



Estimación de las posibles consecuencias de los terremotos históricos españoles en la actualidad: escenarios de riesgo PAGER para la gestión de emergencias sísmicas en España

J. Elez¹ · PG Silva^{1,4} · R. Pérez-López² · JL Giner-Robles³ · MA Rodríguez-Pascua^{1,4} · Y. Sánchez-Sánchez¹

Recibido: 26 de septiembre de 2024 / Aceptado: 13 de marzo de 2025 / Publicado en línea: 15 de mayo de 2025 © EI/
Los autor(es) 2025

Abstracto

Para influir en la concienciación pública sobre el riesgo sísmico en España y en la percepción que los responsables políticos tienen de dicho riesgo, así como para mejorar las medidas preventivas (desde mapas de riesgo y códigos de edificación hasta legislación), este trabajo (1) sintetiza las pérdidas y los daños experimentados en España en la historia y la actualidad, (2) explora escenarios empíricos de pérdidas mediante la aplicación del método USGS PAGER (Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response) a algunos de los terremotos históricos fuertes mejor estudiados en España (en concreto, modelizamos qué ocurriría si los terremotos de Torrevieja (1829, IX–X EMS-98/X ESI-07; 389 víctimas) y Arenas del Rey (1884, IX–X EMS-98/X ESI-07; 900 víctimas) se desencadenaran hoy), y (3) calcula el aumento del riesgo debido a los cambios de población durante la temporada turística. Todos los escenarios resultantes muestran consistentemente un nivel de respuesta sugerido a nivel internacional, acorde con el aumento relevante de la vulnerabilidad y la exposición experimentado en España desde mediados del siglo XX. Las valoraciones de pérdidas obtenidas son difíciles de afrontar, lo que indica claramente que la sociedad española no está preparada para este tipo de eventos fuertes, que han ocurrido en el pasado reciente y con seguridad ocurrirán en el futuro.

Palabras clave Escenarios de riesgo sísmico · Vulnerabilidad · Exposición de la población · Susceptibilidad · Concienciación pública sobre terremotos

* J. Elez
j.elez@usal.es

¹ Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca (USAL), Salamanca,

² España Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Madrid, España

³ Departamento de Geología y Geoquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España

⁴ Escuela Politécnica EPS, Departamento de Geología, Universidad de Salamanca (USAL), Ávila, España

1 Introducción

En el último siglo, el predominio de los datos instrumentales en las evaluaciones del riesgo sísmico en España (Benito y Gaspar-Escribano2007; Mezcua y otros.2008; Benito y otros.2013) ha llevado a subestimar los registros de un número importante de terremotos históricos moderados-fuertes (Mw 5.0–7.0) ocurridos en España durante los dos últimos milenios (Galbis1932; Silva y otros.2019b ; Higo.1). Por ejemplo, tan solo en los catálogos sísmicos del siglo XIX se muestran ocho eventos fuertes que causaron más de 1.700 muertos, miles de heridos y enormes pérdidas económicas (Martínez Solares y Mezcua2002), mientras que no se consideran los cálculos de los mapas de riesgo sísmico actuales para eventos en España anteriores a 1048 d.C. (Benito et al.2013).

Este estudio explora los resultados de la aplicación del sistema PAGER del USGS (Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response; Earle et al.2009;Jaiswal y Wald 2010; Worden y otros.2020) hasta el evento de Torrevieja de 1829 d. C. (IX–X EMS-98/X ESI-07) (Larramendi1829;Galbis1932; Prado, 1836) y el de Arenas del Rey de 1884 (IX–X EMS-98/X ESI-07), el último terremoto fuerte que sacudió España (Orueta y Duarte,1885; Taramelli y Mercalli1886; Anónimo1890; Fouqué,1890; Higo.1), para generar escenarios de riesgo para el presente. Ambos terremotos representan una cantidad importante de información histórica sobre daños, están bien estudiados actualmente, tienen magnitudes y pérdidas similares (Mw 6,5-7), comparten el mismo nivel máximo de intensidad macrosísmica (X) y comparten un contexto temporal y social.

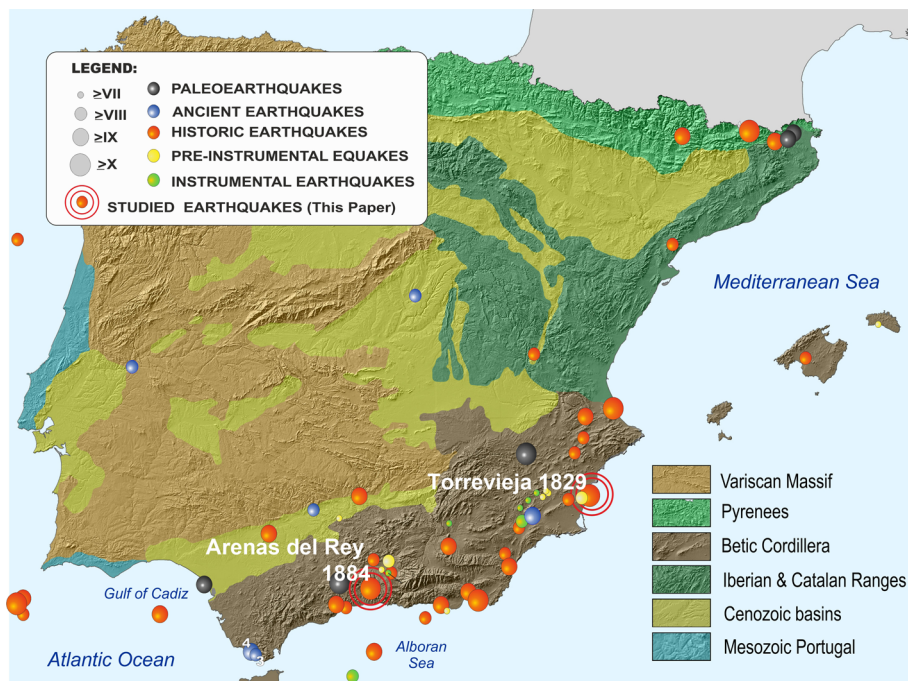


Figura 1 Localización de los principales terremotos fuertes ($\geq VII$) en la Península Ibérica, con una edad que va desde c. 3700 a. C. (Bradley y García Sanjuán2017) hasta 2021 CE y clasificación según Silva et al. (2019a)

Aunque existen otros procedimientos de modelado de pérdidas (por ejemplo, Kircher et al. 1997; Erdik y otros. 2014; Silva y otros. 2015b; Quirós Hernández 2017; Crowley y otros. 2020; Wyss y Rosset 2020; Hosseinpour y otros. 2021; Deligiannakis y otros. 2023), el enfoque empírico mundial de PAGER (Jaiswal y Wald 2013), ha sido aceptado como modelo tanto para el programa europeo RISE (reducción del riesgo de terremotos en tiempo real para una Europa resiliente; <http://www.rise-eu.org/home/>) y el proyecto ShakeMapEU (Cauzzi et al. 2018).

Escenarios de riesgo PAGER de futuros terremotos (por ejemplo, Kircher et al. 2006) aún están poco explorados en España y en todo el mundo. En España, la mayoría de los estudios que evalúan escenarios de pérdidas sísmicas se centran en ubicaciones urbanas específicas (Feriche et al. 2009; Lantada y otros. 2010; Irizarry y otros. 2011, 2012; Feriche 2012; Quirós Hernández 2017; Aguilar-Meléndez et al. 2019) en lugar de evaluaciones de riesgos de terremotos específicos.

La comparación de los datos históricos de pérdidas con los resultantes de los escenarios de riesgo PAGER actuales nos permite explorar la influencia de las variaciones en la exposición y el riesgo relacionados con la expansión urbana y la despoblación rural que han experimentado las zonas afectadas desde el siglo XIX (p. ej., Guarner Calaf 2017). De hecho, la zona afectada por el suceso de Torrevieja de 1829 se encuentra actualmente en una conocida región turística española, la "*Levante Mediterráneo*", una zona turística de clase mundial y reconocida internacionalmente. Esta situación nos permite explorar los efectos del turismo en la intensificación del riesgo sísmico general mediante un aumento estacional de la exposición de la población.

El objetivo principal de este trabajo es influir en la concienciación pública, incluyendo la de profesionales y responsables políticos, sobre la prevención del riesgo sísmico en España. Los resultados obtenidos se centran en reconsiderar las iniciativas preventivas para mejorar la percepción general del riesgo sísmico en España y cómo dicha percepción se ve afectada por parámetros y variables sociales y de planificación urbana que no suelen considerarse adecuadamente en los análisis estándar de riesgo sísmico.

2 Panorama de los datos de pérdidas relacionadas con terremotos en España

En la Península Ibérica, los terremotos más fuertes tienen magnitudes moderadas (Mw 6,0-7,0) pero niveles de intensidad fuertes (valores entre IX y X) (Martínez-Solares y Mezcuza, 2002; Silva y otros. 2019a). En la mayoría de los casos, estos niveles de intensidad sobredimensionados están relacionados con EEEs secundarios, que incrementan los daños y las pérdidas en las zonas urbanas.

Según datos de la *Consorcio de Compensación de Seguros* (Consorcio de Compensación de Seguros; CCS 2021), durante el periodo instrumental (1963-presente), el 96,5% de las pérdidas se asociaron a daños a bienes inmuebles (edificios), el 3,1% a daños materiales y el 0,4% restante a lesiones personales. Entre 1987 y 2021 (es decir, durante la mayor parte del periodo instrumental), las pérdidas ascendieron a 622 M€ (actualizado a 2021). Estas pérdidas se acumularon claramente en el siniestro de Lorca de 2011 (Mw 5,2). Con una intensidad de VIII (ESI-07 y EMS98), este siniestro causó 9 muertos y más de 300 heridos. Aproximadamente 28.000 edificios resultaron dañados; las pérdidas asociadas ascendieron a 552,1 M€, o el 89% de la pérdida total. El 11% restante (69,9 M€) se distribuye de la siguiente manera: (1) la serie sísmica de la Cuenca de Granada (2020-2021), que tuvo una magnitud máxima de Mw 4,5 (Madarieta-Txurruka et al. 2022), no causó víctimas mortales pero produjo pérdidas económicas por valor de 17,7 M€; (2) el sismo offshore en el mar de Alborán (Mw 6,3) que afectó a la ciudad de Melilla (a 80 km) en 2016 causó 26 heridos y daños moderados en edificios, lo que se tradujo en pérdidas económicas de 8,64 M€; (3) el terremoto de La Paca de 2005 (Mw 4,8) en la región de Murcia produjo pérdidas económicas por valor de casi 9,5 M€; y (4) el terremoto de Mula de 1999 (Mw 4,7), también en la región de Murcia, supuso casi

18 M en pérdidas. En 1969, el terremoto del Cabo de San Vicente (Mw 7,8 e intensidad VII MSK; Baptista, et al.1992; Bufor, y otros.2019), un evento en alta mar, desencadenó un tsunami que causó la muerte de siete personas en España, daños en 274 edificios en Huelva y cientos más en la zona afectada. Finalmente, el terremoto de Galera de 1964 (Mw 4,8) en Almería no causó víctimas mortales, pero sí daños moderados en edificios de los pueblos de Orce y Galera.

Durante el intervalo de tiempo preinstrumental (1900-1963 d. C.), los datos económicos comparables son más escasos que los datos de la CCS de 1954. Destaca el evento de Albolote de 1956, ya que causó 11 muertos y 73 heridos (Martínez Solares2016En la zona epicentral (localidad de Albolote), el 1% de las viviendas quedaron destruidas, el 6% quedaron en ruinas, el 35% fueron habitables y el 41% sufrieron daños moderados. En 1930, el terremoto de Montilla no causó víctimas mortales, pero dañó 250 viviendas, algunas de las cuales quedaron destruidas. El coste se estimó en nada menos que 1 millón de pesetas (equivalente a más de 20 millones de euros en la actualidad; INE, s.f.; Carbonell (1930)). En 1919, el terremoto de Jacarilla no causó víctimas mortales pero sí dañó considerablemente los edificios (Galbis 1932; Garrido2012; Batlló y otros.2015), especialmente en Torremendo y Jacarilla. En 1917, el suceso de Torres de Cotillas causó daños en la localidad, pero no causó víctimas. En 1911, se produjeron tres sucesos más (Torres de Cotillas, Lorquí y Santa Fé; Galbis1932) dañaron edificios y casas representativas y causaron heridos; sin embargo, ninguno causó víctimas mortales.

Todos los eventos instrumentales y preinstrumentales enumerados, ocurridos a lo largo de los siglos XX y XXI, tienen una intensidad de entre VI y VIII en la escala EMS-98 o ESI-07; por lo tanto, estos eventos son terremotos moderados con magnitudes generalmente cercanas a 5,0 (Ms/mb/ Mw). El número total de víctimas mortales registradas en España por estos eventos es de 27.

En contraste, varios terremotos fuertes ocurridos a lo largo del período histórico causaron considerables pérdidas económicas y víctimas. Silva et al. (2019a) catalogaron ocho eventos relevantes del siglo XIX con intensidades de escala ESI-07 de hasta X (Tabla1Además de causar considerables daños materiales, los siniestros de Dalias, Pinos-Puente, Torrevieja y Arenas del Rey causaron 407, 13, 389 y 900 víctimas, respectivamente; el de Huércal-Overa, que también causó considerables daños materiales, causó una víctima. En conjunto, estos siniestros causan más de 1700 muertes.

Existe cierta información histórica sobre pérdidas causadas por terremotos desde el siglo IX (es decir, informes de geógrafos árabes como Udias,2015), pero los informes detallados de daños causados por terremotos han sido comunes en España desde el terremoto de Lisboa de 1755 d.C. (Martínez Solares 2001). Este evento es claramente un caso atípico, ya que causó entre 20.000 y

Tabla 1 Datos relativos a fuertes terremotos ocurridos durante el siglo XIX en España

Año	Ubicación	Magnitud	Intensidad EMS-98	Intensidad ESI-07
1804	Mar de Alborán, Mediterráneo	6,7 millones	VII–VIII	VIII
1804	Dallas, Almería	6,4 millones	VIII–IX	IX
1806	Pinos-Puente, Granada	5,3 millones	VIII	
1829	Torrevieja, Alicante	6,6–6,9 millones	IX–X	incógnita
1845	Tivissa, Baleares	5,1 Mw	VI–VII	VII
1851	PaLma de Mallorca, Baleares	> 4,5 millones	VII	VII
1863	Huércal-Overa, Almería	4,2–4,6 millones	VI–VII	VIII
1884	Arenas del Rey, Granada	6,5–6,7 millones	IX–X	incógnita

30.000 víctimas sólo en Lisboa; y entre 35.000 y 45.000 en Portugal, España y Marruecos (Pereira2009), con más de 1.200 bajas solo en España (Martínez Solares 2001). Sin embargo, el número total probablemente fue mayor.

La información recopilada sobre terremotos antiguos en España incluye EEE que datan desde finales del Neolítico hasta la época visigoda romana. Determinar el número de pérdidas causadas por terremotos antiguos es imposible debido a la falta de documentación histórica.

El registro de terremotos en la Península Ibérica se considera clásicamente completo para eventos con $M_w \geq 5,8$ desde 1800 d.C. y para eventos muy fuertes con $M_w \geq 6,8$ desde 1300 d.C. (por ejemplo, Stucchi et al.2013). Sin embargo, estudios recientes muestran claramente la incompletitud de los registros sísmicos anteriores a 1500 d. C., especialmente de aquellos anteriores a 1000 d. C. (Silva et al.2019b).

