Sismotectónica en Costa Rica

Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional OVSICORI-UNA

AGOSTO, 2022

Sismicidad en Costa Rica

Un total de 1118 sismos con magnitud local entre 0,3 y 5,8 fueron localizados por la red sismográfica del OVSICORI-UNA durante el mes de agosto de 2022. De estos, 10 eventos (correspondiente con el 0,89 % del catálogo mensual) fueron reportados como sentidos por la población costarricense mediante las redes sociales del Observatorio en Facebook y Twitter. La información completa de los sismos sentidos, donde se incluye el tiempo de origen, la magnitud, la profundidad y su ubicación epicentral, se puede encontrar en la página web del Observatorio mediante el siguiente enlace:

OVSICORI-UNA: `http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php/sismos-sentidos`.

La distribución espacial de la sismicidad durante agosto se puede observar en el mapa de la figura 1. En esta, el tamaño y color de los círculos representa la magnitud y la profundidad de los eventos respectivamente. Los círculos resaltados en color rojo denominados "sismos del mes", corresponden con eventos que en su mayoría fueron sentidos por la población y que debido a su magnitud, sobresalen por sobre la sismicidad de fondo. Para algunos de estos sismos se presenta además su mecanismo de ruptura (bola de playa), el cual demuestra la cinemática promedio del proceso de ruptura a lo largo de la falla causante (Tabla 1).

El día con mayor cantidad de eventos registrados fue el 8 de agosto, con 79 sismos, mientras que los días con la menor cantidad de sismos registrados fueron el 5 y 26, con 23 eventos registrados en ambos días (figura 2). El sismo de mayor magnitud, Mw=5,8, ocurrió el 03 de agosto a las 15:55, hora local, a 4 km SE de la Paz Centro, León, Nicaragua, a 112 km de profundidad. Este sismo fue sentido principalmente en diferentes localidades de la península de Nicoya.

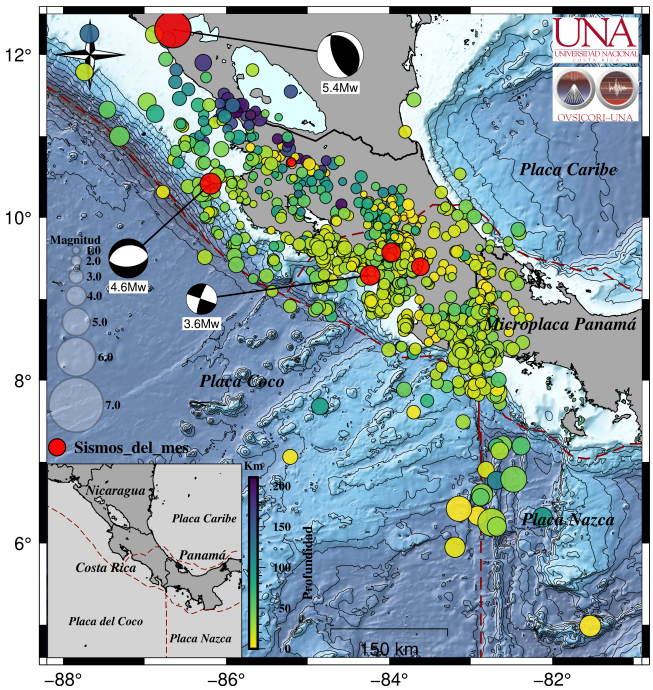

Figura 1: Mapa mostrando la distribución hipocentral de la sismicidad en Costa Rica durante el mes de agosto de 2022. El color y tamaño de los círculos representa la profundidad y magnitud de los sismos, respectivamente. Los eventos con un mecanismo focal (o bola de playa) corresponden con los sismos destacados del mes, ya sea por su magnitud, por haber sido percibidos por la población, o bien, ambas condiciones.

