

Tsunamis, volcanes y deslizamientos.

El reciente deslizamiento de Groenlandia y otros fenómenos complejos

JOSEP BATLLÓ
INSTITUT CARTOGRÀFIC Y GEOLÒGIC DE CATALUNYA
ASSOCIACIÓ CATALANA DE METEOROLOGIA

Recientemente la prensa y otros medios de comunicación se hicieron eco de la publicación en la revista *Science* de un estudio que analizaba un hecho singular ocurrido en 2023 en Groenlandia, pero observado en toda la Tierra.

Recientemente la prensa y otros medios de comunicación se hicieron eco de la publicación en la revista *Science* de un estudio que analizaba un hecho singular ocurrido en 2023 en Groenlandia, pero observado en toda la Tierra.

Esta noticia, muy confusa si nos atenemos a lo publicado en los medios genera-

listas, correspondía a la publicidad, bien orquestada por otra parte, de un estudio recientemente aparecido en *Science* sobre la detección lejana de un tsunami local ocurrido en Groenlandia (Svennevig et al., 2024). Podría pensarse que se trata de un meteo-tsunami; pero no es así.

En pocas palabras, el fenómeno analizado tiene su origen en la ocurrencia de

un desprendimiento masivo de tierras que, en las regiones remotas de Groenlandia se convirtió, durante su recorrido, en una mezcla de desprendimiento y alud que, al impactar en el fondo de un fiordo provocó un tsunami localmente de grandes dimensiones y que, a su vez, y dado que se trata de un espacio confinado, provocó unas seiches que se de-

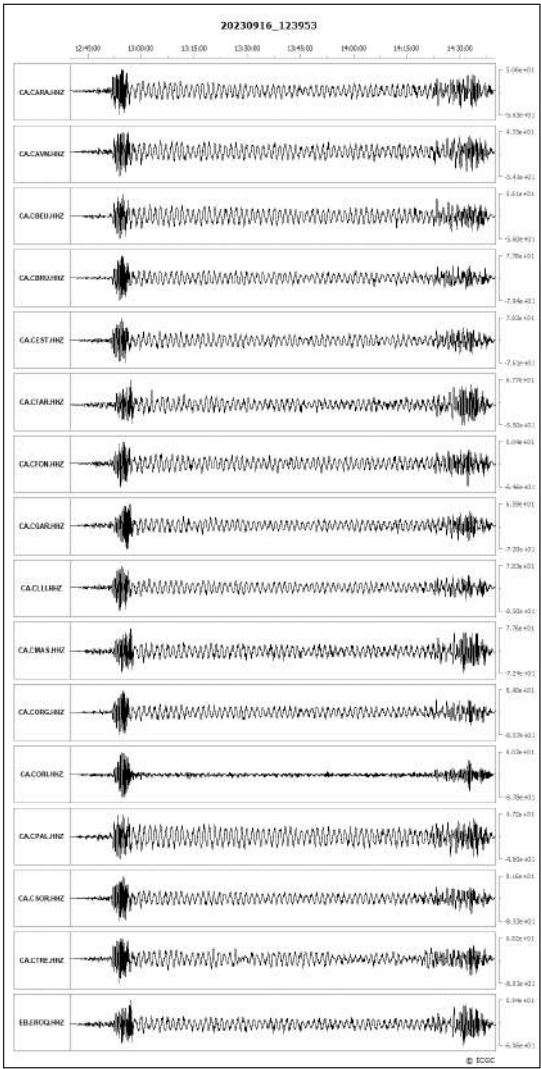


Figura 1.- Componente vertical del registro sísmico obtenido por las estaciones de la red sísmica de Cataluña de la señal generada por el desprendimiento y posterior tsunami y seiches ocurridos en el este de Groenlandia el día 16 de setiembre de 2023. Se ha aplicado un filtro pasa banda de periodos entre 20 y 100 s a la señal de todas las estaciones.

