

Interpretación de la migración espacio-temporal de los enjambres de terremotos en la caldera de
Yellowstone

Mia Valentina Angulo Melendez

Trabajo de Grado para Optar el título de Física

Director

Manuel Alberto Florez torres

Doctor en geofísica

Codirector

José David Sanabria Gómez

Doctor en Física

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

*A mi mamita,
a mi papá, a mi hermano,
a mi abuelita.*

Magia - Cerati
*Todo me sirve, nada se pierde, yo lo transformo
Sé, nunca falla, el universo está mi favor
Y es tan mágico.*

Agradecimientos

A mi mamá, por abrigarme con su cálido amor, por haber sido mi más grande apoyo y mi refugio en la tempestad, sin ella este logro no habría sido posible. A mi papá, quien en mi camino de formación ha sido y será siempre mi mayor ejemplo de valentía. A Checho, mi hermano y mi tutor de toda la vida, por contagiarme de risas con sus chistes y enseñarme desde pequeña que la física y las matemáticas son divertidas.

A mis profesores, Manuel Alberto Torres y José David Sanabria por guiarme en el desarrollo de este trabajo de grado.

A Santiago, cuyo paso por mi pequeña isla ha tejido bonitos recuerdos que siempre albergaré en mi corazón. Gracias por confiar en mí y por siempre encontrar las palabras precisas para hacerme sonreír.

Tabla de contenido

Introducción	10
1. Marco teórico	14
1.1 Generalidades sobre terremotos	14
1.2 Enjambres sísmicos en sistemas volcánicos	16
1.3 Métodos de análisis de patrones espacio-temporales: enfoque del vecino más cercano . . .	18
2. Resultados	22
2.1 Implementación de la distancia del vecino más cercano	22
2.2 Estudio de la dinámica espacial de los enjambres sísmicos	30
3. Conclusiones	34
Referencias bibliográficas	36

Lista de tablas

Tabla 1. Datos de los enjambres más grandes. 27

Lista de figuras

Figura	1. Representación gráfica del mecanismo de rebote elástico, (a) estado inicial de la falla, (b) deformaciones producidas por los esfuerzos aplicados, (c) estado de la falla después del terremoto. Imágenes adaptadas de (Udías et al., 2014)	15
Figura	2. (a) Mapa de calor de las componentes re-escaladas del espacio y el tiempo (T,R), (b) histograma del vecino más cercano (η_j).	20
Figura	3. Estructura en forma de árbol para una agrupación de eventos sísmicos.	21
Figura	4. Sismicidad en Yellowstone (2002-2021): Puntos negros representan datos sísmicos y triángulos amarillos indican las estaciones sísmicas.	23
Figura	5. Evaluación de la sismicidad en el lago de Yellowstone con magnitud de corte $m_c = 1,0$: (a,b) periodo 2002-2012, (b,c) periodo 2012-2021.	25
Figura	7. Histogramas que representan el análisis de las agrupaciones sísmicas obtenidas. (a) Muestra el promedio de la profundidad de la hoja para todas las agrupaciones sísmicas obtenidas, mientras que (b) representa el tamaño (cantidad de eventos) de todas las agrupaciones sísmicas obtenidas.	27
Figura	8. Actividad sísmica en la región de Yellowstone durante un período de 19 años, desde 2002 hasta 2021. La imagen (a) muestra los enjambres sísmicos que ocurrieron en la zona y la imagen (b) la sismicidad de fondo.	28
Figura	9. Representación gráfica de enjambres sísmicos identificados mediante el enfoque del vecino más cercano en dos periodos de tiempo: (a) 2002-2012 y (b) 2012-2021. Cada enjambre se muestra en colores distintos (de acuerdo con la figura Figura 8) y los eventos de sismicidad de fondo se representan con puntos negros.	29

Figura 10. Histograma del promedio de la migración vertical $\Delta\bar{Z}$ para todos los enjambres sísmicos.	31
Figura 11. Representación espacial de los enjambres sísmicos como centroides con su respectivo $\Delta\bar{Z}$ calculado.	31
Figura 12. Evolución espacial en profundidad de los enjambres sísmicos en el tiempo: (a) en 2017 y (b) en 2010.	33

RESUMEN

TÍTULO: Interpretación de la migración espacio-temporal de los enjambres de terremotos en la caldera de Yellowstone*

AUTOR: Mia Valentina Angulo Melendez**

PALABRAS CLAVES: Sismología, Enjambres sísmicos, Migración, Método de la distancia del vecino más cercano

DESCRIPCIÓN:

Se ha creído generalmente que los enjambres sísmicos son provocados por deslizamientos sísmicos o la migración de fluidos a través de fallas preexistentes en la corteza terrestre. Sin embargo, los factores que controlan la evolución de los enjambres aún no se comprenden completamente. En este trabajo, se realizó una metodología de desagrupación sísmica en Yellowstone utilizando el algoritmo del vecino más cercano en un catálogo de sismicidad entre 2002 y 2021. La implementación de este algoritmo permitió identificar patrones de agrupación sísmica con el fin de extraer la sismicidad de tipo enjambre. Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis estadístico enfocado en los episodios de migración espacial de los enjambres identificados. Los resultados muestran que alrededor del 41 % de los eventos sísmicos del catálogo corresponden a enjambres sísmicos. Asimismo, no se logró determinar una migración preferencial en profundidad, lo que sugiere una posible migración de fluidos hidrotermales en direcciones laterales.

* Proyecto de investigación.

** Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Asesores: Ph. D. William Pinto Hernández and Ph. D. José David Sanabria.

ABSTRACT

TITLE: Interpretation of the spatio-temporal migration of earthquake swarms in the Yellowstone caldera.

AUTHOR: Angulo Melendez, Mia Valentina **

KEYWORDS: Seismology, Earthquake Swarms, Migration, Nearest Neighbor Distance Method.

DESCRIPTION: It is generally believed that earthquake swarms are driven by either aseismic slip or the migration of fluids through a preexisting fault network. However, the factors that control swarm evolution remain unclear. In this study, a seismic de-clustering methodology was applied to Yellowstone using the nearest-neighbor algorithm on a seismicity catalog from 2002 to 2021. The implementation of this algorithm allowed for the identification of seismic clustering patterns to extract swarm-type seismicity. Additionally, a statistical analysis focused on the episodes of spatial migration of the identified swarms was conducted. The results show that approximately 41 % of the seismic events in the catalog correspond to seismic swarms. Furthermore, no preferential depth migration could be determined, suggesting a possible lateral migration of hydrothermal fluids.

** Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Advisors: Ph. D. Manuel Alberto Florez Torres and Ph. D. José David Sanabria.

Introducción

Los sismos, también conocidos como terremotos, son fenómenos naturales que han ocurrido a lo largo de la historia de la Tierra, debido principalmente a los movimientos en la corteza terrestre. El estudio de los sismos ha llevado a importantes avances en la comprensión de la estructura y evolución de nuestro planeta (Stein and Wysession, 2009; Udías et al., 2014). En términos generales, los terremotos suelen manifestarse en regiones específicas del planeta conocidas como zonas sísmicas de alta actividad. Por lo tanto, es común que ocurran múltiples terremotos en una misma zona, ya sea al mismo tiempo o en un período posterior al evento principal. Esto se debe a que en la naturaleza, los terremotos tienden a agruparse tanto en el espacio como en el tiempo. La secuencia más típica y mayormente estudiada es la de evento principal-réplicas, en la que un sismo principal es seguido por réplicas sísmicas de menores magnitudes.

Sin embargo, en algunas ocasiones, se producen enjambres sísmicos, que son otra forma de sismicidad que carece de la presencia de un evento principal de mayor magnitud como es el caso de la secuencia evento principal-réplicas. Los enjambres suelen presentarse en zonas con alta actividad volcánica y geotérmica (Hill, 1977; Maeda et al., 2010; Mogi, 1963; Wu et al., 2007; Yukutake et al., 2011), así como en regiones con deslizamientos y fisuras (Shelly et al., 2013). Por ejemplo, el enjambre ocurrido en Marsushiro, Japón se considera uno de los más energéticos de la historia (Matsu'ura and Karakama, 2005). En un período de tres años (1965-1967), se registraron alrededor de 700,000 eventos sísmicos. La magnitud más grande registrada en el enjambre de Matsushiro fue de 5.4 en la escala de magnitud de momento (M_w) causando algunos daños, pero sin víctimas mortales. Entre los daños reportados se encuentran deformaciones en la superficie del suelo y un aumento del flujo de agua en los manantiales de la zona debido a la sobrecarga de dióxido de carbono CO_2 originado en el subsuelo (Cappa et al., 2009).

Por otro lado, según (Holtkamp et al., 2011), sismos registrados en algunos enjambres ocurridos en zonas de subducción en Latinoamérica podrían haber actuado como precursores de grandes

terremotos, tales como los eventos sísmicos de 2010 M_w 8,8 Maule en Chile y 2007 M_w 8,1 Pisco en Perú. En el volcán Cerro Machín en Colombia, considerado uno de los volcanes más peligrosos del país debido a su historial de actividad explosiva en los últimos 5,000 años (Inguaggiato et al., 2017), se han detectado diferentes enjambres sísmicos. Destaca en particular el ocurrido entre 2008 y 2013, el cual incluyó el terremoto de mayor magnitud registrado hasta la fecha, con una magnitud local de M_L 4,9. Este evento sísmico provocó la emisión de fuentes de agua en lugares inusuales, deslizamientos de tierra y agrietamiento del terreno (Makario Londoño, 2022).

