

La Red Sísmica de Querétaro, nueva infraestructura de monitoreo en el centro de México

Juan Martín Gómez-González*, Lucía Capra Pedol y Víctor Hugo Márquez Ramírez

Instituto de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México,
campus UNAM-Juriquilla, Blvd. Juriquilla No. 3001, Querétaro 76230, Qro., México.
* Autor para correspondencia (J.M. Gómez-González): gomez@geociencias.unam.mx

EDITORES:

Luigi Solari

CÓMO CITAR:

Gómez-González, J. M., Capra Pedol, L., & Márquez Ramírez, V. H. (2025). La Red Sísmica de Querétaro, nueva infraestructura de monitoreo en el centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 42(2), XXX-XXX. DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/igc.20072902e.2025.2.1853>

Manuscrito recibido: diciembre 12, 2024

Manuscrito corregido recibido: marzo 30, 2025

Manuscrito aceptado: marzo 31, 2025

Publicado en línea: mayo 28, 2025 (en prensa)

COPYRIGHT

© 2025 Los autores.

Este es un artículo de acceso-libre publicado y distribuido por la Universidad Nacional Autónoma de México bajo los términos [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) que permite uso irrestricto, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que se otorguen los créditos correspondientes al (los) autor(es) original(es).



RESUMEN

Las redes sísmicas son fundamentales para monitorear y entender el comportamiento espacio-temporal de la sismicidad, especialmente en regiones intraplaca las cuales se han estudiado poco. En el centro de México la falta de infraestructura ha dificultado contar con un registro sistemático de la sismicidad. En este trabajo se describe la creación y avances de la Red Sísmica de Querétaro, desarrollada por el Instituto de Geociencias, para registrar y estudiar el fenómeno sísmico en el centro de México. La red entró en operación en septiembre de 2021. El catálogo de septiembre de 2021 a diciembre de 2022 muestra una actividad somera (< 20 km), con una distribución NW-SE, paralela al eje central de la Sierra Madre Oriental. La variación espacial de la microsismicidad en la región está determinada por la geología de las provincias fisiográficas de la Faja Volcánica Transmexicana, la Mesa Central y la Sierra Madre Oriental. La red sísmica de Querétaro ayudará a identificar las principales estructuras geológicas que generan la microsismicidad. Las localizaciones epicentrales ya forman parte del Atlas Estatal de Riesgo, ello facilitará evaluar algunos riesgos potenciales para la población. También permitirá estudiar la sismicidad local y regional intraplaca y crear una historia sísmica instrumentalmente documentada que permita evaluar el peligro sísmico. Los nuevos datos sísmicos permitirán estimar los parámetros de la fuente sísmica, proponer modelos de velocidades en la corteza, calcular leyes de atenuación y sentar las bases para estudios de sismotectónica. De igual forma ayudará a estudiar algunos colapsos en cavernas y eventos inducidos artificialmente, los cuales son comunes en la región. Con la red sísmica se formaliza el monitoreo instrumental sistemático de sismicidad intraplaca en el Centro de México.

Palabras clave: Red sísmica; estaciones sísmicas; sismicidad intraplaca; monitoreo; riesgo; México.

ABSTRACT

Seismic networks are essential for monitoring and understanding the space-time behavior of seismicity, especially in intraplate regions, which have been little studied. In central Mexico, the lack of infrastructure has hindered systematic recording of seismicity. This paper describes the creation and progress of the Queretaro Seismic Network, developed by the Instituto de Geociencias, to record and study seismic phenomena in central Mexico. The network began operation in September 2021. The earthquake catalog from September 2021 to December 2022 shows shallow activity (<20 km), with a NW-SE distribution, parallel to the central axis of the Sierra Madre Oriental. The spatial variation of microseismicity in the region is controlled by the geology of the physiographic provinces of the Trans-Mexican Volcanic Belt, the Mesa Central, and the Sierra Madre Oriental. The Queretaro seismic network will help to identify the main geological active structures. The epicentral locations are already included in the State Risk Atlas, which will facilitate the assessment of some potential risks

to the population. It will also allow for the study of local and regional intraplate seismic activity and the creation of an instrumentally documented seismic history for assessing seismic hazard. The new seismic data will allow for the estimation of seismic source parameters, the proposal of crustal velocity models, the calculation of attenuation laws, and the establishment of the foundation for seismotectonic studies. The seismic network will help to study some cavern collapses and induced events, which are common in the region. The seismic network will enable the systematic instrumental monitoring of intraplate seismic activity in Central Mexico.

Key words: seismic network; seismic stations; intraplate seismicity; monitoring; risk; Mexico.

INTRODUCCIÓN

Las redes sísmicas son la herramienta básica en el registro de sismicidad natural e inducida. Su capacidad de detección y precisión en las localizaciones depende del número de estaciones, su distancia y distribución epicentral y la sensibilidad de los equipos, especialmente para la detección de microsismicidad de magnitud (M_L) inferior a 3.5 (Bormann, 2012; D'Alessandro y Stickney, 2012; Chen *et al.*, 2022). Una red sísmica suficientemente densa facilita diferenciar el tipo de fuentes, estimar las características del modelo de velocidades (Bormann, 2012), identificar las estructuras sismogénicas y describir los procesos de la fuente sísmica, entre otros (Bormann, 2012; Miccolis *et al.*, 2021).

En México la mayoría de las investigaciones sobre sismología se han enfocado en la Trincheras Mesoamericana (TMA) por ser la región de mayor actividad (Figura 1), causada por la interacción de las placas de Rivera y Cocos con la de Norteamérica, ello ha permitido aportes importantes sobre el fenómeno sísmico. La red de mayor cobertura territorial en México es la del Servicio Sismológico Nacional (SSN) que actualmente cuenta con 64 estaciones de banda extra-ancha (<http://www.ssn.unam.mx/acerca-de/estaciones>), su número se ha incrementado en los últimos 20 años. Esta infraestructura ha permitido mejorar el conocimiento sobre los procesos sísmicos, la estructura de velocidades y la geometría de la zona de subducción. La mejora en la detección también evidenció la existencia de sismicidad en zonas de las que se tenía poca información (Figura 1). Pese a estos avances, la infraestructura del SSN sigue siendo insuficiente para describir el comportamiento de la sismicidad en las regiones intraplaca.

La cantidad y distribución de estaciones sísmicas son fundamentales en la localización de la sismicidad. Un comparativo con algunos países, con tasas de sismicidad parecidas a las de México, muestra que se requiere invertir más recursos en infraestructura sísmica. Por ejemplo, Costa Rica cuenta con un territorio 38 veces más pequeño y alrededor de 300 estaciones; mientras que en Estados Unidos de América (EE.UU.), cuya superficie es aproximadamente 4.6 veces más grande que México, cuenta con cerca de 4500 estaciones. Tan solo en el estado de California, EE.UU., cuyo territorio es aproximadamente la quinta parte del mexicano, la *California Integrated Seismic Network* (<https://www.cisn.org>) opera más de 3000 estaciones (Hauksson, 2011). De hecho, la mayoría de los estados de EE.UU. cuentan con su propia red sísmica, incluso aquellos donde la tasa de sismicidad es baja. Esta política de inversión ha sido fundamental para caracterizar sismicamente la zona de Nuevo Madrid, en el centro-este de EE.UU., donde han ocurrido varios sismos históricos grandes, como los de 1811 ($M7.5$) y 1812 ($M7.3$). Las redes sísmicas regionales, locales y temporales han ayudado a construir mapas epicentrales, estimar la orientación y profundidad de las fallas activas (Pollitz *et al.*, 2001), así como evaluar el riesgo sísmico asociado con las estructuras sismogénicas del noreste de Arkansas, suroeste de Kentucky, sureste de Missouri y el noroeste de Tennessee (Nuttli, 1973; Herrmann y Canas, 1978; Lay y Wallace, 1995; Orton *et al.*, 2016).

En este contexto, los datos sísmicos son la principal herramienta para definir la existencia de las fallas sismogénicas sin expresión en superficie, ya sea porque fueron erosionadas por los agentes geomórficos o cubiertas por sedimentos (Güven *et al.*, 2023). Sin

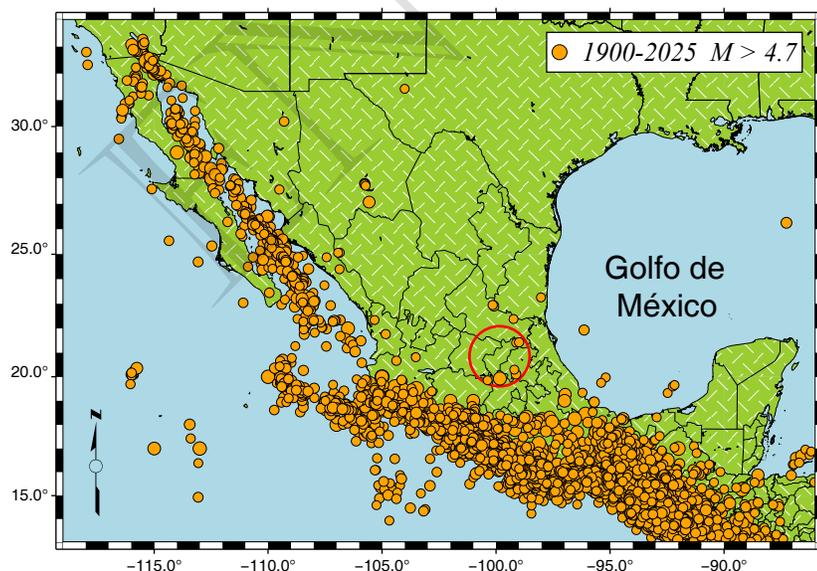


Figura 1. Ubicación de la región de estudio (círculo rojo). Sismicidad registrada por el SSN de enero de 1900 a febrero de 2025 ($4.7 < M < 8.2$).

embargo, la resolución de las redes sísmicas depende del número de estaciones, de su distribución y de su distancia a la fuente. En este trabajo se describe la creación de una nueva red sísmica, diseñada para monitorear la sismicidad en el centro de México. Los nuevos datos ayudarán a describir el comportamiento espacial y temporal de la sismicidad, acotar las estructuras sismogénicas y generar un historial que permitirá estimar el riesgo sísmico local y regional.

