	0.23	Puerto Lumbreras	0.19
Blanca	0.19	Ricote	0.20
Bullas	0.16	San Javier	0.15
Calasparra	0.14	San Pedro del Pinatar	0.16
Campos del Río	0.21	Torre-Pacheco	0.14
Caravaca de la Cruz	0.14	Las Torres de Cotillas	0.22
Cartagena	0.11	Totana	0.19
Cehegín	0.14	Ulea	0.20
Ceutí	0.21	La Unión	0.11
Cieza	0.18	Villanueva del Río Segura	0.20
Fortuna	0.20	Yecla	0.14
Fuente Álamo de Murcia	0.14	Santomera	0.22
Jumilla	0.14		

PROVINCIA DE NAVARRA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Abáigar	0.07	Arellano	0.08
Abárzuza/Abartzuza	0.08	Areso	0.08
Abaurregaina/Abaurrea Alta	0.11	Arguedas	0.05
Abaurrepea/Abaurrea Baja	0.11	Aria	0.11
Aberin	0.08	Aribe	0.11
Ablitas	0.05	Armañanzas	0.07
Adiós	0.09	Arróniz	0.07
Aguilar de Codés	0.06	Arruazu	0.08
Aibar/Oibar	0.09	Artajona	0.08
Altsasu/Alsasua	0.07	Artazu	0.09
Allín/Allin	0.08	Atez	0.09
Allo	0.07	Ayegui/Aiegi	0.08
Améscoa Baja	0.08	Azagra	0.06
Ancín/Antzin	0.07	Azuelo	0.07
Andosilla	0.06	Bakaiku	0.08
Ansoáin/Antsoain	0.09	Barásoain	0.08
Anue	0.10	Barañain	0.09
Añorbe	0.09	Barbarin	0.07
Aoiz/Agoitz	0.10	Bargota	0.07
Araitz	0.08	Barillas	0.05
Aranarache/Aranaratxe	0.07	Basaburua	0.09
Arantza	0.10	Baztan	0.11
Aranguren	0.10	Bera	0.10
Arano	0.09	Beire	0.07
Arakil	0.09	Belascoáin	0.09
Aras	0.07	Berbinzana	0.07
Arbizu	0.08	Beriáin	0.09
Arce/Artzi	0.10	Berrioplano/Berriobeiti	0.09
Los Arcos	0.07	Berriozar	0.09

PROVINCIA DE NAVARRA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Bertizarana	0.10	Etxalar	0.10
Betelu	0.08	Echarri	0.09
Bidaurreta	0.09	Etxarri-Aranatz	0.08
Biurrun-Olcoz	0.09	Etxauri	0.09
Buñuel	0.04	Egüés	0.10
Auritz/Burguete	0.11	Elgorriaga	0.10
Burgui/Burgi	0.10	Noáin (Valle de Elorz)/Noain (Elortzibar)	0.09
Burlada/Burlata	0.09	Enériz/Eneritz	0.09
El Busto	0.07	Eratsun	0.09
Cabanillas	0.04	Ergoiena	0.08
Cabredo	0.06	Erro	0.10
Cadreita	0.05	Ezcároz/Ezkaroze	0.12
Caparroso	0.05	Eslava	0.08
Cárcar	0.06	Esparza de Salazar/Espartza Zaraitzu	0.11
Carcastillo	0.06	Espronceda	0.07
Cascante	0.05	Estella-Lizarra	0.08
Cáseda	0.08	Esteribar	0.10
Castejón	0.05	Etayo	0.07
Castillonuevo	0.10	Eulate	0.07
Cendea de Olza/Oltza Zendea	0.09	Ezcabarte	0.09
Cintruénigo	0.05	Ezkurra	0.09
Cirauqui/Zirauki	0.08	Ezprogui	0.08
Ciriza/Ziritza	0.09	Falces	0.06
Cizur	0.09	Fitero	0.06
Corella	0.05	Fontellas	0.04
Cortes	0.04	Funes	0.05
Desojo	0.07	Fustiñana	0.04
Dicastillo	0.08	Galar	0.09
Donamaria	0.10	Gallipienzo/Galipentzu	0.08

PROVINCIA DE NAVARRA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Gallué/Galoz	0.11	Lakuntza	0.08
Garaioa	0.11	Lana	0.07
Garde	0.12	Lantz	0.10
Garínoain	0.08	Lapoblación	0.06
Garralda	0.11	Larraga	0.08
Genevilla	0.06	Larraona	0.07
Goizueta	0.09	Larraun	0.09
Goñi	0.09	Lazagurría	0.07
Güesa/Gorza	0.11	Leache	0.09
Guesálaz/Gesalatz	0.09	Legarda	0.09
Guirguillano	0.09	Legaria	0.07
Huarte/Uharte	0.10	Leitza	0.09
Uharte-Arakil	0.09	Lekunberri	0.09
Ibargoiti	0.09	Leoz/Leotz	0.09
Igantzi	0.10	Lerga	0.08
Igúzquiza	0.08	Lerín	0.07
Imotz	0.09	Lesaka	0.10
Irañeta	0.09	Lezáun	0.08
Irurtzun	0.09	Liédena	0.09
Isaba/Izaba	0.13	Lizoáin-Arriasgoiti	0.10
Íturen	0.10	Lodosa	0.07
Iturmendi	0.08	Lónguida/Longida	0.10
Iza/Itza	0.09	Lumbier	0.09
Izagaondoa	0.10	Luquin	0.07
Izalzu/Itzaltzu	0.12	Mañeru	0.08
Jaurrieta	0.11	Marañón	0.06
Javier	0.09	Marcilla	0.05
Juslapeña	0.09	Mélida	0.06
Beintza-Labaien	0.10	Mendavia	0.07

PROVINCIA DE NAVARRA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Mendoza	0.07	Orbara	0.11
Mendigorría	0.08	Orísoain	0.08
Metauten	0.07	Orkoien	0.09
Milagro	0.05	Oroz/Orontze	0.11
Mirafuentes	0.07	Oroz-Betelu/Orotz-Betelu	0.11
Miranda de Arga	0.07	Oteiza	0.08
Monreal/Elo	0.09	Pamplona/Iruña	0.09
Monteagudo	0.05	Peralta/Azkoien	0.06
Morentin	0.08	Petilla de Aragón	0.08
Mues	0.07	Piedramillera	0.07
Murchante	0.05	Pitillas	0.06
Murieta	0.07	Puente la Reina/Gares	0.08
Murillo el Cuende	0.06	Pueyo	0.08
Murillo el Fruto	0.06	Ribaforada	0.04
Muruzábal	0.09	Romanzado	0.10
Navascués/Nabaskoze	0.10	Roncal/Erronkari	0.12
Nazar	0.07	Orreaga/Roncesvalles	0.11
Obanos	0.09	Sada	0.09
Oco	0.07	Saldías	0.09
Ochagavía/Otsagabia	0.12	Salinas de Oro/Jaitz	0.09
Odieta	0.10	San Adrián	0.06
Oitz	0.10	Sangüesa/Zangoza	0.09
Olaibar	0.10	San Martín de Unx	0.08
Olazti/Olazagutía	0.07	Sansol	0.07
Olejua	0.07	Santacara	0.06
Olite/Erriberri	0.07	Doneztebe/Santesteban	0.10
Olóriz/Oloritz	0.09	Sarriés/Sartze	0.11
Ollo	0.09	Sartaguda	0.06
Orbaizeta	0.11	Sesma	0.07

PROVINCIA DE NAVARRA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Sorlada	0.07	Urzainqui/Urzainki	0.12
Sunbilla	0.10	Uterga	0.09
Tafalla	0.08	Uztároz/Uztarroze	0.13
Tiebas-Muruarte de Reta	0.09	Luzaide/Valcarlos	0.12
Tirapu	0.09	Valtierra	0.05
Torralba del Río	0.07	Valle de Yerri/Deierri	0.08
Torres del Río	0.07	Viana	0.07
Tudela	0.04	Vidángoz/Bidankoze	0.11
Tulebras	0.05	Villafranca	0.05
Ucar	0.09	Villamayor de Monjardín	0.07
Ujué	0.08	Hiriberri/Villanueva de Aezkoa	0.11
Ultzama	0.10	Villatuerta	0.08
Unciti	0.09	Villava/Atarrabia	0.10
Unzué/Untzue	0.09	Yesa	0.09
Urdazubi/Urdax	0.11	Zabalza/Zabaltza	0.09
Urdiain	0.07	Ziordia	0.07
Urraul Alto	0.10	Zubieta	0.10
Urraul Bajo	0.10	Zugarramurdi	0.11
Urroz-Villa	0.10	Zúñiga	0.07
Urrotz	0.10	Zizur Mayor/Zizur Nagusia	0.09

PROVINCIA DE ORENSE			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Allariz	0.06	Entrimo	0.06
Amoeiro	0.06	Esgos	0.06
A Arnoia	0.06	Xinzo de Limia	0.06
Avión	0.06	Gomesende	0.06
Baltar	0.05	A Gudiña	0.05
Bande	0.06	O Irixo	0.06
Baños de Molgas	0.06	Xunqueira de Ambía	0.06
Barbadás	0.06	Xunqueira de Espadanedo	0.06
O Barco de Valdeorras	0.05	Larouco	0.05
Beade	0.06	Laza	0.05
Beariz	0.06	Leiro	0.06
Os Blancos	0.06	Lobeira	0.06
Boborás	0.06	Lobios	0.06
A Bola	0.06	Maceda	0.06
O Bolo	0.05	Manzaneda	0.05
Calvos de Randín	0.06	Maside	0.06
Carballeda de Valdeorras	0.05	Melón	0.06
Carballeda de Avia	0.06	A Merca	0.06
O Carballiño	0.06	A Mezquita	0.05
Cartelle	0.06	Montederramo	0.05
Castrelo do Val	0.05	Monterrei	0.05
Castrelo de Miño	0.06	Muíños	0.06
Castro Caldelas	0.05	Nogueira de Ramuín	0.06
Celanova	0.06	Oímbra	0.05
Cenlle	0.06	Ourense	0.06
Coles	0.06	Paderne de Allariz	0.06
Cortegada	0.06	Padrenda	0.06
Cualedro	0.05	Parada de Sil	0.06
Chandrea de Queixa	0.05	O Pereiro de Aguiar	0.06

PROVINCIA DE ORENSE			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
A Peroxa	0.06	San Cristovo de Cea	0.06
Petín	0.05	Sandiás	0.06
Piñor	0.06	Sarreaus	0.05
Porqueira	0.06	Taboadela	0.06
A Pobra de Trives	0.05	A Teixeira	0.05
Pontedeiva	0.06	Toén	0.06
Punxín	0.06	Trasmiras	0.05
Quintela de Leirado	0.06	A Veiga	0.05
Rairiz de Veiga	0.06	Verea	0.06
Ramirás	0.06	Verín	0.05
Ribadavia	0.06	Viana do Bolo	0.05
San Xoán de Río	0.05	Vilamarín	0.06
Riós	0.05	Vilamartín de Valdeorras	0.05
A Rúa	0.05	Vilar de Barrio	0.06
Rubiá	0.05	Vilar de Santos	0.06
San Amaro	0.06	Vilardevós	0.05
San Cibrao das Viñas	0.06	Vilariño de Conso	0.05

PROVINCIA DE PONTEVEDRA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Arbo	0.07	Mondariz-Balneario	0.07
Barro	0.07	Moraña	0.07
Baiona	0.07	Mos	0.07
Bueu	0.07	As Neves	0.07
Caldas de Reis	0.07	Nigrán	0.07
Cambados	0.07	Oia	0.07
Campo Lameiro	0.07	Pazos de Borbén	0.07
Cangas	0.07	Pontevedra	0.07
A Cañiza	0.07	O Porriño	0.07
Catoira	0.07	Portas	0.07
Cerdedo	0.07	Poio	0.07
Cotobade	0.07	Ponteareas	0.07
Covelo	0.07	Ponte Caldelas	0.07
Crecente	0.06	Pontecesures	0.06
Cuntis	0.07	Redondela	0.07
Dozón	0.06	Ribadumia	0.07
A Estrada	0.06	Rodeiro	0.06
Forcarei	0.06	O Rosal	0.07
Fornelos de Montes	0.07	Salceda de Caselas	0.07
Agolada	0.06	Salvaterra de Miño	0.07
Gondomar	0.07	Sanxenxo	0.07
O Grove	0.07	Silleda	0.06
A Guarda	0.07	Soutomaior	0.07
A Illa de Arousa	0.07	Tomiño	0.07
Lalín	0.06	Tui	0.07
A Lama	0.07	Valga	0.07
Marín	0.07	Vigo	0.07
Meaño	0.07	Vilaboa	0.07
Meis	0.07	Vila de Cruces	0.06
Moaña	0.07	Vilagarcía de Arousa	0.07
Mondariz	0.07	Vilanova de Arousa	0.07