Además de los ejemplos mencionados anteriormente, la región de Yellowstone en Estados Unidos ha sido objeto de profundo estudios sobre enjambres sísmicos en las últimas décadas (Chang et al., 2010; Christiansen et al., 2007; Shelly et al., 2016; Shelly and Hardebeck, 2019). Con una amplia red de monitoreo sismológico y más de 42 estaciones sísmicas en su entorno, se ha convertido en un lugar ideal para la investigación y estudio de estos fenómenos. Como señalan (Miller and Smith, 1999), el campo volcánico de Yellowstone es uno de los sistemas volcano-tectónicos más activos del mundo. En los últimos 2 millones de años, la historia volcánica de esta zona ha estado marcada por tres erupciones volcánicas que dieron lugar a la formación de calderas, siendo la más reciente de ellas la caldera de Yellowstone la cual se produjo hace 0,64 millones de años (Waite and Smith, 2002). Por otra parte, esta caldera se ha caracterizado por una extensa sismicidad, episodios de levantamiento y hundimiento, así como una amplia diversidad de fenómenos ocasionados por el sistema hidrotermal de la zona, el cual es el de mayor concentración de géiseres y cráteres de explosión hidrotermal en la Tierra (Hurwitz and Lowenstern, 2014). Estos sistemas hidrotermales se forman por la circulación de agua a altas temperaturas a través de las fallas de la corteza, en parte debido a la pérdida de calor por la cristalización del magma suministrado por cámaras magmáticas en su interior (Burns et al., 1989). Desde la instalación de una red sísmica en 1973, la actividad sísmica en Yellowstone ha sido monitoreada y diversos estudios han mostrado enjambres sísmicos (Waite and Smith, 2002). El enjambre más grande registrado en la región ocurrió en octubre de 1985 y duró más de tres meses, con alrededor de 3.000 sismos. Además, otro enjambre sucedido

a finales de 2008 e inicios de 2009 consistió en aproximadamente 1.000 sismos, de los cuales cerca de 21 tuvieron magnitudes mayores de tres (Farrell et al., 2009). En la zona de la caldera Long Valley, también se ha observado un comportamiento sísmico similar. La investigación de (Li et al., 2021) empleó una metodología basada en la extracción de enjambres y realizó un estudio del comportamiento migratorio de estos enjambres. Este análisis reveló una tendencia ascendente de fluidos magmáticos o hidrotermales al interior de la caldera.

La necesidad de evaluar los riesgos asociados, comprender el origen de los procesos hidrotermales y preservar las características naturales de Yellowstone ha motivado la mayoría de los estudios sísmicos en esta región (Hurwitz and Lowenstern, 2014). En este sentido, las investigaciones realizadas han demostrado que la actividad hidrotermal y la inyección episódica de fluidos a través de la zona de transición frágil-dúctil se manifiestan a través de enjambres sísmicos, inflación y deflación en la caldera (Hurwitz and Lowenstern, 2014). En relación con el levantamiento y los hundimientos de la caldera, se ha planteado la hipótesis de que el levantamiento podría ser resultado de la acumulación de fluidos magmáticos durante el proceso de enfriamiento y cristalización en el reservorio. Mientras que el hundimiento podría ser una consecuencia de la extensión tectónica o de la liberación de fluidos magmáticos (Dzurisin and Yamashita, 1987). Además, modelos numéricos han verificado la factibilidad de estas premisas, relacionando la inyección hidrotermal en la base de la corteza frágil con el hundimiento y levantamiento de la caldera (Hurwitz et al., 2007; Hutnak et al., 2009). Sin embargo, los modelos más recientes no han permitido distinguir entre fluidos hidrotermales o magmáticos como la causa de estos cambios volumétricos en la caldera (Hurwitz and Lowenstern, 2014).

En cuanto a los enjambres sísmicos en Yellowstone, diversos estudios (Farrell et al., 2009; Shelly et al., 2013; Waite and Smith, 2002) han evidenciado que los mecanismos focales de los terremotos en estos enjambres, así como sus profundidades y patrones de migración temporal son el resultado de la migración de fluidos hidrotermales y la liberación de presión desde la caldera (Hurwitz and Lowenstern, 2014). Estudios adicionales (Caliro et al., 2014; Chiodini et al., 2012,

2003) han encontrado una relación entre los incrementos en los niveles de gases emitidos por las fumarolas y la ocurrencia de levantamientos y enjambres sísmicos en la caldera (Hurwitz et al., 2007). De acuerdo con el trabajo realizado por (Ross et al., 2020) los enjambres inducidos por fluidos pueden modelarse como procesos de difusión, con una difusividad que varía entre 0,02 y 10 [m²/s] (Scholz, 2019). Comúnmente, este tipo de sismicidad se expande hacia afuera desde el punto inicial de inyección del fluido (Chen et al., 2012). Adicionalmente, (Shelly and Hardebeck, 2019) analizaron dinámica del enjambre sísmico que tuvo lugar en Yellowstone entre junio y septiembre de 2017. Los resultados del estudio indicaron la activación de una red de fallas en el enjambre, lo que sugiere la posible difusión de la presión del fluido acuoso a través de estas estructuras (Shelly and Hardebeck, 2019). En trabajos como los de (Hainzl, 2004; Parotidis et al., 2003; Shelly et al., 2013), determinaron que las variaciones de la presión del fluido en los poros debido a la migración de fluidos son uno de los factores que contribuyen a la formación del enjambre. En resumen, el análisis del patrón migratorio del enjambre sísmico puede ser clave para identificar y distinguir los distintos mecanismos que desencadenan estos eventos (Chen et al., 2012).

En este trabajo, se busca abarcar un periodo significativo de 19 años y llevar a cabo un estudio sistemático de todos los enjambres sísmicos que hayan ocurrido durante este lapso. La razón de esto es que los estudios previos realizados en Yellowstone sobre el comportamiento de los enjambres sísmicos se han centrado en un periodo específico de alta sismicidad (Farrell et al., 2009, 2010; Shelly and Hardebeck, 2019; Shelly et al., 2013). Para ello, se utiliza el algoritmo implementado por (Li et al., 2021) en Long Valley. Una vez identificados los enjambres, se realiza un análisis estadístico y se presentan los principales hallazgos en la sección de resultados, donde se discute su importancia.

1. Marco teórico

1.1 Generalidades sobre terremotos

Un terremoto es, a grandes rasgos, un proceso de ruptura que se da en una fractura de la corteza terrestre. Este fenómeno libera de manera repentina energía sísmica almacenada previamente en esa región (Kanamori and Brodsky, 2004). Un terremoto sucede cuando los esfuerzos aplicados superan la fricción estática y se produce una discontinuidad en el campo de velocidad a los dos lados de una superficie llamada falla.

El modelo más aceptado para describir este proceso se denomina mecanismo de rebote elástico (Ried, 1911). Según esta teoría, mucho antes de la aparición de un terremoto ocurre un lento proceso de acumulación de esfuerzos en la falla (ver figura 1a). Luego, dado que la falla es inmovilizada por la fricción ejercida entre ambos lados, surgen deformaciones a su alrededor tal como lo muestra la figura 1b. Estas deformaciones conducen a un incremento considerable de los esfuerzos, de tal modo que una vez estos exceden el umbral de fricción soportado por las rocas en la falla, se produce la ruptura y, por tanto, el terremoto. Después de sucedido el terremoto, se observa un desplazamiento relativo entre ambos lados de la fractura (ver figura 1c) (Stein and Wysession, 2009).

Los terremotos pueden ser provocados por factores naturales y antrópicos. Entre las causas naturales se encuentran las actividades tectónicas, los procesos volcánicos, las colisiones de meteoritos y, en general, cualquier impacto de algún objeto sumamente masivo sobre la Tierra. Por otro lado, algunos ejemplos de las causas de terremotos de origen antrópico son la aplicación del fracking el cual se emplea para la extracción de hidrocarburos, la presencia de embalses y el uso de artefactos nucleares.

El foco o hipocentro de un terremoto es el punto en el interior de la Tierra donde se origina la ruptura, mientras que el epicentro es el punto ubicado sobre la superficie de la Tierra encima del sismo. En general, las redes de monitoreo suelen construir catálogos donde se registran los parámetros hipocentrales (tiempo de origen, profundidad, longitud y latitud) y los errores asociados,

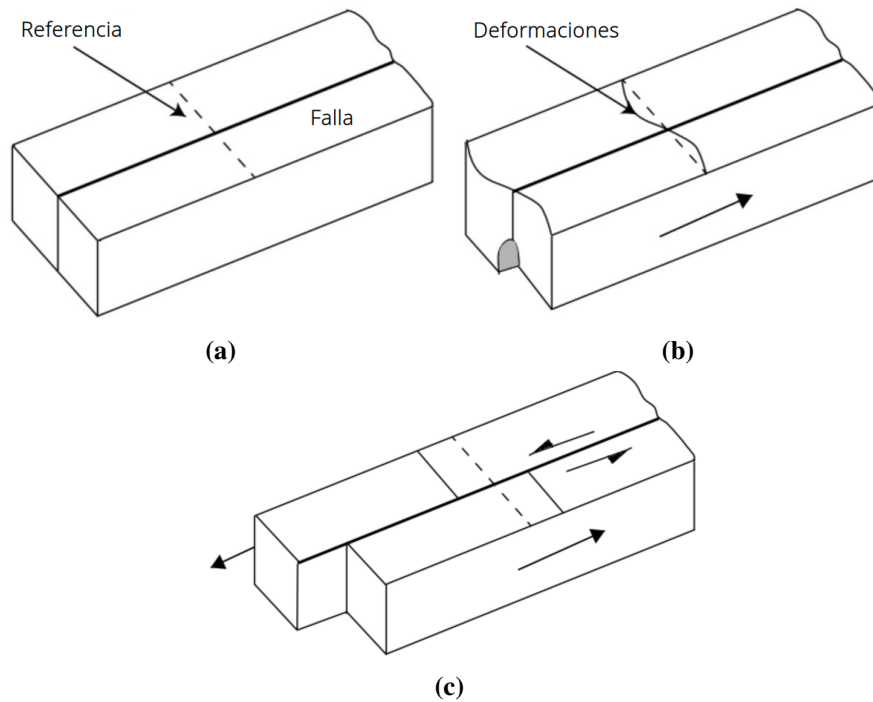


Figura 1. Representación gráfica del mecanismo de rebote elástico, (a) estado inicial de la falla, (b) deformaciones producidas por los esfuerzos aplicados, (c) estado de la falla después del terremoto. Imágenes adaptadas de (Udías et al., 2014)

así como las magnitudes. La localización del terremoto se aborda como un problema inverso, en el que se asume un modelo de velocidades y se realiza una inversión que utiliza el tiempo de arribo de las ondas S y P para determinar los parámetros hipocentrales óptimos. Por otra parte, el tamaño de un terremoto puede ser determinado por medio del momento sísmico M_0 . El momento sísmico que involucra la energía liberada en el sismo, se define como

$$M_0 = \mu \bar{D} S, \quad (1)$$

donde μ es el módulo de rigidez, \bar{D} es el desplazamiento promedio de la falla y S el área de la misma (Kanamori and Brodsky, 2004). El momento sísmico M_0 se mide en unidades de fuerza por distancia (típicamente en [dinas]×[cm]) y permite definir una escala logarítmica para la determinación de la

intensidad de un terremoto:

$$M_W = \frac{\log M_0}{1,5} - 6,07. \quad (2)$$

Sin embargo, para sismos pequeños, no es posible determinar el momento sísmico, por lo que se utiliza la magnitud local M_L la cual se calibra de forma empírica (Stein and Wysession, 2009). La magnitud local tiene la forma

$$M_L = \log(A/T) + F(h, \Delta) + C, \quad (3)$$

siendo A la amplitud de la señal, T el periodo dominante, C un factor de escala local, F la calibración que es función de Δ la distancia epicentral del sismómetro y h la profundidad del hipocentro. En general, los parámetros hipocentrales y la magnitud M_L de los sismos son determinados de manera rutinaria por la red de monitoreo sísmico de la región.