La cantidad acumulada de sismos localizados por la red sismográfica del OVSICORI-UNA durante el mes de agosto se detalla en la figura 3. La cantidad de eventos incrementa de manera constante en función del tiempo, tal y como

Datos de contacto: OVSICORI-UNA, Dirección: Universidad Nacional, Campus Omar Dengo, Heredia, Costa Rica (2386-3000),
email: ovsicori@una.cr, Tel: (506) 2562-4001

Evento	Fecha	Hora (UTC)	Latitud	Longitud	Prof. (km)	Mag (M_W)	strike/dip/rake
1	$2022-08-03$	$15:55:40$	12,31	$-86{,}65$	114	5,4	$158/64/99$
2	$2022-08-05$	$18:05:00$	10,42	$-86{,}19$	32	4,6	$85/55/-86$
3	$2022-08-06$	$00:09:00$	9,29	$-84{,}23$	35	3,6	$289/89/8$

TABLA 1: SOLUCIÓN DEL MECANISMO FOCAL PARA LOS SISMOS CON MAGNITUD MAYOR O IGUAL A $M_L = 4{,}0$, OCURRIDOS DURANTE EL MES DE AGOSTO DEL 2022. EL MECANISMO FOCAL SE CALCULÓ MEDIANTE LA INVERSIÓN DEL TENSOR DE MOMENTO SÍSMICO REGIONAL.

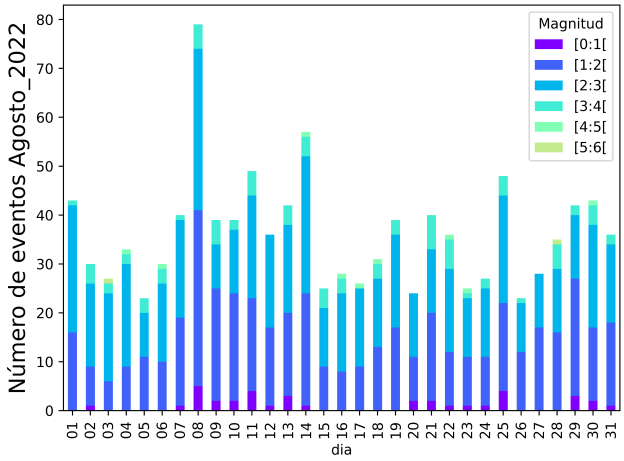

Figura 2: Conteo diario de la actividad sísmica en Costa Rica durante el mes de agosto de 2022, localizada por la red sismográfica del OVSICORI-UNA. La distribución de color en cada una de las barras correponde con el rango de magnitud descrito en la leyenda dentro de la figura.

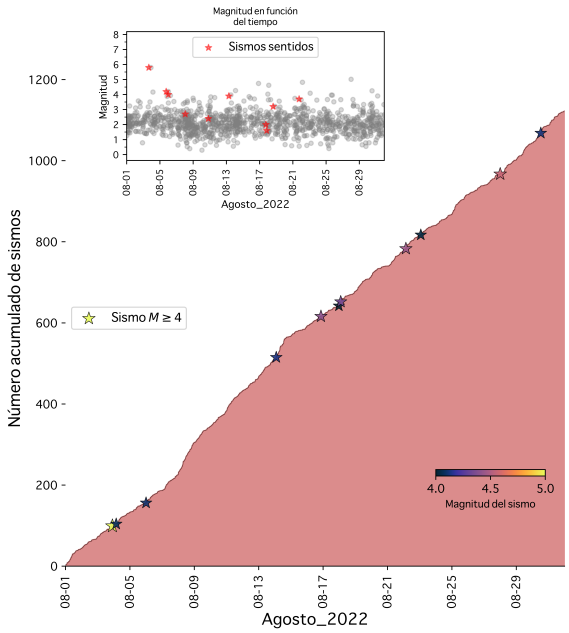

Figura 3: Cantidad acumulada de sismos (curva de color rojo) localizados manualmente por el personal del OVSICORI-UNA durante el mes de agosto del 2022. En la figura, las estrellas de color representan la ocurrencia de sismos con magnitudes mayores o iguales a 4,0, de acuerdo con la escala de colores que se observa en la parte inferior derecha. El panel superior muestra la distribución diaria de magnitudes correspondientes a la sismicidad del mes. En este, las estrellas de color rojo resaltan aquellos sismos que fueron sentidos por la población.

se ha observado en los meses anteriores. En su mayoría, la sismicidad en Costa Rica durante este mes está conformada principalmente por sismicidad de fondo.

