

Murmullos sismológicos: cómo Oaxaca escuchó la explosión del volcán Hunga-Tonga

Seismological murmurs: how Oaxaca heard the explosion of the Hunga-Tonga volcano

Ericka Alinne Solano Hernández y Marco Calò

Resumen

La erupción del volcán Hunga Tonga Hunga Ha'apai en enero de 2022, cientos de veces más potente que la bomba atómica de Hiroshima, dejó una huella global. Este artículo destaca cómo una red de 11 sismómetros en la costa de Oaxaca, México, originalmente instalada para monitorear la actividad sísmica local, registró las ondas sísmicas del evento a más de 9,300 km de distancia. La instalación estratégica de estas estaciones permitió un análisis detallado de la duración, amplitud y contenido de frecuencias de las ondas sísmicas. La información recopilada no sólo ofrece una visión única del impacto del evento en la costa de Oaxaca, sino que también brinda una oportunidad valiosa para estudiar el interior de la Tierra, especialmente en la interfaz núcleo-manto a 2900 km de profundidad en el océano Pacífico. Este artículo destaca la importancia de redes sísmicas para comprender eventos globales y resolver incógnitas sobre la estructura interna de la Tierra.

Palabras clave: vulcanología, Hunga Tonga, sismología, sismómetros, ondas sísmicas, impacto global, Oaxaca.

CÓMO CITAR ESTA COLABORACIÓN

Solano Hernández, Ericka Alinne y Calò, Marco. (2024, enero-febrero). Murmullos sismológicos: cómo Oaxaca escuchó la explosión del volcán Hunga-Tonga. *Revista Digital Universitaria (RDU)*, 25(1). <http://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2024.25.1.13>

Abstract

The eruption of the Hunga Tonga Hunga Ha'apai volcano in January 2022, hundreds of times more powerful than the Hiroshima atomic bomb, left a global footprint. This article highlights how a network of 11 seismometers on the coast of Oaxaca, Mexico, originally installed to monitor local seismic activity, recorded the seismic waves of the event over 9,300 km away. The strategic placement of these stations allowed for a detailed analysis of the duration, amplitude, and frequency content of the seismic waves. The collected information not only provides a unique perspective on the event's impact on the Oaxaca coast but also offers a valuable opportunity to study the Earth's interior, especially at the core-mantle interface 2900 km deep in the Pacific Ocean. This article emphasizes the importance of seismic networks in understanding global events and solving mysteries about the Earth's internal structure.

Keywords: volcanology, Hunga Tonga, seismology, seismometers, seismic waves, global impact, Oaxaca.

Ericka Alinne Solano Hernández

Escuela Nacional de Estudios Superiores, unidad Morelia, (ENES-UNAM)

Se graduó como Ingeniera Geofísica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en 2005. Realizó su maestría y doctorado en el posgrado en Ciencias de la Tierra en la UNAM en el área de Sismología. Su experiencia es en sismicidad en las dorsales oceánicas, la evaluación de los efectos del sitio y la estimación de la energía sísmica. Sus intereses de investigación son sismicidad regional y sismos en el océano, así como la modelación de tsunamis y valoración de áreas de riesgo por tsunami y deslaves en zonas costeras. Ha trabajado en exploración geofísica terrestre y aérea. Fue parte de la Unidad de Mantenimiento del Sistema Internacional de Vigilancia de la Organización para la Prohibición Completa de Ensayos Nucleares (OTNCE). Hizo un diplomado en divulgación de ciencia en la Dirección de Divulgación de la Ciencia UNAM. Actualmente es profesora-investigadora en el campus de la Universidad del Mar, forma parte del Sistema Nacional de Investigadores y es actualmente Secretaria General de la Unión Geofísica Mexicana.