En cuanto a la estadística de terremotos, (Gutenberg and Richter, 1941) concluyeron que los terremotos con magnitudes pequeñas son más frecuentes que los terremotos con magnitudes altas (Kanamori and Brodsky, 2004) y plantearon la siguiente relación:

$$\log N(M) = a - bM, \quad (4)$$

en la cual $N(M)$ es el número de terremotos con magnitudes menores o igual a M , a es una constante que depende del número de terremotos utilizados en la muestra, y b es un parámetro que describe la distribución relativa del tamaño de los eventos (Wiemer and Wyss, 2002).

1.2 Enjambres sísmicos en sistemas volcánicos

Los enjambres se definen como aglomeraciones de eventos sísmicos que están estrechamente agrupados en tiempo y espacio, y no tienen un terremoto principal que desencadene la secuencia (Beer et al., 2015; Mogi, 1963). Estos enjambres pueden durar desde horas hasta meses. Los

enjambres sísmicos de origen tectónico son los más comunes, y se originan por la acumulación de esfuerzos en las zonas de contacto entre las placas tectónicas, lo que conduce a la liberación de energía en forma de terremotos de baja magnitud en diferentes zonas tectónicas, como las fallas activas, las zonas de subducción y las áreas de deformación cortical (Guarracino and Jougnot, 2018; Hollenstein et al., 2008). Por otro lado, existen enjambres migratorios que se producen debido a una perturbación temporal en el campo de esfuerzos terrestres causada por la intrusión de fluidos en la corteza terrestre (Massin et al., 2013). Particularmente, los enjambres migratorios son frecuentes en sistemas volcánicos debido a la actividad magmática subterránea intrínseca a este tipo de zonas (Mogi, 1963).

En particular, la caldera de Yellowstone es una región geotérmica ubicada en los Estados Unidos conocida por ser una de las zonas sísmicas más activas del mundo, con frecuentes enjambres migratorios. Esta región es el resultado de una amplia red de cámaras magmáticas subterráneas que generan migraciones de fluidos hidrotermales y magmáticos (Li et al., 2021). Cuando el magma se infiltra en la corteza, aumenta la concentración de esfuerzos en las fallas preexistentes, lo cual puede conllevar a la generación de enjambres sísmicos (Mogi, 1963). Por otra parte, la emisión de calor de las cámaras magmáticas también desencadena la liberación de fluidos hidrotermales, que al ejercer presión sobre las paredes de la falla, reducen el esfuerzo normal efectivo de la misma y aumentan la probabilidad de la ruptura de la falla, dando lugar a posibles enjambres sísmicos en la zona (Shelly et al., 2016). El modelo numérico desarrollado por (Hainzl, 2004) indica que la expansión espacial de los hipocentros puede ser un indicativo importante de la activación de sismos por fluidos. Aunque la propagación espacial de los enjambres puede darse en todas las direcciones, estudios recientes han evidenciado la existencia de direcciones preferenciales. Por ejemplo, en la investigación realizada por (Shelly et al., 2016), se encontró una propagación bilateral en un enjambre en el 2014 analizado en la caldera de Long Valley. Además de la difusión de fluidos, los procesos de falla y las variaciones de presión del fluido en los poros también contribuyen de manera compleja y conjunta a la migración espacio-temporal de los enjambres sísmicos.

1.3 Métodos de análisis de patrones espacio-temporales: enfoque del vecino más cercano

En la actualidad, las técnicas de desagrupamiento se han implementado con el propósito de separar los sismos de un catálogo en grupos. Las técnicas convencionales de desagrupamiento se dividen principalmente en dos tipos: los métodos de ventana y los métodos de enlace (Wu, 2010). Los métodos de ventana analizan una ventana de tiempo determinada y aplican un criterio específico para decidir si un evento sísmico pertenece o no a alguna agrupación en particular (Gardner and Knopoff, 1974; Utsu, 1970). Por otro lado, los métodos de enlace identifican conexiones entre los eventos utilizando criterios de cercanía espacio-temporales, además de incluir aspectos como la similitud entre la magnitud y la frecuencia (Davis and Frohlich, 1991; Reasenber, 1985). Dentro de los métodos de enlace, la técnica de la distancia del vecino más cercano ha sido ampliamente utilizada en sismología debido a que se considera un método efectivo para la detección de agrupaciones sísmicas, entre estas, los enjambres sísmicos (Aden-Antoniów et al., 2022; Baiesi and Paczuski, 2004; Li et al., 2021). Este enfoque no depende del tamaño de una ventana de tiempo para identificar agrupaciones de terremotos, sino que utiliza la definición de una distancia entre el evento sísmico y su vecino más cercano como criterio para determinar si el evento se considera parte de la agrupación. Por lo tanto, este método es más flexible que los métodos basados en ventana, los cuales requieren la especificación de un tamaño de ventana fijo para determinar la presencia de agrupaciones.

En este contexto, (Zaliapin and Ben-Zion, 2013) propusieron una distancia en el dominio del espacio-tiempo basada en un trabajo anterior de (Baiesi and Paczuski, 2004), donde para cada evento j del catálogo, se calcula la distancia a cada evento anterior i . Específicamente, esta distancia se define como

$$\eta_{ij} = t_{ij}(r_{ij})^{d_f} 10^{-bm_i} \quad (5)$$

donde $t_{ij} = t_j - t_i$ es el tiempo de interrecurrencia en años, $r_{ij} \geq 0$ es la distancia espacial entre los hipocentros en kilómetros, m_i es la magnitud del evento i , b es el parámetro de la relación de Gutenberg y Richter (ver ecuación 4), y d_f es la dimensión fractal de la distribución del epicentro.

Cabe destacar que el factor multiplicativo 10^{-bm_i} tiene un papel importante, ya que aumenta en el dominio espacio-temporal la disminución potencial de eventos de grandes magnitudes (Zaliapin and Ben-Zion, 2020). En conjunto, estas variables permiten incluir características temporales, espaciales, estadísticas y geométricas, lo que resulta esencial para una medida precisa y bien informada de la física de los terremotos. De acuerdo con lo anterior, el vecino o pariente i más cercano es aquel con la distancia mínima al evento j , es decir:

$$\eta_j = \min(\eta_{ij}, i < j). \quad (6)$$

Con base en esta definición, cada evento j tiene un único pariente (exceptuando el primer evento del catálogo) y puede tener múltiples descendientes al conectar sucesivamente cada pariente con su vecino antecesor más cercano, lo que crea una estructura jerárquica similar a un árbol (Zaliapin and Ben-Zion, 2013). En la implementación del enfoque de la distancia del vecino más cercano, es conveniente definir nuevas componentes espacio-temporales re-escaladas. Para lograr esto, se aplica el logaritmo (\log_{10}) a ambos lados de la ecuación 5

$$\log_{10} \eta_{ij} = \log_{10} t_{ij} + d_f \log_{10} r_{ij} - bm_i, \quad (7)$$

tomando $q = 0,5$, al reescalar las componentes temporales y espaciales resulta

$$T_{ij} = t_{ij} 10^{-qbm_i}; R_{ij} = (r_{ij})^{d_f} 10^{-(1-q)bm_i}. \quad (8)$$

Con estas definiciones la ecuación 7 se puede reescribir como las ecuaciones 9

$$\begin{aligned} \log_{10} \eta_{ij} &= \log_{10} T_{ij} + \log_{10} R_{ij} \\ \eta_{ij} &= T_{ij} R_{ij}. \end{aligned} \quad (9)$$

Por otro lado, este enfoque de agrupamiento se fundamenta en el comportamiento típico de

la sismicidad, el cual ha evidenciado una distribución bimodal de la distancia del vecino más cercano (η_j) y la distribución conjunta de las componentes re-escaladas (T, R) (Baiesi and Paczuski, 2004, 2005; Zaliapin and Ben-Zion, 2013). Este patrón de distribución bimodal proporciona una herramienta natural para separar un catálogo sísmico en dos grupos: aquellos eventos cercanos a sus parientes (aglomerado) y aquellos eventos relativamente distantes entre sí (fondo) (Zaliapin and Ben-Zion, 2013). Al aplicar esta metodología al catálogo sísmico en Long Valley las figura 2b y 2a evidencian claramente este comportamiento. En particular, el mapa de calor de la figura 2a muestra el modo de sismicidad de fondo localizado sobre la línea blanca, y el modo aglomerado, que se ubica cerca del origen y corresponde al grupo sísmico con distancias η_j cercanas entre sí. La línea blanca en la figura corresponde a la recta $\log_{10} T_{ij} + \log_{10} R_{ij} = -5$, que marca una línea divisoria entre ambos modos con una distancia límite $\eta_0 = 10^{-5}$ (ver ecuación 9). Es importante destacar que en este trabajo, el valor de η_0 se determinó empíricamente mediante la evaluación del histograma de las distancias del vecino más cercano (por ejemplo, ver figura 2b)