Redes sísmicas en México

El SSN ha sido un referente para otros centros de investigación interesados en desplegar su propia red sísmica, tanto en las normas de construcción de casetas, como en su infraestructura y en la administración de datos. Su densidad de estaciones ha permitido incrementar la cantidad de localizaciones epicentrales en todo el país, especialmente de regiones donde se tenía poco o ningún antecedente (Figura 2). Otra red más específica es la del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). La Red del Noroeste de México (RESNOM) se diseñó para monitorear la sismicidad regional de los cinco estados alrededor del Golfo de California (Baja California Sur, Baja California, Sonora, Sinaloa y

Nayarit). De las estaciones desplegadas al menos 18 son de banda extra-ancha y 32 de aceleración y 45 transmiten en tiempo real (Castro *et al.*, 2018). Otra red regional, pero territorialmente más pequeña, es la del Valle de México (RSVM) que se compone de más de 30 estaciones de banda ancha desplegadas en la Ciudad de México (CDMX) y el Estado de México. Además, en la región existen más de 120 acelerógrafos instalados por diferentes instituciones (Quintanar *et al.*, 2018), la mayoría de ellos en la CDMX.

Junto a la cuenca de México existe otra red aún más específica, la cual fue diseñada para monitorear el volcán Popocatepetl, se compone de 16 sismógrafos y más de 22 sensores de monitoreo de diferentes parámetros, incluso con cámaras de video (Espinasa-Pereña *et al.*, 2021), su cercanía con la RSVM enriquece su cobertura. Otra red similar es la del estado de Colima (RESCO), su objetivo principal es monitorear el volcán de Fuego, comprende 15 estaciones propias, más otras pertenecientes a diferentes instituciones como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y la Universidad de Colima, entre otras (Espinasa-Pereña *et al.*, 2021). En el caso de las redes estatales son pocos los estados que cuentan con

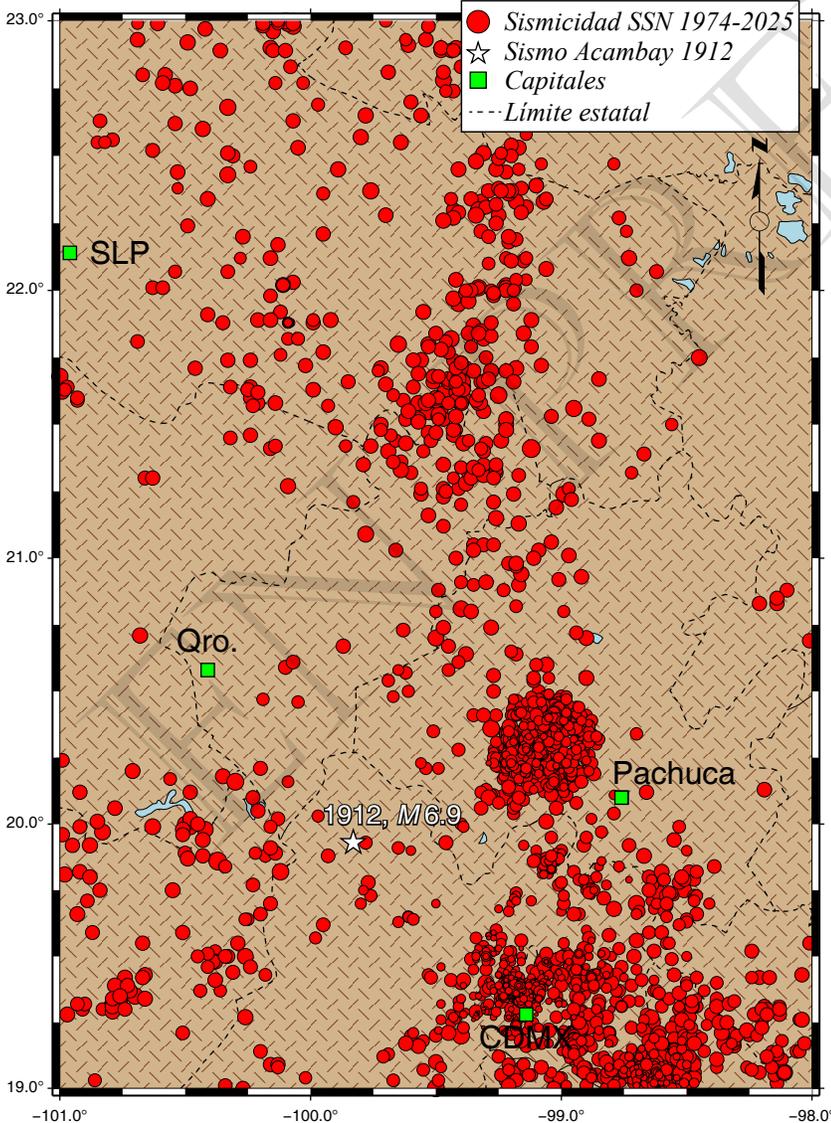


Figura 2. Sismicidad instrumental regional registrada por el SSN (2025) de julio de 1974 a febrero de 2025. La estrella indica el epicentro de los sismos de Acambay de 1912 y los cuadros verdes las capitales de los estados. En las concentraciones de sismicidad, hacia Hidalgo y Estado de México, influye la existencia de, al menos, una estación sísmica en dicha zona (fuente: SSN, 2025).

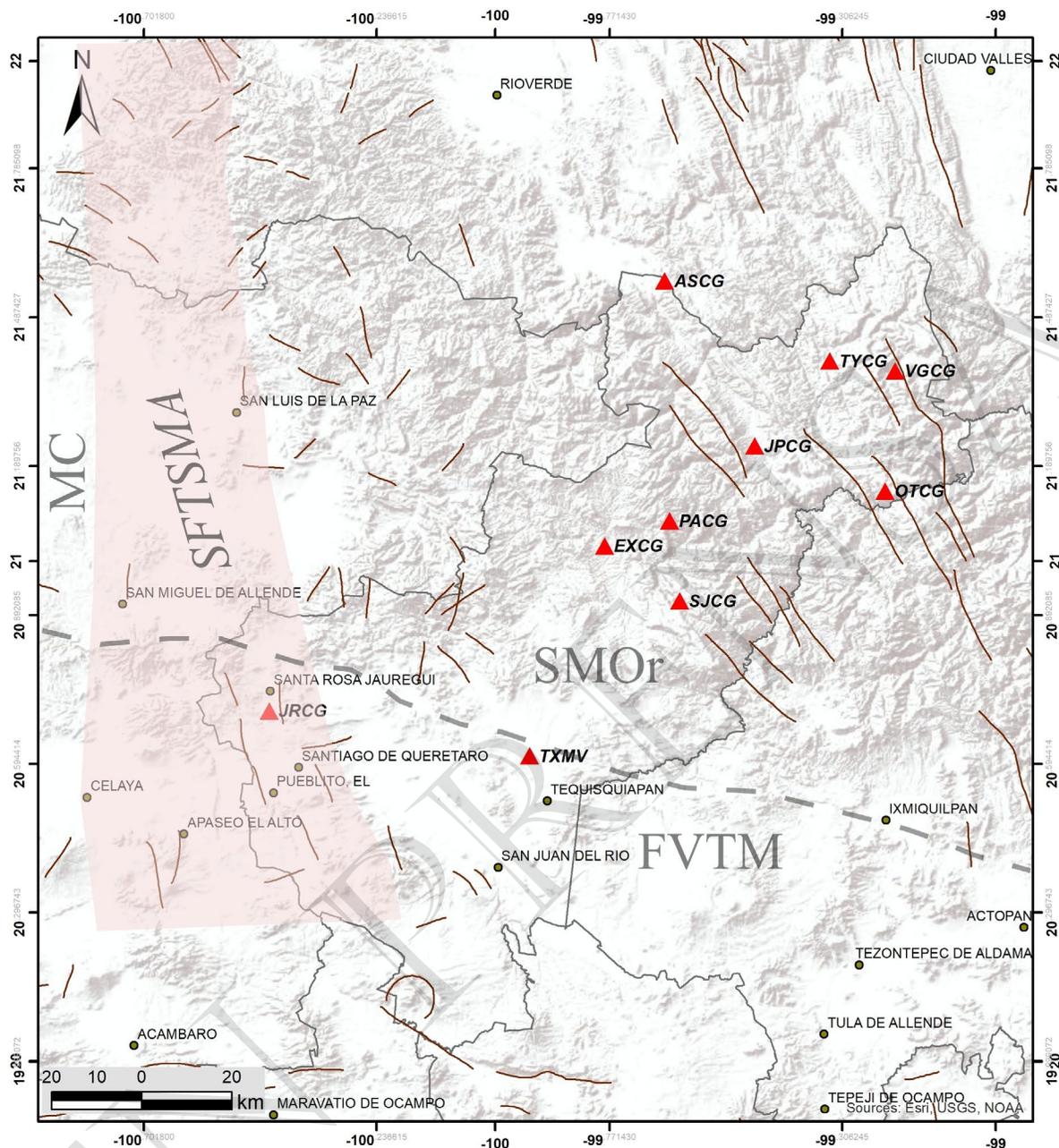


Figura 3. Provincias fisiográficas en el estado de Querétaro. SMOr: Sierra Madre Oriental, FVTM: Faja Volcánica Transmexicana, MC: Mesa Central, SFTSMA: Sistema de Fallas Taxco San Miguel de Allende. Las líneas café indican las fallas en la región y los triángulos la ubicación de las estaciones de la Red Sísmica de Querétaro.

algún tipo de infraestructura. La más grande es la de Jalisco (RESAJ) con 28 estaciones, la mayoría de ellas de banda ancha (Núñez-Cornú *et al.*, 2018), ésta permite monitorear la sismicidad generada por la subducción de las placas de Cocos y de Rivera bajo la placa de Norteamérica. La cantidad y distribución de estaciones de la RESAJ también le permite monitorear la microsismicidad que ocurre hacia el norte del estado.

Existen otras redes sísmicas más pequeñas, pero no menos importantes, en los estados de Nuevo León, Veracruz, Tlaxcala y recientemente en Zacatecas. Sin embargo, la mayoría de los estados de la República Mexicana carecen de una red sísmica propia, probablemente por el desconocimiento de la ocurrencia de sismicidad y del impacto en el entorno. En Querétaro tuvieron que pasar más de 20

años de monitoreo de sismicidad con redes temporales (Zúñiga *et al.*, 2003; Dávalos-Álvarez *et al.*, 2005; León-Loya, 2014; López-Valdivia, 2014) para concretar la creación de una red sísmica (Figura 3), la cual mejora la cobertura de estaciones en la región del Bajío y ayudará a registrar y estudiar la sismicidad intraplaca.