 [0000-0003-4627-689X](https://orcid.org/0000-0003-4627-689X)

Marco Calò

Instituto de Geofísica (UNAM)

Investigador Titular B se incorporó en el Departamento de Vulcanología del Instituto de Geofísica de la UNAM en 2015 y desde el 2016 forma parte del Sistema Nacional de Investigadores (nivel II). Se graduó en 2005 en Geología en la Universidad de Palermo (Italia) con una tesis enfocada a la sismología y en 2009, obtuvo un doctorado en Geofísica en cotutela entre la Universidad de Palermo y Estrasburgo (Francia). Su formación post-doctoral se llevó a cabo entre l'École et Observatoire de Sciences de la Terre, de Estrasburgo y el Seismological Berkeley Laboratory de la Universidad de California, Berkeley. Sus investigaciones se enfocan en la sismología aplicada al estudio de campos volcánicos y geotérmicos, sismicidad antropogénica, geodinámica y estudio de la estructura del interior de la Tierra.

 [0000-0001-7261-7008](https://orcid.org/0000-0001-7261-7008)

El origen de las vibraciones

Es común que, durante las reuniones virtuales con el micrófono encendido, se escuchen sonidos de ambulancias o patrullas, como si todos los participantes vivieran en la misma colonia, pero dispersos en distintos puntos. Imagina que, en un momento así, pasa una ambulancia mientras todos tienen el micrófono activado; las ondas acústicas generadas por la sirena se percibirán con distinta intensidad en cada ubicación. Si registramos en un mapa la posición de cada casa junto con el tiempo exacto en que se escuchó más cerca o con mayor intensidad la sirena, podríamos trazar la ruta de la ambulancia en la colonia.

Bajo este principio de rastrear el origen del sonido, los sismólogos instalan estaciones sismológicas para “escuchar” las ondas sísmicas que se propagan en el interior de la Tierra y determinar el lugar y el tiempo en que se originó el temblor. Aunque no podemos predecir cuándo ocurrirá un sismo, las estaciones sismológicas se mantienen siempre encendidas, registrando en todo momento las vibraciones que se transmiten en forma de ondas sísmicas por el suelo.

Estas estaciones no solo graban el movimiento originado por sismos, sino también cualquier tipo de vibraciones, ya sea por la actividad humana, como caminar o el tránsito de vehículos, o de origen natural, como el oleaje de los océanos, movimientos de los árboles, derrumbes, impactos de meteoritos o explosiones volcánicas.

Una explosión volcánica, además de acústica, es sísmica

El volcán Hunga Tonga–Hunga Ha’apai —“Hunga Tonga” para quienes no hablan tongano—, forma parte de un archipiélago de 170 islas volcánicas del Reino de Tonga, situado al sur del océano Pacífico, a unos 2000 km de Nueva Zelanda. Estas islas se formaron debido a la interacción entre dos placas tectónicas: la Australiana y la del Pacífico, donde la última se sumerge por debajo de la primera, en un proceso conocido como subducción.

El proceso de subducción de placas da origen a varios volcanes, que generalmente se alinean paralelamente al límite entre las placas. Cuando la placa se sumerge, libera grandes cantidades de agua y minerales hacia la superficie. Estos fluidos, al entrar en contacto con las rocas calientes del manto terrestre, las funden, produciendo magma. Dado que el magma es menos denso que el material circundante, asciende hacia la superficie a través de fisuras, formando así los volcanes (Tatsumi, 1986).

El 15 de enero de 2022, a las 04:14:45 UTC (Tiempo Universal Coordinado), una explosión estridente del volcán Hunga Tonga fue registrada por instrumentos en todo el mundo (Matoza et al., 2022). ¿Cómo es posible? La magnitud de las vibraciones está vinculada al tamaño de la fuente y a la proximidad a la estación

de registro. Imaginemos el volcán como un cono con un área de base de 314 km², equivalente a una cuarta parte de la Ciudad de México, y una altura de 2000 m desde el fondo del mar. Antes de la erupción, dos islas de 2 km de largo cada una eran visibles en el mapa, con una altura máxima de 150 m —un poco menos que la Torre Latinoamericana en la Ciudad de México—. Tras la violenta explosión de enero, quedaron sólo algunas isletas, mientras que el resto quedó sumergido a 140 m de profundidad en el mar (Figura 1). El edificio volcánico se resquebrajó, transformando el paisaje (Garvin et al., 2018).