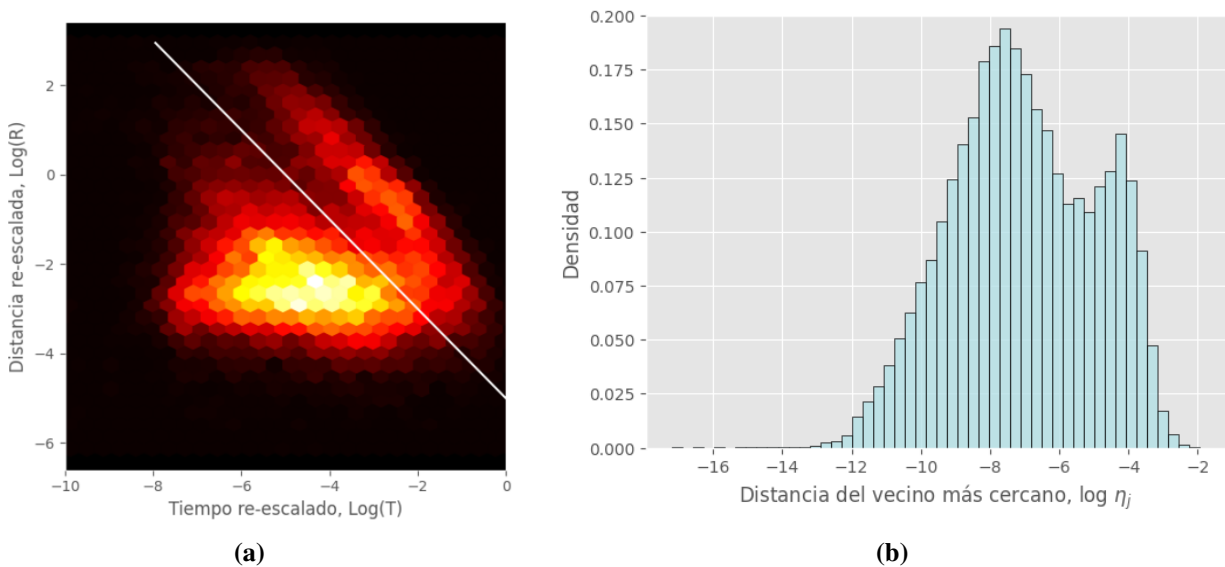


Figura 2. (a) Mapa de calor de las componentes re-escaladas del espacio y el tiempo (T,R), (b) histograma del vecino más cercano (η_j).

El modo aglomerado se refiere a la agrupación de eventos sísmicos que están altamente locali-

zados en el tiempo y el espacio, y los valores de distancias del vecino más cercano cumplen con la condición $\eta < \eta_0$ (Zaliapin and Ben-Zion, 2013). Este grupo de eventos pueden ser secuencias sismo principal-réplicas o enjambres sísmicos. Al representar la estructura de este modo como un árbol, se utiliza el término de la hoja para referirse a un evento que no tiene un pariente próximo dentro de la misma agrupación. Por otro lado, la profundidad de la hoja denotada como d , se refiere al número de generaciones que separan a la hoja del primer evento de la agrupación sísmica (Li et al., 2021). De manera ilustrativa, en el diagrama Figura 3 se muestra una aglomeración con tres ramas, cada una con su correspondiente hoja. En la primera rama, se observa una profundidad de la hoja de $d = 4$, mientras que para la segunda rama se observa una profundidad de la hoja de $d = 3$ al igual que la tercera rama.

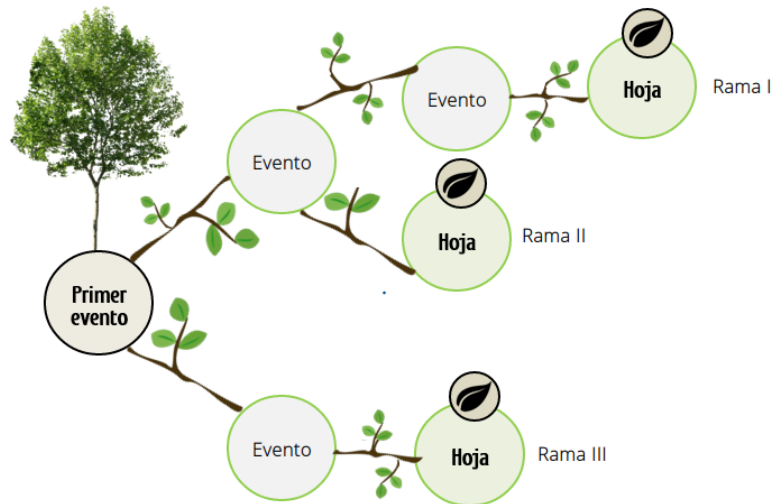


Figura 3. Estructura en forma de árbol para una agrupación de eventos sísmicos.

En la literatura revisada, se ha observado que el cálculo del promedio de la profundidad de la hoja denotado por \bar{d} permite distinguir entre las agrupaciones típicas de secuencias evento principal-réplicas y las agrupaciones en forma de enjambres sísmicos (Li et al., 2021). Esto se debe a que, en general, la estructura de agrupación de los enjambres sísmicos suelen tener ramas con mayores profundidades, lo que significa un mayor número de generaciones. En cambio, las

secuencias de evento principal-réplicas suelen estar compuestas por un pequeño número de eventos que desencadenan la mayoría de los eventos en la secuencia, lo que se traduce en árboles con pocas generaciones (Zaliapin and Ben-Zion, 2013). Por último, en consonancia con la revisión bibliográfica de este enfoque, se han mantenido algunas variables fijas como el valor de $b = 1$ y la dimensión fractal para la sismicidad de los epicentros $d_f = 1,6$ (Zaliapin and Ben-Zion, 2013). Además, se define una medida de migración vertical promedio para cada enjambre de acuerdo con (Li et al., 2021). Dicha medida se obtiene a través de la siguiente fórmula:

$$\Delta\bar{Z} = Z_0 - \bar{Z} \quad (10)$$

donde Z_0 representa la profundidad del primer evento del enjambre y \bar{Z} es el promedio de las profundidades de todos los eventos del enjambre. Un valor positivo de $\Delta\bar{Z}$ indica una migración ascendente en el enjambre, mientras que un valor negativo indica una migración descendente. Este enfoque nos permitirá profundizar en el análisis de la migración de cada enjambre.

2. Resultados

En esta sección se presentan los resultados encontrados. En una primera parte se muestra el desarrollo del enfoque del vecino más cercano para la identificación de los enjambres sísmicos del catálogo. Por último, se presentan los resultados de la aplicación del estudio de la migración en profundidad para los enjambres sísmicos obtenidos.

2.1 Implementación de la distancia del vecino más cercano

Con el fin de estudiar la sismicidad en la región de Yellowstone, se realiza un análisis de los datos, estableciendo restricciones específicas en el catálogo recuperado de la (Universidad de Utah, 2022). Durante este proceso, se descartan aquellos eventos que presentan errores en la profundidad con valores iguales o mayores a $erz \leq 5$ y aquellos con un ángulo de separación entre la estación

sísmica más cercana y la estación que registró el evento mayor o igual a 180° . A partir de esta depuración, se delimita el catálogo sísmico de Yellowstone a la región de estudio, que abarca las coordenadas 40°N - 45°N de latitud y $111^\circ15'\text{W}$ - 110°W de longitud. En esta área, se recuperan un total de 10.833 eventos sísmicos, con una magnitud de corte de $m_c = 1,0$, que fueron registrados por 42 estaciones sísmicas ubicadas en toda la región delimitada. En el mapa de la figura Figura 4 se muestran los eventos sísmicos denotados por círculos negros y las estaciones sísmicas como triángulos de color amarillo.

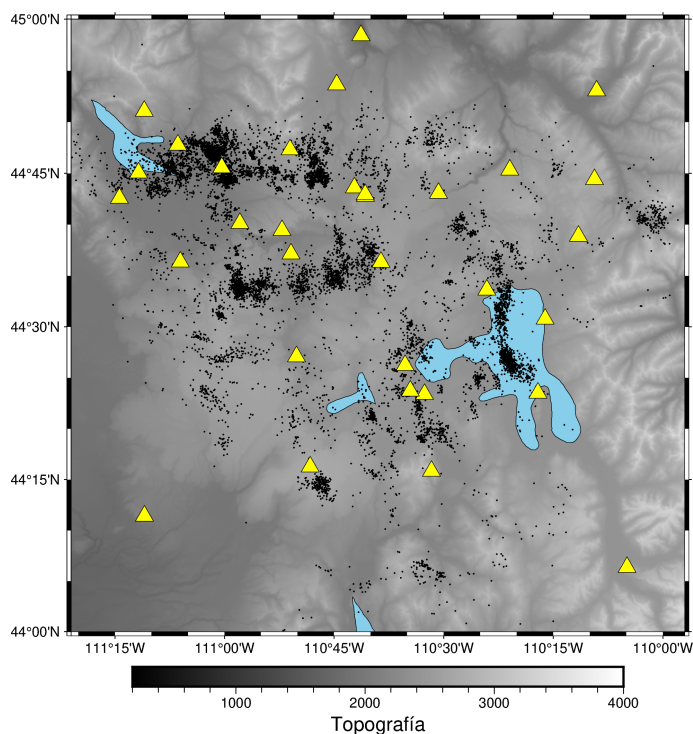


Figura 4. Sismicidad en Yellowstone (2002-2021): Puntos negros representan datos sísmicos y triángulos amarillos indican las estaciones sísmicas.