2.1 Terremotos de Torrevieja de 1829 y Arenas del Rey de 1884

El terremoto de Torrevieja del 21/03/1829 d.C. (Fig.1) en la Cordillera Bética fue uno de los terremotos más fuertes ocurridos en tiempos históricos. Está catalogado como IX-X en el Sistema de Medición de Emisiones (M_w 6.6) (Martínez Solares y Mezcua,2002) y X en la escala MSK64 y ESI-07 (M_w 6,6–6,9) (Martínez Solares y Mezcua2002; Alfaro y otros.2012; Silva y otros.2019a). Este terremoto fue causado por la Falla del Bajo Segura (BSF), un empuje ciego orientado al norte que resultó en un anticlinal superficial de dirección oeste a lo largo del margen sur de la Cuenca del Bajo Segura.

El sismo de Torrevieja afectó a una zona litoral y causó 389 muertos y 375 heridos, aproximadamente 2.300 casas fueron destruidas y casi 3.000 resultaron dañadas (Larramendi 1829;Galbis1932Cuatro pueblos fueron destruidos (Torrevieja, Guardamar, Benejuzar y Almoradí), otros catorce ubicados en la zona sur de la Cuenca Baja del Segura, afectados por efectos con intensidades de entre IX y X EMS (X MSK/ESI), requirieron reconstrucción, y los tres puentes existentes sobre el río Segura resultaron gravemente dañados. En total, casi 500 km²Se vieron afectados por efectos secundarios con intensidades que van desde VIII a X (ESI-07), y más de 1500 km²fueron afectados con intensidad VII (ESI-07).

Se han publicado los escenarios de ShakeMap para el evento de Torrevieja, y un enfoque detallado para modelar la fuente, el tamaño y el M_w de la falla responsable se puede encontrar en Silva et al.2017). Estos autores establecen una magnitud de M_w 6,8 relacionada con la activación de falla inversa de bajo ángulo de los segmentos Benejuzar y Guardamar de la Falla del Bajo Segura (Alfaro et al.2012) como el escenario conservador preferido para este terremoto. El M_w resultante y la ubicación del epicentro de este escenario preferido se encuentran dentro del rango de los utilizados en estudios previos (Martínez Solares y Mezcua,2002; Alfaro y otros.2012).

El terremoto de Arenas del Rey de 1884/15/25 d.C. (Fig.1), que fue el acontecimiento histórico más mortífero en la Península Ibérica, causó 900 muertos y más de 2.000 heridos, destruyó 1.000 casas y hirió a más de 17.000 personas (Orueta y Duarte,1885). El terremoto golpeó una zona rural y montañosa al suroeste de la ciudad de Granada el día de Navidad de 1884 d.C. (aproximadamente a las 21:00 h) (Fig.2).

El terremoto casi destruyó siete localidades (Arenas del Rey, Alhama de Granada, Albuñuelas, Santa Cruz del Comercio, Ventas de Zafarraya, Jayena y Periana; Fig.3) y daños importantes a otros seis (Canillas de Aceituno, Zafarraya, Salares, Cacín, Alcaucín y Jatar). Está catalogado como IX-X en la EMS y X en las escalas MSK64 y ESI-07 (con magnitudes que oscilan entre 6,5 y 6,7) (Comisión del Mapa Geológico de España,1885;Galbis1932; Martínez Solares y Mezcua2002; Reicherter y otros.2003; Grützner y otros.2013; Rodríguez-Páscua et al.2017;2018; Silva y otros.2019a). Las EEEs secundarias afectan un área de más de 14.000 km², y los efectos geológicos más severos alcanzaron una intensidad X en la escala ESI-07, afectando así un área de 25 km². Además,

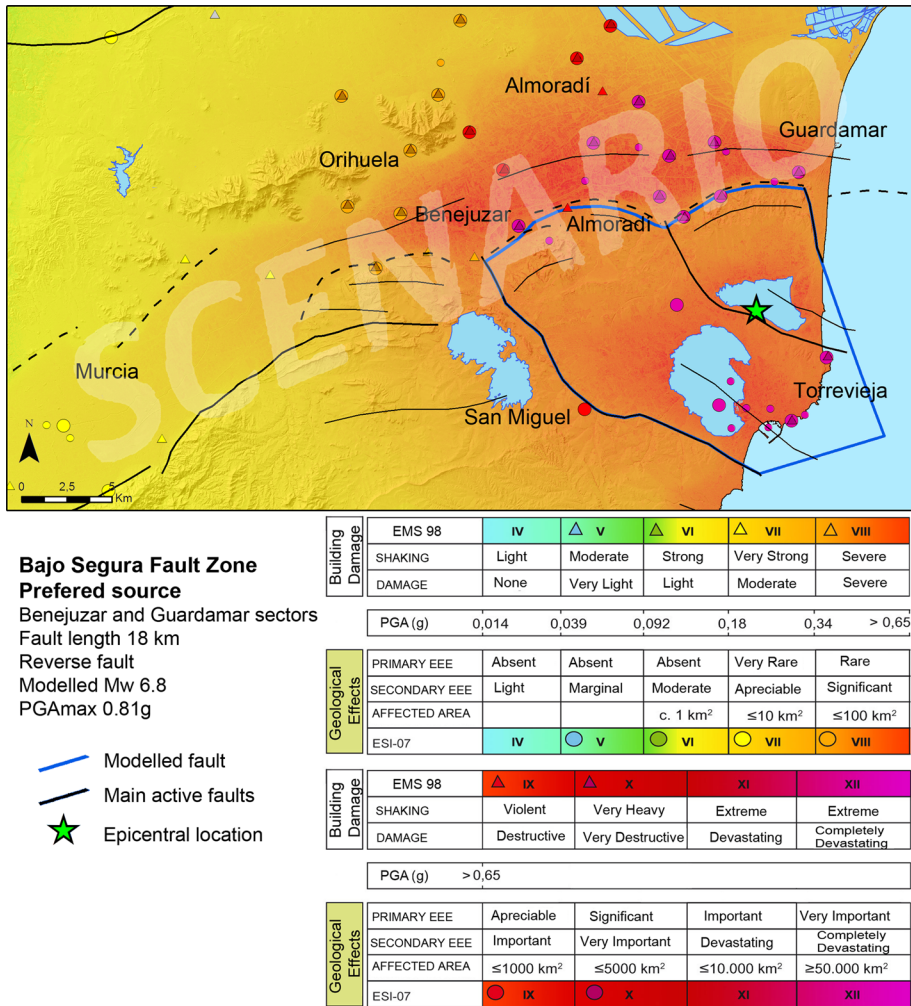


Figura 2 ShakeMap del terremoto de Torrevieja de 1829, que sigue el escenario preferido en Silva et al. (2017), también incluye efectos geológicos catalogados (ESI07) y daños a edificios (EMS98)

El sismo principal alcanzó intensidad X en la EMS en Arenas del Rey y intensidad IX en al menos once localidades más.

Este evento fue el único terremoto histórico en España en el que se registró una rotura superficial de la falla responsable; la rotura superficial, de aproximadamente 16 km de longitud, se produjo en la falla de Ventas de Zafarraya (Reicherter et al.2003).

Se han publicado los escenarios y zonas de intensidad de ShakeMap para el evento Arenas del Rey (Silva et al.2019a). Siguiendo la descripción geológica de la falla de Ventas de Zafarraya y la ruptura superficial relacionada con el evento de 1884 (Reicherter et al.2003; Grützner y otros.2013), los autores del escenario establecieron un Mw 7.0 en una falla normal de bajo ángulo, la falla de Ventas de Zafarraya, como el escenario preferido, simulando así los diversos efectos catalogados IX y X relacionados. El modelo de falla final tiene aproximadamente 28 km de largo y 15 km de ancho y una forma relativamente irregular, lo que resulta en un PGAmáximode 0,71 g. La longitud resultante,

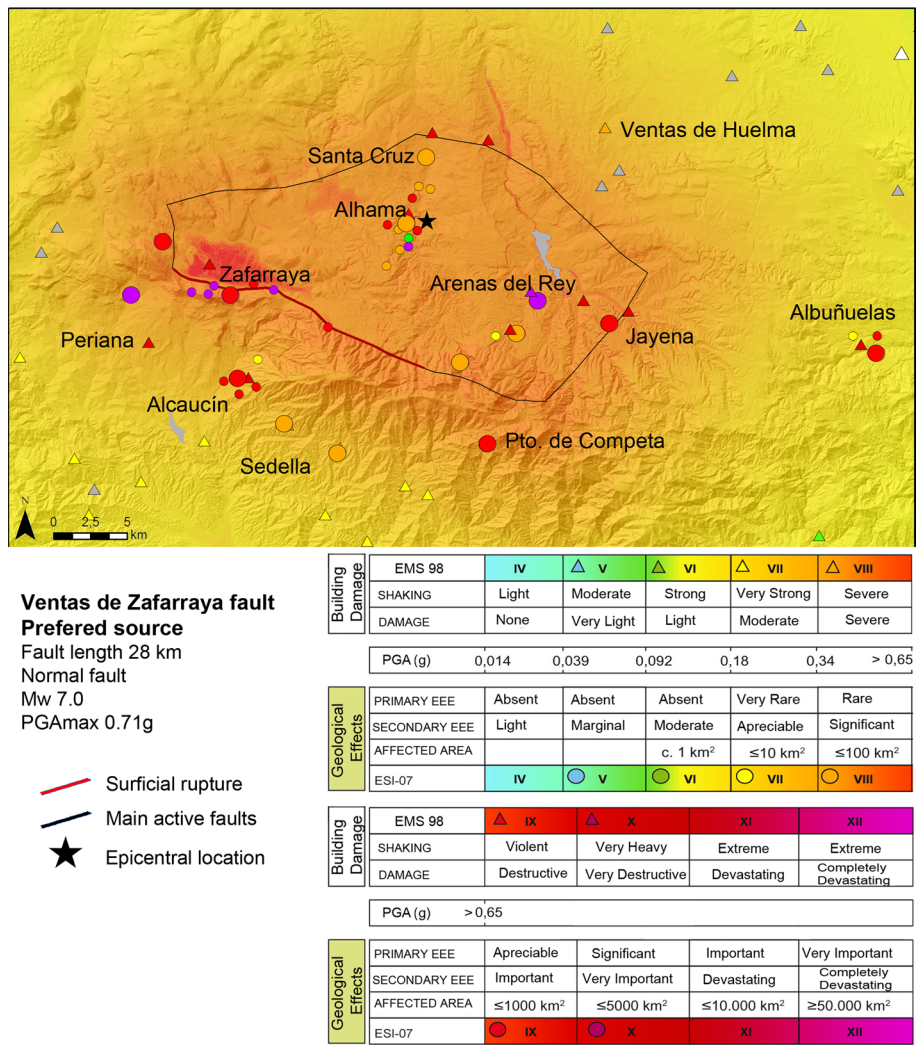


Figura 3ShakeMap del evento Arenas del Rey 1884 basado en datos publicados (Sect.2.1), también incluye efectos geológicos catalogados (ESI07) y daños a edificios (EMS98)

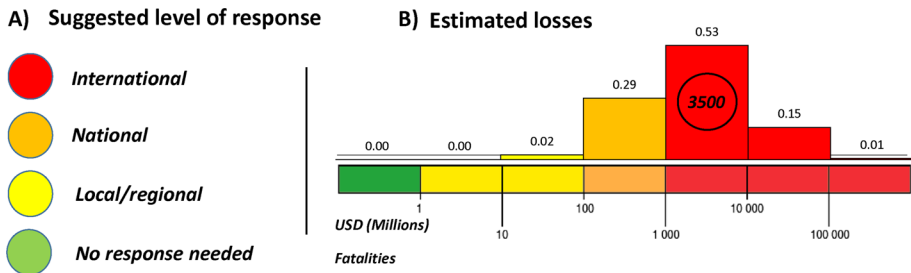
La ubicación, Mw y la ubicación epicentral de este escenario preferido son bastante similares a las estimadas por estudios previos (Martínez Solares y Mezcuá,2002; Reichert y otros,2003; Grützner y otros,2013).

3 métodos

El flujo de trabajo de estimación empírica de PAGER para víctimas mortales y pérdidas económicas tuvo que adaptarse a las particularidades de los terremotos históricos. Por lo tanto, a continuación, se describen brevemente sus características principales y, finalmente, el flujo de trabajo aplicado, que describe todas las particularidades.

Como resultado principal, las pérdidas se muestran (según el procedimiento PAGER) como un gráfico de barras que muestra la probabilidad estimada de pérdidas en porcentaje y en órdenes de magnitud. Las muertes oscilan entre 0 y 1 millón, y las pérdidas, entre 0 y 1.000 millones de dólares estadounidenses (USD; 1.000.000.000 USD) (Fig.4). En la Fig. 4B, tanto los rangos de las cifras de muertes como los de pérdidas económicas en millones están codificados por colores según el umbral (Fig.4A) (verde para 0 a 1, amarillo para 1 a 10 y 10 a 100, naranja para 100 a 1000 y rojo para valores > 1000).

El código de color del umbral con mayor probabilidad se asigna al nivel de respuesta sugerido para cada escenario (Fig.4B). Siguiendo la metodología PAGER, si los códigos para el número de víctimas mortales y la magnitud de las pérdidas económicas difieren, se asigna el código más alto. Por ejemplo, a un evento con un código naranja para víctimas mortales y uno rojo para pérdidas económicas se le asigna un código rojo (nivel de respuesta sugerido internacional). Las pérdidas estimadas activan la alerta de color correspondiente, que determina el nivel de respuesta sugerido. La función de distribución acumulada, obtenida empíricamente, para las víctimas mortales y las pérdidas económicas estimadas también estima los valores medios de la distribución en términos de número de personas y millones (M) de USD, respectivamente.



C) Estimated population exposed to earthquake shaking

ESTIMATED POPULATION EXPOSURE (k = x1000)						1413k	785k	280k	221k	0
ESTIMATED MODIFIED MERCALLI INTENSITY		I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+
PERCEIVED SHAKING		Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very Strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	Resistant Structures	none	none	none	V. Light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	V. Heavy
	Vulnerable Structures	none	none	none	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	V. Heavy	V. Heavy

Figura 4Resultados de PAGER:**A**Nivel de respuesta sugerido.**B**Probabilidad calculada de los rangos de pérdidas (víctimas y millones de USD). Los números en la parte superior de las barras indican la probabilidad del intervalo, y el valor central obtenido de la función de fragilidad está encerrado en un círculo.**do**Población estimada (× 1000) afectada por el umbral de intensidad

3.1 Estimación de mortalidad

El método PAGER estima la tasa de mortalidad (Eq.1) en Jaiswal y Wald (2010) mediante una función de distribución acumulativa lognormal de dos parámetros (parámetros libres) (también conocida como función de fragilidad). El número total de víctimas mortales de un terremoto dado se estima multiplicando el número de personas expuestas a cada nivel de intensidad de temblor por las tasas de mortalidad para ese nivel y luego sumándolas para todas las intensidades de temblor relevantes.

La tasa de mortalidad, o función de fragilidad (Jaiswal y Wald2010), es el siguiente:

$$S_{yo} = \Phi \left[\frac{1}{\sigma} \left(\ln \left(\frac{S_i}{S_o} \right) \right) \right] \quad (1)$$

dónde S_{yo} denota la tasa de letalidad para cada intervalo de intensidad; σ y S_o denotan la desviación estándar y media, respectivamente, obtenidas y tabuladas por país (σ y S_o son los parámetros libres de la ecuación); y S_i denota la intensidad que va desde 5,0 a 9,0.