Aunque la actividad volcánica comenzó en diciembre de 2021, la erupción del 15 de enero de 2022 fue cientos de veces más potente que la bomba atómica lanzada en Hiroshima. Como todo evento catastrófico, la explosión del volcán Hunga Tonga se propagó por aire, mar y tierra, generando ondas de presión atmosférica, olas de tsunami y ondas sísmicas que atravesaron el interior de la Tierra. La magnitud estimada del evento fue de 5.8, según el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2022).

Vibraciones lejanas en territorio mexicano

La excepcional explosión del volcán Hunga Tonga proporciona a los científicos de todo el mundo una oportunidad para estudiar los procesos asociados a la destrucción y construcción de volcanes, así como para investigar fenómenos que se propagan en la atmósfera, el mar y el interior de la Tierra.

A finales de septiembre de 2021, en la costa de Oaxaca, un equipo de científicos de la Universidad del Mar y del Instituto de Geofísica de la UNAM instaló una red temporal de 11 sismómetros con el propósito de monitorear la actividad sísmica en la zona costera entre las poblaciones de Pinotepa Nacional y Salina Cruz (Calò et al., 2022). Al aumentar el número de sismómetros de 3 a 14, se logró percibir sismos de magnitudes pequeñas ($M < 2$) que pasaban desapercibidos para los servicios de monitoreo sísmico nacional. Mientras la red de 14 sensores estaba instalada, ocurrió el evento volcánico de Tonga y sus vibraciones viajaron por todo el planeta, quedando registradas en nuestros instrumentos.

Aunque este evento fue captado por sismómetros a nivel global, la coincidencia de tener un arreglo de varias estaciones sísmicas temporales desplegadas en la costa de Oaxaca (a ~9,300 km de distancia) permitió describir en detalle sus características, como duración, amplitud y contenido de frecuencias. Esto incluye la capacidad de distinguir las señales dejadas por sismos locales y sismos ocurridos a gran distancia (telesismos), así como sus posibles implicaciones para las Ciencias de la Tierra.

Las estaciones se ubicaron a una distancia de entre 10 y 30 km en la costa oaxaqueña (ver figura 1b), junto con las estaciones permanentes del Servicio Sismológico Nacional, para medir los movimientos del suelo y registrar la sismicidad local de la región.

Figura 1. Ubicación del volcán Hunga Tonga-Hunga Ha'apai. (B) Estaciones de banda ancha operadas por el Servicio Sismológico Nacional de México (SSN) en cuadros amarillos, estaciones temporales en triángulos rojos. (C) Forma de la isla antes y después de la explosión. Crédito: figuras modificadas del sitio NASA Earth Observatory.