Una primera inspección del catálogo reveló altas concentraciones sísmicas en el espacio y el tiempo. Las figuras Figura 5 muestran la actividad sísmica entre 2002-2012 (a,b) y 2012-2021 (c,d) para la región del lago de Yellowstone. Por ejemplo, la figura (c) muestra una alta concentración de sismicidad a principios de 2010 y la figura (d) evidencia un comportamiento similar en el 2018. Aunque muchas de estas concentraciones son visualmente claras, es difícil determinar con precisión

su duración y la cantidad de eventos sísmicos que las componen. Esto se debe a que, incluso en estas aglomeraciones observadas, pueden encontrarse eventos sísmicos de otro tipo, como secuencias de evento principal-réplicas o de sismicidad aleatoria. En este sentido, la implementación del enfoque del vecino más cercano resulta útil para identificar de manera más precisa y confiable los tipos de aglomeraciones presentes en el catálogo de Yellowstone y, por ende, los enjambres sísmicos.

En este orden de ideas, para clasificar las aglomeraciones en el catálogo se utilizó el enfoque del vecino más cercano. A partir de los datos obtenidos, se generó un histograma para las distancias η_j (Figura 6b) y un mapa de calor que representa la distribución conjunta de las componentes re-escaladas obtenidas (T , R) (Figura 6a). En la Figura 6b se puede observar un comportamiento bimodal que muestra un modo con un pico más pronunciado correspondiente a la sismicidad aglomerada con distancias η_j pequeñas, y otro modo correspondiente a la sismicidad de fondo. La Figura 6a exhibe de igual forma esta bimodalidad, donde el modo más cercano al origen corresponde a la sismicidad altamente aglomerada y el otro modo corresponde a la sismicidad de fondo. La recta que separa estos dos modos tiene la ecuación $\log_{10} T_{ij} + \log_{10} R_{ij} = -4,2$, con una distancia límite de cercanía $\eta_0 = 10^{-4,2}$, que se eligió porque es el que mejor separa los dos modos en términos observacionales.

Con esta distancia límite se estableció un umbral para los dos tipos de poblaciones sísmicas encontradas, de tal forma que la población aglomerada cumple con la condición de que sus distancias no superan este límite $\eta_j < 10^{-4,2}$ (distancias η_j más cercanas) y la población de sismicidad de fondo $\eta_j > 10^{-4,2}$ (distancias η_j más lejanas). A partir de esto, se encontró que del total de 10793 eventos registrados en el catálogo, el 30.05 % (3248 eventos) se clasifican como sismicidad de fondo y el 69.95 % (7545 eventos) como sismicidad aglomerada durante el periodo 2002-2021. Es importante destacar que la sismicidad aglomerada incluye tanto secuencias de eventos principal-réplicas como enjambres sísmicos.

Para extraer aquellas aglomeraciones que no corresponden a secuencias evento principal-replicas y que consideramos enjambres, se definieron dos criterios. En primer lugar, se estableció que las

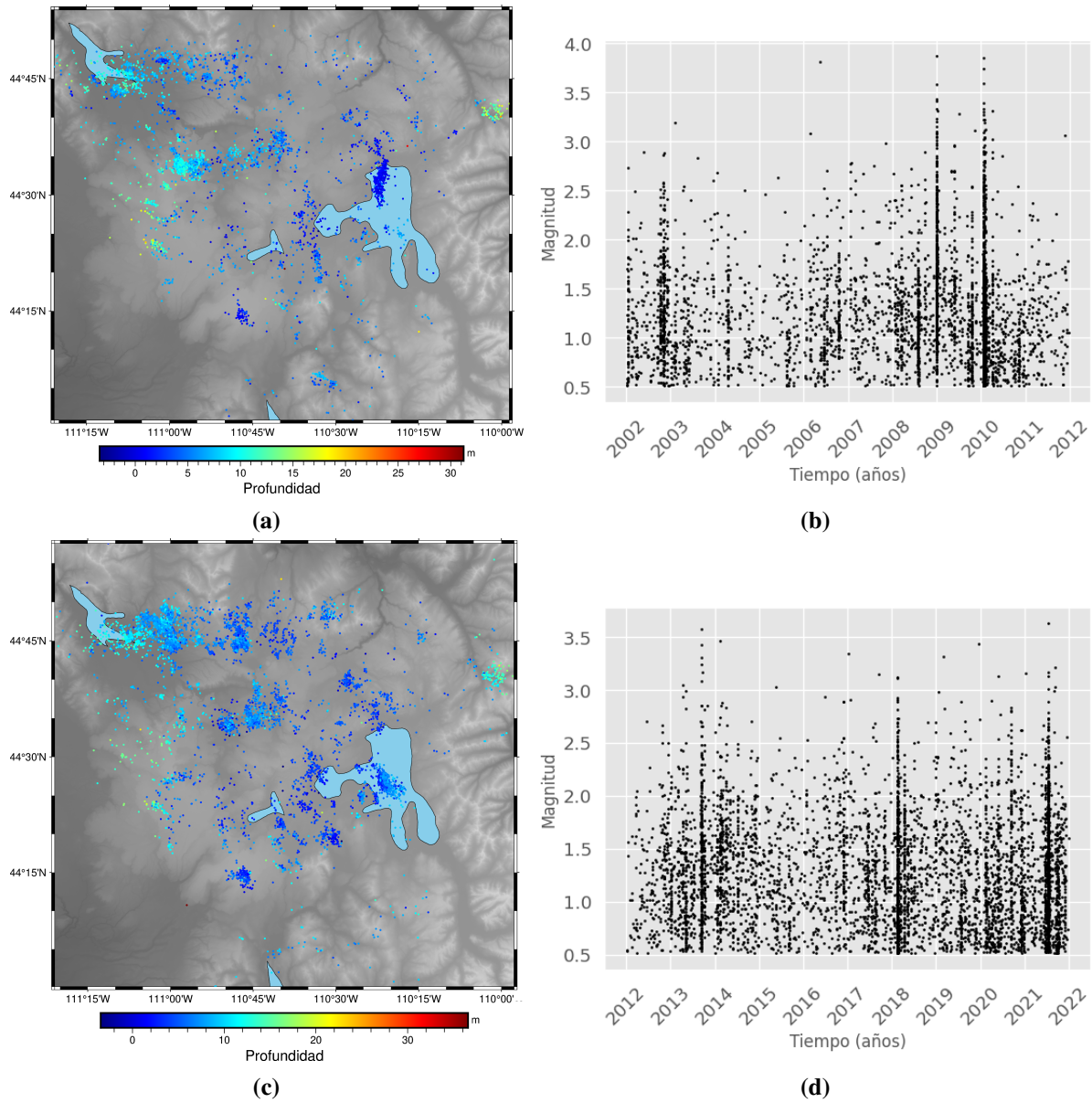
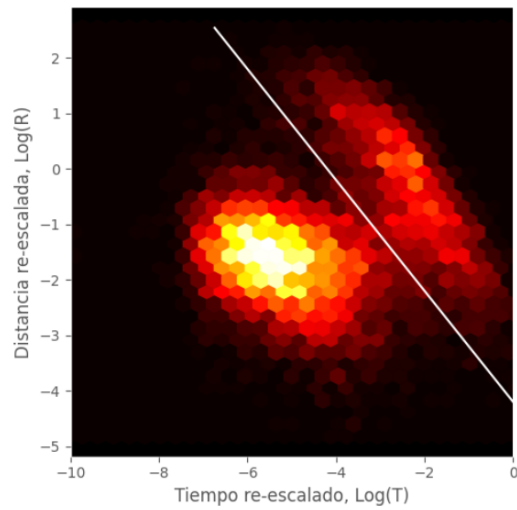
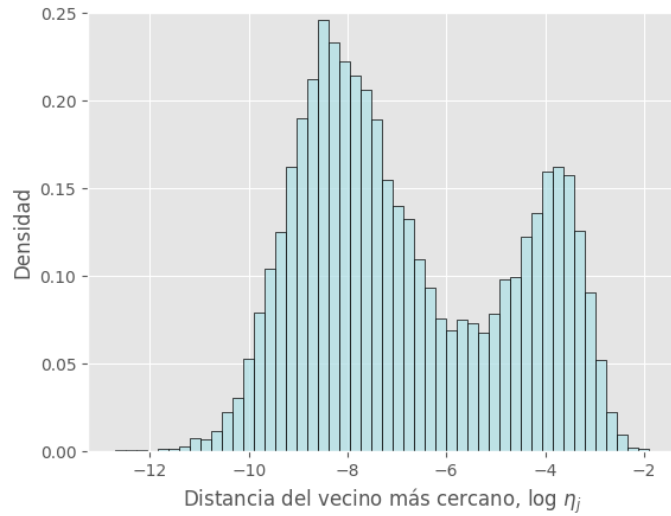


Figura 5. Evaluación de la sismicidad en el lago de Yellowstone con magnitud de corte $m_c = 1,0$: (a,b) periodo 2002-2012, (b,c) periodo 2012-2021.



(a) Mapa de calor de las componentes re-escaladas del espacio y el tiempo (T,R).

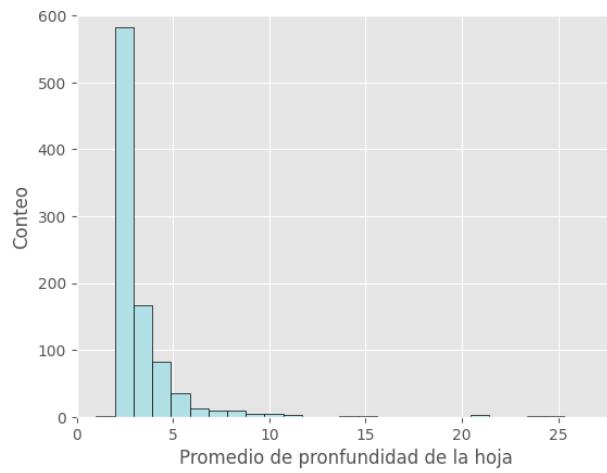


(b) Histograma del vecino más cercano (η_j).