PROVINCIA DE SALAMANCA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Ahigal de los Aceiteros	0.04	Gejuelo del Barro	0.04
Ahigal de Villarino	0.04	Guadramiro	0.04
La Alameda de Gardón	0.04	Hinojosa de Duero	0.05
La Alamedilla	0.04	Iruelos	0.04
La Alberguería de Argañán	0.04	Ituero de Azaba	0.04
Aldeadávila de la Ribera	0.05	Lumbrales	0.04
Aldea del Obispo	0.04	El Manzano	0.04
Almendra	0.04	Masueco	0.05
Bañobárez	0.04	Mieza	0.05
Barceo	0.04	El Milano	0.04
Barruecopardo	0.04	Monleras	0.04
Bermellar	0.04	Moronta	0.04
Bogajo	0.04	Navasfrías	0.04
La Bouza	0.05	Olmedo de Camaces	0.04
Brincones	0.04	El Payo	0.04
Cabeza del Caballo	0.04	La Peña	0.04
Campillo de Azaba	0.04	Peralejos de Abajo	0.04
Carpio de Azaba	0.04	Peralejos de Arriba	0.04
Casillas de Flores	0.04	Pereña de la Ribera	0.05
Castillejo de Martín Viejo	0.04	Pozos de Hinojo	0.04
Cerezal de Peñahorcada	0.05	Puebla de Azaba	0.04
Cerralbo	0.04	Puertas	0.04
Encinasola de los Comendadores	0.04	Puerto Seguro	0.04
Espadaña	0.04	La Redonda	0.04
Espeja	0.04	Saelices el Chico	0.04
La Fregeneda	0.05	Saldeana	0.04
Fuenteliante	0.04	Sanchón de la Ribera	0.04
Fuentes de Oñoro	0.04	San Felices de los Gallegos	0.04
Gallegos de Argañán	0.04	Santiz	0.04

<b>PROVINCIA DE SALAMANCA</b>			
<b>Municipio</b>	<b>PGA (<math>T_R = 475</math>)</b>	<b>Municipio</b>	<b>PGA (<math>T_R = 475</math>)</b>
Sardón de los Frailes	0.04	Villar de la Yegua	0.04
Saucelle	0.05	Villar de Peralonso	0.04
Sobradillo	0.05	Villar de Samaniego	0.04
Trabanca	0.04	Villarino de los Aires	0.05
Tremedal de Tormes	0.04	Villarmuerto	0.04
Valderodrigo	0.04	Villasbuenas	0.04
Valsalabroso	0.04	Villaseco de los Reyes	0.04
La Vídola	0.04	Villavieja de Yeltes	0.04
Vilvestre	0.05	Vitigudino	0.04
Villar de Argañán	0.04	Yecla de Yeltes	0.04
Villar de Ciervo	0.04	La Zarza de Pumareda	0.05

PROVINCIA DE SANTA CRUZ DE TENERIFE			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Adeje	0.07	Puerto de la Cruz	0.07
Agulo	0.07	Puntagorda	0.07
Alajeró	0.07	Puntallana	0.07
Arafo	0.07	Realejos, Los	0.07
Arico	0.08	Rosario, El	0.07
Arona	0.07	San Andrés y Sauces	0.07
Barlovento	0.07	San Juan de la Rambla	0.07
Breña Alta	0.07	San Miguel de Abona	0.07
Breña Baja	0.07	San Sebastián de la Gomera	0.07
Buenavista del Norte	0.07	Santa Cruz de la Palma	0.07
Candelaria	0.08	Santa Cruz de Tenerife	0.08
Fasnia	0.08	Santa Úrsula	0.07
Frontera	0.07	Santiago del Teide	0.07
Fuencaliente de la Palma	0.07	Sauzal, El	0.07
Garachico	0.07	Silos, Los	0.07
Garafía	0.07	Tacoronte	0.07
Granadilla de Abona	0.07	Tanque, El	0.07
Guancha, La	0.07	Tazacorte	0.07
Guía de Isora	0.07	Tegueste	0.07
Güímar	0.07	Tijarafe	0.07
Hermigua	0.07	Valverde	0.07
Icod de los Vinos	0.07	Valle Gran Rey	0.07
San Cristóbal de La Laguna	0.07	Vallehermoso	0.07
Llanos de Aridane, Los	0.07	Victoria de Acentejo, La	0.07
Matanza de Acentejo, La	0.07	Vilaflor	0.07
Orotava, La	0.07	Villa de Mazo	0.07
Paso, El	0.07	Pinar de El Hierro, El	0.07

PROVINCIA DE SEVILLA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Aguadulce	0.12	Castilleja de la Cuesta	0.09
Alanís	0.06	Castilleja del Campo	0.09
Albaida del Aljarafe	0.09	El Castillo de las Guardas	0.07
Alcalá de Guadaíra	0.09	Cazalla de la Sierra	0.06
Alcalá del Río	0.09	Constantina	0.06
Alcolea del Río	0.08	Coria del Río	0.09
La Algaba	0.09	Coripe	0.13
Algámitas	0.14	El Coronil	0.11
Almadén de la Plata	0.06	Los Corrales	0.14
Almensilla	0.09	El Cuervo de Sevilla	0.10
Arahal	0.10	Dos Hermanas	0.09
Aznalcázar	0.09	Écija	0.10
Aznalcóllar	0.08	Espartinas	0.09
Badolatosa	0.13	Estepa	0.12
Benacazón	0.09	Fuentes de Andalucía	0.10
Bollullos de la Mitación	0.09	El Garrobo	0.07
Bormujos	0.09	Gelves	0.09
Brenes	0.09	Gerena	0.08
Burguillos	0.08	Gilena	0.13
Las Cabezas de San Juan	0.10	Gines	0.09
Camas	0.09	Guadalcanal	0.05
La Campana	0.09	Guillena	0.08
Cantillana	0.08	Herrera	0.12
Cañada Rosal	0.10	Huévar del Aljarafe	0.09
Carmona	0.09	Isla Mayor	0.10
Carrión de los Céspedes	0.09	La Lantejuela	0.10
Casariche	0.13	Lebrija	0.10
Castilblanco de los Arroyos	0.07	Lora de Estepa	0.13
Castilleja de Guzmán	0.09	Lora del Río	0.08

PROVINCIA DE SEVILLA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
La Luisiana	0.10	El Real de la Jara	0.06
El Madroño	0.07	La Rinconada	0.09
Mairena del Alcor	0.09	La Roda de Andalucía	0.15
Mairena del Aljarafe	0.09	El Ronquillo	0.07
Marchena	0.10	El Rubio	0.11
Marinaleda	0.11	Salteras	0.09
Martín de la Jara	0.14	San Juan de Aznalfarache	0.09
Los Molares	0.10	Sanlúcar la Mayor	0.09
Montellano	0.12	San Nicolás del Puerto	0.06
Morón de la Frontera	0.12	Santiponce	0.09
Las Navas de la Concepción	0.06	El Saucedo	0.14
Olivares	0.09	Sevilla	0.09
Osuna	0.12	Tocina	0.08
Los Palacios y Villafranca	0.10	Tomares	0.09
Palomares del Río	0.09	Umbrete	0.09
Paradas	0.10	Utrera	0.10
Pedrera	0.13	Valencina de la Concepción	0.09
El Pedroso	0.06	Villamanrique de la Condesa	0.10
Peñaflor	0.09	Villanueva del Ariscal	0.09
Pilas	0.09	Villanueva del Río y Minas	0.08
Pruna	0.14	Villanueva de San Juan	0.13
La Puebla de Cazalla	0.11	Villaverde del Río	0.08
La Puebla de los Infantes	0.08	El Viso del Alcor	0.09
La Puebla del Río	0.09		

PROVINCIA DE SORIA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Abejar	0.05	Bliecos	0.05
Adradas	0.04	Borjabad	0.05
Ágreda	0.06	Borobia	0.05
Alconaba	0.05	Buberos	0.05
Alcubilla de Avellaneda	0.04	Buitrago	0.05
Alcubilla de las Peñas	0.04	Burgo de Osma-Ciudad de Osma	0.04
Aldealafuente	0.05	Cabrejas del Campo	0.05
Aldealices	0.06	Cabrejas del Pinar	0.04
Aldealpozo	0.06	Calatañazor	0.05
Aldealseñor	0.06	Candilichera	0.05
Aldehuela de Periañez	0.06	Cañamaque	0.04
Las Aldehuelas	0.07	Carabantes	0.05
Alentisque	0.04	Carrascosa de la Sierra	0.06
Aliud	0.05	Casarejos	0.04
Almajano	0.06	Castilfrío de la Sierra	0.06
Almaluez	0.04	Castilruiz	0.06
Almarza	0.06	Centenera de Andaluz	0.04
Almazán	0.04	Cerbón	0.07
Almazul	0.05	Cidones	0.05
Almenar de Soria	0.05	Cigudosa	0.06
Arancón	0.06	Cihuela	0.04
Arcos de Jalón	0.04	Ciria	0.05
Arévalo de la Sierra	0.06	Cirujales del Río	0.06
Ausejo de la Sierra	0.06	Coscurita	0.04
Barca	0.04	Covaleda	0.04
Bayubas de Abajo	0.04	Cubilla	0.04
Bayubas de Arriba	0.04	Cubo de la Solana	0.05
Beratón	0.05	Cueva de Ágreda	0.05
Blacos	0.05	Dévanos	0.06

PROVINCIA DE SORIA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Deza	0.04	Montenegro de Cameros	0.05
Duruelo de la Sierra	0.04	Morón de Almazán	0.04
Escobosa de Almazán	0.04	Muriel de la Fuente	0.05
Espeja de San Marcelino	0.04	Muriel Viejo	0.04
Espejón	0.04	Nafría de Ucero	0.04
Estepa de San Juan	0.06	Narros	0.06
Frechilla de Almazán	0.04	Navaleno	0.04
Fuentearmegil	0.04	Nepas	0.05
Fuentecantos	0.05	Nolay	0.05
Fuentelmonge	0.04	Noviercas	0.05
Fuentelsaz de Soria	0.06	Ólvega	0.05
Fuentepinilla	0.04	Oncala	0.07
Fuentes de Magaña	0.07	Pinilla del Campo	0.05
Fuentestrún	0.06	Portillo de Soria	0.05
Garray	0.05	La Póveda de Soria	0.06
Golmayo	0.05	Pozalmuro	0.06
Gómara	0.05	Quintana Redonda	0.05
Herrera de Soria	0.04	Quintanas de Gormaz	0.04
Hinojosa del Campo	0.05	Quiñonería	0.05
La Losilla	0.06	Los Rábanos	0.05
Magaña	0.06	Rebollar	0.05
Maján	0.04	Renieblas	0.05
Matalebreras	0.06	Reznos	0.05
Matamala de Almazán	0.04	Rioseco de Soria	0.05
Medinaceli	0.04	Rollamienta	0.05
Miño de Medinaceli	0.04	El Royo	0.05
Molinos de Duero	0.05	Salduero	0.05
Momblona	0.04	San Felices	0.06
Monteagudo de las Vicarías	0.04	San Leonardo de Yagüe	0.04

PROVINCIA DE SORIA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
San Pedro Manrique	0.07	Valdelagua del Cerro	0.06
Santa Cruz de Yanguas	0.06	Valdemaluque	0.04
Santa María de Huerta	0.04	Valdenebro	0.04
Santa María de las Hoyas	0.04	Valdeprado	0.07
Serón de Nágima	0.05	Valderrodilla	0.04
Soliedra	0.04	Valtajeros	0.07
Soria	0.05	Velamazán	0.04
Sotillo del Rincón	0.05	Velilla de la Sierra	0.05
Suellacabras	0.06	Velilla de los Ajos	0.04
Tajahuerce	0.06	Viana de Duero	0.05
Tajueco	0.04	Villaciervos	0.05
Talveila	0.04	Villar del Ala	0.05
Tardelcuende	0.05	Villar del Campo	0.06
Taroda	0.04	Villar del Río	0.07
Tejado	0.05	Los Villares de Soria	0.06
Torlengua	0.04	Villasayas	0.04
Torreblacos	0.05	Villaseca de Arciel	0.05
Torrubia de Soria	0.05	Vinuesa	0.05
Trévago	0.06	Vizmanos	0.06
Ucero	0.04	Vozmediano	0.05
Vadillo	0.04	Yanguas	0.07
Valdeavellano de Tera	0.05	Yelo	0.04
Valdegeña	0.06		

PROVINCIA DE TARRAGONA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Aiguamúrcia	0.06	Les Borges del Camp	0.06
Albinyana	0.06	Bot	0.04
L'Albiol	0.06	Botarell	0.06
Alcanar	0.05	Bràfim	0.06
Alcover	0.06	Cabacés	0.05
Aldover	0.05	Cabra del Camp	0.06
L'Aldea	0.05	Calafell	0.06
L'Aleixar	0.06	Camarles	0.05
Alfara de Carles	0.05	Cambrils	0.06
Alforja	0.06	La Canonja	0.06
Alió	0.06	Capafonts	0.06
Almóster	0.06	Capçanes	0.05
Altafulla	0.06	Castellvell del Camp	0.06
L'Ametlla de Mar	0.05	El Catllar	0.06
L'Ampolla	0.05	La Sénia	0.04
Amposta	0.05	Colldejou	0.06
Arbolí	0.06	Conesa	0.05
L'Arboç	0.07	Constantí	0.06
L'Argentera	0.06	Corbera d'Ebre	0.04
Arnes	0.04	Cornudella de Montsant	0.05
Ascó	0.04	Creixell	0.06
Banyeres del Penedès	0.07	Cunit	0.07
Barberà de la Conca	0.06	Deltebre	0.05
Bellmunt del Priorat	0.05	Duesaigües	0.06
Bellvei	0.07	L'Espluga de Francolí	0.05
Benifallet	0.05	Falset	0.05
Benissanet	0.05	La Fatarella	0.04
La Bisbal de Falset	0.04	La Febró	0.06
La Bisbal del Penedès	0.06	La Figuera	0.05
Blancafort	0.05	Figuerola del Camp	0.06
Bonastre	0.06	Flix	0.04