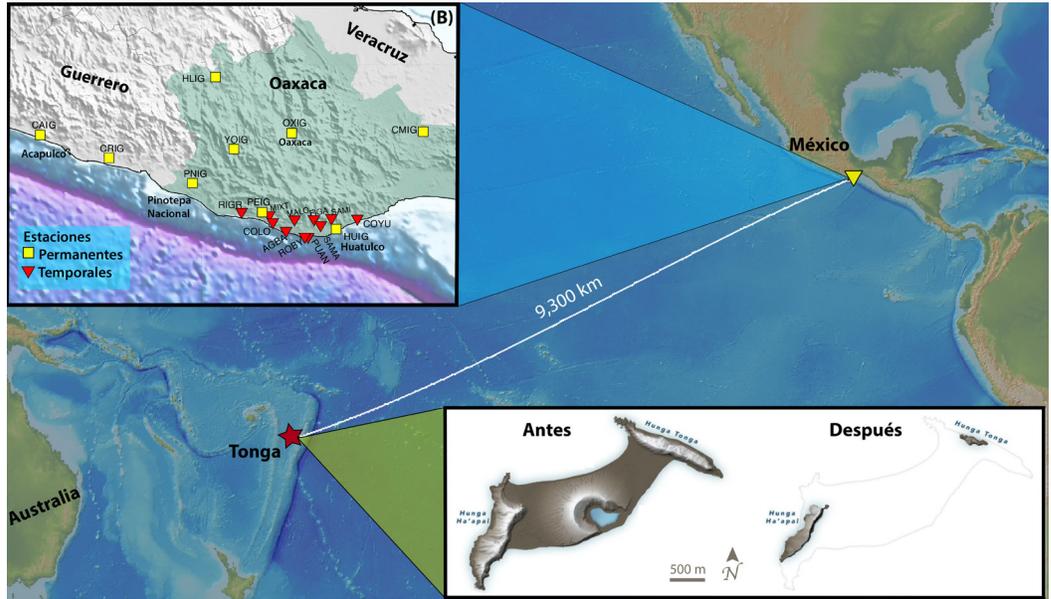
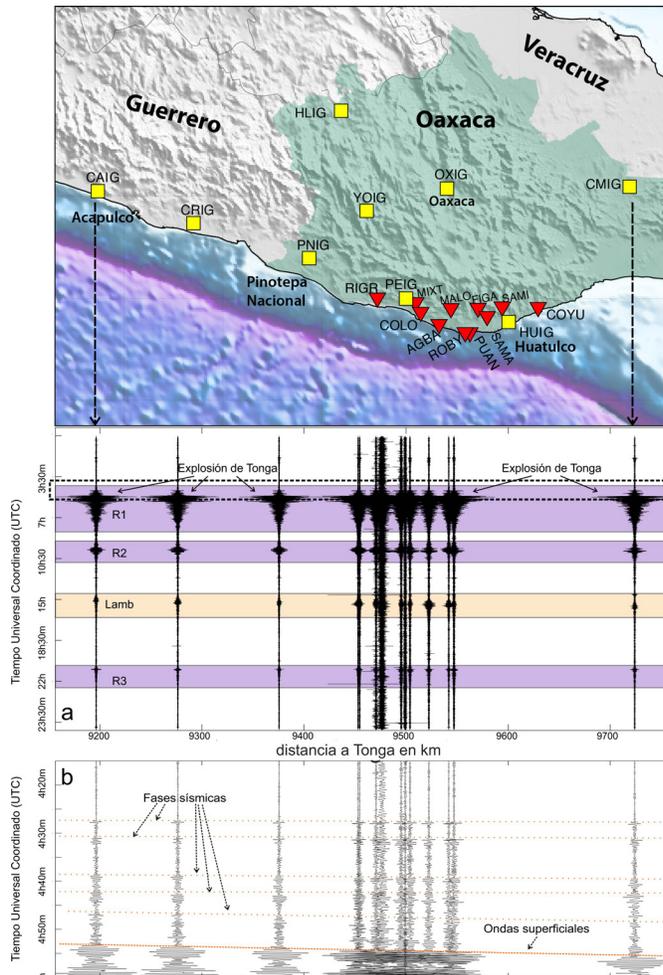


Figura 2. a) Sismogramas verticales de cada estación, según la distancia desde el epicentro de la explosión del volcán Hunga Tonga (~9,300 km). Las bandas violetas subrayan la presencia de la explosión principal (R1) y las dos vueltas más que las ondas sísmicas dieron alrededor de la Tierra (R2 y R3). El recuadro naranja encierra las ondas de presión (Lamb). El recuadro de línea segmentada es el acercamiento (b) al primer arribo 8 minutos después de la explosión de Tonga a Oaxaca y la llegada de varias fases sísmicas asociadas a reflexiones y refracciones de las ondas con la estructura interna de la Tierra. Crédito: elaboración propia.



El interior de la Tierra a través de sismogramas

En la Figura 2, se presentan dos conjuntos (a y b) de 13 sismogramas pertenecientes a la red de estaciones, dispuestos en posición vertical. En cada sección, el tiempo avanza de arriba hacia abajo, mientras que de izquierda a derecha, organizamos las estaciones respecto a su distancia al volcán Hunga Tonga. En la primera sección (a), los sismogramas tienen una duración de 24 horas, donde distinguimos el primer arribo de ondas producidas por la explosión del volcán Hunga Tonga en nuestra red y una serie de otras señales que describiremos más adelante.

