



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

**FRECUENCIA Y ORIGEN DE LOS ENJAMBRES SÍSMICOS EN EL NORTE Y CENTRO DE  
MÉXICO**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

**DENI MONTSERRAT GONZÁLEZ LÓPEZ**

TUTORA:

DRA. XYOLI PÉREZ CAMPOS  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM

COMITÉ TUTOR:

DR. FRANCISCO RAMÓN ZÚÑIGA DÁVILA-MADRID  
CENTRO DE GEOCIENCIAS CAMPUS JURQUILLA, UNAM

DR. LUIS ANTONIO DOMÍNGUEZ RAMÍREZ  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., MARZO DE 2024



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Contenido

---

Resumen.....	1
Abstract.....	2
1 Introducción.....	3
2 Enjambres sísmicos.....	6
2.1 Enjambres sísmicos en el mundo.....	7
2.2 Enjambres sísmicos en México.....	10
2.3 Relación Gutenberg-Richter.....	14
2.4 Distancia entre sismos.....	14
2.5 Dimensión fractal de los epicentros.....	15
3 Identificación de enjambres sísmicos.....	18
3.1 Separación entre sismos agrupados y sismicidad de fondo.....	18
3.2 Clasificación de las secuencias.....	23
4 Catálogo de sismos.....	25
4.1 Valor b, dimensión fractal $d_f$ y umbral de distancia $\eta_0$ .....	29
5 Resultados.....	31
5.1 Cuencas y Cordilleras (BAR).....	31
5.2 Cuenca de Burgos (BB).....	38
5.3 Sierra Madre Occidental (SMO).....	45
5.4 Faja Volcánica Trans Mexicana (FVTM).....	54
5.5 Enjambres sísmicos en común entre las regiones de estudio.....	66
6 Enjambres sísmicos del norte y centro de México.....	68
6.1 Conclusiones.....	77
7 Referencias.....	80

# AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra de la UNAM por la oportunidad de seguir aprendiendo en esta gran institución.

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada durante mi estancia en la Maestría.

A la Dra. Xyoli Pérez Campos por permitirme trabajar con ella. Siempre ha mostrado un interés genuino por mí y todos sus estudiantes, tanto en la parte académica como en el aspecto personal. Es una de las mujeres a las que admiro y que me inspiran.

Al Dr. Francisco Ramón Zúñiga y al Dr. Luis Antonio Domínguez, por ser parte de mi comité tutor. Durante cuatro semestres estuvieron al pendiente de este proyecto y me apoyaron con sus comentarios y sugerencias.

A los miembros de mi jurado: Dr. Juan Martín Gómez González, Dra. Ericka Alinne Solano Hernández, Dra. Gina Paola Villalobos Escobar y Dr. Juan Carlos Montalvo Arrieta. Gracias por la paciencia, las correcciones y comentarios de este trabajo. Las ideas que me han dado han permitido mejorarlo.

A mi mamá Graciela López por su apoyo incondicional, las conversaciones, por aplaudirme mis aciertos, y levantarme cuando cometo errores; siempre de esa manera tan amorosa que te hacer ser especial. Mami, eres la mujer de mi vida, estoy muy orgullosa de ti.

A José y Andrea, mis hermanos. Me alegra que estén trabajando en sus objetivos. Agradezco que cuando titubeo, son los primeros en recordarme que lo puedo lograr. Son una gran inspiración para mí.

A mi papá, Alejandro González y mis abuelos, Elvia Méndez y José López. Aunque a veces estamos en desacuerdo, nunca me han frenado y me han permitido elegir mis propias batallas. Gracias por sus cuidados.

A Gustavo Sánchez, por recordarme que cuando más difícil parece algo es cuando más debes impulsarte y que renunciar no es opción. Me hace muy feliz crecer contigo y presenciar en primera fila la persona en la que te conviertes cada día.

Al M.C. Isaac Valverde, por su amistad y ser un compañero de trabajo excepcional durante mi estancia en la Maestría. Es un gran ser humano y estoy segura que tendrá éxito en lo que se proponga.

Los datos sismológicos fueron obtenidos por el Servicio Sismológico Nacional (México). Agradecemos a todo el personal del mismo por el mantenimiento de las estaciones, la adquisición y distribución de los datos.

Esta investigación fue realizada gracias al apoyo de obtención de grado del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) IN110822.

## RESUMEN

---

Los enjambres sísmicos son un tipo de sismicidad agrupada en tiempo y espacio que carecen de un sismo principal a diferencia de las secuencias de réplicas. Existen varios tipos de enjambres sísmicos, los cuales han sido clasificados de acuerdo con su origen como tectónicos, volcánicos o antrópicos. En México este tipo de sismicidad se ha estudiado en varias ocasiones concluyendo que es un territorio en el que se pueden presentar los tres tipos de enjambres. En este trabajo se utilizaron los eventos sísmicos reportados por el Servicio Sismológico Nacional de 2012 a 2022 para formar un catálogo de sismos en cada una de las cuatro regiones sísmicas en las que se dividió la región de estudio: Sierra Madre Occidental (SMO), Cuencas y Cordilleras (BAR), Cuenca de Burgos (BB) y Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). La primeras tres se encuentran en el norte de México y la última en el centro. Con la finalidad de entender un poco más la sismicidad en estas regiones, este trabajo se enfoca en determinar si en estas zonas es habitual el comportamiento de enjambre sísmico, además conocer en qué áreas se están presentando y cuáles son las principales características de estas secuencias. Para identificar aquellos grupos de sismos con un comportamiento de enjambre sísmico, la metodología tiene tres partes principales: 1) identificación de grupos de sismos cercanos tanto en tiempo como en espacio utilizando el algoritmo conocido como la distancia al vecino más cercano, 2) revisión manual de los resultados, 3) identificación de enjambres considerando una cantidad mínima de cinco eventos, que no cumplen la ley de Båth y no se ajustan a la ley de Omori-Utsu. En este trabajo se identificaron cincuenta y un enjambres sísmicos en un periodo de casi diez años, de los cuales, doce ya habían sido estudiados con anterioridad o fueron reportados por el SSN. Estos enjambres son los más numerosos de cada región y tienden a ser interesantes por su origen volcánico, antrópico o tectónico. Además, los resultados muestran que el comportamiento en forma de enjambre de la sismicidad en la zona norte y centro de nuestro país puede ser más común de lo que se piensa para algunas de las regiones, pues casi todos los grupos analizados mostraron un comportamiento de enjambre sísmico. Por lo tanto, resulta importante resaltar la posibilidad de explorar otras áreas con mayor detalle teniendo en cuenta que para el estudio de enjambres sísmicos, la cobertura de estaciones y la magnitud mínima que pueda detectarse juega un papel fundamental.

## ABSTRACT

---

Earthquake swarms are sequences of seismic events closely clustered activity in space and time, without a mainshock unlike aftershock sequences. The swarms can be classified into three categories based on their origin: tectonic, volcanic or anthropic. In Mexico, researchers have studied this type of seismicity and have found that all three types of swarms can occur. This work utilized seismic event data reported by the Mexican National Seismological Service from 2012 to 2022 to create one catalog for each region into which the study area was divided: Sierra Madre Occidental (SMO), Basin and Range (BAR), Burgos Basin (BB) and Trans-Mexican Volcanic Belt (FVTM). The first three locations are in Northern Mexico, while the fourth is in Central Mexico. This work aims to understand the seismicity of the region by determining the frequency of earthquake swarms, identifying the areas in which they occur, and their main characteristics. The methodology for identifying seismic clusters that exhibit earthquake swarm characteristics is composed of three main parts: 1) the identification of earthquake groups that occur close to each other in space and time through the nearest-neighbor distance algorithm, 2) review the results manually, 3) when looking for earthquake swarms, groups of at least five events must be considered, the seismicity does not follow Båth's law nor conform to Omori-Utsu law. In a span of ten years, we identified fifty-one earthquake swarms, twelve of which were previously studied or reported by the SSN. These earthquake swarms are the most numerous in each region and are interesting due to their volcanic, anthropic, or tectonic origin. The analysis shows that earthquake swarms are more frequent in specific areas of Mexico, as almost all analyzed sequences exhibit swarm features. It is important to note that certain areas should be further explored in detail, considering the critical role of station coverage and the minimum detectable magnitude.

# 1 INTRODUCCIÓN

---

Los enjambres sísmicos son un tipo de sismicidad agrupada en tiempo y espacio que carecen de un sismo principal a diferencia de las secuencias de réplicas. Existen varios tipos de enjambres sísmicos, los cuales han sido clasificados de acuerdo con su origen como tectónicos, volcánicos o antrópicos.

Como se explica en el Capítulo 2 de este trabajo, en México, este tipo de actividad sísmica ha sido estudiada previamente en diversos trabajos (p. ej., Zobin, 1996). Se ha documentado la existencia de enjambres sísmicos por reactivación de fallas (Havskov, 1982; Yamamoto et al., 2018), como consecuencia de la actividad volcánica (Domínguez et al., 2001) y de origen antrópico asociado al rápido llenado de una presa (Montalvo-Arrieta et al., 2018).

De igual manera, alrededor del mundo se han elaborado diversos estudios que han revelado las características de las secuencias de eventos, las condiciones geológicas, tectónicas y de esfuerzos de las zonas en las que se presentan. Existen regiones en donde los enjambres son una característica de la tectónica regional como Japón y California (Vidale et al., 2006). Este tipo de actividad se presenta en diversos contextos tectónicos como zonas de subducción (Holtkamp & Brudzinski, 2011), zonas de rift continental (Ibs-von Seht et al., 2008), regiones de fallas transformantes (Roland & McGuire, 2009). También se ha descubierto que los fluidos juegan un papel fundamental en el origen de los enjambres, tanto de aquellos que son producidos de forma natural como los de origen antrópico (Danré et al., 2022).

Además, en varios países como Estados Unidos, Italia y Japón, se han elaborado catálogos de enjambres sísmicos (Vidale et al., 2006; Zaliapin & Ben-Zion, 2013a; Peresan & Gentili, 2018). La identificación de enjambres y la obtención de los catálogos ha permitido que se pueda hacer una descripción de este tipo de sismicidad.

Aunque es evidente que esta actividad sísmica no es algo nuevo en México y ha sido estudiada, no se tiene un catálogo de enjambres sísmicos. Por lo tanto, se desconoce si es característica de algunas regiones en el país o si se presenta de manera poco frecuente en las mismas. Por lo que, en este trabajo se pretenden identificar los enjambres sísmicos en la región norte y centro de México, que no son zonas dominadas por una tectónica regional fuerte y, así determinar si en estas zonas es normal el comportamiento de enjambre sísmico, además conocer en qué áreas se están presentando y cuáles son las principales características de estas secuencias.

Para poder identificar los enjambres sísmicos de la región de estudio, es necesario aplicar un algoritmo de agrupación, el cual es descrito en el Capítulo 3. La metodología seleccionada fue propuesta por Zaliapin & Ben-Zion (2013a) y es conocida como la distancia al vecino más cercano, que permite separar los sismos agrupados de la denominada sismicidad de fondo.

La metodología de la distancia al vecino más cercano, a diferencia de las tradicionales técnicas de ventaneo (Gardner & Knopoff, 1974), no necesita que el usuario tenga conocimiento muy preciso de los parámetros que se utilizan, tampoco requiere que la sismicidad cumpla con algún modelo o condiciones a priori como la técnica de Zhuang et al. (2002) o no requiere el cálculo de numerosos valores como es el caso de los métodos que usan modificaciones directas del modelo epidémico de secuencias de réplicas (ETAS).

Las ventajas de la metodología propuesta por Zaliapin & Ben-Zion (2013a) son que está parametrizada únicamente por la dimensión fractal de los epicentros, el valor  $b$  de la relación Gutenberg-Richter y un umbral de distancia que permite separar la sismicidad de fondo de la sismicidad agrupada. Asimismo, es estable ante cuestiones de incompletitud del catálogo de sismos, cambios importantes en el valor de  $b$  o de la dimensión fractal.

Lo anterior hace que la metodología de la distancia al vecino más cercano sea una elección fiable para detectar eventos agrupados en México, ya que hay zonas del norte donde es complicado elegir un catálogo completo, lo que en la mayoría de las técnicas de agrupamiento puede ser necesario. Además, es factible el cálculo de los tres parámetros que usa el método.

El siguiente paso, después de la detección de eventos agrupados, es determinar cuáles de ellos son un enjambre sísmico. Para esto, se deben considerar aquellos grupos que tengan un número de eventos suficiente y luego se verifica si las secuencias resultantes cumplen con las características esenciales de un comportamiento de enjambre: 1) no seguir la ley de Båth y 2) no cumplir con la ley de Omori-Utsu (Holtkamp et al., 2011).

La descripción completa de la zona de estudio y cómo se conforman los cuatro catálogos en los que se divide el análisis: Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), Sierra Madre Occidental (SMO), Región de Cuencas y Cordilleras (BAR) y Cuenca de Burgos (BB). Así como, los valores de los parámetros del algoritmo de agrupación para cada región: valor de  $b$ , dimensión fractal y umbral, se explican en el capítulo 4.

De tal manera que, en el Capítulo 5 se describen los resultados obtenidos para cada zona. Los resultados se pueden dividir en tres etapas fundamentales de acuerdo con la metodología: la

obtención de grupos de cada región; los resultados tras una revisión manual de los grupos obtenidos; y la identificación de aquellas secuencias que muestran un comportamiento de enjambre.

La información anterior nos permite comparar si enjambres que ya habían sido estudiados en la zona, fueron identificados con la metodología empleada, y así validar los resultados obtenidos. También, nos permite distinguir en qué zonas se presenta este tipo de sismicidad, cuáles son las características de los enjambres, si tienen algo en común y con qué frecuencia se presentan. Estos puntos son discutidos en el Capítulo 6, donde también se encuentran las conclusiones a las que se ha llegado en este trabajo.

## 2 ENJAMBRES SÍSMICOS

---

Los enjambres sísmicos son secuencias de eventos que tienden a agruparse en tiempo y espacio, que cuando ocurren, la tasa de sismicidad incrementa más allá de la sismicidad de fondo. A diferencia de las secuencias de réplicas, los enjambres sísmicos carecen de un solo evento de gran magnitud, conocido como sismo principal; en su lugar se constituyen de eventos de magnitud similar (Mogi, 1963).

Mogi (1963) realizó algunos experimentos de laboratorio y propuso que los enjambres sísmicos ocurren en zonas donde la corteza está altamente fracturada y el campo de esfuerzos es heterogéneo. En este tipo de regiones solo es necesario un pequeño esfuerzo de cizalla para producir una dislocación y así generar un gran número de eventos.

La tasa de sismicidad en un enjambre sísmico varía con el tiempo, es decir, tiende a tener periodos en donde aumenta o disminuye; además, al no tener un sismo principal, inicialmente no se puede asociar de forma directa una ley que describa su comportamiento, a diferencia de las secuencias de réplicas cuya evolución temporal puede ser descrita mediante la ley de Omori-Utsu que sostiene que la tasa de sismicidad decae con el tiempo desde que ocurre el sismo principal de acuerdo con la ley de potencia,

$$N(t) \propto (t + c)^{-p},$$

donde  $t$  es el tiempo después del sismo principal,  $c$  es una constante, y el exponente  $p \approx 1$  (Omori, 1894; Utsu, 2002).

No obstante, en diversos estudios (e.g., Hainzl y Fisher 2002; Fischer 2003) se han hecho ajustes de la ley de Omori-Utsu a los sismos principales que se han logrado identificar en un enjambre. Lo que se ha podido observar es que esta ley puede ajustarse a este comportamiento en la sismicidad, siendo el valor del exponente  $p$  lo que puede llegar a cambiar. Por lo tanto, un enjambre puede ser considerado como un número de secuencias de réplicas que se superponen en el tiempo y el espacio (Fischer et al., 2014). Para describir este comportamiento, Ogata (1988) propuso un modelo epidémico de secuencias de réplicas (ETAS, por sus siglas en inglés) que considera que cada sismo es capaz de generar réplicas y su productividad incrementa con la magnitud.

Por otra parte, los enjambres sísmicos son un tipo de actividad sísmica que suele generarse en la corteza por la acción de esfuerzos generados por actividad tectónica, volcánica o antrópica. Por tal motivo, se clasifican en tres tipos: tectónicos, volcánicos o de origen antrópico. La duración de las secuencias de eventos puede durar horas, días o meses.

Este tipo de actividad sísmica se puede caracterizar por medio de algunos parámetros sencillos como: duración, extensión espacial, número de sismos y magnitudes. Pero, también puede ser estudiada mediante otras características como las que se mencionan a continuación.

La primera característica es el valor  $b$  de la relación Gutenberg-Richter (G-R; Gutenberg & Richter, 1944), que tiene una gran variabilidad dependiendo de cada enjambre; sus valores típicamente exceden 1 y pueden llegar a ser tan altos como 2.5 (Beer et al., 2015).

La segunda es la caída de esfuerzos efectiva; para todo un enjambre sísmico suele ser un valor bajo, entre 0.01-1 MPa (Fischer & Hainzl, 2017). La caída de esfuerzos total puede interpretarse como un indicativo de la deformación asísmica dentro de las secuencias (Danré et al., 2022).

También pueden caracterizarse enjambres sísmicos por medio de la duración, velocidad de migración y momento escalar total (Roland & McGuire, 2009; Danré et al., 2022).

## 2.1 ENJAMBRES SÍSMICOS EN EL MUNDO

En algunas regiones como Japón y el sur de California, se ha determinado que las secuencias de réplicas y los enjambres sísmicos son una característica de la tectónica regional y no se limitan a algunas condiciones geológicas, áreas volcánicas o geotérmicas (Vidale & Shearer, 2006; Vidale et al., 2006). Realmente, los enjambres sísmicos ocurren en diversos contextos tectónicos, como zonas de subducción, zonas de rift continental, regiones de fallas transformantes, entre otros. Además, los factores que propician este tipo de actividad sísmica son variados.

Holtkamp y Brudzinski (2011) hicieron un estudio en donde se determinó que los enjambres son un tipo de actividad sísmica frecuente en zonas de subducción y que, aunque gran parte de ellos están asociados a actividad volcánica, existen aquéllos con un origen tectónico. Las secuencias sísmicas también están presentes en zonas de subducción de México. En el país

están dadas por la interacción de la placa de Cocos y Rivera con la placa de Norteamérica (Zobin, 1996).

En el trabajo de Ibs-von Seht et al. (2008) se analizaron enjambres sísmicos en rifts de diferentes partes del mundo: Río Grande, Kenia y Eger. Los resultados fueron interesantes, pues sugieren que los enjambres se presentan en zonas de rift influenciadas por zonas de fractura de gran escala que interceptan el curso principal del rift. Hay regiones como Río Grande y Kenia, en donde hay fuerte evidencia de que el proceso de rifting se mantiene hasta ahora. Las magnitudes máximas de estos enjambres están entre 4.2 y 4.7, las tasas de sismicidad están entre 20 y 100 eventos por día, los valores  $b$  son de 0.8 a 1.0.

Los estudios de patrones de enjambres sísmicos en rifts continentales muestran que estos corresponden con el régimen de esfuerzos regionales en cada área. Los estilos son dominados por fallamiento normal y lateral. La ocurrencia de esta actividad sísmica está delimitada a zonas profundas de debilidad que permiten la intrusión de material del manto superior a la corteza.

Roland & McGuire (2009) analizaron siete enjambres del sur de California y todos los parámetros obtenidos señalaron que un *aseismic creep* o deslizamiento asísmico es el mecanismo que conduce al origen de enjambres sobre regímenes de frontera entre placas que tienen un deslizamiento lateral.

En el mundo existen regiones en donde los enjambres han sido estudiados e incluso se han elaborado y analizado catálogos de estas secuencias sísmicas. Uno de estos catálogos fue elaborado para Sudamérica por Holtkamp et al. (2011) y abarca de 1973 a 2009; fue hecho a partir del catálogo global de Determinación Preliminar de Epicentros (PDE, por sus siglas en inglés). Fueron identificados un total de 29 enjambres sísmicos; todos ellos tienen diferentes características como contextos geológicos, duración, extensión espacial, número de sismos y magnitudes.

Algunos de los enjambres en Sudamérica se han presentado en zonas de subducción y delinean los límites de la zona de ruptura de sismos principales. Otros enjambres, también en zonas de subducción, se presentan en dorsales asísmicas, incluyendo *gaps* o brechas sísmicas, como es el caso de Perú y Ecuador. Dos de los enjambres en esta zona fueron analizados junto con información geodésica y se encontró que la deformación asociada con estos no requiere una componente significativa de deslizamiento sobre una falla asísmica o intrusión magmática. Los

pocos enjambres en zonas volcánicas de Sudamérica ocurren en zonas con erupciones poco frecuentes y pueden relacionarse con zonas de falla regionales.

Otra zona que ha sido extensamente estudiada a través de catálogos de enjambres sísmicos es el Sur de California. En el trabajo de Zaliapin & Ben-Zion (2013b) se encontró que los enjambres se localizan en zonas con un comportamiento frágil y dúctil que tienen una temperatura y/o contenido de fluido relativamente altos. En el noreste de Italia se realizó un catálogo para analizar secuencias sísmicas y se determinó que los enjambres se distribuyen principalmente en la región sureste (Peresan & Gentili, 2018).

En Nueva Zelanda se ha estudiado que los eventos de deslizamiento lento a lo largo de la Trinchera de Hikurangi, están acompañados por actividad intensa en forma de enjambres sísmicos. Proponen que la alta presión de fluidos dentro de la zona de falla que se acumula antes de los sismos lentos puede causar migración de los fluidos y originar los enjambres sísmicos (Nishikawa et al., 2021).

También se han caracterizado enjambres sísmicos en Bohemia Occidental y Vogtland; de hecho, es una zona en donde la actividad sísmica en forma de secuencias es muy común y ha sido estudiada en múltiples ocasiones. La actividad en forma de enjambres sísmicos en esta región ha sido asociada con la interacción de fluidos con la zona de falla (Hainzl & Fischer, 2002; Fischer, 2003; Hainzl, 2004) y la actividad geodinámica general del área que también origina otros procesos como la desgasificación de  $CO_2$  de origen magmático (Fischer et al., 2014).

Ha sido reportado en otros trabajos que los enjambres sísmicos se pueden unir con procesos de flujo de fluidos que alteran el campo de esfuerzos y disparan sismicidad (Smith et al., 2004; Hainzl & Ogata, 2005). En el Sur de California también se ha documentado la existencia de actividad sísmica en forma de enjambre asociada a la difusión de presión por fluidos (Ross et al., 2020; Ross & Cochran, 2021).

Como se observa, los fluidos tienen un papel muy importante en el origen y comportamiento de varios enjambres sísmicos. Incluso, se ha estudiado que son factor clave para explicar tanto enjambres de origen natural como aquellos de origen antrópico. En ambos casos se ha observado la propagación de un frente de sismicidad que se atribuye a la difusión de presión de fluido (Shapiro et al., 1997), al deslizamiento asísmico (Roland & McGuire, 2009) o a ambos.

En el estudio de Danré et al. (2022) se analizaron 22 enjambres de origen natural y antrópico. Las observaciones sugieren que el mecanismo que dispara ambos procesos es similar. Además, el principal responsable de la migración de los sismos durante el enjambre es la prevalencia del deslizamiento asísmico que es inducido por los fluidos.

## 2.2 ENJAMBRES SÍSMICOS EN MÉXICO

En México se ha detectado una cantidad importante de enjambres sísmicos de diversa naturaleza, que han sido motivo de estudio de varios autores. A continuación, se muestra una breve descripción de algunos de estos enjambres con la finalidad de ver la diversidad de su origen y sus características.

Lomnitz et al. (1970) realizaron un estudio en el que analizaron un enjambre sísmico de más de 70 sismos de magnitudes entre 4.0 y 5.5 que ocurrió en marzo de 1969, cerca de la Roca Consag en el norte del Golfo de California en México. El estudio de este enjambre y de la actividad sísmica de la región contribuyó al conocimiento de la tectónica regional. Las soluciones de los mecanismos focales de los sismos que integran el enjambre muestran una componente de falla normal, que junto con información batimétrica fueron indicadores de un patrón de dispersión del fondo marino.

Del 4 al 15 de febrero de 1981 ocurrió una secuencia sísmica en la Ciudad de México. Havskov (1982) analizó los eventos de magnitud  $2.7 \leq M_L \leq 3.2$  que se localizaron a una profundidad de 1.2 km. La solución del plano de falla para esos sismos fue normal con eje tensional en dirección casi E-O, que fue un mecanismo focal parecido al del evento de mayor magnitud de otra secuencia que ocurrió en febrero de 1980. El motivo de la actividad sísmica fue explicado mediante una acumulación de esfuerzo regional; sin embargo, también se mostró la posibilidad de que el hundimiento de la Cuenca de México podía originar esfuerzos orientados de forma similar y que podían disparar la actividad sísmica.

Existen otros estudios que han revelado que existen enjambres cuyo origen tiene que ver con la actividad volcánica de algunas regiones. Domínguez et al. (2001) estudió la actividad sísmica presente como varios enjambres en el volcán de Colima; los sismos comenzaron en noviembre de 1988 y se prolongaron por 12 meses. Se concluyó que esta actividad fue el resultado de la migración de un dique y el crecimiento de ramas del mismo dentro del edificio volcánico.

Pacheco et al. (1999) analizaron una secuencia sísmica entre febrero y marzo de 1997, de 230 sismos con profundidades entre 10 y 18 km, que se localizaron entre los volcanes Tancítaro y Parícutín; la posible causa de esta sismicidad son las fracturas y grietas preexistentes. Estudiar esta secuencia fue importante porque se concluyó que la zona que se ubica entre los bloques corticales de Jalisco, Michoacán y Guerrero, que tiene una gran deformación y que en el artículo se denomina Triángulo Michoacán, no tiene el mismo campo de esfuerzos que la FVTM. Pues el primero posee un campo de esfuerzos compresional en dirección NE, mientras de la FVTM tiene un campo de esfuerzos extensional en dirección NS. Los enjambres cercanos al volcán Tancítaro también son comunes y se han presentado en otros años como 1999, 2000, 2006 y 2020 (Pinzón et al., 2017; Jácome et al., 2022; Legrand et al., 2023).

En el reciente trabajo de Legrand et al. (2023) se analizan los diferentes enjambres que se han detectado entre los volcanes Tancítaro y Parícutín en los años 1997, 1999, 2000, 2006, 2020 y 2021. Como se puede observar, también incluye los enjambres que habían sido estudiados por Pacheco et al. (1999). En este nuevo análisis se resalta la importancia del monitoreo en la sismicidad del área entre esos volcanes, para poder comprender y rastrear la evolución espacio-temporal de los hipocentros, debido a que los enjambres pueden estar asociados con el nacimiento de un nuevo volcán.

En Jalisco, los enjambres sísmicos suelen presentarse como el resultado de la tectónica regional, como la reactivación de fallas preexistentes dada la interacción del borde oeste de la FVTM con el borde este del bloque de Jalisco (Yamamoto et al., 2018).

Munguía et al. (2016) estudiaron un enjambre sísmico en Bahía de Asunción, Baja California, entre los años 2006 y 2007. El enjambre ocurrió a lo largo de fallas activas que son paralelas entre sí y casi perpendiculares a la línea de costa; la deformación activa de la corteza tiene lugar en el sistema de fallas Tosco-Abreojos. El análisis de los mecanismos focales indica que esta es una zona transtensional que acomoda parte del deslizamiento entre las placas del Pacífico y Norte América.

Gardine et al. (2011) describen un enjambre que tuvo lugar entre finales de mayo y principios de julio de 2006 con más de 700 sismos de  $M_L > 2.4$  cerca del volcán Parícutín, ubicado en el campo Michoacán-Guanajuato. La secuencia sísmica se originó por la acreción de un dique y la inflación horizontal de estructuras tipo *sill* en el volcán. En este caso no hubo una erupción

volcánica, si bien las erupciones están acompañadas por enjambres, los enjambres no siempre están acompañados por erupciones.

Fasola et al. (2019) encontraron a partir del estudio de varios enjambres en Oaxaca, que estas secuencias y eventos de deslizamiento lento se pueden dar en un mismo contexto geológico. En ese estudio, el análisis lleva a concluir que ambos tipos de actividad ocurren sobre una zona de la falla Chacalapa-La Venta que es una *sliver* que acomoda el deslizamiento asociado con la subducción oblicua. Una placa *sliver* es pequeña, por lo general es más larga que ancha, que se encuentra encajada entre dos placas más grandes como resultado de la partición por deformación.

Por su parte, Gómez-Arredondo et al. (2016) determinaron que el enjambre en 2012, de más de 250 sismos en Linares, Nuevo León, fue producido posiblemente como consecuencia de la reactivación de fallas de tipo inverso en la región, pues existe un campo de esfuerzos compresivo derivado del empuje hacia el este de un bloque menos denso que es bloqueado por un bloque de roca más denso localizado al este del frente de la Sierra Madre Oriental.

El 27 de agosto de 2013 comenzó una secuencia sísmica con un sismo de  $M_w$  4.1 en el sur de la provincia de Cuencas y Cordilleras de Chihuahua, este enjambre sísmico terminó en diciembre de 2013 y fue estudiado en el trabajo de Suárez et al. (2016). El Servicio Sismológico Nacional (SSN) localizó aproximadamente 60 eventos donde el más grande,  $M_w$  5.3, ocurrió el 21 de septiembre. Dado que la sismicidad fue sentida en una zona muy amplia, y con el objetivo de analizar si la sismicidad estaba asociada con alguna falla, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) instaló de forma provisional 12 sismómetros. El periodo de medición fue del 18 al 29 de noviembre y se localizaron aproximadamente 200 sismos. Con el análisis de mecanismos focales y relocalizaciones de este enjambre, se determinó que la sismicidad estuvo asociada a tres zonas: sistema de falla Vallencillo, falla Peñasco y sistema de fallas la Mezcalera. La sismicidad sugiere que la deformación es consistente con la extensión y transtensión lateral derecha en la porción mexicana de la región de Cuencas y Cordilleras.

El Servicio Sismológico Nacional (SSN) de México comparte en su página oficial reportes especiales de sismicidad, que incluyen la presencia de enjambres sísmicos. En la Tabla 2.1 se incluye un breve resumen de estas secuencias reportadas por el SSN (2023).

Tabla 2.1 Información de los enjambres sísmicos reportados por el SSN, comenzando desde los más actuales en 2022 hasta 2013.

Fecha	Localización	Sismos reportados	Magnitud mínima	Magnitud máxima
15 al 22 de noviembre de 2022	Hidalgo del Parral, Chihuahua	130	1.9	4.1
23 de septiembre de 2022	Los Reyes, Michoacán	200	3.1	4.3
4 al 6 de septiembre de 2021	Guanajuato – San Luis Potosí	32	3.6	4.5
13 de marzo al 26 de agosto de 2021	Sonora	127	-	5.1
30 de mayo al 3 de septiembre de 2021	Michoacán	1,083	-	4.1
25 de diciembre de 2020 al 24 de marzo de 2021	Chiapas	60	1.5	4.1
5 de enero al 10 de marzo de 2020	Michoacán	3,294	-	4.1
10 al 12 de diciembre de 2019	Golfo de California	27	3.7	4.8
21 de marzo de 2019	Costa de Oaxaca	42	1.9	4.4
2 al 25 de diciembre de 2018	Nayarit	34	-	4.0
27 al 28 de julio de 2018	Golfo de California	14	3.1	4.6
11 al 16 de mayo de 2018	Sinaloa	149	2.7	4.0
18 al 22 de agosto de 2017	Cercanías de Coalcomán, Michoacán	81	2.9	4.6
23 al 24 de julio de 2017	Golfo de California	80	3.0	4.5
15 de febrero de 2017	Veracruz	9	3.6	3.9
21 al 23 de agosto de 2016	Golfo de California	88	1.4	3.2
6 de octubre de 2013	Coyuca de Benítez, Guerrero	17	3.1	4.9
17 de septiembre de 2013	Hidalgo	13	3.4	3.8

Información tomada de los reportes especiales del SSN disponibles en la página <http://www.ssn.unam.mx/>. Última fecha de consulta octubre de 2023.

