

El riesgo de tsunami como parte de un escenario de amenazas múltiples en cascada: elementos para la seguridad

The tsunami risk as part of a cascading multi-hazard scenario: elements for security

José A. Aparicio Florido¹

¹ Instituto Español para la Reducción de los Desastres (IERD), España

aparicioflorido@gmail.com

RESUMEN. Los tsunamis son amenazas naturales que cuentan en España con un relevante número de registros en los catálogos sísmicos. Sin embargo, sus períodos de recurrencia son difíciles de determinar debido a que muy pocos terremotos, en fallas concretas, son capaces de generar este tipo de fenómenos. Cuando ocurre, el tsunami no se manifiesta como un riesgo aislado sino que es siempre efecto de otra amenaza precedente y, al mismo tiempo, potencial causa subsecuente de otros efectos ulteriores, formando parte de un proceso de amenazas múltiples en cascada. Así lo demuestran tres de estos escenarios en cascada modelizados en este artículo, correspondientes a los episodios de 1755, 1969 y 2003, a los que se acompañan las simulaciones numéricas de previsible propagación de olas precalculados por la Red Sísmica Nacional. Su análisis demuestra la necesidad de adaptar la planificación de protección civil a la interrelación de las amenazas, ya sean concurrentes o encadenadas.

ABSTRACT. In Spain, tsunamis are natural hazards with a relevant number of records in the earthquake catalogues. However, it is difficult to determine its recurrence because very few earthquakes, on specific faults, can generate this type of phenomena. When it occurs, the tsunami does not become an isolated risk but is always the effect of a previous threat and, at the same time, a potential subsequent cause of other aftereffects, forming part of a cascading multi-hazard process. It will be shown in this paper, where three of these cascading scenarios corresponding to the 1755, 1969 and 2003 episodes are modeled, paired with numerical simulations of foreseeable propagation of waves pre-calculated by the National Seismic Network. Its analysis will demonstrate the need to adapt civil protection planning to the interrelation of hazards, whether concurrent or chained.

PALABRAS CLAVE: Tsunami, Riesgo, Amenaza, Cascada, Seguridad.

KEYWORDS: Tsunami, Risk, Hazard, Cascade, Security.

1. Génesis y recurrencia de los tsunamis

Los tsunamis o maremotos¹ son olas o series de olas generadas por el repentino desplazamiento vertical de una columna de agua que a su vez es originado por otro fenómeno previo que lo desencadena: la actividad sísmica, el vulcanismo explosivo, un deslizamiento sobre o bajo el agua, el impacto de un asteroide o ciertos episodios meteorológicos, los cuales pueden tener lugar en océanos, bahías, lagos, ríos o reservorios (Bryant, 2001). En este sentido, tanto los tsunamis como los seiches —ondas estacionarias generadas por las ondas sísmicas al atravesar el cuerpo de agua de ríos, embalses, estanques y lagos— se forman siempre a partir de un elemento desestabilizador y son, sin excepción, el producto siguiente e inmediato de un efecto en cascada, también llamado efecto en cadena o efecto dominó, donde el tsunami no tiene por qué representar una mayor preocupación que la amenaza desencadenante.

Aunque la génesis de los tsunamis no se circunscribe a los terremotos con epicentro submarino, el 80-85% tienen esta naturaleza (Whitmore et ál., 2008; Cantavella et ál., 2021; Vázquez-Garrido et ál., 2022). Sin embargo, conviene poner de relieve tres axiomas básicos: 1º) no todas las fallas generan tsunamis; 2º) muy pocos terremotos con hipocentros en fallas tsunamigénicas generan tsunamis; y 3º) muy pocos tsunamis son destructivos. Por tanto, el rango de probabilidad adquiere la forma diagramática de una pirámide invertida (figura 1). Son las fallas con desplazamiento vertical (normales o inversas) las que por su mecanismo focal tienen potencial propio para poner en movimiento la columna de agua que las cubre, lo que no presupone descartar que algunas fallas de salto en dirección también puedan hacerlo en combinación con otros efectos cosísmicos; y son los terremotos de magnitud $\geq 6,0$ los que, en función de su profundidad y tipo de falla, podrían reunir las condiciones mínimas necesarias para generar tsunamis.



Figura 1. El rango de probabilidad de los tsunamis destructivos adquiere la forma de una pirámide invertida. Fuente: Elaboración propia.

En relación con su capacidad destructiva, tsunamis como el de 1755 —considerado como el peor escenario posible en el contexto sísmico del territorio español— tienen períodos de recurrencia superiores a 200 años (Martínez-Solares, 2001). Según Ruiz-Muñoz et ál. (2005), en los últimos 7.000 años se han registrado en el sur peninsular en torno a 20 tsunamis, de los que no todos han sido confirmados por tsunamitas, esto es, depósitos sedimentarios marinos que han dejado una impronta geológica en el litoral. Esto les lleva a proponer que la frecuencia de repetición de estos fenómenos con impacto costero estaría entre los 300 y 400 años, sin incluir los meramente instrumentales como es el caso del 28 de febrero de 1969. Lario et ál. (2010a), al igual que el resto de investigadores que han abordado el catálogo de tsunamis históricos, reconocen que el cálculo para estos eventos de alta energía (EVE) es muy problemático, pudiendo estimarse para el Golfo de Cádiz entre 1200 y 1500 años (Lario et ál., 2010b; Lario et ál., 2011). Este lapso temporal ha sido rebajado por Ruiz-Muñoz et ál. (2013), que sitúan los períodos de retorno de los episodios dañinos entre 700 y 1000 años; y por Gracia (2017), que considerando un más que posible tsunami datado mediante C^{14} por Becker-Heidmann et

¹ En el art. 1 del Real Decreto 1053/2015, de 20 de noviembre, por el que se aprueba la directriz básica de planificación de protección civil ante el riesgo de maremotos se afirma que el término tsunami es equivalente a maremoto, decantándose la normativa española por el segundo. En este artículo se empleará preferentemente la palabra tsunami por su carácter internacional, reservando maremoto para las referencias normativas.

ál. (2007) entre 1421 y 1451, reduciría el período de retorno por debajo de los 700 años. Este criterio es compartido por Aparicio (2017), que analizando la secuencia cíclica de los grandes terremotos tsunamigénicos ocurridos entre el s. III a.C. y el s. XVIII extrae una recurrencia aproximada de 500-600 años. De lo que no cabe duda es de que la acción de los tsunamis es más frecuente de lo que se piensa (Luque, 2008) y que, como bien afirma Rodríguez-Vidal (2017), no debe obviarse que uno solo de estos eventos de magnitud similar al del 218 a.C. o el de 1755 puede tener un efecto altamente destructivo. Con todo, la probabilidad de que un tsunami provoque inundación costera en el litoral español es muy baja, mientras que sí son esperables efectos severos del terremoto que lo antecede.

Por otra parte, la recurrencia de los tsunamis en las costas españolas, sea cual sea la causa que los genere y la mayor o menor intensidad de su impacto, no está clara dada la escasez y dudosa fiabilidad de los testimonios recogidos en los catálogos sísmicos no instrumentales. Lo que sí manifiestan los datos corroborables es una proporción de 9,5 a 1 de recurrencia en el Mediterráneo con respecto al Atlántico NE (Bryant, 2001). El gran vacío existente anterior al s. XVIII (figura 2) se justifica por la ausencia de textos descriptivos en determinados períodos históricos, la omisión de hechos de escaso interés literario, la imposibilidad de distinguir entre distintos tipos de EWE —por ejemplo, el acaecido frente a las costas de Cádiz en 1731 (Gracia el ál., 2022)— y, en un sentido similar, los tsunamis no detectables al ojo humano anteriores a la época instrumental y que podríamos denominar invisibles. Uno de ellos fue el ocurrido el 28 de febrero de 1969, sentido ampliamente en España, Portugal y Marruecos, de magnitud 7,8° Mw e intensidad máxima VIII-IX (IGN), que fue registrado en los mareógrafos de estos tres países con un pico de amplitud de 1,2 m en Casablanca (Martínez-Solares, 2005). A pesar de ello, ni siquiera los medios de comunicación se hicieron eco de ello, centrándose en informar sobre los efectos del terremoto. Esto lleva a replantear cuántos eventos como este han pasado desapercibidos en época histórica y preinstrumental, y, por tanto, cuál es el período de recurrencia real de estos fenómenos, lo cual no es objeto de este artículo. Pero dado que no es un hecho tan excepcional como parecía, los antecedentes conocidos y sus consecuencias son suficientes como para abordar en este trabajo la forma en que se ha incorporado el riesgo de tsunami en el sistema nacional de protección civil, el desarrollo del sistema de alerta de tsunamis para la cuenca del Mediterráneo y Atlántico NE, la gestión de estas alertas en España, el contexto de amenazas múltiples en cascada en el que se enmarcan estos fenómenos y las simulaciones numéricas precalculadas para los escenarios de 1755, 1969 y 2003.

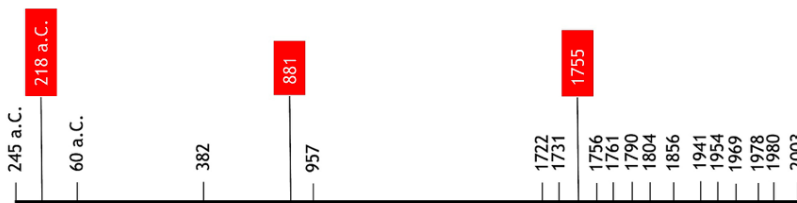


Figura 2. Resumen de eventos tsunamigénicos de los que existen referencias. En fondo rojo se destacan los de mayor penetración costera. Obsérvese el vacío documental anterior a 1755. Fuente: Elaboración propia a partir de los catálogos sísmicos.

2. El riesgo de tsunami en la planificación española

La Ley 17/2015, de 9 de julio, del Sistema Nacional de Protección Civil (LSNPC) incorporó el riesgo de tsunami como uno de los deben conformar el catálogo de planes especiales a nivel nacional y autonómico, y que pueden llegar a afectar a la seguridad nacional. En noviembre de ese mismo año se aprobó la directriz básica necesaria para elaborar estos nuevos planes y en mayo de 2021 se aprobó el plan estatal ante este riesgo. Dada la lentitud legislativa que manifiestan los rangos de fechas entre la aprobación de otras directrices básicas y sus correspondientes planes básicos o estatales (tabla 1), es destacable la premura con la que se abordó este fenómeno.