SISMOS SENTIDOS EN FORTUNA DE BAGACES, GUANACASTE Y SU POSIBLE RELACIÓN CON ACTIVIDAD ANTROPOGÉNICA EN EL CAMPO GEOTÉRMICO DE MIRAVALLES

El 17 de agosto a las 20:20, hora local, se reportó un sismo sentido en el distrito de Fortuna del cantón de Bagaces, Guanacaste (estrella de color rojo en el mapa de la figura 4). Este evento tuvo una magnitud local de 1,6 y una profundidad de 2 km, ubicándose en una falla local con orientación aparente SW-NE y con extensión somera. A pesar de ser un sismo de baja magnitud, fue percibido por la población del distrito de Fortuna. Un total de 19 sismos con un rango de magnitud entre 1,5 y 3,2, ubicados dentro de una circunferencia de 5 km de radio con respecto al epicentro del sismo del 17 de agosto, fueron reportados sentidos al OVSICORI-UNA desde el año 2014 (figura 5). Similarmente, la mayoría de estos eventos son someros, localizados entre 1 y 3 km de profundidad. De acuerdo con el catálogo de sismos sentidos en la zona, el periodo de recurrencia de los sismos sentidos en la región se redujo en un 50 %, pasando de un evento cada $\sim$ 600 días entre 2014 y 2016 hasta uno o dos sismos cada $\sim$ 300 días o menos en años más recientes (figura 5, panel b).

Con el propósito de comprender mejor la naturaleza de la fuente generadora y la física de las fallas responsables de la microsismicidad sentida en la Fortuna de Bagaces, se hizo uso de las estaciones sismológicas de banda ancha que el OVSICORI-UNA opera en los volcanes Tenorio (VTAC), Miravalles (VMAR) y Rincón de la Vieja (VRLE y VRBA), para extraer funciones de Green, las cuales son señales coherentes, generadas entre dos puntos en la Tierra y sensibles a los cambios estructurales transitorios de la corteza tales como: apertura o cierre de grietas, movimiento de fluidos, estrés, etc.

Mediante la correlación cruzada del ruido sísmico ambiental entre todos los pares de estaciones, se midieron variaciones temporales en la velocidad de las ondas sísmicas Rayleigh en distintos rangos de profundidad del subsuelo y corteza superficial alrededor de la región de Fortuna de Bagaces y los campos geotérmicos de Miravalles, operados por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). La tabla 2 muestra

Profundidad muestreada (km)	Rango de frecuencia utilizada (Hz)
$0-1$	$0{,}5-2$
$1-3$	$0{,}7-1$
$3-10$	$0{,}1-1$

TABLA 2: RANGOS DE PROFUNDIDAD MUESTREADOS UTILIZANDO LA CORRELACIÓN CRUZADA DE RUIDO SÍSMICO AMBIENTAL ENTRE LAS ESTACIONES SISMOLÓGICAS DE LA CORDILLERA VOLCÁNICA DE GUANACASTE.