En cuanto a enjambres de origen antrópico, Montalvo-Arrieta et al. (2018) analizaron una secuencia sísmica de octubre de 2013 a julio de 2014 conocida como “El Cuchillo” por su ubicación en la presa con el mismo nombre que se encuentra en Nuevo León. Se encontró que hay una relación entre la sismicidad y el llenado del reservorio a partir del valor  $b$ , la correlación lineal positiva entre las fluctuaciones del nivel de agua y la sismicidad; además, las estimaciones de la presión de poro entre 100 y 250 kPa revelan que se pueden inducir sismos de  $M \geq 3$ .

También, Sánchez (2021) hizo un estudio de un enjambre que ocurrió en Ixtlán del Río Nayarit con actividad de diciembre de 2018 a abril de 2019. En ese trabajo se analiza si el origen del enjambre puede estar asociado al llenado de las presas El Cajón y La Yesca.

### 2.3 RELACIÓN GUTENBERG-RICHTER

Un concepto importante que suele emplearse en los estudios de sismicidad y del que se hace uso en este trabajo, es la relación G-R, que establece que las magnitudes de los sismos se distribuyen de manera exponencial (Gutenberg & Richter, 1944) como:

$$\log_{10}N(m) = a - bm,$$

donde,  $N(m)$  es el número acumulativo de sismos con magnitud más grande o igual que  $m$  que ocurren en un tiempo dado,  $a$  un parámetro que depende del número de eventos en el tiempo y región seleccionados, la pendiente  $b$  da una estimación de la relación entre el número de eventos de pequeña y gran magnitud y es generalmente uno (Gutenberg & Richter, 1944). Un valor alto de  $b$  señala que ocurren con más frecuencia los sismos pequeños, mientras que un valor pequeño de  $b$  señala que una gran fracción ocurren en grandes magnitudes (Gutenberg & Richter, 1944; Taroni et al., 2021).

La relación G-R permite explicar por qué los sismos de menor magnitud son más comunes que los sismos de mayor magnitud.

### 2.4 DISTANCIA ENTRE SISMOS

Otro concepto importante para el entendimiento de la metodología que se utilizó en el presente estudio y que se describirá en el siguiente capítulo es la distancia entre sismos.

Baiesi & Paczuski (2004) plantearon la definición de una métrica que incluye propiedades estadísticas de la sismicidad en tiempo y espacio como la relación G-R y la dimensión fractal de los epicentros. Esta métrica es particular porque, aunque se denomina distancia entre sismos, no incluye únicamente una distancia espacial o temporal. Más bien, es una distancia en un dominio espacio, tiempo y energía.

Esta métrica permite cuantificar el número promedio de sismos que ocurren dentro del intervalo  $\Delta m$  de magnitud  $m$ , en un área de radio  $r$  sobre un intervalo de tiempo  $\tau$ , en ausencia de agrupamiento, y se expresa matemáticamente como

$$\bar{n} = C\tau r^{d_f} \Delta m 10^{-bm}.$$

Los exponentes  $d_f$  y  $b$  representan la dimensión fractal y la constante de la relación G-R, respectivamente. Además,  $C$  es una constante que depende de la sismicidad en cada región.

Visto de otra forma, si se toma la magnitud de un evento  $i$ -ésimo y se considera la distancia espacial  $l_{ij}$  de este evento con un evento posterior  $j$ -ésimo y el intervalo de tiempo entre sismos  $t_{ij}$ , se puede saber cuántos sismos pueden esperarse que ocurran dentro de un rango de magnitud  $\Delta m$ , entre los dos eventos,

$$\eta_{ij} = C t l^{d_f} \Delta m 10^{-bm_i}.$$

De todos los sismos que ocurren antes de  $j$  existe un evento  $i^*$  para el cual  $\eta_{ij}$  es mínimo, por lo que,  $i = i^*$  es el evento con el que está más correlacionado  $j$ . Con lo anterior se puede concluir que la distancia y la correlación tienen una relación inversa, es decir, a menor distancia mayor correlación y viceversa.

Por lo tanto, si se conoce cuál es el evento  $i = i^*$  con el que  $j$  muestra una mayor correlación o una menor distancia, y estos se unen, se pueden representar las secuencias de sismos, que, desde un punto de vista topológico se pueden ver como un árbol orientado en tiempo cuyo primer evento es el primer evento en todo el catálogo.

## 2.5 DIMENSIÓN FRACTAL DE LOS EPICENTROS

Como se mencionó, el concepto de dimensión fractal es usado en la definición anterior de distancia entre sismos, por lo que, es importante tener en cuenta cuál es su significado y como puede calcularse.

Este concepto de dimensión fractal surge por la necesidad de explicar la disposición de varias cosas en la naturaleza, ya que la organización de algunas de ellas no puede ser descrita por medio de una geometría Euclidiana, por lo tanto, en el pasado se utilizaban diversos adjetivos poco precisos para tratar de definirla.

El término fractal fue usado por primera vez por Mandelbrot (1967) quien trató de describir mediante una cantidad  $D$ , el grado de complicación de alguna geometría. Los fractales tienen ciertas características: son invariantes bajo alguna transformación de escala, no tienen un tamaño característico y cumplen una ley de potencias (Goltz, 2005).

De acuerdo con Goltz (2005), no hay una definición de dimensión fractal, incluso, hay un gran número de dimensiones fractales, por lo tanto, es necesario que al reportar este valor se especifique el método con el que ha sido obtenido.

Un tipo de dimensión fractal es la dimensión de correlación, que se basa en la correlación espacial entre pares de puntos. De acuerdo con Grassberger & Procaccia (1983), la función de correlación  $C(r)$ , está relacionada con la integral de correlación mediante

$$C(l) = \int_0^l d^F r C(r).$$

La función de correlación se puede definir para  $N$  pares de eventos de la siguiente manera,

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N H(r - \|x_i - x_j\|),$$

donde  $H$  es la función de Heavyside y es igual a cero si el argumento es menor que cero, sino es igual a uno. La función de correlación mide el número de puntos que se correlacionan con otros en una esfera de radio  $r$  que se localiza alrededor del punto de referencia  $x_j$  (Goltz, 2005).

En Grassberger & Procaccia (1983) se demuestra que teóricamente la correlación integral es proporcional a la potencia  $D$  mediante la siguiente relación,

$$\lim_{r \rightarrow 0} C(r) \propto r^D,$$

donde,  $D$  es la dimensión de correlación e igual a la segunda dimensión generalizada, dimensión de Renyi (Molchan & Kronrod, 2009). Por lo tanto,

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log C(r)}{\log r}.$$

La estimación de  $D$ , de forma práctica, se realiza mediante una gráfica log-log de la correlación integral  $C(r)$  y distintos valores de  $r$ , en donde después se aplica un ajuste por medio del método de mínimos cuadrados sobre la región que muestre un comportamiento lineal, de tal manera que  $D$  es la pendiente de la gráfica (Volant y Grasso, 1994).

El comportamiento lineal de la gráfica log-log está limitado por un valor de distancia mínimo y uno máximo, conocido como el rango de escalamiento. Para identificar los valores óptimos de distancia que definen este rango, se puede aplicar la prueba de la pendiente (Spada et al., 2011). Esta prueba consiste en obtener la derivada de la correlación integral  $C(r)$  como función de la distancia logarítmica,

$$\dot{C}(R) = \frac{d \log[C(r)]}{d \log(r)}.$$

Entre los valores óptimos de distancia  $r_{min}$  y  $r_{max}$ , la pendiente será casi constante, ya que el rango de escalamiento está definido entre estos valores.

### 3 IDENTIFICACIÓN DE ENJAMBRES SÍSMICOS

---

La metodología que se utilizará para la identificación de enjambres sísmicos se puede dividir en tres partes importantes: 1) clasificación de eventos agrupados y no agrupados, 2) revisión manual de los resultados y 3) identificación de los enjambres sísmicos. Por lo tanto, primero se explicará la técnica de agrupamiento de sismos que se decidió utilizar.

#### 3.1 SEPARACIÓN ENTRE SISMOS AGRUPADOS Y SISMICIDAD DE FONDO

Dado que, en la sismología, el análisis de secuencias sísmicas ha sido de interés a lo largo del tiempo, existen distintas metodologías para agrupar sismos. Cada metodología tiene ciertas ventajas y desventajas.

Existen técnicas que aunque permiten encontrar eventos agrupados, es necesario un ajuste de los parámetros y umbrales, como es el caso de las técnicas de ventaneo, varias de estas técnicas se desprenden del trabajo de Gardner & Knopoff (1974).

Otras técnicas están basadas en la manipulación del modelo ETAS, incluida la metodología del vecino más cercano. Sin embargo, hay algunas que necesitan que los catálogos de sismicidad que se analizan cumplan con ciertos criterios como la técnica de Zhuang et al. (2002).

Otras metodologías están especializadas en encontrar específicamente enjambres sísmicos. Algunas de ellas reúnen características de técnicas convencionales.

Por ejemplo, la metodología propuesta por Holtkamp et al. (2011) examina todos los grupos de sismos en un catálogo de Sudamérica, con la extracción de todos los sismos en una ventana que se mueve sobre una malla. En cada zona sobre el mallado se gráfica la magnitud contra el tiempo para identificar cambios en la tasa de sismicidad y se seleccionan casos donde no haya un sismo principal asociado. En casos de interés se aplican ciertas condiciones necesarias para poder identificar un enjambre: no seguir la ley de Båth y la sismicidad no obedece a la ley de Omori-Utsu. La técnica es manual y entre sus ventajas está el que reduce el número de falsos negativos. Su desventaja se centra en la difícil visualización en áreas en donde la tasa de sismicidad de fondo es alta.

Aquellas metodologías que incluyen la manipulación del modelo ETAS para la identificación de secuencias, resultan ser eficientes. Sin embargo, necesitan el análisis y la estimación de varios parámetros (Zhuang et al., 2002; Nishikawa et al., 2021).

Es importante considerar que también existen técnicas de desagrupación para el análisis de secuencias sísmicas.

En el presente estudio se eligió una metodología de agrupamiento debido a que se pretende analizar enjambres sísmicos y estos son eventos agrupados en tiempo y espacio. La metodología implementada es conocida como la distancia al vecino más cercano (Zaliapin et al., 2008; Zaliapin & Ben-Zion, 2013a, 2013b). Cabe mencionar que esta técnica solo se basa en una característica estadística y no en una relación causal entre los sismos.

La metodología de la distancia al vecino más cercano comenzó a desarrollarse por Zaliapin et al. (2008), quienes retomaron la definición de la distancia entre eventos  $\eta_{ij}$  propuesta por Baiesi & Paczuski (2004) y ampliaron la aproximación para demostrar la existencia de dos subpoblaciones de distancias  $\eta_{ij}$  que son estadísticamente distintas. Una de ellas es un flujo uniforme de distancias, estacionario y homogéneo que se asocia con eventos desagrupados. La otra población corresponde con distancias más pequeñas en tiempo y espacio de lo que se espera para el flujo uniforme y se asocia con los eventos agrupados.

La distancia entre sismos propuesta por Baiesi & Paczuski (2004) tiene una versión “truncada” que se usa para evitar tener un número infinito de sismos del número total de eventos  $N$ , que impida el cálculo significativo de la distancia al vecino más cercano. Esta versión es la que utilizaron Zaliapin & Ben-Zion (2013a) para separar la sismicidad agrupada de la sismicidad de fondo. Esta distancia está dada por la expresión

$$\eta_{ij} \begin{cases} t_{ij}(r_{ij})^{d_f} 10^{-bm_i}, & t_{ij} > 0; \\ \infty, & t_{ij} \leq 0. \end{cases}$$

En donde  $t_{ij} = t_j - t_i$  es el tiempo de ocurrencia entre eventos y es positivo porque  $t_j > t_i$ , ya que, de acuerdo con la definición, el sismo  $j$  ocurre después del  $i$ ,  $r_{ij}$  es la distancia entre los eventos,  $\theta_i$  es la latitud del sismo,  $\phi_i$  la longitud y  $m_i$  la magnitud. Como se explicó anteriormente, esta métrica utiliza la dimensión fractal de los epicentros  $d_f$  y el valor  $b$  de la relación G-R.

Con la finalidad de descomponer la distribución de las distancias  $\eta_{ij}$ , es recomendable representarlas en términos de sus denominadas componentes reescaladas en espacio y tiempo, las cuales están normalizadas por la magnitud del evento padre  $i$  (Zaliapin & Ben-Zion, 2013a),

$$T_{ij} = t_{ij}10^{-qbm_i},$$

$$R_{ij} = (r_{ij})^{d_f}10^{-(1-q)bm_i}.$$

De tal manera que  $\eta_{ij} = T_{ij}R_{ij}$ , lo que es lo mismo que  $\log_{10}\eta_{ij} = \log_{10}T_{ij} + \log_{10}R_{ij}$ . En la literatura se recomienda usar  $q = 0.5$ , teniendo en cuenta que este solo es un parámetro que se usa con fines de visualización.

Se ha demostrado en los trabajos de Zaliapin et al. (2008), Zaliapin & Ben-Zion (2013a) que la distribución de distancias entre sismos para un catálogo de eventos que carecen de agrupamiento, se comporta como si se calculara la distancia entre sismos que provienen de un proceso estacionario homogéneo de Poisson. La distribución de distancias entre eventos de un proceso de ese tipo, que por construcción carece de agrupamiento, se puede aproximar a una distribución unimodal tipo Weibull y la distribución conjunta de las componentes en espacio y tiempo tiene un comportamiento también unimodal que se concentra en una línea que obedece a

$$\log_{10}T + \log_{10}R = \text{constante}.$$

En la Figura 3.1 podemos observar el comportamiento descrito anteriormente.

Por otra parte, la sismicidad observada en un catálogo real de eventos muestra un comportamiento bimodal y esto ha sido documentado en varios estudios como por ejemplo el de Peresan y Gentili (2018), quienes analizan grupos de sismos en el noreste de Italia.

También en California Zaliapin & Ben-Zion (2013b) observaron este comportamiento bimodal y determinaron que uno de los modos se comporta de manera similar a lo que se mostró para un proceso de Poisson y que se asocia con los eventos que constituyen la sismicidad de fondo. Mientras que el otro modo está asociado con los eventos agrupados, es decir, aquéllos con una mayor cercanía en tiempo y espacio que lo que se esperarían para el proceso de Poisson. En la Figura 3.2 se pueden observar los dos modos, tanto en una gráfica de las distancias reescaladas como en un histograma del  $\log\eta$ .

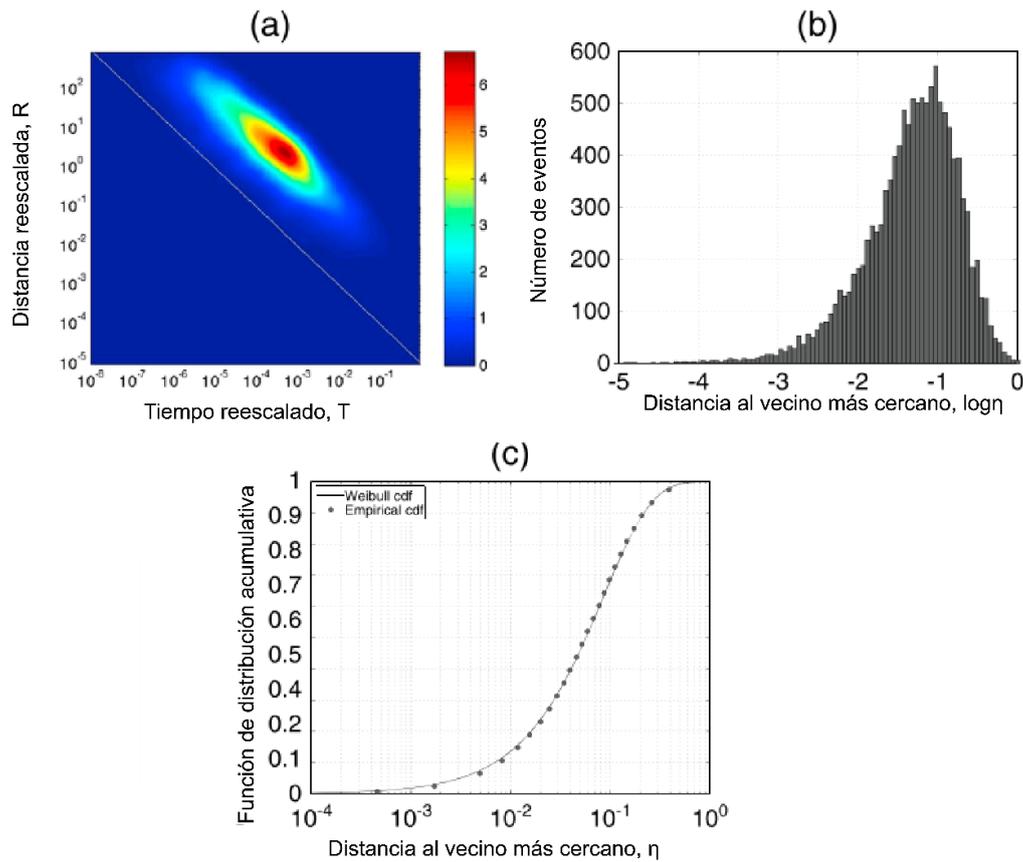


Figura 3.1 Comportamiento de las distancias asociadas a la sismicidad observada en un proceso estacionario homogéneo de Poisson. (a) Distribución de las componentes temporal y espacial ( $T, R$ ), se concentran en una línea  $\log_{10}T + \log_{10}R = \text{constante}$ . (b) Comportamiento unimodal de la distribución de las distancias  $\eta$ . (c) Función de distribución acumulativa empírica (cdf) para las distancias  $\eta$  (círculos) y la función de distribución acumulativa para una distribución Weibull (línea negra), se observa una aproximación muy cercana. Tomada de Zaliapin & Ben-Zion (2013a).

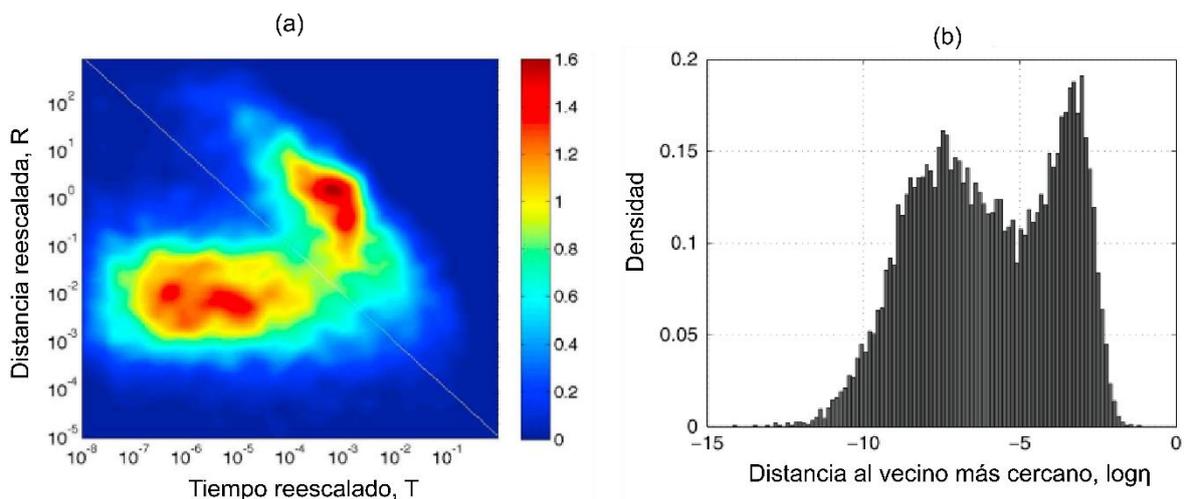


Figura 3.2 Comportamiento de las distancias  $\eta$  asociadas a la sismicidad en el sureste de California. (a) Distribución de las componentes temporal y espacial ( $T, R$ ), que se concentran en una línea  $\log_{10}T + \log_{10}R = \text{constante}$  para el modo asociado a la sismicidad de fondo, el otro modo es el que se asocia a la parte agrupada. (b) Comportamiento bimodal de la distribución de las distancias  $\eta$ , el modo de la derecha está asociado con la parte desagrupada y el de la izquierda con la parte agrupada. Tomada de Zaliapin & Ben-Zion (2013a).

El comportamiento bimodal no se explica como resultado de un agrupamiento en espacio o tiempo, solo se presenta cuando hay un agrupamiento de ambos. Además, no puede atribuirse a las condiciones del medio donde se presenta la sismicidad, como la complejidad de las fallas; de tal manera que, su origen está dado completamente por las estructuras sísmicas dependientes del espacio y del tiempo.

Como fue explicado en el capítulo anterior, Baiesi & Paczuski (2004) también establecieron que existe un evento  $i = i^*$  cuya distancia a otro evento  $j$ ,  $\eta_{ij}$ , es mínima; por lo tanto, esta distancia es denominada como la distancia al vecino más cercano (Zaliapin & Ben-Zion, 2013a). Entonces, si se puede unir cada evento  $j$  con su vecino más cercano o evento “padre” un catálogo de sismos puede ordenarse y desde un punto de vista topológico, se puede formar una estructura de árbol orientada en tiempo, en la que el primer evento sea el primero de todo el catálogo.

Con un catálogo de sismos ordenado lo que restaría es formar los grupos de sismos y distinguir entre la sismicidad de fondo y la sismicidad agrupada. La forma más sencilla de realizar la separación es por medio de definir un umbral de distancia al vecino más cercano,  $\eta_0$ . De esta manera, si  $\eta_{ij} < \eta_0$  significa que la distancia entre eventos es corta y corresponden a la parte agrupada; en caso contrario  $\eta_{ij} \geq \eta_0$ , lo que corresponde a la sismicidad de fondo.

Existen dos formas de establecer el umbral  $\eta_0$ . La primera es mediante una inspección visual de un histograma o gráfico de densidad del  $\log_{10}\eta$ , en el que se observe claramente la separación de los dos modos de sismicidad como es el caso del ejemplo de la Figura 3.2. La segunda forma de establecer  $\eta_0$  fue propuesta por Hicks (2011), quien utilizó un modelo de mezcla Gaussiana y que se explicará brevemente a continuación.

Esencialmente, los modelos de mezcla son modelos probabilísticos que representan la existencia de subpoblaciones dentro de una población. El modelo de mezcla Gaussiana tiene dos modos y nos dice que una muestra  $x_i \in R^l$ ,  $i = 1, \dots, n$  proviene de una distribución

$$F(x) = wN(x; \mu_1, \Sigma_1) + (1 - w)N(x; \mu_2, \Sigma_2),$$

donde  $w$  es el peso del primer modo y  $N(x; \mu, \Sigma)$  es una distribución normal con media  $\mu$ , que es un vector de  $l$  componentes y varianza  $\Sigma$  que es una matriz de  $l \times l$  componentes y la estimación del modelo se puede hacer usando un algoritmo de Esperanza-Maximización (EM)

que se usa para encontrar estimadores de máxima verosimilitud de parámetros en modelos probabilísticos.

Un modelo asigna a cada evento las probabilidades  $w$  y  $(1 - w)$  de ser atribuidas a uno u otro modo. La asignación final se hace de acuerdo con la máxima probabilidad, eligiendo el valor umbral  $\eta_0$  que ecualiza la densidad de los dos modos estimados,

$$N(\eta_0; \mu_1, \Sigma_1) = N(\eta_0; \mu_2, \Sigma_2).$$

Una vez que se conoce el umbral de distancia con el método descrito anteriormente, lo que resta es eliminar aquellas uniones entre eventos con una distancia  $\eta_{ij} \geq \eta_0$ , por lo que, la sismicidad es dividida en sismos únicos o la denominada sismicidad de fondo y, la parte agrupada que son grupos de dos o más eventos a los que también se les denomina familias.

La metodología que se utilizó en este trabajo para la identificación de grupos de sismos, que usa la distancia al vecino más cercano tiene ciertas ventajas: 1) está completamente parametrizada por la dimensión fractal de los epicentros  $d_f$ , el valor de  $b$  de la relación G-R y el valor umbral  $\eta_0$ , 2) la técnica es estable respecto a errores de localización, magnitud mínima, elección de  $d_f$ , valor  $b$  e incompletitud del catálogo, 3) no asume ninguna forma de agrupamiento, y 4) se adapta por sí misma sin depender de algún umbral que defina algún experto (Zaliapin & Ben-Zion, 2013a).

### 3.2 CLASIFICACIÓN DE LAS SECUENCIAS

Es importante tener en cuenta que el separar la sismicidad por grupos de sismos que son cercanos en tiempo y espacio no significa que sean secuencias sísmicas con un comportamiento de enjambre. Por lo tanto, con la finalidad de distinguir aquellos grupos que sí muestran un comportamiento de enjambre, se agregaron dos pasos más a la metodología empleada.

Entonces, una vez que se tienen los grupos de sismos a través de la técnica de la distancia al vecino más cercano, se optó por realizar una revisión manual de los grupos. La finalidad es verificar que no haya algún sismo que no esté agrupado tanto en tiempo como en espacio, es decir, que sea un evento sin asociación alguna al grupo.

Una vez que se termina la revisión se deben identificar aquellos grupos de sismos que presenten un comportamiento de enjambre. Para ello, Holtkamp et al. (2011) definieron algunos criterios,

los cuales utilizaron para poder hacer una clasificación de secuencias tipo enjambre y secuencias de réplicas. Los criterios son los siguientes: 1) cantidad mínima de 5 eventos; 2) no cumplir la ley de Båth, esto es que el segundo evento más grande en la secuencia no tenga una diferencia de magnitud igual o mayor que uno, respecto al sismo de mayor magnitud; y 3) la sismicidad no se debe ajustar a la ley de Omori-Utsu, en su lugar debe iniciar y terminar de manera abrupta.

## 4 CATÁLOGO DE SISMOS

Zúñiga et al. (2017) hicieron una regionalización sísmica de México tomando en cuenta características geológicas, tectónicas y sísmicas. La regionalización incluye 18 regiones que se pueden clasificar en tres tipos: sismicidad asociada a los procesos de subducción a lo largo de la costa del Pacífico, eventos sísmicos intraplaca como consecuencia de la subducción de las placas de Cocos y Rivera, y, por último, sismicidad cortical que se relaciona con las características geológicas y tectónicas de las regiones. En la Figura 4.1 se muestran las zonas que se caracterizan por tener una sismicidad somera.

Para este trabajo se formaron cuatro catálogos sísmicos que se delimitan espacialmente por las siguientes regiones: Sierra Madre Occidental (SMO), Cuencas y Cordilleras (BAR, por sus siglas en inglés), Cuenca de Burgos (BB, por sus siglas en inglés) y Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). Los límites considerados en este estudio para las tres regiones del norte SMO, BAR y BB coinciden con lo que se observa en la Figura 4.1. Sin embargo, los límites de la región FVTM se consideraron de acuerdo con lo propuesto por Ferrari et al. (2012) para que pudiera haber una intersección entre las regiones del norte y la FVTM.

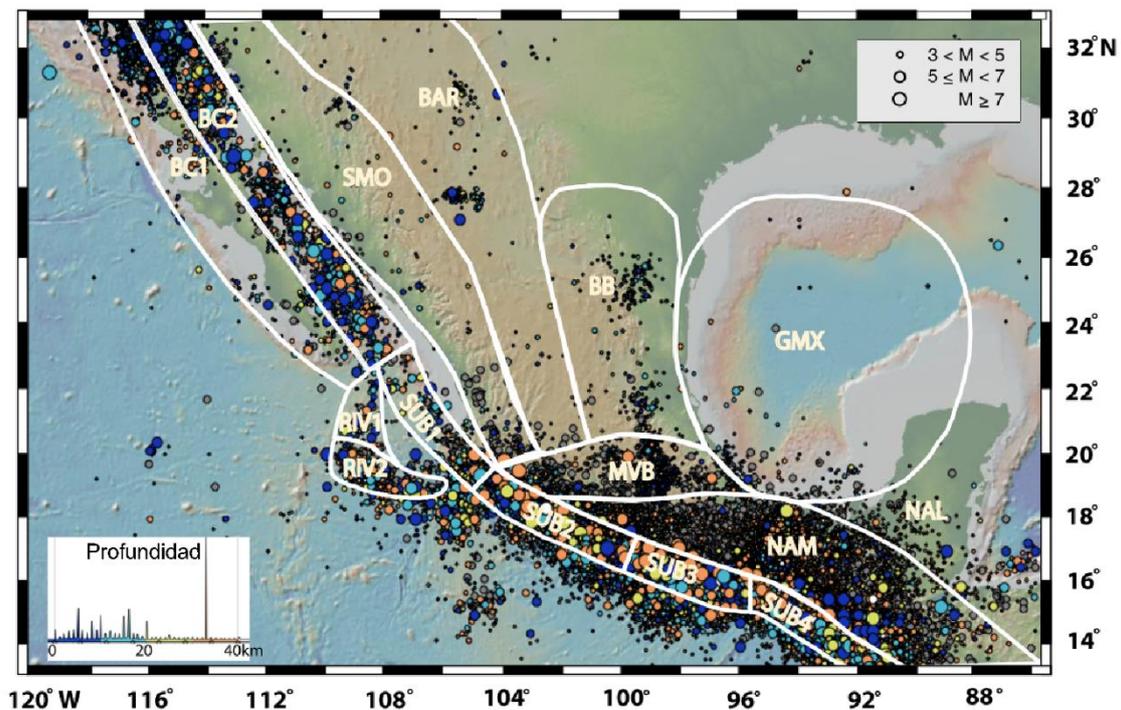


Figura 4.1 Regiones con sismicidad somera (< 40 km), de acuerdo con la regionalización propuesta por Zúñiga et al. (2017). Tomada de Zúñiga et al. (2017).

La información de los sismos que conforman los cuatro catálogos fue tomada del catálogo del Servicio Sismológico Nacional (SSN). El catálogo del SSN comienza en enero de 1990 y de esa fecha hasta el 30 de noviembre del 2022, se reportaron una cantidad de 267,616 sismos en el territorio mexicano, de los cuales 249,967 tuvieron una magnitud calculable. En la Figura 4.2 se puede observar la distribución de esta sismicidad.

En la Figura 4.2, además se resalta la información de las zonas de estudio: BAR, BB, SMO y FVTM. La tonalidad del color en estas regiones depende de la fecha, entre más oscuros los eventos son más recientes, por lo que, la mayoría de los eventos en estas regiones han ocurrido en los últimos años.

También, es importante notar que con los límites considerados para la FVTM hay un traslape con las regiones del norte. Esto es con la finalidad de ver si los enjambres identificados en una zona como en la otra, son los mismos en el área en la que se traslapan.