Marco Tectónico

Las características geológicas y estructurales del estado de Querétaro son el resultado de diferentes ambientes sedimentarios (marino, continental y volcánico) y procesos tectónicos asociados a la evolución de tres provincias fisiográficas (Figura 3): la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM), la Sierra Madre Oriental (SMOr) y la Mesa Central (MC) (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002; Padilla y Sánchez,

2007; Dickinson, 2009). La FVTM es un arco magmático continental asociado a la subducción de la placa de Cocos por debajo de la placa Norteamericana. Tiene una longitud de más de 1000 km y cruza el país desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México, sus rocas ocupan la porción centro sur del estado de Querétaro. La actividad volcánica inició en el Mioceno Medio-Tardío, y se extendió a lo largo del Pleistoceno y Holoceno, a través de diferentes pulsos magmáticos (Ferrari *et al.*, 1999). En su configuración actual se encuentran los principales volcanes activos de México. En el estado de Querétaro, las rocas pertenecientes a la FVTM corresponden al pulso magmático del Mioceno Tardío (12–5 Ma), caracterizado principalmente por vulcanismo bimodal, con la formación de mesetas lávicas, estratovolcanes y calderas (Aguirre-Díaz *et al.*, 2005). A escala regional, dos principales sistemas de fallas normales caracterizan a la FVTM: un sistema E-W, paralelo al arco volcánico, asociado al vulcanismo monogenético, y un sistema NW-SE a lo largo del cual se han formado las principales cadenas de estratovolcanes (Alaniz *et al.*, 1998). Ambos sistemas se pueden reconocer en el Estado de Querétaro (Figura 3): el sistema de fallas NW-SE denominado Taxco San Miguel de Allende (SFTSMA, Alaniz *et al.*, 1998), y un conjunto de fallas orientadas ENE, asociadas al sistema Chapala-Tula (Aguirre-Díaz *et al.*, 2005).

Otra provincia fisiográfica con presencia en Querétaro es la SMOr, la cual se extiende a lo largo de 1350 km al oriente de México, su orientación es NW-SE y tiene un ancho variable que aumenta de sur a norte. Ocupa el sector nororiental del estado de Querétaro, y consiste de rocas sedimentarias marinas, plegadas durante un evento de acortamiento del Cretácico Tardío (Vázquez-Serrano *et al.*, 2018), forma un sistema regional de anticlinales y sinclinales, las cuales conservan la misma orientación a lo largo de toda la cordillera, excepto en Nuevo León donde sufre una flexión y sus pliegues cambian de orientación hacia el W-E (Chávez-Cabello *et al.*, 2011). Las rocas que componen la SMOr son principalmente sedimentarias de origen marino (calizas y lutitas), formadas desde el Triásico Tardío hasta el Cretácico. Sus elevaciones máximas varían entre 2000–3700 m s.n.m. En el Cenozoico, una fase de deformación extensional llevó a la formación de un sistema de fallas normales con orientación N-S, NE-SW y E-W (Carrillo-Martínez, 2000).

La Mesa Central (MC) es la tercera provincia fisiográfica que tiene expresión en Querétaro, ocupa la porción occidental del estado, en el límite con el estado de Guanajuato y San Luis Potosí, corresponde a una provincia magmática del Cenozoico, caracterizada principalmente por el emplazamiento de derrames de lava y domos de composición dacítica a riolítica. Su relieve es plano en la mayor parte de la región, con una altitud que varía entre 1700 y 2300 m s.n.m.; en su porción sur presenta relieves más abruptos separados por valles con relleno fluvio-lacustre (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005, 2012, 2023). Diferentes etapas de deformación han afectado a la MC desde el Cretácico Tardío, hasta la fase extensional del Oligoceno. Las principales estructuras tectónicas presentan rumbos NW-SE, NE-SW, N-S y E-W (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005; Dávalos *et al.*, 2005, Del Río Varela *et al.*, 2018). El límite entre la MC y la FVTM corresponde a un sistema de fallas normales conocido como el sistema del Bajío (Botero-Santa *et al.*, 2015).

Sismicidad histórica regional

Uno de los sismos intraplaca más grandes que ha ocurrido en México es el de Acambay de 1912 (M6.9), en el Estado de México (Langridge *et al.*, 2000). Este poblado se encuentra a 92 km al SE de la ciudad de Querétaro y casi a la misma distancia al noroeste de la Ciudad de México (Figura 2). El sismo afectó a más de 700 personas de entre las cuales hubo alrededor de 100 decesos, además produjo bastantes daños materiales. Pese a su impacto, actualmente poca gente sabe de su ocurrencia, algunas razones de su anonimato fueron

posiblemente la baja población que había en ese entonces en Acambay, menos de 2000 habitantes, mientras que en el Estado de México había 989510 habitantes, y en el país poco más de 15 millones (INEGI, 1910a, 1910b); además, las noticias se difundían lentamente con un alcance territorialmente limitado.

Son pocos los estudios que existen sobre sismos históricos en la región. Suter *et al.* (1996) propusieron las intensidades regionales del sismo de Acambay de 1912, estimaron que sus isosistas podrían haber alcanzado intensidades de hasta VIII en los poblados más cercanos al epicentro, y de hasta IV en los más alejados. Entre los estados afectados por la distribución de daños estarían el Estado de México, Michoacán, Querétaro, Ciudad de México, Puebla, Guanajuato, Hidalgo, San Luis Potosí, Morelos y Tlaxcala. En conjunto, la población de estos estados, en esa época era aproximadamente de 6500000 personas; actualmente supera los 55000000 de habitantes. Dado este crecimiento poblacional hoy en día un sismo como el de Acambay podría ser devastador, ya que el municipio de Acambay cuenta con 67872 habitantes y el Estado de México tiene cerca de 16992418 (INEGI, 2020). Vale la pena recordar que con el crecimiento poblacional también se incrementa el riesgo sísmico, especialmente cuando se desconoce las zonas potencialmente activas y aquellas que son más vulnerables, el reto es estimar el riesgo oportunamente para evitar que el siguiente episodio se pueda convertir en un desastre. Para eso se requiere un monitoreo constante de la sismicidad, y que los datos sean de buena calidad, actualmente las ciudades se han esparcido tanto, y crecido tan vertiginosamente, que otro sismo en el centro de México, similar al de Acambay de 1912, podría causar muchas pérdidas humanas y de infraestructura en varios de los centros de población cercanos.

En Querétaro, uno de los primeros estudios instrumentales sobre sismicidad instrumental fue el de Zúñiga *et al.* (2003), quienes en 1998 desplegaron una pequeña red sísmica temporal para monitorear una secuencia sísmica en el poblado de Sanfandila, población ubicada a unos 20 km al SE de la capital, en el municipio de Pedro Escobedo. La correlación de los hipocentros, y mecanismos focales, con las estructuras geológicas locales les permitieron proponer como la estructura sismogénica una falla normal, cuyo foco se localizó a 6 km de profundidad. Tiempo después, Dávalos-Álvarez *et al.* (2005) desplegaron una red temporal, de tres sismógrafos digitales triaxiales GBV de periodo corto, para evaluar el estado de sismicidad alrededor de las principales estructuras geológicas potencialmente activas al sur de la ciudad de Querétaro. El nivel de microsismicidad fue más alto de lo esperado, algunas estaciones que registraron más de 600 microsismos en un año, sin embargo, por su magnitud tan pequeña la mayoría de los eventos sólo se registraron en las estaciones más cercanas al epicentro (Dávalos-Álvarez *et al.*, 2005), y de los cuales sólo se pudieron localizar seis eventos con el método clásico de localización (Lee y Lahr, 1972). Llama la atención que un par de sismos ocurrieron cerca de donde se construiría el aeropuerto Intercontinental de Querétaro, lo que sugiere la necesidad de monitorear la zona sistemáticamente.

Otro episodio de microsismicidad ocurrió en diciembre de 2000, en el extremo NW de Querétaro, en el municipio de Arroyo Seco. Durante tres meses se desplegó una red temporal de tres sismógrafos digitales GBV de periodo corto, con geófonos de 4.5 Hz. Se registraron aproximadamente 300 disparos, sin embargo, debido a las magnitudes tan pequeñas de los eventos sólo fue posible localizar seis sismos (Zúñiga *et al.*, 2009). Este método clásico requiere un mínimo de tres estaciones, bien distribuidas azimutalmente, para localizar un evento (Lee y Lahr, 1972; Lienert *et al.*, 1986 Havskov *et al.*, 2012). Para aprovechar al máximo la actividad registrada en una y dos estaciones se recurrió al método mono-estación (Lienert *et al.*, 1986; Magotha *et al.*, 1987; Lay y Wallace, 1995; Lienert y Havskov, 1995). Éste es la

última alternativa para aprovechar los datos sísmicos registrados, su calidad es inversamente proporcional a la distancia fuente-estación, ello hace que las localizaciones sean más cualitativas, pues tampoco se puede estimar la profundidad del foco (Bormann, 2012; Ottemöller *et al.*, 2021). Con este método se localizaron 160 epicentros distribuidos alrededor del valle.

En 2007 ocurrió otra secuencia sísmica, esta vez hacia el extremo este de Querétaro, entre los municipios de Jalpan y Landa de Matamoros. Para registrar la sismicidad inicialmente se instalaron cinco sismógrafos triaxiales GBV de periodo corto (4.5 Hz), la sismicidad se mantuvo constante durante casi tres años, por sus magnitudes tan pequeñas los eventos se registraron en pocas estaciones. Para localizarla, León-Loya (2014) y López-Valdivia (2014) recurrieron al método mono-estación (Lienert *et al.*, 1986; Magotra *et al.*, 1987; Lay y Wallace, 1995; Lienert y Havskov, 1995), con el cual obtuvieron más de 1800 epicentros, cuya distribución NW-SE es paralela al eje de la SMOr (García de León-Martínez, 2018; León-Loya, 2014; López-Valdivia, 2014), con una migración de sur a norte, hacia la zona media de San Luis Potosí. El carácter cualitativo del método proviene de su limitación para estimar un error de localización (Bormann, 2012; Ottemöller *et al.*, 2024). Este trabajo fue el inicio de una colaboración que aún perdura con las autoridades de Protección Civil de Querétaro.

Otra secuencia sísmica ocurrió entre marzo de 2010 y diciembre de 2011, en los municipios de Peñamiller y Tolimán. Lo atípico de esta actividad fue su duración, de casi 20 meses, y que ocurrió en el semi-desierto queretano, donde los pobladores declararon nunca haber sentido un sismo antes. Para el monitoreo se instalaron tres sensores de periodo intermedio (Guralp CMG-40T), cuyo ancho de banda es entre 0.0333 Hz y 50 Hz, con digitalizadores SARA de 22 bits. Las localizaciones se obtuvieron mediante el método mono-estación, los epicentros no mostraron un patrón definido. Los habitantes locales resaltaron lo estruendoso de la actividad y no el movimiento del terreno, lo que sugiere fuentes someras. Esta secuencia confirmó la necesidad de una red sísmica permanente para el estado.