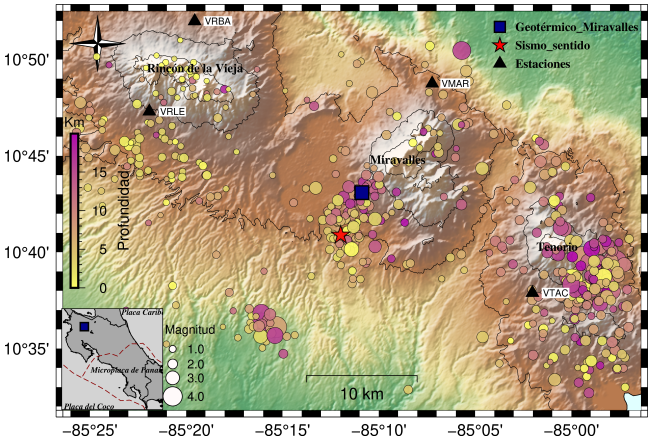

Figura 4: Distribución espacial de la actividad sísmica (círculos) a lo largo del arco volcánico de Guanacaste, donde se incluye el volcán Tenorio, Miravalles y Rincón de la Vieja. Los triángulos en color negro representan las estaciones sísmicas ubicadas alrededor de estos volcanes. El tamaño y color de los círculos describen la magnitud y profundidad de los sismos, respectivamente. La estrella de color rojo, ubicada en la Fortuna de Bagaces corresponde con el sismo sentido del 17 de agosto de 2022, con una magnitud de 1.6, a 2 km de profundidad.

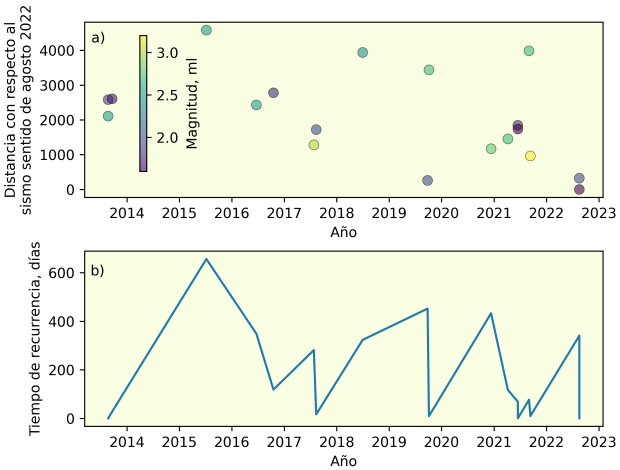

Figura 5: Distribución temporal de sismos sentidos en un radio de 5 km con respecto al epicentro del sismo del 17 de agosto de 2022, ubicado en la Fortuna de Bagaces, Guanacaste. Panel a) muestra la distancia relativa con respecto al tiempo en años desde 2014. Panel b) Muestra el tiempo de recurrencia en días, con respecto al tiempo desde 2014.

los rangos de profundidad muestreados con el análisis de ruido sísmico.

Nuestras observaciones muestran múltiples variaciones importantes en la atenuación de la roca que afectaron la velocidad de propagación de las ondas sísmicas desde enero hasta finales de agosto de 2022 (Figura 6) a profundidades que van entre 1 y 3 km. Los cambios de mayor magnitud hasta el momento ocurrieron entre julio y agosto de 2022, justo cuando se reportaron sismos sentidos en Fortuna de Bagaces, y donde se observa un incremento de hasta $0{,}4\,\%$ en la velocidad de propagación de las ondas sísmicas entre las estaciones VMAR y VRLE (panel c en la figura 6). Durante este mismo periodo se muestra, de igual forma, un incremento pero de menor magnitud entre las estaciones VRLE-VTAC y VMAR-VTAC (figura 6, paneles a y b, respectivamente). Por el contrario, la velocidad de las ondas sísmicas entre las estaciones VMAR-VRBA se redujo en un $0{,}2\,\%$, con respecto a periodos previos.

Los cambios de velocidad observados en la figura 6 pueden estar directamente relacionados con la actividad antropogénica orientada a la extracción y/o inyección de fluidos de la corteza superior en el campo geotérmico de Miravalles para la generación de energía eléctrica. La figura 7 muestra la deformación vertical elástica del suelo en respuesta a la actividad antropogénica, en donde los periodos más intensos, marcados en color amarillo, ocurren entre las 6:00 y 18:00 horas.