PROVINCIA DE TARRAGONA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Forès	0.05	Móra d'Ebre	0.05
Freginals	0.05	Móra la Nova	0.05
La Galera	0.05	El Morell	0.06
Gandesa	0.04	La Morera de Montsant	0.05
Garcia	0.05	La Nou de Gaià	0.06
Els Garidells	0.06	Nulles	0.06
Ginestar	0.05	La Palma d'Ebre	0.04
Godall	0.05	Els Pallaresos	0.06
Gratallops	0.05	Passanant i Belltall	0.05
Els Guiamets	0.05	Paüls	0.04
Horta de Sant Joan	0.04	Perafort	0.06
El Lloar	0.05	El Perelló	0.05
Llorac	0.05	Les Piles	0.05
Llorenç del Penedès	0.07	El Pinell de Brai	0.05
Margalef	0.04	Pira	0.06
Marçà	0.05	El Pla de Santa Maria	0.06
Mas de Barberans	0.04	La Pobla de Mafumet	0.06
Masdenverge	0.05	La Pobla de Montornès	0.06
Masllorç	0.06	Poboleda	0.05
La Masó	0.06	El Pont d'Armentera	0.06
Maspujols	0.06	Pontils	0.06
El Masroig	0.05	Porrera	0.05
El Milà	0.06	Pradell de la Teixeta	0.06
Miravet	0.05	Prades	0.05
El Molar	0.05	Prat de Comte	0.04
Montblanc	0.06	Pratdip	0.06
Montbrió del Camp	0.06	Puigpelat	0.06
Montferri	0.06	Querol	0.06
El Montmell	0.06	Rasquera	0.05
Mont-ral	0.06	Renau	0.06
Mont-roig del Camp	0.06	Reus	0.06

PROVINCIA DE TARRAGONA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
La Riba	0.06	La Torre de l'Espanyol	0.04
Riba-roja d'Ebre	0.04	Torredembarra	0.06
La Riera de Gaià	0.06	Torroja del Priorat	0.05
Riudecanyes	0.06	Tortosa	0.05
Riudecols	0.06	Ulldecona	0.05
Riudoms	0.06	Ulldemolins	0.05
Rocafort de Queralt	0.05	Vallclara	0.05
Roda de Barà	0.06	Vallfogona de Riucorb	0.05
Rodonyà	0.06	Vallmoll	0.06
Roquetes	0.05	Valls	0.06
El Rourell	0.06	Vandellòs i l'Hospitalet de l'Infant	0.06
Salomó	0.06	El Vendrell	0.06
Salou	0.06	Vespella de Gaià	0.06
Sant Carles de la Ràpita	0.05	Vilabella	0.06
Sant Jaume d'Enveja	0.05	Vilallonga del Camp	0.06
Sant Jaume dels Domenys	0.07	Vilanova d'Escornalbou	0.06
Santa Bàrbara	0.05	Vilanova de Prades	0.05
Santa Coloma de Queralt	0.06	Vilaplana	0.06
Santa Oliva	0.07	Vila-rodona	0.06
Sarral	0.06	Vila-seca	0.06
Savallà del Comtat	0.05	Vilaverd	0.06
La Secuita	0.06	La Vilella Alta	0.05
La Selva del Camp	0.06	La Vilella Baixa	0.05
Senan	0.05	Vilalba dels Arcs	0.04
Solivella	0.05	Vimbodí i Poblet	0.05
Tarragona	0.06	Vinebre	0.04
Tivenys	0.05	Vinyols i els Arcs	0.06
Tivissa	0.05	Xerta	0.05
La Torre de Fontaubella	0.06		

PROVINCIA DE TERUEL			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Ababuj	0.04	Blesa	0.04
Abejuela	0.06	Bordón	0.04
Aguatón	0.05	Bronchales	0.04
Aguilar del Alfambra	0.04	Bueña	0.05
Alba	0.05	Burbáguena	0.04
Albarracín	0.05	Cabra de Mora	0.05
Albentosa	0.05	Calamocha	0.04
Alcaine	0.04	Calomarde	0.05
Alcalá de la Selva	0.04	Camañas	0.05
Alfambra	0.05	Camarena de la Sierra	0.05
Aliaga	0.04	Camarillas	0.04
Almohaja	0.04	Caminreal	0.04
Alobras	0.05	Cantavieja	0.04
Alpeñés	0.04	Cañada de Benatanduz	0.04
Allepuz	0.04	Cañada Vellida	0.04
Allueva	0.04	Cañizar del Olivar	0.04
Anadón	0.04	Cascante del Río	0.05
Arcos de las Salinas	0.05	Castejón de Tornos	0.04
Arens de Lledó	0.04	Castel de Cabra	0.04
Argente	0.05	El Castellar	0.05
Bádenas	0.04	Castellote	0.04
Báguena	0.04	Cedrillas	0.05
Bañón	0.04	Celadas	0.05
Barrachina	0.04	Cella	0.05
Bea	0.04	Corbalán	0.05
Beceite	0.04	Cortes de Aragón	0.04
Bello	0.04	Cosa	0.04
Bezas	0.05	Cretas	0.04
Blancas	0.04	Crivillén	0.04

PROVINCIA DE TERUEL			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
La Cuba	0.04	La Iglesuela del Cid	0.04
Cubla	0.05	Jabaloyas	0.05
Cucalón	0.04	Jarque de la Val	0.04
El Cuervo	0.05	Jorcas	0.04
Cuevas de Almudén	0.04	Josa	0.04
Cuevas Labradas	0.05	Lagueruela	0.04
Ejulve	0.04	Lanzuela	0.04
Escorihuela	0.05	Libros	0.05
Escucha	0.04	Lidón	0.05
Estercuel	0.04	Linares de Mora	0.04
Ferreruela de Huerva	0.04	Loscós	0.04
Fonfría	0.04	Lledó	0.04
Formiche Alto	0.05	Maicas	0.04
Fortanete	0.04	Manzanera	0.05
Frías de Albarracín	0.05	Martín del Río	0.04
Fuenferrada	0.04	La Mata de los Olmos	0.04
Fuentes Calientes	0.04	Mezquita de Jarque	0.04
Fuentes Claras	0.04	Mirambel	0.04
Fuentes de Rubielos	0.05	Miravete de la Sierra	0.04
Fuentespalda	0.04	Molinos	0.04
Galve	0.04	Monforte de Moyuela	0.04
Gargallo	0.04	Monreal del Campo	0.04
Gea de Albarracín	0.05	Monroyo	0.04
Griegos	0.04	Montalbán	0.04
Guadalaviar	0.04	Monteagudo del Castillo	0.04
Gúdar	0.04	Monterde de Albarracín	0.05
Hinojosa de Jarque	0.04	Mora de Rubielos	0.05
La Hoz de la Vieja	0.04	Moscardón	0.05
Huesa del Común	0.04	Mosqueruela	0.04

PROVINCIA DE TERUEL			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Muniesa	0.04	Rubiales	0.05
Noguera de Albarracín	0.04	Rubielos de la Cérida	0.04
Nogueras	0.04	Rubielos de Mora	0.05
Nogueruelas	0.05	Salcedillo	0.04
Obón	0.04	Saldón	0.05
Odón	0.04	San Agustín	0.05
Ojos Negros	0.04	San Martín del Río	0.04
Olba	0.05	Santa Cruz de Nogueras	0.04
Orihuela del Tremedal	0.04	Santa Eulalia	0.05
Orrios	0.05	Sarrión	0.05
Palomar de Arroyos	0.04	Segura de los Baños	0.04
Pancrudo	0.04	Seno	0.04
Las Parras de Castellote	0.04	Singra	0.05
Peñarroya de Tastavins	0.04	Terriente	0.05
Peracense	0.04	Teruel	0.05
Peralejos	0.05	Toril y Masegoso	0.05
Perales del Alfambra	0.05	Tormón	0.05
Pítarque	0.04	Tornos	0.04
Plou	0.04	Torralba de los Sisones	0.04
El Pobo	0.04	Torrecilla del Rebollar	0.04
Pozondón	0.05	Torre de Arcas	0.04
Pozuel del Campo	0.04	Torre de las Arcas	0.04
La Puebla de Valverde	0.05	Torrelacárcel	0.05
Puertomingalvo	0.04	Torre los Negros	0.04
Ráfales	0.04	Torremocha de Jiloca	0.05
Rillo	0.04	Torres de Albarracín	0.05
Riodeva	0.05	Torrijas	0.05
Ródenas	0.04	Torrijo del Campo	0.04
Royuela	0.05	Tramacastiel	0.05

PROVINCIA DE TERUEL			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Tramacastilla	0.05	Villanueva del Rebollar de la Sierra	0.04
Tronchón	0.04	Villar del Cobo	0.04
Utrillas	0.04	Villar del Salz	0.04
Valacloche	0.05	Villarluengo	0.04
Valbona	0.05	Villarquemado	0.05
Valdecuenca	0.05	Villarroya de los Pinares	0.04
Valdelinares	0.04	Villastar	0.05
Valderrobres	0.04	Villel	0.05
El Vallecillo	0.05	Visiedo	0.05
Veguillas de la Sierra	0.05	Vivel del Río Martín	0.04
Villafranca del Campo	0.04	La Zoma	0.04
Villahermosa del Campo	0.04		

PROVINCIA DE VALENCIA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Ademuz	0.05	Algimia de Alfara	0.07
Ador	0.15	Alginet	0.14
Atzeneta d'Albaida	0.16	Almàssera	0.10
Agullent	0.16	Almiserà	0.15
Alaquàs	0.12	Almoines	0.15
Albaida	0.16	Almussafes	0.14
Albal	0.13	Alpuente	0.06
Albalat de la Ribera	0.15	L'Alqueria de la Comtessa	0.15
Albalat dels Sorells	0.10	Andilla	0.06
Albalat dels Tarongers	0.07	Anna	0.16
Alberic	0.15	Antella	0.16
Alborache	0.12	Aras de los Olmos	0.05
Alboraya	0.11	Aielo de Malferit	0.16
Albuixech	0.10	Aielo de Rugat	0.15
Alcàsser	0.13	Ayora	0.11
Alcàntera de Xúquer	0.16	Barxeta	0.16
Alzira	0.15	Barx	0.15
Alcublas	0.06	Bèlgida	0.16
L'Alcúdia	0.14	Bellreguard	0.15
L'Alcúdia de Crespins	0.16	Bellús	0.16
Aldaia	0.11	Benagéber	0.06
Alfajar	0.12	Benaguasil	0.09
Alfauir	0.15	Benavites	0.07
Alfara de la Baronia	0.07	Beneixida	0.16
Alfara del Patriarca	0.10	Benetússer	0.12
Alfarp	0.14	Beniarjó	0.15
Alfarrasí	0.16	Beniatjar	0.16
Algar de Palancia	0.07	Benicolet	0.15
Algemesí	0.15	Benicull de Xúquer	0.15

PROVINCIA DE VALENCIA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Benifairó de les Valls	0.07	Casas Altas	0.05
Benifairó de la Valldigna	0.15	Casas Bajas	0.05
Benifaió	0.14	Casinos	0.07
Beniflá	0.15	Castelló de Rugat	0.16
Benigánim	0.16	Castellonet de la Conquesta	0.15
Benimodo	0.14	Castielfabib	0.05
Benimuslem	0.15	Catadau	0.14
Beniparrell	0.13	Catarroja	0.12
Benirredrà	0.15	Caudete de las Fuentes	0.06
Benisanó	0.09	Cerdà	0.16
Benissoda	0.16	Cofrentes	0.10
Benisuera	0.16	Corbera	0.15
Bétera	0.09	Cortes de Pallás	0.12
Bicorp	0.14	Cotes	0.16
Bocairent	0.16	Cullera	0.15
Bolbaite	0.15	Chelva	0.06
Bonrepòs i Mirambell	0.10	Chella	0.16
Bufali	0.16	Chera	0.07
Bugarra	0.08	Cheste	0.11
Buñol	0.11	Chiva	0.11
Burjassot	0.10	Chulilla	0.07
Calles	0.06	Daimús	0.14
Camporrobles	0.05	Domeño	0.08
Canals	0.16	Dos Aguas	0.13
Canet d'En Berenguer	0.08	L'Eliana	0.09
Carcaixent	0.15	Emperador	0.10
Càrcer	0.16	Enguera	0.16
Carlet	0.14	L'Ènova	0.16
Carrícola	0.16	Estivella	0.07

PROVINCIA DE VALENCIA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Estubeny	0.16	Llocnou de la Corona	0.12
Faura	0.07	Llocnou de Sant Jeroni	0.15
Favara	0.15	Llanera de Ranes	0.16
Fontanars dels Alforins	0.16	Llaurí	0.15
Fortaleny	0.15	Llombai	0.14
Foios	0.10	La Llosa de Ranes	0.16
La Font d'En Carròs	0.15	Macastre	0.12
La Font de la Figuera	0.15	Manises	0.11
Fuenterrobles	0.05	Manuel	0.16
Gandia	0.15	Marines	0.08
Gátova	0.07	Massalavés	0.15
Gavarda	0.16	Massalfassar	0.10
Genovés	0.16	Massamagrell	0.09
Gestalgar	0.08	Massanassa	0.12
Gilet	0.08	Meliana	0.10
Godella	0.10	Millares	0.13
Godolleta	0.12	Miramar	0.15
La Granja de la Costera	0.16	Mislata	0.11
Guadasséquies	0.16	Mogente/Moixent	0.16
Guadassuar	0.15	Moncada	0.10
Guardamar de la Safor	0.14	Montserrat	0.13
Higueruelas	0.06	Montaverner	0.16
Jalance	0.10	Montesa	0.16
Jarafuel	0.11	Montixelvo/Montichelvo	0.15
Llíria	0.08	Montroy	0.13
Loriguilla	0.11	Museros	0.09
Losa del Obispo	0.07	Náquera	0.08
Llutxent	0.15	Navarrés	0.15
Llocnou d'En Fenollet	0.16	Novelé/Novetlè	0.16