La Red Sísmica de Querétaro

La primera estación sísmica de banda extra ancha en Querétaro se instaló en el Campus UNAM-Juriquilla en septiembre de 2010, la cual incluyó un sensor STS-2, un digitalizador Quanterra Q330 y un acelerógrafo Episensor. Dicha estación registró múltiples eventos, principalmente regionales y telesísmicos, cuyos datos se compartieron inmediatamente en tiempo real con el SSN y con el consorcio internacional IRIS (*Incorporated Research Institutions for Seismology*). La secuencia sísmica de Peñamiller de 2010 ayudó a convencer al gobierno del estado, y a la Coordinación Estatal de Protección Civil (CEPCQ), de instalar una red sísmica en el estado; se adquirieron seis sismógrafos de banda ancha: un sensor Trillium 120PA, cinco sensores Compact y seis digitalizadores Taurus. Entre 2012 y 2016 los municipios de San Joaquín, Arroyo Seco y Pinal de Amoles aportaron los terrenos y la construcción de sus respectivas casetas. Sin embargo, el proyecto cayó en un marasmo, y no se retomó sino hasta finales de 2019, cuando CONAHCYT aprobó un proyecto de investigación con el que se adquirieron varios sismógrafos de periodo corto; mientras que Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro (CONCYTEQ) otorgó al Instituto de Geociencias (IGc) un apoyo económico para la construcción de cuatro casetas, al final se construyeron seis. La Unidad de Servicios para la Educación Básica en el Estado de Querétaro (USEBEQ) autorizó la construcción de una caseta en sus planteles de Extoraz y Jalpan (Tabla 1). Con estos apoyos inició la configuración de la Red Sísmica de Querétaro (ReSiQ) compuesta por 10 estaciones.

Con la llegada de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) al Campus UNAM-Juriquilla se incrementó notablemente el ruido ambiental. Entonces, la ENES apoyó el traslado de la estación Juriquilla al Centro de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Animal en Altiplano (CEIEPAA), de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ) de la UNAM, en Tequisquiapan (Tabla 1; Figuras 3 y 4). Con un nuevo nombre, TXMV, la estación entró en operación el 20 de febrero de 2020. Además, en septiembre de 2021, gracias a un nuevo apoyo del CONCYTEQ, se concretó el enlace por internet de todas las estaciones de la ReSiQ. Desde entonces se ha trabajado en la operatividad de las estaciones, en la estabilidad de la transmisión, en la recepción de datos, en la configuración del servidor y en la optimización del algoritmo de disparo.

La inauguración formal de la ReSiQ se realizó el 23 de septiembre de 2022, con ello inició formalmente el monitoreo de sismicidad en Querétaro (Figura 5). La ReSiQ generará nuevos datos sísmicos (Figura 6) para localizar la microsismicidad intraplaca, modelar las formas de onda y estudiar los procesos sísmicos que detonan enjambres regionales. La nueva información estimulará nuevas investigaciones en sismotectónica. La red también ayudará a registrar y discriminar la actividad antropogénica en zonas de interés económico, así como apoyar a las autoridades de Protección Civil para estimar el impacto de la sismicidad en la población.

Instrumentación

La ReSiQ se compone de 10 estaciones (Tabla 1, Figura 2), tres de ellas son de banda extra-ancha (TXMV, SJCG ASCG), una de periodo intermedio (JPCG) y seis de periodo corto (EXCG, JRJCG, PICG, TYCG, 3LCG, OTCG). La estación de Tequisquiapan (TXMV) contiene un sensor triaxial de alto rendimiento STS-2, cuya banda de operación es de 8.33 mHz – 50 Hz y sensibilidad de 1500 Vs/m; además de un acelerógrafo de fuerzas balanceadas EpiSensor de Kinematics y un digitalizador Quanterra Q330 de seis canales y 24 bits (Tabla 1 y 2). Los datos de esta estación son de acceso libre desde los servicios del SSN e IRIS (Figura 3). Otra estación de banda ancha se encuentra en el municipio de San Joaquín (SJCG), allí se instaló un sensor triaxial Trillium 120PA, con una banda de operación entre 8.33 mHz y 145 Hz, con un digitalizador Terrashark (Tabla 2). La estación de Arroyo Seco (ASCG) incluye un sensor Trillium Compact con un ancho de banda entre 50 mHz y 100 Hz, y un digitalizador Terrashark (Figura 3, Tabla 1 y 2). En las estaciones SJCG y ASCG la principal fuente de ruido local es la vegetación del entorno. En SJCG hay una amplificación del movimiento del terreno por una potente capa de arcilla que subyace la estación (Tabla 3).

Tabla 1. Ubicación espacial de las estaciones que componen la Red Sísmica de Querétaro (ReSiQ).

Código	Latitud (°)	Longitud (°)	Elevación (m s.n.m.)	Población
ASCG	21.56	-99.66	1108	Arroyo Seco
EXCG	21.03	-99.78	1335	Peñamiller
JPCG	21.23	-99.48	756	Jalpan
JRJCG	20.70	-100.45	1848	Juriquilla
OTCG	21.15	-99.22	1326	Otates
PICG	21.08	-99.65	2636	Pinal de Amoles
SJCG	20.92	-99.63	2348	San Joaquín
TXMV	20.61	-99.93	1909	Tequisquiapan
TYCG	21.39	-99.32	704	Tancoyol
3LCG	21.38	-99.20	1624	Valle de Guadalupe



Figura 4. Estación sísmica de Tequisquiapan (TXMV), localizada en el Centro de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Animal en Altiplano (CEIEPAA), de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM, en Tequisquiapan, Querétaro. Se compone de un sensor STS-2, un digitalizador Q330 y un acelerógrafo Episensor. Los datos se comparten con el SSN y con el Consorcio IRIS.

En las estaciones Jalpan (JPCG) y Valle de Guadalupe (3LCG) se instaló un sensor 3D Guralp CMG-40T cuyo ancho de banda es de 30 s a 50 Hz, ambos conectados a un digitalizador Terrashark (Tabla 2). El resto de las estaciones, Pinal de Amoles (PICG), Extoraz (EXCG), Juriquilla (JRCG), albergan un sismógrafo Terrashark 3D, con geófonos de 4.5 Hz (ver Tabla 2) y se encuentran sobre material bien consolidado. De acuerdo con los diferentes fabricantes todos los digitalizadores son nominalmente de 24 bits, sin embargo, exceptuando los sismógrafos de banda ancha, el resto opera de forma efectiva con 21 o 23 bits. La mayoría de las estaciones se encuentran aisladas y su relación señal-ruido es alta, lo cual se constata en la calidad visual de las señales. En las estaciones EXCG, JRCG, PICG, TYCG, 3LCG se instaló un sismógrafo Terrashark 3D de periodo corto, se trata de geófonos cuya frecuencia natural es de 4.5 Hz. Los sismógrafos Terrashark tienen una banda de respuesta entre 5 Hz – 1000 Hz, lo que los restringe al monitoreo de sismicidad local y regional cercano. Finalmente, en la estación Otates (OTCG) también se instaló un sensor 3D de periodo corto de alta sensibilidad, OYO HS-1 3C, cuya banda de respuesta está entre 2 Hz – 250 Hz, este sensor está conectado a un digitalizador Terrashark.

Entre 2019 y 2021 para concretar la ReSiQ se construyeron cuatro casetas (Tabla 1) de acuerdo con las especificaciones del SSN. Su diseño comprende dos cuartos de doble muro, uno para el sensor, que se coloca sobre un pilar construido sobre el basamento, el cual está aislado del resto de la estructura (Figura 4). En el segundo cuarto se coloca el digitalizador, los dispositivos de transmisión, las baterías y conectores de energía. En Otates (OTCG) y Tancoyol (TYCG) se construyó una mini-caseta, tipo registro, la cual no contiene el cubo de concreto, pero que está asentada sobre una roca caliza bien consolidada (Tabla 2). Siete de las casetas se encuentran sobre roca firme en sitios relativamente aislados, y dos sobre material poco consolidado (Tabla 2). A la estación SJCG la subyace una capa de arcilla, mientras que la estación JPCG se encuentra sobre una capa de conglomerado pobremente consolidado (Tablas 1 y 2).

La mayoría de las estaciones están alimentadas por corriente

directa, con un panel solar de 50 watts y una batería de ciclo profundo de 24 Ah para el sismógrafo, así como un panel de 150 watts y una batería de 40 Ah para la antena de internet y el modem (Tabla 2). El flujo de energía entre el panel solar, la batería de respaldo y el sismógrafo o modem se administra con un controlador fotovoltaico. Por otro lado, en la sierra las tormentas eléctricas son uno de los fenómenos meteorológicos más frecuentes, lo que provoca múltiples apagones que pueden durar varios días, por ello, varias estaciones cuentan con una segunda batería de respaldo. Además, para prevenir el impacto de las corrientes inducidas, se utiliza una caja de aluminio de 5 mm para proteger los sensores, con un revestimiento interno de poliestireno extruido (Foamular de Owens Corning) de 2 cm de espesor para reducir las variaciones de temperatura.

Sistema de Monitoreo

La ReSiQ se diseñó para registrar principalmente la sismicidad en el estado de Querétaro (Figuras 2 y 3), aunque la variedad de sismógrafos permite registrar también sismos regionales y telesísmos (Figura 3). La digitalización se obtiene a través de un convertidor A/D de 24 bits, que proporciona un rango dinámico efectivo de 130 dB. Todos los equipos están configurados para registrar las señales a una tasa de 100 muestras por segundo. La Tabla 2 muestra la banda de operación de los sismógrafos que actualmente componen la ReSiQ.

El diseño de redes sísmicas es un desafío multifactorial, para Olivieri y Clinton (2012) la eficacia de una red depende de un buen sistema de monitoreo sísmico (SMS), para ello se requiere conocer las características físicas de la red, la distribución de estaciones, las condiciones del entorno, la capacidad de comunicación, el tipo de sismicidad y las magnitudes esperadas. El SMS de la ReSiQ se basa en los programas SeisComp (<https://www.seiscomp.de>) y Earthworm (<http://www.earthwormcentral.org>), los cuales son escalables, pueden operar tanto en redes grandes como pequeñas. Estos programas pueden adquirir y procesar el flujo de cientos de datos de alta frecuencia de muestreo y procesar secuencias densas de réplicas.