Riesgo	Directriz básica	Plan estatal
Conflictos bélicos	-	-
Accidentes nucleares	-	Real Decreto 1546/2004, de 25 de junio
Inundaciones	Resolución de 31 de enero de 1995	Resolución de 2 de agosto de 2011
Terremotos	Resolución de 5 de mayo de 1995	Resolución de 29 de marzo de 2010
Erupciones volcánicas	Resolución de 21 de febrero de 1996	Resolución de 30 de enero de 2013
Transporte de mercancías peligrosas	Real Decreto 387/1996, de 1 de marzo	-
Accidentes químicos	Real Decreto 1196/2003, de 19 de septiembre	Real Decreto 1070/2012, de 13 de julio
Accidentes radiológicos	Real Decreto 1564/2010, de 19 de noviembre	Real Decreto 1054/2015, de 20 de noviembre
Incendios forestales	Real Decreto 893/2013, de 15 de noviembre	Resolución de 31 de octubre de 2014
Tsunamis	Real Decreto 1053/2015, de 20 de noviembre	Resolución de 19 de mayo de 2021
Fenómenos meteorológicos adversos	-	-
Riesgos biológicos	-	-
Accidentes de aviación civil	Real Decreto 837/2020, de 15 de septiembre.	-

Tabla 1. Fechas de aprobación de las directrices básicas y sus correspondientes planes especiales estatales. Fuente: Elaboración propia a partir de la normativa en vigor.

Su justificación no es otra que el definitivo arranque del Sistema de Alerta de Tsunamis en el Atlántico Nororiental y el Mediterráneo y Mares Adyacentes (NEAMTWS), que estuvo precedida de dos ejercicios de comunicación denominados NEAMWave en 2012 y 2014, iniciando su andadura en tiempo real a finales de 2015 con una primera alerta real emitida el 17 de noviembre de ese año tras registrarse un terremoto con epicentro frente a las islas jónicas. La activación automática de las alertas involucraba a los países receptores, entre ellos España, en su difusión dentro cada ámbito nacional.

3. El sistema de alerta temprana NEAMTWS

3.1. Puesta en marcha y ejercicios preparatorios

Tras la catástrofe de Sumatra del 26 de diciembre de 2004, entre las prioridades de acción de la Conferencia Mundial sobre la Reducción de los Desastres celebrada en Kobe (Japón) del 18 al 22 de enero de 2005 se incluyó el compromiso de potenciar la creación de sistemas de alerta temprana ante el riesgo de tsunami no solo en el océano Índico sino en aquellos lugares que carecían de ellos, como el Caribe, el Atlántico nororiental, el Mediterráneo y los mares conectados a estas tres cuencas. Pocos días después, el establecimiento de estos sistemas fue encargado por la UNESCO a la Comisión Oceanográfica Internacional (IOC), que en sesión asamblearia celebrada en París del 21 al 30 de junio de 2005 decidió establecer un Grupo de Coordinación Internacional (ICG) para el desarrollo del sistema NEAMTWS.

La fase de puesta a punto se prolongó hasta 2012, año en que se iniciaron las pruebas. Los ejercicios realizados entre 2012 y 2014 consistieron en el envío de mensajes desde los centros sismológicos proveedores de las alertas (TWP) a los puntos focales de posible impacto (TFP) con tres niveles de alerta: watch (vigilancia), advisory (aviso) e information (información). En general, el nivel de participación de las autoridades de protección civil nacionales en la zona NEAM durante el ejercicio de 2012 fue menor de lo esperado o deseado (Necmioglu et ál., 2013: 47), actuando solo 18 países de los 39 que se adscribieron al NEAMTWS. No tuvo mejor acogida el de 2014, en el que colaboraron 21 países, tres más que la vez anterior. En esta segunda ocasión, el Instituto Español de Oceanografía (IEO) quedó configurado por defecto como el contacto nacional sobre los tsunamis (TNC), y la Dirección General de Protección Civil y Emergencias (DGPCE) como el punto focal encargado de la recepción y alerta (TWFP) al resto de autoridades competentes en cada comunidad autónoma.



3.2. Primeras alertas reales

La primera alerta real de tsunami se emitió el 17 de noviembre de 2015 tras un terremoto de magnitud $6,0^{\circ} M_L$ con epicentro en las coordenadas $38,67^{\circ} N$ $20,60^{\circ} E$, a 10 km al W de Léucade, y a $\sim 10,7$ km de profundidad (NOA), ocasionando una redundancia informativa al ser emitida por partida doble tanto por el National Observatory of Athens como por el Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia italiano (INGV). En España, los mensajes fueron retransmitidos en su idioma original (inglés) desde la DGPCE a los servicios de protección civil de las comunidades autónomas y desde ahí a los ayuntamientos costeros, con destino final, en la gran mayoría de los casos, a las jefaturas de policía local.

Cuatro días después de este episodio se publicó la Directriz Básica de Maremotos, que no establecía ningún protocolo de alerta definitivo ni provisional, sino que remitía al futuro plan estatal el establecimiento del Sistema Nacional de Alerta por Maremotos (SINAM). Puesto que dicho plan no fue aprobado hasta mayo de 2021, el vacío existente durante ese intervalo se cubrió inicialmente por parte de algunos servicios regionales mediante la elaboración de unas guías de interpretación de los mensajes y la traducción del inglés al español, lo cual ralentizaba la llegada de la información hasta las autoridades locales.

Así se gestionó el siguiente evento notificado por el sistema NEAMTWS a las 01:36 UTC del 24 de agosto de 2016 tras un terremoto de magnitud $6,0^{\circ} M_w$, con epicentro en las coordenadas $42,69^{\circ} N$ $13,23^{\circ}$, a 1 km al W de Accumoli, y a ~ 8 km de profundidad (INGV). Los mensajes de alerta volvieron a llegar de forma automática hasta los TFP nacionales y de ahí hasta los centros de coordinación de emergencias de las comunidades autónomas, que lo trasladaron a los municipios costeros previa traducción. Lo interesante de este evento sísmico es que su foco estuvo situado tierra adentro a ~ 50 km de la costa adriática; pero cabe aclarar que la alerta de tsunami no se activó automáticamente por un error del sistema, sino que el sistema prevé la posibilidad de que terremotos de magnitud superior a $6,0^{\circ}$ con epicentro a menos de 100 km tierra adentro pueden generar tsunamis por efecto cosísmico en forma de deslizamientos submarinos, como sucedió en 1954 y 2003, ambos en la costa argelina.

La tercera y última alerta de tsunami entre la activación del sistema NEAMTWS y la implantación en España del SINAM ocurrió a las 11:51 UTC del 30 de octubre de 2020, de magnitud $6,7^{\circ} M_L$, con epicentro a 17 km al N de la isla de Samos (Grecia), en las coordenadas $37,90^{\circ} N$ $26,81^{\circ} E$, e hipocentro a $\sim 11,9$ km de profundidad (NOA). El evento sísmico sí provocó en esta ocasión una inundación en dos puntos del distrito de Seferihisar, en la provincia de Esmirna (Turquía), y en la propia isla de Samos, que inundaron calles y establecimientos próximos a la costa, y arrastraron veleros de gran porte (Mourenza, 2020). Para entonces ya había sido aprobada la Directriz Básica de Protección Civil ante el Riesgo de Maremotos, pero no así el plan estatal y el definitivo protocolo de alerta, que no verían la luz hasta el año siguiente.

4. La gestión de las alertas de tsunami en España

4.1. El Sistema Nacional de Alerta de Maremotos (SINAM)

El SINAM, implantado en España mediante la aprobación del Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo de Maremotos, integra los siguientes sistemas de información y alerta: a) la Red Sísmica Nacional (RSN), dependiente del IGN; b) la red de mareógrafos de Puertos de Estado (REDMAR), los sistemas de detección del IEO y demás sistemas de detección marina gestionados por las administraciones públicas que puedan proporcionar información útil; c) los proporcionados por instituciones internacionales y países vecinos; y d) las alertas emitidas por los centros regionales de aviso de tsunami establecidos por el IOC/NEAMTWS. Sin embargo, en España es la RSN la encargada a nivel nacional de «detectar, valorar e informar, en primera instancia, aquellos fenómenos que, por sus características, pudieran producir maremotos». Esto significa que, aunque tanto la DGPCE como el IEO sigan recibiendo los mensajes del sistema internacional NEAMTWS, dentro del territorio nacional solo se difundirán oficialmente y en español los mensajes elaborados por la RSN con base en el protocolo y matrices de decisión establecidos en el Anexo II del plan, y utilizando unas simulaciones numéricas de propagación de olas precalculadas mediante métodos deterministas, almacenadas

en una base de datos que cuenta con miles de supuestos diferentes en función del epicentro, profundidad, magnitud y otros parámetros definitorios. Cuando la red sismográfica del IGN detecta un terremoto potencialmente tsunamigénico, se compara y extrae de esta base de datos el más parecido y se emiten los mensajes preconfigurados, con el nivel de alerta que corresponda a cada zona, a la lista de destinatarios igualmente previstos. Este proceso se genera de forma automática en un tiempo inferior a 5 min desde tiempo origen (t_0) y sin revisión humana. A él le seguirán a intervalos los subsiguientes mensajes de confirmación o cancelación, según corresponda, en los que se irán incorporando, ya con intervención humana, la información procedente de las simulaciones numéricas reales elaboradas por el grupo EDANYA de la Universidad de Málaga (modelo Tsunami-HySEA) con datos más precisos de generación, propagación e inundación costera, y los registros de la red de mareógrafos. De este modo se reajustarán en cada mensaje de actualización los niveles de alerta, alturas de ola y tiempos de arribo a cada segmento de costa.

Los mensajes se notifican mediante correo electrónico únicamente al Centro Nacional de Seguimiento y Coordinación de Emergencias (CENEM) y desde aquí a los centros de coordinación operativa autonómicos, que actúan como correa de transmisión con las autoridades locales. En cuanto a los mensajes procedentes del NEAMTWS, no tienen otro tratamiento que ser incorporados al SINAM a modo puramente informativo o de cotejo.

4.2. Niveles de alerta

Los niveles de alerta son tres y adoptan la clasificación realizada por el NEAMTWS: verde (información), amarillo (aviso) y rojo (alerta). El nivel verde significa que no hay riesgo de tsunami o que solo se prevén alturas de ola $< 0,2$ m en mar abierto o altura vertical máxima en tierra $< 0,5$ m; en nivel amarillo, la altura de la ola en mar abierto quedaría en el rango de $0,2-0,5$ m y la altura vertical máxima en tierra en el rango $0,5-1,0$ m; por último, en nivel rojo, la ola alcanzaría una altura en mar abierto $> 0,5$ m y altura vertical máxima en tierra $> 1,0$ m. Se habrá podido observar que el watch o máximo nivel de alerta del NEAMTWS ha sido traducido en la planificación española como alerta y no como vigilancia, lo cual genera una aparente redundancia semántica al coincidir este término con uno de los tres niveles de alerta, de modo que watch representa en España el nivel de alerta alerta; de ahí que en adelante me referiré a ellos por sus colores, incluidas las tablas de simulaciones numéricas. En la figura 3 se muestra un modelo de mapa sectorizado.