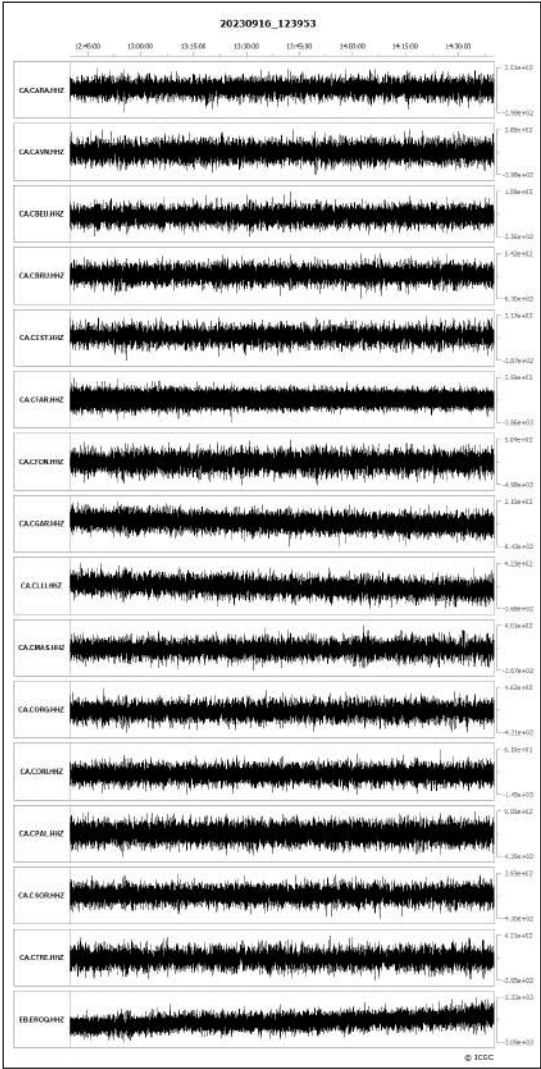


Figura 2.- Los mismos registros mostrados en la figura 1, pero en bruto, sin aplicar filtro o tratamiento alguno. Vemos como no puede observarse en absoluto la señal del evento.