PROVINCIA DE VALENCIA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Oliva	0.15	Quesa	0.15
Olocau	0.08	Rafelbuñol/Rafelbunyol	0.09
L'Olleria	0.16	Rafelcofer	0.15
Ontinyent	0.16	Rafelguaraf	0.16
Otos	0.16	Ráfol de Salem	0.16
Paiporta	0.12	Real de Gandía	0.15
Palma de Gandía	0.15	Real	0.13
Palmera	0.15	Requena	0.07
El Palomar	0.16	Riba-roja de Túria	0.10
Paterna	0.11	Riola	0.15
Pedralba	0.09	Rocafort	0.10
Petrés	0.08	Rotglà i Corberà	0.16
Picanya	0.12	Rótova	0.15
Picassent	0.13	Rugat	0.15
Piles	0.15	Sagunto/Sagunt	0.08
Pinet	0.15	Salem	0.16
Polinyà de Xúquer	0.15	San Antonio de Benagéber	0.10
Potrís	0.15	Sant Joanet	0.16
La Pobla de Farnals	0.09	Sedaví	0.12
La Pobla del Duc	0.16	Segart	0.08
Puebla de San Miguel	0.05	Sellent	0.16
La Pobla de Vallbona	0.09	Sempere	0.16
La Pobla Llarga	0.16	Senyera	0.16
Puig	0.09	Serra	0.08
Puçol	0.09	Siete Aguas	0.10
Quart de les Valls	0.07	Silla	0.13
Quart de Poblet	0.11	Simat de la Valldigna	0.15
Quartell	0.07	Sinarcas	0.06
Quatretonda	0.16	Sollana	0.14

PROVINCIA DE VALENCIA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Sot de Chera	0.08	Vallada	0.16
Sueca	0.15	Vallanca	0.05
Sumacàrcer	0.15	Vallés	0.16
Tavernes Blanques	0.10	Venta del Moro	0.06
Tavernes de la Valldigna	0.15	Villalonga	0.15
Teresa de Cofrentes	0.11	Vilamarxant	0.09
Terrateig	0.15	Villanueva de Castellón	0.16
Titaguas	0.06	Villar del Arzobispo	0.07
Torrebaja	0.05	Villargordo del Cabriel	0.05
Torrella	0.16	Vinalesa	0.10
Torrent	0.12	Xàtiva	0.16
Torres Torres	0.07	Xeraco	0.15
Tous	0.15	Xeresa	0.15
Tuéjar	0.06	Xirivella	0.11
Turís	0.12	Yátova	0.12
Utiel	0.06	La Yesa	0.06
Valencia	0.11	Zarra	0.11

PROVINCIA DE VIZCAYA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Abadiño	0.05	Derio	0.04
Abanto y Ciérvana-Abanto Zierbena	0.04	Dima	0.05
Ajangiz	0.05	Durango	0.05
Alonsotegi	0.04	Ea	0.05
Amorebieta-Etxano	0.04	Elantxobe	0.05
Amoroto	0.05	Elorrio	0.05
Arakaldo	0.04	Erandio	0.04
Arantzazu	0.04	Ereño	0.05
Areatza	0.04	Ermua	0.05
Arrankudiaga	0.04	Errigoiti	0.04
Arratzu	0.05	Etxebarri	0.04
Arrieta	0.04	Etxebarria	0.05
Arrigorriaga	0.04	Forua	0.05
Artea	0.04	Fruiz	0.04
Artzentales	0.04	Galdakao	0.04
Atxondo	0.05	Galdames	0.04
Aulesti	0.05	Gamiz-Fika	0.04
Bakio	0.04	Garai	0.05
Balmaseda	0.04	Gatika	0.04
Barakaldo	0.04	Gautegiz Arteaga	0.05
Barrika	0.04	Gernika-Lumo	0.05
Basauri	0.04	Getxo	0.04
Bedia	0.04	Gizaburuaga	0.05
Berango	0.04	Gordexola	0.04
Bermeo	0.04	Gorliz	0.04
Berriatua	0.05	Güeñes	0.04
Berriz	0.05	Ibarrangelu	0.05
Bilbao	0.04	Igorre	0.04
Busturia	0.04	Ispaster	0.05

PROVINCIA DE VIZCAYA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Iurreta	0.05	Ondarroa	0.06
Izurtza	0.05	Orozko	0.04
Karrantza Harana/Valle de Carranza	0.04	Ortuella	0.04
Kortezubi	0.05	Otxandio	0.05
Larrabetzu	0.04	Plentzia	0.04
Laukiz	0.04	Portugalete	0.04
Leioa	0.04	Santurtzi	0.04
Lekeitio	0.05	Sestao	0.04
Lemoa	0.04	Sondika	0.04
Lemoiz	0.04	Sopelana	0.04
Lezama	0.04	Sopuerta	0.04
Loiu	0.04	Sukarrieta	0.04
Mallabia	0.05	Trucios-Turtzioz	0.04
Mañaria	0.05	Ubide	0.05
Markina-Xemein	0.05	Ugao-Miraballes	0.04
Maruri-Jatabe	0.04	Urduliz	0.04
Mendata	0.05	Urduña/Orduña	0.04
Mendexa	0.05	Valle de Trápaga-Trapagaran	0.04
Meñaka	0.04	Zaldibar	0.05
Morga	0.04	Zalla	0.04
Mundaka	0.04	Zamudio	0.04
Mungia	0.04	Zaratamo	0.04
Munitibar-Arbatzegi Gerrickaitz	0.05	Zeanuri	0.05
Murueta	0.04	Zeberio	0.04
Muskiz	0.04	Zierbena	0.04
Muxika	0.04	Ziortza-Bolibar	0.05
Nabarniz	0.05		

PROVINCIA DE ZAMORA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Alcañices	0.05	Cubillos	0.04
Alcubilla de Nogales	0.04	Cubo de Benavente	0.04
Alfaraz de Sayago	0.04	Entrala	0.04
Almaraz de Duero	0.04	Espadañedo	0.04
Almeida de Sayago	0.04	Faramontanos de Tábara	0.04
Andavías	0.04	Fariza	0.04
Arcos de la Polvorosa	0.04	Fermoselle	0.04
Argañín	0.04	Ferreras de Abajo	0.04
Arquillinos	0.04	Ferreras de Arriba	0.04
Arrabalde	0.04	Ferreruela	0.05
Asturianos	0.04	Figueruela de Arriba	0.04
Ayoó de Vidriales	0.04	Fonfría	0.05
Barcial del Barco	0.04	Fresno de la Polvorosa	0.04
Benavente	0.04	Fresno de Sayago	0.04
Bermillo de Sayago	0.04	Friera de Valverde	0.04
Bretó	0.04	Fuente Encalada	0.04
Bretocino	0.04	Galende	0.05
Brime de Sog	0.04	Gallegos del Río	0.05
Brime de Urz	0.04	Gamones	0.04
Burganes de Valverde	0.04	Granja de Moreruela	0.04
Cabañas de Sayago	0.04	Granucillo	0.04
Calzadilla de Tera	0.04	Hermisende	0.05
Camarzana de Tera	0.04	La Hiniesta	0.04
Carbajales de Alba	0.05	Justel	0.04
Carbellino	0.04	Losacino	0.05
Cerecinos del Carrizal	0.04	Losacio	0.05
Cernadilla	0.04	Lubián	0.05
Cobrerros	0.05	Luelmo	0.04
Coomonte	0.04	Mahide	0.04

PROVINCIA DE ZAMORA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Maire de Castroponce	0.04	Palacios del Pan	0.04
Manganeses de la Lampreana	0.04	Palacios de Sanabria	0.04
Manganeses de la Polvorosa	0.04	Pedralba de la Pradería	0.05
Manzanal de Arriba	0.04	Peñausende	0.04
Manzanal del Barco	0.04	Peque	0.04
Manzanal de los Infantes	0.04	El Perdigón	0.04
Matilla de Arzón	0.04	Pereruela	0.04
Melgar de Tera	0.04	Perilla de Castro	0.04
Micereces de Tera	0.04	Pías	0.05
Milles de la Polvorosa	0.04	Piedrahita de Castro	0.04
Molezuelas de la Carballeda	0.04	Pino del Oro	0.04
Mombuey	0.04	Pobladura del Valle	0.04
Monfarracinos	0.04	Porto	0.05
Montamarta	0.04	Pozuelo de Tábara	0.04
Moral de Sayago	0.04	Puebla de Sanabria	0.05
Moraleja de Sayago	0.04	Pública de Valverde	0.04
Morales del Vino	0.04	Quintanilla de Urz	0.04
Morales de Rey	0.04	Quiruelas de Vidriales	0.04
Morales de Valverde	0.04	Rabanales	0.05
Moralina	0.04	Rábano de Aliste	0.05
Moreruela de los Infanzones	0.04	Requejo	0.05
Moreruela de Tábara	0.04	Riofrío de Aliste	0.05
Muelas de los Caballeros	0.04	Rionegro del Puente	0.04
Muelas del Pan	0.04	Roales	0.04
Muga de Sayago	0.04	Robleda-Cervantes	0.05
Navianos de Valverde	0.04	Roelos de Sayago	0.04
Olmillos de Castro	0.04	Rosinos de la Requejada	0.04
Otero de Bodas	0.04	Salce	0.04
Pajares de la Lampreana	0.04	Samir de los Caños	0.05

PROVINCIA DE ZAMORA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
San Cebrián de Castro	0.04	Vega de Tera	0.04
San Cristóbal de Entreviñas	0.04	Vegalatrave	0.05
San Justo	0.05	Videmala	0.05
San Pedro de Ceque	0.04	Villabrázaro	0.04
San Pedro de la Nave-Almendra	0.04	Villadepera	0.04
Santa Colomba de las Monjas	0.04	Villafáfila	0.04
Santa Cristina de la Polvorosa	0.04	Villaferrueña	0.04
Santa Croya de Tera	0.04	Villageriz	0.04
Santa Eufemia del Barco	0.04	Villalba de la Lampreana	0.04
Santa María de la Vega	0.04	Villalcampo	0.04
Santa María de Valverde	0.04	Villanázar	0.04
Santibáñez de Tera	0.04	Villanueva de Azoague	0.04
Santibáñez de Vidriales	0.04	Villanueva de Campeán	0.04
Santovenia	0.04	Villanueva de las Peras	0.04
San Vicente de la Cabeza	0.05	Villardecierros	0.04
San Vitero	0.05	Villar del Buey	0.04
Tábara	0.04	Villardiegua de la Ribera	0.04
La Torre del Valle	0.04	Villarrín de Campos	0.04
Torregamones	0.04	Villaseco del Pan	0.04
Torres del Carrizal	0.04	Villaveza del Agua	0.04
Trabazos	0.05	Villaveza de Valverde	0.04
Trefacio	0.05	Viñas	0.05
Uña de Quintana	0.04	Zamora	0.04
Valcabado	0.04		

PROVINCIA DE ZARAGOZA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Abanto	0.04	Ateca	0.04
Acered	0.04	Badules	0.04
Agón	0.04	Bagüés	0.09
Aguarón	0.04	Balconchán	0.04
Aguilón	0.04	Bárboles	0.04
Ainzón	0.04	Bardallur	0.04
Aladrén	0.04	Belmonte de Gracián	0.04
Alarba	0.04	Berdejo	0.05
Alberite de San Juan	0.04	Berruoco	0.04
Albeta	0.04	Biel	0.06
Alcalá de Moncayo	0.05	Bijuesca	0.05
Alconchel de Ariza	0.04	Biota	0.05
Aldehuela de Liestos	0.04	Bisimbre	0.04
Alfamén	0.04	Boquiñeni	0.04
Alhama de Aragón	0.04	Bordalba	0.04
Almonacid de la Sierra	0.04	Borja	0.04
La Almunia de Doña Godina	0.04	Brea de Aragón	0.04
Alpartir	0.04	Bubierca	0.04
Ambel	0.05	Bulbunte	0.04
Anento	0.04	Bureta	0.04
Aniñón	0.04	El Buste	0.04
Añón de Moncayo	0.05	Cabolafuente	0.04
Aranda de Moncayo	0.04	Calatayud	0.04
Arándiga	0.04	Calatorao	0.04
Ardisa	0.05	Calcena	0.05
Ariza	0.04	Calmarza	0.04
Artieda	0.09	Campillo de Aragón	0.04
Asín	0.05	Carenas	0.04
Atea	0.04	Cariñena	0.04