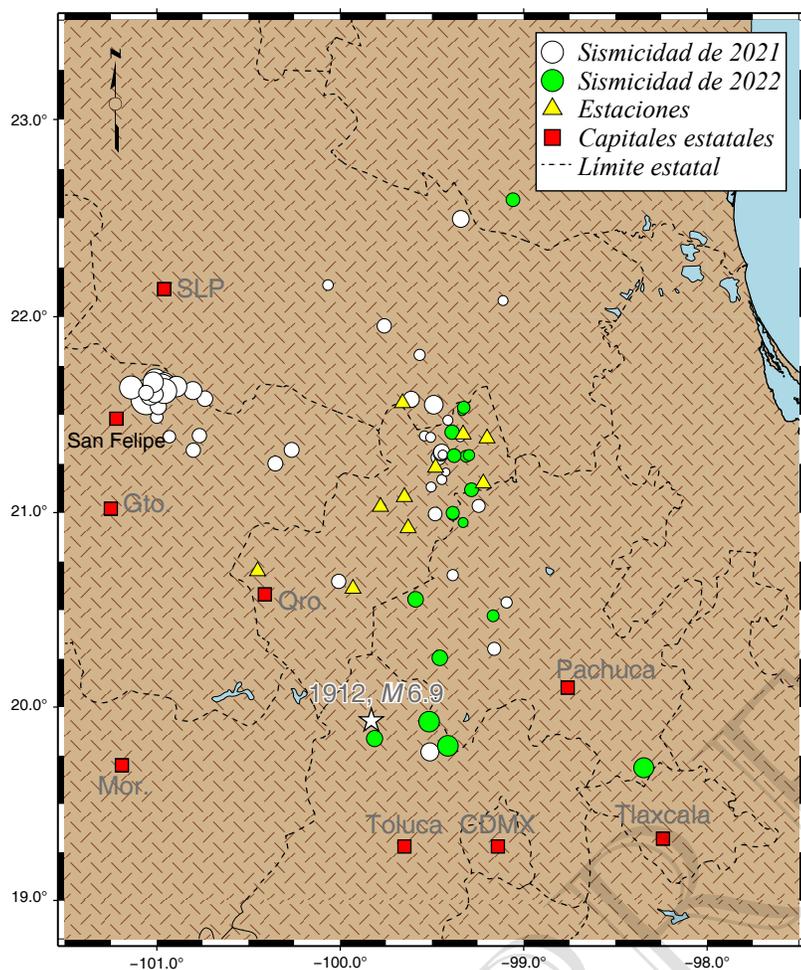


Figura 5. Sismicidad registrada por la ReSiQ (círculos) de septiembre de 2021 a diciembre de 2022, se compone de 280 microsismos. Las magnitudes máximas y mínimas son 4.4 y 1.1, respectivamente. El tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud calculada. Los triángulos indican la ubicación de las estaciones. La estrella indica el epicentro del sismo de Acambay de 1912 (M6.9).

SeisComp

SeisComp es un software sismológico para adquisición, procesamiento, distribución y análisis interactivo de datos (<https://www.seiscomp.de/doc/apps/seedlink.html>). Actualmente la ReSiQ utiliza únicamente el módulo básico de adquisición de datos sísmicos en tiempo real. Para el intercambio a través de internet, este sistema dinámico se fundamenta en una base de datos única subyacente que se ejecuta en servidores Linux. Está programado en C++ y Python, además, contiene una GUI integrada (<https://www.seiscomp.de/seiscomp3>). Su versatilidad se basa en la inclusión de módulos para cada una de las etapas. Una vez instalado SeisComp, el servidor crea múltiples búfferes de anillos en una memoria compartida, uno por cada canal de adquisición del sismógrafo, a los que accede un selector de fase. SeisComp permite probar diferentes umbrales de detección de fase en los datos crudos, incluso bastante bajos, además contiene un algoritmo de asociación de fases para procesar eventos a diferentes escalas.

SeisComp realiza la transmisión de datos sísmicos hacia el servidor del IGc mediante SeedLink (<https://docs.fdsn.org/projects/seedlink/en/latest/protocol.html>). Se trata de un protocolo de adquisición de datos en tiempo real y un software cliente-servidor. Las series temporales se representan como una secuencia de paquetes de longitud variable y se vinculan mediante un identificador de estación y de flujo. Seedlink permite que los datos estén disponibles por internet a través de conexiones TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*). Para una conexión no cifrada el puerto

TCP predeterminado es el 18000, en el caso de que la conexión sea cifrada, entonces el protocolo TLS (Transport Layer Security) utiliza el puerto 18500, aunque ello probablemente implicará un posible incremento en la latencia. El proceso puede multiplexar varias series temporales en una sola conexión. En ocasiones el enrutador encuentra problemas que provocan la interrupción de la conexión a internet, como descargas eléctricas, deficiencias de la batería, interrupción temporal del internet, etc., lo que se aprecia como brechas en las series de tiempo, provocadas por la ausencia temporal de la señal u otros problemas de transmisión.

Una vez que SeisComp adquiere los datos de todas las estaciones los almacena de manera continua en una estructura de archivos miniSEED, y los pone disponibles a través de SeedLink para permitir su flujo en tiempo real. Dado que SeedLink incluye un concepto de solicitud de datos, ello puede implicar problemas de brecha en el caso de reinicio durante la transmisión. La mayoría de las estaciones de la ReSiQ utilizan un GPS para el control de la posición y el tiempo, aunque ante cualquier dificultad de sincronización los Terrashark tienen la posibilidad de utilizar el servicio de NTP (Network Time Protocol) de su tarjeta interna, ello garantiza la sincronización automática del tiempo.

Earthworm

La ReSiQ realiza la adquisición de datos sísmicos mediante el software de código abierto Earthworm (www.earthwormcentral.com). El sistema de procesamiento de datos es altamente modular para la

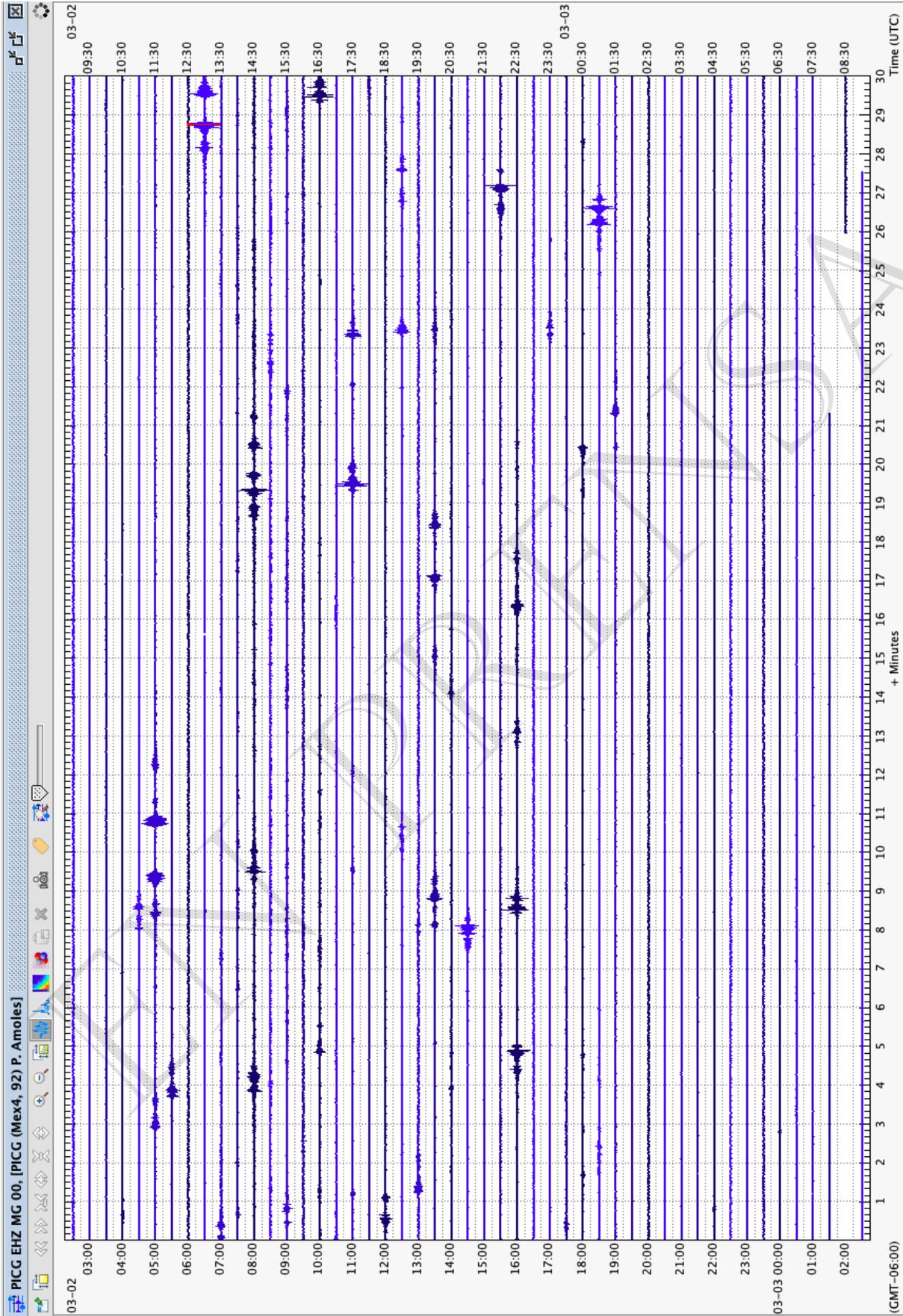


Figura 6. Ejemplo de un helicorder de 24 h del software Swarm de la estación Pinal de Amoles. La línea horizontal corresponde a 30 minutos de señal. El eje vertical izquierdo indica la hora local y el vertical derecho, el tiempo UTC.

Tabla 2. Características del terreno y frecuencias de operación de las estaciones de la ReSiQ.