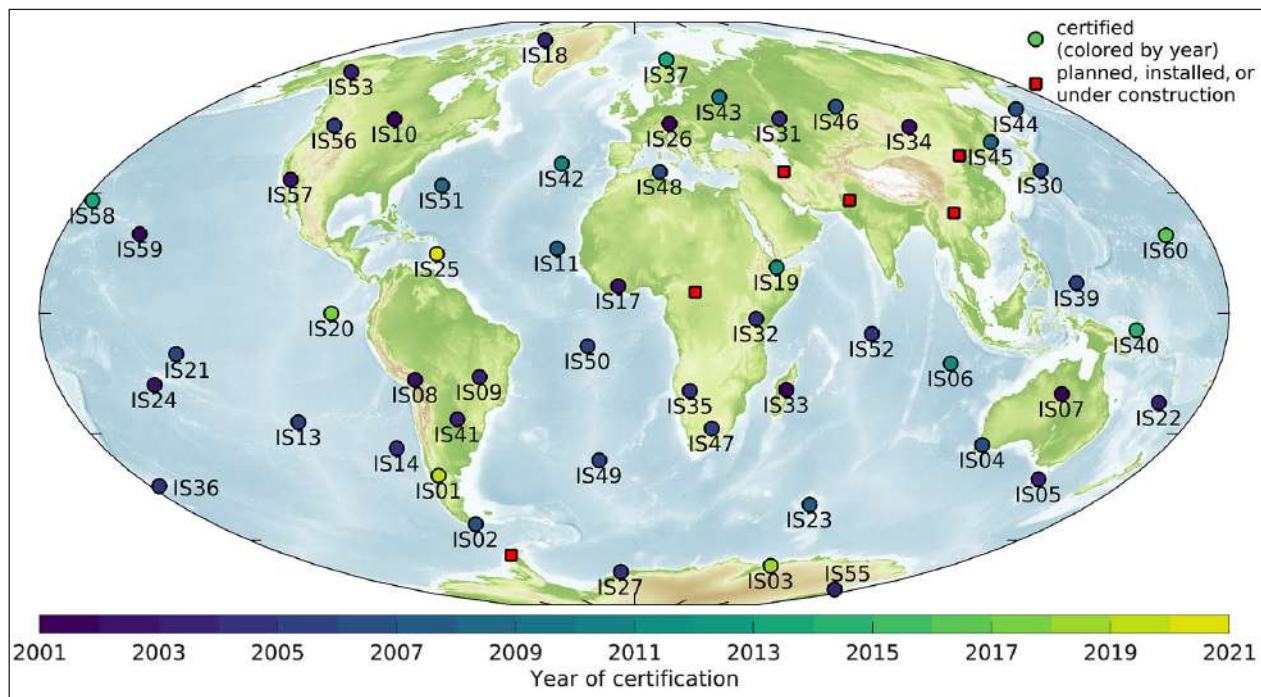


Figura 3.- Distribución de las estaciones que componen la red de registro de infrasonidos desplegada por el CTBTO. Se indica las que ya están certificadas (plenamente operativas) y las que está planificadas o en construcción (en fecha enero de 2021). De Hupe *et al.* (2022).

techaron por multitud de estaciones sísmicas, entre ellas las peninsulares. Pocos días antes de la publicación del artículo ampliamente difundido por la prensa ya se había publicado otro (este no tuvo la publicidad del anterior) que se circunscribe al análisis de la información sísmica disponible respecto a este fenómeno (Carrillo-Ponce *et al.*, 2024). Se trata, ciertamente, de un fenómeno nada común.

No son extraños los tsunamis localmente importantes generados por deslizamientos. Como caso histórico y relativamente cercano podemos recordar el del Cabo Girão, en la isla de Madeira, en 1930 (Omira *et al.*, 2022). Mucho más recientes y aun en nuestra memoria podemos citar los de los volcanes Anak Krakatau, en 22 de diciembre de 2018, y Hunga-Tonga, en 15 de enero de 2022.

Si intentamos recomponer la película de los hechos ocurridos en Groenlandia desde el punto de vista de la investigación, la primera evidencia de la ocurrencia del fenómeno fue la detección a nivel prácticamente mundial de una extraña señal sísmica. Los sismógrafos detectaron el día 16 de setiembre de 2023 un impulso de baja frecuencia, bastante distinto del que detectamos en el caso de terremotos, aunque sean lejanos, seguido del establecimiento de una os-

cilación de periodo muy constante (92 s aproximadamente) que pudo observarse durante nueve días. Esta última oscilación, por su amplitud y frecuencia (no se corresponde con las que podríamos esperar de las vibraciones libres de la Tierra, que excitan los grandes terremotos), fue la que provocó el interés de los analistas e investigadores. En la figura 1 reproducimos la señal detectada por las estaciones de la red sísmica catalana (ICGC, 2000) que operamos en el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya; pero puede extrapolarse a cualquier estación peninsular, y aun de toda Europa, de similares características. La localización del origen del fenómeno detectado apuntó a la costa este de Groenlandia. El análisis de otras redes, en particular la de infrasonidos (nos referiremos a ella más adelante) establecida por la Organización del Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares (OTPCE o en inglés CTBTO) y, ya focalizados en la zona de ocurrencia, los datos proporcionados por mareógrafos cercanos y por imágenes de satélites dieron con el origen del fenómeno: un imponente deslizamiento de tierras (como ya hemos mencionado) desde la cumbre de una montaña, a unos 1000 m sobre el nivel del mar, que tuvo un recorrido de unos dos kilóme-

tros, siguiendo en parte el curso de un glaciar, y que llegó a movilizar un volumen aproximado de $25 \times 10^6 \text{ m}^3$ de tierras y nieve. Este alud desembocó en un fiordo (el Dickson Fjord), que es estrecho y muy alargado y, físicamente, lo podríamos considerar como un tubo cerrado. Además, la presencia de hielos aún lo convierte en un espacio más confinado ya que no podemos considerar su boca y parte de su superficie un espacio totalmente abierto.