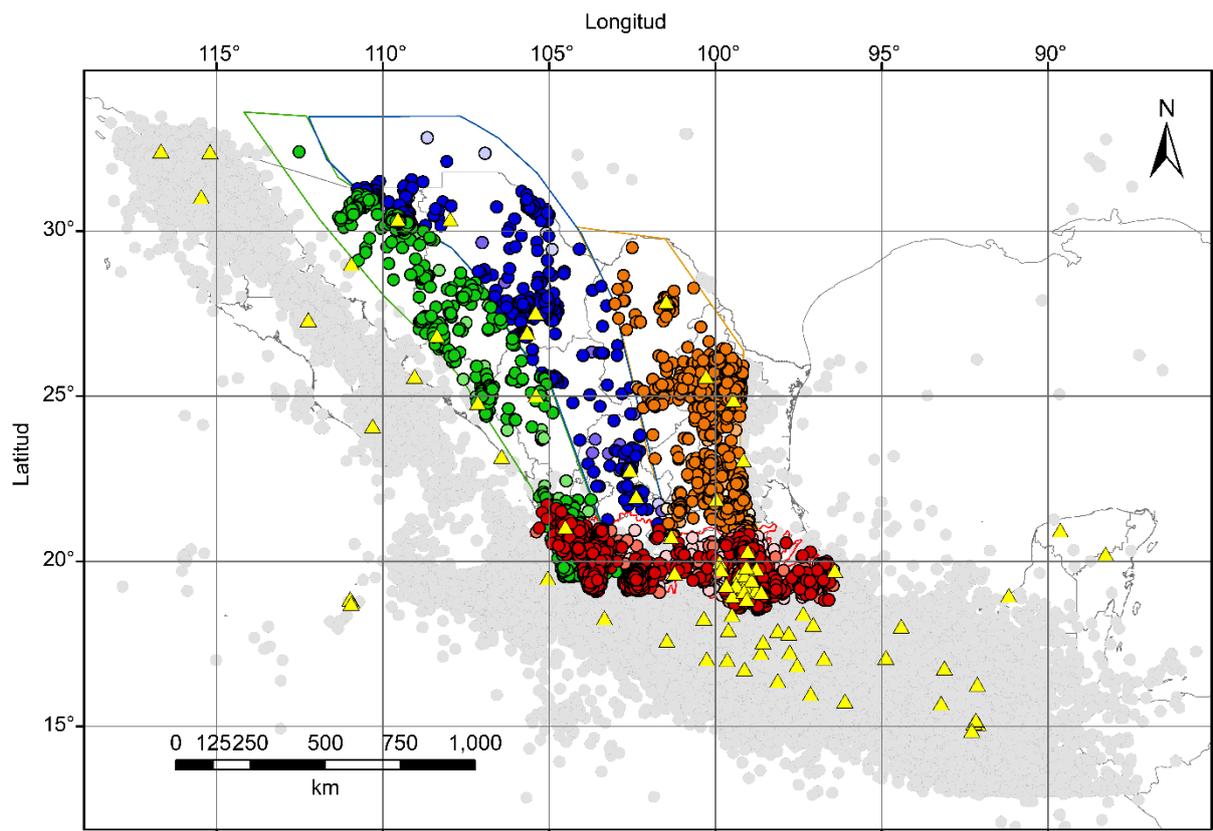


Figura 4.2 Sismicidad en la República Mexicana reportada por el SSN desde 1990 hasta noviembre de 2022. La sismicidad de la zona Sierra Madre Occidental (SMO) se representa en color verde, la que corresponde a la región de Cuencas y Cordilleras (BAR) en color azul, a la Cuenca de Burgos (BB) en color naranja y a la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) en color rojo. La tonalidad depende de su evolución temporal; el tono más claro corresponde a eventos entre que ocurrieron antes de 1990; un tono intermedio a eventos entre 1990 y 2010 y el tono más intenso a sismos de 2010 a 2022. Los triángulos amarillos representan las estaciones sismológicas de banda ancha del SSN.

Con la finalidad de delimitar temporalmente los catálogos de SMO, BAR, BB y FVTM es importante tener en cuenta el comportamiento de la tasa de sismicidad del catálogo completo del SSN, como de las cuatro zonas por separado. Este análisis se describe a continuación.

La gráfica que presenta el número de eventos contra el tiempo para todo el catálogo se observa en la Figura 4.3. Como se puede ver a lo largo del tiempo, la tasa de sismicidad en México ha tenido cambios importantes.

En el trabajo de Pérez-Campos et al. (2018) se explican los cambios en el monitoreo sísmico que ha tenido el SSN y que por consecuencia han repercutido en la variación de la tasa de sismicidad. Desde los inicios de catálogo en 1900 y hasta 1974 la localización y magnitud de los sismos reportados fue tomada del trabajo de Kostoglodov & Pacheco (1999), solo se reportaban sismos de  $M > 6.5$ . Luego, en la Figura 4.3 se observa un cambio en la tasa de sismicidad que se mantiene hasta 1986; durante este periodo, en 1974, Jaime Yamamoto introdujo el uso de un código computacional para estimar la localización de los eventos y en 1983 se introdujo el cálculo de la magnitud de duración para sismos de magnitud más pequeña. Después, se nota un cambio en la tasa de sismicidad que se mantiene hasta 2010, esto se debe a una expansión de la red hacia al norte y al intercambio de datos con otras agencias que comenzó en el 2006. El último cambio importante se ve reflejado en la tasa de sismicidad en el 2016.

En la Figura 4.4, se muestran las gráficas de número acumulado de eventos contra el tiempo para cada una de las regiones de estudio. En la región FVTM y BB se pudieron detectar sismos a partir de 1912, aunque en BB solo se tenía el registro de un sismo hasta después de 1970. El primer sismo en la región SMO se detectó hasta 1932 y en BAR existen sismos reportados hasta 1974.

Alrededor de 1988 la telemetría comenzó y en ese entonces la Red Convencional de estaciones sísmicas estaba formada por 13 estaciones, después a principios de los noventa nació la Red de Banda Ancha, pero, en todos estos años las redes se concentraron en la parte del centro y el sur de México (Pérez-Campos et al., 2018). Por esta razón el catálogo para la FVTM tiene un mayor incremento en el número de sismos respecto a las regiones del norte, BAR, BB y SMO.

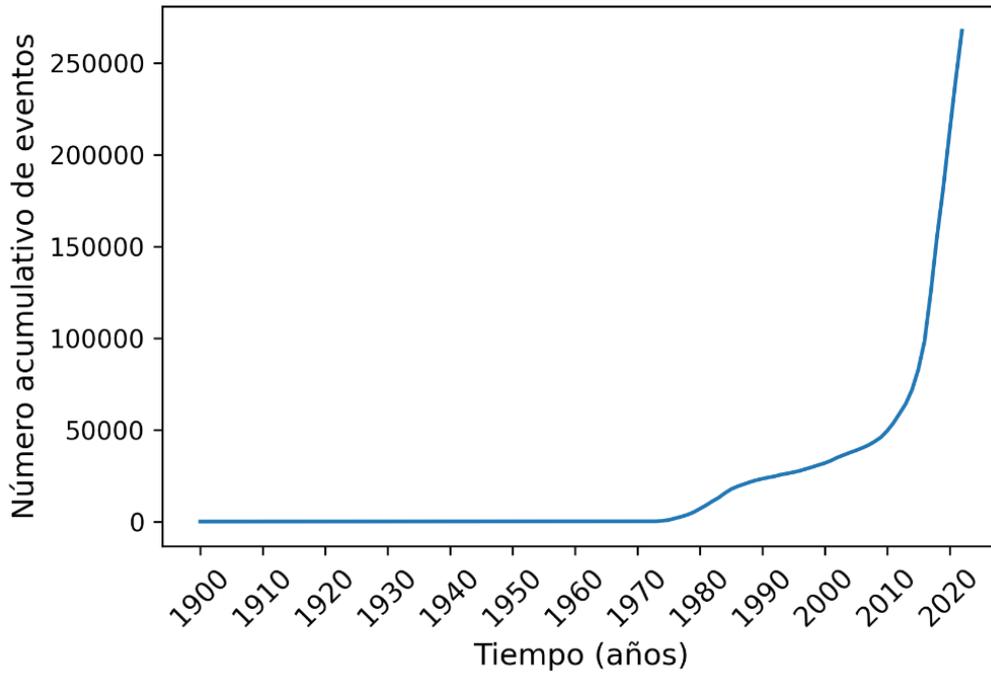


Figura 4.3 Número acumulativo de eventos en el tiempo para todo el catálogo del SSN. Cambios importantes en la tasa de sismicidad se observan después de 1970, 1985 y 2010. Estos cambios están directamente relacionados a los cambios en el monitoreo.

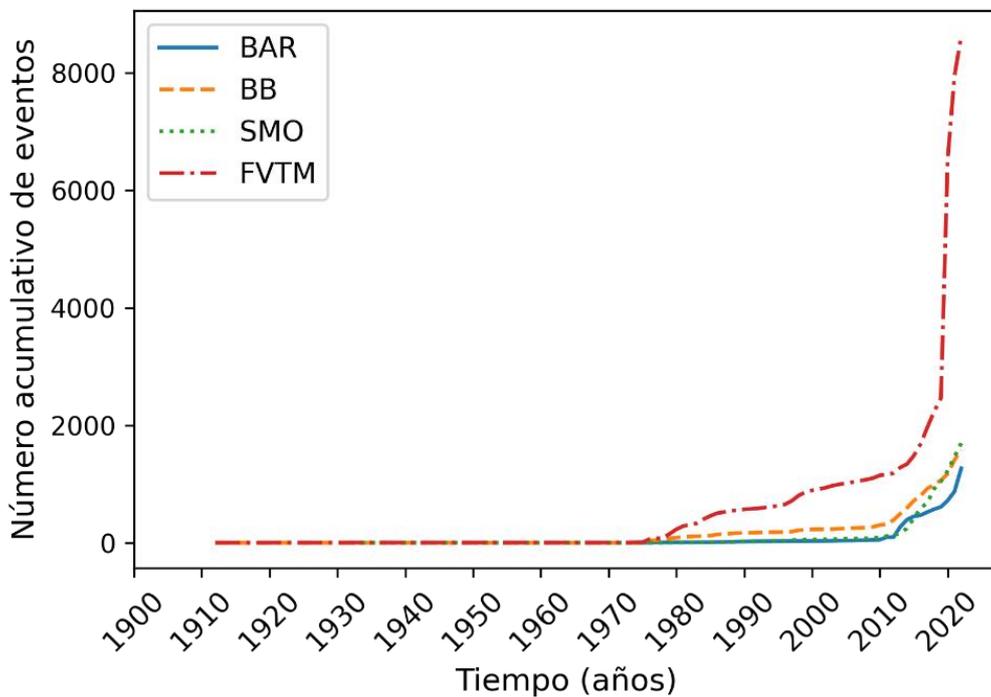


Figura 4.4 Número acumulativo de eventos en el tiempo para las regiones de estudio BAR (azul), BB (naranja), SMO (verde) y FVTM (rojo). Un incremento importante en la tasa de sismicidad para las zonas BAR, BB y SMO, se observa después de 2010. Para la región de FVTM se observa un primer cambio después de 1970, un segundo cambio casi en el año 2000, después la tasa de sismicidad se mantiene casi constante hasta 2020. En 2020 y 2021 ocurrieron dos secuencias sísmicas numerosas en la zona FVTM lo que provocó el cambio tan abrupto en la tasa de sismicidad.

En las regiones del norte, de acuerdo con la Figura 4.4, la tasa de sismicidad tuvo un cambio importante después de 2010, que puede deberse a la expansión de la red sísmica hacia el norte en 2006. Este cambio se da en BB en 2011 y en SMO y BAR a partir de 2012. Después de estos años la tasa de sismicidad se mantiene casi constante para las tres zonas. En el caso de la región FVTM la tasa de sismicidad cambio ligeramente en 2012 y se mantuvo casi constante hasta 2020 cuando se presentaron dos enjambres sísmicos en Michoacán esta gran cantidad de sismos provocó el aumento considerable de la sismicidad para este catálogo.

Teniendo en cuenta las observaciones anteriores, con la finalidad de mantener una tasa de sismicidad más o menos constante para todas las regiones de estudio se decidió delimitar el análisis de este trabajo de 2012 a finales de noviembre de 2022.

#### 4.1 VALOR $b$ , DIMENSIÓN FRACTAL $d_f$ Y UMBRAL DE DISTANCIA $\eta_0$

Como se mencionó anteriormente, la metodología del vecino más cercano para la detección de eventos agrupados esta parametrizada por el valor  $b$ , el valor de dimensión fractal  $d_f$  de los epicentros y un umbral de distancia  $\eta_0$ .

Para cada catálogo, el valor  $b$  que se utiliza para el algoritmo de agrupamiento es el reportado por Zuñiga et al. (2017), el cual fue calculado por el método de máxima verosimilitud. La magnitud mínima  $M_{min}$  para cada zona fue fijada a la magnitud de completitud  $M_c$  que también es reportada por Zúñiga et al. (2017).

El valor de dimensión fractal  $d_f$  fue obtenido con ZMAP (Wiemer, 2001) que utiliza el método de correlación integral para calcular dicha dimensión. Se tomó en cuenta que en el periodo en el que se calculó dicho valor no tuviera grupos de eventos de tamaño importante. El rango de distancia, es decir,  $R_{min}$  y  $R_{max}$  fueron calculadas con la prueba de la pendiente de tal manera que la derivada de la correlación integral tuviera un comportamiento más o menos constante como se explicó en el segundo capítulo de este trabajo.

Mientras que, el valor de  $\eta_0$  fue calculado a partir de un modelo de mezcla Gaussiano.

El resumen de los parámetros antes mencionados para cada región se muestra en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Resumen de los datos y parámetros importantes para cada región de análisis. Número total de sismos que ocurrieron de 2012 a 2022 con una  $M \geq M_c$  en cada región para todo el catálogo del SSN.

	<b>BAR</b>	<b>BB</b>	<b>SMO</b>	<b>FVTM</b>
<b>Total de sismos</b>	1268	1583	1695	8628
<b>Sismos de 2012 a 2022 con <math>M \geq M_c</math></b>	666	1004	1534	7324
<b><math>M_{max}</math></b>	5.4	4.5	5.1	4.8
<b><math>M_{min} = M_c</math></b>	2.9	3.0	3.0	2.1
<b>Valor <math>b</math></b>	0.68	0.6	0.65	0.78
<b>Dimensión fractal, <math>d_f</math></b>	0.73	1.20	1.42	1.62
<b>Valor umbral de distancia, <math>\eta_0</math></b>	-3.54	-2.65	-3.4	-4.06

El valor  $b$  de la relación  $G$ - $R$ , la dimensión fractal ( $d_f$ ) y el valor umbral de distancia ( $\eta_0$ ) se usaron en la metodología de agrupamiento.

## 5 RESULTADOS

---

A continuación, se muestran los resultados del procesamiento. Para cada zona se incluyen los resultados después de aplicar el algoritmo de agrupación de sismos, los resultados tras la revisión manual y las secuencias que son identificadas como enjambres sísmicos.

### 5.1 CUENCAS Y CORDILLERAS (BAR)

Los resultados de la distribución del  $\log \eta_{ij}$  para la región BAR se muestra en la Figura 5.1, en donde podemos observar un comportamiento bimodal. Aunque, no se observa una definición clara de cada modo, la separación entre ellos es visible. Por lo tanto, se pudo llevar a cabo la separación entre eventos agrupados y sismicidad de fondo utilizando la técnica del vecino más cercano.

La Tabla 5.1 muestra el número de familias y el tamaño de cada una para el caso de la región BAR. En este caso, 174 (26.13%) eventos forman parte de la sismicidad de fondo, mientras que 492 (73.87%) sismos se encuentran en un grupo de dos o más eventos. En la Figura 5.2 se observa la distribución espacial y temporal de las familias, así como la sismicidad de fondo para la región BAR.

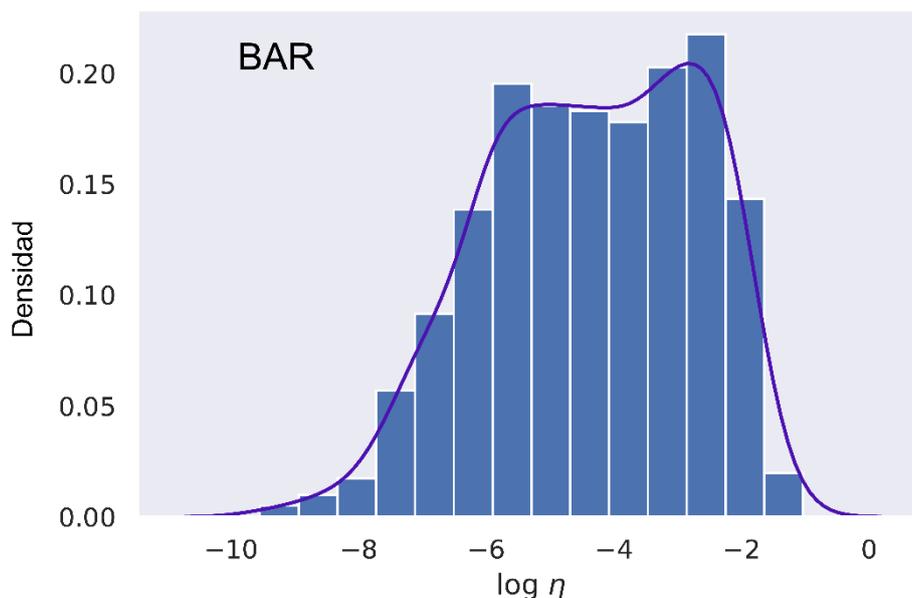


Figura 5.1 . Densidad del  $\log \eta_{ij}$  para el catálogo de la región de Cuencas y Cordilleras (BAR). Se observa un comportamiento bimodal. El modo de la derecha está relacionado a la sismicidad de fondo y el de la izquierda a la sismicidad agrupada.

Tabla 5.1 Número de familias resultantes para la región de Cuencas y Cordilleras (BAR) después de aplicar el algoritmo de agrupamiento. El número de sismos en cada grupo se muestra en la fila superior.

<b>Eventos</b>	2	3	4	5	6	7	8	9	11	24	40	44	159
<b>Familias</b>	41	14	3	4	2	3	2	1	1	1	1	1	1

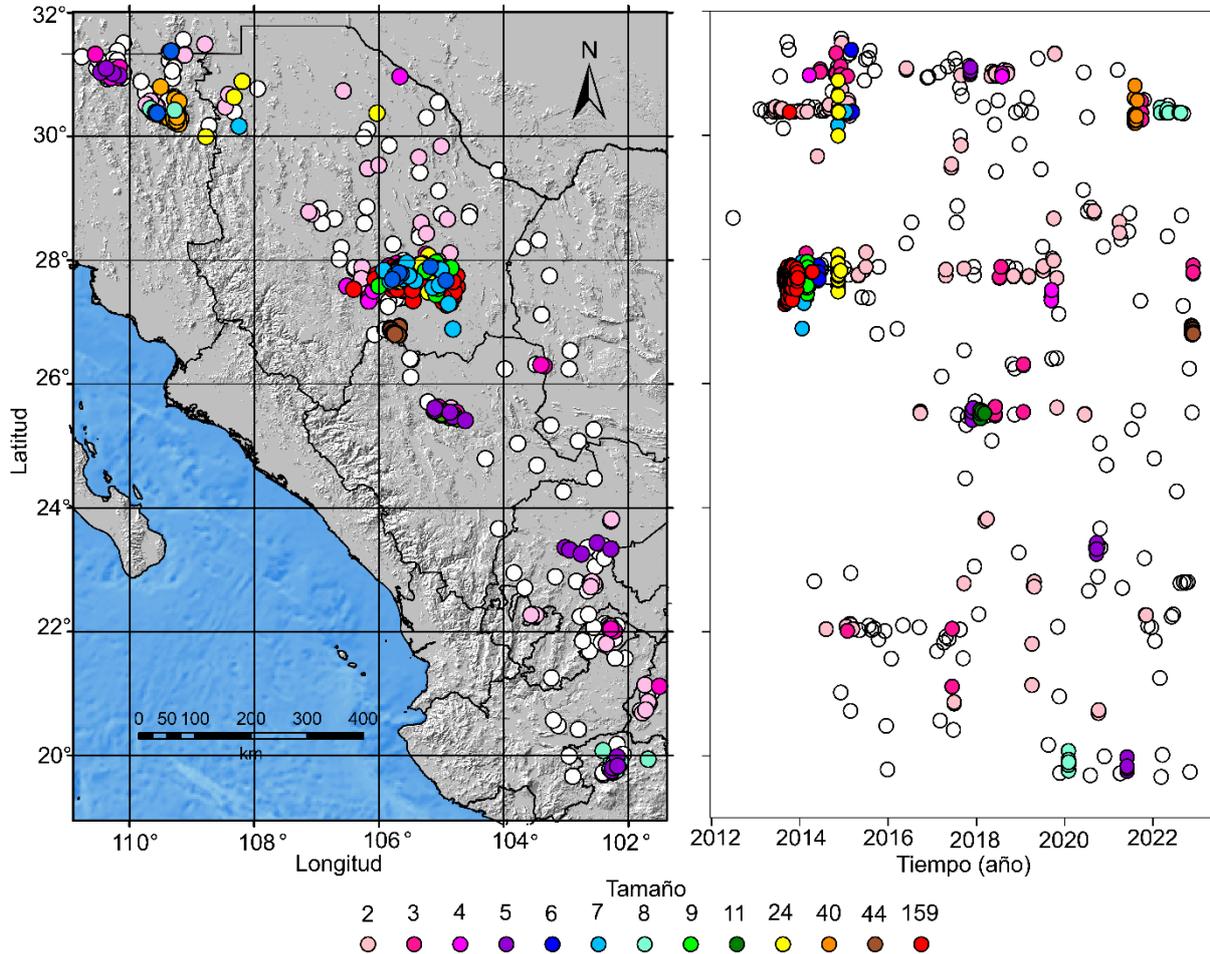


Figura 5.2 Izquierda: Distribución espacial de los grupos de sismos de la región BAR antes de la revisión manual. Derecha: Distribución espacial en latitud y distribución temporal de los mismos. El color está dado por el número de sismos en cada grupo. La superposición de los eventos se da conforme al número de sismos en cada grupo. Los grupos de 2, 3 y 4 sismos se colocaron primero, seguido por las secuencias de mayor tamaño hasta llegar a la capa de grupos de 5 sismos. La sismicidad de fondo es representada por los círculos en color blanco.

Como podemos observar existen algunos sismos que muestran una separación espacial o temporal mayor que la que se espera que exista entre los sismos que conforman un enjambre sísmico. Por lo tanto, se hizo una revisión manual de las familias para descartar aquellos sismos con una separación espacial o temporal atípica en comparación al resto de los miembros de su grupo.

Después de hacer la revisión, los resultados se muestran en la Tabla 5.2 y en la Figura 5.3. El número de eventos que conforman la sismicidad de fondo aumentó a 235 (35.28%). Entonces, el número de sismos que están en un grupo disminuyó a 431 (65.72%). No obstante, es evidente

que la mayor parte de la sismicidad en esta región se encuentra de forma agrupada; 295 sismos, que equivalen a un 44.29% de la sismicidad del catálogo, forman parte de un grupo de cinco o más eventos.

Tabla 5.2 Número de familias resultantes para la región de Cuencas y Cordilleras (BAR) después de realizar la revisión de los grupos. El número de sismos en cada grupo se muestra en la fila superior.

<b>Eventos</b>	2	3	4	5	7	8	9	15	40	44	155
<b>Familias</b>	41	14	3	2	2	1	1	1	1	1	1

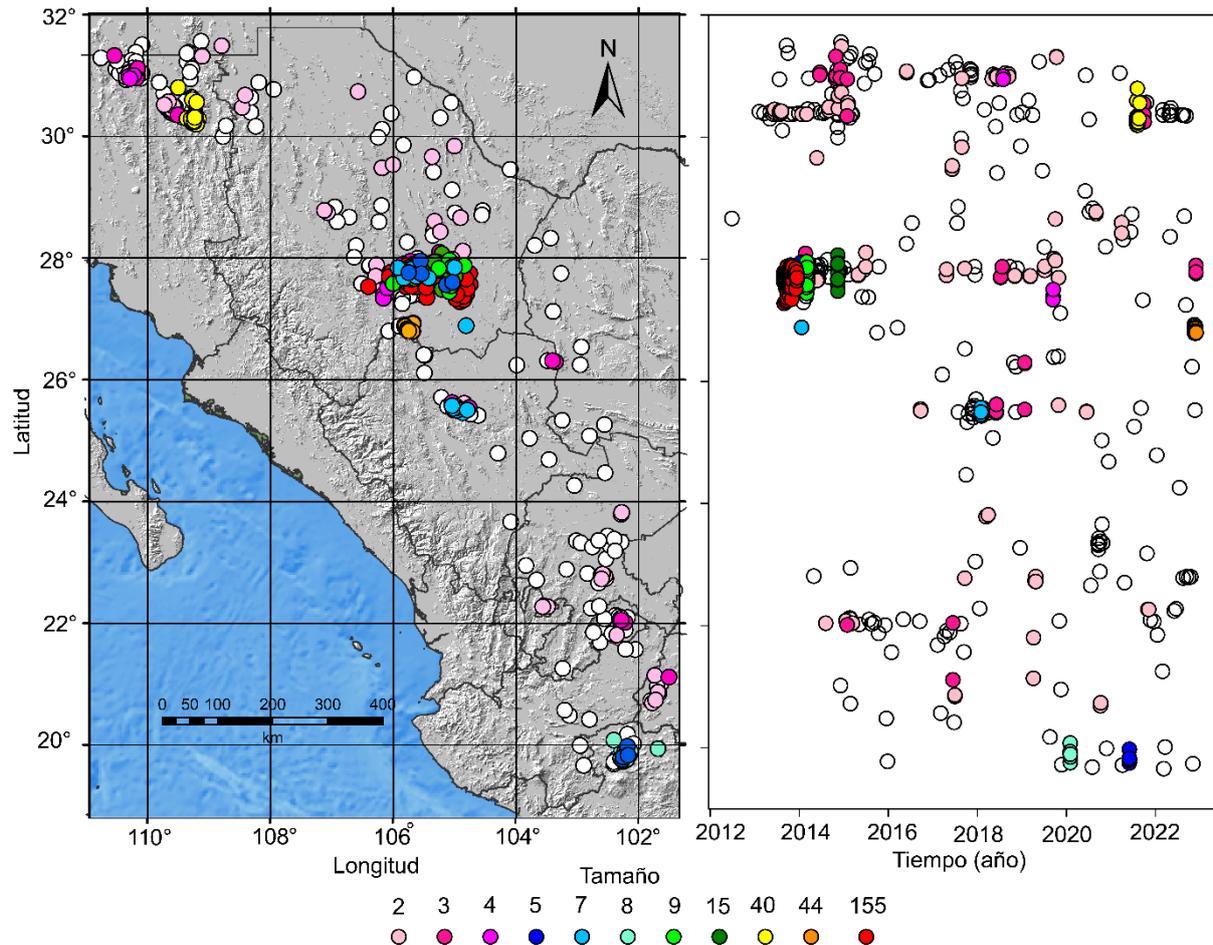


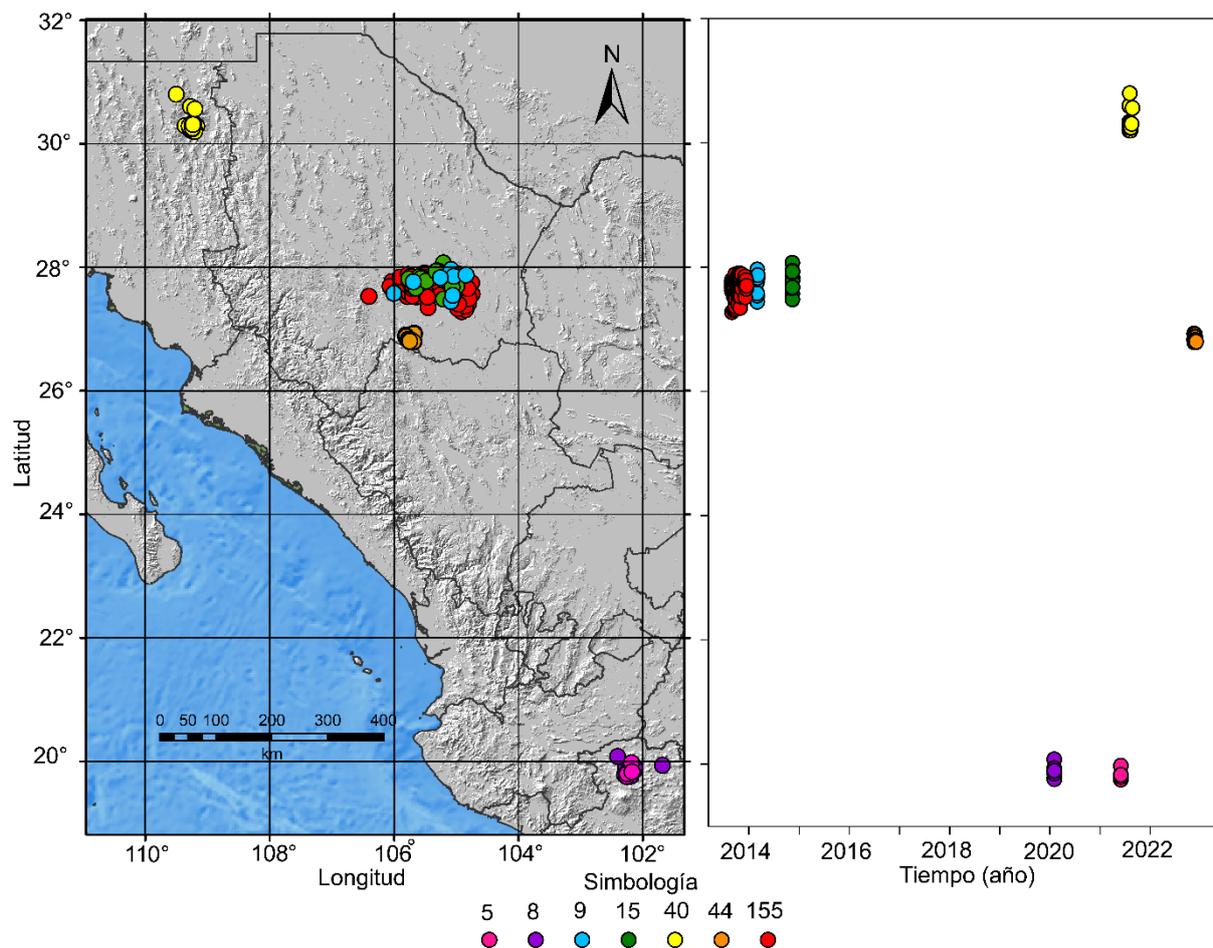
Figura 5.3 Izquierda: Distribución espacial de los grupos de sismos de la región BAR después de la revisión. Derecha: Distribución espacial en latitud y la distribución temporal de los sismos. El color está dado por el número de sismos en cada grupo. La superposición de los eventos se conforme al número de sismos en cada grupo. Los grupos de 2, 3 y 4 sismos se colocaron primero, seguido por las secuencias de mayor tamaño hasta llegar a la capa de grupos de 5 sismos. La sismicidad de fondo es representada por los círculos en color blanco.

La familia más grande para la región BAR está conformada por ciento 155 sismos. Existen otros dos grupos de un tamaño importante, uno 40 y otro de 44 sismos. Como se observa, los cambios más importantes tras la revisión se dieron para las familias con menos eventos. La familia de 24 eventos se redujo a 15. Algunas familias de cinco, siete, y ocho sismos no fueron consideradas con la agrupación necesaria para ser un posible enjambre sísmico, al igual que las

familias de seis eventos que fueron completamente descartadas.

De cada región los grupos revisados se analizaron para identificar aquellos que tienen un comportamiento de enjambre sísmico. Por lo tanto, se hizo un análisis de magnitud respecto al tiempo y número de sismos respecto al tiempo a los grupos de más de cinco eventos. Los grupos que se clasificaron como enjambres sísmicos fueron aquellos en los que se observó que las magnitudes entre los eventos eran similares, así que no obedecen la ley de Båth. Además, la tasa de sismicidad comienza y termina de manera abrupta, de tal manera que, no se muestra un comportamiento descrito por la ley de G-R.

Para la región BAR de un total de diez grupos, siete secuencias, un 70% de los grupos presentan un comportamiento de enjambre y pueden clasificarse de esta manera, la distribución espacial y temporal de estos enjambres se muestra en la Figura 5.4.



Los grupos con un comportamiento de enjambre se localizan en regiones muy específicas de la zona BAR, al norte y al sur. Cuatro de los siete en la región se localizan en el estado de Chihuahua. Entre los 20.5° y 26° de latitud norte no se observa ninguna secuencia tipo enjambre. Es importante tener en consideración que las secuencias que se encuentran al sur que tienen un tamaño de 5 y 8 sismos, que ocurrieron en 2021 y 2020 pueden formar parte de otros enjambres más numerosos que se presenten en la región de la FVTM.