Múltiples estudios recientes (p.e. Taira et al. (2018); Yang et al. (2022); Guo and Thurber (2022)) han demostrado afectaciones estructurales similares a lo largo de los campos geotérmicos y de inyección en los Estados Unidos.

Debido a la naturaleza y mecánica de las ondas sísmicas de tipo Rayleigh, una reducción en la velocidad de propagación ha sido generalmente atribuída al fracturamiento hidráulico de la roca, generando grietas y poros, o bien, al incremento en la presión poro por la difusión de fluidos a lo largo de microfracturas y espacios abiertos en el matriz de roca, también al incremento en la densidad del material debido a la presencia de fluidos. De manera que, la inclusión de fluidos "frios" con saturación completa y la contracción térmica inducida por fuertes cambios de temperatura dentro de reservorios calientes de roca, en conjunto con la difusión de estos fluidos por medio de los pozos de producción geotérmica ubicados hacia el Noreste del Volcán Miravalles, podrían ser los mecanismos responsables de la reducción de velocidad observada entre las estaciones VMAR-VRBA.

Cuando la extracción de fluidos calientes desde los pozos de producción de Miravalles es neta, se genera subsidencia y esto provoca una contracción poroelástica en los reservorios. La contracción de poros y grietas conduce al incremento en la velocidad de las ondas sísmicas. Si la extracción es relativamente rápida, el proceso descrito anteriormente se acelera, generando un incremento súbito en la velocidad de Rayleigh a profundidades de entre 1 y 3 km tal y como se observa en