Vemos que el evento más singular por lo poco común, el tsunami y las posteriores seiches, se producen en la hidrosfera; pero tienen efectos en la atmósfera y tierra sólida claramente detectables. De hecho, la primera localización del fenómeno se realizó mediante el estudio de estos registros.

En su momento, ya hace un año, no nos apercebimos del fenómeno registrado por nuestra red sísmica. Los sismógrafos actuales registran unos rangos dinámicos y de frecuencia muy extensos, de los que observamos las partes que nos interesan. En la figura 2 mostramos los mismos registros que en la figura 1 pero en bruto, sin ningún filtrado ni tratamiento. Como vemos, no se observa nada mencionable. Solamente cuando filtramos la señal en el rango de frecuen-

Tsunamis, volcanes y deslizamientos. El reciente deslizamiento de Groenlandia y otros fenómenos complejos

cias de interés (en este caso entre 0.01 y 0.05 Hz, es decir, en períodos entre 20 y 100 s) observamos la señal generada por el desprendimiento y las posteriores seiches. Dado que nuestro interés es el registro y análisis de la sismicidad regional, que se registra en bandas de frecuencia muy distintas, resulta difícil la observación inmediata de fenómenos como el que comentamos.

Es de destacar, como hemos comentado, que la detección adecuada de estos fenómenos involucra diferentes redes de observación. Por lo que respecta a la atmósfera, vemos que, en este caso, aparte de los datos sísmicos y mareográficos, también se detectó por estaciones de infrasonidos. En concreto los *arrays* I37NO y I43RU, instalados en Noruega y Rusia respetivamente, y que forman parte de la red de infrasonidos desplegada por el CTBTO. Estas estaciones son muy sofisticadas y se componen de registradores de infrasonidos (básicamente conjuntos de microbarógrafos absolutos y diferenciales) desplegados en forma de *array* que permiten registrar las variaciones de presión en la atmósfera y su dirección de propagación a partir de frecuencias de 30 Hz e inferiores. Son dispositivos muy sensibles que nos permiten una monitorización pasiva de la atmosfera a alta frecuencia (respecto a las frecuencias que observamos clásicamente en meteorología). En la figura 3 mostramos su distribución mundial. Vemos que no hay ninguna en toda la península ibérica.

En este caso, un deslizamiento masivo, sus registros, aunque importantes, no fueron muy esenciales. Es diferente el caso de las erupciones volcánicas (y, en general, de cualquier explosión). Éste es el caso de la explosión del volcán Hunga-Tonga, ocurrida el 15 de enero de 2022, a las 4:14 UTC. En este caso la afectación principal se produce en la atmósfera. Dada su magnitud, y sin necesidad de instrumentos sofisticados, la onda expansiva de la explosión fue registrada por los barógrafos de todo el mundo. Pero no solo los barógrafos, la explosión también afecta a la tierra sólida y no es tan conocido que también fue observable por sismógrafos