Estación	Localidad	Tipo de suelo	Banda de operación de los sismógrafos
ASCG	Arroyo Seco	Roca caliza	120 s – 100 Hz
JPCG	Jalpan	Conglomerado	30 s – 50 Hz
JRCG	Juriquilla	Suelo sedimentario	4.5 Hz (Frec. Natural)
OTCG	Otates*	Roca caliza	2 Hz (Frec. Natural)
EXCG	Peñamiller	Roca caliza	4.5 Hz (Frec. Natural)
PICG	Pinal de Amoles	Roca caliza	4.5 Hz (Frec. Natural)
SJCG	San Joaquín	Capa de arcilla	120 s – 145 Hz
TYCG	Tancoyol*	Roca caliza	4.5 Hz (Frec. Natural)
TXMV	Tequisquiapan	Roca volcánica	8.33 mHz – 50 Hz
3LCG*	Valle de Guadalupe	Roca caliza	4.5 Hz (Frec. Natural) 30 s – 50 Hz

detección automática de hipocentros y magnitudes de sismos (Johnson *et al.*, 1995). Earthworm proporciona mecanismos de transporte de red y formatos comunes como salida para la transferencia de datos (Friberg *et al.*, 2010), su base de datos incluye la mayoría de los registradores de datos disponibles actualmente. El software es capaz de manejar cientos de canales en tiempo cuasi-real rápidamente, sus módulos cargan información en una base de datos MySQL, para luego recuperarla para su posprocesamiento y notificación de alarmas (Earle *et al.*, 2003). Sus componentes trabajan juntos para proporcionar una entrada, procesamiento y salida de datos eficientemente, mientras que sus capacidades en tiempo real permiten una respuesta inmediata de la actividad sísmica. Earthworm se caracteriza por la independencia de su sistema, escalabilidad, conectividad y robustez (<http://www.earthwormcentral.org/>). Su diseño en capas permite su ejecución en cualquier plataforma (Linux, Solaris, Mac OSX y Windows).

Earthworm realiza el procesamiento mediante programas separados denominados módulos, cada uno de ellos realiza una tarea específica y se comunica con los otros módulos, por ejemplo, el módulo *ew2mseed* es independiente, crea archivos continuos diarios en miniSEED, desde una conexión *wave_serverV*, el guardado de datos lo realiza en estructuras de archivos similares. La escritura de paquetes de mensajes ordenados y escritos la lleva a cabo en regiones de memoria compartida (anillos). Un módulo específico del dispositivo obtiene muestras digitalizadas (formas de onda) de la señal medida por uno o varios sensores conectados a un sismógrafo (canales). El módulo convierte las señales en una secuencia de paquetes de mensajes de datos de formas de onda de Earthworm estándar (TRACEBUFs), el cual identifica el origen de los datos que contiene utilizando una firma única para cada canal (SCNL, acrónimo en inglés del ID de estación, ID de canal, código de red e ID de ubicación). El segmento de datos de la forma de onda que contiene se identifica mediante el tipo de datos de cada muestra, el número de muestras, la hora UTC de la primera muestra y la frecuencia de muestreo. El módulo escribe en orden cada TRACEBUF en un anillo de memoria compartida para su posterior procesamiento por parte de otros módulos.

En la ReSiQ Earthworm está instalado en el servidor, en los sismógrafos 3D Terrashark y en los digitalizadores de la misma marca. Realiza el agrupamiento de señales en archivos que incluyen las estaciones con los disparos asociados con potenciales eventos, lo que facilita la identificación de las fases *P* y *S*, así como su posterior revisión y marcado de los archivos que contienen algún evento. Para la detección de fase, en los canales verticales, Earthworm utiliza un

Tabla 3. Niveles de ruido en las estaciones de la ReSiQ.

Estación	Ruido bajo	Ruido intermedio	Ruido alto
ASCG			X
EXCG		X	
TXMV		X	
JPCG			
JRCG			
OTCG	X		
PICG		X	
SJCG			X
TYCG		X	
3LCG		X	X

algoritmo de banda ancha denominado FilterPicker (Lomax *et al.*, 2012; Vasallo *et al.*, 2012). En los sismógrafos Terrashark, para que el sistema de detección de sismicidad local y regional sea lo más sensible posible, las ventanas se han fijado en 1 s para STA y 8 s para LTA (promedio a corto plazo). Una vez transferidos los datos al servidor del IGc, Earthworm realiza la asociación centralizada de fases, por lo que el análisis se realiza en tiempo cuasi-real. Para correlacionar los disparos de todas las estaciones se han probado diferentes umbrales de detección, también basados en la relación STA/LTA. Su optimización reduce los disparos en falso, lo que implica una menor cantidad de archivos.

Para una visualización constante y rápida de las señales en tiempo real la ReSiQ utiliza el software Swarm (<https://doi.org/10.5066/P93A9MWK>), el cual genera helicorders de 24 h que facilitan identificar los disparos más conspicuos asociados con un posible sismo (Figura 5). El procesamiento de datos y la localización de la sismicidad registrada por la ReSiQ se realiza mediante el software SEISAN (Ottmøller *et al.*, 2024), el cual se compone de un conjunto de programas, vinculados a la misma base de datos. SEISAN permite leer las fases de un evento, localizar su hipocentro, estimar diferentes parámetros espectrales, al igual que el momento sísmico, el azimut de llegada a partir de más de tres estaciones de tres componentes, entre otros. Los programas de búsqueda permiten utilizar diferentes criterios y localizar eventos particulares para trabajar con un subconjunto de datos sin extraer los eventos.

Microsismicidad en el centro de México

La tasa de sismicidad mundial es inversamente proporcional a la magnitud, este hecho ofrece la oportunidad de estudiar el fenómeno sísmico sin tener que esperar mucho tiempo. Sin embargo, el análisis de las formas de onda de sismos pequeños se puede dificultar por ser fácilmente afectadas por el ruido sísmico de fondo, el cual Lay y Wallace (1995) definen como pequeñas señales continuas generadas por fuentes de energía de deformación rápida, como las mareas, la presión atmosférica, el calentamiento diurno de la superficie y las vibraciones inducidas por el hombre. Dicho ruido puede incluso comprometer las ventajas del uso de sismógrafos de alta resolución (Havskov *et al.*, 2012). Cada fuente tiene su rango de frecuencias características, por ejemplo, la actividad antropogénica suele generar frecuencias altas (> 1 Hz), mientras que las condiciones climáticas y los cambios de temperatura producen ruido de baja frecuencia (< 0.05 Hz), en tanto que el ruido microsísmico, generado por la actividad del mar, aporta frecuencias entre 0.125 y 0.25 Hz (Longuet-Higgins, 1950). El antídoto está en tener una buena densidad y distribución de estaciones, su optimización incrementa la probabilidad de localizar y caracterizar la microsismicidad adecuadamente.

Ghasemi *et al.* (2018) han analizado el ruido sísmico de fondo como un proceso estocástico estacionario, el cual no tiene un espectro de fase definido porque puede ser causado tanto por el ruido ambiental antropogénico, como por el ruido propio de los instrumentos electrónicos, ambos pueden contaminar las señales sísmicas en un amplio rango de frecuencias (Ghasemi *et al.*, 2018). La mitigación del nivel del ruido de fondo es un factor clave para establecer los umbrales de detección. La caracterización del ruido sísmico en la ReSiQ es un tema pendiente que requiere de un análisis preciso, lo que está más allá de los objetivos de este texto.

Uno de los objetivos de la ReSiQ es detectar el rango más amplio de magnitudes, con especial énfasis en la microsismicidad. En cada sismógrafo Earthworm genera un archivo por evento, el cual se puede guardar de origen en diferentes formatos (seed, miniseed, GSE, suds, sac, ah, seisan). Al mismo tiempo se genera un archivo de 24 horas, el cual *seedlink* transmite periódicamente al servidor, una vez en éste Earthworm determina la longitud de la ventana de datos para cada evento, en función de la magnitud del sismo y de la relación STA/LTA, la cual típicamente puede ser entre 30 s y 300 s de duración. Earthworm genera en el servidor un archivo de registro que contiene todas las estaciones, de la red o de las subredes que se hayan configurado, independientemente de que algunas estaciones hayan registrado o no el evento.

Estimación de magnitudes

La ReSiQ combina sismógrafos de periodo corto (Terrashark), con sismógrafos de banda intermedia (Guralp) y extra ancha (Trillium y Quanterra, Tabla 1), lo que permite el registro de sismos locales y regionales. El análisis de la microsismicidad se puede dificultar hacia las magnitudes más pequeñas, ello depende del ruido del entorno y la cobertura de las estaciones. La magnitud local la estima SEISAN a partir de la lectura de la fase *P* en la componente vertical (M_L), calcula la magnitud por cada estación, al final de la inversión se obtiene un resumen de la localización junto con la magnitud promedio (Otemoller *et al.*, 2021). Dado que las frecuencias varían con la magnitud, la distancia y las características de la corteza, entre la fuente y la estación, aún hay eventos que pasan desapercibidos para la ReSiQ. Para garantizar la calidad de las localizaciones de los microsismos se requiere cubrir todo el estado con estaciones a distancias inferiores a 20 km, así como probar diferentes algoritmos de disparo. A nivel regional la ReSiQ ha registrado varios sismos de $M \geq 4.3$ ocurridos a menos de 500 km.

Localización y modelo de velocidades

La localización de sismicidad se puede dificultar en función de las distancias fuente-estación, ya que los tiempos de viaje son una función no lineal de las coordenadas de las estaciones. Pequeñas diferencias en dichos tiempos de viaje pueden ser de gran relevancia, por ejemplo, para dos estaciones que se encuentren en puntos opuestos de la fuente, a la misma distancia, su localización puede ser diferente. En la localización hipocentral, basada en el análisis de los arribos de las ondas *P* y *S*, las diferencias relativas de los tiempos de viaje se vuelven muy significativas entre eventos cercanos (Sokolowski *et al.*, 2016; Ross y Ben-Zion, 2014). Generalmente la relación señal-ruido de las ondas *P* es menor que la de las ondas *S*, por lo que los tiempos de detección están influidos por las ondas secundarias, ello dificulta distinguir si los arribos se deben a fallas pequeñas en la vecindad de otra falla más grande, o si son efectos espurios generados durante las localizaciones (Ross y Ben-Zion, 2014).

Para obtener las localizaciones es necesario contar con un modelo de velocidades del subsuelo (Lee y Lahr, 1972; Otemoller *et al.*, 2021), sin embargo, en Querétaro no existe un modelo regional de referen-

cia. Se probaron algunos modelos de velocidades extraídos de varias fuentes (Dziewonski y Anderson, 1981; Spica *et al.*, 2016; Mooney *et al.*, 2023), sin embargo, ninguno de ellos fue satisfactorio. Por ello, se utilizó un modelo modificado a partir de la estructura de densidades propuesta por Nieto-Samaniego *et al.* (2005) para la Mesa Central (Tabla 4). Las velocidades se dedujeron a partir de las relaciones de Birch (1960, 1961) y Gardner *et al.* (1974). Si bien el RMS de la mayoría de las localizaciones es inferior a 0.5, en algunos eventos el error es cercano a 1.0, debido probablemente a diferencias de hasta 0.5 s que existen entre los arribos observados y los teóricos en algunas trazas del mismo evento. Además, el programa de localización contenido en SEISAN no considera complejidades estructurales, sólo modelos horizontalmente estratificados (Tabla 4). Una tarea pendiente de la ReSiQ es explorar y mejorar el modelo de velocidades local. Para analizar microsismos Carvalho *et al.* (2016) han mostrado la importancia de mejorar el detalle de los modelos locales de velocidades, con base en un arreglo de estaciones a distancias inferiores a 1 km, logran localizar e invertir el tensor de momento de sismos de $M \sim 0.7$. La construcción de un modelo de velocidades *ad-hoc* para Querétaro permitirá explorar el umbral de detección y mejorar la calidad de las localizaciones.