Temporalmente, los enjambres en esta zona ocurrieron antes del 2016 y después de 2020. Entre estos años solo se detectó un grupo de 7 sismos que puede observarse en la Figura 5.3, sin embargo, su comportamiento no reflejaba las características de un enjambre sísmico.

En la Tabla 5.3 se muestra la información principal de los enjambres sísmicos en la región BAR. Los enjambres con mayor número de sismos se encuentran en el sur del estado de Chihuahua. Uno de ellos con 155, ya ha sido estudiado por Suárez et al. (2016), tuvo una duración de cuatro meses, de agosto a diciembre de 2013.

Tiempo después en esa misma zona se presentaron dos enjambres sísmicos. Uno de ellos está conformado por nueve sismos que ocurrieron en marzo de 2014. El otro enjambre tuvo lugar el 13 de noviembre de 2014 con un total de quince sismos.

Al sur de las secuencias anteriores en la región Hidalgo del Parral, tuvo lugar otro enjambre sísmico que comenzó el 15 de noviembre del 2022 y cuyo último evento encontrado en este trabajo ocurrió el 30 de noviembre del mismo año. Esta secuencia incluye un total de 44.

En la parte norte de Sonora se identificó un enjambre sísmico de un total de 40. Esta secuencia comenzó en julio de 2021 y terminó en agosto del mismo año. Esta secuencia contiene una parte de los sismos de un enjambre más numeroso que se presentó en Sonora en el 2021. La otra parte de la sismicidad fue identificada como un enjambre de 104 sismos en la región de SMO, cuyos resultados se describen en el apartado 5.3 de este trabajo.

Los sismos que ocurren en Michoacán parecen presentar al igual que el resto de las secuencias mencionadas un comportamiento de enjambre, sin embargo, son secuencias con un número pequeño de cinco y ocho eventos, que son parte de las de secuencias más grandes registradas en esta zona en los años 2020 y 2021, pero, que fueron añadidas a este catálogo como consecuencia de la intersección de la región BAR y FVTM. La comparación de secuencias en la zona de traslape para identificar lo anterior se describe en la sección 5.5 de este trabajo.

Con las observaciones descritas anteriormente y con la finalidad de no duplicar la cantidad de enjambres detectados, se considera que para la región BAR el total de enjambres identificados es de cuatro que se pueden identificar en la Tabla 5.3.

*Tabla 5.3 Características principales de los enjambres sísmicos que se identificaron en la región BAR.*

ID	Número de sismos	Magnitud mínima	Magnitud máxima	Fecha y hora UTC del primer evento	Fecha y hora UTC del último evento	Duración en días
5*	5	3.4	3.6	31/05/2021 13:02:37	31/05/2021 22:09:47	0.38
8*	8	3.2	3.7	01/02/2020 02:21:21	02/02/2020 20:14:46	1.74
9	9	3.1	4.0	02/03/2014 06:01:38	06/03/2014 09:05:21	4.13
15	15	3.4	4.3	13/11/2014 08:38:52	13/11/2014 21:55:39	0.55
40*	40	3.0	4.4	31/07/2021 21:44:43	24/08/2021 22:30:13	24.03
44	44	2.9	4.3	15/11/2022 22:11:09	30/11/2022 04:15:21	14.25
155	155	3.0	5.4	28/08/2013 02:24:38	15/12/2013 05:24:32	109.12

*El ID corresponde al identificador en la simbología del mapa de enjambres sísmicos de la región BAR y que en este caso es exactamente igual al número de sismos. Las secuencias que forman parte de los enjambres sísmicos en Michoacán de 2020 y 2021, así como, la secuencia de cuarenta sismos que forma parte de otro enjambre más numeroso que se localiza en Sonora se identifican con \*.*

En la Figura 5.5 se muestran los histogramas de profundidad de los enjambres identificados de la región BAR, el número en la parte superior de cada histograma indica el ID con el que se identifican en la Tabla 5.3. En este caso se omiten los histogramas de los grupos de 5 y 8 eventos. Tampoco se muestra el histograma del enjambre de 40 sismos porque este forma parte de una secuencia de mayor tamaño, 144 sismos, cuyo histograma se mostrará en la sección de SMO.

En la Figura 5.5 se muestran los histogramas de profundidad de los enjambres que se ubican en el estado de Chihuahua. Se puede observar que la sismicidad en los enjambres de 9, 15 y 155 se concentra en los primeros 20 km. Mientras que para la secuencia de 44 eventos que se localiza en Hidalgo del Parral, los sismos se ubican sobre todo en una profundidad promedio de 5 km.

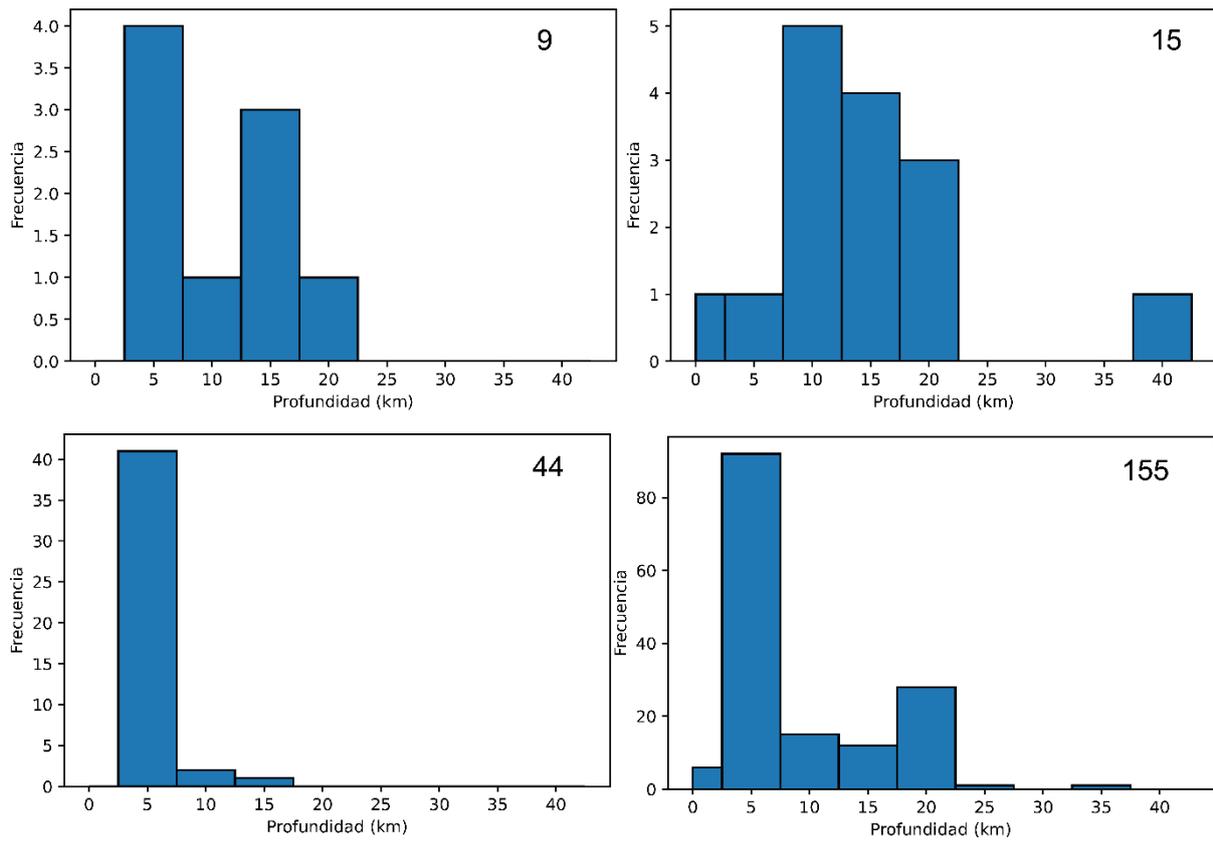


Figura 5.5 Histogramas de profundidad de los enjambres identificados en la región BAR. El número en la parte superior indica el ID con el que se identifica cada enjambre de acuerdo con la Tabla 5.3.

## 5.2 CUENCA DE BURGOS (BB)

La gráfica de densidad del  $\log\eta_{ij}$  para el catálogo de Cuenca de Burgos (BB) se muestra en la Figura 5.6. En este caso, el modo asociado con la sismicidad agrupada es visiblemente más pequeño que el asociado con la parte no agrupada, de hecho, no se observa una separación muy clara entre uno y otro modo.

Los primeros resultados del algoritmo de agrupación se pueden ver en la Tabla 5.4, que nos indica el número de familias que existen de cada tamaño. El total de eventos que conforman este catálogo es de 1004, de los cuales 371 (36.95%) fueron clasificados como sismicidad de fondo; por lo tanto, 633 (63,04%) de los sismos son parte de algún grupo de sismos. No obstante, es importante observar que 291 (28.98%) de los sismos se encuentran en grupos de menos de cinco sismos, por lo tanto, no tienen la cantidad de sismos necesaria para que puedan ser identificados como enjambres sísmicos.

Los resultados de la distribución espacial y temporal para el catálogo BB se muestran en Figura 5.7.

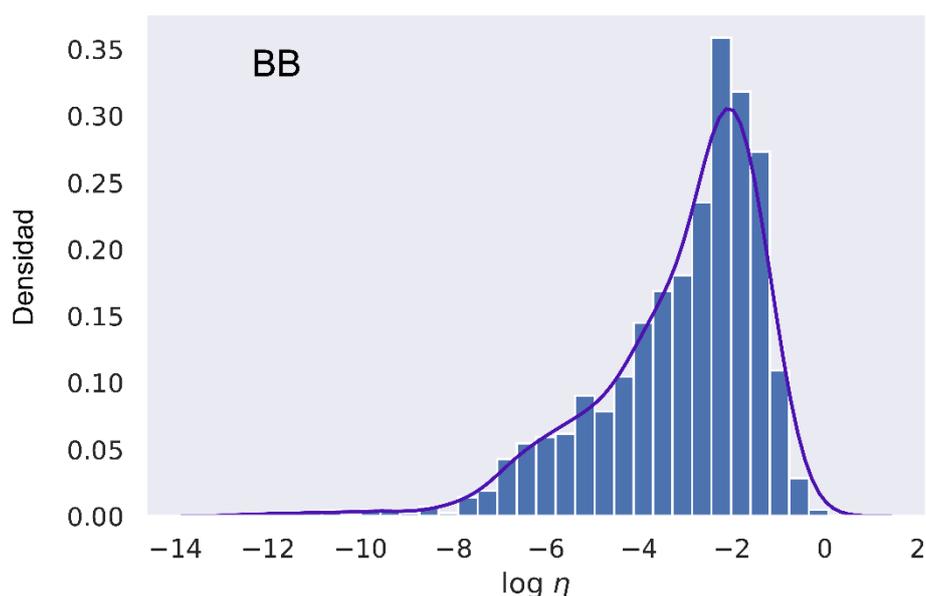


Figura 5.6 Densidad del  $\log\eta_{ij}$  para el catálogo de la región de Cuenca de Burgos (BB). Se observa un comportamiento bimodal, aunque en este caso el modo asociado con la sismicidad agrupada (izquierda) no parece separarse claramente de la sismicidad de fondo (derecha).

Para esta zona se realizó una modificación del valor umbral  $\eta_0$  obtenido con el modelo de mezcla Gaussiana, además junto con los resultados que se muestran en la Tabla 5.5, sugieren que para esta zona la revisión manual de los resultados es fundamental, pues puede haber una cantidad mayor de eventos mal clasificados en comparación con la región BAR.

Tabla 5.4 Número de familias resultantes para la región de Cuenca de Burgos (BB) antes de realizar la revisión de los grupos. El número de sismos en cada grupo se muestra en la fila superior.

<b>Eventos</b>	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	16	39	71	81
<b>Familias</b>	70	37	10	2	7	2	1	3	1	1	1	1	1	1	1

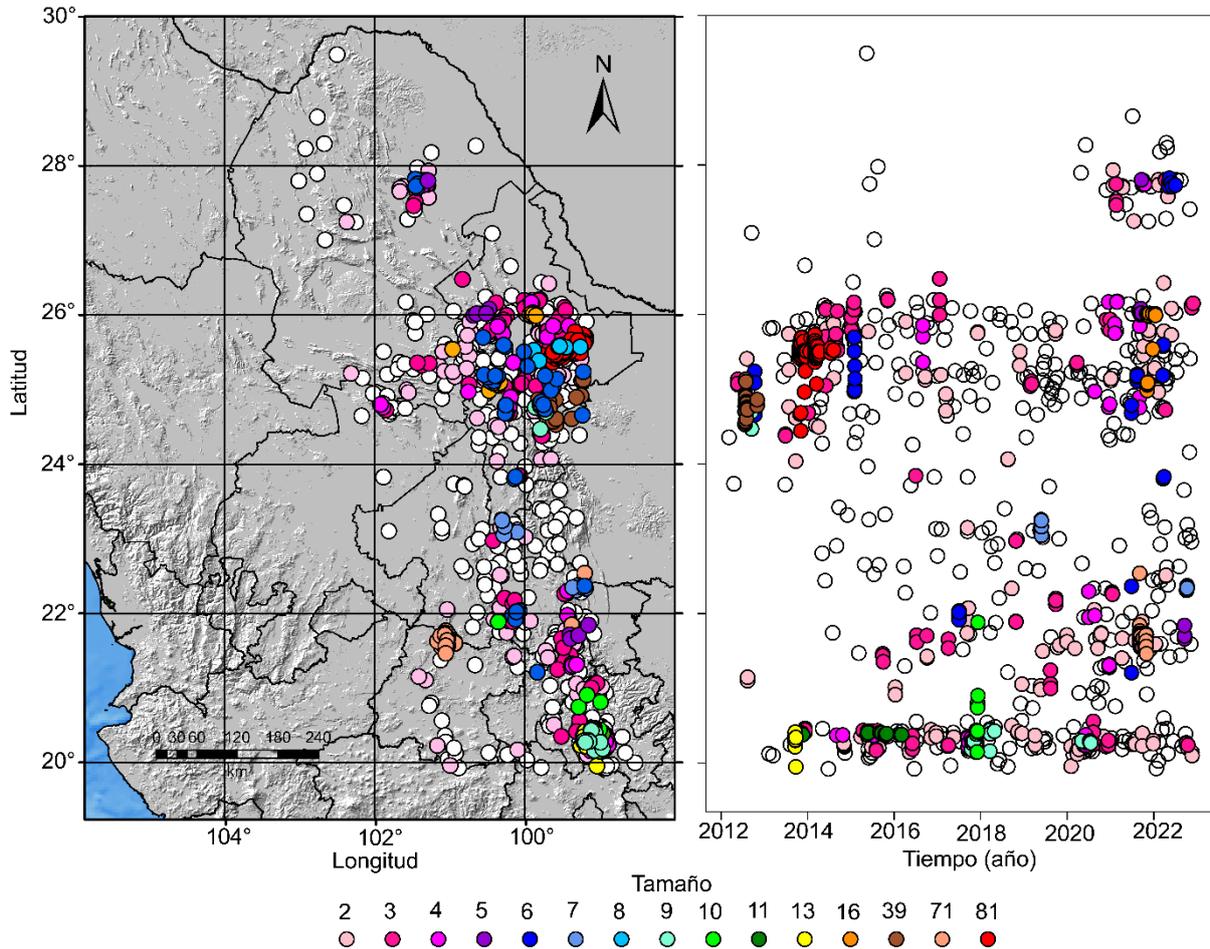


Figura 5.7 Izquierda: Distribución espacial de los grupos de sismos de la región BB antes de la revisión. Derecha: Distribución espacial en latitud y la distribución temporal de los mismos grupos. El color está dado por el número de sismos en cada grupo. Del lado izquierdo, la superposición de los eventos se da conforme al número de sismos en cada grupo. La sismicidad de fondo, representada por los círculos en color blanco, se colocó primero, después, la capa de grupos de 2, 3 y 4 sismos. Por último, de acuerdo con el número de sismos se colocaron en orden descendente las secuencias de mayor tamaño hasta llegar a la capa de grupos de 5 sismos.

Para esta región hubo algunos cambios importantes. El primero es que la secuencia de 71 sismos, la segunda más grande, se redujo a 56. La secuencia de dieciséis eventos se redujo a ocho. También se eliminaron algunas secuencias que no estaban agrupadas lo suficiente tanto en tiempo como en espacio.

Después de la revisión, la nueva distribución de los eventos por tamaño de grupo de observa en la Tabla 5.5. La cantidad de eventos únicos aumento a 435 (43.33%) un 6.38% más que en los resultados sin revisión. Por lo tanto, la cantidad de sismos agrupados disminuyó a 569

(56.67%). De acuerdo con estos resultados, aún más de la mitad de la sismicidad se encuentra de manera agrupada para la región BB. Aunque, es importante señalar que la cantidad de sismos que pertenecen a un grupo de más de cinco eventos y cuyas características pueden ser analizadas para la identificación de enjambres sísmicos es de 272 (27.09%). Es decir, aproximadamente la cuarta parte de toda la sismicidad. Los resultados de la distribución espacial y temporal después de la revisión de los grupos se muestran en la Figura 5.8.

Tabla 5.5 Número de familias resultantes para la región de Cuenca de Burgos (BB) después de realizar la revisión de los grupos. El número de sismos en cada grupo se muestra en la fila superior.

<b>Eventos</b>	2	3	4	5	6	7	8	9	13	35	56	81
<b>Familias</b>	40	35	13	1	3	2	4	2	1	1	1	1

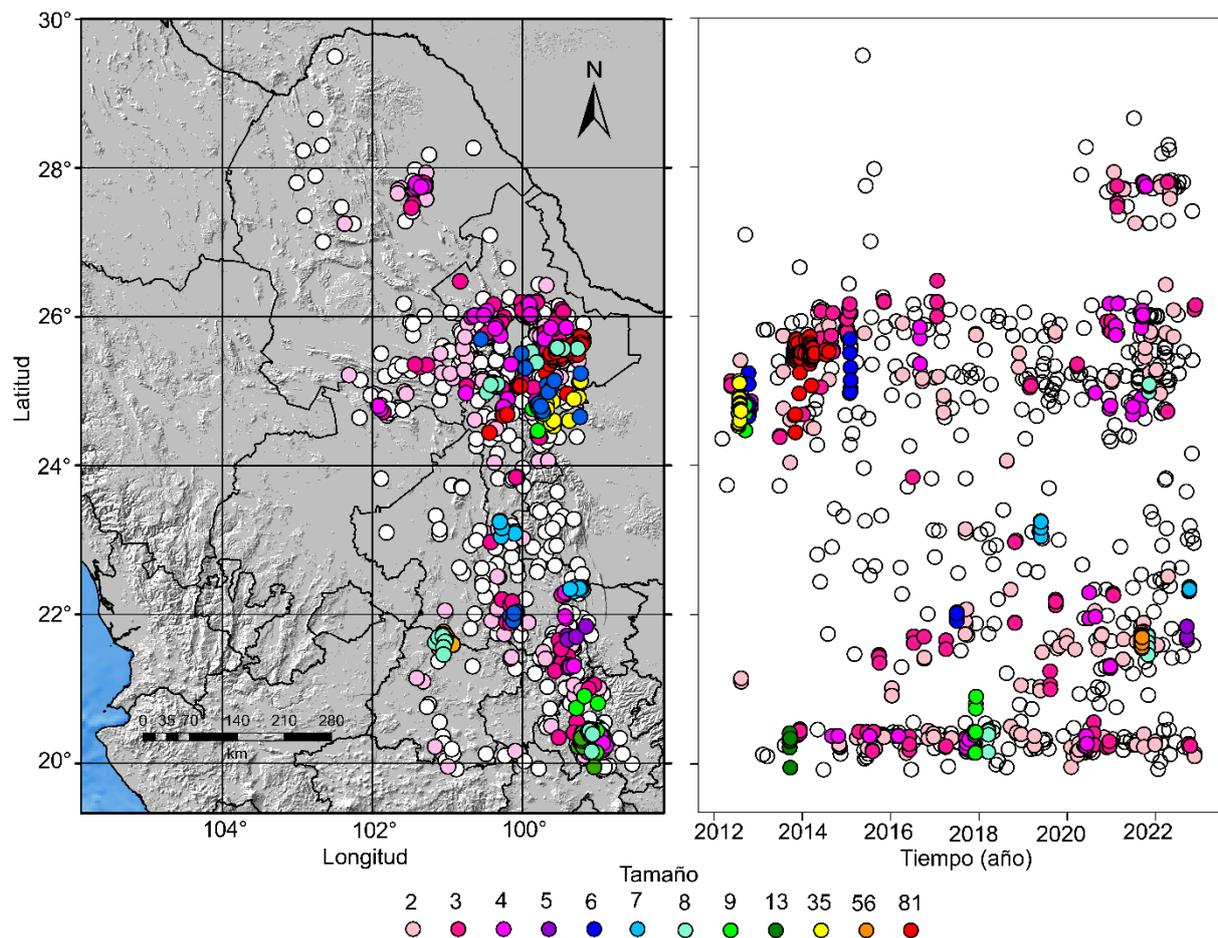
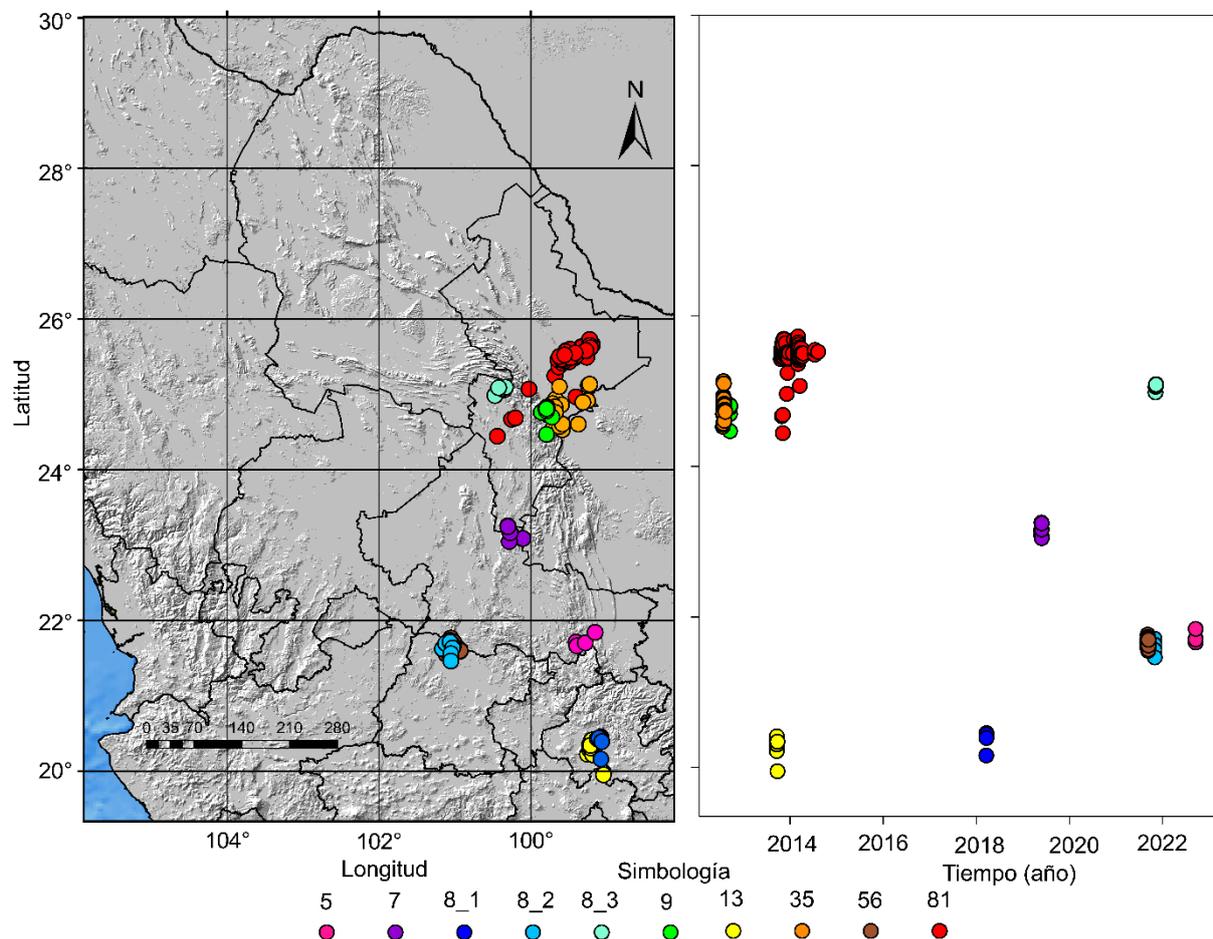


Figura 5.8 Izquierda: Distribución espacial de los grupos de sismos de la región BB después de la revisión. Derecha: Distribución espacial en latitud y la distribución temporal de los mismos grupos. El color está dado por el número de sismos en cada grupo. Del lado izquierdo, la superposición de los eventos se da conforme al número de sismos en cada grupo. La sismicidad de fondo, representada por los círculos en color blanco, se colocó primero, después, la capa de grupos de 2, 3 y 4 sismos. Por último, de acuerdo con el número de sismos se colocaron en orden descendente las secuencias de mayor tamaño hasta llegar a la capa de grupos de 5 sismos.

Los resultados tras el análisis de las secuencias para la identificación de enjambres sísmicos se muestran en la Figura 5.9. Como se puede observar para la zona BB de un total de dieciséis secuencias analizadas, se identificaron un total de diez enjambres sísmicos, es decir, 62.5% de los grupos. Tres de estos posibles enjambres tienen una cantidad más grande de eventos en comparación al resto: 35, 56 y 81. Los enjambres más pequeños tienen un total de cinco, siete, ocho, nueve y trece elementos.

Espacialmente los enjambres de la zona BB se distribuyen aproximadamente entre los 20° y 26° de latitud norte y 99° y 101° de longitud oeste. En el estado de Nuevo León se pudieron identificar cuatro enjambres sísmicos, mientras que, en Hidalgo, San Luis Potosí y Guanajuato, dos enjambres por estado.



Temporalmente, la actividad tipo enjambre en esta zona se distribuye a lo largo del periodo de estudio, es decir, del año 2012 a finales de 2022. Aunque, se puede observar que no se identificaron enjambres sísmicos en los años 2015, 2016 y 2017.

Las características principales de los enjambres sísmicos de la región BB se muestran en la Tabla 5.6.

Dos de los enjambres con mayor número de eventos 35 y 81 ocurrieron en Nuevo León. La secuencia de menor tamaño ocurrió a finales de 2012 y 14 meses después, en octubre de 2013 tuvo lugar el otro enjambre cuyos epicentros se ubicaron al norte de los epicentros de la secuencia anterior. La duración de la secuencia de 81 sismos también fue mucho más larga, extendiéndose por un periodo de casi un año.

También, se puede ver que, en septiembre de 2012, casi un mes después de que finalizara el enjambre de 35 sismos en Nuevo León, comenzó otro enjambre de 9 sismos. Los epicentros de este enjambre se ubicaron al oeste de la secuencia de 35 sismos.

Algunos años después, en noviembre de 2021 se presentó otro enjambre de solo 8 eventos en Nuevo León, que se ubica más al oeste de los enjambres descritos anteriormente.

La segunda secuencia que más sismos contiene de la región BB, con un total de 56, ocurrió en Guanajuato y de acuerdo con los resultados de este trabajo, inicio el 4 de septiembre de 2021 y terminó el 12 de septiembre del mismo año. Casi un mes después, el 27 de octubre comenzó otra secuencia en la misma zona, sin embargo, esta solo tuvo un total de 8 sismos.

En San Luis Potosí, en los límites con Nuevo León se identificó un enjambre de 7 sismos que ocurrió en mayo de 2019. Después, el 17 de septiembre de 2022 se identificó otro enjambre de 5 sismos en el mismo estado, pero, este se localizó al sur del anterior, en los límites con Querétaro.

Las secuencias que se ubican en Hidalgo son dos. La primera comenzó el 17 de septiembre de 2013 y terminó el 23 de septiembre del mismo año, con un total de 13 sismos. La segunda está conformada por un total de 8 sismos que ocurrieron del 19 al 20 de marzo de 2018. Es importante observar los epicentros de las dos secuencias se ubican casi en la misma zona. Como se describe en la sección 5.5 de este trabajo, estos enjambres fueron identificados también en la región de la FVTM.

Con las observaciones descritas anteriormente y con la finalidad de no duplicar la cantidad de enjambres detectados, se considera que para la región BB, el total de enjambres identificados es de ocho, los cuales se listan en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6 Características principales de los enjambres sísmicos que se identificaron en la región BB.

ID	Número de sismos	Magnitud mínima	Magnitud máxima	Fecha y hora UTC del primer evento	Fecha y hora UTC del último evento	Duración días
5	5	3.7	4.0	17/09/2022 09:13:38	17/09/2022 15:34:32	0.26
7	7	3.8	4.3	24/05/2019 23:52:55	28/05/2019 09:31:00	3.40
8_1*	8	3.0	3.9	19/03/2018 05:33:35	20/03/2018 22:06:11	1.69
8_2	8	3.5	4.1	27/10/2021 06:36:41	31/10/2021 16:27:34	4.41
8_3	8	3.7	4.2	06/11/2021 11:18:57	10/11/2021 10:15:03	3.95
9	9	3.1	3.6	14/09/2012 13:29:16	17/09/2012 08:22:20	2.79
13*	13	3.1	4.0	17/09/2013 10:31:05	23/09/2013 08:03:40	5.90
35	35	3.0	3.6	21/07/2012 18:32:07	10/08/2012 11:28:40	19.71
56	56	3.5	4.5	04/09/2021 09:38:25	12/09/2021 21:45:02	8.50
81	81	3.1	4.5	19/10/2013 17:22:17	08/08/2014 12:18:31	292.79

El ID corresponde al identificador en la simbología del mapa de enjambres sísmicos de la región BB. Las secuencias que fueron identificadas en el estado de Hidalgo en la región BB y en la zona de la FVTM se resaltan con \*.

En la Figura 5.10 se muestran los histogramas de profundidad de los enjambres identificados de la región BB. En este caso se omiten los histogramas del grupo de 8 y 13 que se mostrarán en la sección de FVTM. Como se puede ver hay enjambres en los que la profundidad promedio de los eventos es de 5 km, en algunos casos hay sismos con una profundidad promedio que alcanza los 10 km. La sismicidad de las secuencias con 9, 35 y 81 sismos que se localizan en Nuevo León, se encuentra principalmente en los primeros 20 km de profundidad.