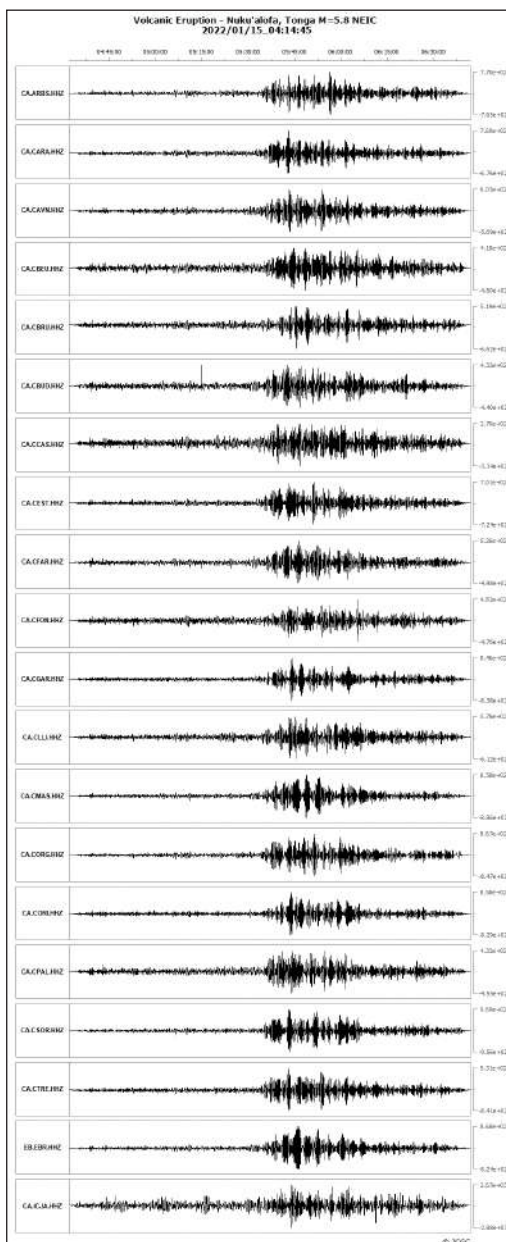


Figura 4.- Componente vertical del registro sísmico obtenido por las estaciones de la red sísmica de Cataluña de la señal generada por la explosión del volcán Hunga-Tonga ocurrida el día 15 de setiembre de 2022. En este caso se ha aplicado un filtro pasa banda de periodos entre 10 y 100 s a la señal de todas las estaciones.

de todo el mundo (y no hace falta decir que también provocó un tsunami). En la figura 4 mostramos de nuevo los registros obtenidos por las estaciones de la red sísmica catalana. Dada la superior velocidad de las ondas sísmicas vemos que ya antes de las 5 UTC la señal registrada se muestra alterada, y a partir de las 5:35 aproximadamente se registran ondas de gran amplitud correspondiente a las ondas superficiales, formadas por la parte de la energía que queda atrapada en las

partes más superficiales de la Tierra. Debemos esperar hasta aproximadamente las 21 UTC para registrar las ondas que se propagan por el aire en la Península.

En concreto, en la estación sísmológica CORG de nuestra red, instalada cerca de la localidad de Organyà, y no lejos de la Seu d'Urgell, disponemos también de una estación meteorológica automática para el control de las condiciones locales. En la figura 5 mostramos el registro de presión y observamos perfectamente el paso de la onda de presión generada por el volcán. También, y no se ha comentado mucho en la prensa, el segundo y tercer paso, distanciados unas 36 horas entre ellos (el tiempo que tarda el pulso de presión en dar la vuelta a la Tierra).

Esta explosión también ha sido estudiada mediante el uso de los registros de las estaciones de registro de infrasonidos (véase, por ejemplo, Vergoz *et al.*, 2022). En este caso ya podemos imaginar que todas las estaciones de las redes de infrasonidos lo registraron. Además, la actividad del volcán ya había atraído la atención de estas redes. Si los terremotos o deslizamientos no son predecibles, las explosiones volcánicas, dadas las características de la actividad volcánica, pueden, en la gran mayoría de los casos, preverse con algunas horas de anticipación (recordemos el caso reciente del volcán de Tajogaite, en la isla de La Palma). Así, la actividad del volcán era muy alta desde el 20 de diciembre anterior y las redes de observación, entre ellas la de infrasonidos, a partir del análisis de los niveles de ruido generados por el volcán, permitían prever la ocurrencia de explosiones (aunque la magnitud final del evento tiene márgenes de incerteza muy altos).