En la Figura 2b, hay un acercamiento en donde ocurrió el primer arribo del tren de ondas de la explosión de Hunga Tonga a Oaxaca, tan solo 8 minutos después y casi al mismo tiempo en todas las estaciones de la costa. Esto se debe a que las ondas sísmicas viajaron por casi 10,000 km a través del interior de la Tierra, y las diferencias en el tiempo de recorrido entre una estación y otra se vuelven muy pequeñas, de milisegundos. Es como si cayera un rayo estando en una reunión virtual entre amigos del mismo barrio con todos los micrófonos encendidos; todos escucharíamos el trueno casi al mismo tiempo, ya que el rayo se originó en un lugar muy lejano.

En la misma figura, también podemos observar la llegada de varios tipos de ondas o fases sísmicas (líneas punteadas), por ejemplo, las ondas sísmicas que viajan en el interior de la Tierra (ondas de cuerpo o internas) y ondas de gran amplitud viajando cerca de la superficie (ondas superficiales). Recordemos que la Tierra en su interior tiene varias capas, como una cebolla, y que la presión y la densidad de los materiales en el interior aumentan conforme nos acercamos al centro de la Tierra. Entonces, las ondas sísmicas que recorren grandes distancias transcurren por las distintas capas (principalmente en el núcleo externo y el núcleo interno) y sufren reflexiones y refracciones que se registran como llegadas de "paquetes de ondas" en diferentes tiempos. Las ondas superficiales —que hemos marcado como R1 en Figura 2a— llegaron después porque viajan por la superficie a menor velocidad que las ondas de cuerpo, que viajan en el interior. Las ondas superficiales siguieron dando vueltas a la Tierra hasta desvanecerse (R2 y R3 en Figura 2a). Entretanto, en nuestros sismogramas se grabaron también las ondas de presión que se propagaron en la atmósfera y arribaron a Oaxaca aproximadamente 10 horas después. A este tipo de ondas se les denomina ondas de Lamb (Figura 2a).

Al igual que las señales acústicas, las señales sísmicas se componen de varias frecuencias, al igual que un acorde se compone de varias notas. La forma gráfica a color que usamos para representar las distintas frecuencias se llama espectrograma. En los espectrogramas, podemos observar la duración o persistencia de una frecuencia (eje vertical) a lo largo del tiempo (eje horizontal), mientras que los colores cálidos o fríos nos indican mayor o menor concentración de energía de la señal sísmica (Figura 3).

Por ejemplo, el zumbido persistente observado como una banda roja horizontal, entre 0.1 y 1 Hertz (Hz), es generado por la acción constante de las olas y el viento. En el caso de un sismo local que ocurre cerca de una estación sismológica, la energía generalmente se concentra en frecuencias mayores que 1 Hz, y su duración es de menos de un minuto, afortunadamente. En cambio, la explosión del volcán Hunga Tonga generó ondas sísmicas cuyo contenido energético, registrado en México, está en el intervalo de frecuencias entre 0.025 y 0.1 Hz. El hecho de que la energía se propague a través del subsuelo a frecuencias tan bajas permite que las perturbaciones den varias vueltas a la Tierra y sean grabadas varias veces en el mismo sismómetro, exactamente como

podemos observar tanto en los sismogramas como en los espectrogramas —R1, R2 y R3, ¡tres vueltas en 24 horas!—. También la onda de Lamb dejó su huella visible en el espectrograma, y esto nos hace pensar que si llegó hasta en México, en las cercanías del volcán, el ruido de la explosión fue ensordecedor.