Los parámetros libres de la ecuación son específicos de cada país y se obtienen minimizando los errores residuales al realizar predicciones retrospectivas de las muertes relacionadas. Para ello, los autores analizaron los terremotos registrados entre 1973 y 2007, y obtuvieron parámetros libres para la mayoría de los países donde, durante ese período, se produjeron tres o más terremotos mortales (p. ej., 15 terremotos mortales ocurrieron en Italia durante el período de referencia). Este no es el caso de España, donde no se produjo ningún terremoto mortal durante ese período. Para países en esa situación, Jaiswal et al. (2009) definen un esquema de regionalización que combina los factores de los eventos fatales (como la vulnerabilidad, la geografía y el clima) y construye inventarios e indicadores socioeconómicos, permitiendo así obtener valores cualitativos para los parámetros libres.

España se agrupa en un esquema de regionalización con países de Europa occidental (Portugal, Alemania, Francia, Reino Unido, Noruega, Suecia, Jaiswal et al. 2009), la mayoría de los cuales tienen un registro limitado de terremotos fuertes (véase el catálogo de Grünthal y Wahlström (2003) que abarca desde 1300 hasta 1993) y un riesgo sísmico general bajo (Corbane et al. 2017; Rovida y otros. 2022). Por lo tanto, las víctimas calculadas (determinadas de forma similar a las pérdidas económicas) representan el valor medio (la probabilidad promedio) de las pérdidas por un terremoto. Además, se calculó la desviación estándar normalizada de la probabilidad de pérdidas para cada país y, nuevamente, el resultado es específico para cada país (Jaiswal y Wald, 2009, 2010). Si las pérdidas estimadas se distribuyen como variables aleatorias lognormales, entonces la probabilidad de un umbral de pérdida dado (por ejemplo, entre 10 y 100 o 100 y 1000) se puede calcular y mostrar gráficamente (Jaiswal y Wald 2010; por ejemplo, Figura 4B).

3.2 Estimación de pérdidas económicas

Para estimar las pérdidas económicas, el sistema PAGER del USGS utiliza un enfoque bastante similar al utilizado para estimar el número de muertes: PAGER obtiene una función de fragilidad basada empíricamente donde las pérdidas económicas totales finales para un evento son la suma de la exposición económica por la tasa de pérdidas para cada nivel de intensidad; los resultados se dan en dólares estadounidenses.

Tasa de pérdidas económicas (función de fragilidad):

$$S(s) = \Phi \left[\frac{1}{\sigma} \left(\ln \left(\frac{S_i}{S_o} \right) \right) \right] \quad (2)$$

dónde $r(s)$ denota la tasa de siniestralidad; S denota la intensidad del evento, que varía de 5,0 a 9,0; y son la desviación estándar y la media empíricas obtenidas, respectivamente, que se tabulan por país.

Exposición económica:

$$\text{Exposición económica} = \text{región} \times \text{PIB}_{(\text{región}, s)} \quad (3)$$

dónde región denota una constante para cada país y $\text{PIB}_{(\text{región}, s)}$ indica el PIB (producto interno bruto) per cápita multiplicado por el número de personas en cada nivel de intensidad. Los datos originales del PIB corresponden al año 2000 y se actualizaron a los valores de 2021 cuando fue necesario en este trabajo.

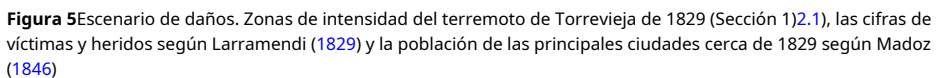
3.3 Enfoque metodológico

Para aplicar los cálculos de PAGER a escenarios de terremotos históricos y, desde un punto de vista procedimental, obtener la población expuesta en zonas de intensidad, el flujo de trabajo realizado en un entorno GIS incluye (1) calcular un ShakeMap del evento estudiado, (2) obtener las zonas de intensidad MMI, y (3) calcular la población de cada zona de intensidad.

Los datos de ShakeMap se obtuvieron utilizando dos métodos: el primer método, que sigue el flujo de trabajo de Silva et al. (2017), implica el ajuste fino de las características geológicas del área afectada por el terremoto y el uso de métodos específicos para terremotos históricos. Este método se centra en la aplicación de la escala ESI-07, lo que permite reducir las incertidumbres típicamente asociadas con eventos históricos (M_w , intensidad, ubicación epicentral, etc.). Este flujo de trabajo implica el uso de un tamaño de píxel pequeño (de 5 a 25 m) y dos factores de corrección: uno relacionado con la pendiente y otro con el espesor de los materiales no consolidados del Cuaternario. Ambos elementos ayudan a caracterizar los llamados efectos de sitio a nivel de píxel y permiten un mejor ajuste de los EEEs y EAEs catalogados en terremotos históricos mediante el uso del modelo de aceleración en PGA o ShakeMap (Fig. 2). El segundo método implica seguir estrictamente el flujo de trabajo del USGS sin usar factores correctivos y con un tamaño de píxel grande (cerca de 1 km). En todos los casos, las transformaciones de ShakeMap PGA a zonas de intensidad MMI se realizaron según Worden et al. (2020).

Siguiendo las recomendaciones del procedimiento PAGER del USGS, se calcularon en LandScan las poblaciones que ocupan las diferentes zonas de intensidad (2019). Este conjunto de datos se proporciona como un ráster SIG (1000 × 1000 m/píxel) que contiene un modelo empírico de la distribución espacial de la población. Este producto, LandScan (2019)TM es un conjunto de datos de población global de alta resolución, propiedad de UT-Battelle, LLC, operador del Laboratorio Nacional de Oak Ridge. En un entorno SIG, se proporciona un cálculo sencillo de la población de un área determinada. La evolución actual e histórica de los datos de población en España y sus municipios (censo oficial actual e histórico) se utiliza junto con este trabajo para contrastarlos con los de la base de datos LandScan y caracterizar el incremento de la población, en términos de exposición, durante la historia reciente de España.

El evento de Torre Vieja tuvo lugar en una zona bastante poblada para la época del evento (Figs. 5y6). Siguiendo el recuento histórico de la población de Madoz (1846), la zona de intensidad IX-X incluía varias localidades relevantes con entre 2000 y 3000 habitantes cada una. La zona de intensidad VIII incluía el municipio de Orihuela, la localidad más poblada de



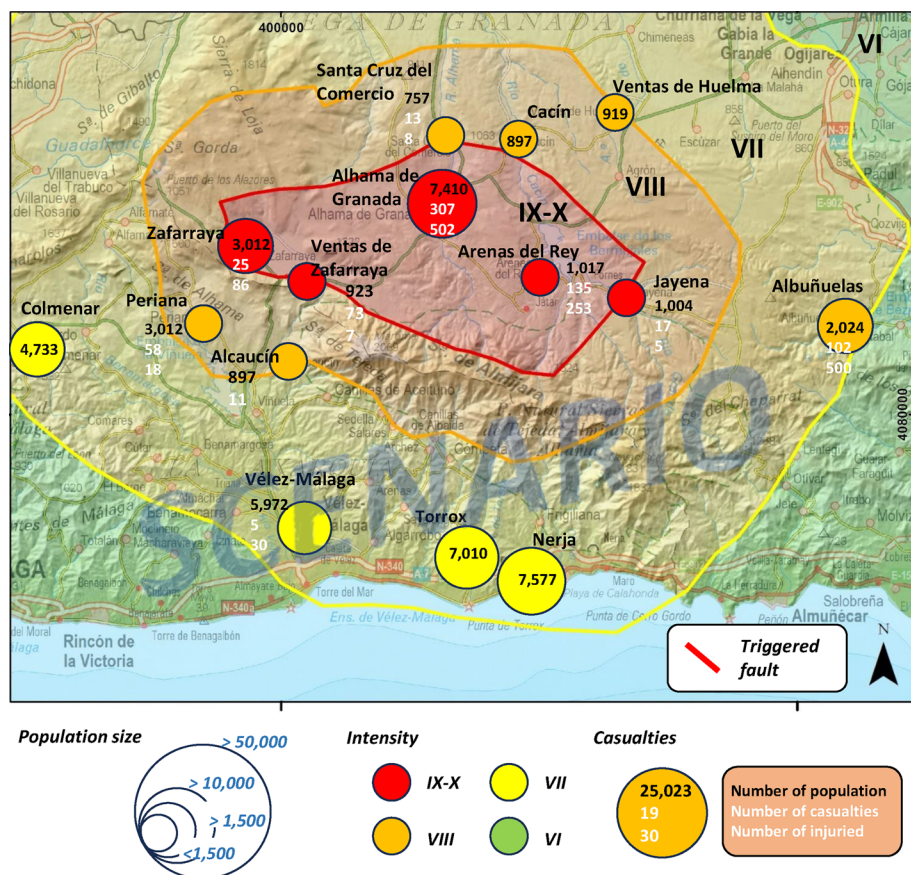


Figura 6 Escenario de daños. Zonas de intensidad, víctimas y heridos causados por el terremoto de Arenas del Rey de 1884 (Sección 1.2.1), población cercana a 1884 según IGE (1897)

la zona afectada con más de 25.000 habitantes, así como otros pequeños pueblos con menos de 1.000 habitantes (Larramendi 1829). En la actualidad, la población (que se ha multiplicado entre 5 y 10 veces en algunas zonas) ha aumentado en la zona.

El terremoto de Arenas del Rey de 1884 tuvo lugar en una zona rural de montaña (Sierra de los Guájares) con aldeas dispersas y poblaciones relativamente bajas (Fig. 6). Según el censo histórico de Granada y Málaga para la época sísmica (IGE, 1897) En la zona de intensidad IX-X, el pueblo más poblado fue Alhama de Granada (con 7410 habitantes); los siguientes pueblos más poblados fueron Zafarraya (con 3012 habitantes) y Arenas del Rey y Jayena (con aproximadamente 1000 habitantes cada uno). En la zona de intensidad VIII, solo algunos pueblos superaron los mil habitantes.

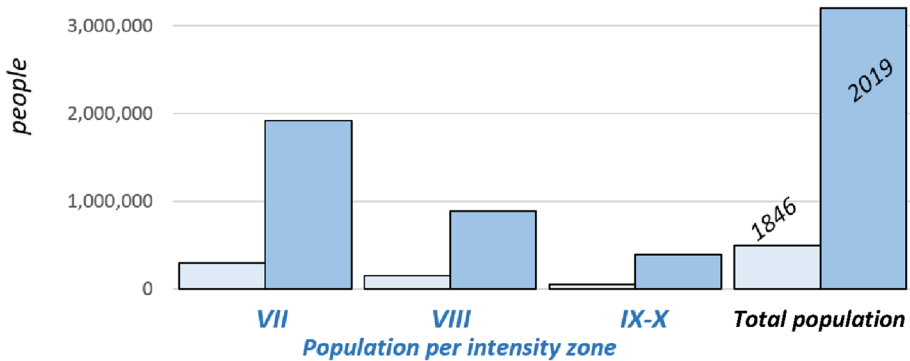
En la actualidad la población ha aumentado en la zona, pero principalmente en el sector costero en la zona de intensidad VII del evento de 1884 (Fig. 7). Por el contrario, en la zona epicentral (intensidad IX-X) la población ha disminuido (Figs. 6 y 7).

La primera ronda de escenarios PAGER se calculó utilizando LandScan (2019) base de datos de población. Sin embargo, esta base de datos, que es continua y tiene cobertura global, está diseñada para una respuesta rápida (rápida) después de una emergencia. Una comparación de

A) Population for the Torrevieja event

x1000

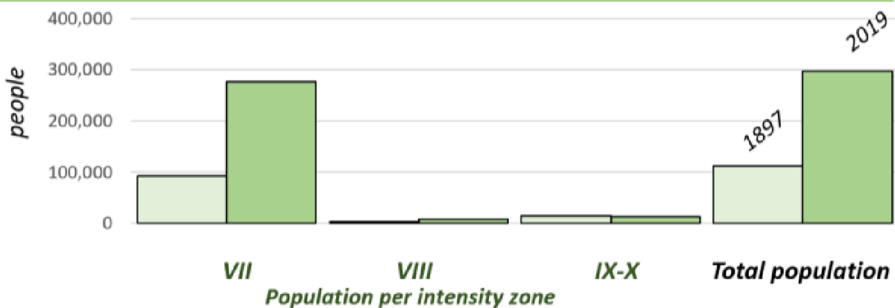
Madoz 1846	293	148	49	490
INE 2020	1,918	884	397	3,199



B) Population for the Arenas del Rey event

x1000

Census 1897	93	4	15	112
INE 2020	276	9	13	298



C) Current population per intensity zone and database

Torrevieja 1829

x1000

<i>database</i>	<i>Intensity VIII</i>	<i>Intensity IX-X</i>
LandScan	661	297
INE	884	397

Arenas del Rey 1884

x1000

<i>database</i>	<i>Intensity VIII</i>	<i>Intensity IX-X</i>
LandScan	12	10
INE	15	12

Figura 7 Comparación del tamaño de la población actual con la de la población cercana al evento para el terremoto de Torrevieja de 1829 y el terremoto de Arenas del Rey. **a)** Comparación de bases de datos de población

Los datos de población proporcionados por la base de datos LandScan con los datos del Instituto Nacional de Estadística (INE) indican claramente que LandScan subestima la población en el territorio español (Fig. 7C). Como se muestra en la Fig. 7, las diferencias para las zonas de intensidad IX-X, las más relevantes en términos de pérdidas humanas, son de aproximadamente 30%.

4.1 Escenarios PAGER primarios para el terremoto de Torrevieja de 1829: T1, T2 y T3

Se obtuvieron dos escenarios básicos del terremoto de Torrevieja (Escenarios T1 y T2). Escenario T1 (Fig. 8A) considera las dimensiones de la fuente (Mw 6,8) y la tipología de falla utilizada por Silva et al. (2017)) para calcular zonas de intensidad y derivar valores PGA aplicando la

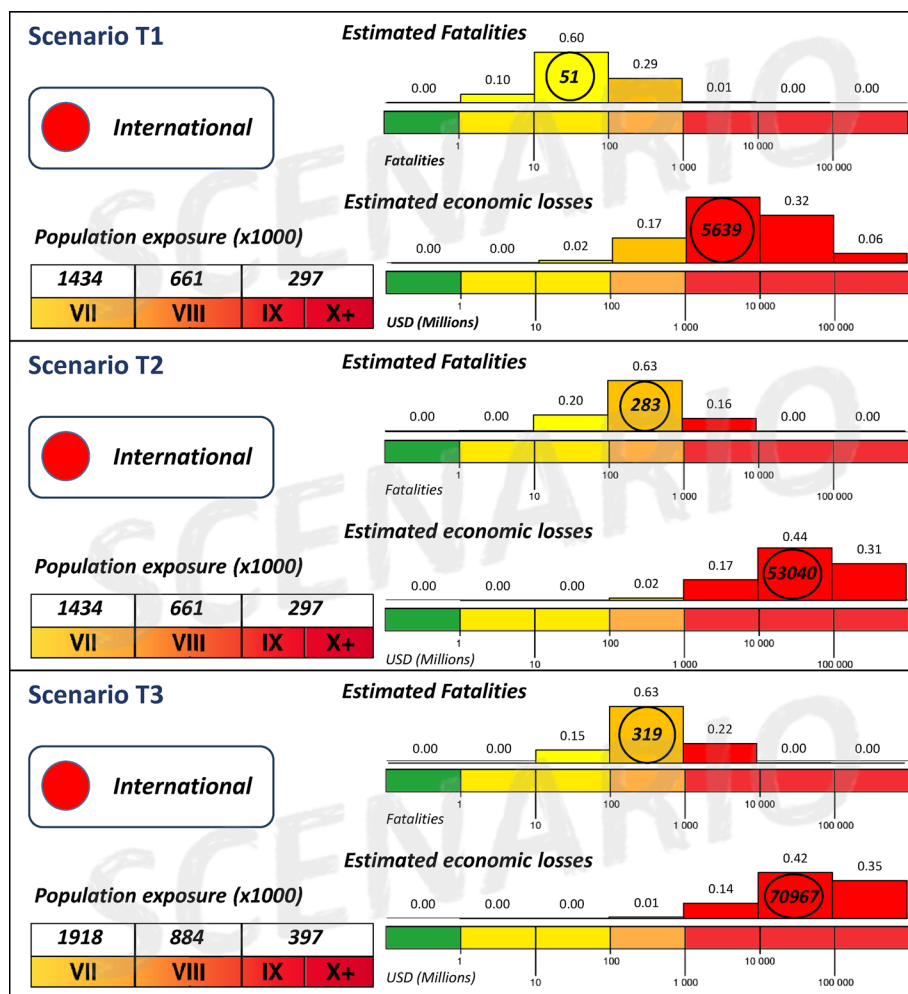


Figura 8 Escenarios PAGER para el terremoto de Torrevieja de 1829. En los escenarios T1 y T2, los datos de población provienen de LandScan (2019) y en el Escenario T3, ShakeMap sigue el método USGS y los datos de población son del INE (2020)

Método ShakeMap modificado por estos autores para el sureste de España. Escenario T2 (Fig.8B) considera los mismos parámetros de fuente que T1 pero sigue el procedimiento original del USGS (Worden et al. 2020). Ambos escenarios se calcularon utilizando el LandScan (2019) base de datos de población.