En el caso del volcán Anak Krakatau, en Indonesia, también se produjo, aparte de una erupción, un corrimiento de tierras y posterior tsunami inducido y, aunque las dimensiones de este corrimiento por colapso son mucho mayores que en el caso de Groenlandia (diferentes estimaciones oscilan en valores de $260\text{-}7\cdot 10^6\text{ m}^3$), al no existir una cámara de resonancia (el fiordo) como en el primer caso no se observa

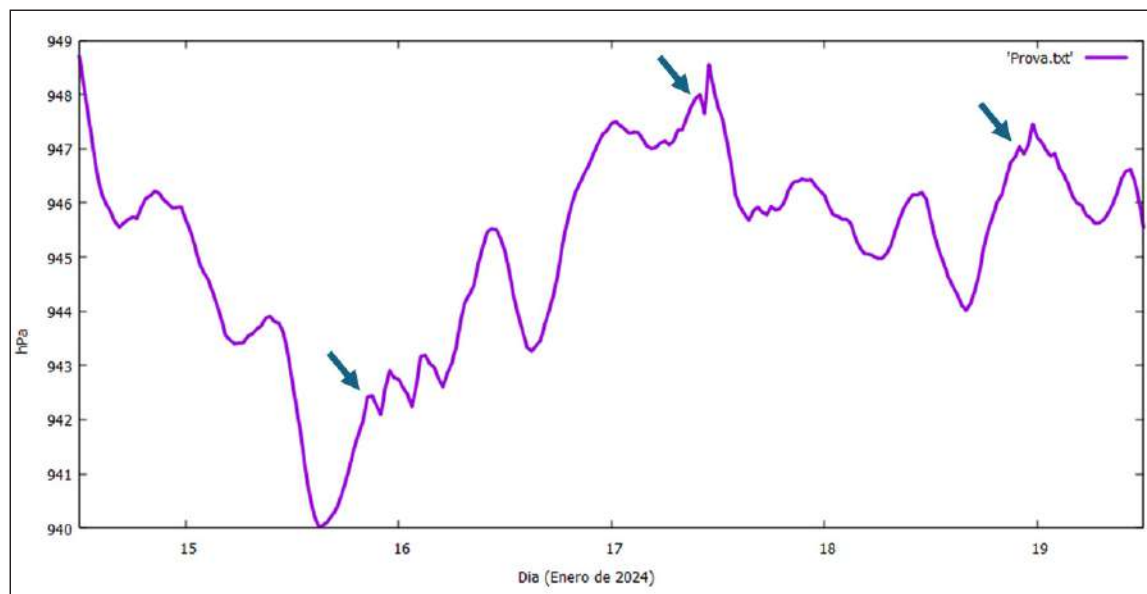


Figura 5.- Registro de presión de la estación meteorológica automática instalada para el seguimiento de las condiciones locales en la estación sísmica CORG de la red sísmica de Catalunya. Puede observarse claramente el paso, por tres veces del frente de onda provocado por la violenta explosión del volcán Hunga-Tonga, en el océano Pacífico. Las flechas marcan el inicio aproximado de la perturbación.

a gran distancia en las estaciones sísmicas ni se producen oscilaciones sostenidas. También se registró y estudió en estaciones de infrasonidos. Es el caso de la I06AU, en Australia y otras estaciones no integradas en la red mundial del CTBTO (Perttu *et al.*, 2020). Asimismo, el tsunami producido por el corrimiento no fue de proporciones catastróficas dado que no se produjo en un espacio confinado.

Como vemos, fenómenos extraordinarios y, en general, complejos, como los que hemos comentado (no se trata solo de tsunamis, que son una consecuencia dentro de la cadena) exigen, para su estudio, la combinación de registros de muy diversa índole, que superan los límites de la meteorología, sismología, oceanografía y otras ciencias de la Tierra y que obliga a romper los límites que nos hemos impuesto a lo largo de los años y a trabajar conjuntamente para extraer la máxima información sobre estos eventos.