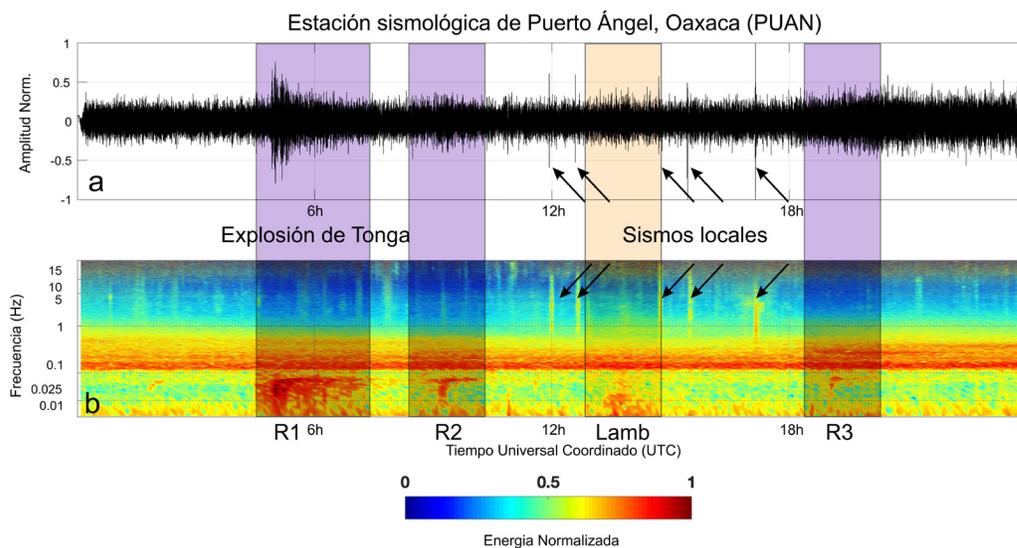


Figura 3. Sismograma de 24 horas del 15 de enero de 2022 de la estación PUAN, instalada en Puerto Ángel, Oaxaca (a), con su espectrograma abajo (b). El eje horizontal del tiempo es Tiempo Universal Coordinado (UTC). Los recuadros de color son los mismos que en la figura 2. Crédito: elaboración propia.

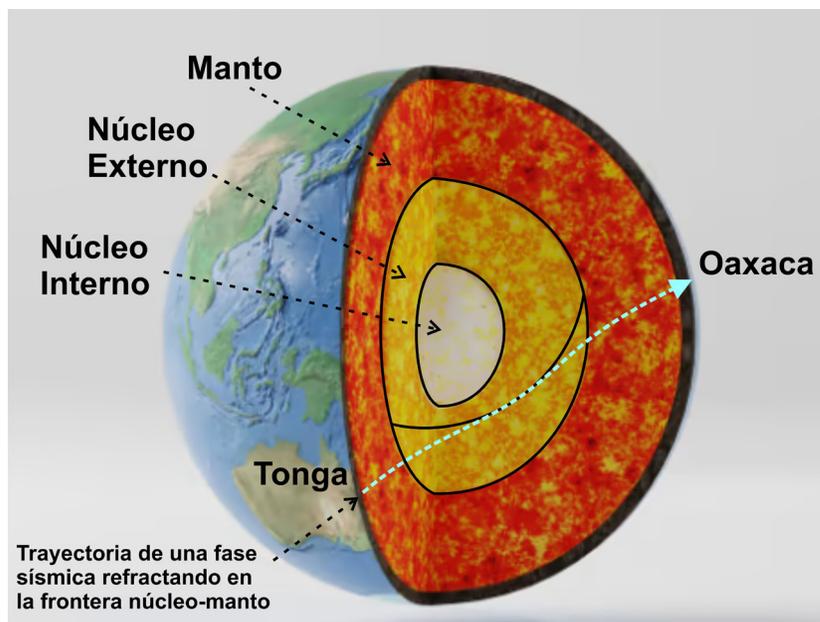


Figura 4. Capas de la Tierra y trayectoria de ondas refractadas en la frontera Núcleo-Manto. Crédito: elaboración propia.

Imágenes del límite Núcleo-Manto de la Tierra por debajo del Pacífico

La explosión del volcán Hunga Tonga hizo vibrar la costa de Oaxaca por más de 3 horas y 45 minutos (R1 en Figura 2a). Afortunadamente, las amplitudes de estos movimientos en el suelo fueron muy pequeñas y sólo equipos muy sensibles, como los sismómetros, fueron capaces de percibirlos. La información contenida en estos registros sísmicos resulta de gran importancia al estudiar el interior de la Tierra. De hecho, estas ondas atraviesan las partes más profundas de nuestro planeta y alcanzan a interactuar con el límite manto-

núcleo, permitiendo una descripción detallada de su forma. Si consideramos que esta interfase se encuentra aproximadamente a 2900 km de profundidad, es sencillo entender que sin esta información no podríamos “ver” lo que hay a esas profundidades (Figura 4).