Escenario T1 (Fig.8A) resulta en un número moderado de muertes (51) en comparación con las producidas en 1829 (389). El escenario resultante se mantiene en un umbral inferior al nivel de respuesta sugerido (amarillo en lugar de naranja). Desde un punto de vista económico, la función de distribución estima pérdidas entre \$1,000 y \$10,000 millones con una probabilidad del 0.44%, pérdidas entre \$10,000 y \$100,000 millones con una probabilidad del 0.32%, y un valor medio de \$5,639 millones para ambos rangos de pérdidas.

El escenario T2 utiliza el método ShakeMap original del USGS; en consecuencia, el escenario se ajusta mejor a los datos reales de mortalidad producidos en 1829 (Fig.8B). El umbral principal es naranja (100 a 1000 muertes con una probabilidad del 63 %), lo que corresponde al del evento original; sin embargo, la media de la distribución de probabilidad (283 muertes) sigue siendo inferior a la del evento histórico analizado (389). Las pérdidas económicas también aumentan, con una probabilidad del 75 % de que se sitúen entre 10 000 y 1 000 millones de dólares.

La comparación de ambos escenarios revela claramente que T1 de Silva et al. (2017) muestra que el modelo ShakeMap subestima las muertes y las pérdidas, y que T2 se ajusta mejor a los registros históricos. Estas subestimaciones de T1 probablemente estén relacionadas con las correcciones aplicadas (efecto del sitio, pendiente y dimensión del píxel), que permiten que T1 proporcione un rango de zonas de intensidad más fiable. En consecuencia, T1 produce un modelo con mayor ajuste geológico, pero, como indicaron inicialmente Silva et al., es más conservador al estimar los daños. Revisión del flujo de trabajo de ShakeMap en Silva et al. (2017) al trabajar con funciones de pérdida e iterar ShakeMaps basados en la geología con escenarios de pérdida sería interesante para el trabajo futuro.

Se calculó un tercer escenario para el terremoto de Torrevieja (T3) (Fig.8C). Este escenario utiliza las mismas zonas de intensidad que T2, pero los datos de población de la base de datos Land-Scan se actualizan al censo español más reciente (INE,2024), lo que supone un aumento de la población del 33,3 %. En este nuevo escenario, el valor medio de las muertes según la distribución de probabilidad aumenta ligeramente a 319 personas, acercándose así a las 389 muertes ocurridas en 1829. Sin embargo, las pérdidas económicas esperadas se mantienen en los mismos umbrales y porcentajes similares a los del Escenario T2 (umbrales naranja y rojo). No obstante, debido al importante aumento de la población actual, el valor medio de la distribución de probabilidad aumenta a casi 71 000 millones de dólares. En los tres escenarios, el nivel de respuesta es rojo, lo que indica un nivel de respuesta internacional.

4.2 Escenarios PAGER primarios para el terremoto de Arenas del Rey de 1884: A1 y A2

Siguiendo el procedimiento utilizado para el suceso de Torrevieja, se elaboraron varios escenarios iniciales para el terremoto de Arenas del Rey de 1884 (Fig.9). Escenario A1 (Fig.9A) utiliza parámetros de falla, zonas de intensidad y valores PGA derivados calculados por Silva et al.(2019a) utilizando el enfoque ShakeMap propuesto para eventos históricos en el sureste de España (Silva et al.2017). Escenario A2 (Fig.9B) utiliza los mismos parámetros de origen pero sigue el procedimiento original del USGS para la producción de ShakeMap (Worden et al.2020). En ambos casos, la población se estimó a partir del censo español vigente (INE).2024), como los datos en LandScan (2019) la base de datos subestima el tamaño de la población en aproximadamente un 22% (Fig.7).

En comparación con el evento real, los escenarios A1 y A2 obtenidos (con valores de 9 y 14, respectivamente) muestran cifras muy bajas de muertes, muy alejadas de las 900 muertes ocurridas en 1884 (el umbral se codifica en amarillo en lugar de naranja). Desde un punto de vista económico, ambos escenarios sitúan el rango principal de pérdidas en el mismo orden de magnitud, con valores que oscilan entre 1000 y 10 000 millones de dólares, con un 43 % (A1) y un 45 % (A2). Ambos escenarios muestran la necesidad de una respuesta internacional (es decir, una alerta de código rojo), y el valor medio de la distribución de probabilidad se sitúa entre 1621 y 2239 dólares.

5 Ajuste de los escenarios obtenidos: población y parámetros libres

5.1 Configuración de los parámetros libres de la función de fragilidad PAGER para España

El aumento de la vulnerabilidad y la exposición vinculado al crecimiento poblacional y a la expansión de infraestructuras y bienes en España ha sido notable desde finales del siglo XIX. En cuanto a la población (Fig. 7), España estaba habitada por 12,5 millones de personas en 1797 (censo de Godoy¹⁸⁰¹) y, según el censo de 1897, por 18,2 millones de personas cien años después (IGE,¹⁸⁹⁷); la población ha aumentado desde entonces hasta su tamaño actual de 47,42 millones de personas (datos del INE, 01 de enero de 2001).²⁰²¹INE, s.f. (a). En España, la evolución del PIB indica aumentos desde apenas 23.500 millones de euros en 1850 (Guarner Calaf²⁰¹⁷) hacia

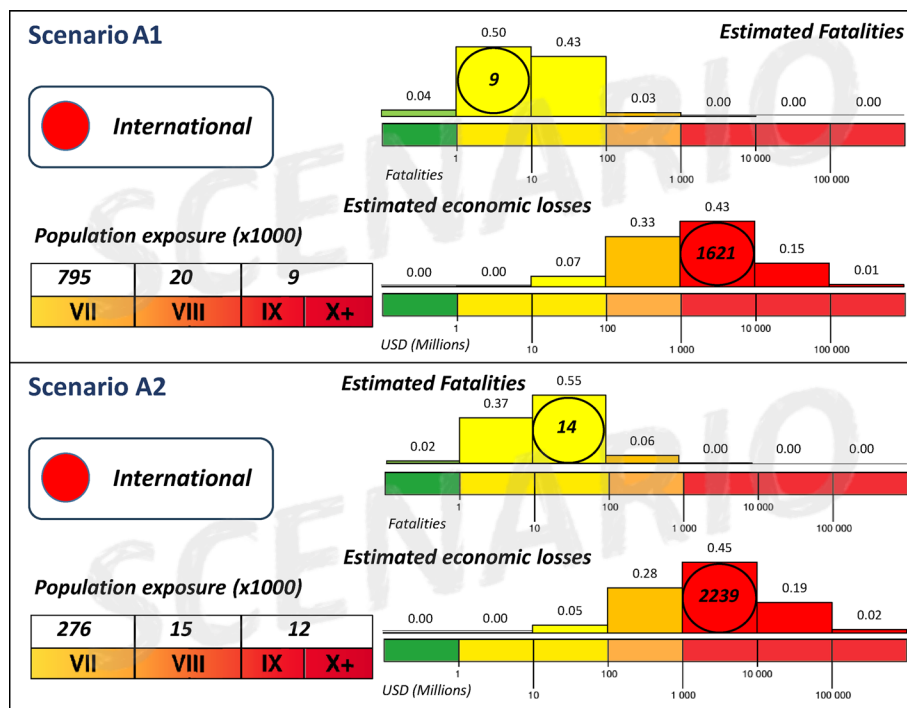


Figura 9 Escenarios PAGER para el terremoto de Arenas del Rey de 1884. En el escenario A1, se utilizó el método ShakeMap de Silva et al. (2017) En el Escenario A2, ShakeMap sigue el método del USGS. En ambos casos, los datos de población proceden del INE (2020).

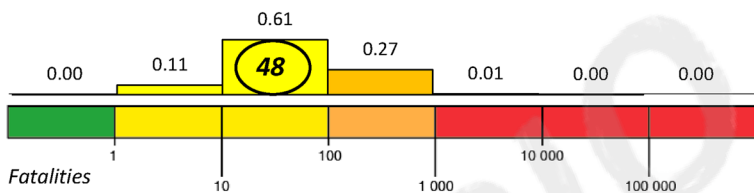
1.470 millones de euros en 2021 (datos del INE español, s.f. (b). Por lo tanto, tanto la población como el PIB cambiaron significativamente.

En cuanto a la zona afectada por el terremoto de Torrevieja, los modelos descritos anteriormente no consideran el aumento significativo del número de habitantes en España ($\times 6$), ya que los escenarios obtenidos apenas alcanzaron el número de víctimas mortales de 1829, excepto cuando se utilizan los datos de población de 2019. Todos los escenarios descritos previamente para este terremoto subestiman el número final de víctimas mortales.

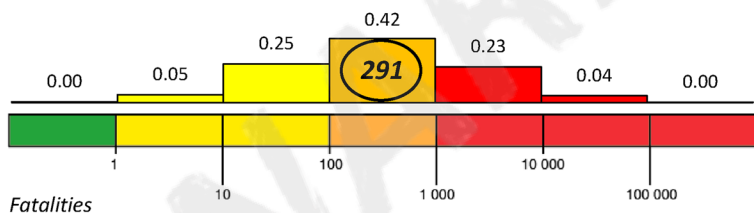
Esta subestimación debería estar relacionada con los esquemas de regionalización y los parámetros libres resultantes de las ecuaciones utilizadas para elaborar los escenarios de pérdidas (véase la sección de métodos). En el procedimiento PAGER, los parámetros libres se calcularon con datos de terremotos que mostraban pérdidas humanas y/o económicas en un período específico, es decir, de 1973 a 2007. En ese período, España no experimentó ningún terremoto con pérdidas. Sin embargo, supongamos que el cálculo...

A) Spain

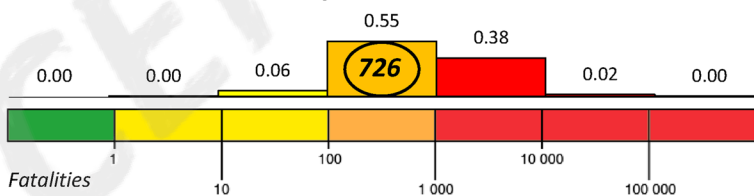
Scenarios T4



B) Southern mediterranean country



C) Northern mediterranean country



D) Population exposure (x1000)

294	148	50
VII	VIII	IX
		X+

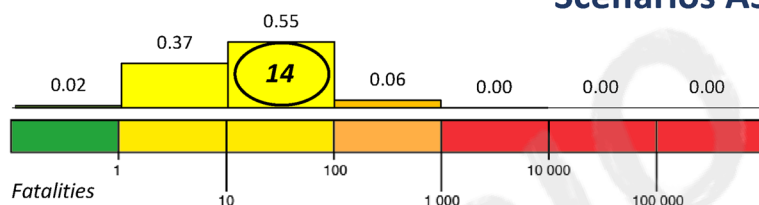
Figura 10 Escenarios PAGER T4, estimación de víctimas mortales causadas por el terremoto de Torrevieja de 1829 con población cercana al evento (Madoz 1846). A) utilizando diferentes parámetros libres. B) muestra la exposición de la población por zona de intensidad

El período de estos parámetros libres en España había incorporado datos del siglo XIX (Tabla 1). Por lo tanto, si se utilizan registros relevantes de eventos sísmicos del siglo XX, los parámetros libres de España deberían ser más cercanos a los de los países mediterráneos. Desde un punto de vista geológico, el ciclo sísmico no responde a la cronología humana, y su evolución temporal continúa.

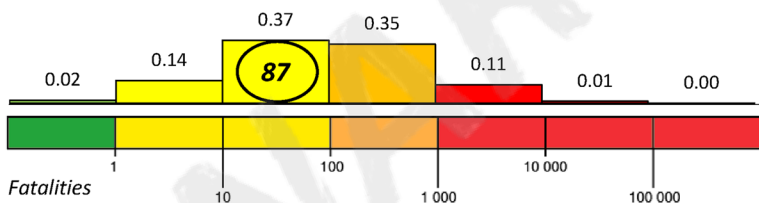
En el primer paso, probamos los escenarios resultantes utilizando la población cercana al evento, es decir, datos de Madoz (1846) y IGE (1897) para los eventos de Torrevieja y Arenas del Rey de 1884, respectivamente, aplicando los parámetros libres para tres áreas de PAGER: (a) Europa Occidental (es decir, España), (b) países del sur del Mediterráneo (p. ej., Túnez y Argelia) y (c) países del norte del Mediterráneo (en este caso, Italia). En este punto, solo se utilizan las víctimas mortales como elementos comparativos, ya que, si bien el informe histórico de daños existente (Larramendi) 1829; Orueta y

A) Spain

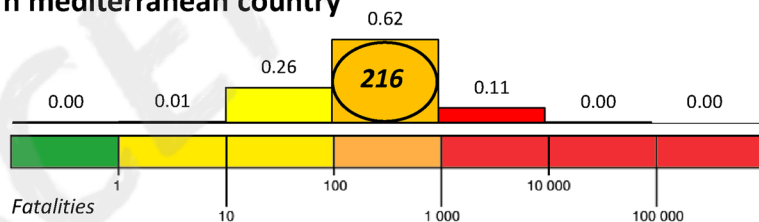
Scenarios A3



B) Southern mediterranean country



C) Northern mediterranean country



D) Population exposure (x1000)

93	4	15	
VII	VIII	IX	X+

Figura 11 Escenarios PAGER A3, estimación de víctimas mortales causadas por el terremoto de Arenas del Rey de 1884 con datos de población cercana al evento (IGE, 1897). **A**-d) utilizando diferentes parámetros libres. **D** Exposición de la población por zona de intensidad

Duarte,1885) los datos son fiables y completos, los datos sobre pérdidas económicas son incompletos y difíciles de extrapolar a valores monetarios actuales.