PROVINCIA DE ZARAGOZA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Castejón de Alarba	0.04	Gallur	0.04
Castejón de las Armas	0.04	Godojos	0.04
Castejón de Valdejasa	0.04	Gotor	0.04
Castiliscar	0.06	Grisel	0.05
Cervera de la Cañada	0.04	Herrera de los Navarros	0.04
Cerveruela	0.04	Ibdes	0.04
Cetina	0.04	Illueca	0.04
Cimballa	0.04	Isuerre	0.08
Clarés de Ribota	0.04	Jaraba	0.04
Codos	0.04	Jarque	0.04
Contamina	0.04	Langa del Castillo	0.04
Cosuenda	0.04	Layana	0.05
Cubel	0.04	Lechón	0.04
Las Cuerlas	0.04	Litago	0.05
Chodes	0.04	Lituénigo	0.05
Daroca	0.04	Lobera de Onsella	0.08
Ejea de los Caballeros	0.04	Longares	0.04
Embid de Ariza	0.04	Longás	0.08
Encinacorba	0.04	Lucena de Jalón	0.04
Épila	0.04	Luceni	0.04
Erla	0.04	Luesia	0.06
Los Fayos	0.05	Luesma	0.04
Fombuena	0.04	Lumpiaque	0.04
El Frago	0.05	Luna	0.04
El Frasno	0.04	Magallón	0.04
Fréscano	0.04	Mainar	0.04
Fuendejalón	0.04	Malanquilla	0.05
Fuentes de Jiloca	0.04	Maleján	0.04
Gallocanta	0.04	Malón	0.05

PROVINCIA DE ZARAGOZA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Maluenda	0.04	Nuévalos	0.04
Mallén	0.04	Olvés	0.04
Manchones	0.04	Orcajo	0.04
Mara	0.04	Orera	0.04
Marracos	0.04	Orés	0.05
Mesones de Isuela	0.04	Oseja	0.05
Mezalocha	0.04	Paniza	0.04
Mianos	0.09	Paracuellos de Jiloca	0.04
Miedes de Aragón	0.04	Paracuellos de la Ribera	0.04
Moneva	0.04	Pedrola	0.04
Monreal de Ariza	0.04	Las Pedrosas	0.04
Monterde	0.04	Piedratajada	0.04
Montón	0.04	Los Pintanos	0.09
Morata de Jalón	0.04	Plasencia de Jalón	0.04
Morata de Jiloca	0.04	Pleitas	0.04
Morés	0.04	Plenas	0.04
Moros	0.04	Pomer	0.05
Moyuela	0.04	Pozuel de Ariza	0.04
Mozota	0.04	Pozuelo de Aragón	0.04
Muel	0.04	Pradilla de Ebro	0.04
La Muela	0.04	Puendeluna	0.04
Munébrega	0.04	Purujosa	0.05
Murero	0.04	Retascón	0.04
Murillo de Gállego	0.06	Ricla	0.04
Navardún	0.08	Romanos	0.04
Nigüella	0.04	Rueda de Jalón	0.04
Nombrevilla	0.04	Ruesca	0.04
Novallas	0.05	Sádaba	0.05
Novillas	0.04	Salillas de Jalón	0.04

PROVINCIA DE ZARAGOZA			
Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )	Municipio	PGA ( $T_R = 475$ )
Salvatierra de Esca	0.10	Tosos	0.04
San Martín de la Virgen de Moncayo	0.05	Trasmoz	0.05
Santa Cruz de Grío	0.04	Trasobares	0.05
Santa Cruz de Moncayo	0.05	Uncastillo	0.06
Santa Eulalia de Gállego	0.05	Undués de Lerda	0.09
Santed	0.04	Urrea de Jalón	0.04
Sabiñán	0.04	Urriés	0.09
Sediles	0.04	Used	0.04
Sestrica	0.04	Valdehorna	0.04
Sierra de Luna	0.04	Val de San Martín	0.04
Sigüés	0.10	Valpalmas	0.04
Sisamón	0.04	Valtorres	0.04
Sos del Rey Católico	0.08	Velilla de Jiloca	0.04
Tabuena	0.04	Vera de Moncayo	0.05
Talamantes	0.05	Vierlas	0.05
Tarazona	0.05	La Vilueña	0.04
Tauste	0.04	Villadoz	0.04
Terrer	0.04	Villafeliche	0.04
Tierga	0.05	Villalba de Perejil	0.04
Tobed	0.04	Villalengua	0.04
Torralba de los Frailes	0.04	Villanueva de Jiloca	0.04
Torralba de Ribota	0.04	Villanueva de Huerva	0.04
Torralbilla	0.04	Villar de los Navarros	0.04
Torrehermosa	0.04	Villarreal de Huerva	0.04
Torrelapaja	0.05	Villarroya de la Sierra	0.04
Torrellas	0.05	Villarroya del Campo	0.04
Torrijo de la Cañada	0.04	Vistabella	0.04

<b>CIUDADES AUTÓNOMAS DE CEUTA Y MELILLA</b>			
<b>Municipio</b>	<b>PGA (<math>T_R = 475</math>)</b>	<b>Municipio</b>	<b>PGA (<math>T_R = 475</math>)</b>
Ceuta	0.10	Melilla	0.16



## Bibliografía

- Abrahamson, N. A. y Silva, W. J. (2008):** *Abrahamson & Silva NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters*. PEER Report Draft v2, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA, 380 pp.
- Abrahamson, N.; Atkinson, G.; Boore, D.; Bozorgnia, Y.; Campbell, K.; Chiou, B.; Idriss, I.; Silva, W. y Youngs, R. (2008):** «Comparison of the NGA ground-motion relations», *Earthquake Spectra*, 24, pp. 45-66.
- Aki, K. (1965):** «Maximum likelihood estimate of  $b$  in the formula  $\log N = a - b \cdot M$  and its confidence limits». *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ.*, 43, pp. 237-239.
- Akkar, S. y Boomer, J. J. (2010):** «Empirical Equations for the Prediction of PGA, PGV, and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region, and the Middle East». *Seism. Res. Lett.*, 81, pp. 195-206.
- Allen, T. I. y Wald, D. J. (2009):** *Evaluation of ground-motion modeling techniques for use in Global ShakeMap: a critique of instrumental ground-motion prediction equations, peak ground motion to macroseismic intensity conversions, and macroseismic intensity predictions in different tectonic settings*, U.S. Geological Survey Open-File Report 2009-1047 114, Golden, USA.
- Ambraseys, N. N.; Simpson, K. A. y Bommer, J. J. (1996):** «Prediction of Horizontal Response Spectra in Europe». *Earthquake Eng. Struct. Dynamics*, 25, pp. 371-400.
- Ambraseys, N. N.; Douglas, J.; Sarma, S. K. y 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». *Bull. Earthquake Eng.*, 3, pp. 1-53.
- Anguita, F. y Hernán, F. (2000):** «The Canary Islands origin: a unifying model». *Journal Volcanol. Geotherm. Res.*, 103, pp. 1-26.
- Aoudia, A.; Vaccari, F.; Suhadolc, P. y Meghraoui, M. (2000):** «Seismogenic Potential and Earthquake Hazard Assessment in the Tell Atlas of Algeria». *Journal of Seismology*, 4, pp. 79-98.
- Arias, A. (1970):** «A measure of earthquake intensity». En R. J. Hansen, ed., *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 438-483.
- Atkinson, G. M. y Boore, D. M. (2003):** «Empirical ground-motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93, pp. 1703-1729.
- Atkinson, G. M. y Boore, D. M. (2011):** «Modifications to Existing Ground-Motion Prediction Equations in Light of New Data». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 101, pp. 1121-1135, DOI: 10.1785/0120100270.
- Atkinson, G. M. y Kaka, S. I. (2007):** «Relationships between felt intensity and instrumental ground motion in the central United States and California». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 97, pp. 497-510.
- Autran, A.; Blés, J. L.; Combes, Pu.; Cushíno, M.; Dominique, E.; Durouchoux, Ch.; Gariel, J. C.; Goula, X. y Moi-Iammadjum, B. & Terrrier (1998):** *Probabilistic seismic hazard assessment in France. Part One: Seismotectonic zo-*

- nation (CDROM). Proc. Eleventh European Conference on Earthquake Engineering, París.
- Badal, J.; Samardjijeva, E. y Payo, G. (2000):** «Moment Magnitudes for Early (1923-1961) Instrumental Iberian Earthquakes». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, pp. 1161-1173.
- Baize, S.; Cushing, E. M.; Lemeille, F. y Jomard, H. (2012):** «Updated seismotectonic zoning scheme of Metropolitan France, with reference to geologic and seismotectonic data». *Bulletin de la Société Géologique de France* (en prensa).
- Bakun, W. H. (1999):** «Seismic Activity of the San Francisco Bay Region». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, pp. 764-784.
- Bakun, W. H. y Wentworth, C. M. (1997):** «Estimating Earthquake Location and Magnitude from Seismic Intensity Data». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 87, pp. 1502-1521.
- Banda, E.; Dañobeitia, J. J.; Suriñach, E. y Ansonge J. (1981):** «Features of crustal structure under the Canary Islands», *Earth Planet. Sci. Lett.*, 55, pp. 11-24.
- Batló, J.; Stich, D.; Palombo, B.; Macias, R. y Morales, J. (2008):** «The 1951  $M_w$  5.2 and  $M_w$  5.3 Jaén, Southern Spain, Earthquake Doublet Revisited». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 98, pp. 1535-1545.
- Batló, J.; Stich, D.; Macia, R. y Morales, J. (2010):** «Moment Tensor Inversion for the 5 July 1930, Montilla Earthquake (Southern Spain)». *Seism. Res. Lett.*, 81, pp. 724-731.
- Beauval, C. (2003):** *Analyse des incertitudes dans une estimation probabiliste de l'alea sismique, exemple de la France*. Tesis doctoral, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 161 pp.
- Bender, B. (1983):** «Maximum likelihood estimation of b values magnitude grouped data». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, pp. 831-851.
- Benito, B. y Gaspar-Escribano, J. M. (2007):** «Ground motion characterization and seismic hazard assessment in Spain: context, problems and recent developments». *Journal Seismol*, 11, pp. 433-452.
- Benito, B.; Gaspar-Escribano, J. M.; Martínez-Díaz, J. J.; García Rodríguez, M. J.; Jiménez Peña, E.; Canora, C. y Álvarez-Gómez, J. A. (2008a):** «The RISMUR Project: Seismic Risk assessment of the Murcia province (SE Spain)». *Bolletino di Geofisica Teorica e Applicata*, 49 (1), pp. 3-15.
- Benito, B.; Gaspar-Escribano, J. M.; Martínez-Díaz, J. J.; Gómez, R.; Canora, C. y Álvarez, J. A. (2008b):** *Evaluación de la peligrosidad sísmica (emplazamientos en roca)*. Vol. 1. Evaluación del Riesgo Sísmico en Navarra. Protección Civil de Emergencias de la Comunidad Foral de Navarra. Internal report.
- Benito, B.; Navarro, M.; Vidal, F.; Gaspar-Escribano, J. M.; García, M. J. y Martínez-Solares, J. M. (2010):** «A new seismic hazard assessment in the region of Andalusia (Southern Spain)». *Bull. Earthq. Eng.*, 8, pp. 739-766.
- Berge-Thierry, C.; Cotton, F.; Scotti, O.; Griot-Pommer, D. A. y Fukushima, Y. (2003):** «New Empirical Response Spectral Attenuation Laws for Moderate European Earthquakes». *Journal Earthquake Eng.*, 7, pp. 193-222.
- Bernal, A. (2011):** «Anexo I del informe técnico IGN-PSE. ZF. P03» (archivo pdf: ANEXO I-doc.2.3.0. Descrip. Zon. B y A. pdf, 41 pp.). Inédito.
- Bernreuter, D. L.; Savy, J. B.; Mensing, R. W. y Chen, J. C. (1989):** «Seismic Hazard Characterization of 69 Nuclear Power Plant Sites East of the Rocky Mountains». *Lawrence Livermore National Laboratory, U. S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-5250*.
- Beyer, K. y Bommer, J. J. (2006):** «Relationships between Median Values and between Aleatory Variabilities for Different Definitions of the Horizontal Component of Motion». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 96, pp. 1512-1522.
- Bindi, D.; Pacor, F.; Luzi, L.; Puglia, R.; Massa, M.; Ameri, G. y Paolucci, R. (2011):** «Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database». *Bull. Earthquake Eng.*, doi: 10.1007/s10518-011-9313-z.
- Bommer, J. J.; Scherbaum, F.; Bungum, H.; Cotton, F.; Abrahamson, N. y Sabetta, F. (2005):** «On the use of logic trees for ground-motion predictions equations in seismic-hazard analysis». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2, pp. 377-389.
- Boore, D. M. y 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, pp. 99-138.
- Bosshard, E. y MacFarlane, D. J. (1970):** «Crustal structure of the western Canary Islands from