RESULTADOS

La ReSiQ entró en operación en septiembre de 2021, su primera prueba de desempeño fue un enjambre sísmico ocurrido alrededor de San Felipe, Guanajuato, poblado que se encuentra dentro del Graben de Villa de Reyes, a unos 120 km de la ciudad de Querétaro. La actividad duró aproximadamente cinco semanas, sus magnitudes locales oscilaron entre 1.3 y 4.9, cuya profundidad fue somera, distribuida en los primeros 13 km de la corteza. Los eventos más grandes se percibieron en Querétaro, principalmente en los municipios de Pañamiller, Querétaro y Tolimán, incluso al sur de la zona metropolitana de la capital de San Luis Potosí.

El segundo episodio registrado durante la puesta en marcha de la ReSiQ fue un sismo grande ($M_w 7.1$) que ocurrió el 7 de septiembre de 2021, al suroeste del puerto de Acapulco, Guerrero, aproximadamente a 450 km de Querétaro. La diferencia entre la localización del SSN y el IGC fue de 40 km, aceptable si se toma en cuenta que se trata de una red local, y que a esa distancia la cobertura de la ReSiQ es azimutalmente reducida. Algunos ciudadanos de Querétaro reportaron a las autoridades de Protección Civil haber percibido leves agitaciones en sus viviendas.

De septiembre de 2021 a diciembre de 2022 la ReSiQ localizó poco más de 180 microsismos (Figura 6), cuyas magnitudes locales se encuentran en el intervalo de $1.1 < M_L < 4.9$. La mayoría ocurrió en la Sierra Gorda de Querétaro, la distribución de la sismicidad es SE-NW, lo que coincide con las localizaciones epicentrales de

Tabla 4. Modelo de velocidad utilizado para localizar la sismicidad registrada por la ReSiQ. Modelo derivado de Nieto-Samaniego *et al.* (2005), para ello se usó la relación $V_p/V_s=1.78$; *h* corresponde al espesor de la capa.

<i>h</i> (km)	V_p (km/s)	V_s (km/s)	<i>r</i> (gr/cm ³)
20.0	5.80	3.26	2.60
15.0	6.50	3.65	2.62
42.0	6.71	3.77	2.76
43.0	7.10	3.99	2.90
	8.05	4.52	3.25

León-Loya (2014) y López-Valdivia (2014), quienes usaron el método de localización mono-estación, y sugirieron algunas concentraciones de sismicidad. La ReSiQ además de mejorar estas localizaciones, permite estimar las profundidades, información indispensable para delinear las probables zonas sismogénicas locales. Para el disparo de los sismógrafos, y del sistema, se utiliza la relación STA/LTA. En cada estación se fijaron ventanas de STA=1.0 s y LTA=8.0 s, con un umbral de detección de 2.5. En el servidor Earthworm integra en un sólo archivo los disparos comunes de todas las estaciones de cada evento declarado por el umbral de detección. Este valor depende del nivel de ruido en el entorno de la estación, un valor pequeño puede generar múltiples disparos falsos consecutivos, especialmente cuando los niveles de sismicidad son altos. Pese a que la mayoría de las estaciones de la ReSiQ se encuentran en zonas con niveles bajos de ruido, la generación diaria de disparos falsos hasta diciembre de 2024 era alta, en promedio de más de 1200 por día. A partir de 2025 el umbral de disparo se estableció en 3.9, con ello se tienen cerca de 20 disparos por día, la mayoría de ellos positivos verdaderos, ello facilita la localización de la microsismicidad.

En la Figura 7 se muestra la sismicidad de enero a mediados de mayo de 2023, periodo en el que se localizó prácticamente la mitad de los eventos mostrados en la Figura 6, la cual contiene 16 meses de registro. Esto se podría interpretar como un incremento de sismicidad entre abril y mayo, pero en realidad se debe a la mejora en el algoritmo de disparo, a la solución de problemas técnicos que afectaban la operación de los sismógrafos y el envío continuo de datos.

La Figura 8 muestra los errores de localización de la Figura 7, la mayoría tiene un RMS inferior a 0.5. Los eventos ocurridos dentro de la red tienen los RMS más pequeños; conforme los eventos se alejan de la red, el error aumenta aunque algunos eventos dentro de la red también pueden tener un RMS alto debido a una baja relación

señal-ruido, lo que dificulta el marcado de fases. Por otro lado, al comparar las Figuras 6 y 7 se observa un comportamiento similar en la sismicidad de ambas figuras. En la Figura 7 también se puede observar una concentración de eventos en el centro-este del estado, entre las estaciones de San Joaquín y Tequisquiapan, cuya una orientación es SW-NE. En la mayoría de estas localizaciones su profundidad fue cero, lo que aunado a algunas particularidades de las formas de onda sugiere un origen antropogénico, asociado a las canteras que existen alrededor del poblado de Vizarrón, en el municipio de Cadereyta de Montes.

Algunas de las dificultades técnicas de la ReSiQ han sido la estabilidad de la conexión y la latencia. La conectividad regional se ve afectada cuando hay una alta demanda del sistema de internet, con ello se incrementa la competencia por las conexiones en las torres de comunicación locales, lo que puede generar interrupciones frecuentes y aleatorias, y comprometer la entrega de datos por la inestabilidad, acompañada de una latencia variable en cada estación. Generalmente, las estaciones localizadas en los extremos NW y NE (ASCG y 3LCG) del estado son las que más presentan esta inestabilidad. En la continuidad de la comunicación también influyen las condiciones climáticas y la topografía tan abrupta de la SMO, especialmente en las zonas con pocos puntos de acceso. Este conjunto de factores puede afectar el envío eficiente de datos. Si bien existen periodos en los que los enlaces operan con latencias mínimas, no es frecuente que se mantengan.

DISCUSIÓN

La ReSiQ permite contar con datos sísmicos de calidad para estudiar el fenómeno sísmico en el centro de México. Para que cumpla su función se requerirá evaluar constantemente sus capacidades e implementar mejoras continuas que garanticen su operatividad

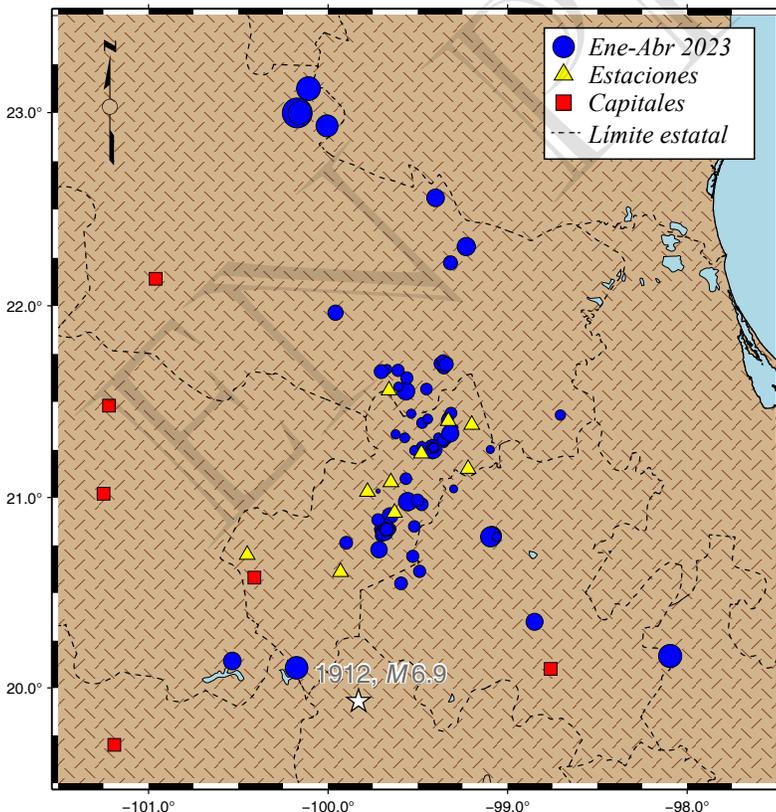


Figura 7. Microsismicidad registrada por la ReSiQ (círculos azules) de enero a mediados de mayo de 2023. Los epicentros en la Sierra Gorda conservan la misma tendencia de los eventos de la Figura 5. Nótese una concentración de eventos antropogénicos, con dirección SW-NE, en la parte centro este del estado de Querétaro, entre las estaciones SJCG y TXMV.

(D'Alessandro y Stickney, 2012). Por ejemplo, cuando ocurre un sismo $M_L \sim 3.5$ cerca de algunas estaciones, como ASCG, la agitación del terreno deforma la señal registrada, lo que incrementa el número de paquetes de datos enviados, y con ello se incrementa la velocidad de bits. Este comportamiento puede ocasionar una deficiencia en la compresión de los paquetes frente a la exigencia de un mayor reempaquetamiento, lo que provoca que durante la transmisión en tiempo real que los datos de mayor amplitud (ventana de ondas S) pasen a la cola del registrador e induzcan una latencia mayor que para los datos iniciales de la onda P , entonces para la localización se pueden requerir ventanas de tiempo más largas de ondas P y S , sin embargo, Earthworm no dispone de un sistema de ventanas autoajustables.

En la mayor parte del estado de Querétaro el servicio regional de internet aún es lento, intermitente e inestable, con altos niveles de latencia, lo que se acentúa en función de las condiciones meteorológicas. Además, los proveedores del servicio de internet son pocos y todos dependen del mismo proveedor mayor, por lo que cuando éste falla todas las transmisiones colapsan. Por otro lado, el desempeño de la red aún se puede mejorar, para ello se requiere completar el despliegado de estaciones en todo el estado, especialmente hacia el sur, sin embargo, varios de los sitios geográficamente idóneos se encuentran en poblados pequeños, donde el servicio de internet aún es deficiente.