Cifra10A–C muestran los resultados para el terremoto de Torrevieja de 1829. Al igual que en el enfoque principal, utilizando los parámetros libres para España (Fig.10A) subestima claramente las pérdidas, que son incluso inferiores a las de los escenarios primarios T1 a T3, que utilizan datos de población del siglo XXI (Fig.8) El uso de parámetros libres para los países del norte o del sur del Mediterráneo aumenta significativamente las muertes (Fig.10B, C). El escenario más similar al histórico es el de un país típico del sur del Mediterráneo. La función de distribución se centra en el rango de entre 100 y 1000 víctimas (nivel naranja) y los valores medios (291 personas) se acercan a las 389 muertes reportadas originalmente. En el caso de los parámetros libres en la región del norte del Mediterráneo, los resultados parecen estar sobreestimados, ya que el valor medio de la distribución de muertes casi duplica los 389 valores originales.

Sobre el terremoto de Arenas del Rey de 1884 (Fig.11A–C), ninguno de los tres escenarios alcanzó un alto nivel de mortalidad. Solo el escenario de un país típico del norte del Mediterráneo (Fig.11C) muestra un rango de muertes en el nivel naranja (que indica entre 100 y 1000). Sin embargo, el valor medio de la función de fragilidad (216) aún dista del número real de muertes (900); este tema se analizará más adelante. Los otros dos escenarios explorados (Fig.10D, E) subestiman en gran medida el número de muertes ocurridas en un orden de magnitud (<100 personas).

Los escenarios históricos realizados confirman que la regionalización PAGER para España junto con los países del noroeste de Europa tergiversa claramente las pérdidas resultantes.

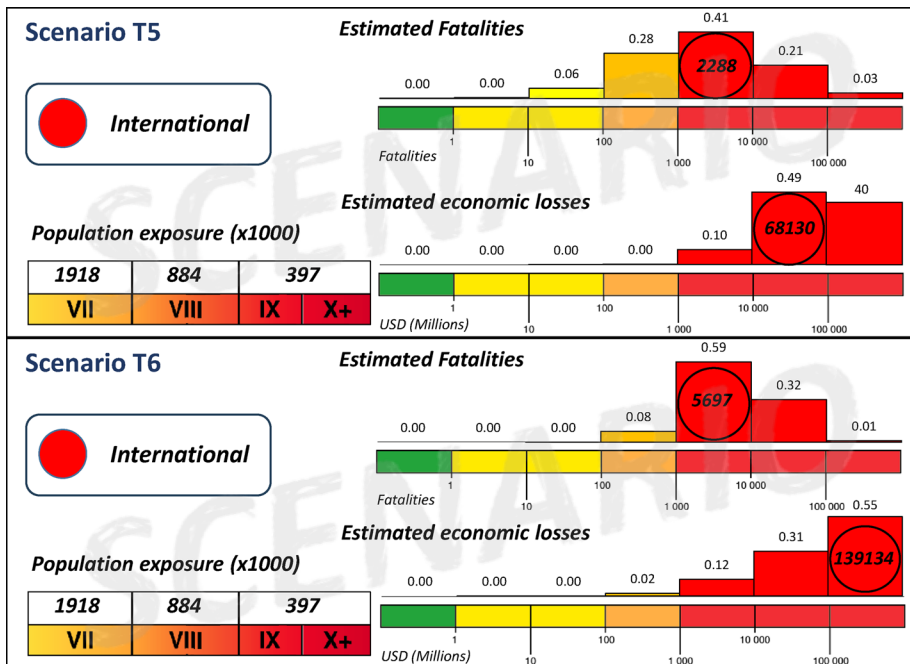


Figura 12 Escenarios PAGER del terremoto de Torrevieja de 1829 con datos de población del INE (2020) y PIB de España. Los escenarios T5 y T6 utilizan parámetros libres de un país del sur y otro del norte del Mediterráneo, respectivamente.

Además, el uso de parámetros libres para los países del norte y sur del Mediterráneo proporciona enfoques más realistas, aunque los escenarios obtenidos aún subestiman las pérdidas. El evento de Torrevieja de 1829 se ajusta mejor al escenario para los países del sur del Mediterráneo (Fig. 10B), mientras que el evento de Arenas del Rey de 1884 coincide con el de los países del norte del Mediterráneo (Fig. 11DO).

Esta dualidad entre países del sur y del norte del Mediterráneo se analizará a continuación en relación con los diseños constructivos y urbanos heredados en el SE español de antiguas culturas de Oriente Medio y países del norte de África.

5.2 Generación de escenarios de pérdida para los rangos de población del siglo XXI

En este segundo paso, generamos escenarios PAGER que sustituyen los datos de población de las zonas de intensidad de terremotos históricos por datos de población actuales. En otras palabras, evaluamos las posibles consecuencias si los fuertes eventos históricos estudiados se repiten en el presente. Para ello, examinamos dos posibles escenarios utilizando funciones de fragilidad y parámetros libres para países del sur y norte del Mediterráneo. En ambos casos, se aplicará la población actual según el INE (año 2020) y las pérdidas económicas se referirán al PIB de España.

Para el terremoto de Torrevieja, los escenarios actuales resultan en graves pérdidas nunca registradas en España y esperadas en ningún estudio previo. Al utilizar los parámetros libres para las regiones del sur del Mediterráneo (Fig. 12A, Escenario T5), la mayor probabilidad de muertes se centra en el rango rojo (que indica entre 1000 y 10 000 víctimas), con un promedio de 2288 muertes. En cuanto a las pérdidas económicas, la mayor probabilidad se sitúa entre 10 000 y 100 000 millones de dólares, con un promedio de más de 68 000 millones de dólares, lo que representa casi el 5 % del PIB español actual. En este caso, la función de distribución indica que existe una probabilidad del 90 % de que las pérdidas económicas se sitúen entre 10 000 y 1 000 millones de dólares. En el escenario de un país típico del norte del Mediterráneo (Fig. 12B, Escenario T6), las pérdidas son aún mayores. En este caso, las muertes se concentran en el intervalo entre 1.000 y 10.000 víctimas, pero la distribución promedio aumenta notablemente hasta casi 5.700 personas, mientras que las pérdidas económicas indican una probabilidad del 55 % de pérdidas en el intervalo entre 100.000 y 1.000 millones de dólares, con un promedio cercano a los 140.000 millones de dólares, aproximadamente el 10 % del PIB español.

En el modelo más conservador (Escenario T5), calculado con los parámetros libres de un país típico del sur del Mediterráneo, el número de víctimas mortales es 5,5 veces mayor que el registrado en el evento de 1829. Este hecho está condicionado en gran medida por el aumento de la población en las zonas de intensidad IX-X, de 50.000 personas en 1829 a 295.000 habitantes en 2020. Este aumento se multiplica por 6, lo que indica la plausibilidad de dicho resultado. Sin embargo, el modelo obtenido con parámetros libres para los países del norte del Mediterráneo (Escenario T6) arroja valores muy elevados de víctimas mortales y pérdidas económicas. Estos resultados pueden considerarse, con cautela, umbrales superiores, considerados catástrofes graves de difícil gestión para el SCC español. En ambos escenarios, se sugiere una respuesta de nivel internacional.

Para el terremoto de Arenas del Rey, los escenarios obtenidos indican la necesidad de una respuesta internacional global, aunque, como describiremos, los resultados no son tan severos como los obtenidos en el evento original de 1884. Utilizando los parámetros libres para los países del sur del Mediterráneo (Fig. 13A, Escenario A4), el valor medio de la distribución de probabilidad se encuentra en el intervalo entre 10 y 100 víctimas con una probabilidad del 37 % y un valor de 87 muertes. Las pérdidas económicas alcanzarían un valor medio de \$2137 millones, dentro del rango más probable (53%) entre \$1,000 millones y \$10,000 millones. Utilizando los parámetros libres de

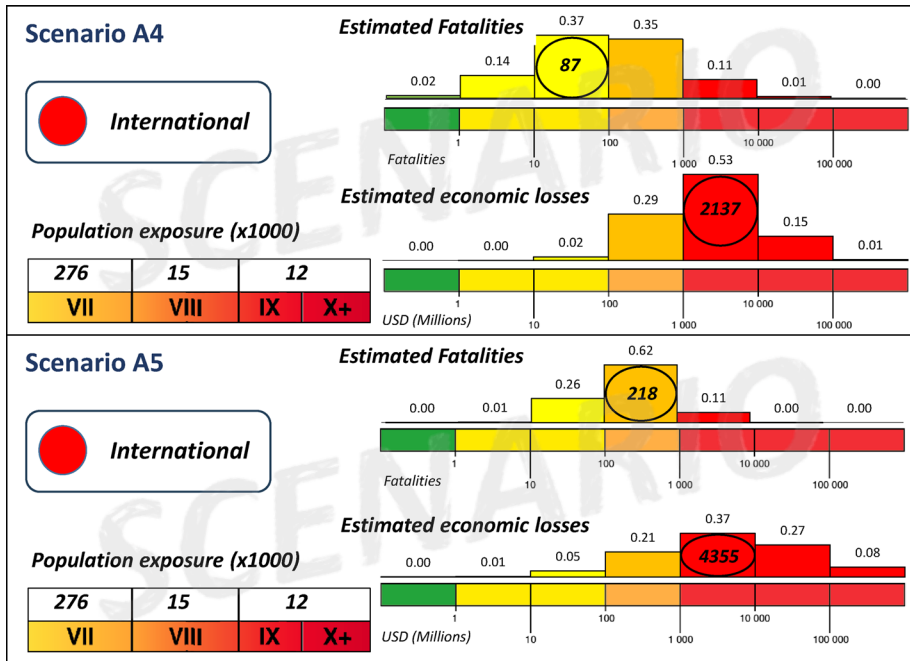


Figura 13 Escenarios PAGER del terremoto de Arenas del Rey de 1884 con población del INE (2020) y PIB de España. A4 y A5 utilizan los parámetros libres de un país típico del sur y norte del Mediterráneo, respectivamente.

un típico país del norte del Mediterráneo (Fig. 13B, Escenario A5) aumenta la probabilidad general de mayores pérdidas. El número de víctimas mortales aumentó a 218 personas en el intervalo entre 100 y 1000 (naranja, con un 62 %); este número de víctimas mortales corresponde al número de víctimas asociadas con el terremoto original de 1884. Sin embargo, el valor medio de la distribución es bajo (218) en comparación con el del evento real (900). De igual manera, las pérdidas económicas estimadas también aumentaron de 1000 a 10 000 millones de dólares, pero el valor medio fue de 4355 millones de dólares, duplicando así los valores del Escenario A4.

En el caso de Arenas del Rey, ninguno de los escenarios modelados dio cuenta de un valor medio de víctimas mortales cercano al número de víctimas reales ocurridas en 1884. Todos se mantienen consistentemente por debajo, pero teniendo el intervalo más probable de 62%, el Escenario A5 (Fig. 13B), se ajusta mejor al caso histórico, cuyo intervalo se sitúa entre 100 y 1.000 víctimas mortales. La razón más probable es la reducción de la población en la zona macrosísmica desde 1884. Según los datos del censo, la población de la zona afectada por la intensidad IX-X era de 14.922 habitantes en 1897, tan solo unos años después del terremoto, mientras que en 2020, la población era de tan solo 12.573 habitantes debido a la emigración de los habitantes de esta zona montañosa a las ciudades más grandes y zonas costeras de las regiones de Granada y Málaga. Por lo tanto, la población disminuyó aproximadamente un 16% (y la vulnerabilidad y la exposición). Sin embargo, otro punto clave para el elevado número de víctimas mortales (900) es la fecha y hora del terremoto de 1884, que se produjo durante la noche de Navidad en invierno. La Navidad es una festividad muy tradicional en España, en la que se reúnen familias y amigos, lo que aumenta el número de personas en pueblos y casas y, por consiguiente, las víctimas mortales.

5.3 El aumento de la exposición estacional durante la temporada turística

El terremoto de Torrevieja de 1829 afectó a una de las regiones turísticas más importantes del Mediterráneo en la actualidad. El conocido y reconocido destino costero español, el " *Levante Mediterráneo* Esta zona, especialmente sus destinos costeros, ha experimentado un aumento exponencial de población desde la década de 1960. Datos del departamento de turismo de la Generalitat Valenciana. (*Generalitat de Valencia*; VAB, 2018) indican que en 2018 visitaron la provincia de Alicante 14,1 M de turistas (el 44,8% de ellos extranjeros) (VAB, 2018). En comparación, toda la provincia de Alicante tenía una población permanente de solo 1,88 millones en 2018.

Este gran aumento de población durante la temporada de verano incide directamente en la vulnerabilidad y exposición ante una catástrofe natural (Fig. 14). En España no existe una base de datos de ámbito nacional que permita obtener datos desagregados por municipios sobre las variaciones estacionales de la

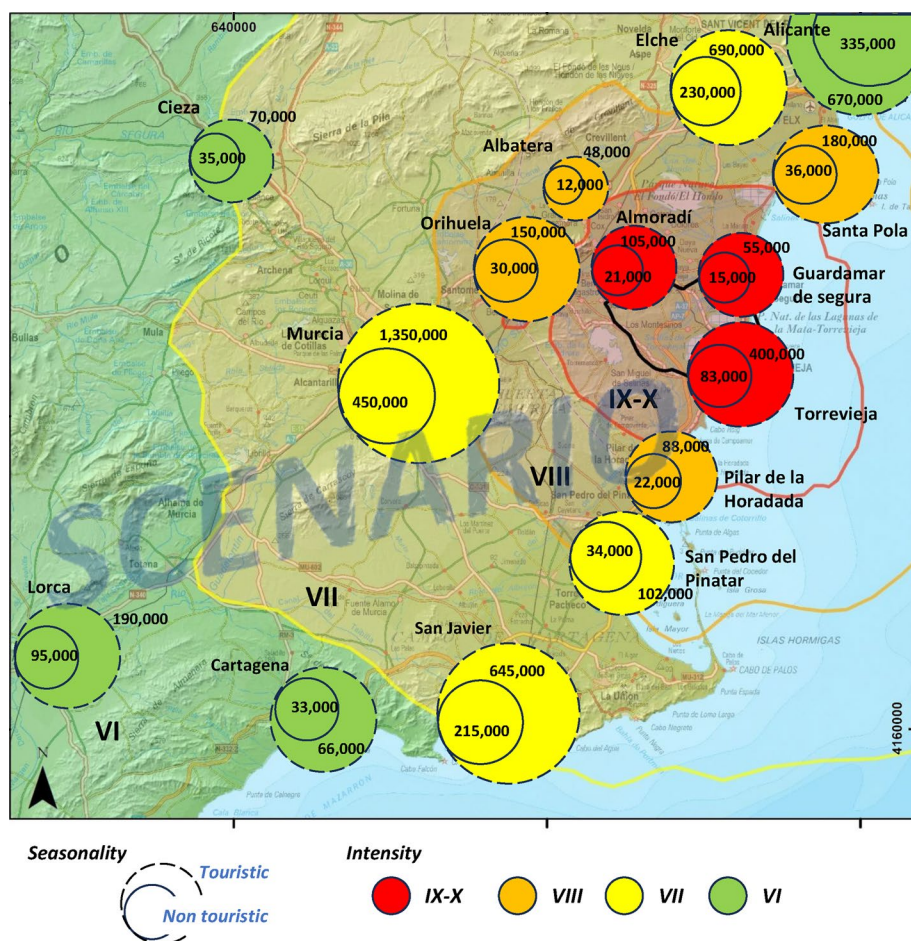


Figura 14 Escenario de exposición actual y máxima por zona de intensidad. Esta figura muestra las principales localidades afectadas por el terremoto de Torrevieja de 1829 y su población actual durante la temporada turística y no turística.

Se puede extraer la población flotante. Sin embargo, algunos municipios estiman oficialmente la población flotante según los cambios en el consumo de agua potable a lo largo del tiempo y el aumento de los residuos urbanos.