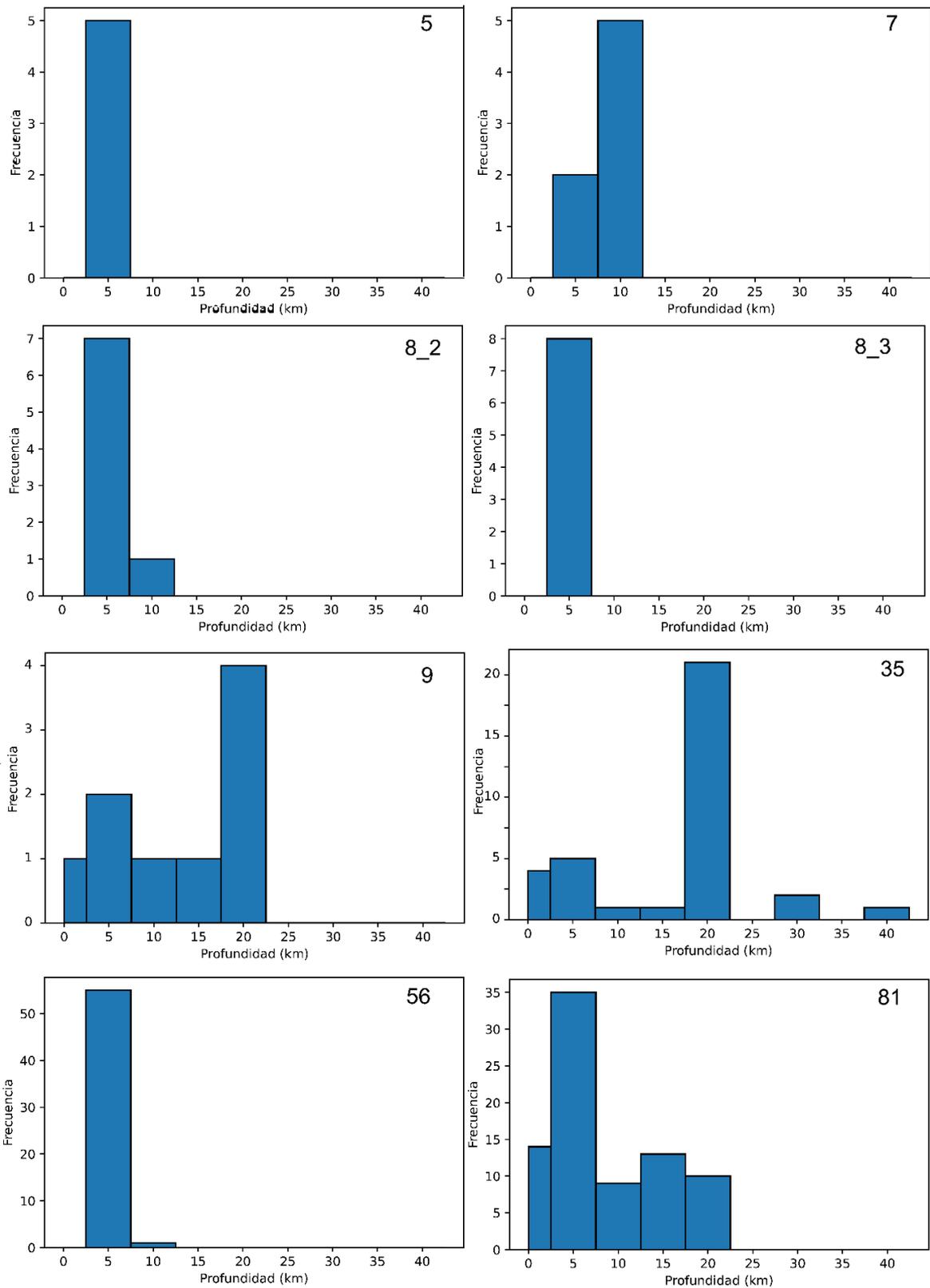


Figura 5.10 Histogramas de profundidad de los enjambres identificados en la región BB. El número en la parte superior indica el ID con el que se identifica cada enjambre de acuerdo con la Tabla 5.6.

### 5.3 SIERRA MADRE OCCIDENTAL (SMO)

En la Figura 5.11 se muestra la densidad del logaritmo de las distancias al vecino más cercano para el catálogo de la región SMO. El comportamiento de la distribución es similar al que se observa para el caso de la región BB. Aunque, los modos no se separan de manera muy clara, la separación de la parte agrupada y la no agrupada sí se puede efectuar, solo se debe tener en cuenta que aumenta la importancia de la revisión manual de cada grupo.

Para la región SMO se tiene un catálogo con 1534 sismos, de los cuales, antes de la revisión manual, 753 (49.09%) constituyen la sismicidad de fondo. Es decir, casi la mitad del catálogo está agrupada y la otra mitad no lo está. En la Tabla 5.7 se puede notar que 359 (23.4%) sismos se agrupan en secuencias de menos de cinco eventos, que es casi la cuarta parte de la sismicidad. El resto de los eventos se agrupan en secuencias de cinco o más eventos. La secuencia más grande es de 106 eventos.

La distribución espacial y temporal de los grupos de sismos antes de la revisión manual para la región SMO se muestran en la Figura 5.12. Como se puede notar no se tiene información de sismicidad de 2012 a finales del 2022 en una latitud de 22° a 24°.

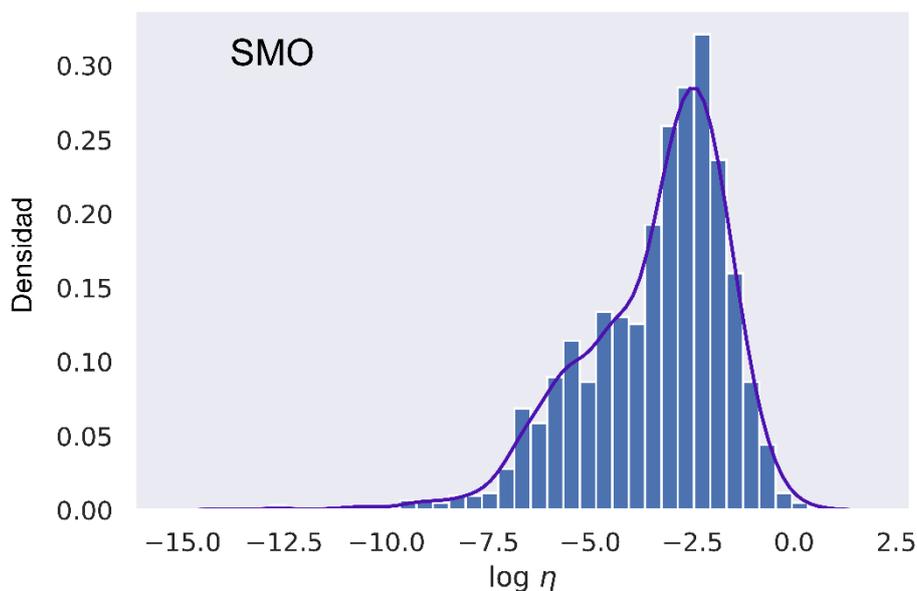


Figura 5.11 Densidad del  $\log \eta_{ij}$  para el catálogo de la región Sierra Madre Occidental (SMO). Se observa un comportamiento bimodal, aunque en este caso el modo asociado con la sismicidad agrupada (izquierda) no parece separarse claramente de la sismicidad de fondo (derecha). Similar al caso de la región BB.

Tabla 5.7 Número de familias resultantes para la región Sierra Madre Occidental (SMO) antes de realizar la revisión de los grupos. El número de sismos en cada grupo se muestra en la fila superior.

Eventos	2	3	4	5	6	7	8	10	11	13	14	15	25	26	31	106
Familias	100	29	18	14	8	1	1	2	1	2	1	2	1	1	1	1

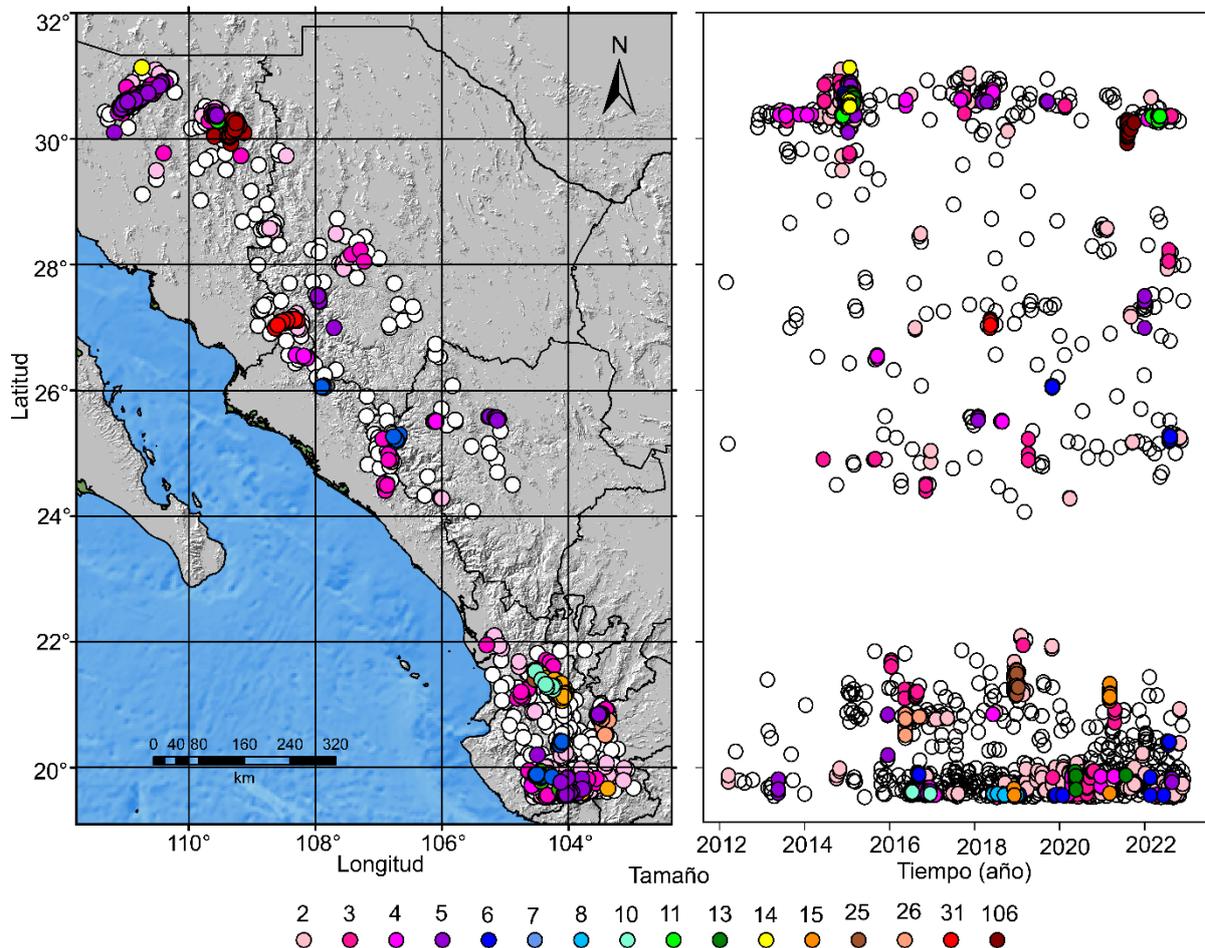


Figura 5.12 Izquierda: Distribución espacial de los grupos de sismos de la región SMO antes de la revisión. Derecha: Distribución espacial en latitud y distribución temporal de los mismos grupos. El color está dado por el número de sismos en cada grupo. La superposición de los eventos se da conforme al número de sismos en cada grupo. La sismicidad de fondo, representada por los círculos en color blanco, se colocó primero, después, la capa de grupos de 2, 3 y 4 sismos. Por último, de acuerdo con el número de sismos se colocaron en orden descendente las secuencias de mayor tamaño hasta llegar a la capa de grupos de 5 sismos.

En la Figura 5.12 se puede observar que en el año 2015 ocurrieron en el noroeste de la región SMO, en el estado de Sonora, varios sismos que de acuerdo con los primeros resultados de agrupamiento conforman una secuencia de catorce sismos y otras secuencias de cuatro y cinco sismos. En la revisión manual se determinó que estas secuencias ocurren lo suficientemente cercanas tanto en tiempo como en espacio para formar una sola de un total de 71 sismos.

De igual manera, en la parte sur de la SMO, en el estado de Nayarit, se agruparon varios sismos que formaron secuencias de seis, trece y veinticinco eventos. Sin embargo, estos sismos

ocurren muy cercanos en espacio y tiempo, por lo tanto, también se pueden considerar como una sola secuencia de 44 eventos.

Así que la principal modificación después de la revisión manual consistió en juntar los grupos antes mencionados que conforman ahora secuencias más grandes de eventos.

Los resultados para la región SMO después de la revisión se observan en la Tabla 5.8. Después de la revisión 863 eventos, es decir, el 56.26% se reportan como sismos no agrupados. Por lo que, la cantidad de sismicidad agrupada disminuyó respecto a los resultados anteriores, ya que ahora es solo el 43.74% del catálogo.

De acuerdo con los resultados de la Tabla 5.8, la sismicidad que se encuentra en grupos de más de cinco sismos conforma el 24.25% del total.

La distribución de los grupos tanto en tiempo como en espacio después de la revisión se muestra en la Figura 5.13. Como se puede observar hubo algunas modificaciones, sin embargo, los grupos más grandes y los de menor tamaño se ubican en las mismas zonas antes y después de la revisión.

De un total de veinte secuencias analizadas, dieciocho (90%) muestran un comportamiento que nos permite clasificarlas como un posible enjambre sísmico. La distribución espacial y temporal de estos enjambres se muestra en la Figura 5.14.

La distribución espacial de los enjambres sísmicos de la región SMO se concentra en tres regiones. La primera está ubicada al noroeste de la región aproximadamente entre los 30° y 31° de latitud, la segunda se localiza en la parte central entre los 25° y 28° de latitud y la tercera se ubica al sur entre los 19° y 22° de latitud.

Las secuencias de mayor tamaño, 71 y 104, se ubican en la región noroeste. En la parte central se localizan enjambres sísmicos de menor tamaño, el más grande tiene 31 sismos. En la parte sur los enjambres sísmicos identificados están conformados en su mayoría por una cantidad pequeña de sismos, aunque en el estado de Nayarit hay dos enjambres de mayor tamaño: 14, 44.

Por otro lado, en casi todos los años del periodo de estudio, es decir, de 2012 a finales de 2022, en la región SMO se produjeron enjambres sísmicos.

Tabla 5.8 Número de familias resultantes para la región Sierra Madre Occidental (SMO) después de realizar la revisión de los grupos. El número de sismos en cada grupo se muestra en la fila superior.

<b>Eventos</b>	2	3	4	5	6	9	10	14	25	31	44	71	104
<b>Familias</b>	99	27	5	8	4	1	1	1	1	1	1	1	1

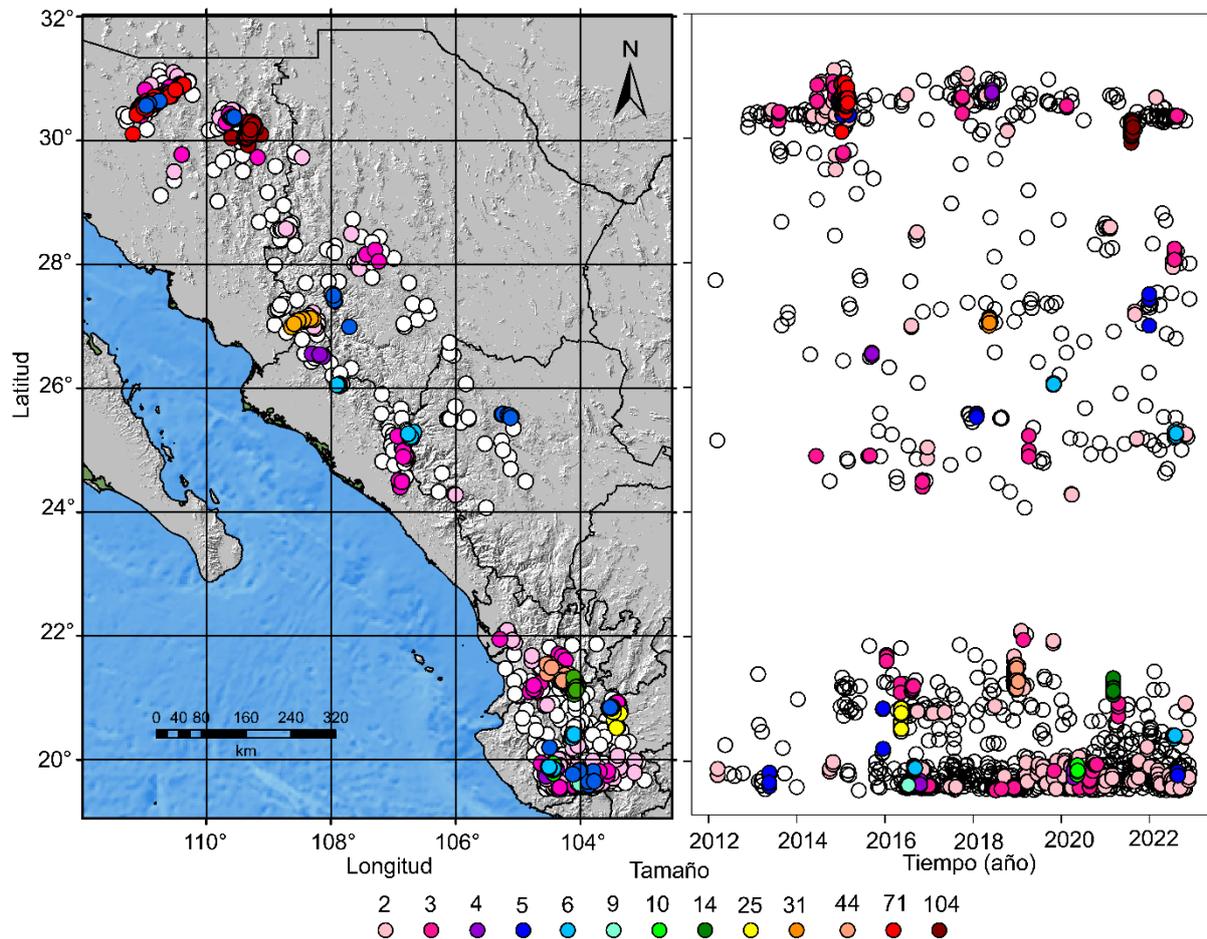


Figura 5.13 Izquierda: Distribución espacial de los grupos de sismos de la región SMO después de la revisión. Derecha: Distribución espacial en latitud y la distribución temporal de los mismos grupos. El color está dado por el número de sismos en cada grupo. La superposición de los eventos se da conforme al número de sismos en cada grupo. La sismicidad de fondo, representada por los círculos en color blanco, se colocó primero, después, la capa de grupos de 2, 3 y 4 sismos. Por último, de acuerdo con el número de sismos se colocaron en orden descendente las secuencias de mayor tamaño hasta llegar a la capa de grupos de 5 sismos.

En la Tabla 5.9 se muestran las características principales de los posibles enjambres sísmicos que se identificaron para la región SMO.

En la región noroeste de la SMO, en el estado de Sonora (Figura 5.14) se identificó la secuencia más grande de todo el catálogo. El número de sismos de este enjambre es de 104 y ocurrió de acuerdo con la fecha UTC del 31 de julio de 2021 al 19 de agosto del mismo año. Esta secuencia se une con otra de cuarenta elementos que como se mencionó en el apartado correspondiente a la zona de BAR de este trabajo.

Cerca de la localización de este enjambre, pero, años antes, el 13 de enero del 2015 ocurrió otro enjambre más pequeño, que solo estuvo conformado por cinco sismos.

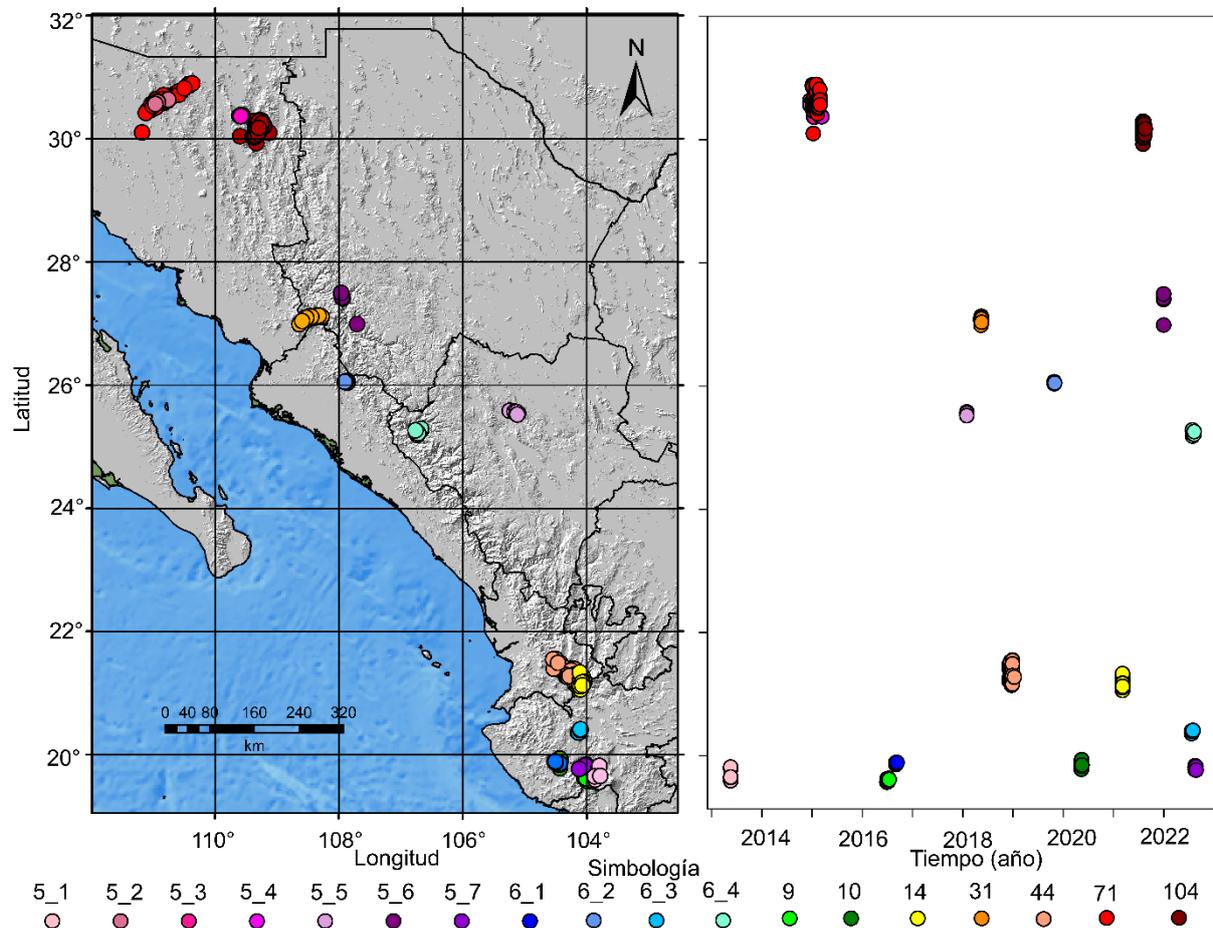


Figura 5.14 Enjambres sísmicos de la región SMO. El color está dado de acuerdo con el tamaño del enjambre. Debido a que existen algunos enjambres con el mismo tamaño, en la simbología se observa que para estos, las etiquetas tienen dos números separados por un guion. El primer dígito es el tamaño del grupo, el segundo dígito va de uno en uno hasta el número máximo de grupos de ese tamaño.

Al noroeste de los enjambres anteriores podemos observar otros dos enjambres. Uno pequeño y uno de gran tamaño. La secuencia de cinco sismos terminó el 19 de diciembre del 2014 y algunos días después, el 3 de enero de 2015 comenzó otra secuencia de mayor tamaño. La secuencia más grande terminó 56 días después, el 28 de febrero. De acuerdo con los resultados de este trabajo, ese enjambre tuvo un total de 71 sismos.

Hacia la zona centro de la región SMO se identificaron cinco enjambres sísmicos. El primero que logramos identificar fueron solo cinco sismos que se localizan dentro del estado de Durango y ocurrieron el 30 de enero de 2018. El 11 de mayo del 2018, al noroeste del enjambre anterior, se identificó un enjambre de treinta y un sismos, los cuales se ubicaron en los límites entre los estados de Sonora, Chihuahua y Sinaloa. Al sureste, en Sinaloa se identificó una secuencia de seis sismos que ocurrieron del 27 al 31 de octubre de 2019.

En el estado de Chihuahua se identificó otro enjambre de cinco sismos, estos ocurrieron el 31 de diciembre de 2021. Casi al sur de esa secuencia, en el estado de Durango, se encontró otro enjambre de seis sismos, esta secuencia comenzó el 28 de julio de 2022 y terminó el 10 de agosto del mismo año.

En la región sur de la SMO se pueden observar en la Figura 5.14 dos grupos de enjambres. Un grupo de dos secuencias que se concentra en el estado de Nayarit y otro de cinco secuencias ubicado en Jalisco. Los enjambres que se localizan en Jalisco están un poco más dispersos espacialmente, que aquellos que se ubican en Nayarit.

La primera secuencia que se identificó en Nayarit tiene 44 sismos que comenzaron a presentarse en la región en diciembre de 2018. En este trabajo solo un sismo del año 2019 se agrupó a la sismicidad, por lo tanto, los 43 sismos restantes ocurrieron en diciembre del 2018. No obstante, en este trabajo se identificó otra secuencia de 14 sismos que sucedieron el 7 y 8 de marzo de 2019, es decir, unos cuantos meses después de la secuencia anterior.

Por otra parte, los enjambres sísmicos de Guadalajara que se identificaron tienen un número pequeño de eventos. El primero ocurrió el 19 de mayo de 2013, con solo cinco eventos y que también fue identificado en la región de FVTM como se describe en el apartado 5.5 de este trabajo. Después, el 28 de junio de 2016 comenzó otra secuencia de nueve sismos. Tiempo después, a inicios de septiembre de 2016, ocurrió otro enjambre de un total de seis sismos.

Se identificó una nueva secuencia con diez sismos que comenzó el 12 de mayo de 2020 y terminó el 16 de mayo del mismo año. Posteriormente, el 22 de julio de 2022 comenzó otro enjambre que tuvo un total de seis sismos y que también fue identificado en la región de FVTM como se describe en el apartado 5.5 de este trabajo. La última secuencia identificada ocurrió el 31 de diciembre de 2021 y fueron agrupados solo cinco sismos.

En la Tabla 5.9 se muestran las características más importantes de los enjambres identificados.

Con las observaciones descritas anteriormente y con la finalidad de no duplicar la cantidad de enjambres detectados, se considera que para la región SMO el total de enjambres identificados es de dieciséis. Los histogramas de profundidad de estos enjambres se muestran en la Figura 5.15. Como se puede observar, la profundidad promedio de los sismos en algunos de los casos se concentra en 5 km, aunque, en otros enjambres se extiende a 10 o 15 km. En la parte sur de la región SMO se encuentran tres enjambres de 9, 10 y 44 eventos en los que la sismicidad se concentra a mayor profundidad que el resto alcanzando hasta los 40 km.

Tabla 5.9 Características principales de los enjambres sísmicos que se identificaron en la región SMO. El ID corresponde al identificador en la simbología del mapa de enjambres sísmicos de la región SMO. Las secuencias que también se identificaron en la región de la FVTM se marcan con \*.

ID	Número de sismos	Magnitud mínima	Magnitud máxima	Fecha y hora UTC del primer evento	Fecha y hora UTC del último evento	Duración en días
5_1*	5	3.4	3.7	19/05/2013 11:44:29	19/05/2013 16:37:30	0.20
5_2	5	3.3	3.7	16/12/2014 21:37:09	19/12/2014 21:15:03	2.98
5_3	5	3.3	3.6	13/01/2015 19:08:51	16/01/2015 23:38:41	3.19
5_4	5	3.2	3.6	02/03/2015 19:33:12	12/03/2015 00:59:12	9.23
5_5	5	3.4	4.2	30/01/2018 00:24:14	30/01/2018 15:25:36	0.63
5_6	5	3.4	4.0	31/12/2021 04:17:31	31/12/2021 14:57:54	0.44
5_7	5	3.2	3.4	16/08/2022 00:28:16	24/08/2022 04:23:21	8.16
6_1	6	3.2	3.6	01/09/2016 08:38:04	09/09/2016 12:12:03	8.15
6_2	6	3.5	4.0	27/10/2019 18:23:43	31/10/2019 14:20:41	3.83
6_3*	6	3.1	3.5	22/07/2022 02:15:33	01/08/2022 23:43:54	10.89
6_4	6	3.6	3.9	28/07/2022 06:11:00	10/08/2022 07:40:22	13.06
9	9	3.0	3.7	28/06/2016 08:42:34	14/07/2016 20:12:07	16.48
10	10	3.4	3.9	12/05/2020 05:11:31	16/05/2020 18:23:16	4.55
14	14	3.4	3.8	07/03/2021 05:17:50	08/03/2021 07:12:12	1.08
31	31	3.0	4.0	11/05/2018 08:12:39	17/05/2018 19:39:57	6.48
44	44	3.5	4.2	04/12/2018 09:48:52	10/01/2019 08:13:08	36.93
71	71	3.0	3.9	03/01/2015 21:20:55	28/02/2015 21:15:25	56.0
104	104	3.0	5.1	31/07/2021 21:19:12	19/08/2021 11:44:46	18.6

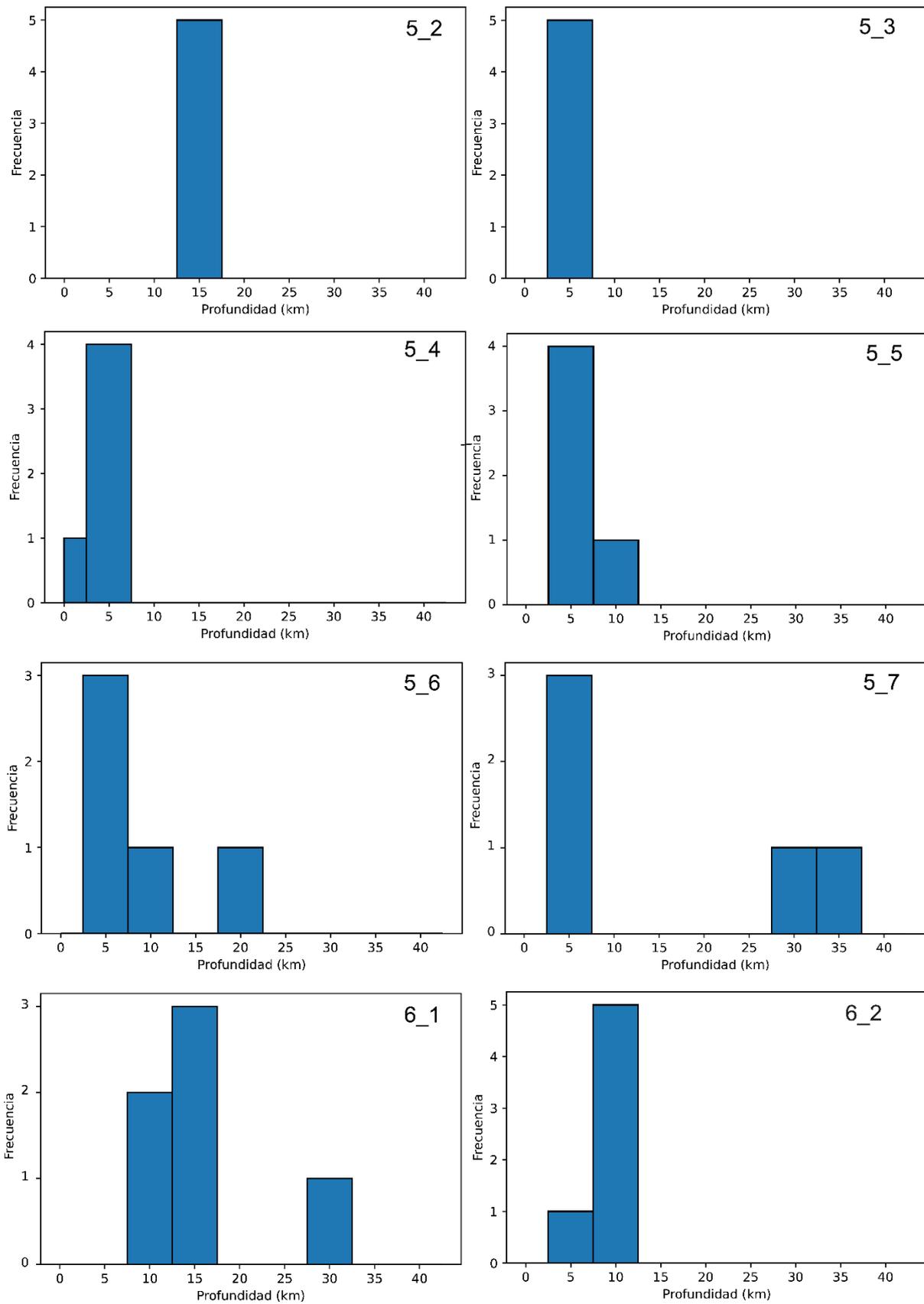


Figura 5.15 Histogramas de profundidad de los enjambres identificados en la región SMO. El número en la parte superior indica el ID con el que se identifica cada enjambre de acuerdo con la Tabla 5.9. El histograma con número 144 corresponde al enjambre que se identificó en la región BAR y SMO.