- seismic refraction and gravity data». *J. Geophys. Res.*, 75, pp. 4901-4918.
- Bragato, P. L. y Slejko, D. (2005):** «Empirical Ground-Motion Attenuation Relations for the Eastern Alps in the Magnitude Range 2.5-6.3». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 95, pp. 252-276.
- Budnitz, R. J.; Apostolakis, G.; Boore, D. M.; Cluff, L. S.; Coppersmith, K. J.; Cornell, C. A. y Morris, P. A. (1997):** «Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: Guidance on uncertainty and use of experts. Senior Seismic Hazard Analysis Committee». *United States Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6372*.
- Bufo, E. y Udías, A. (2007):** Sismicidad y mecanismo focal de los terremotos de la región Cabo de San Vicente-Argelia. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 20 (3-4): 301-310.
- Bufo, E., y Udías, A. (2010):** Azores-Tunisia, a tectonically complex plate boundary. *Advances in Geophysics*. Vol. 52, chap 3, pp. 139-182. 2010 Elsevier Inc. ISSN: 0065-2687. doi: 10.1016/S0065-2687(10)52003-X.
- Bufo, E.; Udías, A. y Colombás, M. A. (1988):** «Seismicity, source mechanisms and seismotectonics of the Azores-Gibraltar plate boundary». *Tectonophysics*, 152, pp. 89-118.
- Cabañas, L.; Benito, B.; Cabañas, C.; López, M.; Gómez, P.; Jiménez, M. E. y Álvarez, S., (1999):** «Banco de Datos de Movimiento Fuerte del Suelo MFS. Aplicaciones». *Física de la Tierra*, 11, pp. 111-137.
- Campbell, K. W. y Bozorgnia, Y. (2008):** *Campbell-Bozorgnia NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectra ground motion parameters*. PEER Report 2007/02, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA, 240 pp.
- Campos-Costa, A.; Sousa, M. L. y Carvalho, A. (2008):** *Seismic zonation for portuguese national Annex of Eurocode 8*. The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- Carbó, A.; Muñoz-Martín, A.; Llanes, P.; Álvarez J. y ZEE Working Group (2003):** «Gravity analysis offshore the Canary Islands from a systematic survey». *Mar. Geophys. Res.* 24, pp. 113-127.
- Carreño, E.; Benito, B.; Martínez Solares, J. M.; Cabañas, L.; Giner, J.; Murphy, P.; López, C.; Del Fresno, C.; Alcalde, J. M.; Gaspar-Escribano, J. M.; Antón, R.; Martínez-Díaz, J.; Cesca, S.; Izquierdo, A.; Sánchez Cabañero, J. G. y Expósito, P. (2008):** «The 7 June 2007  $m_{bLg}$  4.2 Escopete Earthquake: An Event with Significant Ground Motion in a Stable Zone (Central Iberian Peninsula)». *Seism. Res. Lett.* 79, pp. 820-829.
- Castellaro, S. y Bormann, P. (2007):** «Performance of Different Regression Procedures on the Magnitude Conversion Problem». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 97, pp. 1167-1175.
- Castellaro, S.; Mulargia, F. y Kagan, Y. Y. (2006):** «Regression problems for magnitudes». *Geophys. J. Int.*, 165, pp. 913-930.
- Cauzzi, C. y Faccioli, E. (2008):** «Broadband (0.05 s to 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records». *Journal of Seismology*, 12, pp. 453-475.
- Chiou, B. y 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, 219 pp.
- Cornell, C. A. (1968):** «Engineering seismic risk analysis». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 58, pp. 1583-1606.
- Cotton, F.; Pousse, G.; Bonilla, F. y Scherbaum, F. (2008):** «On the discrepancy of recent European ground-motion observations and predictions from empirical models: Analysis of KiK-net accelerometric data and point-source stochastic simulations». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 98, pp. 2244-2261.
- Cramer, C. H. (2001):** «A seismic hazard uncertainty analysis for the New Madrid seismic zone». *Eng. Geol.*, 62, pp. 251-266.
- Crespo, M. J. (2011):** *Análisis de la peligrosidad sísmica en la Península Ibérica con un método basado en estimadores de densidad Kernel*. Tesis doctoral. E. T. S. I. Caminos, Canales y Puertos (UPM).
- Cua, G.; Wald, D. J.; Allen, T. I.; Garcia, D.; Worden, C. B.; Gerstenberger, M.; Lin, K. y Marano K. (2010):** «Best Practices» for Using *Macroseismic Intensity and Ground Motion Intensity Conversion Equations for Hazard and*

- Loss Models in GEMI*. GEM Technical Report 2010-4. GEM Foundation, Pavia, Italy.
- Dash, B. P. y Bosshard, E., (1969):** «Seismic and gravity investigations around the Western Canary Islands». *Earth Planet. Sci. Lett.* 7, pp. 169-177.
- De Vicente, G.; Vegas, R.; Guimerà, J.; Muñoz Martín, A.; Casas, A.; Martín Velázquez, S.; Heredia, N.; Rodríguez-Fernández, L. R.; González Casado, J. M.; Cloetingh, S.; Andeweg, B.; Álvarez J. y Olaiz A. (2004):** «Evolución geodinámica cenozoica de la placa ibérica y su registro en el antepaís». En *Geología de España* (Vera, J. A. ed.), pp. 597-602. SGE-IGME, Madrid.
- De Vicente, G.; Cloetingh, S.; Muñoz-Martin, A.; Olaiz, A.; Stich, D.; Vegas, R.; Galindo-Zaldívar, J. y Fernandez-Lozano, J. (2008):** «Inversion of moment tensor focal mechanisms for active stresses around the microcontinent Iberia: Tectonic implications». *Tectonics*, 27, doi: 10.1029/2006TC002093.
- Delavaud, E.; Cotton, F.; Akkar, S.; Scherbaum, F.; Danciu, L.; Beauval, C.; Drouet, S.; Douglas, J.; Basili, R.; Sandikkaya, M. A.; Segou, M.; Faccioli, E. y Theodoulidis, N. (2012a):** «Toward a ground-motion logic tree for probabilistic seismic hazard assessment in Europe». *Journal of Seismology*, 16, pp. 3-451.
- Delavaud, E.; Scherbaum, F.; Kuehn, N. y Allen, T. (2012b):** «Testing the Global Applicability of Ground Motion Prediction Equations for Active Shallow Crustal Regions». *Bull. Seism. Soc. Am.* 102, pp. 707-721, doi: 10.1785/0120110113.
- Delgado, J.; Peláez, J. A.; Tomás, R.; Estévez, A.; López Casado, C.; Doménech, C. y Cuenca, A. (2006):** «Evaluación de la susceptibilidad de las laderas a sufrir inestabilidades inducidas por terremotos. Aplicación a la cuenca de drenaje del río Serpis (Provincia de Alicante)». *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 19 (3-4).
- Dominique, P.; Sabourault, P. y Le Brun, B. (2001):** *Réseau Accélérométrique Permanent (RAP) —Année 2001—*. Rapport complémentaire. Final report BRGM/RP51406-FR, BRGM, France.
- Dreger, D. S. y Helmberger, D. V. (1993):** «Determination of source parameters at regional distances with three-component sparse network data». *J. Geophys. Res.* 98, pp. 8107-8125.
- Drouet, S.; Scherbaum, F.; Cotton, F. y Souriau, A. (2007):** «Selection and ranking of ground motion models for seismic hazard analysis in the Pyrenees». *Journal of Seismology*, 11, pp. 87-100.
- Engdahl, E. R. y Villaseñor, A. (2002):** *Global seismicity: 1900-1999*. En Lee, W. H. K. and others, eds., *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*: San Diego, Calif., Academic Press, v. 81 (A).
- Esteva, L. (1968):** *Bases para la formulación de decisiones de diseño sísmico*. Tesis doctoral e informe 182. Univ. Autónoma Nacional de México.
- Faccioli, E. y Cauzzi, C. (2006):** *Macroseismic intensities for seismic scenarios, estimated from instrumentally based correlations*. Proceedings 1.<sup>st</sup> ECEES, paper num.: 596. Geneva, 2006.
- Faenza, L. y A. Michelini (2010):** «Regression analysis of MCS intensity and ground motion parameters in Italy and its application in Shake-Map». *Geophys. J. Int.*, 180, pp. 1138-1152.
- Fix, E. y Hodges, J. (1951):** «Discriminatory Analysis, Nonparametric Estimation: Consistency Properties». *Tech. rep., USAF School of Aviation Medicine*, report núm. 4. Project núm. 21 (49-004). Randolph Field, Texas.
- Fleta, J.; Escuer, J.; Goula, X.; Olivera, C.; Combes, Ph.; Grellet, B. y Granier, Th. (1996):** «Zonación Tectónica, primer estadio de la zonación sismotectónica del NE de la Península Ibérica (Catalunya)». *GEOGACETA*, 20, pp. 853-856.
- Frankel, A. (1994):** «Implications of felt area-magnitude relations for earthquake scaling and the average frequency of perceptible ground motion». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, pp. 462-465.
- Frankel, A. (1995):** *Mapping Seismic Hazard in the Central and Eastern United States*. *Seism. Res. Lett.* 66, 4, pp. 8-21.
- Fukao, Y. (1973):** «Thrust Faulting at Lithospheric Plate Boundary. The Portugal Earthquake of 1969». *Earth & Planetary Science Lett.* 18, pp. 205-216.
- García, D.; Singh, S. K.; Herráiz, M.; Ordaz, M. y Pacheco, J. F. (2005):** «Inslab earthquakes of central Mexico: peak ground-motion parameters and response spectra». *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 95, pp. 2272-2282.
- García-Blanco, R. M. (2009):** *Caracterización del*

- potencial sísmico y su influencia en la determinación de la peligrosidad sísmica probabilística. Tesis doctoral, E.T.S.I. Minas (UPM).
- García-Mayordomo, J. (2005):** *Caracterización y análisis de la peligrosidad sísmica en el sureste de España*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 379 pp.
- García-Mayordomo, J. y 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, pp. 55-58.
- García-Mayordomo, J. e Insua-Arévalo, J. M. (2010):** *Zonaciones Sismogénicas en Iberia y Magreb*. Documento interno IGME-UCM, v3, revisado en 15/10/2012, 27 pp.
- García-Mayordomo, J.; Gaspar-Escribano, J. M. y Benito, B. (2007):** «Seismic Hazard Assessment of the Province of Murcia (SE Spain): Analysis of Source Contribution to Hazard». *Journal of Seismology*, 11, pp. 453-471.
- 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. y Moreno, X. (2010a):** *Modelo integral de zonas sismogénicas de España*. Resúmenes de la 1.<sup>a</sup> Reunión Ibérica sobre Fallas Activas y Paleosismología, Sigüenza, España.
- García-Mayordomo, J.; Insua-Arévalo, J. M.; Martínez-Díaz, J. J.; Jiménez-Díaz, A.; Álvarez-Gómez, J. A.; Pérez-López, R.; Rodríguez-Pascua, M. A.; Martín-González, F.; Giner-Robles, J.; Masana, E.; Nemser, E. S. y Cabral, J. (2010b):** «Base de datos de fallas activas de Iberia (primera fase): objetivos y estructura preliminar. Contribución de la Geología al Análisis de la Peligrosidad Sísmica». En Insua-Arévalo, J. M. y Martín-González, F. eds. *Resúmenes de la 1.<sup>a</sup> Reunión Ibérica sobre Fallas Activas y Paleosismología*, pp. 189-192.
- 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. y Baize, S. (2012a):** *Modelo de Zonas Sismogénicas para el Cálculo de la Peligrosidad Sísmica en España*. 7.<sup>a</sup> Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Donostia (España), 2012.
- García-Mayordomo, J.; Martín-Banda, R.; Insua-Arévalo, J. M.; Álvarez-Gómez, J. A.; Cabañas, L.; Cantavella, J. V.; Crespo, M. J.; Pereira Dias, R.; Moniz, C.; Pascual, G.; Alfageme, S. y Rodríguez-Escudero, E. (2012b):** *La Base de Datos de Fallas Activas Cuaternarias de Iberia (QAFI v.2): Características, Aplicaciones y Problemas*. 7.<sup>a</sup> Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Donostia (España), 2012.
- 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. y QAFI Compilers. (2012c):** «La Base de Datos de Fallas Activas en el Cuaternario de Iberia (QAFI v.2.0)». *Journal of Iberian Geology*, 38 (1), pp. 285-302.
- García-Mayordomo, J.; Martín-Alfageme, R.; Martín-Banda, R.; Insua-Arévalo, J. M.; Martínez-Díaz, J. J.; Jiménez-Díaz, A.; Rodríguez-Escudero, E.; Rodríguez-Peces, M. A.; Cabañas-Rodríguez, L. y Gaspar-Escribano J. M. (2012d):** *Seismogenic fault-source characterization in SE Spain: Implications for probabilistic seismic hazard assessment*. 15<sup>th</sup> World Conference of Earthquake Engineering, Lisboa.
- Gardner, J. K. y Knopoff, L. (1974):** «Is the Sequence of Earthquakes in Southern California, with Aftershocks Removed, Poissonian?». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 64, pp. 1363-1367.
- Gaspar-Escribano, J. M.; Jiménez Peña, M. E.; Pastor, J. J. y Benito, B. (2008):** *Sobre la medida del tamaño del terremoto y la peligrosidad sísmica en España*. 6.<sup>a</sup> Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica.
- Giardini, D.; Grünthal, G.; Shedlock, K. y Zhang, P. (2003):** *The GSHAP Global Seismic Hazard Map* (Lee, W.; Kanamori, H. y Jennings, P., eds.)