Por ejemplo, en 2018, la ciudad de Torrevieja, basándose en datos municipales, reportó niveles de consumo de agua y producción de residuos equivalentes a los de una población de 291.741 en junio; 382.154 en julio; 423.045 en agosto; y 297.115 durante las primeras semanas de septiembre; estos números representan aumentos del 350%, 460%, 520% y 357%, respectivamente (Baños Castiñeira et al.2010; Ayuntamiento de Torrevieja2024).

Estas cifras son comunes en los destinos costeros españoles. Guardamar de Segura tiene casi 15.000 habitantes, pero la población estimada para la temporada turística de verano es de 55.000, un aumento del 360 % (Ayuntamiento de Guardamar de Segura).2018). Según datos municipales, la población de Orihuela, que cuenta con numerosos pequeños pueblos cerca de la costa, oscila entre aproximadamente 30.000 habitantes censados en invierno hasta una población flotante de +150.000 habitantes (Ayuntamiento de Orihuela).2016), un aumento del 500%. Según datos más recientes del INE, que se publican en la página web española<https://www.foro-ciudad.com/alicante/>, para los años 2021 y 2022, todas las poblaciones costeras, como la de Torrevieja (una zona costera al sur de la ciudad de Alicante) aumentaron casi cinco veces (Ayuntamiento de Torrevieja2024).

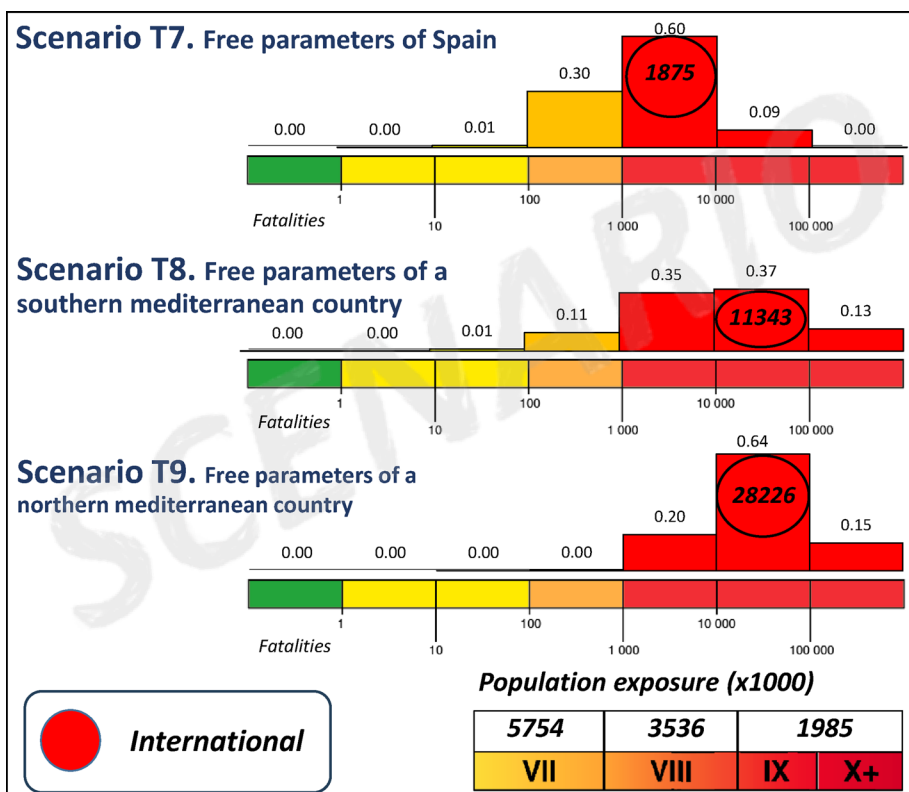


Figura 15 Escenario PAGER de víctimas mortales causadas por el terremoto de Torrevieja de 1829. Los escenarios utilizan el tamaño de la población durante la temporada turística del siglo XXI y diferentes parámetros libres.

Por lo tanto, para diseñar tentativamente el escenario de máxima exposición de la zona durante la temporada de verano (Fig. 14), aplicamos los siguientes aumentos de población: las poblaciones actuales de las zonas de intensidad IX-X se multiplican por cinco ($\times 5$), ya que se trata de localidades predominantemente costeras; las poblaciones de las zonas de intensidad VIII se multiplican por cuatro ($\times 4$); y las poblaciones de las zonas de intensidad VII se multiplican por tres ($\times 3$). Estos aumentos decrecientes representan la proporcionalidad a lo largo de una menor línea costera, menos interés turístico y menores poblaciones flotantes. No obstante, estas aproximaciones aproximadas son compatibles con la variabilidad poblacional descrita en líneas anteriores.

Según Jaiswal y Wald (2011), la exposición económica durante la temporada turística exige un análisis detallado y profundo de las infraestructuras y los edificios afectados, y los resultados pueden ser insuficientes para una estimación rápida de las pérdidas, como en este caso específico. En otras palabras, el aumento de la población durante la temporada turística no se acompaña necesariamente de un aumento equivalente en la exposición de las infraestructuras, y los datos de pérdidas económicas de PAGER podrían sobreestimar las pérdidas económicas reales. En este caso, para mantener la estrategia de modelado conservadora, presentamos únicamente los resultados de PAGER de las muertes estimadas (Figs. 13 y 14).

Escenarios T7 a T9 (Fig. 15) muestran un drástico aumento de las muertes durante la temporada turística, acompañado de un aumento de la exposición. Como se ha comentado, el uso de los parámetros gratuitos para España resulta en el escenario más conservador (Fig. 15A). Sin embargo, incluso en este caso, la función de probabilidad arroja una probabilidad del 60% de que el número total de víctimas mortales se encuentre en el rango de 1.000 a 10.000, con un valor medio de 1.865 víctimas mortales y pérdidas económicas claramente superiores a los 100.000 millones de dólares. Estos resultados indican que el Escenario T7 es el peor escenario jamás registrado en España por un terremoto de interior; el número de víctimas mortales se aproxima únicamente a las causadas por el terremoto-tsunami de Lisboa de 1755 d. C. en la zona litoral del Golfo de Cádiz (Martínez Solares 2001; Pereira 2009).

Escenarios resultantes de aplicar los parámetros libres del sur (Fig. 15B) y norte (Fig. 15C) Los países mediterráneos aumentan considerablemente las muertes con respecto a las de T6. Si se consideran los parámetros libres para los países del sur del Mediterráneo (T8; Fig. 15B) se aplica, se supera la probabilidad media de 10.000 muertes. Según lo determinado en la Sección 5.2 Los escenarios similares al Mediterráneo meridional coinciden mejor con los datos históricos del evento de Torre Vieja, pero suponen que se producirá un número dramático de muertes (Fig. 15B) son difíciles de costear actualmente. El peor escenario posible es el modelado para un país típico del norte del Mediterráneo (es decir, Italia). El modelo obtenido (Fig. 15C) indica que hay una probabilidad del 64% de que el número de víctimas mortales esté entre 10.000 y 100.000, y que la probabilidad media aumenta a 28.000 víctimas mortales.

Incluso con el escenario más conservador con los parámetros libres de España (Escenario T7, Fig. 15A), los resultados indican un escenario de riesgo para el cual la sociedad española actual no está preparada. Los escenarios calculados son extremos, pero es probable que se hubieran producido si un fuerte terremoto ($M_w > 6,5$) hubiera azotado las zonas costeras del sureste de España durante la temporada turística de verano actual.

6 Discusión

Todos los escenarios modelados responden adecuadamente en términos de variaciones en la vulnerabilidad y exposición de las áreas afectadas, y los resultados son sólidos en términos numéricos, aunque catastróficos en términos de cuantificación de daños y pérdidas (Fig. 16). Nuestros escenarios preferidos, en el lado conservador, para la repetición real del terremoto de Torre Vieja en la actualidad estiman pérdidas económicas con valores medios del orden de hasta una décima parte del PIB español.

Key features	Mean values of the distribution <i>Fatalities/ USD Millions</i>		Suggested level of response
Preferred scenarios of the 1829 Torrevieja event			
T3			
USGS type ShakeMap	319	70.967	International
Updated population			
T5			
Free parameters of a south mediterranean country	2.288	68.130	International
More conservative			
T6			
Free Parameters of a north mediterranean country	5.697	139.134	International
Conservative			
T8			
Population in touristic season	11.343	> 139.134	International
Conservative centered			
Preferred scenarios of the 1884 Arenas del Rey event			
A2			
USGS type ShakeMap	14	2.239	International
Updated population			
A5			
Free parameters of a north mediterranean country	218	4.355	International
Conservative			

Figura 16 Resumen de las características clave de los escenarios PAGER preferidos para los terremotos de Torre Vieja y Arenas del Rey en este trabajo. Cabe destacar que, para todos los escenarios, siempre se sugiere un nivel de respuesta internacional (como se indica con los puntos rojos).

(Higo. 14 Escenarios T5 y T6) y porcentajes de probabilidad general que oscilan entre el 30 % y más del 50 % en los intervalos de mayor pérdida (>100 000 millones de dólares). Los resultados en los modelos menos conservadores o durante la temporada turística (con sobrepoblación) son difíciles de gestionar (véase la figura). 14, Escenario T8). De manera similar, dadas las entradas del modelo, las pérdidas humanas calculadas son razonables desde una perspectiva numérica, pero insostenibles desde cualquier punto de vista social (Fig. 16, Escenarios T6 y T8).

En el caso del evento de Arenas del Rey y para los escenarios preferidos, los resultados de fatalidades estimadas concuerdan con los datos originales y la despoblación rural experimentada en la zona durante los últimos 150 años, pero las pérdidas económicas son igualmente difíciles de aceptar, con valores medios que van desde \$ 2,000 a más de \$ 4,000 M y probabilidades significativas (37 a 45%) de pérdidas en el intervalo de pérdidas de \$ 1,000 a 10,000 M (Fig. 16 Escenarios A2 y A5). Cabe señalar que las pérdidas económicas relacionadas con el principal terremoto reciente en España (Lorca en 2011) ascendieron a aproximadamente 500 millones de euros.

En ambos casos, las pérdidas totales resultantes para España serían difíciles de gestionar, y PAGER indica que el nivel de respuesta sísmica sugerido alcanzaría el código rojo (ayuda internacional). Esto ocurre en cada uno de los escenarios calculados aquí, independientemente de las características modeladas (Fig. 16).

Los parámetros libres diseñados originalmente en el Programa PAGER del USGS, que regionaliza España con países de Europa occidental de baja sismicidad, subestiman claramente las pérdidas. El uso de estos parámetros para países mediterráneos (norte y sur) con mayor sismicidad proporciona un enfoque más realista para España. El evento de Torre Vieja de 1829 se ajusta mejor a los escenarios para los países del sur del Mediterráneo (Fig. 10B), mientras que el evento de Arenas del Rey de 1884 se corresponde mejor con los de los países del norte del Mediterráneo (Fig. 11 DO).

La dualidad ibérica entre los países del sur y del norte del Mediterráneo parece lógica ya que la construcción de la época y los diseños urbanos en la Depresión del Bajo Segura, que se vio afectada por el terremoto de Torre Vieja en 1829, todavía eran similares a los típicos de los países norteafricanos. De hecho, las pérdidas, las víctimas mortales (571), la intensidad máxima (IX MSK) y la ubicación geográfica (zona costera) son comparables (dentro del rango) a las del terremoto de Mw 6,4 de Al-Hoceina (norte de Marruecos), que se produjo en 2004 (programa PAGER del USGS). Sin embargo, el terremoto de Mw 6,8 de Boumerdes (norte de Argelia), que se produjo en 2003 (intensidad IX MSK), se produjo en una región más desarrollada y causó 2271 víctimas (Bouhadad et al. 2004). Este terremoto, con entornos geográficos costeros e intensidad similares, se encuentra en el rango del Escenario T5 (evento de Torre Vieja en la actualidad). De igual manera, el terremoto de Al Haouz (Marruecos) de 2023 (Mw 6.8, IX MMI), similar a los reportados para España, presentó niveles de movimiento similares y pronósticos PAGER (Alerta Roja Internacional; USGS) (2024b), mientras que los informes preliminares de los medios estatales marroquíes indicaron casi 3.000 víctimas y más de 5.500 heridos.

El terremoto de Arenas del Rey de 1884 afectó una zona montañosa con numerosos movimientos de ladera, lo que provocó daños y pérdidas en edificaciones. En este sentido, este evento histórico puede compararse con el terremoto de los Apeninos de magnitud 6,3 de 2016 (Italia central, USGS) (2024a), que devastó localidades montañosas históricas, como Accumoli y Amatrice. En este caso, el número de víctimas mortales (301 personas), la intensidad máxima (X-XI), la ubicación geográfica (zona montañosa) y la persistencia de diseños urbanos medievales y edificios antiguos se situaron dentro del rango de los ocurridos en España en 1884. El anterior terremoto de magnitud 6,3 en L'Aquila (Italia), ocurrido en 2009, afectó una región montañosa similar con una construcción teóricamente mejor y una intensidad máxima de EMS de VIII-IX en el centro de la ciudad (Azzaro et al.) (2011). Este evento mató a 308 personas, hirió a 1.500 y desplazó a 65.000 personas (Marincioni et al. 2012; USGS 2023). En ambos casos, las muertes son menores que las registradas (900 personas) durante el terremoto de Arenas del Rey de 1884, pero superiores al rango de pérdidas económicas estimadas (más de \$10,000 millones). Fig. 16A2, A5).

Cabe destacar que múltiples factores hacen que estas comparaciones entre eventos instrumentales históricos y recientes sean comparables, pero no proporcionales entre sí. Los diseños de edificios antiguos y modernos, la hora del día (día/noche), la importancia de la fecha, las labores e instalaciones de socorro y emergencia presentes y pasadas no se incorporan en las evaluaciones sísmicas inmediatas.

6.1 Comentarios al código sísmico español y al Eurocódigo 8

Un punto importante para la comparación de eventos pasados y presentes son las prácticas de la normativa sísmica. Los terremotos recientes en el sureste de España demostraron que los mapas existentes de peligrosidad sísmica subestiman las aceleraciones horizontales máximas esperadas; en 2011, el terremoto de Lorca de magnitud 5,2 obtuvo PGA de 0,34 g, tras lo cual fue necesario actualizar los valores de PGA en los mapas de peligrosidad sísmica españoles para el sureste de España (Benito et al., 2013).

Además, ShakeMaps para eventos históricos en España (por ejemplo, Figs. 4y2; Silva y otros. 2017, 2019a; De Pro-Díaz et al. 2023) identificaron sistemáticamente valores de PGA considerablemente superiores a los obtenidos en el escenario máximo considerado en el código sísmico vigente. Por ejemplo, con datos de escenarios conservadores, los valores de PGAmáx para los eventos de Torrevieja y Arenas del Rey son de 0,81 g y 0,71 g, respectivamente. En cambio, los mapas oficiales de peligrosidad sísmica más recientes de España (Benito et al. 2013) no consideran valores de PGA superiores a 0,55 g con efectos de sitio (categoría de suelo) en el peor escenario para todo el país. Por ejemplo, las áreas macrosísmicas de los dos eventos estudiados en este trabajo se calculan con valores de PGAmáx que se esperan inferiores a 0,45 g. Si bien no existe una correlación directa entre los PGA de un mapa de riesgo y los calculados en escenarios de eventos, los datos de PGA indican claramente el problema subyacente y sus dimensiones. Otro ejemplo: en 2016 se descubrió un nuevo terremoto de la época romana (siglo IV; Rodríguez-Pascua et al., 2016). El terremoto, cuya magnitud se estimó cercana a Mw 6,0 (intensidad IX ESI-07), se relacionó con una falla claramente activa (la falla del Henares) en una zona densamente poblada del centro de España, cerca de Madrid. Hasta la fecha, ni la QAFI (Base de Datos de Fallas Cuaternarias Activas de la Península Ibérica), proporcionada por el Instituto Geológico y Minero de España; <https://info.igme.es/qafi/>; García-Mayordomo et al. 2012) ni los mapas de riesgo españoles (Benito et al. 2013) se han actualizado. En la zona afectada, y según los mapas de riesgo actuales de España para un período de retorno de 475 años, la PGA calculada es de 0,02–0,04 g, es decir, prácticamente nula.