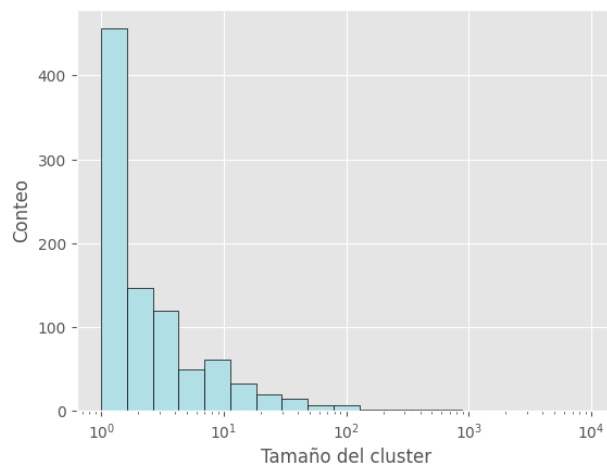
aglomeraciones con una profundidad de hoja promedio mayor a seis ($\bar{d} > 6$) se considerarían enjambres sísmicos, lo cual está en línea con la literatura revisada (Li et al., 2021). Para esto, se realizó un análisis visual del histograma mostrado en la figura 7a, el cual contiene el promedio de la profundidad de cada una de las agrupaciones sísmicas obtenidas. En segundo lugar, se propuso una restricción de una cantidad de eventos mayor a 25 para reconocer la aglomeración como un enjambre sísmico. Esto se debió a que la magnitud de corte establecida de $m_c = 1,0$ limitaba el número de datos disponibles. En consecuencia, se obtenían aglomeraciones con pocas cantidades de datos, lo cual dificultaba la identificación de estas aglomeraciones como enjambres sísmicos.

Utilizando ambos elementos, se registraron un total de 28 enjambres sísmicos entre los años 2002 y 2021. De acuerdo con los resultados, se determinó que el 41,02% de la sismicidad total del catálogo corresponde a eventos que forman parte de enjambres sísmicos. En la tabla Tabla 1 se exponen los datos más relevantes de los cinco enjambres más grandes, mientras que en la figura Figura 8 (a) se visualizan los 28 enjambres ubicados en la región, cada uno representado por un color distinto y (b) la sismicidad de fondo en color negro.

Como último resultado de esta sección, se presenta en las figura Figura 9 una notoria distinción



(a)



(b)

Figura 7. Histogramas que representan el análisis de las agrupaciones sísmicas obtenidas. (a) Muestra el promedio de la profundidad de la hoja para todas las agrupaciones sísmicas obtenidas, mientras que (b) representa el tamaño (cantidad de eventos) de todas las agrupaciones sísmicas obtenidas.

Tabla 1. Datos de los enjambres más grandes.

Color enjambre	Fecha inicio	Duración (días)	Cantidad de sismos	Magnitud máxima
	2017-06-12	118.45	735	4.36
	2010-01-17	104.7	703	3.85
	2021-07-15	15.42	400	3.63
	2008-12-27	8.06	316	3.87
	2018-01-29	38.2	276	3.04

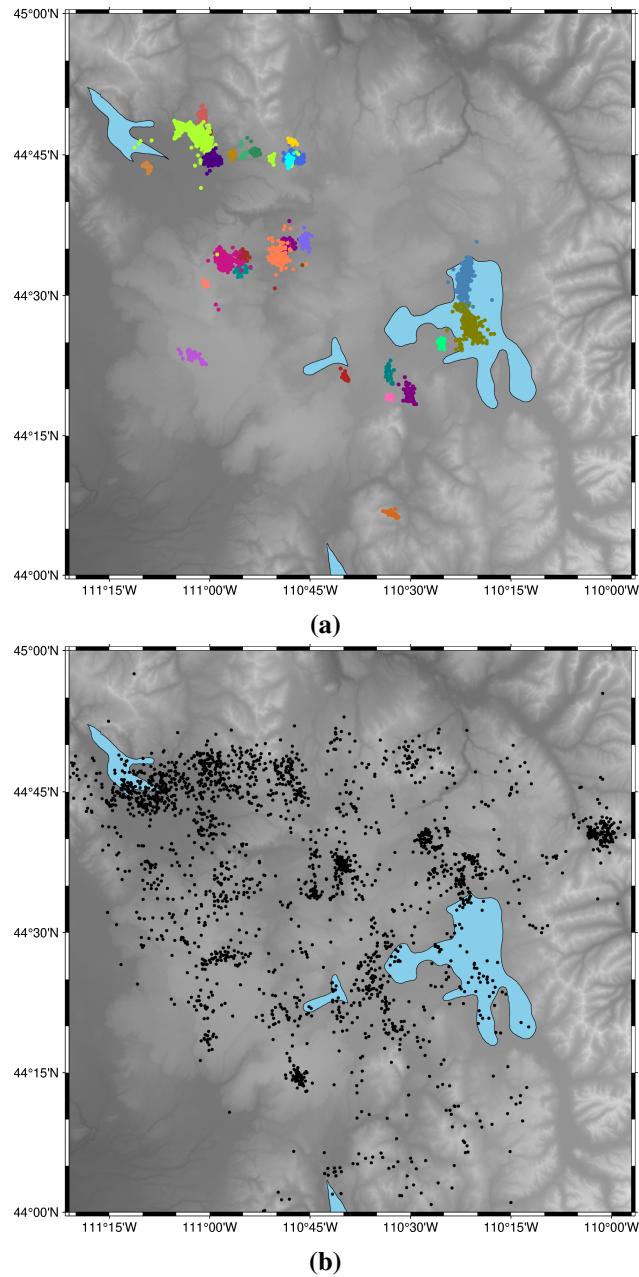
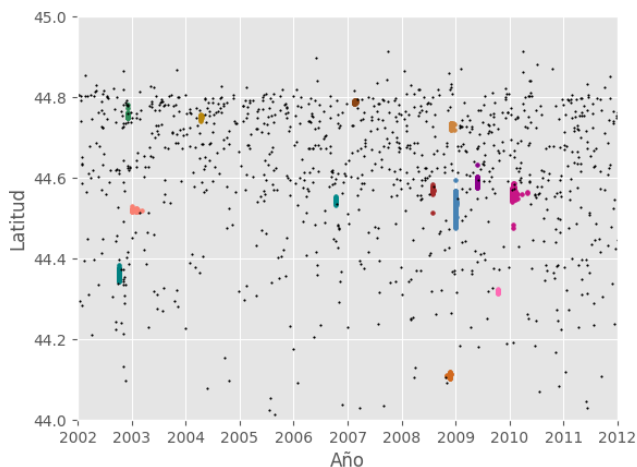
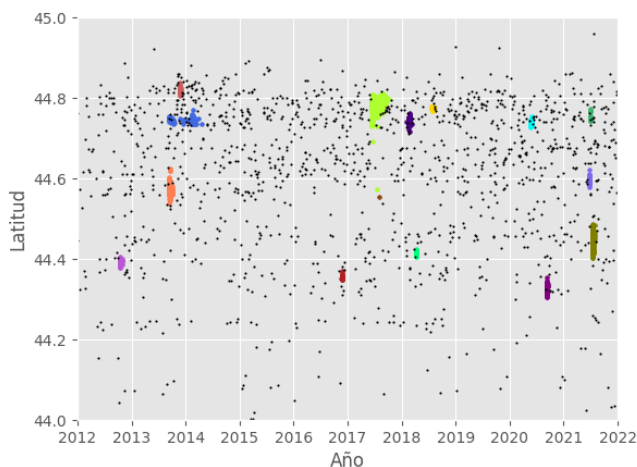


Figura 8. Actividad sísmica en la región de Yellowstone durante un período de 19 años, desde 2002 hasta 2021. La imagen (a) muestra los enjambres sísmicos que ocurrieron en la zona y la imagen (b) la sismicidad de fondo.

entre los enjambres sísmicos identificados por los mismos colores de la figura Figura 8 y la actividad sísmica de fondo. La sismicidad de fondo parece estar distribuida de manera aleatoria en el espacio y el tiempo, en contraste con los enjambres encontrados a través de la implementación presentada en este trabajo.



(a)



(b)

Figura 9. Representación gráfica de enjambres sísmicos identificados mediante el enfoque del vecino más cercano en dos periodos de tiempo: (a) 2002-2012 y (b) 2012-2021. Cada enjambre se muestra en colores distintos (de acuerdo con la figura Figura 8) y los eventos de sismicidad de fondo se representan con puntos negros.

2.2 Estudio de la dinámica espacial de los enjambres sísmicos

El estudio migratorio de los enjambres se centró en examinar la migración espacial en profundidad, para lo cual se aplicó la ecuación 10 a los 28 enjambres obtenidos. Los resultados se representaron en forma de un histograma (ver imagen Figura 10). Al analizar el histograma, se muestra un enjambre atípico con migración descendente de $-5,12$ [km] en promedio. Asimismo, se observó una distribución de probabilidad con un valor de migración vertical de $0,075$ [km] promedio. Es importante destacar que este valor promedio se encuentra dentro del rango de error en profundidad (cuyo valor es $e\bar{r}_z = 1,27$ [km]). Por lo tanto, los resultados no proporcionan suficiente evidencia para la migración.

Para profundizar en el análisis y reducir la influencia del dato atípico, se realizó la prueba de rangos con signo de Wilcoxon. Esta prueba no es paramétrica, lo que significa que no se requiere que los datos tengan una distribución gaussiana (normal) para obtener resultados válidos. Asimismo, esta prueba se utilizó para determinar si el promedio de la migración en profundidad $\Delta\bar{Z}$ difiere significativamente de cero, lo cual indicaría una migración en profundidad preferencial. En este sentido, la hipótesis nula establece que los enjambres no presentan una migración preferencial, es decir, $\Delta\bar{Z} = 0$. En contraposición, la hipótesis alternativa indica que los datos de migración promedio para todos los enjambres muestran una migración preferencial en profundidad, ya sea ascendente o descendente ($\Delta\bar{Z} \neq 0$). Los resultados de la prueba indicaron que la hipótesis nula no puede ser rechazada, lo que significa que no se puede concluir de manera significativa que los valores de migración promedio de todos los enjambres difieran significativamente de cero o bien, presenten una migración preferencial. Esto se debe a que el valor-p obtenido en la prueba fue de 0.54 , el cual es mayor que el nivel de significancia estándar de 0.05 .