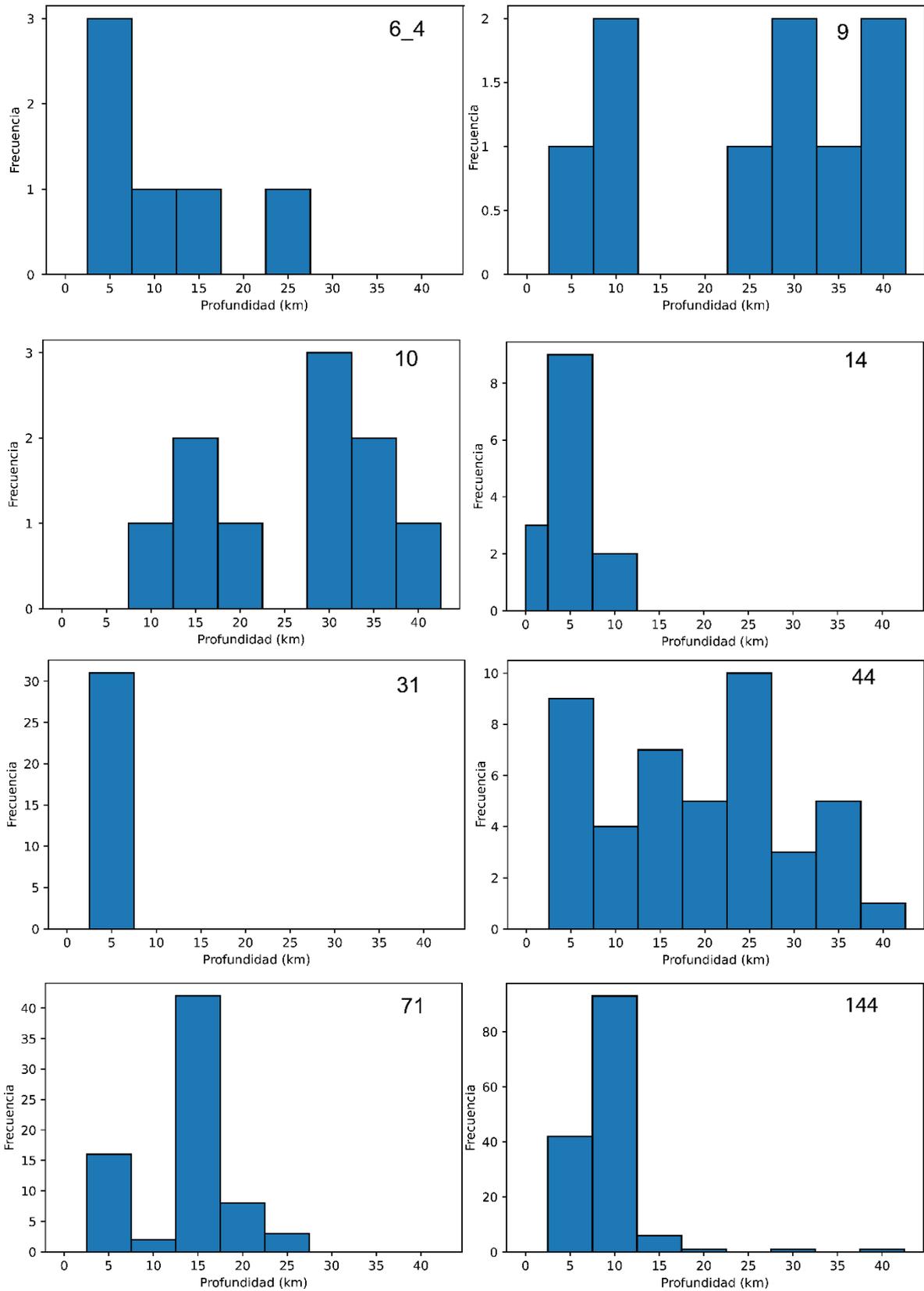


Figura 5.15 Continuación.

## 5.4 FAJA VOLCÁNICA TRANS MEXICANA (FVTM)

En la Figura 5.16 se muestra la gráfica de densidad del logaritmo de las distancias al vecino más cercano. El caso es particular, ya que, a diferencia de los catálogos anteriores, en donde se observaba un comportamiento bimodal, en esta zona, la gráfica de densidad tiene un comportamiento trimodal. Este caso puede presentarse cuando existe una cantidad importante de sismos que se ubicaron muy cerca en espacio. El catálogo de la región FVTM contiene la sismicidad para de la zona de Michoacán, en donde en 2020 y 2021 se presentaron dos enjambres sísmicos muy grandes. Por lo tanto, este comportamiento de la densidad del  $\log\eta_{ij}$  puede ser asociado a este acontecimiento.

Aunque, el comportamiento de la gráfica de densidad del logaritmo de las distancias tiene tres modos, la separación de la sismicidad en eventos agrupados y desagrupados es posible. En este caso el valor umbral de distancia  $\eta_0$  fue el que se calcula mediante el método que utiliza el modelo de mezcla Gaussiana.

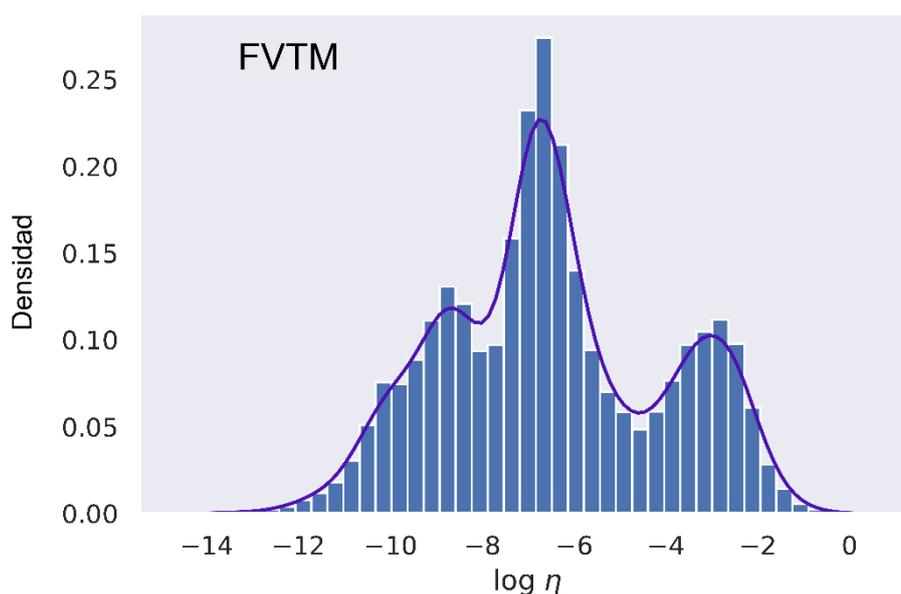


Figura 5.16 Densidad del  $\log\eta_{ij}$  para el catálogo de la región de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). Se observa un comportamiento con tres modos. El modo asociado a la sismicidad de fondo es el que se encuentra del lado derecho, los otros dos modos están asociados con la parte agrupada (centro y lado izquierdo). Este comportamiento en el que la parte agrupada se separa se puede presentar en catálogos en donde existe un número muy grande de sismos que ocurren muy cercanos en espacio. En el catálogo de esta región existen grupos muy grandes de sismos.

La Tabla 5.10 contiene los grupos que se formaron para esta región. El total de sismos en este catálogo es de 7324 y de estos 1276 (17.42%) no fueron agrupados, el resto pertenecen a un grupo. Incluso, 5470 (78.69%) sismos están en un grupo de cinco o más eventos. Por lo tanto, esta es de las cuatro regiones de estudio, la zona en donde un mayor porcentaje de la sismicidad parece presentarse de forma agrupada.

La distribución espacial y temporal se muestra en Figura 5.17. Para esta región, la revisión de los resultados fue imprescindible debido a una observación en particular. Como se puede notar en la Figura 5.17, el grupo más grande de sismos se extiende temporalmente abarcando los años 2020, 2021 y 2022. Sin embargo, al analizar con mayor detenimiento esta secuencia de 4850 sismos, se determinó que los eventos que la conforman pueden ser separados en dos grupos, incluso algunos son parte de la secuencia de 249 sismos.

Con lo anterior, la principal modificación para este catálogo consistió en la separación de la secuencia más grande en dos grupos diferentes: uno con 1120 sismos y el otro con 3745. Además, algunos sismos fueron añadidos al grupo de 249 eventos, por lo tanto, esta secuencia al final se conforma por 284 sismos.

La distribución de los grupos de sismos para la FVTM, después de la revisión se muestran en la Figura 5.18. Existe una zona entre aproximadamente los 99.5° y 101.5° de longitud en donde no se registran muchos eventos y los que se han identificado no se agrupan espacial y temporalmente.

Los resultados después de la revisión, que muestran el número de familias con cierto número de eventos para la región FVTM se muestra en la Tabla 5.11.

El número de sismos no agrupados es de 1349 (18.83%), por lo que aumentó un 1.41% respecto al número de eventos que constituyen la sismicidad de fondo antes de hacer la revisión. Entonces, 5975 sismos están agrupados, lo que equivale al 81.17% de la sismicidad del catálogo de la FVTM.

*Tabla 5.10 Número de familias resultantes para la región de la Faja Volcánica Transmexicana (FTM) antes de realizar la revisión de los grupos. El número de sismos en cada grupo se muestra en la fila superior.*

<b>Eventos</b>	2	3	4	5	6	7	8	10	12	13	14	19	22	25	26	249	4850
<b>Familias</b>	166	50	24	17	6	4	2	5	2	2	1	1	1	1	1	1	1

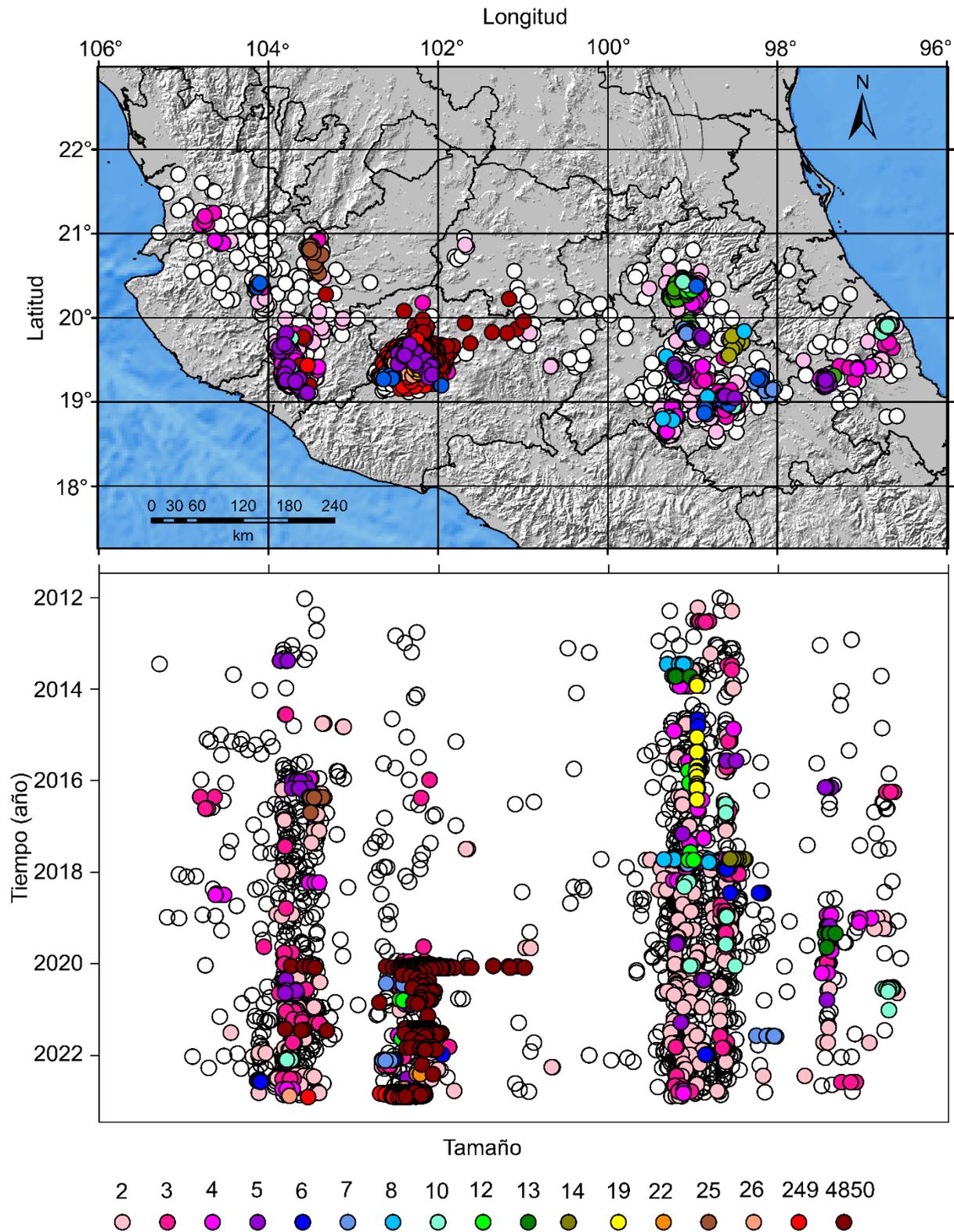


Figura 5.17 Arriba: Distribución espacial de los grupos de sismos de la región FVTM antes de la revisión. Abajo: Distribución espacial en longitud y distribución temporal de los mismos grupos. El color está dado por el número de sismos en cada grupo. La superposición de los eventos se da conforme al número de sismos en cada grupo. La sismicidad de fondo, representada por los círculos en color blanco, se colocó primero, después, la capa de grupos de 2, 3 y 4 sismos. Por último, de acuerdo con el número de sismos se colocaron en orden descendente las secuencias de mayor tamaño hasta llegar a la capa de grupos de 5 sismos.

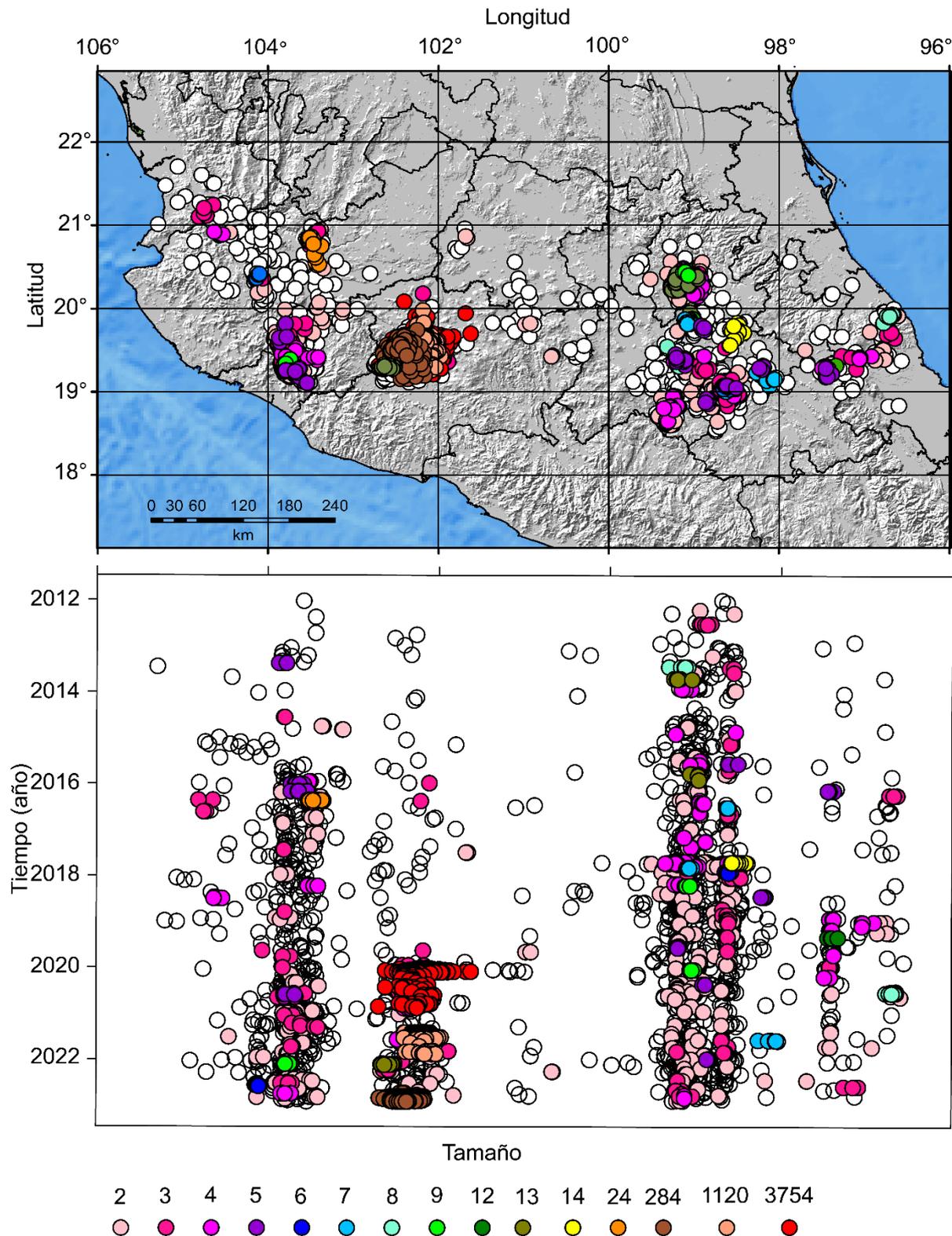


Figura 5.18 Arriba: Distribución espacial de los grupos de sismos de la región FVTM después de la revisión. Abajo: Distribución espacial en longitud y la distribución temporal de los mismos grupos. El color está dado por el número de sismos en cada grupo. La superposición de los eventos se da conforme al número de sismos en cada grupo. La sismicidad de fondo, representada por los círculos en color blanco, se colocó primero, después, la capa de grupos de 2, 3 y 4 sismos. Por último, de acuerdo con el número de sismos se colocaron en orden descendente las secuencias de mayor tamaño hasta llegar a la capa de grupos de 5 sismos.

Tabla 5.11 Número de familias resultantes para la región de la Faja Volcánica Transmexicana (FTM) después de realizar la revisión de los grupos. El número de sismos en cada grupo se muestra en la fila superior.

<b>Eventos</b>	2	3	4	5	6	7	8	9	12	13	14	24	284	1120	3754
<b>Familias</b>	166	51	28	11	2	3	2	4	1	2	1	1	1	1	1

También, 5379 (73.44%) sismos se encuentran en un grupo de cinco o más sismos, por lo que, pueden ser analizados para determinar si tienen el comportamiento de un enjambre sísmico. Esta cantidad de eventos, aunque disminuyó un 5.25% en comparación con los resultados sin revisar, se puede notar que la cantidad es casi las tres cuartas partes del catálogo de la FVTM.

La distribución espacial y temporal de los grupos que tienen un comportamiento de enjambre sísmico para la región FVTM se observa en la Figura 5.19. De un total de treinta y dos grupos, veintitrés (71.87%) presentan un comportamiento de enjambre.

La distribución espacial de los enjambres sísmicos en esta región también se concentra en ciertas regiones. Se pueden ver algunos enjambres en el lado oeste en los estados de Jalisco, Colima y Michoacán. También, se distinguen otros enjambres que se ubican hacia el lado este en los estados de México, la CDMX, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

Los enjambres se ubican temporalmente distribuidos desde el año 2012 hasta finales de 2022. Aunque entre 2014 y 2015 la actividad sísmica en forma de enjambre no se observa claramente.

La región FVTM es de las cuatro regiones en las que se divide este estudio, la zona en donde se identificaron enjambres que incluyen más sismos.

Al oeste de la FVTM, en Jalisco, se identificaron dos enjambres sísmicos. Uno de ellos tiene cinco sismos el 19 de mayo del 2013, el otro enjambre tiene seis sismos y el primero ocurrió el 22 de junio del 2017.

Al sur de los enjambres anteriores, en el estado de Colima, se encontraron tres secuencias más. Dos de ellas con cinco sismos (ID 5\_3 y 5\_5), la primera ocurrió el 25 de agosto del 2013 y tiempo después en la misma región el 3 de marzo de 2016 ocurrió otro enjambre. A principios de febrero de 2022 se determinó que ocurrió otro enjambre de nueve sismos.

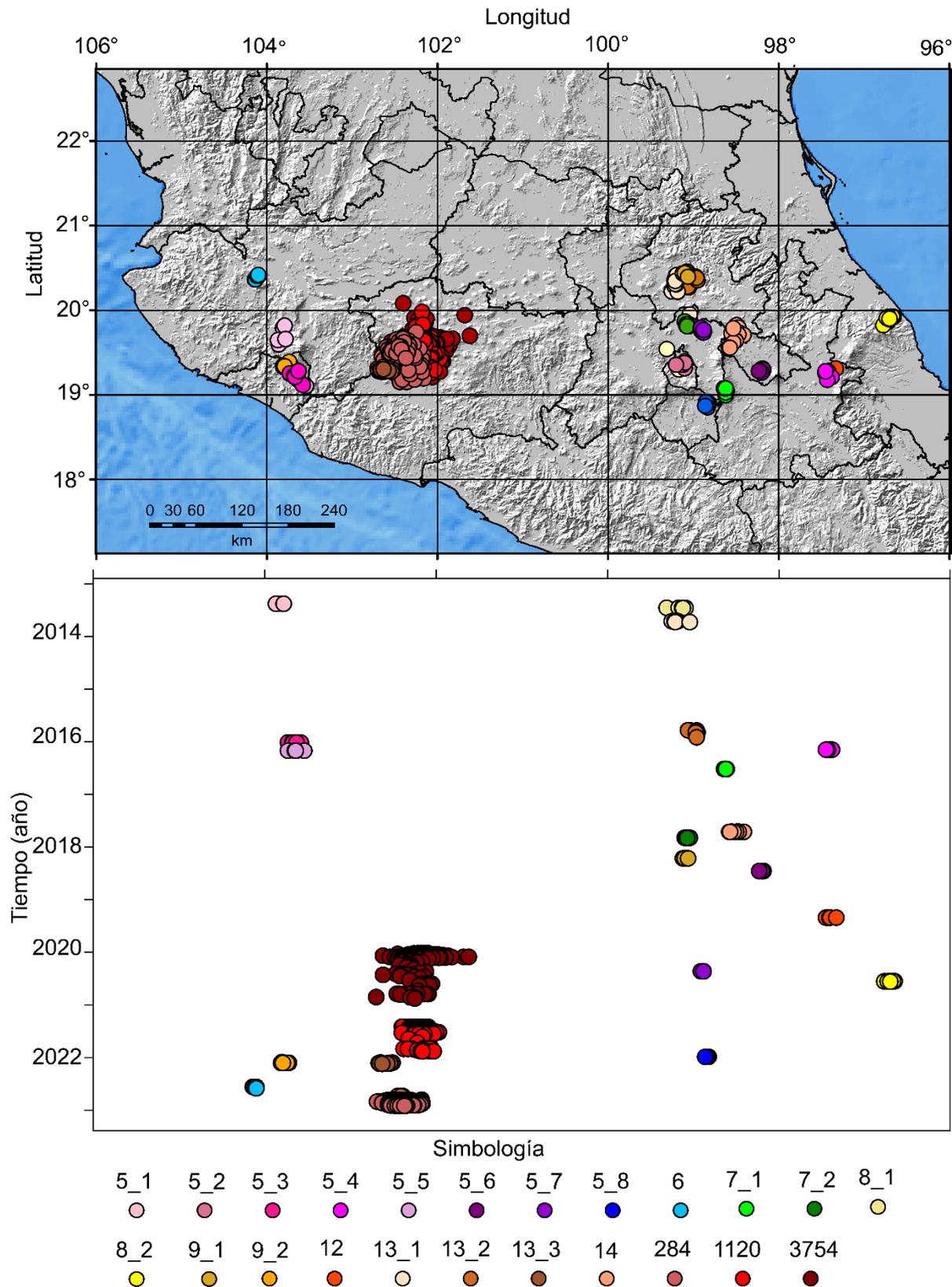


Figura 5.19 Enjambres sísmicos de la región FVTM. El color esta dado de acuerdo con el tamaño del enjambre. Debido a que existen algunos enjambres con el mismo tamaño, en la simbología se observa que para estos, las etiquetas tienen dos números separados por un guion. El primer dígito es el tamaño del grupo, el segundo dígito va de uno en uno hasta el número máximo de grupos de ese tamaño.

Las secuencias con mayor número de eventos para la región FVTM se ubicaron en Michoacán. La más grande tiene 3754 sismos; de acuerdo con los resultados de la Tabla 5.12, esta comenzó el 5 de enero de 2020 y tuvo una duración de casi un año, hasta noviembre del 2020. Tiempo después, en mayo de 2021, la tasa de sismicidad aumentó nuevamente y otra secuencia de 1120 se presentó en la zona. Tres meses después, en febrero de 2022 ocurrió otro enjambre de trece sismos. La última secuencia identificada tiene 284 sismos que ocurrieron de noviembre a septiembre de 2022.

En la parte este de la FVTM los enjambres no son numerosos como en Michoacán; en esta parte, la secuencia más grande tiene catorce sismos que ocurrieron entre los estados de Hidalgo y Tlaxcala el 16 y 17 de septiembre de 2017. En el estado de Hidalgo se identificaron tres secuencias más, una con nueve y otras dos con trece eventos. Una de ellas se puede identificar en la Figura 5.19 como 13\_1, esta ocurrió en septiembre de 2013; la otra que se identifica como 13\_2 comenzó el 13 de octubre de 2015. El enjambre de nueve sismos ocurrió el 20 de marzo de 2018.

En la CDMX y el Estado de México se encontraron cuatro enjambres sísmicos. El primer enjambre que ocurrió y que pudo identificarse tiene ocho sismos que tuvieron lugar en junio de 2013. El siguiente se presentó el 25 de agosto del 2013 con un total de cinco sismos. Posteriormente, el 28 de octubre de 2017 comenzó otra secuencia de la que se identificó forman parte siete sismos. La sismicidad del último enjambre identificado en esta parte tuvo lugar el 11 y 12 de mayo de 2020, con un total de cinco sismos.

En la Figura 5.19, se ve un enjambre de cinco eventos en Morelos que ocurrieron entre el 25 y 26 de diciembre de 2021. Hacia el este del enjambre anterior, entre el Estado de México y Puebla, se distingue otra secuencia con siete sismos que se ocurrieron el 8 de julio de 2016.

También en Puebla se identificaron otros dos enjambres sísmicos. Temporalmente, la primera secuencia de cinco sismos tuvo lugar el 25 de febrero de 2016, la segunda con doce sismos ocurrió el 5 de mayo de 2019.

Finalmente, en el estado de Veracruz se identificó un enjambre que ocurrió del 19 al 22 de julio de 2020 con un total de ocho sismos.

El total de enjambres identificados para la región de la FVTM es de veintitrés.

Tabla 5.12 Características principales de los enjambres sísmicos que se identificaron en la región FVTM. El ID corresponde al identificador en la simbología del mapa de enjambres sísmicos de la región FVTM.

ID	Número de sismos	Magnitud mínima	Magnitud máxima	Fecha y hora UTC del primer evento	Fecha y hora UTC del último evento	Duración días
5_1	5	3.4	3.7	19/05/2013 11:44:29	19/05/2013 16:37:30	0.2
5_2	5	2.1	2.3	25/08/2013 10:23:30	25/08/2013 21:03:44	0.44
5_3	5	2.9	3.4	06/01/2016 21:39:34	07/01/2016 05:10:02	0.31
5_4	5	3.1	3.5	25/02/2016 23:28:47	25/02/2016 23:37:06	0.01
5_5	5	2.7	3.3	03/03/2016 07:47:52	03/03/2016 22:15:00	0.60
5_6	5	3.6	3.7	15/06/2018 21:25:20	16/06/2018 05:52:31	0.35
5_7	5	2.0	3.0	11/05/2020 03:08:06	12/05/2020 02:40:48	0.98
5_8	5	3.2	3.7	25/12/2021 02:00:06	26/12/2021 10:48:18	1.37
6	6	3.1	3.5	22/07/2022 02:15:33	01/08/2022 23:43:54	10.89
7_1	7	2.3	4.1	08/07/2016 17:42:10	08/07/2016 23:14:12	0.23
7_2	7	2.0	2.8	28/10/2017 11:24:04	29/10/2017 03:03:21	0.65
8_1	8	2.3	2.9	16/06/2013 16:39:25	18/06/2013 23:53:07	2.3
8_2	8	2.7	4.2	19/07/2020 23:10:38	22/07/2020 14:25:05	2.64
9_1	9	2.8	3.9	20/03/2018 10:12:28	20/03/2018 22:06:11	0.50
9_2	9	3.2	3.5	31/01/2022 19:37:40	06/02/2022 16:43:52	5.88
12	12	3.1	3.8	05/05/2019 09:21:58	05/05/2019 09:38:12	0.01
13_1	13	3.1	4.0	17/09/2013 10:31:05	23/09/2013 08:03:40	5.90
13_2	13	2.6	2.9	13/10/2015 10:57:24	01/12/2015 18:25:38	49.31
13_3	13	3.4	3.6	03/02/2022 18:57:22	12/02/2022 08:10:04	8.55
14	14	2.7	3.6	16/09/2017 23:44:33	17/09/2017 13:18:02	0.56
284	284	3.2	4.3	23/09/2022 20:27:39	30/11/2022 17:18:30	67.87
1120	1120	3.0	4.3	30/05/2021 08:13:54	18/11/2021 01:30:34	171.72
3754	3754	2.1	4.2	05/01/2020 13:13:05	16/11/2020 04:11:37	315.62

En la Figura 5.20 se muestran los histogramas de profundidad de los enjambres identificados en la región FVTM. Los enjambres de Michoacán, que son los más numerosos, tienen profundidades entre los primeros 40 km. Los enjambres que se ubican al oeste de los enjambres de Michoacán tienen profundidades promedio entre 10 a 25 km. La sismicidad de los enjambres que se ubican al este de la FVTM es más somera, pues las profundidades promedio se encuentran entre los 5 o 10 km.