Figura 3. Modelo teórico de mapa sectorizado con los tres niveles de alerta previstos en las matrices de decisión. Fuente: Elaboración propia a partir de los ejemplos de mensaje de alerta que figuran en el Plan Estatal ante el Riesgo de Maremotos.

Con respecto a la estructura de los mensajes, ésta ha sido sensiblemente modificada en el protocolo español de modo que, además de los datos sísmicos, se especifican las provincias potencialmente afectadas y, en cada una de ellas, los distintos niveles de alerta para cada tramo de costa y las horas estimadas de llegada.

En caso de confirmarse el tsunami se incluirá además la altura de ola registrada en los diferentes mareógrafos, y boyas si las hubiere, nacionales e internacionales. Si el terremoto no reúne características para generarlo, se sustituirá toda la información anterior por un texto aclaratorio y único indicando que no se espera que afecte a las costas españolas.

5. El programa TsunamiReady®

Como complemento a la planificación de emergencias y a la gestión de alertas de tsunami, la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) ideó en 2001 un programa denominado TsunamiReady® basado en el modelo StormReady®, orientado a los fenómenos meteorológicos extremos y temporales, al objeto de dotar a la población estadounidense de las habilidades y conocimientos necesarios para sobrevivir a un tsunami antes, durante y después de un evento (Haddow et ál, 2008). Es, por tanto, una iniciativa anterior al tsunami de Indonesia de 2004 y a la decisión de la UNESCO de desarrollar el NEAMTWS. Su objetivo principal es reforzar la seguridad pública previendo medidas de mitigación que minimicen sus consecuencias antes de que se desencadene el fenómeno, aumentando la preparación de las comunidades expuestas a este riesgo y mejorando la respuesta de las Administraciones públicas, los gestores de emergencias y los ciudadanos, con la ayuda de una serie de pautas metodológicas (tabla 2).

Mitigación	1	Haber designado y cartografiado las zonas de riesgo de tsunami.
	2	Incluir información sobre el riesgo de tsunami y la vulnerabilidad de la comunidad en el plan de mitigación de amenazas múltiples aprobado por Agencia Federal de Gestión de Emergencias (FEMA) para la comunidad.
	3	Instalar señalización identificativa de las áreas de riesgo de tsunami, rutas de evacuación y puntos de reunión en terrenos elevados.
Preparación	1	Elaborar mapas de evacuación de fácil comprensión bajo determinación de las autoridades locales.
	2	Mantener un esfuerzo continuo y sostenido de educación pública sobre los tsunamis, apoyado en materiales de divulgación.
	3	Apoyar un esfuerzo continuo de educación específica en los centros escolares.
	4	Realizar al menos una actividad educativa o de alcance comunitario con carácter anual.
	5	Realizar ejercicios comunitarios que refuercen los aspectos reseñados en los apartados 1 y 4 de este bloque.
	6	Realizar simulacros de evacuación en todos los centros educativos de la zona evacuable para reforzar los aspectos reseñados en los apartados 1 y 4 de este bloque.
Respuesta	1	Abordar el riesgo de tsunami en el plan de emergencias de la comunidad.
	2	Abordar el riesgo de tsunami en los planes de autoprotección de todos los centros educativos de la zona expuesta.
	3	En caso de activación, comprometerse a apoyar el CECOP durante la gestión del incidente.
	4	Disponer de medios redundantes y confiables en los CECOP y otros centros de respuesta 24x7 para recibir los mensajes de información, aviso y vigilancia de tsunami.
	5	Disponer de medios redundantes y confiables en los CECOP y otros centros de respuesta 24x7 al objeto de difundir al público los mensajes oficiales de información, aviso y vigilancia de tsunami.
	6	Disponer de receptores de radio en instalaciones críticas y establecimientos públicos.
	7	Realizar ejercicios del plan de emergencia que pongan a prueba al menos un componente del CECOP o un elemento de las respuestas 4 a 6.

Tabla 2. Pautas requeridas para la certificación del programa TsunamiReady®. Fuente: NOAA.

A partir de 2015, este programa de marca registrada se internacionalizó y personalizó bajo el paraguas del Programa de Reconocimiento TsunamiReady de UNESCO/IOC, gracias al interés de este organismo por hacerlo extensivo a otros lugares del planeta. De este modo, en febrero de 2020 ya había 192 comunidades certificadas en 16 estados de las costas este y oeste de los Estados Unidos por el programa TsunamiReady® estadounidense, mientras que entre 2017 y 2022 habían sido certificadas por la UNESCO/IOC un total de 29 comunidades locales distribuidas entre centroamérica (25), India (2) e Indonesia (2). Por último, este último programa estaba siendo impulsado en 2022 en 7 puntos focales de la región NEAM: Chipiona (España), El Yadida (Marruecos), Samos (Grecia), Estambul (Turquía), Lárnaca (Chipre), Marsaxlokk (Malta) y Alejandría (Egipto). Chipiona fue incluida en 2020 como municipio piloto dentro de un proyecto liderado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IH Cantabria), que en 2009 había participado en el proyecto TRANSFER modelizando los primeros escenarios de inundación y mapas de riesgo probabilísticos para las

provincias de Cádiz y Huelva, y que había iniciado sus trabajos con Chipiona incluso antes de iniciarse el proyecto TsunamiReady. Se trata de una preparación práctica en la que se han elaborado los mapas de inundación por tsunami a escala local con los límites que marcan la cota del maximum run-up o línea de máxima elevación y penetración del oleaje, así como las rutas de evacuación desde diversos puntos de partida en la costa hacia el interior hasta los lugares seguros de reunión. Además, en junio de 2022 se realizaron los primeros ejercicios reales de evacuación con la colaboración de personas de distintos grupos etarios y capacidad de movilidad.

6. Las amenazas múltiples y el efecto en cascada

Una de las pautas del programa TsunamiReady® —no implementada, por cierto, en la versión UNESCO/IOC— obliga a que los planes de emergencia contemplen las amenazas múltiples, término introducido por la Agencia Federal de Gestión de Emergencias norteamericana (FEMA) en 1982-1983 como parte del Proyecto de Amenazas Múltiples de UTAH (May, 2007), que se presentaba como un modelo que involucrara a las agencias y funcionarios locales en la mitigación de este tipo de situaciones. Según terminología de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), se entiende por amenaza múltiple el contexto específico en que distintos eventos peligrosos pueden coincidir simultáneamente, actuando en cascada o de forma acumulativa en el tiempo y considerando los efectos potenciales interrelacionados, una idea ya adelantada por Hewitt y Burton (1971) al abordar el estudio de all hazards at a place y al distinguir entre los riesgos simples, compuestos y múltiples. En torno a esta cuestión, el Marco de Acción de Hyogo (2005-2015) incidió en que entre la consideraciones generales a tener en cuenta dentro de la Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres (ISDR) debía incorporarse un enfoque integrado de amenazas múltiples en las políticas, la planificación y la programación en relación con el desarrollo sostenible, el socorro, la rehabilitación y las actividades de recuperación en situaciones de postemergencia en países enfrentados a los desastres.

Ba et ál. (2021) establecen una clasificación de cinco tipos de combinaciones de amenazas múltiples, entre las cuales se encuentran englobadas dentro del término de la UNDRR las amenazas múltiples concurrentes, las amenazas múltiples en cascada y las amenazas múltiples acumulativas. Las amenazas múltiples concurrentes son aquellas que pueden coincidir en un determinado tiempo y lugar sin que exista ninguna relación de causalidad entre ellas; por ejemplo, la ocurrencia de un terremoto durante un temporal que a su vez provoca inundaciones. Las amenazas múltiples en cascada son aquellas en las que un evento adverso desencadena otros eventos directos, o bien un efecto dominó en la que los eventos desencadenados provocan a su vez otros eventos no directamente vinculados con el evento inicial, o una combinación de ambos procesos. Por último, las amenazas múltiples acumulativas son aquellas que tienen unos efectos destructivos lentos y a largo plazo, convirtiéndose en un problema estructural hasta que el daño se hace permanente.

Centrándonos aquí en las amenazas múltiples en cascada, la UNDRR² lo define como un proceso en el que un impacto primario (o desencadenante), tal como unas precipitaciones intensas, la actividad sísmica o una rápida fusión de nieve, puede causar una serie de impactos secundarios. Frente a esta concepción tradicional (Pescaroli et ál., 2015; Jiang et ál., 2022), May (2007) arguye que no es suficiente con afirmar que existe siempre una amenaza primaria y que las que le siguen en la secuencia son amenazas secundarias, ya que estas últimas pueden guardar relación directa con el evento desencadenante o depender de cualquier otro de los eventos desencadenados en forma de estructura ramificada. Por otra parte, el término secundario cabe ser interpretado como un evento no principal, cuando no en pocas ocasiones ha conllevado peor destrucción que el evento inicial y mayor complejidad y atención en la gestión de la emergencia. De ahí que considero que esta expresión debe ser sustituida por subsecuente.

Como ejemplo de máximo exponente, la catástrofe de Japón de 2011 despertó definitivamente el interés de la comunidad internacional por los efectos combinados y exponenciales de los desastres en cascada, ya suscitado tras los episodios del huracán Katrina en 2005 y del terremoto de Haití en 2010 (Shimizu y Clark,

² Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction, UNDRR, 2019.



2015; McGee et ál, 2016). El enfoque de la gestión de los desastres estudiando los fenómenos que los provocan de forma independiente y planificando los riesgos sin conexión entre sí es, en la actualidad, obsoleta y, como bien afirman Shimizu y Clark (2015), motivan un cambio de paradigma en las políticas de gestión de emergencias teniendo en cuenta que las amenazas múltiples en cascada tienden a convertirse en la nueva normalidad conforme nos enseñan los escenarios recientes y, como casuística general, en el caso del riesgo de tsunami. No pocos autores han propuesto que esta perspectiva sea aplicada no solo al terreno de la ingeniería y al estudio de impacto sobre edificaciones e infraestructuras críticas, como venía siendo habitual, sino también de forma sistemática al campo de la planificación de emergencias (May, 2007; Marzocchi et ál., 2009; Shimizu y Clark, 2015; Ba et ál., 2021), llegándose a afirmar que la falta de previsión de estas interrelaciones entre amenazas confluyentes o encadenadas podría ser considerado como negligencia por parte de las personas y órganos encargados de la planificación (Alexander, 2018).