- International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, IASPEI.
- Giner Caturla, J.J. (1996):** *Sismicidad y Peligrosidad Sísmica en la Comunidad Autónoma Valenciana*. Tesis doctoral, Universidad de Granada. 295 pp.
- Gómez-Guillamón, F. (1957):** *Sobre construcción antisísmica*. Instituto geográfico y Catastral, 66 pp.
- González de Vallejo, L. I.; García-Mayordomo, J. e Insua, J. M. (2006):** «Probabilistic Seismic-Hazard Assessment of the Canary Islands». *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 96, pp. 2040-2049.
- Gregor, N. J.; Silva, W. J.; Wong, I. G. y Youngs, R. R. (2002):** «Ground motion attenuation relationships for Cascadia subduction zone megathrust earthquakes based on a stochastic finite-fault model». *Bull. Seism. Soc. Am.* 92, pp. 1923-1932.
- Gutenberg, B. y Richter, C. F. (1944):** «Frequency of earthquakes in California». *Bull. Seism. Soc. Am.* 34, pp. 185-188.
- Gutenberg, B. y Richter, C. F. (1956):** «Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration (second paper)». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 46, pp. 105-145.
- Hamdache, M. (1998):** «Seismic Hazard Assessment for the Main Seismogenic Zones in North Algeria». *Pure Appl. Geophys.* 152, pp. 281-314.
- Hamdache, M.; Peláez, J. A.; Talbi, A. y López Casado, C. (2010):** «A Unified catalog of Main Earthquakes for Northern Algeria from A. D. 856 to 2008». *Seism. Res. Lett.* 81, pp. 732-739.
- Hanks, T. C. y H. Kanamori, H. (1979):** «A moment magnitude scale». *J. Geophys. Res.*, 84, pp. 23480-23500.
- Harbi A.; Meghraoui, M. y Maouche, S. (2010):** «The Djidjelli (Algeria) earthquakes of 21 and 22 August 1856 (10 VIII, IX) and related tsunami effects Revisited». *Journal of Seismology*, doi: 10.1007/s10950-010-9212-9 (published online).
- Havskov, J. y Ottemöller, L. (1999):** «Seisan earthquake analysis software». *Seism. Res. Lett.*, 70, pp. 532-534.
- Hernán F. (2004):** «Origen del Archipiélago Canario». *Geología de España* (Vera, J. A., ed.), SGE-IGME, pp. 667-671, Madrid.
- Idriss, I. M. (2008):** «An NGA Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated by Shallow Crustal Earthquakes». *Earthquake Spectra*, 24, pp. 217-242.
- IGME (2012):** *QAFI: Quaternary Active Faults Database of Iberia*. Versión online: [www.igme.es/infoigme/aplicaciones/QAFI/](http://www.igme.es/infoigme/aplicaciones/QAFI/) (último acceso octubre de 2012).
- IGN (2012):** *Tipo de Magnitud*. Servicio de Información Sísmica IGN, [www.ign.es/ign/head/sismoTipoMagnitud.do](http://www.ign.es/ign/head/sismoTipoMagnitud.do) (último acceso octubre de 2012).
- Ingeniería y Prospección (1992):** *Estudio Sísmico de Navarra*. Gobierno de Navarra, Servicio de Protección Civil, Memoria, 103 pp., 7 planos + 5 apéndices.
- International Seismological Centre (2010):** *Online Bulletin* ([www.isc.ac.uk](http://www.isc.ac.uk)). Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2010.
- IPEEE (1993):** *IPEEE seismic hazard study for Spanish nuclear power plants. Part I-Generic study, SMT/93/001R*. Westinghouse Energy Systems Europe, EQE Engineering Inc., Geomatrix Consultants Inc., 89 pp. + figures, tables y references.
- ISO/IEC 98 (1993):** *Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*.
- Isobe, T.; Feigelson, E. D.; Akritas, M. G. y Babu, G. J. (1990):** «Linear Regression in Astronomy I». *The Astrophysical Journal*, 364, pp. 104-113.
- Jiménez, M. J.; García-Fernández, M.; GSHAP Ibero-Maghreb Working Group (Chadi, M.; El Fou I, D.; Izquierdo, A.; Martínez-Solares, J. M.; Sousa-Oliveira, C.; Tadili, B. A.) (2001):** «Seismic Hazard Assessment in the Ibero-Maghreb Region». *Annali Geofis.*, 42, pp. 1057-1066.
- Johnston, A. (1989):** The seismicity of stable continental interiors. *Earthquakes at North-Atlantic Passive Margins: Neotectonics and Postglacial Rebound*, (S. Gregersen y P. W. Basham, Editores), Kluwer Academic Publishers.
- Johnston, A. C. (1996a):** «Seismic moment assessment of earthquakes in stable continental regions-I. Instrumental seismicity». *Geophys. J. Int.*, 124, pp. 381-414.
- Johnston, A. C. (1996b):** «Seismic moment assessment of earthquakes in stable continental regions-II. Historical seismicity». *Geophys. J. Int.*, 125, pp. 639-678.

- Johnston, A. C. (1996c):** «Seismic moment assessment of earthquakes in stable continental regions-III. New Madrid 1811-1812. Charleston 1886 and Lisbon 1755». *Geophys. J. Int.*, 126, pp. 314-344.
- Joyner, W. B. y Boore, D. M. (1993):** «Methods for regression analysis of strong-motion data». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, pp. 469-487.
- Joyner, W. B. y Boore, D. M. (1994):** «Methods for regression analysis of strong-motion data». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, pp. 955-956.
- Kanno, T.; Narita, A.; Morikawa, N.; Fujiwara, H. y Fukushima, Y. (2006):** «A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 96, pp. 879-897, doi: 10.1785/0120050138.
- Lin, P. S. y Lee, C. T. (2008):** «Ground-Motion Attenuation Relationships for Subduction-Zone Earthquakes in Northeastern Taiwan». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 98, pp. 220-240, doi: 10.1785/0120060002.
- López Arroyo, A. y Udías, A. (1972):** «Aftershock Sequence and Focal Parameters of February 28, 1969 Earthquake of the Azores-Gibraltar Fracture Zone». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 63, pp. 699-720.
- López Casado, C.; Sanz de Galdeano, C.; Delgado, J. y Peinado, M. A. (1995):** «The Parameter *b* in the Betic Cordillera, the Rif and Neighbouring Areas. Its Relations with the Tectonics of the Region». *Tectonophysics*, 248, pp. 277-292.
- López Casado, C.; Molina, S.; Delgado, J. y Pealáez, J. A. (2000):** «Attenuation of Intensity with Epicentral Distance in the Iberian Peninsula». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, pp. 34-47.
- López Fernández, C. (2008):** «Actividad sísmica, zonación sismotectónica y peligrosidad sísmica en el noroeste de la Península Ibérica». *Nova Terra*, 35, 293 pp.
- López, C. (2008):** *Nuevas Fórmulas de Magnitud para la Península Ibérica y su entorno*. Trabajo de Investigación del Máster de Geofísica y Meteorología. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Físicas, Dpto. de Geofísica y Meteorología.
- López, C. y Muñoz, D. (2003):** «Fórmulas de magnitudes los boletines y catálogos españoles». *Física de la Tierra*, 15, pp. 49-71.
- Lussou, P.; Bard, P. Y. y Cotton, F. (2001):** «Site design regulation codes: contribution of KNET DATA to site effect evaluation». *Journal of Earthquake*, 5, pp. 13-33.
- McGuire, R. K. (2004):** *Seismic hazard and risk analysis*. Earthquake Engineering research Institute. Oakland, 221 pp.
- Marin, S.; Avouac, J. P.; Nicolas, M. y Schlupp, A. (2004):** «A Probabilistic Approach to Seismic Hazard in Metropolitan France». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94, pp. 2137-2163.
- Martín Martín, A. J. (1983):** *Riesgo sísmico en la Península Ibérica*. Tesis Doctoral, 2 tomos, 235 pp. + figuras y tablas. Instituto Geográfico Nacional, Madrid.
- Martín Martín, A. J. y Blázquez, R. (1981):** *Evaluación del riesgo sísmico en la presa de El Limonero (Málaga)*. Control y Geología. S. A. Madrid.
- Martínez-Díaz (2012):** Anexo I del informe técnico IGN-PSE.ZF.F01 (archivo pdf: ANEXO I, doc. 2.4. Descrip. Zon. GM *et al.*, en pdf, 19 pp. Inédito.
- Martínez Solares, J. M. (2003):** «Sismicidad histórica de la Península Ibérica». *Física de la Tierra*, 15, pp. 13-28.
- Martínez-Solares, J. M. y López Arroyo, A. (1999):** *Nuevas aportaciones para el cálculo de la atenuación sísmica en la zona de Azores-Gibraltar. Implicaciones en la actual Norma Sismorresistente*. Tomo 1.º, pp. 383-391. 1.º Congreso Nac. Ing. Sísmica, Murcia.
- Martínez Solares, J. M. y López Arroyo, A. (2004):** «The great historical 1755 earthquake. Effects and damage in Spain». *Journal of Seismology*, 8, pp. 275-294.
- Martínez Solares, J. M. y Mezcua, J. (2002).** *Catálogo Sísmico de la Península Ibérica (800 a.C.-1900)*. Monografía núm. 18, Instituto Geográfico Nacional. 253 pp.
- McGuire, R. K. (2008):** «Probabilistic seismic hazard analysis: Early history». *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 37, pp. 329-338.
- Mezcua, J. (1982):** *Catálogo General de Isosistas de la Península Ibérica*. Publicación 202, Instituto Geográfico Nacional, Madrid.
- Mezcua, J. y Martínez Solares, J. M. (1983):** *Sismicidad del área Ibero-Mogrebí*. Publicación 203, 301 pp., Instituto Geográfico Nacional, Madrid.
- Mezcua, J.; Galán, J.; Rueda, J. J.; Martínez-**

- Solares, J. M. y Buforn, E. (1990):** *Sismotectónica de las Islas Canarias, estudio del terremoto del 9 de mayo de 1989 y su serie de réplicas*. Publicación técnica núm. 23, 24 pp. Instituto Geográfico Nacional, Madrid.
- Mezcua, J.; Buforn, E.; Udías, A. y Rueda, J. (1992):** «Seismotectonics of the Canary Islands». *Tectonophysics*, 208, pp. 447-452.
- Mezcua, J.; Rueda, J. y García Blanco, R. M. (2004):** «Reevaluation of historic earthquakes in Spain». *Seism. Res. Lett.*, 75, pp. 75-81.
- Mezcua, J.; García Blanco, R. M. y Rueda, J. J. (2008):** «On the Strong Ground Motion Attenuation in Spain». *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 98, pp. 1343-1353.
- Mezcua, J.; Rueda, J. y García Blanco, R. M. (2011):** «A new probabilistic seismic hazard study of Spain». *Natural Hazards*, doi: 10.1007/s11069-011-9819-3.
- Molina, S. (1998):** *Sismotectónica y peligrosidad sísmica del área de contacto entre Iberia y África*. Tesis Doctoral, 280 pp., Universidad de Granada.
- Muñoz, D. (1983):** *Estudio del riesgo sísmico en el sur y sureste de la Península Ibérica*. Tesis Doctoral, 117 pp., Universidad Complutense de Madrid.
- Muñoz, D. y Udías, A. (1992):** Earthquake occurrence and seismic zonation in South Spain. *Proceedings 10<sup>th</sup> World Conference Earthquake Engineering, Madrid*. Balkema, Rotterdam, vol. 1, pp. 483-487.
- Musson, R. M. W.; Grünthal, G. y Stucchi M. (2010):** «The comparison of macroseismic intensity scales». *Journal of Seismol.*, 14, pp. 413-428.
- National Earthquake Information Center (NEIC10) (2010):** *U. S. Geological Survey database*. En <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/>.
- Newmark, N. M. y Hall, W. J. (1973):** «Procedures and criteria for earthquake-resistant design. Building Practices for disaster mitigation». *Building Science Series*, 46, pp. 209-236. US department of Commerce, Washington DC.
- Norma de la Construcción Sismorresistente Española (NCSE-94) (1994):** «Norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación». Real Decreto 2543/1994, de 27 de diciembre, Publicado en el *BOE*, vol. 33, pp. 3935-3980.
- Norma de la Construcción Sismorresistente Española (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.
- Norme Tecnica per le Costruzioni (NTC) (2008):** «Norme Tecnica per le Costruzioni, Decree of the Minister of the Infrastructures, 14 January 2008». *Italian Official Gazette*, núm. 29, of 4 February 2008.
- Nuclenor, S. A. (1985):** «Nuevo estudio de revisión de la calificación sísmica del emplazamiento de la C. N. de Santa María de Garoña». *Temas SEP II-4*, núm. doc. 07.04.77/2.
- Nuttli, O. (1973):** «Seismic Wave attenuation and magnitude relations for Eastern North America». *J. Geophys. Res.* 78, pp. 876-885.
- Nuttli, O.; Bollinger, G. A. y Griffiths, D. W. (1979):** «On the relation between Modified Mercalli Intensity and body-wave magnitude». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 69, pp. 893-910.
- Olaiz, J.; Muñoz-Martín, A.; De Vicente, G.; Vegas, R. y Cloetingh, S. (2009):** European continuous active tectonic strain-stress map. *Tectonophysics*, doi:10.1016/j.tect.2008.06.023.
- Olivera, C.; Redondo, E.; Lambert, J.; Riera, A. y Roca, A. (2006):** *Els terratrèmols dels segles XIV i XV a Catalunya*. Barcelona-ICC 2006. ISBN 84-393-6961-1.
- Ordaz, M.; Aguilar, A. y Arboleda, J. (2007):** CRISIS2007. National University of Mexico (UNAM).
- Payo, G. y de Miguel, F. (1974):** «Magnitud de los sismos de la región ibérica a partir de la fase Lg». *Revista de Geofísica*, 33, pp. 159-174.
- Peláez Montilla, J. A. (2000):** *Agregación y desagregación de aceleraciones esperadas en la Península Ibérica utilizando sismicidad de fondo*. Tesis Doctoral, 183 pp., Universidad de Granada.
- Peláez Montilla, J. A. y López Casado, C. (2002):** «Seismic hazard estimate at the Iberian Peninsula». *Pure Appl. Geophys.*, 159, pp. 2699-2713.
- Peláez-Montilla, J. A.; Hamdache, M. y López Casado, C. (2003):** «Seismic hazard in Northern Algeria using spatially smoothed seismicity. Results for peak ground acceleration». *Tectonophysics*, 372, pp. 105-119.
- Peláez, J. A.; Delgado, J. y López Casado, C. (2005):**