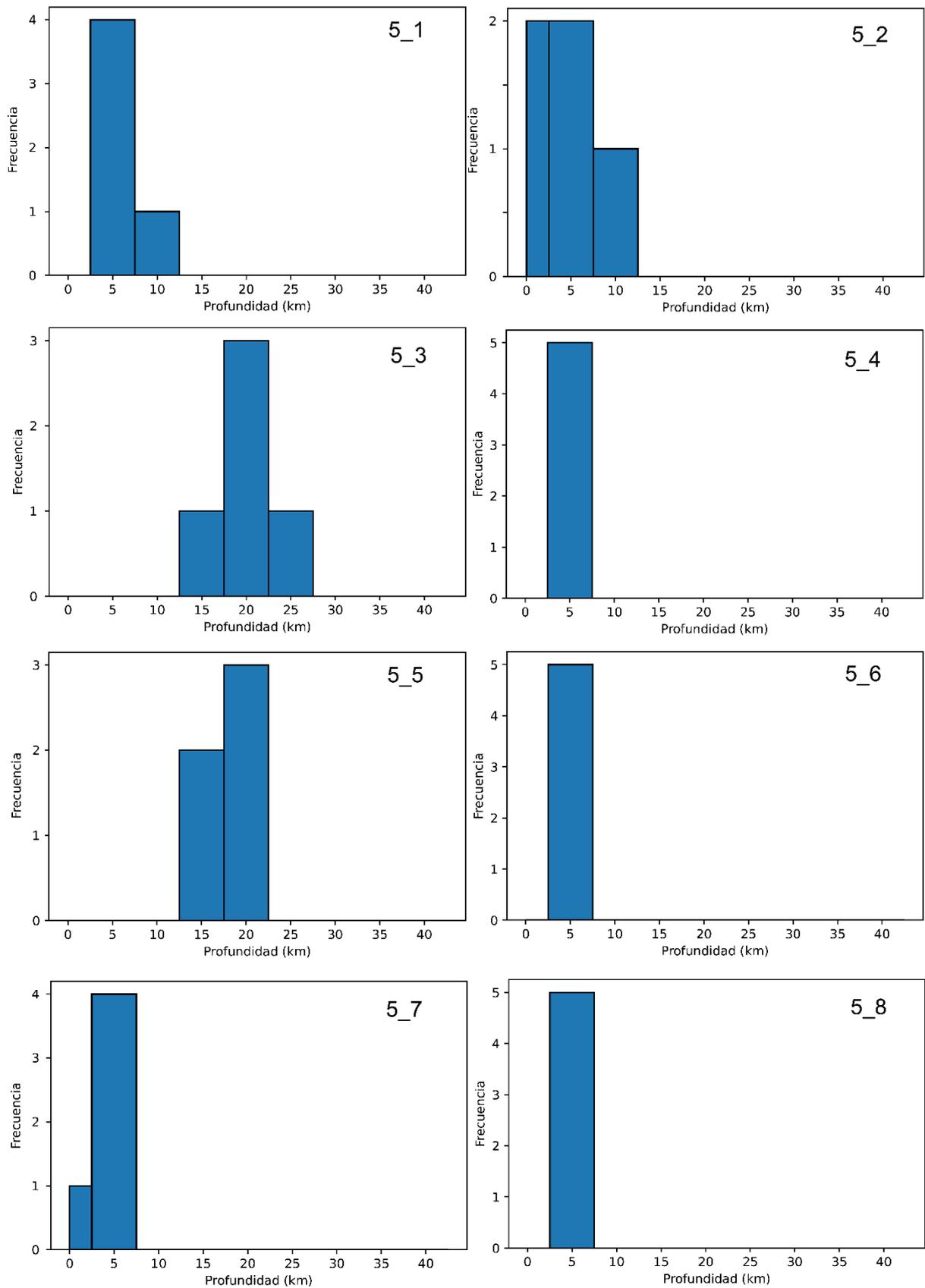


Figura 5.20 Histogramas de profundidad de los enjambres identificados en la región FVTM. El número en la parte superior indica el ID con el que se identifica cada enjambre de acuerdo con la Tabla 5.12.

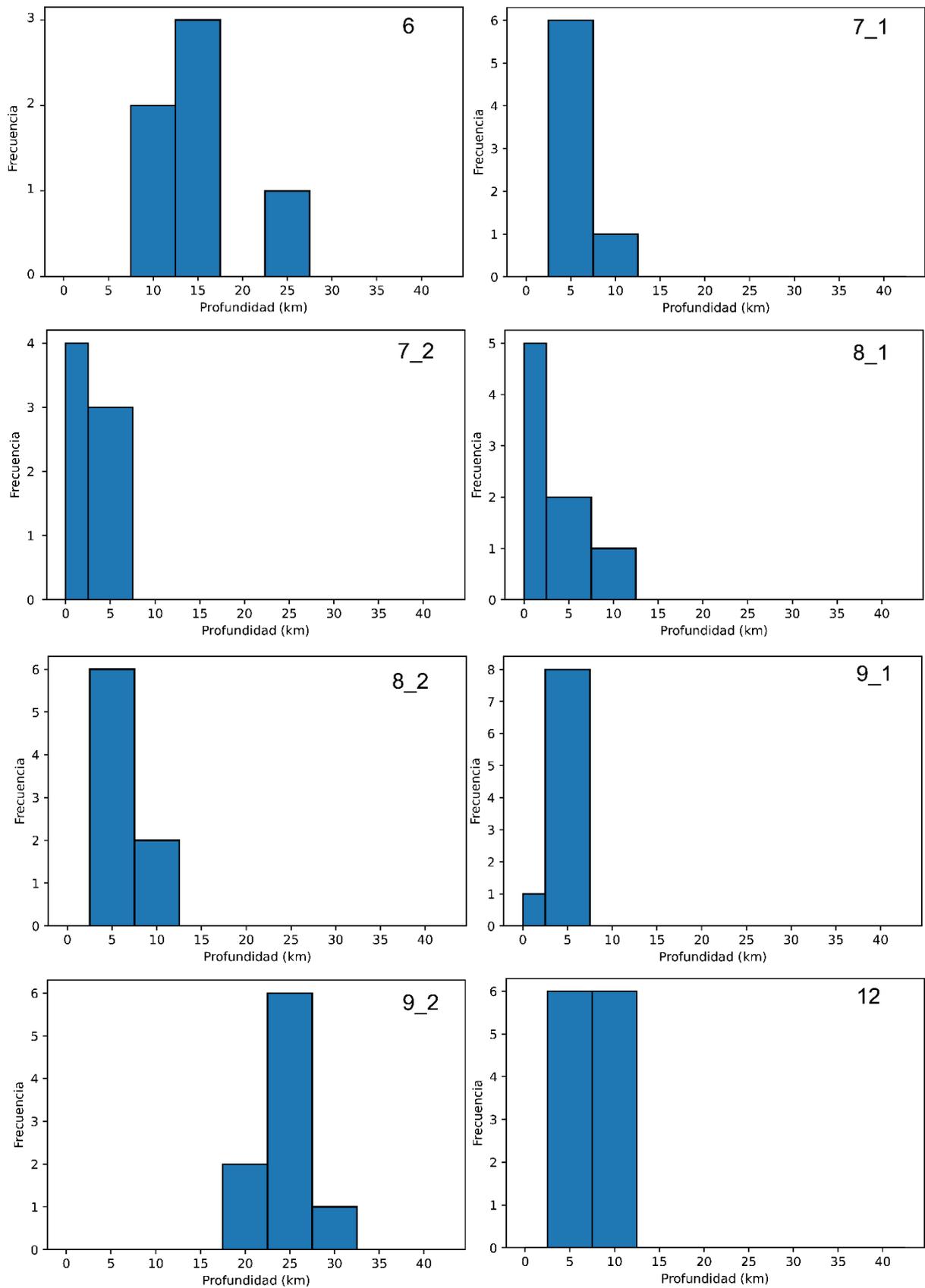


Figura 5.20 Continuación.

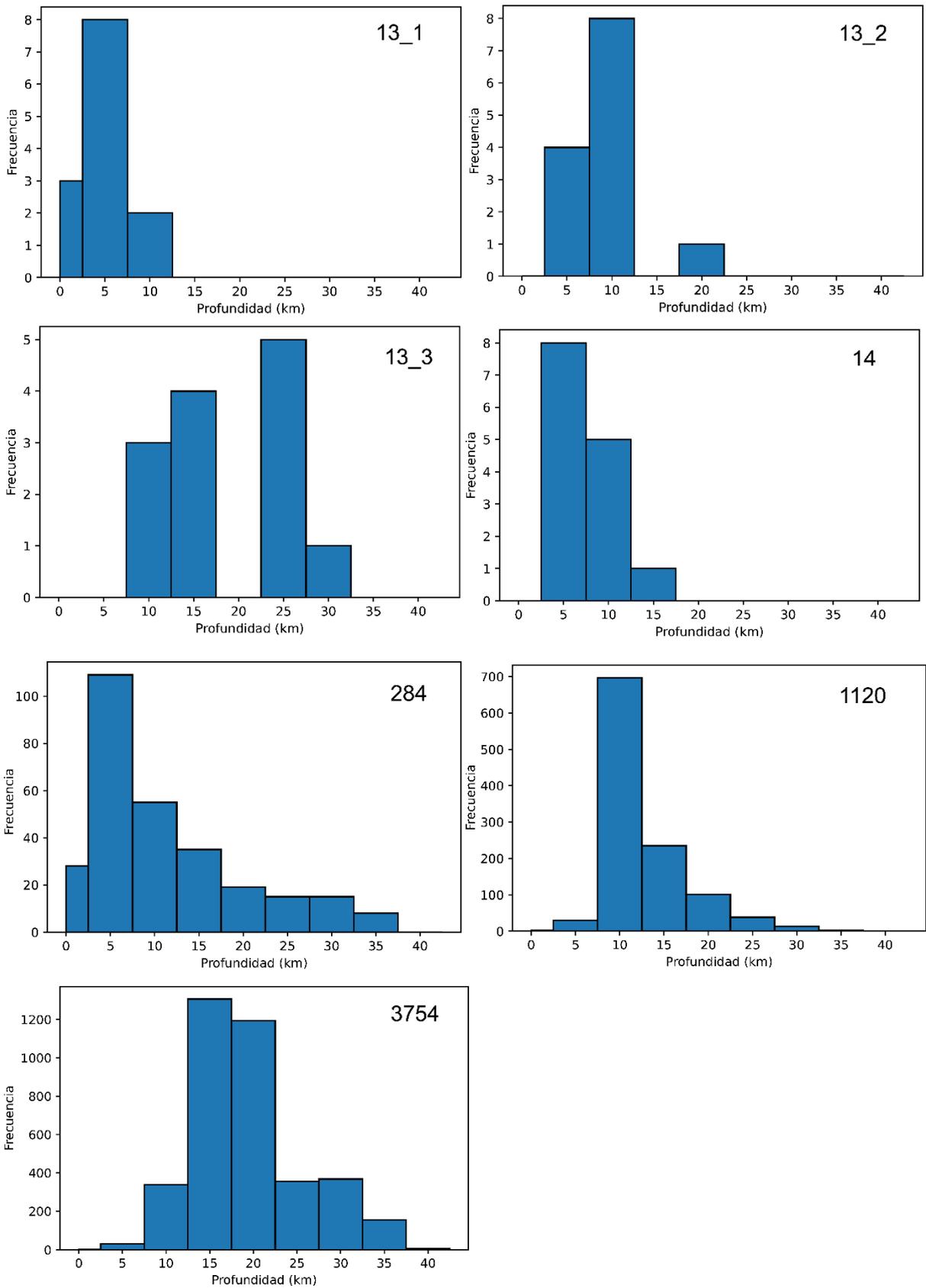


Figura 5.20 Continuación.

## 5.5 ENJAMBRES SÍSMICOS EN COMÚN ENTRE LAS REGIONES DE ESTUDIO

Como se mostró en la Figura 4.2, la sismicidad de la región FVTM se traslapa con el sur de las regiones SMO, BAR y BB. Por lo tanto, con la finalidad de tener en cuenta si hay un duplicado en los enjambres o existe alguna observación importante se mostrarán los resultados en la zona de traslape.

Las tres áreas donde se traslapa la región FVTM con SMO, BAR y BB se muestran en la Figura 5.21. En el mapa se muestran los enjambres de cada zona por colores: rojo para la FVTM, verde para SMO, azul para BAR y anaranjado para BB. Los enjambres en común se ven en color amarillo.

Como se puede observar, los enjambres que se ubican en las zonas de intersección son pocos. Además, como se esperaba, la sismicidad en estas áreas en común es casi en su totalidad de color amarillo, es decir, se pudieron identificar casi las mismas secuencias tanto en la FVTM como en las regiones del norte.

La única diferencia se encuentra en un enjambre que se identificó en la FVTM y no en la región BB (Figura 5.21), el cual se identifica en la Figura 5.19 como 13\_2. Pero, se puede ver que las magnitudes de los sismos de esta secuencia son menores que 3.0.

Por otra parte, los enjambres en común entre la FVTM y BB son dos: el primero con trece sismos que ocurrieron del 17 al 23 de septiembre de 2013 y el segundo con ocho sismos que ocurrieron el 19 y 20 de marzo de 2018.

Las secuencias en común entre la FVTM y SMO son dos: una con cinco sismos que ocurrieron el 19 de mayo de 2013 y la otra de seis sismos que comenzó el 22 de julio de 2022.

Los enjambres que se detectaron en la región BAR forman parte de los enjambres más grandes de la FVTM, por eso en la Figura 5.21 no se observan círculos en color azul. En la región BAR, se identificó un enjambre de ocho sismos que ocurrieron del 1 al 2 de febrero de 2020, que forma parte de la secuencia de tres mil setecientos cincuenta y cuatro sismos que se identificó en la FVTM y que ocurrió en el 2020. La otra secuencia de cinco eventos que se identificó en el sur de la región BAR ocurrió el 31 de mayo de 2021 y es parte del enjambre de mil ciento veinte sismos que se identificó en la FVTM que comenzó el 30 de mayo de 2021.

También es importante tener en cuenta que hay un enjambre en Sonora que fue separado en dos como consecuencia de la división entre zonas. Este enjambre fue identificado con cuarenta

sismos que ocurrieron del 31 de julio al 24 de agosto de 2021 en la región de BAR y con ciento cuatro sismos que se presentaron del 31 de julio al 19 de agosto de 2021 en la región SMO.

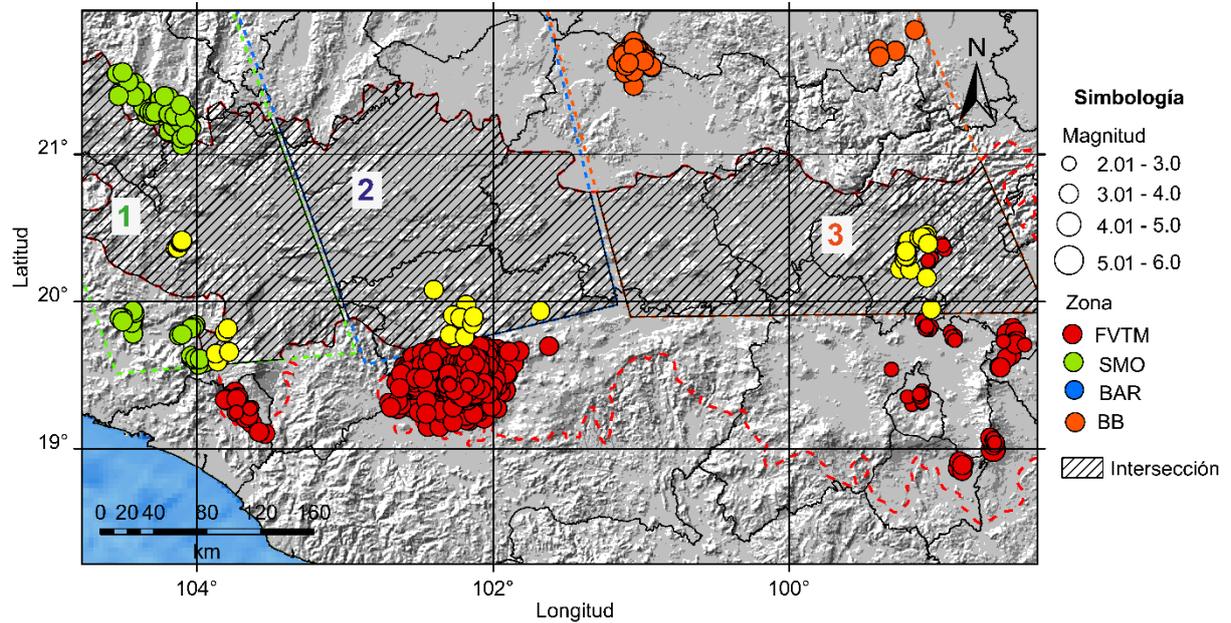


Figura 5.21 Sismicidad (círculos) que conforma los enjambres sísmicos identificados para las cuatro regiones: FVTM (rojo), SMO (verde), BAR (azul) y BB (naranja). La zona donde se traslapa la FVTM con las regiones del norte, se observa con líneas diagonales en color negro. La zona a la izquierda, que tiene el número 1 es el área donde se traslapan la FVTM y SMO. La zona del centro, con el número 2 es donde se traslapa la FVTM y BAR. La zona de la derecha, que tiene el número 3, es donde se traslapa la FVTM y BB. En color amarillo se resaltan aquellos enjambres que fueron identificados en ambas zonas. Los círculos en color azul no se observan porque los únicos enjambres identificados para BAR en el área que abarca el mapa se ubican en la zona de traslape con la FVTM.

## 6 ENJAMBRES SÍSMICOS DEL NORTE Y CENTRO DE MÉXICO

---

Una forma de validar los resultados anteriores se mostró en los resultados de la zona de traslape. Como se pudo observar, las secuencias fueron identificadas tanto en la FVTM y en las regiones del norte. La única diferencia se encontró para el caso de la región BB, no obstante, se explica mediante la consideración de que la magnitud mínima de cada catálogo se fijó a la magnitud de completitud  $M_c$  que para la FVTM es de 2.1 y para la región BB es de 3.0. De tal manera que, los sismos de magnitud menor que 3.0 no fueron incluidos en el análisis para BB.

También es importante mencionar que existen secuencias que se identificaron, aunque fueron divididas por la separación en las cuatro regiones de estudio. Como es el caso del enjambre en Sonora o los enjambres en Michoacán.

Otra forma de validar los resultados es mediante la comparación entre los enjambres identificados y los enjambres que ya han sido estudiados y reportados en México. Esto quiere decir, que se puede verificar si algunos de los enjambres que se han reportado en la zona de estudio, fueron identificados con la metodología que se siguió en este trabajo.

Hay dos enjambres que se identificaron en la región de Cuencas y Cordilleras (BAR) que fueron reportados con anterioridad. El primero, es el enjambre con ciento cincuenta y cinco sismos que se localiza en Chihuahua y ocurrió del 27 de agosto de 2013 hasta diciembre del mismo año. Esta secuencia fue reportada y estudiada por Suárez et al. (2016), quienes en su artículo mencionan que comenzó el 27 de agosto de 2013 y concluyó en diciembre, por lo que, coincide con la información que se reporta en este trabajo. En su estudio concluyen que la sismicidad estuvo asociada con tres zonas: sistema de fallas Vallencillo, falla Peñasco y sistema de fallas la Mezcalera.

La segunda secuencia se localiza al suroeste de Hidalgo del Parral, Chihuahua y fue reportada por el SSN (2022<sup>a</sup>) con un total de ciento treinta sismos de magnitud entre 1.9 y 4.1 que ocurrieron del 15 al 22 de noviembre de 2022. Nosotros identificamos un enjambre con cuarenta y cuatro sismos con magnitudes entre 2.9 y 4.3, que comenzó el 15 de noviembre de 2022 y terminó el 30 de noviembre de ese año. El mecanismo focal calculado por el SSN (2022<sup>a</sup>) para el sismo de mayor magnitud es de rumbo con una ligera componente inversa que permite relacionar la actividad al Graben de San Rafael.

En el reporte del enjambre de 2021 no se menciona la magnitud mínima de los eventos, pero, posiblemente también sea menor que 2.9, que es la magnitud mínima que se consideró para la región BAR. Por lo tanto, la diferencia entre el número de eventos reportado por el SSN y el que se encontró en este trabajo, puede deberse a que el SSN sí considero los eventos de magnitud más pequeña.

En la región de la Cuenca de Burgos (BB) se identificaron tres enjambres que coinciden con lo que se ha reportado en la literatura y en el SSN. El primero ocurrió al sureste del área de Linares de julio a diciembre de 2012 y que fue estudiado por Gómez-Arredondo et al. (2016), quienes relocalizaron 52 sismos con magnitud entre 2.5 y 3.6. En este trabajo la secuencia que coincide se identificó que ocurrió de julio a diciembre de 2012, con un total de treinta y cinco sismos con magnitudes entre 3.0 y 3.6. Según el estudio de Gómez-Arredondo et al. (2016) fue producido probablemente como consecuencia de la reactivación de fallas de tipo inverso en la región.

La segunda secuencia que coincide se trata de la secuencia El Cuchillo que ocurrió de octubre de 2013 a julio de 2014 y fue estudiada por Montalvo-Arrieta et al. (2018). En los resultados del artículo se encontró que hay una relación entre la sismicidad y el llenado de reservorio. En este trabajo la secuencia que se identifica consta de un total de ochenta y un sismos que ocurrieron entre el 19 de octubre de 2013 y el 8 de agosto de 2014.

Por último, el SSN (2021c) reporto un enjambre en Guanajuato-San Luis Potosí que tuvo lugar del 4 al 6 de septiembre de 2021, con eventos de magnitud entre 3.6 y 4.5 que coincide con la secuencia de cincuenta y seis eventos de magnitudes entre 3.5 y 4.5. De acuerdo con el reporte del SSN (2021c), el mecanismo focal del evento de magnitud 4.5 muestra un desplazamiento lateral con una fuerte componente de desplazamiento inverso, además, se resalta la posibilidad de que pueda estar asociado a la falla existente entre la ciudad de San Luis Potosí y San Felipe.

Para la región de la Sierra Madre Occidental (SMO) hay tres secuencias que coinciden con lo que se ha reportado y estudiado en otros trabajos o por el SSN. La primera secuencia que coincide es un enjambre que en este trabajo se identificó con treinta y un sismos que ocurrieron al norte de Sinaloa del 11 al 17 de mayo de 2018 con magnitudes entre 3.0 y 4.0. El SSN (2018<sup>a</sup>) reportó esta secuencia con fecha del 11 al 16 de mayo de 2018 en la que se localizaron 35 sismos con magnitud entre 2.7 y 4.0.

La segunda secuencia se ubica en Ixtlán del Río, Nayarit y fue reportada por el SSN (2018b). De acuerdo con el informe, comenzó el 2 de diciembre de 2018 y continuó hasta el 24 y 25 de

diciembre con un total de 34 sismos. Este mismo enjambre fue estudiado por Sánchez (2021), quien reportó un total de 134 sismos de diciembre de 2018 a abril de 2019. En su trabajo se analiza si el origen del enjambre puede estar asociado con el llenado de las presas El Cajón y La Yesca. El enjambre coincide con la secuencia de cuarenta y cuatro eventos que se identificó con magnitudes entre 3.5 y 4.2 del 4 de diciembre de 2018 al 10 de enero de 2019.

La última secuencia que coincide se ubica en el estado de Sonora. El SSN (2021<sup>a</sup>) la reportó con una duración entre marzo y agosto de 2021 y un total de ciento veintisiete sismos con una magnitud máxima de 5.1. En este trabajo, esta secuencia se identificó en dos regiones SMO y BAR. En SMO el total de sismos es de ciento cuatro y ocurrieron del 31 de julio al 19 de agosto de 2021 con magnitud entre 3.0 y 5.1 que se complementa con los cuarenta eventos identificados en BAR que se presentaron del 31 de julio al 24 de agosto de 2021 con magnitudes entre 3.3 y 4.4. Por lo que, este enjambre tiene en total ciento cuarenta y cuatro sismos. El mecanismo focal que calculó el SSN (2021<sup>a</sup>) para el evento más grande es de tipo normal con una pequeña componente de rumbo y, una orientación N-S que coincide con la orientación del sistema de fallas de la zona.

Finalmente, para la región de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) hay cuatro enjambres que ya habían sido reportados por el SSN y algunos de ellos se han estudiado recientemente.

El primero es el enjambre más grande de la zona, que se localiza en Michoacán, con un total de tres mil setecientos cincuenta y cuatro sismos con magnitudes entre 2.1 y 4.2 que tuvo lugar del 5 de enero de 2020 al 15 de noviembre de 2020. Este enjambre sísmico fue reportado por el SSN (2020) con sismos magnitud máxima de 4.1, que se presentaron del 5 de enero al 10 de marzo de 2020.

El segundo enjambre también fue identificado por el SSN (2021b) en Michoacán, de acuerdo con el informe la sismicidad ocurrió del 30 de mayo al 3 de septiembre de 2021. En este estudio se identificaron mil ciento veinte sismos, que ocurrieron del 30 de mayo al 18 de noviembre de 2021.

Las dos secuencias anteriores fueron estudiadas por Legrand et al. (2023), pues la recurrencia de enjambres en el campo volcánico Michoacán-Guanajuato puede ser asociada al ascenso del magma hacia la superficie, que si llega a liberarse puede originar un nuevo volcán. En el trabajo de Legrand et al. (2023) se reportan los enjambres de 1997, 1999, 2000, 2006, 2020 y 2021, sin embargo, en este estudio se identificaron otras dos secuencias más que ocurrieron en 2022. Este aumento en la frecuencia de los enjambres sísmicos en la región puede sostener la idea de

mantener en un monitoreo permanente la actividad sísmica porque no se descarta la posibilidad de que nazca un nuevo volcán.

La tercera secuencia también se localizó en Michoacán y fue reportada por el SSN (2022b) con un total de doscientos sismos que ocurrieron a partir del 23 de septiembre de 2022. Este enjambre se localiza espacialmente en la misma zona que los enjambres de 2020 y 2021. Nosotros, identificamos este enjambre con un total de doscientos ochenta y cuatro sismos que ocurrieron del 23 de septiembre al 30 de noviembre de 2022.

El cuarto enjambre ocurrió en Hidalgo a partir del 17 de septiembre de 2013 y el SSN (2013) reportó que pudieron localizar trece sismos con magnitud entre 3.4 y 3.8. Nosotros, identificamos esta secuencia con trece sismos que comenzó el 17 de septiembre de 2013. Este enjambre, de acuerdo con el reporte del SSN (2013) puede relacionarse con el sistema de fallas de la región, ya que es una zona activa que se encuentra al norte de la FVTM.

Por otra parte, como se mostró en los resultados, el porcentaje de eventos que se agrupan para los catálogos BAR, BB, SMO y FVTM es: 65.72%, 56.67%, 43.74% y 81.17%, respectivamente. Para la región BAR el porcentaje de sismos del catálogo que forman parte de un grupo de más de cinco eventos es de 44.29%, para BB es de 27.09% y para SMO de 24.25%. De tal manera que, en las regiones del norte hay un menor porcentaje de información analizada que para la zona del centro de México de la que se analizó el 73.44% de la sismicidad.

A excepción de la región SMO, para las otras tres, más de la mitad de la sismicidad que se estudió de 2012 a finales de 2022 se encuentra agrupada. No obstante, también los resultados muestran que únicamente para el catálogo de la FVTM, esta sismicidad forma en gran parte grupos de más de cinco sismos.

Cinco eventos fue el número considerado como mínimo para poder analizar si la secuencia contaba con las características de un enjambre sísmico.

Las secuencias con comportamiento de enjambre para cada región fueron: en el caso de BAR, siete de diez que equivale al 41.44% de la sismicidad del catálogo; para BB, diez de dieciséis que equivale al 22.91% de la sismicidad del catálogo; para SMO, dieciocho de veinte que equivale a 22.29% de la sismicidad en el catálogo; y para la FVTM, veintitrés de treinta y dos que equivale al 72.6% de la sismicidad en el catálogo. Para los cuatro catálogos por separado, casi todos los grupos analizados resultaron tener características de un enjambre sísmico.

Algunos enjambres fueron identificados doble vez por el traslape entre las zonas del norte y la FVTM, además, hay algunos enjambres que forman parte de otros como es el caso del enjambre de 2021 en Sinaloa. Por lo tanto, el total de enjambres identificados en las cuatro zonas es de cincuenta y uno.

La actividad en forma de enjambres sísmicos que se lograron identificar más al oeste de la República Mexicana se presenta particularmente al sur de Chihuahua, al norte de Sonora, al norte de Sinaloa, Durango, el sur de Nayarit, en Jalisco y Michoacán. Mientras que los que se concentran en el lado este del país lo hacen en los estados de Nuevo León, San Luis Potosí, Guanajuato e Hidalgo.

La mayoría de los enjambres de gran tamaño son los que han sido reportados por el SSN y algunos han sido estudiados por diversos autores (Gómez-Arredondo et al., 2016; Suárez et al., 2016; Montalvo-Arrieta et al., 2018; Sánchez, 2021; Legrand et al., 2023). Con la información recopilada se puede ver que se tienen en la zona de estudio, que comprende la región BAR, BB, SMO y FVTM, enjambres de origen tectónico, volcánico y antrópico.

Si se considera un solo catálogo de enjambres sísmicos uniendo la información de las cuatro regiones analizadas, los enjambres más numerosos están asociados con actividad en el campo volcánico Michoacán-Guanajuato. En el caso de los dos enjambres identificados en Nayarit pueden tener un origen antrópico asociado con el llenado de reservorios al igual que el enjambre de 2014 conocido como la secuencia El Cuchillo. El resto de las secuencias puede estar asociada con la actividad de los diferentes sistemas de fallas de cada zona.

Como se pudo observar en los resultados de este trabajo y en la Figura 6.1 los enjambres sísmicos en las cuatro regiones de estudio se observan en zonas específicas. Por una parte, esto puede ser asociado a que las regiones en donde se ubican los enjambres tienen las características físicas y geológicas para que este tipo de sismicidad se presente a diferencia de las otras zonas. Estas características pueden ser regiones altamente fracturadas, zonas en las que los esfuerzos están extremadamente concentrados (Mogi, 1963), regiones con un flujo de calor elevado (Zaliapin & Ben-Zion, 2013b), zonas en las que la intrusión de fluidos reduce la resistencia de las fallas (Roland & McGuire, 2009).

También, existe la posibilidad de que estén ocurriendo sismos con una magnitud pequeña que no están siendo detectados y que también sean parte de un enjambre sísmico. Esto es factible si se considera la distribución de las estaciones sísmicas de la Red de Banda Ancha del SSN y

la magnitud mínima ( $M_{\min}$ ) que es capaz de detectar en cada región. Esta magnitud es importante porque es la  $M_{\min}$  necesaria para que el total de los sismos sean detectados.

En el mapa de la Figura 6.1 se muestran las zonas que tienen cierta  $M_{\min}$  reportada y capaz de detectar por la red actual del SSN.

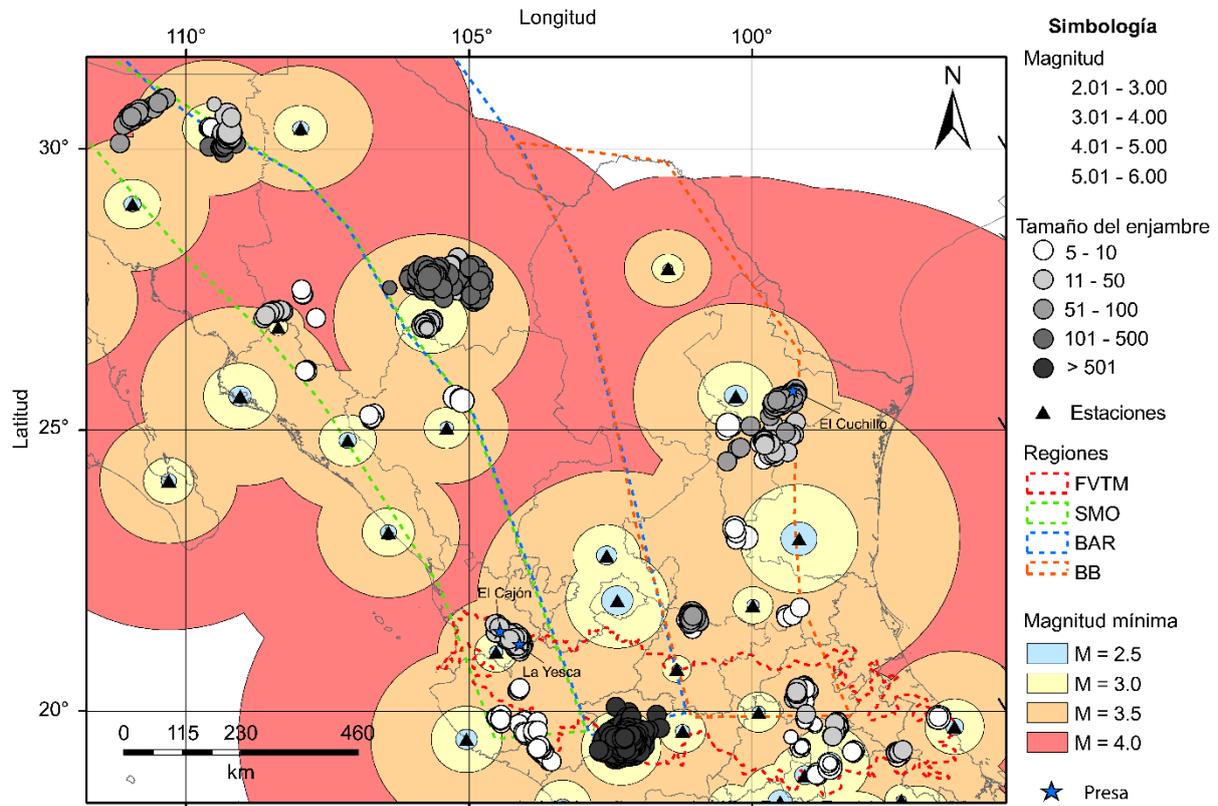


Figura 6.1 Magnitud mínima que es posible detectar por medio de una sola estación, con la red de estaciones de banda ancha del SSN (triángulos en color negro). También se muestra la sismicidad que conforma los enjambres sísmicos identificados (círculos) en cada región (líneas punteadas). De cada sismo se puede observar la magnitud que tienen (tamaño del círculo) y el tamaño del enjambre sísmicos al que pertenecen (tono de gris). Se observa la localización de las presas (estrellas color azul) cuya actividad ha sido relacionada con enjambres sísmicos y que se mencionan en este trabajo.