En este sentido, aunque el Plan Estatal General de Emergencias de Protección Civil (PLEGEM) aprobado por el Consejo de Ministros el 15 de diciembre de 2020 concibe por primera vez en la normativa española de ámbito nacional un «enfoque integrador y multirriesgo» de las emergencias y catástrofes, en la práctica no supone ningún cambio en la política de gestión fragmentada de los riesgos, sino que se presenta como un marco de planificación genérico para hacer frente a los riesgos de naturaleza inespecífica o que no cuenten con un plan especial y, en las circunstancias más desfavorables, a las amenazas múltiples concurrentes. En él no se describe ninguna metodología innovadora, sino que se remite al modelo de análisis clásico de los riesgos conforme a lo establecido por la Norma Básica de Protección Civil (NBPC), esto es, un análisis individualizado de los mismos ante los que se elaborará, y de hecho así han sido elaborados, un plan por cada uno de ellos, incluyendo el más reciente sobre tsunamis. Por tanto, se puede afirmar que el nuevo Sistema Nacional de Protección Civil de 2015, así como su Estrategia Nacional aprobada por el Consejo de Seguridad Nacional mediante la Orden PCI/488/2019, de 29 de abril, no han asimilado los avances en la investigación sobre la gestión de las amenazas múltiples y deja en el aire su eficacia real ante futuros escenarios de esta complejidad.

7. Modelización de escenarios en cascada

Estudios recientes han diseñado diversos modelos gráficos de amenazas múltiples y efectos en cascada orientados en particular a mejorar la resiliencia de las infraestructuras críticas o, en general, la planificación de emergencias (Pescaroli y Alexander, 2015; McGee et ál., 2016; Alexander, 2018; Suppasri et ál., 2021; y Jiang et ál., 2022). Todos ellos están expresados en forma de diagramas de flujo en los que se interconectan causas, efectos y factores potenciadores, como la vulnerabilidad y la exposición, en los que a su vez un efecto puede ser la causa subsidiaria de una cadena de efectos (Pescaroli y Alexander, 2015). Este conjunto de conectores es lo que se denominará en adelante escenario en cascada. Para entender el planteamiento, en la figura 4 se muestra un esquema simple de escenario en cascada, en el que C_1 es la causa inicial generadora de distintos efectos; E/C_S , efecto de una causa anterior y causa subsecuente de otros efectos; y E , efecto directo de la causa inicial o de cualquier causa subsecuente. La concatenación de varios eslabones efecto-causa ($C_1 \rightarrow E/C_S \rightarrow E/C_S \rightarrow E/C_S \rightarrow E$) corresponde puramente al llamado efecto dominó.

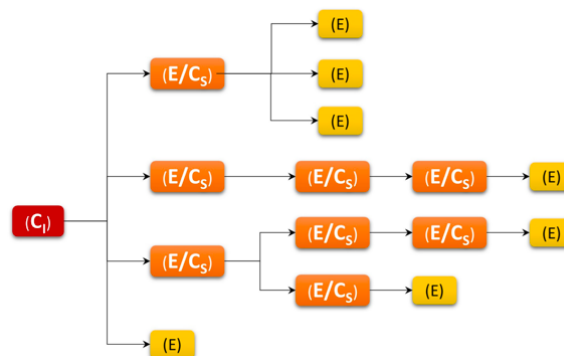


Figura 4. Esquema simple de escenario en cascada con distintas combinaciones de causas y efectos, donde C_1 = causa inicial, E/C_S = efecto y causa subsecuente y E = efecto. Fuente: Elaboración propia a partir de los esquemas propuestos por (Pescaroli y Alexander, 2015).

A continuación se aplica esta misma metodología a tres episodios que han afectado a las costas de la Península Ibérica y al Magreb con distintos grados de intensidad: los terremotos de Lisboa (1755), Cabo de San Vicente (1969) y Boumerdès (2003). Su análisis demostrará que la amenaza de tsunami nunca se manifiesta como un riesgo aislado y que su afrontamiento desde la actual planificación de protección civil no puede plantearse solo como un escenario múltiple o concurrente, sino como un escenario de riesgos en cascada.

7.1. Terremoto de Lisboa de 1755

7.1.1. Escenario en cascada

De los tres escenarios propuestos, el terremoto del 1 de noviembre de 1755 es el único que no cuenta con un registro sísmico instrumental, aunque se estima que su magnitud aproximada fue de 8,5-8,9° Mw (Reid, 1914; López-Arroyo & Udías, 1972; Martins & Mendes, 1990; Johnston, 1996; Gjevik et ál., 1997; Dabrio et ál., 1998; Martínez-Solares & López-Arroyo, 2004). Sin embargo, se trata de una de las catástrofes mejor documentadas, por lo que se pueden recrear con gran fidelidad los efectos ocasionados.

Diversos trabajos de investigación sitúan su epicentro en el mismo lugar que el del 28 de febrero de 1969 (Martínez-Solares et ál., 1979; Gjevik et ál., 1997; Levret, 1991; Martínez-Loriente et ál., 2021), es decir, en la llanura abisal de la Herradura (HAP). En ella se encuentra la falla inversa del mismo nombre, cuya longitud de fractura se ha podido estimar en 160-220 km (Martínez-Loriente et ál., 2021). El evento sísmico liberó una energía diez veces superior al de 1969 (Martínez-Solares et ál., 2001), provocando una amenaza múltiple en cascada cuyos efectos devastaron la ciudad de Lisboa.

La causa inicial sísmica provocó otros efectos geológicos directos (E) entre los que destacan el deslizamiento de laderas y acantilados, licuefacciones, subsidencias, cráteres de arena, ruido sísmico y seiches. Como causas subsecuentes generadoras de ulteriores efectos (E/C₃) desencadenó un tsunami que inundó las costas de Lisboa, Alentejo, Algarve, Golfo de Cádiz y Marruecos; el colapso masivo de edificios residenciales en Portugal, España y Marruecos; y un incendio urbano de grandes proporciones que calcinó Lisboa, donde se estima un volumen de 15.000-20.000 víctimas mortales en una ratio de 7/100 sobre una población de ~250.000 habitantes (Martínez Solares, 2001; Shradly, 2008). Las reacciones de pánico se tradujeron en la huida en masa de núcleos poblacionales como Lisboa, Ayamonte, Huelva y Cádiz, dando lugar a situaciones de inseguridad pública, muertes por ahogamiento y numerosos actos de pillaje. Baptista et ál. (1998) estiman que la intensidad máxima debió alcanzar el grado X-XI sobre la escala de Mercalli en Lisboa y Setúbal (Portugal), siendo VIII-IX en el sur de España y norte de Marruecos.

En conjunto, el escenario resultante de esta amenaza múltiple en cascada se puede representar esquemáticamente tal como muestra la figura 5. Sin embargo, de repetirse en el actual estado de desarrollo demográfico y tecnológico, cabría añadir al mismo los posibles efectos para las infraestructuras hidráulicas (presas, depósitos, estaciones de bombero, desaladoras, obras de encauzamiento, espigones, canalizaciones, etc.), vías de comunicación y centros de transporte, industrias químicas, instalaciones militares, sector turístico y, especialmente, las redes de suministros básicos, cuya interrupción conllevaría la necesidad de una evacuación controlada hasta la recuperación de la normalidad, tal como ocurrió en 2005 tras el impacto del huracán Katrina en la ciudad de Nueva Orleans. Los centros de coordinación de emergencias, atención hospitalaria y otros servicios críticos situados en las áreas expuestas al riesgo podrían quedar igualmente inoperativos ante una previsible caída de los sistemas de comunicación, fallos en los sistemas autónomos de generación eléctrica, la imposibilidad de garantizar un relevo de su personal o los daños sufridos en los edificios que los albergan.

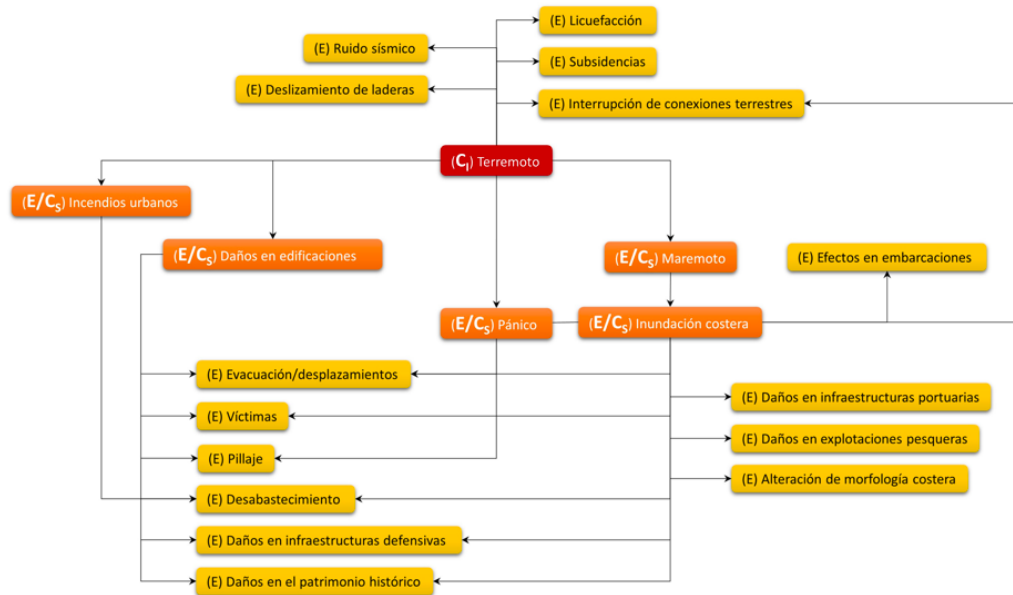


Figura 5. Escenario en cascada del terremoto de Lisboa de 1755. Fuente: elaboración propia.

7.1.2. Simulación numérica

El escenario precalculado por la RSN para un terremoto de estas características está levantado sobre los siguientes parámetros sísmicos: magnitud, 8,5° Mw; localización, SW Cabo de San Vicente; latitud, 36,5° N; longitud, 10,0° W; profundidad, 20 km. Suponiendo un tiempo origen (t_0) a las 10:16:00 UTC, las primeras olas alcanzarían la costa de Huelva entre Ayamonte y Palos de la Frontera a las 10:58:28 (+42 min 28 s desde t_0). La estimación del nivel de alerta y restantes tiempos de llegada se muestran en la tabla 3 y en la figura 6.