También se habrá percatado el lector del interés especial que hemos puesto en recalcar la contribución de los registros de ultrasonidos, muy poco utilizados (quizás y simplemente, no utilizados) en España. La propagación de pulsos de cualquier frecuencia en la atmósfera (desde ruidos audibles hasta las ondas de gravedad) se conoce y se ha podido simular a partir de nuestros modelos basados en las ecuaciones termo-hidrodinámicas de la atmósfera desde hace mucho tiempo. El problema que ha existido, y por el cual su estudio no se había desarrollado, era disponer de instrumentos adecuados para

su registro. El progreso técnico de las últimas décadas permite, actualmente, estos registros de alta frecuencia relacionados con la presión atmosférica y nuevas líneas en el estudio de nuestro entorno como podemos ver en publicaciones como Le Pichon *et al.* (2019). Su despliegue se asocia más con las redes sísmicas que con las meteorológicas. El motivo es nuevamente técnico: instrumentos con muestreos de 100 muestras por segundo, o superiores, son comunes en las redes sísmicas. Así, el registro de infrasonidos solo supone, técnicamente, añadir nuevos canales de registro a una estación. Hemos mencionado la red de estaciones del CTBTO, de cobertura mundial y, en pocas palabras, la mejor de que disponemos en el planeta. Pero existen otras regionales y opciones más modestas que pueden cubrir nuestras necesidades en este campo. Redes sísmicas importantes como la americana mantenida por el USGS incorporan ya, de forma regular, un sensor y registro en todas las estaciones de nueva instalación. Poco se ha hecho en este sentido en España. Deberíamos introducirnos a la mayor brevedad en este campo que nos aportaría importantes datos para el estudio de nuestro entorno.

Referencias

● Carrillo-Ponce, A., S. Heimann, G. M. Petersen, T. R. Walter, S. Cesca, T. Dahm (2024). The 16 September 2023 Greenland Megatsunami: Analysis and Modeling of the Source and a Week-Long, Monochromatic Seismic Signal.

The Seismic Record, 4(3), 172–183.

<https://doi.org/10.1785/0320240013>.

● Hupe, P., L. Ceranna, A. Le Pichon, R. S. Matoza and P. Mialle (2022). International Monitoring System infrasound data products for atmospheric studies and civilian applications, *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 4201–4230, <https://doi.org/10.5194/essd-14-4201-2022>.

● ICGC (2000). Catalan Seismic Network. International Federation of Digital Seismograph Networks. Other/Seismic Network, <https://doi.org/10.7914/SN/CA>.

● Le Pichon, A., E. Blanc, and A. Hauchecorne (Eds.) (2019). *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies: Challenges in Middle Atmosphere Dynamics and Societal Benefits*, 2nd Ed., Springer Nature, Switzerland, XXVIII + 1167 p., <https://doi.org/10.1007/978-3-319-75140-5>.

● Omira, R, M.A. Baptista, R. Quartau, R.S. Ramalho, J. Kim, I. Ramalho, A. Rodrigues (2022). How hazardous are tsunamis triggered by small-scale mass-wasting events on volcanic islands? New insights from Madeira – NE Atlantic, *Earth and Planetary Science Letters*, 578, 117333, 12 p., <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117333>.

● Perttu, A. *et al.* (2020). Reconstruction of the 2018 tsunamigenic flank collapse and eruptive activity at Anak Krakatau based on eyewitness reports, seismo-acoustic and satellite observations, *Earth and Planetary Science Letters*, 541, 116268, 12 p., <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116268>.

● Svennevig, K. *et al.* (2024). A rockslide-generated tsunami in a Greenland fjord rang Earth for 9 days. *Science*, 385, 1196-1205, <https://doi.org/10.1126/science.adm9247>.

● Vergoz, J. *et al.* (2022). IMS observations of infrasound and acoustic-gravity waves produced by the January 2022 volcanic eruption of Hunga, Tonga: A global analysis, *Earth and Planetary Science Letters*, 591, 117639, 13 p., <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117639>.