- «A preliminary probabilistic seismic hazard assessment in terms of Arias intensity in south-eastern Spain». *Engineering Geology*, 77, pp. 139-151.
- Peláez Montilla, J. A.; Hamdache, M. y López Casado, C. (2006):** «Seismic Hazard in Terms of Spectral Accelerations and Uniform Hazard Spectra in Northern Algeria». *Pure Appl. Geophys.*, 163, pp. 119-135.
- Peláez, J. A.; Chourak, M.; Tadili, B. A.; Aït Brahim, L.; Hamdache, M.; López Casado, C. y Martínez Solares, J. M. (2007):** «A Catalog of Main Moroccan Earthquakes from 1045 to 2005». *Seism. Res. Lett.* 78, pp. 614-621.
- Pondrelli, S.; Ekstrom, G.; Morelli, A. y Primerano, S. (1999):** «Study of the source geometry for tsunamigenic events of the Euromediterranean area». *In international Conference on Tsunamis*, pp. 297-307, UNESCO books, París.
- Power, M.; Chiou, B.; Abrahamson, N.; Bozorgnia, Y.; Shantz, T. y Roblee, T. (2008):** «An Overview of the NGA Project». *Earthquake Spectra*, 24, 3 pp.
- Reasenbergh, P. (1985):** «Second-Order Moment of Central California Seismicity, 1969-1982». *J. Geophys. Res.*, 90, pp. 5479-5495.
- Rivas-Medina, A.; Santoyo, M. A.; Luzón, F.; Benito, B.; Gaspar-Escribano, J. M. y García-Jerez, A. (2012):** «Seismic Hazard and ground motion characterization at the Itoiz dam (Northern Spain)». *Pure Appl. Geophys.*, 169, pp. 1519-1537.
- Richter, C. F. (1958):** *Elementary Seismology*. W. H. Freeman, San Francisco.
- Rueda, J. (2009):** *Discriminación sísmica mediante el análisis de las señales generadas por explosiones y terremotos. Aplicación a la región suroeste de Europa-Norte de África*. Tesis Doctoral, ETSIA-UPM.
- Rueda, J. y Mezcua, J. (2001):** *Sismicidad, sismotectónica y peligrosidad sísmica en Galicia*. Instituto Geográfico Nacional. Publicación Técnica, núm. 35.
- Rueda, J. y Mezcua, J. (2002):** «Estudio del terremoto de 23 de septiembre de 2001 en Pego (Alicante). Obtención de una relación  $m_{bLg}-M_w$  para la Península Ibérica». *Rev. Soc. Geol. España*. 15 (3-4), pp. 159-173.
- Rueda, J. y Mezcua, J. (2005):** «Near-real-time Seismic Moment-tensor Determination in Spain». *Seism. Res. Lett.*, 76, pp. 455-465.
- Sabetta, F. y Pugliese, A. (1996):** «Estimation of Response Spectra and Simulation of Nonstationary Earthquake Ground Motions». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, pp. 337-352.
- Samardjieva, E.; Payo, G.; Badal, J. y López, C. (1997):** *Catalogue of Digital Historical Seismograms (1912-1962)*. Instituto Geográfico Nacional.
- Sanz de Galdeano, C. y López-Casado, C. (1988):** «Fuentes Sísmicas en el Ámbito Bético-Rifeño». *Revista de Geofísica*, 44, pp. 175-198.
- Schenk, V. (1989):** Achievements and probable trends in seismic hazard assessment. *Tectonophysics*, 167, pp. 157-169.
- Scherbaum, F.; Cotton, F. y Smit, P. (2004a):** «On the use of response spectral-reference data for the selection of ground-motion models for seismic hazard analysis: the case of rock motion». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94, pp. 2164-2185.
- Scherbaum, F.; Schmedes, J. y Cotton, F. (2004b):** «On the Conversion of Source-to-Site Distance Measures for Extended Earthquake Source Models». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94, pp. 1053-1069.
- Scherbaum, F.; Delavaud, E. y Riggelsen, C. (2009):** «Model Selection in Seismic Hazard Analysis: An Information-Theoretic Perspective». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 99, pp. 3234-3247.
- Scholz, C. H. (2002):** *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*, 2nd ed., Cambridge Univ. Press, New York.
- Secanell, R.; Goula, X.; Susagna, T.; Fleta, J. y Roca, A. (1999):** Mapa de zonas sísmicas de Cataluña. *Memorias Ier Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Murcia, 12-16 abril 1999.
- Secanell, R.; Goula, X.; Susagna, T.; Fleta, J. y Roca, A. (2004):** «Seismic hazard zonation of Catalonia, Spain, integrating random uncertainties». *Journal of Seismology*, 8, pp. 25-40.
- Secanell, R.; Bertil, D.; Martín, C.; Goula, X.; Susagna, T.; Tapia, M.; Dominique, P.; Carbon, D. y Fleta, J. (2008):** «Probabilistic seismic hazard assessment of the Pyrenean region». *Journal of Seismology*, 12, pp. 323-341.
- Sha, Y. y Bolt, B. A. (1980):** «The standard error of the magnitud-frequency  $b$  value». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72, pp. 1677-1687.
- Serpelloni, E.; Vannucci, G.; Pondrelli, S.; Arg-**

- nani, A.; Casula, G.; Anzidei, M.; Baldi, P. y Gasperini, P. (2007): Kinematics of the Western Africa-Eurasia plate boundary from focal mechanisms and GPS data. *Geophys. J. Int.* 169, pp. 1180-1200. doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03367.x
- Silverman, B. (1986): «Density Estimation for Statistics and Data Analysis». *Monographs on Statistics and Applied Probability*, 26. Chapman and Hall.
- Sousa, M. L. y Oliveira, C. S. (1997): Hazard assessment based on macroseismic data considering the influence of geological conditions. *Nat. Hazards* 14, pp. 207-225. doi: 10.1007/BF00128267.
- Sousa, M. L. y Campos-Costa, A. (2009): «Ground motion scenarios consistent with probabilistic seismic hazard disaggregation analysis. Application to Mainland Portugal». *Bull. Earthquake Eng.*, 7, pp. 127-147.
- SSHAC (Senior Seismic Hazard Analysis Committee) (1997): *Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts*. U. S. Nuclear Regulatory Commission report CR-6372, Washington DC.
- 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». *Proc. Microzonation Conf.*, Seattle, WA, pp. 897-909.
- Stich D.; Ammon, C. J. y Morales, J. (2003): «Moment tensor solutions for small and moderate earthquakes in the Ibero-Maghreb region». *J. Geophys. Res.*, 108, p. 2148, doi: 10.1029/2002JB002057, 2003.
- Stich D.; Batlló, J.; Morales, J.; Macià, R. y Di-neva, S. (2003): «Source parameters of the  $M_w = 6.1$ , 1910 Adra earthquake (southern Spain)». *Geophys. J. Int.*, 155, pp. 539-546.
- Stich D.; Batlló, J.; Macià, R.; Teves-Costa, P. y Morales, J. (2005): «Moment tensor inversion with single-component historical seismograms: The 1909 Benavente (Portugal) and Lambesc (France) earthquakes». *Geophys. J. Int.* 162, pp. 850-858.
- Stich D.; Martín, R. y Morales, J. (2010): «Moment tensor inversion for Iberia-Maghreb earthquakes 2005-2008». *Tectonophysics*, 483, pp. 390-398.
- Stirling, M. W.; McVerry, G. H. y Berryman, K. R. (2002): «A new seismic hazard model of New Zealand». *Bull. Seis. Soc. Am.*, 92, pp. 1878-1903.
- Stucchi M.; Rovida, A.; Gomez Capera, A. A.; Musson, R.; Papaioannou, Ch. y Batlló, J. (2010): *European Earthquake Catalogue (1000-1963;  $M > 5.8$ ). Proyecto Neries Deliverable D10-NA4*. EC project number: 026130.
- Susagna, M. T. y Goula X. (1999): *Atlas Sismic de Catalunya*. Vol. 1, ISBN:84-393-5035-X. ICC. Generalitat de Catalunya.
- Tapia, M. M. (2006): *Desarrollo y aplicación de métodos avanzados para la caracterización de la respuesta sísmica del suelo a escala regional y local*. PhD Thesis, 356 pp. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Tavakoli, B. y Pezeshk, S. (2005): «Empirical-Stochastic Ground-Motion Prediction for Eastern North America». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 95, pp. 2283-2296, doi: 10.1785/0120050030.
- Tapia, M.; Susagna, T. y Goula, X. (2007): Curvas predictivas del movimiento del suelo en el oeste del Mediterráneo. *Memorias 3.º Congreso Nac. de Ingeniería Sísmica*. Girona.
- Topozada, T. R. (1975): «Earthquake magnitude as a function of intensity data in California and western Nevada». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 65, pp. 1223-1238.
- Trifunac, M. D.; Lee, V. W. y Anderson, J. G. (1987): *Methods for introduction of geologic data into characterization of active faults and seismicity and upgrading of the URS technique*. Report NUREG/CR, vol. 2. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC.
- Tselentis, G. A. y Danciu, L. (2008): «Empirical relationships between Modified Mercalli Intensity and engineering ground-motion parameters in Greece». *BSSA*, 98 (4), pp. 1863-1875.
- Udiás, A. y López Arroyo A. (1970): «Body and Surface Wave Study of Source Parameters of the March 15, 1964 Spanish Earthquake». *Tectonophysics*, 9, pp. 323-346.
- Vanmarcke, E. H. y Lai, S-S. P. (1980): «Strong-motion duration and RMS amplitude of earthquake records». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 70, pp. 1293-1307.
- Veith K. F. y Clawson, G. E. (1972): «Magnitude from short period P-wave data». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 62, pp. 435-452.

- Vere-Jones, D. (1992):** «Statistical methods for the description and display of earthquake catalogs. In: Statistics in the Environmental and Earth Sciences». *Arnold Publishers*, pp. 220-246.
- Vilanova, S. P. y Fonseca, J. B. F. D. (2007):** «Probabilistic Seismic-hazard Assessment for Portugal». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 97, pp. 1702-1717.
- Vilanova, S. P.; Oliveira, C. S.; Brum da Silveira, A.; Madeira, J.; Nemser, E.; Fonseca, J. B. F. D.; Arvidsson, R.; Besana-Ostman, G. M.; Bezzeghoud, M.; Borges, J. F.; Cabral, J.; Carvalho, J.; Cunha, P. P.; Dias, R. P.; Carlos Lopes, F.; Perea, H. y Wong, I. (2010):** «New seismic source zone model for Portugal and Azores for use in project Share: methodology and preliminary results». *Contribución de la Geología al Análisis de la Peligrosidad Sísmica* (Insua-Arévalo y Martín-González, eds.), pp. 205-206, Sigüenza (Guadalajara, España).
- Wahlström, R. y Grünthal, G. (2000):** «Probabilistic seismic hazard assessment (horizontal PGA) for Sweden, Finland and Denmark using different logic tree approaches». *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, pp. 45-58.
- Watts, A. B. y Masson D. G. (1995):** «A giant landslide on the north flank of Tenerife, Canary Islands». *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 100, pp. 24-498.
- Watts A. B.; Pierce C.; Collier, J.; Dalwood, R.; Canales, J.P. y Henstock, T.J. (1997):** A seismic study of lithosphere flexure in the vicinity of Tenerife, Canary Islands. *Earth. Planet. Sci. Lett.* 146, pp. 431-447.
- Weichert, D. H. (1980):** «Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 70, pp. 1337-1346.
- Wells, D. L. y Coppersmith, K. J. (1994):** «New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, pp. 974-1002.
- Wesnousky, S. (1986):** «Earthquakes, quaternary faults, and seismic hazard in California». *J. Geophys. Res.*, 91, pp. 12587-12631.
- Wiemer, S. (2001):** «A Software Package to Analyze Seismicity: ZMAP». *Seism. Res. Lett.*, 72, pp. 374-383.
- Woo, G. (1996a):** Kernel Estimation Methods for Seismic Hazard Area Modelling. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, pp. 353-362.
- Woo, G. (1996b):** Seismic hazard program: KER-FRACT. Program Documentation.
- Worden, C. B.; Gerstenberger, M. C.; Rhoades, D. A. y Wald, D. J. (2012):** «Probabilistic Relationships between Ground-Motion Parameters and Modified Mercalli Intensity in California». *BSSA*, vol. 102, núm. 1, pp. 204-221.
- Youngs, R. R.; Chiou, S. J.; Silva, W. J. y Humphrey, J. R. (1997):** «Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes». *Seism. Res. Lett.*, 68, pp. 58-73.
- Zhao, J. X.; Zhang, J.; Asano, A.; Ohno, Y.; Oouchi, T.; Takahashi, T.; Ogawa, H.; Irikura, K.; Thio, H. K.; Somerville, P. G.; Fukushima, Y. y Fukushima, Y. (2006):** «Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period». *Bull. Seism. Soc. Am.*, 96, pp. 898-913, doi: 10.1785/0120050122.