Id. Zona ³	Territorio	Nivel de alerta	Tiempo de llegada (UTC)
H01	Huelva	Rojo	1755-11-01 10:58:28
PO01	Pontevedra	Rojo	1755-11-01 11:11:33
H02	Huelva	Rojo	1755-11-01 11:13:35
CA02	Cádiz	Rojo	1755-11-01 11:17:04
CA01	Cádiz	Rojo	1755-11-01 11:17:52
C01	A Coruña	Rojo	1755-11-01 11:22:17
CA03	Cádiz	Rojo	1755-11-01 11:29:01
C02	A Coruña	Rojo	1755-11-01 11:30:22
CE01	Ceuta	Rojo	1755-11-01 11:31:03
GC03	Las Palmas	Rojo	1755-11-01 11:36:33
GC02	Las Palmas	Rojo	1755-11-01 11:41:14
MA01	Málaga	Rojo	1755-11-01 11:42:07
TF04	Santa Cruz de Tenerife	Rojo	1755-11-01 11:44:52

³ Para la delimitación de las zonas de impacto, acúdase al Apéndice B del Plan Estatal de Maremotos.

Id. Zona ³	Territorio	Nivel de alerta	Tiempo de llegada (UTC)
GC01	Las Palmas	Rojo	1755-11-01 11:46:48
TF02	Santa Cruz de Tenerife	Rojo	1755-11-01 11:47:48
TF03	Santa Cruz de Tenerife	Rojo	1755-11-01 11:53:47
MA02	Málaga	Rojo	1755-11-01 11:55:21
TF01	Santa Cruz de Tenerife	Rojo	1755-11-01 11:58:28
O01	Asturias	Rojo	1755-11-01 12:04:29
LU01	Lugo	Rojo	1755-11-01 12:18:02
S01	Cantabria	Rojo	1755-11-01 12:22:59
O02	Asturias	Rojo	1755-11-01 12:26:18
BI01	País Vasco	Rojo	1755-11-01 12:31:33

Tabla 3. Zonas, territorios, niveles de alerta y tiempos de llegada precalculados por la RSN en el mensaje 1 de alerta de tsunamis para el escenario de 1755. Fuente: RSN.



Figura 6. Niveles de alerta y zonas de previsibles zonas de impacto para la simulación numérica de 1755. Fuente: Elaboración propia a partir del escenario previsto por la RSN.

Para este primer mensaje automático se prevé inicialmente nivel rojo para la cornisa cantábrica, Galicia, Canarias, Ceuta y las provincias de Huelva, Cádiz y Málaga. Para el resto, el cálculo no contempla afectación alguna. Recordemos además que el nivel rojo significa que el tsunami podría generar una altura de ola $\geq 0,5$ m en el litoral costero o ≥ 1 m en tierra. Esto no excluye que en las actualizaciones posteriores las alertas rojas se puedan extender a otros sectores de costa o que se rebajen a nivel amarillo o verde. No obstante, dado el escaso lapso existente entre terremoto (C_1) y tsunami (E/C_5), las autoridades competentes y la población en general habrán de tomar decisiones de respuesta sobre el nivel decretado inicialmente con base en su planificación local y en los conocimientos adquiridos de autoprotección.

En cuanto al resultado del escenario en cascada, el grado de implantación de las medidas de construcción sismorresistentes, el nivel de ocupación actual del litoral en las zonas de previsible impacto, la densidad de población estable o flotante en estas áreas y la existencia de instalaciones críticas debería instar a una reevaluación del impacto de cada subcadena de efectos para determinar la amenaza mayor, que muy

probablemente seguirá siendo el terremoto.

7.2. Terremoto del Cabo de San Vicente de 1969

7.2.1. Escenario en cascada

El segundo escenario objeto de análisis corresponde al terremoto del 28 de febrero de 1969, de 7,8° Mw, ocurrido a las 02:40:34 UTC (t_0) con epicentro en las coordenadas 36,0469° N 10,6273° W, a 180 km al SW del Cabo de San Vicente y a una profundidad de ~31 km (IGN). La falla que lo generó, de 80-90 km de longitud y 50-60 km de anchura (Udías & López-Arroyo, 1972; Fukao, 1973; Baptista et ál., 1992; Gjevik et ál., 1997; Matías et ál., 2013; Martínez-Loriente et ál., 2014; Clain et ál., 2015), se sitúa también en el HAP y es de solución inversa, con un pequeño componente de salto en dirección (Udías & López-Arroyo, 1972; Fukao, 1973; Baptista et ál., 1992; Grandin et ál., 2007; Clain et ál., 2015). La orientación del plano de falla es NW-SE paralela al Banco Gorringe (Fukao, 1973; Baptista et ál., 1992; Matías et ál., 2013; Martínez-Loriente et ál., 2014; Martínez-Loriente et ál., 2021), en una zona de subducción en la que el bloque de muro se sitúa al norte y el bloque de techo es el que efectúa el cabalgamiento en dirección SE-NW.

El terremoto, como causa inicial (C_1), afectó a la misma área macrosísmica que el terremoto de Lisboa de 1755, aunque en una décima proporción, y desencadenó efectos geológicos similares. Con respecto a las amenazas subsiguientes (E/C_5), las de peores consecuencias fueron los daños en edificaciones, con especial incidencia en la región portuguesa del Algarve, Ayamonte, Isla Cristina y Huelva, en relación directa con diseños constructivos poco consecuentes con la actividad sísmica del entorno (Aparicio, 2020), y las reacciones de pánico generalizado. También generó un tsunami que se propagó a la velocidad media de 400 km/h (Mendes, 1969) y que fue confirmado por los mareógrafos: 0,12 m en La Coruña; 0,17 m en Santa Cruz de Tenerife; 0,28 m en Cádiz; 0,30 m en Chipiona; 0,76 m en Horta; 0,84 m en Lagos; 0,93 m en Cascais; y 1,20 m en Casablanca (Baptista et ál., 1992; Martínez Solares, 2005). La intensidad máxima registrada fue de VIII-IX en Fonte Louzeiros (Algarve, Portugal), VII en Beas e Isla Cristina (Portugal) y VI en Salé y Rabat (Marruecos) (Bufo et ál., 2020). Sin embargo, no se evidenció ninguna acción dinámica costera más allá de un reflujo mareal en la desembocadura del Bou Regreg (Rabat), donde se ha calculado una elevación máxima del cauce no superior a 1 m dentro del estuario (Amine et ál., 2018). Por el contrario, en alta mar y en un radio de 236 millas alrededor del epicentro, 6 barcos sufrieron fuertes vibraciones y balanceos entre olas de gran altura surgidas espontáneamente sobre una mar en calma, cuyos efectos llevaron a la declaración de siniestro total del petrolero Ida Knutsen (Aparicio, 2020). Aun así, de haber ocurrido en época histórica o preinstrumental no se habría contabilizado en los catálogos sísmicos, reforzando nuestras dudas sobre la verdadera recurrencia cíclica de estos fenómenos. El escenario resultante se muestra en la figura 7.

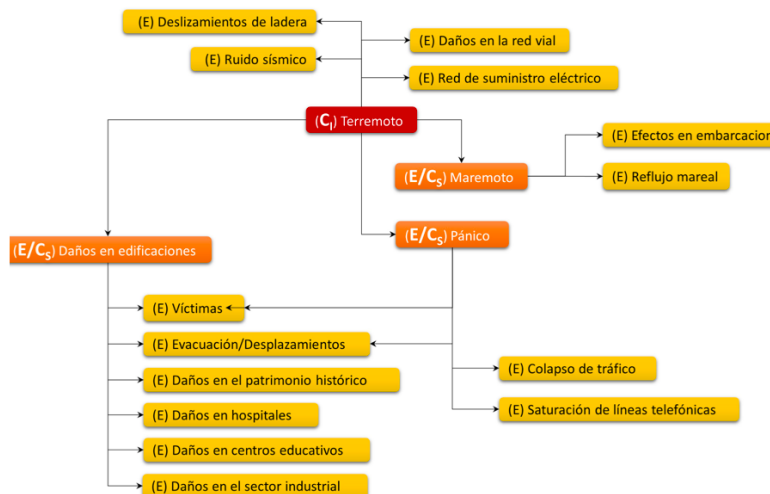


Figura 7. Escenario en cascada del terremoto del Cabo de San Vicente de 1969. Fuente: Elaboración propia.

7.2.2. Simulación numérica

Los parámetros sísmicos tomados por la RSN para la configuración de este escenario son los siguientes: magnitud, 7,8° Mw; latitud, 35,985° N; longitud, 10,8133° W; profundidad, 20 km. Suponiendo aquí un t_0 a las 02:40:32 UTC, el primer oleaje llegaría igualmente a Ayamonte-Palos a las 03:28:01 (+47 min 29 s desde t_0). La estimación del nivel de alerta y tiempo de llegada de la primera ola se muestra en la tabla 4 y figura 8.

Id. Zona	Territorio	Nivel de alerta	Tiempo de llegada (UTC)
H01	Huelva	Rojo	1969-02-28 03:28:01
PO01	Pontevedra	Rojo	1969-02-28 03:39:22
H02	Huelva	Rojo	1969-02-28 03:42:31
CA02	Cádiz	Rojo	1969-02-28 03:45:13
CA01	Cádiz	Rojo	1969-02-28 03:46:11
C01	A Coruña	Rojo	1969-02-28 03:50:00
GC03	Las Palmas	Rojo	1969-02-28 03:54:57
CA03	Cádiz	Rojo	1969-02-28 03:57:10
C02	A Coruña	Rojo	1969-02-28 03:58:04
CE01	Ceuta	Rojo	1969-02-28 03:59:12
GC02	Las Palmas	Rojo	1969-02-28 03:59:39
TF04	Santa Cruz de Tenerife	Rojo	1969-02-28 04:03:04
GC01	Las Palmas	Rojo	1969-02-28 04:05:01
MA01	Málaga	Rojo	1969-02-28 04:10:16
MA02	Málaga	Rojo	1969-02-28 04:23:30
O01	Asturias	Rojo	1969-02-28 04:32:11
LU01	Lugo	Rojo	1969-02-28 04:45:44
S01	Cantabria	Rojo	1969-02-28 04:50:41
O02	Asturias	Rojo	1969-02-28 04:54:00
TF02	Santa Cruz de Tenerife	Amarillo	1969-02-28 04:05:46
TF03	Santa Cruz de Tenerife	Amarillo	1969-02-28 04:12:00
TF01	Santa Cruz de Tenerife	Amarillo	1969-02-28 04:16:37
BI01	País Vasco	Amarillo	1969-02-28 04:59:15

Tabla 4. Zonas, territorios, niveles de alerta y tiempos de llegada precalculados por la RSN en el mensaje 1 de alerta de tsunamis para el escenario de 1969. Fuente: RSN.