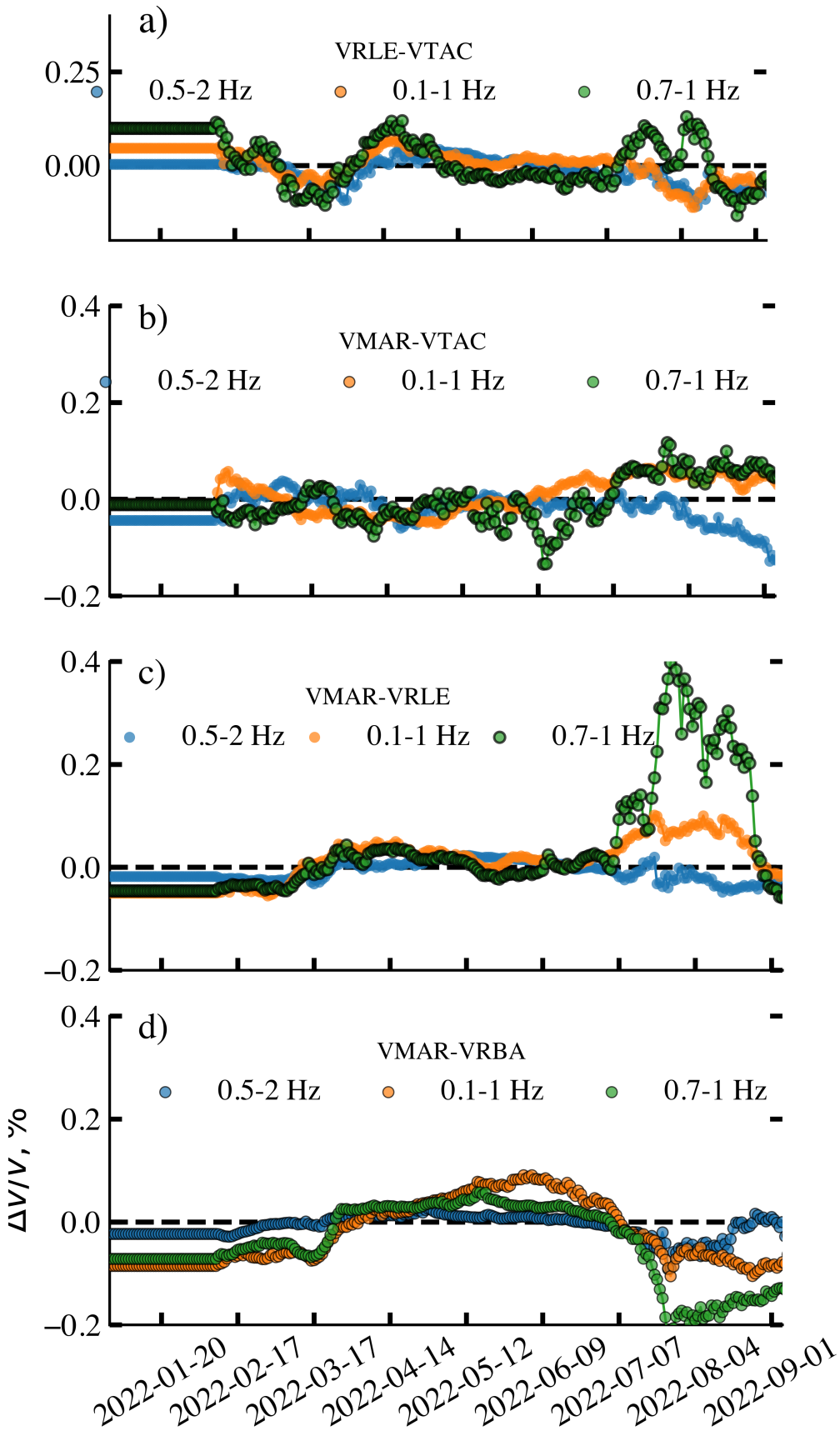

Figura 6: Cambios en la velocidad de las ondas sísmicas superficiales entre los pares de estaciones panel a) VRLE-VTAC, panel b) VMAR-VTAC, panel c) VMAR-VRLE y panel d) VMAR-VRBA. Para cada par de estaciones se analizaron 3 bandas de frecuencia distintas, por ejemplo: 0,5-2 Hz (color celeste) que muestrea entre 0,0 y 1,0 km de profundidad, 0,7-1 Hz (color verde) que muestrea entre 1,0 y 3 km de profundidad y 0,1-1 Hz (color anaranjado) que muestrea un volumen entre 1 y 7 km de profundidad.

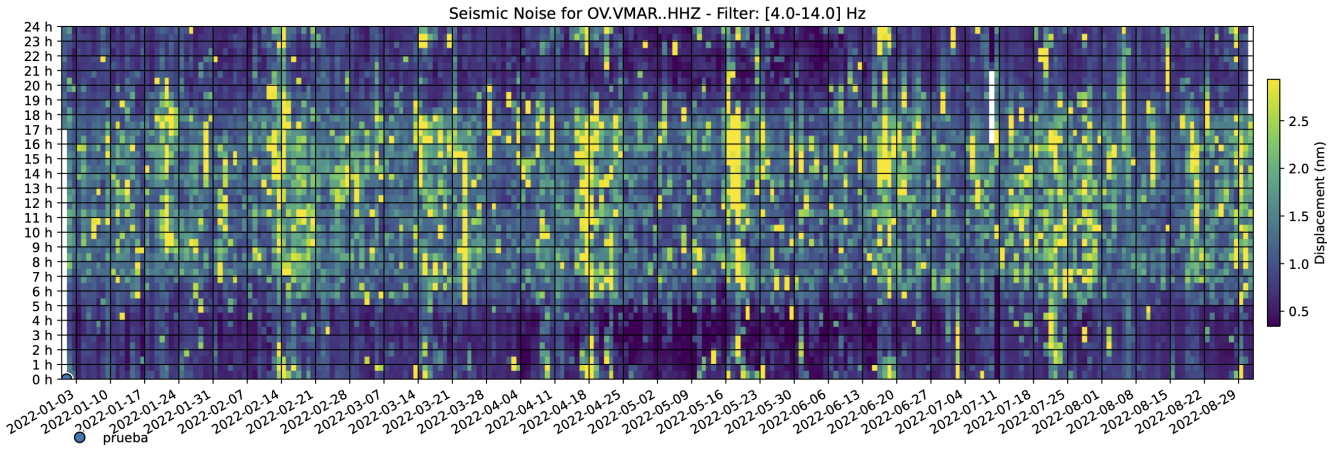

Figura 7: Desplazamiento vertical del suelo generado por la actividad antropogénica en los alrededores de la estación sismológica VMAR, en el Volcán Miravalles.

los páneles a), b) y c) de la Figura 6.