El primer código sísmico moderno para España (NCSE-94) se publicó en 1994 y no fue obligatorio hasta 1997. Sin embargo, en muchas zonas rurales y montañosas, la mayoría de las construcciones en el centro de la ciudad se construyeron a finales del siglo XIX o principios del XX, mucho antes de la aplicación de los códigos sísmicos modernos. Además, entre 1970 y 1990 se construyeron grandes edificios de apartamentos en zonas costeras durante el... *“Boom turístico español” (caso Torrevieja)* Este hecho quedó de manifiesto con el sismo moderado Mw 5,2 de Lorca, que, a pesar de su magnitud moderada, requirió la demolición de aproximadamente 700 edificios.

El código de construcción actual en España (Norma Sismorresistente Española; NCSE02, 2002) data de 2002, se actualizó en 2007 y, como se mencionó, se publicaron mapas de riesgo mejorados en 2013. El Eurocódigo 8 (aceptado en 2004 y publicado en 2007) aún no se ha transpuesto a la normativa española, a pesar de los intentos fallidos (NCSR-16, NCSR-23). Casi todos los países europeos han adoptado los Eurocódigos, pero en España, lamentablemente, las normativas locales alternativas a estas normas son la norma en el momento de redactar este documento.

7 Conclusiones

La aplicación del procedimiento PAGER a los terremotos históricos en España ha demostrado ser razonable y numéricamente adecuada a pesar de las considerables pérdidas calculadas. Desde un punto de vista metodológico, los parámetros libres (específicos del país) de las funciones de fragilidad del procedimiento PAGER para España proporcionan sistemáticamente valores de pérdida subestimados.

Parece más que razonable utilizar provisionalmente los parámetros libres de los países del norte y del sur del Mediterráneo para ajustar mejor los cálculos de pérdidas resultantes.

Todos los escenarios obtenidos resultan en un nivel de respuesta sugerido a nivel internacional. Para el escenario de Torre Vieja, los modelos conservadores indican pérdidas económicas cercanas a una décima parte del PIB español (Fig. 14 Escenarios T5 y T6) y miles de víctimas; estas cifras son muy desalentadoras. En el caso del evento de Arenas del Rey, y debido a la despoblación rural durante el siglo XX, las cifras son bastante reducidas en comparación, pero igualmente catastróficas, con pérdidas del orden de miles de víctimas y millones de dólares.

Independientemente del escenario modelado en este trabajo, los daños esperados son incompatibles con los mapas actuales de riesgo sísmico español; cabe destacar que, desde el terremoto de Arenas del Rey de 1884, solo se han producido unos pocos terremotos significativos en España. La naturaleza moderada de estos eventos más recientes crea una falsa percepción general de «conciencia moderada del riesgo sísmico» que permea a toda la sociedad, las normativas y los responsables políticos.

Las pérdidas resultantes sugieren firmemente que, actualmente, la sociedad y las administraciones españolas no están preparadas para este tipo de eventos fuertes ocurridos en el pasado reciente (hace aproximadamente 200 años). Eventos similares ocurrirán con seguridad en zonas similares en el futuro, lo que resultará en escenarios devastadores si no se mejoran las políticas territoriales, urbanísticas y turísticas.

Además, el gran número de terremotos referenciados en varios catálogos sísmicos españoles de época preinstrumental (Galbis 1932; Martínez Solares y Mezcuza 2002; Martínez Solares 2011; IGNICIÓN 2024) es profundamente impactante, y la mayoría de estos terremotos rara vez se han estudiado. Los catálogos actuales y las bases de datos de fallas activas deberían revisarse periódicamente (pero no lo hacen), ya que el número de eventos históricos recién descubiertos o estudiados aumenta cada año (p. ej., Rodríguez-Pascua et al. 2023).

Para este tipo de eventos se utiliza la escala ESI-07 (Michetti et al. 2007; Silva y otros. 2015a) mejora las evaluaciones de intensidad, lo que permite la inclusión de registros paleosísmicos en las evaluaciones de riesgo sísmico (SHA) y amplía el período temporal de las observaciones sísmicas a varios miles de años en el pasado. Esto es crucial para mejorar la caracterización de los períodos de retorno (basados en la geología) de 450 a 500 años que se utilizan en las SHA para los códigos sísmicos.

En los últimos años, la iniciativa líder de la Unidad URGE (Unidad de Respuesta a Emergencias Geológicas) del Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC) ha simulado escenarios sísmicos realistas utilizando la metodología adaptada del Programa ShakeMap/PAGER del USGS para planificar ejercicios tácticos relacionados con simulacros de terremotos (Pérez-López et al. 2018a,b). La Unidad Militar de Emergencias del Ejército de Tierra (UME), la policía, protección civil, los bomberos y los legisladores se evaluaron con este enfoque determinista para mapas tácticos y escenarios de pérdidas. Por lo tanto, los simulacros de terremotos ofrecen una visión de lo que podemos esperar durante terremotos fuertes en España. Estos modelos pueden mejorarse si se incorporan progresivamente otros factores clave (población flotante, horario diurno/nocturno y tipo de edificación) para los escenarios de pérdidas más graves.

Expresiones de gratitud Los autores desean agradecer al USGS por desarrollar y mantener el programa PAGER y su política de acceso abierto; esta agencia es un modelo a seguir para todos nosotros desde un punto de vista científico y social.

Contribuciones del autor Todos los autores contribuyeron al estudio, la concepción y el diseño. El primer borrador del manuscrito fue escrito por J. Elez, y todos los autores comentaron todas las versiones previas del mismo.

Manuscrito. PG Silva, MA Rodríguez-Pascua y JL Giner-Róbles realizaron una revisión de terremotos históricos; R. Perez-López e Y. Sánchez-Sánchez diseñaron escenarios individuales y recopilaron datos relativos; J. Elez e Y. Sánchez-Sánchez crearon modelos. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

FondosFinanciación de acceso abierto proporcionada por los Fondos Europeos FEDER y la Junta de Castilla y León en el marco de la Estrategia de Investigación e Innovación para la Especialización Inteligente (RIS3) de Castilla y León 2021–2027. Esta investigación forma parte del Proyecto de Investigación Español I+D+i PID2021-123510OB-I00 (QTECIBERIA-USAL), financiado por el MICIN AEI/<https://doi.org/10.13039/501100011033>/PID2020-113407RB-I00 (FAMRAD). Esta también es una contribución del Grupo de Trabajo QTECT-AEQUA: *Asociación Española para el Estudio del Cuaternario*.

Declaraciones

IncompatibilidadLos autores no declaran ningún conflicto de intereses que revelar.

Acceso abiertoEste artículo está bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional, que permite su uso, intercambio, adaptación, distribución y reproducción en cualquier medio o formato, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor o autores originales y a la fuente, se proporcione un enlace a la licencia Creative Commons y se indique si se realizaron cambios. Las imágenes u otro material de terceros en este artículo están incluidos en la licencia Creative Commons del artículo, a menos que se indique lo contrario en la línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del artículo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener permiso directamente del titular de los derechos de autor. Para ver una copia de esta licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Referencias

- Aguilar-Meléndez A, Pujades LG, Barbat AH, Ordaz MG, de la Puente J, Lantada N, Rodríguez-Lozoya HE (2019) Un enfoque probabilístico para la evaluación del riesgo sísmico basado en funciones de vulnerabilidad, aplicación a Barcelona. *Bull Earthquake Eng* 17(4):1863–1890. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0516-4>
- Alfaro P, Bartolome R, Borque MJ, Estévez A, García Mayordomo J, García-Tortosa FJ, Gil AJ, Gracia E, Lo Iacono C, Perea H (2012) La zona de falla del Bajo Segura: cabalgamiento ciego activo en la Cordillera Bética oriental (SE de España). *J Iber Geol* 38:271–284. https://doi.org/10.5209/rev_JIGE.2012.v38.n1.39217
- Anónimo (1890) Estudios relativos al terremoto ocurrido en Andalucía el 25 de diciembre de 1884 y la constitución geológica del suelo conmovido por las sacudidas efectuadas por la Comisión destinada al objeto por la Academia de Ciencias de París. *Boletín de la Comisión del Mapa Geológico de España, Madrid*, T. XVI:299–303
- Azzaro R, Barbano MS, D'Amico S, Tuvè T, Scari L, Mostaccio A (2011) El terremoto de L'Aquila de 2009: Aplicación de la escala macrosísmica europea al estudio de daños en la zona epicentral. *Boll Geofis Teor Appl* 52:561–581. <https://doi.org/10.4430/bgta0012>
- Baños Castiñeira CJ, Vera Rebollo JF, Díez Santo D (2010) El abastecimiento de agua en los espacios y destinos turísticos de Alicante y Murcia. *Investigando Geo* 51:81–105. <https://doi.org/10.14198/INGEO2010.51.04>
- Baptista MA, Miranda PMA, Victor LM (1992) Análisis de máxima entropía de datos del tsunami portugués, Tsunamis del 28/02/1969 y del 26/05/1975. *Sci Tsunami Hazards* 10:9–20
- Batló J, Martínez-Solares JM, Macià R, Stich D, Morales J, Garrido L (2015) El otoño de 1919 Torre-Serie sísmica de Mendo (Jacarilla) (SE de España). *Ann Geophys* 58(3):S0324. <https://doi.org/10.4401/ag-6686>
- Benito B, Gaspar-Escribano JM (2007) Caracterización del movimiento del terreno y evaluación del riesgo sísmico en España: contexto, problemas y desarrollos recientes. *J Seismol* 11:433–452. <https://doi.org/10.1007/s10950-007-9063-1>
- Benito B, Gaspar-Escribano JM, Rivas-Medina A, Martínez Solares JM (2013) Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España 2012. Instituto Geográfico Nacional (IGN), Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) España. ISBN: 978-84-416-2685-0
- Bouhadad Y, Nour A, Slimani A, Laouami N, Belhai D (2004) El terremoto de Boumerdes (Argelia) de mayo 21, 2003 (Mw = 6,8): deformación del suelo e intensidad. *J Seismol* 8:497–506. <https://doi.org/10.1007/s10950-004-4838-0>

- Bradley R, García Sanjuán L (2017) ¿Tiempo repentino? Los desastres naturales como estímulo para la construcción de monumentos. Desde Silbury Hill (Gran Bretaña) hasta Antequera (España). En: Bickle P, Cummings V, Hofmann D, Pollard J (eds.) *El Neolítico de Europa*. Oxbow Books, Oxford, pp. 188–200
- Bufoñ E, López-Sánchez C, Lozano L, Martínez-Solares JM, Cesca S, Oliveira CS, Udias A (2019) Re-Evaluación de la intensidad sísmica y reubicación de la secuencia sísmica de 1969 en el Cabo de San Vicente: una comparación con el terremoto de Lisboa de 1755. *Pure Appl Geophys* 177:1781–1800
- Carbonell A (1930) El terremoto de montilla. con ilustraciones gráficas. Boletín De La Cámara Oficial Min-Era de Córdoba 15:1–15
- Cauzzi C, Clinton J, Faenza L, Heimers S, Koymans M, Lauciani V, Luzi L, Michelini A, Puglia R, Russo E, Sleeman R (2018) ShakeMapEU: hacia un sistema ShakeMap europeo integrado. En: *Actas de la 20.ª Asamblea General de la EGU, Viena, 8-13 de abril*, pág. 9016
- CCS (2021) Estadística. Riesgos extraordinarios, serie 1971–2018. Consorcio de Compensación de Sector uros, Ministerio de Economía y Empresa, Gobierno de España. Madrid, España
- Comisión del Mapa Geológico de España (1885) Terremotos de Andalucía. Informe dando cuenta del estado de los trabajos. Boletín de la Comisión del Mapa Geológico T. XII. Madrid, España Corbane C, Hancilar U, Ehrlich D, De Groeve T (2017) Evaluación paneuropea del riesgo sísmico: una prueba de Concepto utilizando la rutina de estimación de pérdidas por terremotos (ELER). *Bull Earthq Eng* 15:1057–1083. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-9993-5>
- Crowley H, Dabbek J, De Maio FV et al (2020) D26.8 Pruebas y verificación del riesgo sísmico europeo modelo (ESRM20), entregable del proyecto SERA. www.sera-eu.org. Consultado el 24 de enero de 2024.
- De Pro-Díaz Y, Perea H, Insua-Arévalo JM, Martínez-Díaz JJ, Canora C (2023) Terremoto limitante Fuentes de falla mediante el uso de datos de intensidad y escenarios sísmicos: aplicación a la Cordillera Bética (sur de España). *Front Earth Sci* 25:1–20. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1214836>
- Deligiannakis G, Zimbis A, Papanikolaou I (2023) Pérdida por terremoto y requisitos de capital de solvencia Cálculo de riesgos mediante un modelo de catástrofe específico para cada falla. Documentos de Ginebra, Risk Insur-Issues Pract 48(4):821–846
- Earle PS, Wald DJ, Jaiswal KS, Allen TI, Marano KD, Hotovec AJ, Hearne MG, Fee JM (2009) Evaluación de terremotos globales para la respuesta (PAGER): un sistema para determinar rápidamente el impacto de los terremotos globales en todo el mundo. Informe de archivo abierto del Servicio Geológico de Estados Unidos 2009-1131
- Erdik M, Şeşetyan K, Demircioğlu MB, Zülfişar D, Hancilar U, Tüzün C, Harmandar E (2014) Rápido Evaluación de pérdidas sísmicas tras terremotos devastadores. En: Ansal A (ed.), *Perspectivas sobre la ingeniería sísmica y la sismología europeas*. Ingeniería geotécnica, geológica y sísmica, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07118-3_2
- Ferliche M, Vidal F, García R, Navarro M, Vidal MD, Montilla P, Piñero L (2009) Daños por terremoto Escenarios en el área urbana de Vélez-Málaga (sur de España) aplicables a la planificación local de emergencias. En: VIII taller internacional sobre microzonificación sísmica y reducción del riesgo, Almería, España, 15-18 de marzo de 2009.
- Ferliche M (2012) Elaboración de escenarios de daños sísmicos en la ciudad de Granada. Tesis Doctoral. Instituto andaluz de Geofísica y prevención de Desastres sísmicos. Universidad de Granada. http://digibug.ugr.es/handle/10481/29803#WZy_LbZLe70
- Fouqué F (1890) Estudios relativos al terremoto ocurrido en Andalucía el 25 de diciembre de 1884 y la constitución geológica del suelo conmovido por las sacudidas. Boletín De La Comisión Del Mapa Geológico De España TXVI:305–308
- Galbis J (1932) Catálogo Sísmico de la zona Compreendida Entre los Meridianos 5° E y 20° W de Green-cual y los Paralelos 45° y 25° Norte. Instituto Geográfico Nacional, Madrid, España García-Mayordomo J, Insua-Arévalo JM, Martínez-Díaz JJ et al (2012) La base de datos de fallas cuaternarias de Ibérica (QAFI v.2.0). *J Iber Geol* 38(1):285–302
- Garrido L (2012) El terremoto de Jacarilla de 10 de septiembre de 1919 y su serie de réplicas. Grado Tesis, Universidad Complutense de Madrid, España
- Censo de Godoy (1801) Censo de la población de España en el año 1797 ejecutado de orden del Rey en el de 1801. Madrid: Imprenta. Real, 1801. Instituto Nacional de Estadística, España. Web de NIPO: 729-16-004-3
- Grünthal G, Wahlström R (2003) Un catálogo de terremotos para el centro, norte y noroeste de Europa basado en magnitudes Mw. Informe técnico científico STR, Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Alemania. <https://doi.org/10.2312/GFZ.b103-030104>
- Grützner C, Ruano P, Jabaloy A, Galindo-Zaldívar J, Becker-Heidmann P, Sanz de Galdeano C, Ruders-dorf A, Reicherter K (2013) Historia de la ruptura del Holoceno tardío de la falla de Ventas de Zafarraya (sur de España). Cuaternario y Geomorfología 27(3–4):51–61
- Guarner Calaf C (2017) España, análisis de una realidad: la economía española entre 1850 y 2015. *icade* 101:1–24. <https://doi.org/10.14422/icade.i101.y2017.012>