Figura 8. Niveles de alerta y zonas de previsibles zonas de impacto para la simulación numérica de 1969. Fuente: Elaboración propia a partir del escenario previsto por la RSN.

En esta matriz de decisión se prevé nivel rojo para Cantabria, Asturias, Galicia, Santa Cruz de Tenerife, Las Palmas de Gran Canaria, Fuerteventura, Lanzarote, Huelva, Cádiz, Málaga y Ceuta; y amarillo para País Vasco, La Palma, El Hierro y La Gomera. Sin embargo, ante la experiencia del episodio de 1969, la posibilidad de inundación costera por tsunami podría ser de nuevo nula o limitada de no interferir otros parámetros como la hora y coeficiente de marea, o los posibles condicionantes meteorológicos que pueden amplificar los resultados. En cualquier caso, la amenaza mayor seguiría siendo el terremoto. Obsérvese también que a similar nivel de alerta para las mismas costas que la simulación de 1755, el impacto experimentado en el pasado ha sido notablemente diferente, lo que significa que no existe relación directa de proporcionalidad entre nivel y efectos.

7.3. Terremoto de Boumerdès de 2003

7.3.1. Escenario en cascada

El tercer escenario a tratar es el terremoto del 21 de mayo de 2003, de 6,8° Mw, ocurrido a las 18:44:36 UTC (t_0) con epicentro en las coordenadas 36,91° N 3,58° E, a 7 km al N de Zemmouri (Argelia), y a una profundidad de ~10 km (CRAAG⁴). El plano de falla que lo generó, de 50-64 km de longitud y orientación 54-70° ENE (Masina et ál., 2020), es también de tipo inverso puro ($\lambda = 90^\circ$) y está situada en una zona de subducción entre las placas africana y eurasiática.

La causa inicial (C_1) provocó en Argelia similares efectos geológicos directos que los casos anteriores, además de grietas en dos de las tres presas de la zona afectada, cortes en el suministro de agua, gas y electricidad, caída de antenas de telefonía y colapso de centrales de comunicaciones (Bendimerad, 2003). Tal como ocurrió durante los terremotos de 1954 y 1980, un nuevo deslizamiento masivo de turbiditas, del que existen evidencias geológicas, cortó 5 cables de comunicaciones submarinos en 28 puntos distintos a lo largo de 150 km de recorrido y a una distancia de 70 km de la costa argelina, que dejaron incomunicada por vía telefónica Europa con Argelia (Cattaneo et ál., 2012). Sin embargo, fueron las amenazas subsecuentes en cascada (E/C_5) las que ocasionaron mayor destrucción y lesiones. Los daños materiales afectaron a 181.658 edificios, con colapso total de 1.758 en Argel y Boumerdès, a lo que hay que sumar 6.181 infraestructuras públicas afectadas, 2.278 fallecidos y 11.450 heridos (Hamada, 2004). En Argelia, el mayor grado de destrucción corresponde a un nivel X de la escala de intensidad EMS-98 para Boumerdès, Dellys y Zemmouri (Harbi et ál., 2007). En España, por el contrario, la intensidad máxima fue II-III en las localidades de Palma y

⁴ Centro de Investigación en Astronomía, Astrofísica y Geofísica de Argelia.

Aparicio Florido, J. A. (2024). El riesgo de tsunami como parte de un escenario de amenazas múltiples en cascada: elementos para la seguridad. *Revista de Pensamiento Estratégico y Seguridad CISDE*, 9(1), 69-89. <https://doi.org/10.54988/cisde.2024.1.1338>

Sóller, aunque fue sentido en Murcia, la Comunidad Valenciana y en las provincias de Albacete y Barcelona (IGN).

Con respecto al tsunami, las peores consecuencias tuvieron lugar en España, donde el efecto de resonancia dentro de los puertos y dársenas provocó roturas de amarras, colisiones, hundimientos o elevación de ~180 embarcaciones de recreo de pequeño y mediano porte en la isla de Menorca. La máxima amplitud del nivel del mar alcanzó un pico máximo de 1,96 m de altura en los mareógrafos de Ibiza y Mallorca (Masina, 2020), mientras que a lo largo de 50 km de costa desde Corso hasta Dellys apenas se apreció una retirada del mar de hasta 100 m (Harbi et ál., 2007). En conjunto, el escenario final resultante es el que se muestra en la figura 9.

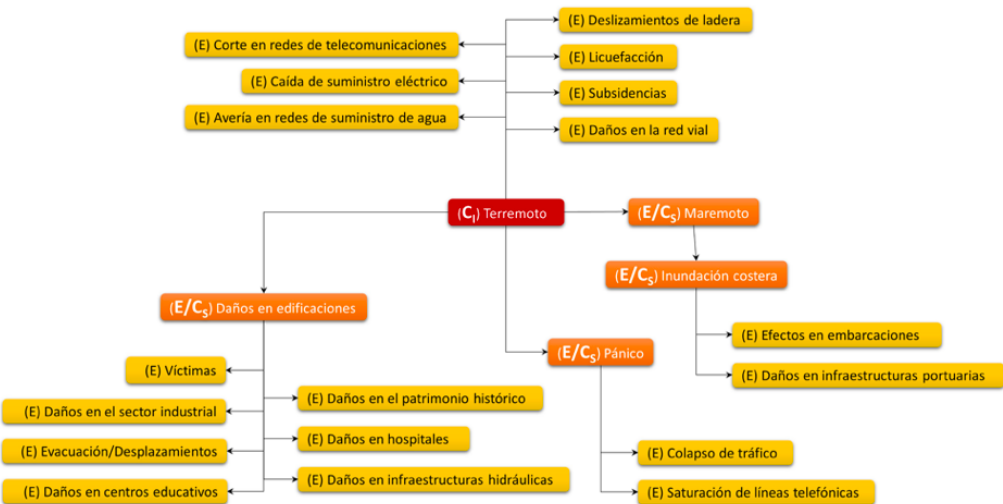


Figura 9. Escenario en cascada del terremoto de Boumerdès de 2003. Fuente: Elaboración propia.

7.3.2. Simulación numérica y respuesta

El escenario previsto por la RSN para un terremoto asimilable al del 21 de mayo de 2003 está planteado sobre los siguientes parámetros sísmicos: magnitud, 6,6° Mw; localización, Boumerdès (Argelia); latitud, 36,8187° N; longitud, 3,7203° E; profundidad, 0 km. Se calcula que el tsunami podría afectar al litoral de Cataluña, Comunidad Valenciana, Islas Baleares, Ceuta, Melilla y Andalucía, a excepción de Huelva. Suponiendo aquí un t₀ a las 18:44:19 UTC, las olas alcanzarían en primer lugar a la isla de Mallorca a las 19:15:53 (+31 min 34 s desde t₀). La estimación del nivel de alerta y tiempo de llegada de la primera ola se muestra en la tabla 5 y figura 10.

Id. Zona	Territorio	Nivel de alerta	Tiempo de llegada (UTC)
IB02	Islas Baleares	Rojo	2003-05-21 19:15:53
IB03	Islas Baleares	Rojo	2003-05-21 19:19:34
IB01	Islas Baleares	Rojo	2003-05-21 19:22:06
MU01	Murcia	Rojo	2003-05-21 19:28:42
V01	Valencia/València	Rojo	2003-05-21 19:36:22
A01	Alicante/Alacant	Rojo	2003-05-21 19:37:42
AL02	Almería	Amarillo	2003-05-21 19:36:19
AL01	Almería	Amarillo	2003-05-21 19:46:40



Id. Zona	Territorio	Nivel de alerta	Tiempo de llegada (UTC)
T01	Tarragona	Amarillo	2003-05-21 19:53:40
GI01	Girona	Amarillo	2003-05-21 19:54:48
B01	Barcelona	Amarillo	2003-05-21 19:55:24
GR01	Granada	Amarillo	2003-05-21 20:01:22
CS01	Castellón/Castelló	Amarillo	2003-05-21 20:05:00
MA02	Málaga	Amarillo	2003-05-21 20:06:43
ME01	Melilla	Amarillo	2003-05-21 20:09:20
MA01	Málaga	Amarillo	2003-05-21 20:20:33
CA03	Cádiz	Amarillo	2003-05-21 20:24:34
CE01	Ceuta	Amarillo	2003-05-21 20:28:37
CA02	Cádiz	Amarillo	2003-05-21 20:37:21
CA01	Cádiz	Amarillo	2003-05-21 21:10:42

Tabla 5. Zonas, territorios, niveles de alerta y tiempos de llegada precalculados por la RSN en el mensaje 1 de alerta de tsunamis para el escenario de 2003. Fuente: RSN.



Figura 10. Niveles de alerta y zonas de previsibles zonas de impacto para la simulación numérica de 2003. Fuente: Elaboración propia a partir del escenario previsto por la RSN.

En esta matriz de decisión, el nivel rojo se focaliza en las Islas Baleares, provincias de Valencia y Alicante, y Murcia. El nivel amarillo abarca Cataluña, Castellón, Almería, Granada, Málaga y Cádiz. Sin embargo, sobre la experiencia de 2003 el impacto de la causa inicial (C_i) sería prácticamente nula en España, siendo el riesgo de inundación costera por tsunamis (E/C_S) el único impacto previsto en territorio español.

7.4. Conclusiones

Aunque un tsunami, como fenómeno natural potencialmente catastrófico, puede tener distintas etiologías, los episodios de 1755, 1969 y 2003 analizados en este artículo, así como las primeras alertas emitidas por el sistema NEAMTWS entre 2015 y 2020, evidencian que son los terremotos la causa inicial que con mayor frecuencia los generan. Por tanto, un tsunami es siempre el efecto de otra amenaza precedente y, a su vez, la

posible causa subsecuente de otros efectos, lo que le convierte no en un peligro aislado sino en un conector insertado dentro de una estructura ramificada de amenazas múltiples en cascada que conforman un escenario de riesgo en el que la inundación costera no tiene por qué ser el efecto más destructivo. De hecho, muy pocos terremotos generan tsunamis y, de estos, muy pocos son percibidos por las personas. Un ejemplo es el de 1969, que de haber ocurrido en época histórica o preinstrumental no habría sido contabilizado en los catálogos sísmicos.