Adicionalmente, se realizó un análisis para evaluar si los enjambres sísmicos que ocurren cerca unos de otros presentan un patrón migratorio similar en profundidad. La figura 3.8 muestra los centroides de los 28 enjambres sísmicos ubicados en el espacio, junto con su respectivo promedio

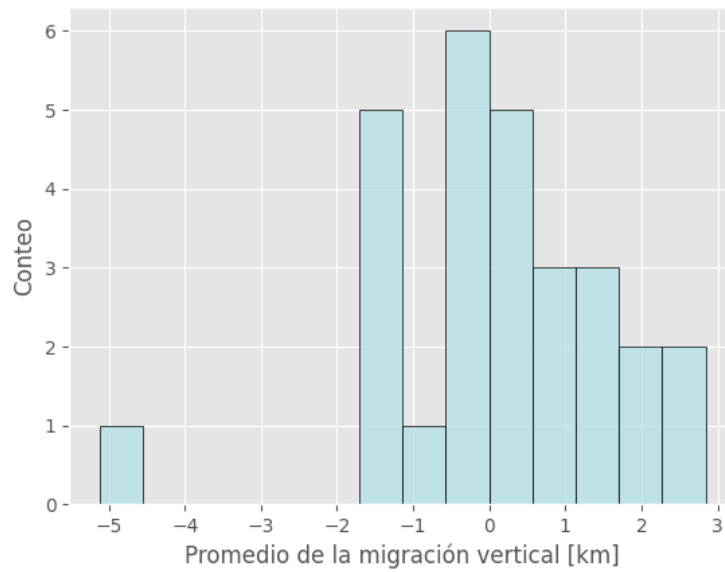


Figura 10. Histograma del promedio de la migración vertical $\Delta\bar{Z}$ para todos los enjambres sísmicos.

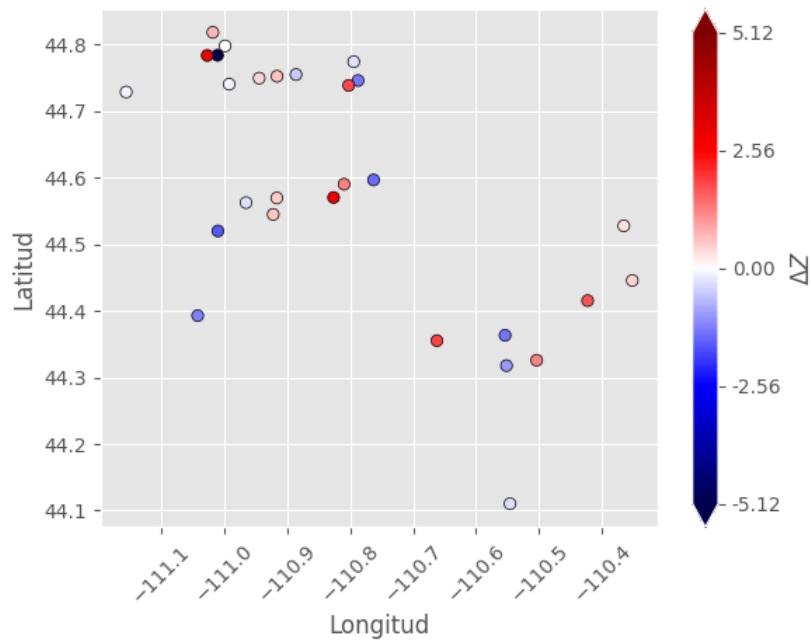
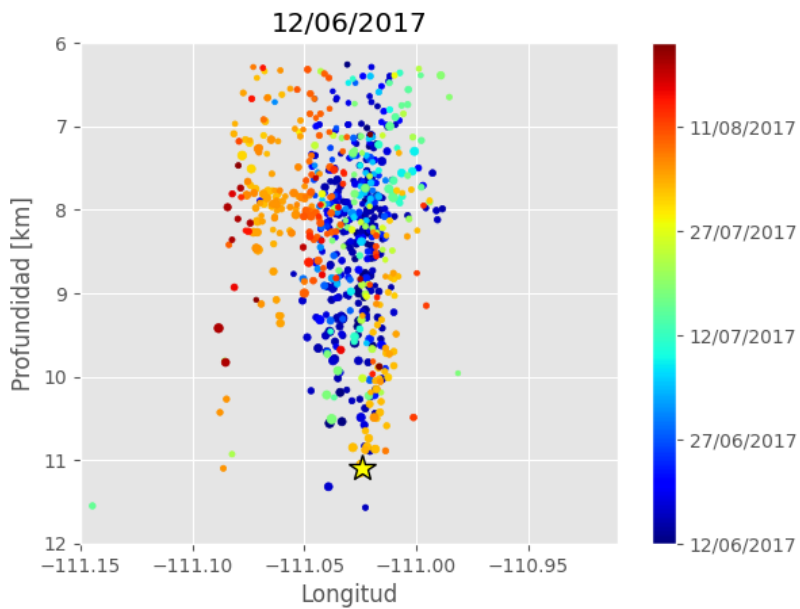


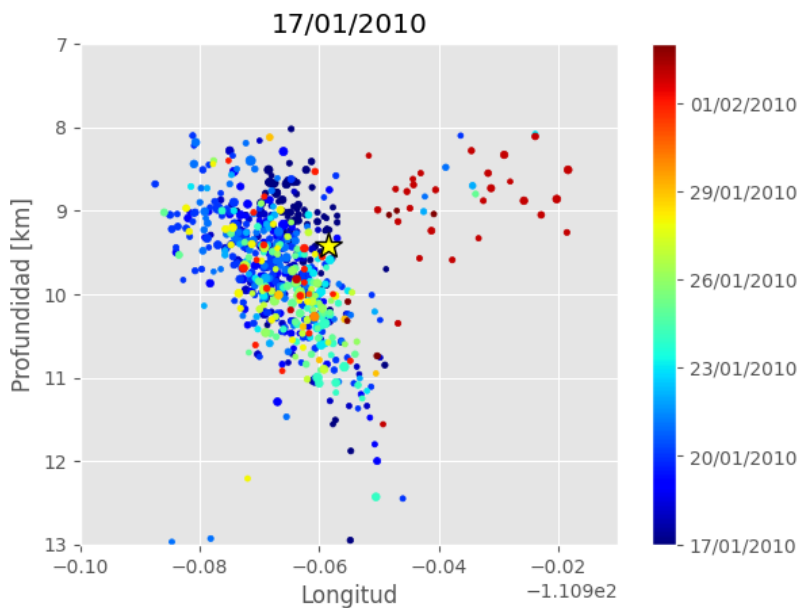
Figura 11. Representación espacial de los enjambres sísmicos como centroides con su respectivo $\Delta\bar{Z}$ calculado.

de migración en profundidad $\Delta\bar{Z}$. Los enjambres con migración ascendente están representados por puntos rojos, los enjambres con migración descendente están representados por puntos azules. Al analizar la figura Figura 11, se puede observar que en general, los enjambres cercanos no presentan una migración preferencial en profundidad, lo que sugiere que no existe una relación espacial clara entre la proximidad espacial de enjambres y sus patrones migratorios en profundidad.

Finalmente, en las figuras Figura 12 se evidencia la migración espacial en el tiempo de dos enjambres sísmicos: el ocurrido en junio de 2017 (a) y el de enero de 2010 (b). En las figuras, la estrella indica el primer evento de cada enjambre. A partir del análisis de estas Imágenes, se puede observar que el enjambre sísmico del 2017 presenta una expansión de los eventos sísmicos desde profundidades mayores a menores, hasta que finalmente la actividad sísmica del enjambre cesa. En cambio, para el enjambre del 2010, no se observa una migración clara en profundidad. Estos resultados son consistentes con el promedio de migración en profundidad, el cual fue de $\Delta\bar{Z} = 2,84$ para el enjambre de 2017 y $\Delta\bar{Z} = -0,29$ para el de 2010.



(a)



(b)

Figura 12. Evolución espacial en profundidad de los enjambres sísmicos en el tiempo: (a) en 2017 y (b) en 2010.

3. Conclusiones

Durante el periodo comprendido entre 2002 y 2021, se identificaron 28 enjambres sísmicos mediante una metodología basada en la distancia del vecino más cercano, aplicada a todo el catálogo sísmico. Los resultados muestran que alrededor del 41 % de los eventos sísmicos del catálogo de Yellowstone corresponden a enjambres sísmicos, lo que sugiere una alta sismicidad en forma de enjambres en contraste con la mayoría de las zonas del mundo donde prevalece el tipo de aglomeración evento principal-réplicas. Este hallazgo indica que los enjambres en Yellowstone no deben ser considerados como episodios aislados, sino que son recurrentes y pueden ser manifestaciones del constante movimiento de los fluidos hidrotermales dentro del sistema. Sin embargo, se necesita un análisis más detallado para determinar los mecanismos que desencadenan estos enjambres.

Además, durante la implementación del algoritmo, se pudo notar que el parámetro de la distancia de cercanía límite η_0 tuvo una mayor sensibilidad en comparación con la elección de los valores de b y la dimensión fractal d_f . Asimismo, se encontró que el método produjo resultados más precisos al considerar únicamente las distancias epicentrales r_{ij} sin incluir la profundidad.

En general, se observó una disminución en la cantidad de eventos de los enjambres sísmicos en comparación con las investigaciones revisadas en la región durante el desarrollo de este trabajo. Esta observación se debe principalmente a que en la implementación del método de la distancia al vecino se estableció un umbral de magnitud de $m_c = 1$, lo que resultó en una considerable reducción de datos. A pesar de esto, el algoritmo logró recuperar y extraer los enjambres de manera precisa, lo que demostró la confiabilidad de este método ante la variación de la magnitud de corte.

Al aplicar una medida de migración vertical (ver ecuación 10) a todos los enjambres sísmicos obtenidos anteriormente, no se encontró evidencia de un patrón sistemático de migración en profundidad para los terremotos que pertenecen a los enjambres analizados. En contraste, en la caldera de Long Valley se observó una migración ascendente en los enjambres. Este hallazgo sugiere

una migración bilateral de fluidos en la región de Yellowstone, lo cual puede ser de gran importancia para comprender la dinámica migratoria y la estructura geológica de la región.