- GVA (Generalitat Valenciana) (2018) Evolución de la actividad Turística. Provincia de Alicante. El turismo en la Comunidad Valenciana 2018. Turisme Comunitat Valenciana. Gobierno de Valencia, España Hosseinpour V, Saeidi A, Nollat MJ, Nasteve M (2021) Software de estimación de pérdidas sísmicas: un análisis integral Revisión exhaustiva de los pasos de la evaluación de riesgos, desarrollo de software y limitaciones. *Eng Struct* 232:111866. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111866>
- IGE (Instituto Geográfico y Estadístico) (1897) Resultados Provisionales del Censo de la Población de España según el empadronamiento hecho en la península e islas adyacentes el 31 de diciembre de 1897 por la Dirección General del Instituto Geográfico y Estadístico. Madrid, imprenta de la dirección general del Instituto Geográfico y Estadístico (IGE), España
- IGN (2024) Catálogo sísmico de terremotos. Red Sísmica Nacional. Instituto Geográfico Nacional (IGN): Madrid, España. Página web oficial de la Red Sísmica Española. <http://www.ign.es/web/ign/portal/sis-catalogo-terremotos>. Consultado el 20 de diciembre de 2024
- INE (2024) Estadística continua de población. <https://www.ine.es/index.htm>. Consultado el 20 de diciembre de 2024
- INE (Instituto Nacional de Estadística) (nd a) Cálculo de variaciones del Índice de Precios de Consumo (sistema IPC base 2021). <https://www.ine.es/varipcc/>. Consultado el 20 de diciembre de 2024
- Irizarry J, Lantada N, Pujades L, Barbat AH, Goula X, Susagna T, Roca A (2011) Escena que sacude el suelo Evaluación del riesgo urbano y demográfico de Barcelona mediante el método basado en el espectro de capacidad de riesgo-UE. *Bull Earthq Eng* 9:441–466. <https://doi.org/10.1007/s10518-010-9222-6>
- Irizarry J, Macau A, Figueras S, Goula X, Lantada N, Vendrell S, Pujades LG, Blázquez A (2012) Seis-Evaluación del riesgo microbiológico en la ciudad de Girona, España. En: XV Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, Lisboa, Portugal, 24–28 de septiembre
- Jaiswal KS, Wald DJ (2011) Estimación rápida de las consecuencias económicas de los terremotos globales. EE. UU. Informe de archivo abierto del Servicio Geológico 2011-1116, EE. UU.
- Jaiswal KS, Wald DJ, Hearne M (2009) Estimación de víctimas de grandes terremotos en todo el mundo utilizando un Enfoque empírico. Informe de archivo abierto del Servicio Geológico de Estados Unidos 2009-1136, EE. UU.
- Jaiswal KS, Wald DJ (2010) Un modelo empírico para la estimación global de la mortalidad por terremotos. *Earthq Spectra* 26(4):1017–1037. <https://doi.org/10.1193/1.3480331>
- Jaiswal KS, Wald DJ (2013) Estimación de pérdidas económicas causadas por terremotos utilizando un enfoque empírico. *Espectros Earthq* 29(1):309–324. <https://doi.org/10.1193/1.4000104>
- Kircher CA, Reitherman RK, Whitman RV, Arnold C (1997) Estimación de pérdidas sísmicas en edificios. *Espectros Earthq* 13(4):703–720. <https://doi.org/10.1193/1.1585976>
- Kircher CA, Seligson HA, Bouabid J, Morrow G (2006) Cuando el gran huracán ataca de nuevo: pérdidas estimadas debido a una repetición del terremoto de San Francisco de 1906. *Earthq Spectra* 22(2):297–339. <https://doi.org/10.1193/1.2187067>
- LandScan (2019) LandScan™, conjunto de datos de población global de alta resolución con derechos de autor de UT-battelle, LLC, operador del Laboratorio Nacional de Oak Ridge bajo el Contrato No. DE-AC05-00OR22725 con el Departamento de Energía de los Estados Unidos, Estados Unidos
- Lantada N, Irizarry J, Barbat AH, Goula X, Roca A, Susagna T, Pujades L (2010) Peligro y riesgo sísmico Escenarios para Barcelona, España, utilizando el método del índice de vulnerabilidad de riesgo-UE. *Bull Earthq Eng* 8:201–229. <https://doi.org/10.1007/s10518-009-9148-z>
- Larramendi MJ (1829) Memoria, relación de circunstancias y estado general de pérdidas causadas por la terrible catástrofe de los terremotos del 21 de marzo y siguientes han causado en Torrevieja y Gobernación de Orihuela. Imprenta Real, Madrid, España
- Madarieta-Txurruka A, González-Castillo L, Peláez JA, Catalán M, Henares J, Gil AJ, Lamas-Fernández F, Galindo-Zaldívar J (2022) El papel de las fallas como barreras en secuencias sísmicas confinadas: Sismicidad de 2021 en la Cuenca de Granada (Cordillera Bética). *Tectonics* 41:e2022TC007481
- Madoz P (1846) Diccionario Geográfico-Estadístico-Histórico de España y sus posesiones de Ultramar. Madrid, España
- Marincini F, Appiotti F, Ferretti M, Antinori C, Melonaro P, Pusceddu A, Oreficini-Rosi R (2012) Percepción y comunicación del riesgo sísmico: el estudio de caso del terremoto de L'Aquila del 6 de abril de 2009. *Earthq Spectra* 28(1):159–183. <https://doi.org/10.1193/1.3672928>
- Martínez Solares JM (2001) Los efectos en España del Terremoto de Lisboa (1 de noviembre de 1755). Monografías Instituto Geográfico Nacional, IGN. Madrid, España
- Martínez Solares JM, Mezcua J (2002) Catálogo Sísmico de la Península Ibérica (880 aC–1900). instituto Geográfico Nacional: Madrid, España
- Martínez Solares JM (2016) Terremotos en España. Actividad reciente en el Mar de Alborán. Consorcio de Seguros, Revista digital. <https://www.consortsegurosdigital.com/numero-04/en-profundidad/terremotos-en-espana-actividad-reciente-en-el-mar-de-alboran>. Consultado el 1 de junio de 2024
- Mezcua J, García Blanco RM, Rueda J (2008) Sobre la atenuación del movimiento del terreno intenso en España. *B Seismol Soc Am* 98(3):1343–1353. <https://doi.org/10.1785/0120070169>

- Michetti AM, Esposito E, Guerrieri L et al (2007) Escala de intensidad ESI 2007, ISPRA 74. ISBN 9788824029032
- NCSE-02 (2002) Norma de la construcción sismorresistente española (2002). Real Decreto 997/2002, de 27 de septiembre. <https://www.ign.es/web/sis-norma-sismorresistente>. Consultado el 20 de diciembre de 2024 Ayuntamiento de Orihuela (2016) Informe de la estrategia integrada para el desarrollo sostenible, Ayuntamiento de Orihuela, Murcia, España
- Orueta y Duarte D (1885) Informe sobre los terremotos ocurridos en el sur de España en diciembre de 1884 y Enero de 1885. Sociedad de Ciencias Físicas y Naturales de Málaga Málaga, España
- Pereira AS (2009) La oportunidad de un desastre: el impacto económico del terremoto de Lisboa de 1755. *J Econ Hist* 69(2):466–499
- Pérez-López R, Elez J, Rodríguez-Pascua MA, Silva PG, Bejar-Pizarro M, Giner-Robles JL (2018a) Mapas de Intensidad Sísmica (ShakeMaps) a tiempo real para la planificación de los simulacros de terremotos que afectan a zonas urbanas. *Rev Protección Civil* 97:1–2
- Pérez-López R, Elez J, Silva PG, Giner-Robles JL, Rodríguez-Pascua MA, Roquero E, Bardají T (2018b) Utilización de ShakeMaps y efectos geológicos como escenarios para simulacros en gestión de desastres por terremoto. Avances en el estudio de fallas activas, terremotos y peligrosidad sísmica de Iberia. IBERFAULT III Resúmenes de la 3ª Reunión Ibérica sobre Fallas Activas y Paleosismología, Editado por C. Canora et al., Universidad de Alicante, Alicante, España. ISBN: 978-84-09-02473-5
- Quirós Hernández LE (2017) Modelizaciones y análisis de sensibilidad en la evaluación integral del riesgo Sísmico a escala Urbana. Aplicación a la ciudad de Lorca. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España
- Reicherter KR, Jabaloy A, Galindo-Zaldívar J, Ruano P, Becker-Heidmann P, Morales J, Reiss S, González-Lodeiro F (2003) Actividad paleosísmica repetida de la falla de Ventas de Zafarraya (sur de España) y su relación con el terremoto de Andalucía de 1884. *Int J Earth Sci* 92(6):912–922. <https://doi.org/10.1007/s00531-003-0366-3>
- Rodríguez-Pascua MA, Silva PG, Perucha MA, Giner-Robles JL, Heras C, Bastida AB, Carrasco P, Roquero E, Lario J, Bardají T, Pérez-López R, Elez J (2016) Estructuras de licuefacción sísmicamente inducida en el yacimiento arqueológico de La Magdalena, Complutum romana del siglo IV d.C. (Madrid, España). *Sedimento Geol* 344:34–46. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.01.025>
- Rodríguez-Pascua MÁ, Perucha MÁ, Silva PG, Montejo Córdoba A, Giner-Robles JL, Elez J, Bardají T, Roquero E, Sánchez-Sánchez Y (2023) Evidencia arqueosismológica de daños sísmicos en la medina Azahara (Córdoba, España) de principios del siglo XI. *Appl Sci* 13:1601. <https://doi.org/10.3390/app13031601>
- Rodríguez-Pascua MA, Silva PG, Perucha MA, Giner-Robles JL, Elez J, Roquero E (2017) El escenario sísmico del Terremoto de Arenas del Rey de 1884 (España). En: Gonçalves C et al. (ed), *Mudanças em Sistemas Ambientais e sua Expressão Temporal*. Universidade del Algarve, Faro, Portugal. <http://hdl.handle.net/10400.1/10066>
- Rodríguez-Pascua MA, Silva PG, Perucha MA, Giner-Robles JL, Elez J, Roquero E (2018) Efectos ambientales del terremoto de Arenas del Rey de 1884 (España). Aplicación de la escala ESI07. En: Canora C, et al (ed), IBERFAULT III Resúmenes de la 3ª Reunión Ibérica sobre Fallas Activas y Paleosismología. Universidad de Alicante, Alicante, España. ISBN: 978-84-09-02473-5
- Rovida A, Antonucci A, Locati M (2022) El catálogo europeo de terremotos preinstrumentales EPICA, El catálogo 1000–1899 del modelo europeo de riesgo sísmico 2020. *Earth Syst Sci Data* 14:5213–5231. <https://doi.org/10.5194/essd-14-5213-2022>
- Ayuntamiento de Guardamar de Segura (2018) Población estimada para 2018. Web del Ayuntamiento de Guardamar de Segura, Alicante, España. <https://www.facebook.com/GuardamarAyuntamiento/posts/1903966752951439/>. Consultado el 20 de diciembre de 2024
- Silva PG, Guerrieri L, Michetti AM (2015a) Escala de intensidad ESI 2007 para evaluar la intensidad de los terremotos. Lazos. En: Beer M, Kougiumtzooglou IA, Patelli E, Au SK (eds.) *Enciclopedia de ingeniería sísmica*. Springer, Berlín/Heidelberg
- Silva V, Marques M, Castro JM, Varum H (2015b) Desarrollo y aplicación de un sistema de pérdida en tiempo real Marco de estimación para Portugal. *Bull Earthq Eng* 13:2493–2516. <https://doi.org/10.1007/s10518-015-9743-0>
- Silva PG, Elez J, Giner-Robles JL, Rodríguez-Pascua MA, Pérez-López R, Roquero E, Bardají T, Martínez-Graña AM (2017) ESI-07 ShakeMaps para eventos instrumentales e históricos en la Cordillera Bética (SE de España): un enfoque basado en datos geológicos y aplicado a la amenaza sísmica. *Quat Int* 451:185–208. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.10.020>
- Silva PG, Rodríguez-Pascua MA, Giner-Robles JL, Elez J, Pérez-López R, Davila MBB (2019b) Cata-Dialogo de los efectos geológicos de los terremotos en España basado en la escala macrosísmica ESI-07:

- Una nueva base de datos para el análisis de riesgo sísmico. *Geoscience* 9:334.<https://doi.org/10.3390/geociencia59080334>
- Silva PG, Rodríguez-Pascua MA, Giner-Robles JL et al (2019a) Catálogo de los Efectos Geológicos de los Terremotos de España, 2a. Serie Riesgos Geológicos y Geotecnia. Instituto Geológico y Minero de España IGME, Madrid, España
- Stucchi M, Rovida A, Gomez Capera AA et al (2013) El catálogo europeo de terremotos SHARE (SHEEC) 1000–1899. *J Seismol* 17(2):523–544
- Taramelli T, Mercalli G (1886) I terremotti Andalusí cominciati il 25 dicembre 1884. *Atti Reale Accademia Dei Lincei (Romaní)* III(4):116–222
- Ayuntamiento de Torrevieja (2024). Población estimada en temporada de verano. Ayuntamiento de Torrevieja, Alicante. España.<http://www.torrevieja.es/sal/noticias/2018/09/Datos%20Turismo%20Verano%202018/index.aspx>. Consultado el 1 de junio de 2024
- Udías A (2015) Terremotos históricos (anteriores a 1755) de la Península Ibérica en catálogos antiguos. *Seismol Res Lett* 86:999–1005.<https://doi.org/10.1785/0220140200>
- USGS (2024a) Programa de riesgo sísmico “M6.3—Italia central”. Instituto Geológico de los Estados Unidos Vaya. https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000gvtu/executive#general_region. Consultado el 1 de junio de 2024
- USGS (2024b) Programa de riesgo sísmico “M 6.8—Al Haouz, Marruecos”. United States Geological Survey. Encuesta de Cal.<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000kufc/shakemap/intensity>. Consultado el 1 de junio de 2024
- Worden CB, Thompson EM, Hearne M, Wald DJ (2020) Manual de ShakeMap en línea: manual técnico, Guía del usuario y guía del software. Servicio Geológico de Estados Unidos.<https://doi.org/10.5066/F7D21VPQ>
- Wyss M, Rosset P (2020) Estimaciones de pérdidas en tiempo casi real para futuros terremotos italianos basadas en el M6.9 Ejemplo de Irpinia”. *Geociencias* 10(5):165.<https://doi.org/10.3390/geosciences10050165>

Nota del editor Springer Nature se mantiene neutral con respecto a los reclamos jurisdiccionales en mapas publicados y afiliaciones institucionales.