Esto nos lleva a presuponer una mayor recurrencia de este tipo de fenómenos, lo que hace aumentar su interés para la concienciación, preparación y respuesta de las comunidades sociales ante los mismos. En este sentido, el programa TsunamiReady UNESCO/IOC, del que la localidad de Chipiona ha sido proyecto piloto en España dentro de la región NEAM bajo la dirección del IHCantabria, representa en la actualidad una de las principales contribuciones internacionales a la adopción práctica de medidas de preparación ante esta amenaza por parte de las entidades locales, con independencia de su nivel de recursos.

Sin embargo, es preciso que los sistemas nacionales de gestión de emergencias adapten necesariamente su planificación a un escenario de amenazas múltiples —sin el que no es posible un tsunami—, que no debe ser concebido como un simple conjunto de amenazas concurrentes, sino como una interacción de amenazas en cascada que puede potenciar los efectos del desastre final. En el caso de España, la reciente actualización del marco jurídico regulador del SNPC no supone ningún cambio en la política de gestión fragmentada de los riesgos ni aporta una metodología innovadora, combinando aún los modelos de planificación clásica e individualiza ante los riesgos (sísmico, químico, nuclear, radiológico, inundaciones, forestal, volcánico y transporte de mercancías peligrosas) con un primer y único plan considerado de última generación, que es precisamente el de riesgo de tsunami. Esto significa que ha sido elaborado con posterioridad a la aprobación del PLEGEM y, por tanto, se integra de forma óptima en la nueva estructura de planificación española, siendo concebido como complemento del PLEGEM y no como una respuesta organizativa independiente.

Aunque la planificación española no contempla los escenarios en cascada, considero que su elaboración es fundamental para prever el alcance de su impacto y preparar una respuesta proporcionada y bien distribuida en cuanto al envío de recursos de intervención. Para ello, la modelización específica de los episodios de 1755, 1969 y 2003, y las simulaciones numéricas precalculadas por la RSN, resuelven varias incertidumbres, entre ellas: 1º) que siendo las matrices de decisión de 1755 y 1969 muy similares entre sí, el impacto real del tsunami asociado a cada uno de ellos no guarda ninguna proporción, siendo prácticamente invisible en el caso de 1969; 2º) que en el caso de España, el mayor impacto en 1755 fue causado por una acción combinada de terremoto y tsunami, mientras que en 1969 lo fue a causa del terremoto, y en 2003 exclusivamente por tsunami; y 3º) que los tiempos de respuesta entre terremoto y tsunami son muy reducidos, siendo de (+42 min 28 s) en la simulación de 1755 para la población más próxima al epicentro; de (+47 min 29 s) para el caso de 1969; y de (+31 min 34 s) para el de 2003. Esto significa que la reducción del riesgo de desastre, enfocada principalmente a la protección de la vida humana, dependerá más bien de una rápida difusión entre la población de los mensajes de alerta del SINAM y de la eficacia de la autoprotección que de la activación del PLEGEM y de los correspondientes planes especiales estatales contemplados por el SNPC, cuya eficacia no ha sido probada hasta el momento.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a los sismólogos Juan Vicente Cantavella Nadal, Director de la Red Sísmica Nacional, y Carlos González González, Jefe de Servicio de la Subdirección General de Vigilancia, Alerta y Estudios Geofísicos del Instituto Geográfico Nacional, por su asesoramiento y por facilitar las simulaciones numéricas y matrices de decisión de las alertas de tsunami asimilables a los escenarios de 1755, 1969 y 2003, con una importante labor de corrección para este último. Asimismo, mi agradecimiento al geógrafo Ignacio Rodríguez Ayerbe, del Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria, por la revisión del texto y sus comentarios y notas sobre el programa TsunamiReady UNESCO/IOC.



Cómo citar este artículo / How to cite this paper

Aparicio Florido, J. A. (2024). El riesgo de tsunamis como parte de un escenario de amenazas múltiples en cascada: elementos para la seguridad. *Revista de Pensamiento Estratégico y Seguridad CISDE*, 9(1), 69-89. <https://doi.org/10.54988/cisde.2024.1.1338>

Referencias

- Alexander, D. (2018). A magnitude scale for cascading disasters. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 30, 180-185. doi:10.1016/j.ijdrr.2018.03.006.
- Amine, M.; Oudif, L.; Bahi, L.; Baba, K.; Astier, S. (2018). Establishment of process of tsunami risk mapping modelling in a 3D video for the city of Rabat (Morocco): application to the worst scenario 1755 and the moderate scenario 1969. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(9), 1559-1572.
- Aparicio Florido, J. A. (2017). 1755: el maremoto que viene. Cádiz (España): Q-book.
- Aparicio Florido, J. A. (2020). Effects of earthquakes on buildings in the Ibero-Maghreb region. In *Natural hazards: impacts, adjustments and resilience*. Londres (Reino Unido): IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.77525.
- Aparicio Florido, J. A. (2020). Effects of the 28 February 1969 Cape Saint Vincent earthquake on ships. *Pure and Applied Geophysics*, 177, 1801-1808. doi:10.1007/s00024-019-02368-0.
- Ba, R.; Deng, Q.; Liu, Y.; Yang, R.; Zhang, H. (2021). Multi-hazard disaster scenario method and emergency management for urban resilience by integrating experiment-simulation-field data. *Journal of Safety Science and Resilience*, 2, 77-89. doi:10.1016/j.jnlssr.2021.05.002.
- Baptista, M. A.; Miranda, P.; Victor, L. M. (1992). Maximum entropy analysis of Portuguese tsunami data: the tsunamis of 28.02.1969 and 26.05.1975. *Science of tsunami hazards*, 10(1), 9-20.
- Baptista, M. A.; Heitor, S.; Miranda, J. M.; Miranda, P.; Mendes Victor, L. (1998). The 1755 Lisbon tsunami: evaluation of the tsunami parameters. *Journal of Geodynamics*, 25(2), 143-157. doi:10.1016/S0264-3707(97)00019-7.
- Becker-Heidmann, P.; Reicherter, K.; Silva Barroso, P.G. (2007). C-dated charcoal and sediment drilling cores as first evidence of Holocene tsunamis at the southern Spanish coast. *Radiocarbon*, 49(2), 827-835. doi:10.1017/S0033822200042703.
- Bendimerad, F. (2003). The Boumerdès, Algeria, earthquake of May 21, 2003. Oakland (Estados Unidos): Earthquake Engineering Research Institute.
- Bryant, E. (2001). *Tsunami: the underrated hazard*. Cambridge (Reino Unido): Cambridge University Press.
- Bufoñ Peiró, E.; López Sánchez, C.; Lozano López, L.; Martínez Solares, J. M.; Cesca, S.; Oliveira, C. S.; Udías Vallina, A. (2020). Re-evaluation of seismic intensities and relocation of 1969 Saint Vincent Cape seismic sequence: a comparison with the 1755 Lisbon earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, 177, 1781-1800. doi:10.1007/s00024-019-02336-8.
- Cantavella Nadal, J. V.; Gaite Castrillo, B.; González González, C.; Naveiras García, F.; Ros Bernabeu, E. (2021). Plan estatal de protección civil ante el riesgo de maremotos: edición comentada. Madrid (España): Ministerio del Interior, Dirección General de Protección Civil y Emergencias.
- Cattaneo, A.; Bahonneau, N.; Ratzov, G.; Dan-Unterseh, G.; Yelles, K.; Bracène, R.; Mercier de Lépinay, B.; Boudiaf, A.; Déverchère, J. (2012). Searching for the seafloor signature of the 21 May 2003 Boumerdès earthquake offshore central Algeria. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 2159-2172. doi:10.5194/nhess-12-2159-2012.
- Clain, S.; Reis, C.; Costa, R.; Figueiredo, J.; Baptista, M. A.; Miranda, J. M. (2015). The Tagus 1969 tsunami simulation with a finite volume solver and the hydrostatic reconstruction technique. hal-01239498v2.
- Dabrio, C. J.; Goy, J. L.; Zazo, C. (1998). The record of the tsunami produced by the 1755 Lisbon earthquake in Valdelagrana spit (Gulf of Cádiz, southern Spain). *Geogaceta*, 23, 31-34.
- Fukao, Y. (1973). Thrust faulting at a lithospheric plate boundary: the Portugal earthquake of 1969. *Earth and Planetary Science Letters*, 18, 205-216. doi:10.1016/0012-821X(73)90058-7.
- Gjevik, B.; Pedersen, G.; Dybesland, E.; Harbitz, C. B. (1997). Modeling tsunamis from earthquake sources near Gorringe Bank southwest of Portugal. *Journal of Geophysical Research*, 102(12), 931-949. doi:10.1029/97JC02179.
- Gracia Prieto, F. J. (2017). Registros de tsunamis en el litoral atlántico de la provincia de Cádiz: antecedentes del maremoto de 1755. In *El riesgo de maremotos en la Península Ibérica a la luz de la catástrofe del 1 de noviembre de 1755* (pp. 19-27). Cádiz (España): Instituto Español para la Reducción de los Desastres (IERD).
- Gracia Prieto, F. J.; Alonso Villalobos, C.; Aparicio Florido, J. A. (2022). The record of extreme wave events in the bay of Cadiz during historical times. In *Historical earthquakes, tsunamis and archaeology in the Iberian Peninsula* (pp. 65-104). Singapur (Singapur): Springer Nature Singapore Pte Ltd. doi:10.1007/978-981-19-1979-4.
- Grandin, R.; Borges, J. F.; Bezzeghoud, M.; Caldeira, B.; Carrilho, F. (2007). Simulations of strong ground motion in SW Iberia for the 1969 February 28 (MS=8.0) and the 1755 November 1 (M8.5) earthquakes – II. Strong ground motion simulations. *Geophysical Journal International*, 171, 807-822. doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03571.x.
- Haddow, G. D.; Bullock, J. A.; Coppola, D. P. (2008). *Introduction to emergency management*. Massachusetts (Estados Unidos): Butterworth-Heinemann, Elsevier.
- Harbi, A.; Maouche, S.; Ousadou, F.; Rouchiche, Y.; Yelles-Chaouche, A.; Merahi, M.; Heddar, A.; Nouar, O.; Kherroubi, A.;

Aparicio Florido, J. A. (2024). El riesgo de tsunami como parte de un escenario de amenazas múltiples en cascada: elementos para la seguridad. *Revista de Pensamiento Estratégico y Seguridad CISDE*, 9(1), 69-89. <https://doi.org/10.54988/cisde.2024.1.1338>