Referencias bibliográficas

Referencias

- Aden-Antoniów, F., Frank, W., and Seydoux, L. (2022). An adaptable random forest model for the declustering of earthquake catalogs. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(2):e2021JB023254.
- Baiesi, M. and Paczuski, M. (2004). Scale-free networks of earthquakes and aftershocks. *Physical review E*, 69(6):066106.
- Baiesi, M. and Paczuski, M. (2005). Complex networks of earthquakes and aftershocks. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 12(1):1–11.
- Beer, M., Kougioumtzoglou, I. A., Patelli, E., and Au, S.-K. (2015). *Encyclopedia of earthquake engineering*. Springer Berlin/Heidelberg, Germany.
- Burns, M. M., Fournier, J.-M., and Golovchenko, J. A. (1989). Optical binding. *Physical Review Letters*, 63(12):1233.
- Caliro, S., Chiodini, G., and Paonita, A. (2014). Geochemical evidences of magma dynamics at campi flegrei (italy). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 132:1–15.
- Cappa, F., Rutqvist, J., and Yamamoto, K. (2009). Modeling crustal deformation and rupture processes related to upwelling of deep co₂-rich fluids during the 1965–1967 matsushiro earthquake swarm in japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B10).
- Chang, W.-L., Smith, R. B., Farrell, J., and Puskas, C. M. (2010). An extraordinary episode of yellowstone caldera uplift, 2004–2010, from gps and insar observations. *Geophysical Research Letters*, 37(23).

- Chen, X., Shearer, P., and Abercrombie, R. (2012). Spatial migration of earthquakes within seismic clusters in southern california: Evidence for fluid diffusion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B4).
- Chiodini, G., Caliro, S., De Martino, P., Avino, R., and Gherardi, F. (2012). Early signals of new volcanic unrest at campi flegrei caldera? insights from geochemical data and physical simulations. *Geology*, 40(10):943–946.
- Chiodini, G., Todesco, M., Caliro, S., Del Gaudio, C., Macedonio, G., and Russo, M. (2003). Magma degassing as a trigger of bradyseismic events: The case of phlegrean fields (italy). *Geophysical Research Letters*, 30(8).
- Christiansen, R. L., Lowenstern, J. B., Smith, R. B., Heasler, H., Morgan, L. A., Nathenson, M., Mastin, L. G., Muffler, L., and Robinson, J. E. (2007). Preliminary assessment of volcanic and hydrothermal hazards in yellowstone national park and vicinity. Technical report, U. S. Geological Survey.
- Davis, S. D. and Frohlich, C. (1991). Single-link cluster analysis of earthquake aftershocks: Decay laws and regional variations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B4):6335–6350.
- Dzurisin, D. and Yamashita, K. M. (1987). Vertical surface displacements at yellowstone caldera, wyoming, 1976–1986. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B13):13753–13766.
- Farrell, J., Husen, S., and Smith, R. B. (2009). Earthquake swarm and b-value characterization of the yellowstone volcano-tectonic system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 188(1-3):260–276.
- Farrell, J., Smith, R. B., Taira, T., Chang, W.-L., and Puskas, C. M. (2010). Dynamics and rapid migration of the energetic 2008–2009 yellowstone lake earthquake swarm. *Geophysical Research Letters*, 37(19).

- Gardner, J. and Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in southern california, with aftershocks removed, poissonian? *Bulletin of the seismological society of America*, 64(5):1363–1367.
- Guarracino, L. and Jougnot, D. (2018). A physically based analytical model to describe effective excess charge for streaming potential generation in water saturated porous media. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(1):52–65.
- Gutenberg, B. and Richter, C. (1941). *Seismicity of the Earth*, volume 34. Geological Society of America.
- Hainzl, S. (2004). Seismicity patterns of earthquake swarms due to fluid intrusion and stress triggering. *Geophysical Journal International*, 159(3):1090–1096.
- Hill, D. P. (1977). A model for earthquake swarms. *Journal of Geophysical Research*, 82(8):1347–1352.
- Hollenstein, C., Müller, M., Geiger, A., and Kahle, H.-G. (2008). Crustal motion and deformation in greece from a decade of gps measurements, 1993–2003. *Tectonophysics*, 449(1-4):17–40.
- Holtkamp, S. G., Pritchard, M., and Lohman, R. (2011). Earthquake swarms in south america. *Geophysical Journal International*, 187(1):128–146.
- Hurwitz, S., Christiansen, L. B., and Hsieh, P. A. (2007). Hydrothermal fluid flow and deformation in large calderas: Inferences from numerical simulations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B2).
- Hurwitz, S. and Lowenstern, J. B. (2014). Dynamics of the yellowstone hydrothermal system. *Reviews of Geophysics*, 52(3):375–411.

- Hutnak, M., Hurwitz, S., Ingebritsen, S., and Hsieh, P. (2009). Numerical models of caldera deformation: Effects of multiphase and multicomponent hydrothermal fluid flow. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B4).
- Inguaggiato, S., Londoño, J. M., Chacón, Z., Liotta, M., Gil, E., and Alzate, D. (2017). The hydrothermal system of cerro machín volcano (colombia): New magmatic signals observed during 2011–2013. *Chemical Geology*, 469:60–68.
- Kanamori, H. and Brodsky, E. E. (2004). The physics of earthquakes. *Reports on progress in physics*, 67(8):1429.
- Li, B. Q., Smith, J. D., and Ross, Z. E. (2021). Basal nucleation and the prevalence of ascending swarms in Long Valley Caldera. *Science Advances*, 7(35):eabi8368.
- Maeda, T., Obara, K., and Yukutake, Y. (2010). Seismic velocity decrease and recovery related to earthquake swarms in a geothermal area. *Earth, planets and space*, 62:685–691.
- Makario Londoño, J. (2022). Variación espacio-temporal del valor b en el Volcán Cerro Machín, Colombia. *Boletín de Geología*, 44(3):143–158.
- Massin, F., Farrell, J., and Smith, R. B. (2013). Repeating earthquakes in the yellowstone volcanic field: Implications for rupture dynamics, ground deformation, and migration in earthquake swarms. *Journal of volcanology and geothermal research*, 257:159–173.
- Matsu'ura, R. S. and Karakama, I. (2005). A point-process analysis of the matsushiro earthquake swarm sequence: The effect of water on earthquake occurrence. *Pure and Applied Geophysics*, 162:1319–1345.
- Miller, D. S. and Smith, R. B. (1999). P and s velocity structure of the yellowstone volcanic field from local earthquake and controlled-source tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B7):15105–15121.

- Mogi, K. (1963). Some discussions on aftershocks, foreshocks and earthquake swarms: the fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena (third paper). *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 41(3):615–658.
- Parotidis, M., Rothert, E., and Shapiro, S. (2003). Pore-pressure diffusion: A possible triggering mechanism for the earthquake swarms 2000 in vogtland/nw-bohemia, central europe. *Geophysical Research Letters*, 30(20).
- Reasenberg, P. (1985). Second-order moment of central california seismicity, 1969–1982. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B7):5479–5495.
- Ried, H. (1911). The elastic-rebound theory of earthquakes. *Univ. California Publ. Bull. Dept. Geol.*, 6:413–444.
- Ross, Z. E., Cochran, E. S., Trugman, D. T., and Smith, J. D. (2020). 3D fault architecture controls the dynamism of earthquake swarms. *Science*, 368(6497):1357–1361.
- Scholz, C. H. (2019). *The mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge university press.
- Shelly, D. R., Ellsworth, W. L., and Hill, D. P. (2016). Fluid-faulting evolution in high definition: Connecting fault structure and frequency-magnitude variations during the 2014 long valley caldera, california, earthquake swarm. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(3):1776–1795.
- Shelly, D. R. and Hardebeck, J. L. (2019). Illuminating faulting complexity of the 2017 yellowstone maple creek earthquake swarm. *Geophysical Research Letters*, 46(5):2544–2552.
- Shelly, D. R., Hill, D. P., Massin, F., Farrell, J., Smith, R. B., and Taira, T. (2013). A fluid-driven earthquake swarm on the margin of the yellowstone caldera. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(9):4872–4886.

Stein, S. and Wysession, M. (2009). *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*. John Wiley & Sons.

Udías, A., Vallina, A. U., Madariaga, R., and Buforn, E. (2014). *Source mechanisms of earthquakes: Theory and practice*. Cambridge University Press.

Udías, A., Madariaga, R., and Buforn, E. (2014). *Source Mechanisms of Earthquakes: Theory and Practice*. Cambridge University Press.

Universidad de Utah (Accedido el 1 de noviembre del 2022). Catálogos sísmicos.

Utsu, T. (1970). Aftershocks and earthquake statistics (1): Some parameters which characterize an aftershock sequence and their interrelations. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Series 7, Geophysics*, 3(3):129–195.

Waite, G. P. and Smith, R. B. (2002). Seismic evidence for fluid migration accompanying subsidence of the yellowstone caldera. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B9):ESE–1.

Wiemer, S. and Wyss, M. (2002). Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes. In *Advances in geophysics*, volume 45, pages 259–V. Elsevier.

Wu, J.-P., Ming, Y.-H., Zhang, H.-R., Liu, G.-M., Fang, L.-H., Su, W., and Wang, W.-L. (2007). Earthquake swarm activity in changbaishan tianchi volcano. *Chinese Journal of Geophysics*, 50(4):938–946.

Wu, Z. (2010). A hidden markov model for earthquake declustering. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B3).

Yukutake, Y., Honda, R., Harada, M., Aketagawa, T., Ito, H., and Yoshida, A. (2011). Remotely-triggered seismicity in the hakone volcano following the 2011 off the pacific coast of tohoku earthquake. *Earth, planets and space*, 63(7):737–740.

Zaliapin, I. and Ben-Zion, Y. (2013). Earthquake clusters in southern california i: Identification and stability. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(6):2847–2864.

Zaliapin, I. and Ben-Zion, Y. (2020). Earthquake declustering using the nearest-neighbor approach in space-time-magnitude domain. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(4):e2018JB017120.