Un aspecto muy importante que hay que tener en cuenta es que gracias a la densidad de estaciones sísmicas temporales en Oaxaca, se podrá detallar una porción muy especial del contacto núcleo-manto que se encuentra en el océano Pacífico y que se piensa es responsable del origen de varias islas volcánicas como las de Polinesia.

Consideraciones finales

La explosión del volcán Hunga Tonga fue un evento excepcional que afectó a todo el globo terrestre, produciendo perturbaciones que se registraron con diversos instrumentos de medición como barómetros, mareógrafos y sismómetros, los cuales registraron variaciones de la presión atmosférica, variaciones en los niveles de la superficie del mar y la generación de ondas sísmicas.

La importancia de estas señales sísmicas captadas por una red densa de sismómetros en la costa de Oaxaca nos proporciona información valiosa para investigar acerca del interior de la Tierra en una porción particular en la frontera núcleo externo-manto, en medio del océano Pacífico a 2900 km de profundidad. Al igual que en México, también hay varias redes sísmicas que captaron el evento y que, de acuerdo a su distancia con Tonga, permitirán estudiar capas superficiales o capas profundas si se encuentran más cerca o más lejos, respectivamente. La tarea de juntar cada pedacito de este rompecabezas será fundamental para integrar los mapas de la estructura interna de la Tierra con detalles aún desconocidos y que pueden ayudar a resolver dudas sobre el funcionamiento de nuestro planeta.

Alrededor del planeta, dentro y fuera de él, hay instrumentos como micrófonos encendidos, atentos a los sonidos de los fenómenos naturales que ocurren en la Tierra y que esperamos seguir estudiando.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Programa de Apoyos para la Superación del Personal Académico de la UNAM (PASPA) y el proyecto interno UMAR 2II2003.

Referencias

- ❖ Calò, M., Solano, E.A., García-Gomora, L.; Montalvo-Lara, C.E.; Sánchez-Alonso, F.; Granados, I.; y López-Arce, O. (2022). Sismicidad de la costa de Oaxaca registrada por una red sísmica temporal en 2021-2022, UGM Reunión Anual 2022. *GEOS, Unión Geofísica Mexicana* 42(1):118.
- ❖ Garvin, J. B., Slayback, D. A., Ferrini, V. L., Frawley, J. J., Giguere, C., Asrar, G., y Andersen, K. (2018). Monitoring and modeling the rapid evolution of Earth's newest volcanic island: Hunga Tonga Hunga Ha'apai (Tonga) using high spatial resolution satellite observations. *Geophysical Research Letters*, 45(8), 3445-3452. <https://doi.org/10.1002/2017gl076621>.

- ❖ Matoza, R. S., Fee, D., Assink, J., Iezzi, A. M., Green, D. N., Kim, K., Toney, L., Lecocq, T., Krishnamoorthy, S., Lalande, J., Nishida, K., Gee, K. L., Haney, M. M., Ortiz, H. D., Brissaud, Q., Martire, L., Rolland, L., Vergados, P., Nippres, A., . . . Wilson, D. C. (2022). Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*, 377(6601), 95-100. <https://doi.org/10.1126/science.abo7063>.
- ❖ NASA Earth Observatory. (s. f.). *Dramatic changes at Hunga Tonga-Hunga Ha'apai*. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/149367/dramatic-changes-at-hunga-tonga%20Hunga-hapai>.
- ❖ Servicio Geológico de Estados Unidos de América (usgs). (2022, 15 de enero). *M 5.8 Volcanic Eruption - 68 km NNW of Nuku'alofa, Tonga*. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/pt22015050/executive>.
- ❖ Servicio Sismológico Nacional (ssn). (s. f.). Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.ssn.unam.mx/>.
- ❖ Tatsumi, Y. (1986). Formation of the volcanic front in subduction zones. *Geophysical Research Letters*, 13(8), 717-720. <https://doi.org/10.1029/gl013i008p00717>.