Las zonas fueron dibujadas a partir de trazar círculos alrededor de cada estación. El procedimiento que se siguió para el cálculo del radio de cada círculo es descrito por Pérez-Campos (2019). En este método se hace uso de la expresión de magnitud calibrada con la magnitud de momento ( $M_{w1}$ ) para determinar el radio de cada círculo.

La expresión de  $M_{w1}$  es,

$$\log_{10}(M_{w1}) = -0.01295 + 0.0719\log_{10}(A_{\max}) + 0.1543\log_{10}(D),$$

donde  $A_{\max}$  es la amplitud máxima de los registros en cuentas medido del cero al pico y  $D$  es la distancia hipocentral en km.

El valor de  $A_{\max}$  que se utilizó, se calculó con base en el nivel de ruido de la estación, el cual, de acuerdo con la expresión de  $M_{w1}$  tiene asociado un radio de detección, que en la expresión es la distancia hipocentral ( $D$ ), para cierta magnitud ( $M_{w1}$ ).

Por otra parte, para poder explorar si es importante considerar esta  $M_{\min}$  de la red sísmica actual se puede observar la Figura 6.1. Como se puede ver, la mayoría de los sismos que conforman los enjambres tienen una magnitud entre 3.0 y 4.0, que pueden relacionarse con el hecho de que las magnitudes de completitud de las regiones BB, BAR, SMO y FVTM están entre estos valores, porque es la  $M_{\min}$  que abarca una mayor área en la zona de estudio, pues, el área con una  $M_{\min}$  de 2.5 o menor.

La zona de la FVTM tiene en toda su extensión una  $M_{\min}$  de 3.5, que es consecuencia de que en el sur de México hay un mayor número de estaciones sísmicas. Se observan algunas regiones como Michoacán o en las cercanías de los estados de Tlaxcala, CDMX y Puebla, en donde hay zonas de mayor tamaño con una  $M_{\min}$  de 3.0.

Por su parte, las regiones que abarcan el norte del país, SMO, BAR y BB tienen una  $M_{\min}$  de 4.0 en algunas zonas, que puede relacionarse con el hecho de que en esta región la cantidad de estaciones sísmicas es pequeña. Esto ha tenido dos importantes consecuencias, una es que en toda el área del norte el número de sismos que se han registrado ha sido pequeño y la otra es que esto es más evidente en el área que tiene una  $M_{\min}$  igual a 4.0. Un punto a favor para poder afirmar que lo anterior no es consecuencia de que ahí no suceden sismos, es el incremento en la tasa de sismicidad que se observó cuando el número de estaciones en el norte del país aumentó.

Del catálogo de sismos del SSN para la región que comprenden BB, BAR y SMO, desde el inicio hasta finales de 2022 se reportaron un total de 4546 sismos de los cuales, solo 285 eventos fueron ubicados en la región con  $M_{\min} = 4.0$  (Figura 6.1), lo que equivale a solo el 6.27 %. Por lo tanto, si este porcentaje de la sismicidad que se observa en estas zonas aumentara, entonces, podría hacerse un análisis más completo de identificación de enjambres sísmicos y afirmarse o descartarse el que en esas zonas no hay actividad sísmica en forma de enjambre.

Otra consecuencia de una  $M_{\min}$  alta es la posibilidad de que los enjambres sísmicos identificados pudieran tener una mayor cantidad de sismos asociados de menor magnitud. Como se mencionó, la magnitud mínima de la sismicidad que comprenden los catálogos de las

cuatro regiones que se estudiaron se fijó a la magnitud de completitud ( $M_c$ ), que en el norte es entre 2.9 y 3.0, y en la FVTM es de 2.09. Por lo tanto, no se consideraron sismos de menor magnitud teniendo en cuenta que la magnitud de completitud es la magnitud más pequeña a la que se detectan el total de los eventos.

El que haya sismos de menor magnitud puede significar que estos podrían ser parte de los enjambres que se identificaron o que formen otros que no se están observando y que complementen los grupos de sismos que se formaron en este trabajo. Como se mostró, existe una parte considerable de la sismicidad de cada región que se está presentando de manera agrupada y, en algunos casos, como los grupos fueron de tamaño menor que cinco, no se pudieron analizar por tener un número de eventos insuficiente. Si la  $M_{\min}$  se redujera, podría aumentar el número de sismos en cada enjambre identificado y permitiría analizar nuevos grupos de sismos.

La información que brinda un mayor número de sismos de menor magnitud puede ser de suma importancia, sobre todo en el estudio del origen de estos enjambres sísmicos.

Algunos trabajos han complementado la información reportada por el SSN, por ejemplo, para el enjambre sísmico en la zona de Linares al noreste de México que ocurrió de agosto a diciembre de 2012, se instaló una red temporal de estaciones de septiembre a diciembre del mismo año (Gómez-Arredondo et al., 2016) que permitió enriquecer el catálogo sísmico y mejorar el análisis. De igual manera, en diciembre de 2018 comenzó un enjambre sísmico en Ixtlán del Río, Nayarit, su estudio fue hecho utilizando la búsqueda de sismos mediante el algoritmo FAST (Yoon et al., 2015; Bergen et al., 2016; Bergen & Beroza, 2018), con el que se detectó un mayor número de eventos que los que habían sido reportados por el SSN (Sánchez, 2021).

Como se mencionó, la posibilidad de que no se hayan identificado enjambres en algunas regiones como consecuencia de la detección toma importancia, sobre todo en zonas donde la  $M_{\min}$  es alta.

Como se muestra en Figura 6.2, en donde se añade al catálogo de enjambres la sismicidad de fondo, la falta de enjambres sísmicos como consecuencia de la detección toma importancia sobre todo en algunas regiones de SMO, BAR y al norte de BB. En estas zonas con  $M_{\min}$  igual o mayor que 4.0 se observa que sí hay sismicidad de fondo, pero, la cantidad de eventos que se detectaron de 2012 a finales de 2022 son pocos.

Hay una región en SMO entre los 22° y 24° de latitud en la que en todo el periodo de estudio no se identificaron enjambres sísmicos porque no hubo sismicidad. Esta zona tiene un área que no tiene una buena cobertura, pero, hacia el noroeste y sureste la cobertura mejora, aun así, no hay ningún sismo en el catálogo. Este comportamiento entonces podría ser asociado a alguna característica de la geología de la región.

Otra área en la que la falta de enjambres puede ser relacionada con las características físicas y geológicas es la zona más que con problemas de detección, es la región centro de la FVTM. Como se puede observar en la Figura 6.2 la cobertura es mejor respecto a las regiones del norte. Además, se identifican enjambres hacia el este que pueden tener un origen tectónico y luego hacia el oeste también hay enjambres tanto de origen tectónico como volcánico.

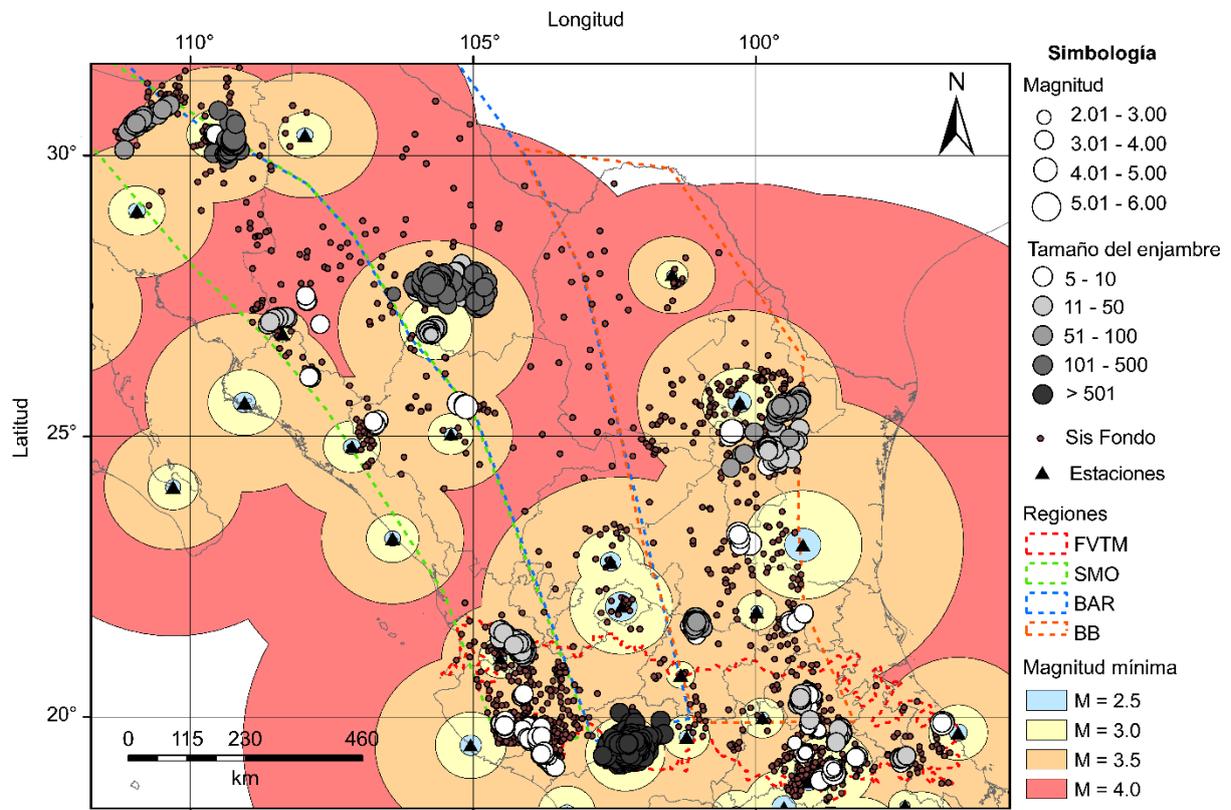


Figura 6.2 Magnitud mínima que es posible detectar por medio de una sola estación de banda ancha del SSN (triángulos en color negro). También se muestra la sismicidad que conforma los enjambres sísmicos identificados (círculos) en cada región (líneas punteadas). De cada sismo se puede observar la magnitud que tienen (tamaño del círculo) y el tamaño del enjambre sísmicos al que pertenecen (tono de gris). También se observa la sismicidad de fondo en círculos pequeños de color café.

Al sur de la región BAR solo se identificaron dos enjambres pequeños que formaban parte de los enjambres de Michoacán. Pero, al norte de estos enjambres, aunque se observa una mejor cobertura de estaciones y una disminución de la  $M_{\min}$ , no se identificaron más secuencias sísmicas. Esto permite pensar en la posibilidad de que esta falta de enjambres sísmicos no esté relacionada con la detección y que la falta de movimiento pueda ser una consecuencia de una menor concentración de esfuerzos. Incluso, se puede ver que, al este de esta área, en la región BB se identificó el enjambre de Guanajuato- San Luis Potosí.

La profundidad promedio de la sismicidad que conforma los enjambres sísmicos en las regiones BAR, BB, SMO y FVTM, en la mayoría de los casos se concentró en una profundidad promedio de 5 km, que es un valor asignado por el SSN. En las cuatro zonas también puede notarse que hay casos en los que los eventos se localizaron a una profundidad promedio de 0 a 20 km.

En Chihuahua, que se ubica en la región BAR, al norte de la secuencia de Hidalgo del Parral de 2022, se ubican tres enjambres que alcanzaron una mayor profundidad que el primero. En la región BB, los enjambres que alcanzaron mayor profundidad promedio, entre 5 a 20 km, se ubican en el estado de Nuevo León. En SMO se observa que los sismos de algunas secuencias que se ubican al sur de la región se localizaron a profundidades promedio que se extendieron de 5 a 40 km. Para la región de la FVTM se puede ver que los enjambres ubicados en la parte este se encontraron a menor profundidad entre los 5 o 10 km, los enjambres más al oeste se extendieron de 10 a 25 km y los enjambres en Michoacán superaron 25 km.

La localización de los enjambres en profundidad también es importante porque puede facilitar la relación entre la posición de los sismos y la localización de algunas estructuras geológicas.

## 6.1 CONCLUSIONES

En este trabajo se identificaron cincuenta y un enjambres sísmicos en un periodo de diez años, de los cuales, doce ya habían sido estudiados con anterioridad o fueron reportados por el SSN. El número de sismos y la fecha de ocurrencia de los enjambres identificados en este estudio es congruente con lo reportado por otros autores o el SSN.

En cuanto a la comparación de las secuencias que se identificaron en las zonas de traslape entre la FVTM y las tres regiones del norte: SMO, BAR y BB. Los enjambres identificados en estas

áreas en común coinciden y la única diferencia fue consecuencia de la magnitud mínima considerada para las cuatro regiones.

Así que la robustez del método empleado de la distancia al vecino más cercano puede corroborarse por medio de la identificación de secuencias que habían sido analizadas en trabajos previos, además de la obtención de resultados similares en las zonas de traslape. Pues, en estas zonas en común, los resultados fueron parecidos independientemente de las diferencias entre los parámetros utilizados: valor  $b$ , dimensión fractal  $d_f$  y distancia umbral  $\eta_0$ .

Los enjambres que han sido estudiados en trabajos previos o reportados por el SSN son los más numerosos de cada catálogo. Con dos excepciones, la primera fue un enjambre de trece elementos en la FVTM y la segunda un enjambre que no había sido reportado que contiene setenta y un sismos y se ubica al norte de la región SMO.

Los enjambres reportados o estudiados con anterioridad también se ubican en una zona con buena cobertura de estaciones y han sido importantes por su origen. Por ejemplo, la secuencia El Cuchillo de 2014, la secuencia en Ixtlán del Río de 2018, con un posible origen antrópico asociado a la actividad de presas. También, aquellos enjambres con un origen volcánico como los que se presentaron en el campo volcánico Michoacán-Guanajuato en 2020, 2021 y 2022 y que tienen una posible relación con el nacimiento de un volcán. Por último, aquellos de origen tectónico que permiten analizar la actividad tectónica del lugar donde se presentan como el enjambre de 2012 en Linares, de 2013 en Chihuahua, en Guanajuato-San Luis Potosí en 2021.

Por otra parte, podemos observar que la zona donde la mayor tasa de sismicidad se encontró de forma agrupada y en secuencias que se comportan como un enjambre sísmico fue la FVTM, aunque, esta sismicidad se concentra principalmente en los tres enjambres más grandes que fueron identificados en Michoacán y que están relacionados con la actividad volcánica de la región.

Casi todos los grupos analizados mostraron un comportamiento de enjambre sísmico. El comportamiento en forma de enjambre de la sismicidad en la zona norte y centro de nuestro país puede ser más común de lo que se piensa para algunas de las regiones: SMO entre los estados de Sinaloa, Chihuahua y Durango; en San Luis Potosí, los enjambres que se ubican más al oeste y los de la parte este de la FVTM.

Si bien es cierto que se han estudiado y se ha explicado el origen de algunos enjambres sísmicos en estas regiones, es conveniente explorar con mayor detalle el origen de este tipo de sismicidad

en otras áreas. Por ejemplo, las regiones en donde se identificaron enjambres de menor tamaño como la parte este y oeste de la FVTM, San Luis Potosí, las secuencias entre Chihuahua, Sinaloa y Durango.

Para el estudio de enjambres sísmicos, la cobertura de estaciones y la magnitud mínima que pueda detectarse juega un papel fundamental. En algunas zonas como el norte y centro de SMO y BAR, debido a la cobertura de estaciones, no se tienen bases suficientes para decir que la actividad sísmica en forma de enjambre no se presenta.

Si la cobertura en el norte de México mejora en un futuro, se podría volver a construir un catálogo de enjambres sísmicos. Con la nueva información se podría ver si la cantidad de enjambres sísmicos aumenta o si estos se presentan en las regiones donde actualmente la  $M_{\min}$  es alta. Incluso pueden enriquecer la información que se ha encontrado en este trabajo.

## 7 REFERENCIAS

---

- Baiesi, M., & Paczuski, M. (2004). Scale-free networks of earthquakes and aftershocks. *Physical Review*, 69(6), 8. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.066106>
- Beer, M., Kougioumtzoglou, I., Patelli, E., & Siu-Kui, A. (2015). Encyclopedia of Earthquake Engineering. In *Encyclopedia of Earthquake Engineering* (pp. 871–885). Springer Reference.
- Bergen, K. J., & Beroza, G. C. (2018). Detecting earthquakes over a seismic network using single-station similarity measures. *Geophysical Journal International*, 213(3), 1984–1998. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy100>
- Bergen, K. J., Yoon, C., & Beroza, G. C. (2016). Scalable Similarity Search in Seismology: A New Approach to Large-Scale Earthquake Detection. *Springer National Publishing*, 301–308. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46759-7\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46759-7_23)
- Danré, P., De Barros, L., Cappa, F., & Ampuero, J. P. (2022). Prevalence of Aseismic Slip Linking Fluid Injection to Natural and Anthropogenic Seismic Swarms. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(12), 1–16. <https://doi.org/10.1029/2022JB025571>
- Domínguez, T., Zobin, V. M., & Reyes-Davila, G. A. (2001). The fracturing in volcanic edifice before an eruption: The June-July 1998 high-frequency earthquake swarm at Volcán de Colima, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 105(1–2), 65–75. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(00\)00243-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00243-2)
- Fasola, S. L., Brudzinski, M. R., Holtkamp, S. G., Graham, S. E., & Cabral-Cano, E. (2019). Earthquake swarms and slow slip on a sliver fault in the Mexican subduction zone. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(15), 7198–7206. <https://doi.org/10.1073/pnas.1814205116>
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., & Manea, M. (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522–523, 122–149. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.09.018>
- Fischer, T. (2003). The August-December 2000 earthquake swarm in NW Bohemia: The first

- results based on automatic processing of seismograms. *Journal of Geodynamics*, 35(1–2), 59–81. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(02\)00054-6](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(02)00054-6)
- Fischer, T., & Hainzl, S. (2017). Effective stress drop of earthquake clusters. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(5), 2247–2257. <https://doi.org/10.1785/0120170035>
- Fischer, T., Horálek, J., Hrubcová, P., Vavryčuk, V., Bräuer, K., & Kämpf, H. (2014). Intra-continental earthquake swarms in West-Bohemia and Vogtland: A review. *Tectonophysics*, 611, 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.11.001>
- Gardine, M., West, M. E., & Cox, T. (2011). Dike emplacement near Parícutin volcano, Mexico in 2006. *Bulletin of Volcanology*, 73(2), 123–132. <https://doi.org/10.1007/s00445-010-0437-9>
- Gardner, K. K., & 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. <https://doi.org/10.1086/622062>
- Goltz, C. (2005). Fractal and chaotic properties of earthquakes. In *Most*. Springer. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BFb0028316>
- Gómez-Arredondo, C. M., Montalvo-Arrieta, J. C., Iglesias-Mendoza, A., & Espindola-Castro, V. H. (2016). Relocation and seismotectonic interpretation of the seismic swarm of August - December of 2012 in the Linares area, northeastern Mexico. *Geofisica Internacional*, 55(2), 95–106. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2016.55.2.1714>
- Grassberger, P., & Procaccia, I. (1983). Measuring the strangeness of strange attractors. *Physics Letters*, 97A, 189–208.
- Gutenberg, B., & Richter, C. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin - Seismological Society of America*, 25, 185–188.
- Hainzl, S. (2004). Seismicity patterns of earthquake swarms due to fluid intrusion and stress triggering. *Geophysical Journal International*, 159(3), 1090–1096. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02463.x>
- Hainzl, S., & Fischer, T. (2002). Indications for a successively triggered rupture growth

- underlying the 2000 earthquake swarm in Vogtland/NW Bohemia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B12), ESE 5-1-ESE 5-9. <https://doi.org/10.1029/2002jb001865>
- Hainzl, S., & Ogata, Y. (2005). Detecting fluid signals in seismicity data through statistical earthquake modeling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(5), 1–10. <https://doi.org/10.1029/2004JB003247>
- Havskov, J. (1982). The Earthquake Swarm of February 1981 in Mexico City. *Geofísica Internacional*, 21(2), 157–175. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1982.21.2.909>
- Hicks, A. L. (2011). Clustering in multidimensional spaces with applications to statistical analysis of earthquake clustering. In *Thesis (M.S.)*. Universidad de Nevada, Reno.
- Holtkamp, S. G., & Brudzinski, M. R. (2011). Earthquake swarms in circum-Pacific subduction zones. *Earth and Planetary Science Letters*, 305(1–2), 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.03.004>
- Holtkamp, S. G., Pritchard, M. E., & Lohman, R. B. (2011). Earthquake swarms in South America. *Geophysical Journal International*, 187(1), 128–146. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05137.x>
- Ibs-von Seht, M., Plenefisch, T., & Klinge, K. (2008). Earthquake swarms in continental rifts - A comparison of selected cases in America, Africa and Europe. *Tectonophysics*, 452(1–4), 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.02.008>
- Kostoglodov, V., & Pacheco, J. F. (1999). *Cien años de sismicidad en México*. Instituto de Geofísica de La Universidad Nacional Autónoma de México. <http://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/sismos/100a%F1os.html>
- Legrand, D., Pertou, M., Macías, J. L., Siebe, C., Pacheco, J., Chacón, F., Lermo, J., Quintanar, L., & Cisneros, G. (2023). Repeated seismic swarms near Parícutin volcano: precursors to the birth of a new monogenetic volcano in the Michoacán-Guanajuato volcanic field, México? *Bulletin of Volcanology*, 85(5), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s00445-023-01645-0>
- Lomnitz, C., Mooser, F., Allen, C., Brune, J., & Thatcher, W. (1970). Seismicity and tectonics

of the Northern Gulf of California region, Mexico. Preliminary results. *Geofísica Internacional*, 10(2), 37–48.

Mandelbrot, B. (1967). How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 156(3775), 636–638. <https://doi.org/10.1126/science.156.3775.636>

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. *Bulletin of the Earthquake Research Institute Universidad de Tokyo*, 41, 615–658.

Molchan, G., & Kronrod, T. (2009). The fractal description of seismicity. *Geophysical Journal International*, 179(3), 1787–1799. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04380.x>

Montalvo-Arrieta, J. C., Pérez-Campos, X., Ramos-Zuñiga, L. G., Paz-Martínez, E. G., Salinas-Jasso, J. A., Navarro, I., & Ramírez-Fernández, J. A. (2018). El Cuchillo seismic sequence of October 2013–July 2014 in the burgos basin, northeastern Mexico: Hydraulic fracturing or reservoir-induced seismicity? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(5), 3092–3106. <https://doi.org/10.1785/0120180165>

Munguía, L., Mayer, S., Aguirre, A., Méndez, I., González-Escobar, M., & Luna, M. (2016). The 2006 Bahía Asunción Earthquake Swarm: Seismic Evidence of Active Deformation Along the Western Margin of Baja California Sur, Mexico. *Pure and Applied Geophysics*, 173(10–11), 3615–3629. <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1184-9>

Nishikawa, T., Nishimura, T., & Okada, Y. (2021). Earthquake Swarm Detection Along the Hikurangi Trench, New Zealand: Insights Into the Relationship Between Seismicity and Slow Slip Events. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(4), 1–31. <https://doi.org/10.1029/2020JB020618>

Ogata, Y. (1988). Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes. *Journal of the American Statistical Association*, 83, 9–27.

Omori, F. (1894). On after-shocks of earthquakes. *J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo*, 7, 111–200.

Pacheco, J., Valdés-González, C., Delgado, H., Singh, S. K., Zuñiga, F. R., Mortera-Gutiérrez,

- C. A., Santoyo, M. A., Domínguez, J., & Barrón, R. (1999). Tectonic implications of the earthquake swarm of 1997 in the Michoacan Triangle, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 12(6), 567–577. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(99\)00040-1](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(99)00040-1)
- Peresan, A., & Gentili, S. (2018). Seismic clusters analysis in Northeastern Italy by the nearest-neighbor approach. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 274, 87–104. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2017.11.007>
- Pérez-Campos, X. (2019). Servicio Sismológico Nacional, México. *Summ. Bull. Internatl. Seismol. Cent.*, 53(II), 29–40. <https://doi.org/10.31905/SZ7RYBTM>
- Pérez-Campos, X., Espíndola, V., Pérez, J., Estrada, J., Cárdenas, C., Bello, D., González-López, A., González, D., Contreras, M., Maldonado, R., Yi, T., Rasilla, I., Vela, M., Cruz, J., Cárdenas, A., Navarro, F., Hurtado, A., Mendoza, A., Montoya-Quintanar, E., & Pérez-Velázquez, M. (2018). The mexican national seismological service: An overview. *Seismological Research Letters*, 89(2A), 318–323. <https://doi.org/10.1785/0220170186>
- Pinzón, J. I., Núñez-Cornú, F. J., & Rowe, C. A. (2017). Magma intrusion near Volcan Tancítaro: Evidence from seismic analysis. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 262, 66–79. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2016.11.004>
- Roland, E., & McGuire, J. J. (2009). Earthquake swarms on transform faults. *Geophysical Journal International*, 178(3), 1677–1690. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04214.x>
- Ross, Z., & Cochran, E. (2021). Evidence for Latent Crustal Fluid Injection Transients in Southern California From Long-Duration Earthquake Swarms. *Geophysical Research Letters*, 48(12). <https://doi.org/10.1029/2021GL092465>
- Ross, Z., Cochran, E., Trugman, D., & Smith, J. (2020). 3D fault architecture controls the dynamism of earthquake swarms. 368(6497), 1082–1086.
- Sánchez, G. (2021). *La secuencia sísmica de Ixtlán del Río ¿Un caso de sismicidad disparada por presas?* Universidad Nacional Autónoma de México.
- Shapiro, S. A., Huenges, E., & Borm, G. (1997). Estimating the crust permeability from fluid-injection-induced seismic emission at the KTB site. *Geophysical Journal International*,

131(2), 5–8. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb01215.x>

Smith, K. D., von Seggern, D., Blewitt, G., Preston, L., Anderson, J. ., Wernicke, B. P., & Davis, J. L. (2004). Evidence for deep magma injection beneath Lake Tahoe, Nevada-California. *Science*, 305, 1277–1280.

Spada, M., Wiemer, S., & Kissling, E. (2011). Quantifying a potential bias in probabilistic seismic hazard assessment: Seismotectonic zonation with fractal properties. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(6), 2694–2711. <https://doi.org/10.1785/0120110006>

SSN. (2013). *Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Secuencia de Sismos en el Estado de Hidalgo Septiembre, 2013*. <http://www.ssn.unam.mx/>

SSN. (2018a). *Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Reporte Especial. Secuencia Sísmica del 11 al 16 de mayo de 2018, Sinaloa*. <http://www.ssn.unam.mx/>

SSN. (2018b). *Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Reporte Especial. Secuencia Sísmica del 24 al 25 de diciembre de 2018, Nayarit (M 4.0)*. <http://www.ssn.unam.mx/>

SSN. (2020). *Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Reporte Especial. Secuencia Sísmica del 5 de enero al 10 de marzo de 2020 Michoacán (M 4.1)*. <http://www.ssn.unam.mx/>

SSN. (2021a). *Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Reporte Especial. Secuencia Sísmica del 13 de marzo al 26 de agosto de 2021, Sonora (M 5.1)*. <http://www.ssn.unam.mx/>

SSN. (2021b). *Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Reporte Especial. Secuencia Sísmica del 30 de mayo al 3 de septiembre de 2021, Michoacán (4.1)*. <http://www.ssn.unam.mx/>

SSN. (2021c). *Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Reporte Especial. Secuencia Sísmica del 4 al 6 de*

septiembre de 2021, Guanajuato-San Luis Potosí (M 4.5). <http://www.ssn.unam.mx/>

SSN. (2022a). *Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Reporte Especial. Secuencia Sísmica del 15 al 22 de noviembre de 2022 al Suroeste de Hidalgo del Parral, Chihuahua.* <http://www.ssn.unam.mx/>

SSN. (2022b). *Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Reporte Especial. Secuencia Sísmica del 23 de septiembre en los Reyes, Michoacán.* <http://www.ssn.unam.mx/>

SSN. (2023). *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Servicio Sismológico Nacional.* <http://www.ssn.unam.mx>

Suárez, G., Sánchez-Alvaro, E., Lomas-Delgado, E., & Arvizu-Lara, G. (2016). The 2013 seismic swarm in Chihuahua, Mexico: Evidence of active extensional deformation in the Southern Basin and range. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(6), 2686–2694. <https://doi.org/10.1785/0120160179>

Taroni, M., Vocalelli, G., & De Polis, A. (2021). Gutenberg–Richter B-Value Time Series Forecasting: A Weighted Likelihood Approach. *Forecasting*, 3(3), 561–569. <https://doi.org/10.3390/forecast3030035>

Utsu, T. (2002). *Statistical features of seismology*. International handbook of Earthquake and Engineering Seismology.

Vidale, J., Boyle, K., & Shearer, P. (2006). Crustal earthquake bursts in California and Japan: Their patterns and relation to volcanoes. *Geophysical Research Letters*, 33(20), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2006GL027723>

Vidale, J., & Shearer, P. (2006). A survey of 71 earthquake bursts across southern California: Exploring the role of pore fluid pressure fluctuations and aseismic slip as drivers. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(5), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2005JB004034>

Volant, P., & Grasso, J. R. (1994). The finite extension of fractal geometry and power law distribution of shallow earthquakes: a geomechanical effect. *Journal of Geophysical*

*Research*, 99(B11), 879–889. <https://doi.org/10.1029/94jb01176>

- Wiemer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(3), 373–382.
- Yamamoto, J., Espíndola, J. M., Zamora-Camacho, A., & Castellanos, G. (2018). The origin of the recent (2012–2016) seismic activity in the Guadalajara, Jalisco, Mexico, area: A block boundary interaction? *PLoS ONE*, 13(8), 1–13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200991>
- Yoon, C. E., O’ Reilly, O., Bergen, K. J., & Beroza, G. C. (2015). Earthquake detection through computationally efficient similarity search. *Science Advantages*, 1(11). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501057>
- Zaliapin, I., & Ben-Zion, Y. (2013a). Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(6), 2847–2864. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50179>
- Zaliapin, I., & Ben-Zion, Y. (2013b). Earthquake clusters in southern California II: Classification and relation to physical properties of the crust. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(6), 2865–2877. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50178>
- Zaliapin, Ilyar, Gabrielov, A., Keilis-Borok, V., & Wong, H. (2008). Clustering analysis of seismicity and aftershock identification. *Physical Review Letters*, 101(1). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.018501>
- Zhuang, J., Ogata, Y., & Vere-Jones, D. (2002). Stochastic declustering of space-time earthquake occurrences. *J. Am. Stat. Assoc.*, 97, 369–380.
- Zobin, V. M. (1996). Earthquake clustering in shallow subduction zones: Kamchatka and Mexico. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 97(1–4), 205–218. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(95\)03129-4](https://doi.org/10.1016/0031-9201(95)03129-4)
- Zúñiga, F. R., Suárez, G., Figueroa-Soto, Á., & Mendoza, A. (2017). A first-order seismotectonic regionalization of Mexico for seismic hazard and risk estimation. *Journal of Seismology*, 21(6), 1295–1322. <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9666-0>