- Beldjoudi, H.; Ayadi, A.; Benouarc, D. (2007). Macroseismic study of the Zemmouri earthquake of 21 May 2003 (Mw 6.8, Algeria). *Earthquake Spectra*, 23(2), 315-332. doi:10.1193/1.2720363.
- Hewitt, K.; Burton, I. (1971). *The hazardousness of a place: a regional ecology of damaging events*. Toronto (Canadá): University of Toronto, Department of Geography.
- Jiang, W.; Wang, F.; Zheng, Xia.; Zheng, Xin.; Qiao, X.; Li, X.; Meng, Q. (2022). Toward interoperable multi-hazard modeling: a disaster management system for disaster model service chain. *International Journal of Disaster Risk Science*. doi:10.1007/s13753-022-00450-1.
- Johnston, A. C. (1996). Seismic moment assessment of earthquakes in stable continental regions—III. New Madrid 1811-1812, Charleston 1886 and Lisbon 1755. *Geophysical Journal International*, 126(2), 314-344. doi:10.1111/j.1365-246X.1996.tb05294.x.
- Lario Gómez, J.; Zazo Cardaña, C.; Goy Goy, J. L.; Silva Barroso, P. G.; Bardají Azcárate, T.; Cabero del Río, A.; Dabrio González, C. J. (2010a). Registro geológico de tsunamis en el SW peninsular durante el Holoceno. *Resúmenes de la 1ª Reunión Ibérica sobre Fallas Activas y Paleosismología*, 167-170.
- Lario Gómez, J.; Luque Ripoll, L.; Zazo Cardaña, C.; Goy Goy, J. L.; Spencer, C.; Cabero del Río, A.; Bardají Azcárate, T.; Borja Barrera, F.; Dabrio González, C. J.; Civis, J.; González Delgado, J. A.; Borja Barrera, C.; Alonso Azcárate, J. (2010b). Tsunami vs. storm surge deposits: a review of the sedimentological and geomorphological records of extreme wave events (EWE) during the Holocene in the Gulf of Cadiz, Spain. *Quaternary International*, 242(1), 196-200. doi:10.1127/0372-8854/2010/0054S3-0029.
- Lario Gómez, J.; Zazo Cardaña, C.; Goy Goy, J. L.; Silva Barroso, P. G.; Bardají Azcárate, T.; Cabero del Río, A.; Dabrio González, C. J. (2011). Holocene paleotsunami catalogue of SW Iberia. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 54(3), 301-316. doi:10.1016/j.quaint.2011.01.036.
- Levet, A. (1991). The effects of the November 1, 1755 "Lisbon" earthquake in Morocco. *Tectonophysics*, 193, 83-94. doi:10.1016/0040-1951(91)90190-4.
- López Arroyo, A.; Udías Vallina, A. (1972). Aftershock sequence and focal parameters of the February 28, 1969 earthquake of the Azores Gibraltar Fracture zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 62(3), 699-719. doi:10.1785/BSSA0620030699.
- Luque Ripoll, L. (2008). El impacto de eventos catastróficos costeros en el litoral del golfo de Cádiz. *Revista Atlántica-Mediterránea de Prehistoria y Arqueología Social*, 10, 131-153.
- Martínez Lorient, S.; Sallarès Casas, V.; Gràcia Mont, E.; Bartolomé de la Peña, R.; Dañobeitia Canales, J. J.; Zitellini, N. (2014). Seismic and gravity constraints on the nature of the basement in the Africa-Eurasia plate boundary: new insights for the geodynamic evolution of the SW Iberian margin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119, 127-149. doi:10.1002/2013JB010476.
- Martínez Lorient, S.; Sallarès Casas, V.; Gràcia Mont, E. (2021). The Horseshoe Abyssal plain Thrust could be the source of the 1755 Lisbon earthquake and tsunami. *Communications, Earth & Environment*, 2(145), 1-9. doi:10.1038/s43247-021-00216-5.
- Martínez Solares, J. M.; López Arroyo, A.; Mezcu Rodríguez, J. (1979). Isoleismal map of the 1755 Lisbon earthquake obtained from Spanish data. *Tectonophysics*, 3-4, 301-313. doi:10.1016/0040-1951(79)90075-1.
- Martínez Solares, J. M. (2001). *Los efectos en España del terremoto de Lisboa (1 de noviembre de 1755)*. Madrid (España): Ministerio de Fomento, Dirección General del Instituto Geológico Nacional.
- Martínez Solares, J. M. (2004). The great historical 1755 earthquake: effects and damage in Spain. *Journal of Seismology*, 8, 275-294. doi:10.1023/B:JOSE.0000021365.94606.03.
- Martínez Solares, J. M. (2005). Tsunamis en el contexto de la Península Ibérica y del Mediterráneo. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 13(1), 52-59.
- Martins, I.; Mendes, V. (1990). *Contribuição para o estudo da sismicidade de Portugal Continental*. Lisboa (Portugal): Universidade de Lisboa, Instituto Geofísico do Infante D. Luís.
- Marzocchi, W.; Mastellone, M. L.; Di Ruocco, A.; Novelli, P.; Romeo, P.; Gasparini, P. (2009). *Principles of Multi-risk assessment: interaction amongst natural and man-induced risks*. Luxemburgo (Luxemburgo): Office for Official Publications of the European Communities. doi:10.2777/30886.
- Masina, M.; Archetti, R.; Lamberti, A. (2020). 21 May 2003 Boumerdès earthquake: numerical investigations of the rupture mechanism effects on the induced tsunami and its impact in harbors. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8, 933. doi:10.3390/jmse8110933.
- Matías, L. M.; Cunha, T.; Annunziato, A.; Baptista, M. A.; Carrilho, F. (2013). Tsunamigenic earthquakes in the Gulf of Cadiz: fault model and recurrence. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 1-13. doi:10.5194/nhess-13-1-2013.
- May, F. (2007). Cascading disaster models in postburn flash flood. In B. W. Butler y W. Cook, *The fire environment-innovations, management and policy; conference proceedings* (pp. 443-464). Washington DC (Estados Unidos): US Department of Agriculture Forest Service.
- McGee, S.; Frittmann, J.; Ahn, S. J.; Murray, S. (2016). Implications of cascading effects for the Hyogo Framework. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 7(2), 144-157. doi:10.1108/ijdrbe-03-2015-0012.
- Mendes, A. S. (1969). Notícia acerca do sismo de 28 de Fevereiro de 1969 em Portugal Continental. *Finisterra*, IV(8), 273-277.
- Mourenza Urbina, A. (2020). Un fuerte terremoto causa al menos 26 muertos y centenares de heridos en Turquía y Grecia. *El País*. (<https://elpais.com/internacional/2020-10-30/un-fuerte-terremoto-causa-varios-muertos-y-centenares-de-heridos-en-turquia-y-grecia.html>).
- Pescaroli, G.; Alexander, D. (2015). A definition of cascading disasters and cascading effects: going beyond the «toppling dominos» metaphor. *GRF Davos Planet@Risk*, 3(1), 58-67.
- Reid, H. F. (1914). The Lisbon earthquake of November 1, 1755. *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 4(2), 53-80.
- Rodríguez Vidal, J. (2017). Registros de paleotsunamis en las costas del litoral atlántico de la provincia de Huelva: antecedentes del maremoto de 1755. In *El riesgo de maremotos en la Península Ibérica a la luz de la catástrofe del 1 de noviembre de 1755* (pp. 29-35).



Cádiz (España): Instituto Español para la Reducción de los Desastres (IERD).

Ruiz Muñoz, F.; Rodríguez Ramírez, A.; Cáceres Puro, L. M.; Rodríguez Vidal, J.; Carretero León, M. I.; Abad de los Santos, M.; Olías Álvarez, M.; Pozo Rodríguez, M. (2005). Evidence of high-energy events in the geological record: Mid-holocene evolution of the southwestern Doñana National Park (SW Spain). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 229, 212-229. doi:10.1016/j.palaeo.2005.06.023.

Ruiz Muñoz, F.; Rodríguez Vidal, J.; Abad de los Santos, M.; Cáceres Puro, L.; Carretero León, M. I.; Pozo Rodríguez, M.; Rodríguez Llanes, J. M.; Gómez Toscano, F.; Izquierdo Labraca, T.; Font, E.; Toscano Grande, A. (2013). Sedimentological and geomorphological imprints of Holocene tsunamis in southwestern Spain: an approach to establish the recurrence period. *Geomorphology*, 203, 97-104. doi:10.1016/j.geomorph.2013.09.008.

Shrady, N. (2008). *The last day: wrath, ruin and reason in the Great Lisbon Earthquake of 1755*. Nueva York (Estados Unidos): Viking Penguin.

Soloviev, S. L.; Solovieva, O. N.; Go, C. N.; Kim, K. S.; Shchetnikov, N. A. (2000). *Tsunamis in the Mediterranean Sea 2000 b.C.-2000 a.D.* Moscú (Rusia): Springer-Science+Business Media B.V. doi:10.1007/978-94-015-9510-0.

Suppasri, A.; Maly, E.; Kitamura, M.; Syamsidik; Pescaroli, G.; Alexander, D.; Imamura, F. (2021). Cascading disasters triggered by tsunami hazards: a perspective for critical infrastructure resilience and disaster risk reduction. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 66, 2-11. doi:10.1016/j.ijdrr.2021.102597.

Udías Vallina, A.; López Arroyo, A. (1972). Aftershock sequence and focal parameters of the February 28, 1969 earthquake of the Azores-Gibraltar fracture zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 62(3), 699-719.

Vázquez Garrido, J. T.; Ercilla Zárraga, G.; Alonso Martínez, M. B.; Peláez Montilla, J. A.; Palomino Cantero, D.; León Buendía, R.; Bárcenas Gascón, P.; Casas Layola, D.; Estrada Llácer, F.; Fernández Puga, M. C.; Galindo Zaldívar, J.; Henares Romero, J.; Llorente Isidro, M.; Sánchez Guillamón, O.; d'Acremont, E.; Abdellah, A.; Chourak, M.; Fernández Salas, L. M.; López González, N.; Lafuerza, S. (2022). Triggering mechanisms of tsunamis in the Gulf of Cadiz and the Alboran Sea: an overview. In *Historical earthquakes, tsunamis and archaeology in the Iberian Peninsula* (pp. 65-104). Singapur (Singapur): Springer Nature Singapore Pte Ltd. doi:10.1007/978-981-19-1979-4.

Whitmore, P.; Benz, H.; Bolton, M.; Crawford, G.; Dengler, L.; Fryer, G.; Goltz, J.; Hansen, R.; Kryzanowski, K.; Malone, S.; Oppenheimer, D.; Petty, E.; Rogers, G.; Wilson, J. (2008). NOAA/West coast and Alaska tsunami warning center Pacific Ocean response criteria. *Science of Tsunami Hazards*, 27(2), 1-21.