La subsidencia sostenida del material, generando fallamiento con una geometría normal, en conjunto con un incremento en la presión de poro a lo largo de los sistemas de falla, podrían ser los mecanismos responsables de la sismicidad inducida en la zona de Fortuna de Bagaces.

Glosario

Actividad antropogénica: Perteneciente o relativo a lo que procede de los seres humanos que, en particular, tiene efectos sobre la naturaleza (RAE, 2022).

Atenuación: disminución de la amplitud de las ondas sísmicas conforme se alejan de la fuente, debido a una dispersión de la energía (USGS, 2022).

Corteza: Capa rocosa externa comparativamente fina de la Tierra, que se divide generalmente entre corteza oceánica (con aproximadamente 7 km de espesor), y corteza continental (normalmente entre 35 y 40 km de espesor). (Tarbuck et al., 2005).

Fracturamiento Hidráulico: Fracturamiento de la roca producida por presión de agua.

Magnitud Momento Sísmico: Medición de la cantidad de momento sísmico liberado durante el sismo. Está basado en una escala logarítmica de momento sísmico, de manera que pueda ser comparada con otras escalas de magnitud (Lay and Wallace, 1995; Tarbuck et al., 2005).

Mecanismos focales (Bola de playa): Es una proyección estereográfica del plano de falla y el plano auxiliar de la falla, que representa las zonas donde ha habido compresión y dilatación, por lo que permiten determinar el mecanismo de ruptura de la falla durante el evento sísmico (Lay and Wallace, 1995).

Microsismicidad: Sismos de baja magnitud.

Momento Sísmico: Energía liberada durante un sismo, calculado a partir del área de ruptura, rigidez de la roca y el desplazamiento promedio de la falla (Lay and Wallace, 1995).

Ruido Sísmico: Radiación sísmica de fondo, generada por la interacción entre el oceáno y la corteza continental.

Ondas Rayleigh: Onda sismica superficial, caracterizada por un moviemiento eliptico (USGS, 2022).

Sismicidad Inducida: Sismicidad generada por actividad humana.

Subsidencia: Hundimiento del terreno producido por una disminución del agua subterranea, ya sea por procesos naturales o inducidos (Tarbuck et al., 2005).

Referencias

Guo, H. and Thurber, C. (2022). Temporal changes in seismic velocity and attenuation at the geysers geothermal fiel, california, from double-difference tomograpy. *Journal of Geophysical Reseach: Solid Earth*, 127.

Lay, T. and Wallace, T. (1995). Modern global seismology. *Academic Press, Estados Unido*.

RAE (2022). Real academia española: Actividad antropogenica. Tomado de `https://www.rae.es` (16/09/2022).

Taira, T., Nayak, A., Brenguier, F., and Manga, M. (2018). Monitoring reservoir response to earthquakes and fluid extraction, salton sea geothermal fiel, california. *Sciences Advances*, 4(1).

Tarbuck, E., Lutgens, F., and Tasa, D. (2005). Ciencias de la tierra, introducción a la geología física. *Pearson Prentice Hall*, 8.

USGS (2022). Earthquake glossary. Tomado de `https://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?alpha=ALL` (16/09/2022).

Yang, Z., Yuan, C., and Denolle, M. (2022). Denolle, m., 2022: Detection elevated pore preassure due to wastewater onjection using ambient noise monitoring. *The Seismic Record*, 2(1):38–49.