En ocasiones se pierde el internet y se interrumpe la conexión entre el servidor y algunos sismógrafos y, aunque se restablece la conexión, no se restituye el flujo de datos pese a que los dispositivos estén activos. Aparentemente, cuando SeedLink realiza la solicitud de datos al sismógrafo existe una diferencia de tiempo o de velocidad entre ambos, lo que impide una sincronización correcta durante el reinicio de la transmisión. Entonces, aunque el sismógrafo y el modem estén activos, éste último ya no proporciona el servicio y no se puede reiniciar remotamente, por lo que hay que acudir a la estación para apagar y encender los dispositivos. Esta dificultad se

presenta principalmente en las estaciones de los extremos de la red (ASCG, 3LCG, TYCG), donde la calidad del internet menor. El reto es identificar la razón del corte, prever la ocurrencia de interrupciones similares y garantizar la reconexión de forma remota.

Por otro lado, las Figuras 6 y 7 corroboran la tendencia espacial de la microsismicidad localizada con el método de localización mono-estación obtenida por León-Loya (2014), López-Valdivia (2014), García de León-Martínez (2018) y Saucedo Cruz (2022). Las localizaciones actuales son más precisas y aportan un parámetro muy importante, la profundidad, lo que ayudará a mejorar la descripción espacial de la sismicidad y la estimación de dimensiones de las estructuras sismogénicas. La sismicidad a escala regional sugiere ciertos alineamientos, principalmente hacia el norte de los tres municipios queretanos que colindan con San Luis Potosí. Sin embargo, a una escala mayor los alineamientos no son tan evidentes, por ello el monitoreo debe ser lo más constante y amplio posible en el tiempo. Esta información permitirá diseñar campañas de geología y geofísica que ayudarán a acotar y caracterizar las probables fallas sismogénicas.

Perspectivas

Con la creación de la ReSiQ se incrementa la infraestructura de monitoreo sísmico en México. Los datos que genera en tiempo real permiten obtener localizaciones de buena calidad, con base en un procesamiento rápido de señales. Esta inversión detonará nuevos estudios regionales de sismicidad y sismotectónica. Aún es necesario instalar algunas estaciones sísmicas hacia el sur del estado, ello ayudará a estimar un modelo regional de velocidades, lo que permitirá construir mecanismos focales, mediante el análisis de primeros arribos y la inversión de la forma de onda. Localizaciones de mejor calidad permitirán delimitar la sismicidad asociada con las principales estructuras sismogénicas regionales, y estimar con mayor certidumbre sus características espaciales.

La CDMX es el mejor ejemplo de la trascendencia de la inversión

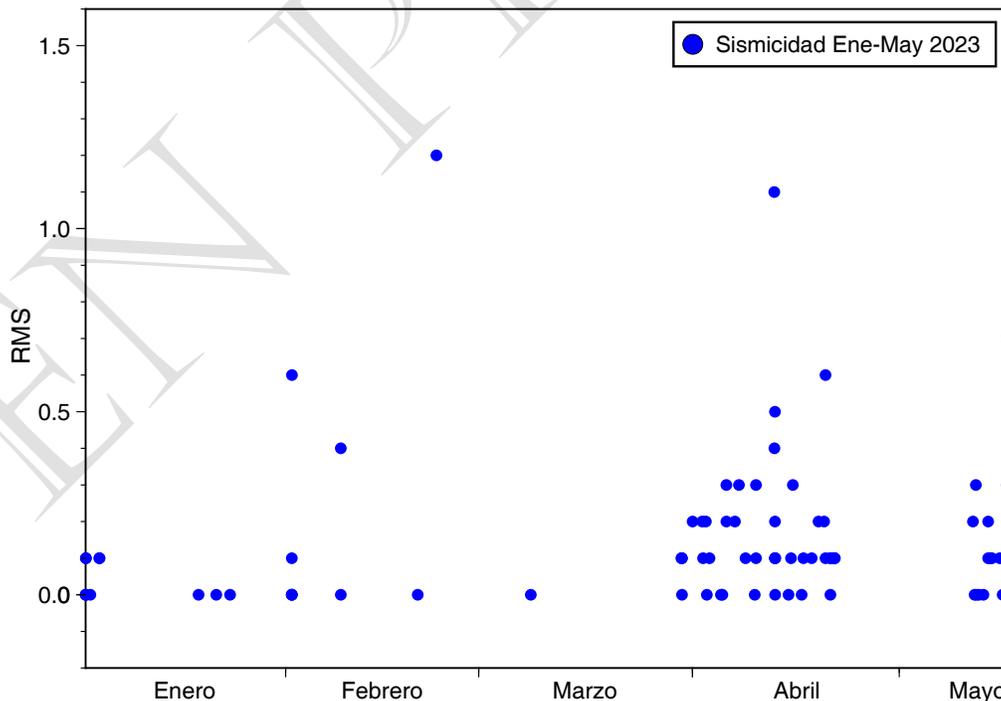


Figura 8. Error RMS para la sismicidad mostrada en la Figura 7. El aparente incremento de sismicidad, de izquierda a derecha, se debe a la mejora en el algoritmo de disparo basado en la relación STA/LTA. El RMS se incrementa conforme los epicentros ocurren más lejos de la red, lo mismo ocurre con algunos eventos en los que la relación señal-ruido disminuye.

en infraestructura sísmica. Hasta antes de los sismos de Michoacán, de septiembre 1985, la CDMX no había experimentado el impacto de un fenómeno tan devastador. A partir de ese momento inició un gran esfuerzo por mejorar la instrumentación en la cuenca de México y en varios de los estados del Pacífico. La inversión incentivó nuevas investigaciones en Sismología e Ingeniería Sismológica, el nuevo conocimiento ayudó a comprender el comportamiento de las ondas sísmicas durante su trayecto, y su comportamiento en la cuenca de México, así como a mejorar los códigos de construcción conforme a las características geológicas locales. Ello ha permitido mitigar el impacto de sismos grandes posteriores ocurridos en la Trinchera Mesoamericana. En el centro de México, el sismo de Acambay de 1912 (*M_s*6.9) es el evento más grande que ha ocurrido en la época instrumental, y es un aviso de la existencia de estructuras geológicas con potencial destructivo. Hoy en día un evento similar podría ser desastroso para muchas poblaciones, entre ellas la CDMX y Querétaro, por lo que los datos de la ReSiQ pueden ayudar a entender el fenómeno sísmico y ayudar a mitigar su impacto.

La ReSiQ también permite la vinculación con diferentes sectores de la sociedad. El hecho de que las magnitudes de la sismicidad en el estado sean pequeñas no reduce la preocupación de la población, que ha crecido con la idea que en Querétaro no tiembla, por lo que, sin importar la magnitud del sismo, entran en pánico. La información de la ReSiQ, le permite a la Coordinación de Protección Civil del Estado de Querétaro (CEPCQ) elaborar planes de acción e informar a la población. Por otro lado, como la ReSiQ permite discernir entre la sismicidad natural y antropogénica, ello puede ser de utilidad para monitorizar la infraestructura estratégica, como el aeropuerto, presas, parques industriales, zonas mineras, entre otras. De esta forma, la ReSiQ, puede ayudar a desarrollar proyectos con otras instituciones educativas, como redes de monitoreo, diseño de medidores, controladores y reinicio remoto de la infraestructura de las casetas, entre otros. También ayudará a la inducción de estudiantes hacia las Ciencias de la Tierra.

CONCLUSIONES

La Red Sísmica de Querétaro del Instituto de Geociencias se diseñó para monitorear la actividad sísmica en el estado y su entorno. Durante sus primeros 20 meses de actividad se localizaron más de 270 microsismos, la mayoría de ellos ocurridos en la Sierra Gorda de Querétaro. Su distribución espacial sugiere algunas tendencias regionales, principalmente paralelas a la orientación SE-NW de la SMO, las cuales se confirmarán conforme crezca la base de datos. El número de eventos localizados aumentará conforme se optimicen el algoritmo de disparo de los sismógrafos y el umbral de detección en el servidor. La ReSiQ permitirá sistematizar el monitoreo y obtener una representación objetiva del comportamiento espacio-temporal de la sismicidad, delimitar estructuras sismogénicas y estimar su potencial. Las contribuciones de la ReSiQ se incrementarán conforme aumente la cantidad de datos. Parte de la sismicidad localizada se comparte con la CEPCQ, organismo que la incluye en el Atlas Estatal de Riesgo. Con el tiempo esta información ayudará a estimar el riesgo asociado con las estructuras sismogénicas y a salvaguardar la infraestructura estratégica del estado.

Datos y recursos

En este trabajo se mostraron datos del SSN y registrados por la ReSiQ, en los cuales se utilizaron los paquetes SEISAN (Ottmøller *et al.*, 2024), SeisComp (<https://www.seiscomp.de>), Earthworm (<http://www.earthwormcentral.org>) y GMT (Wessel *et al.*, 2019).

Código de red (FDSN: International Federation of Digital Seismograph Networks): MG
DOI: 10.7914/SN/MG

Cómo citar la Red Sísmica de Querétaro

Instituto de Geociencias, UNAM (2003): Permanent Seismic Network of Queretaro State, Mexico. International Federation of Digital Seismograph Networks. Dataset/Seismic Network. <https://doi.org/10.7914/SN/MG>

Agradecimientos. Agradecemos la revisión crítica del Dr. Felipe Escalona y de dos árbitros anónimos. Se agradece a la empresa Sigmatic la donación de un acelerógrafo Episensor. Agradecemos el apoyo del M. en C. Francisco Fernández Escobar del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA) de la UNAM por el diseño y construcción de un transformador *ad-hoc* para proteger los equipos de las corrientes inducidas. También agradecemos la colaboración del Prof. Juan Soto del Instituto Tecnológico de San Juan del Río (ITSJR).

Contribución de los autores. JMGG. Metodología, investigación, procesamiento, análisis e interpretación de datos, redacción, revisión, edición, recursos. LCP. Redacción, revisión y recursos. VHMR. Procesamiento, análisis, interpretación de datos y revisión. Todos los autores discutieron los resultados y contribuyeron en el manuscrito.

Política de disponibilidad de datos. Los datos crudos están disponibles para su uso en investigación bajo un esquema de colaboración con los autores.

Declaración de conflicto de intereses. Los autores declaran que no tienen conflictos de intereses.

Financiamiento. La primera estación sísmica de banda ancha de Querétaro se instaló gracias al apoyo del CONAHCYT, mediante el proyecto de Jóvenes Investigadores (J32466-T). La infraestructura de la primera etapa de la ReSiQ fue financiada por CONAHCYT a través del proyecto de Ciencia Básica A1-S-35374. La UNAM-DGAPA-PAPIIT, proporcionó recursos para el trabajo de campo a través del proyecto IN110415. El IIEQ y el CONCYTEQ apoyaron la construcción de casetas y la infraestructura de comunicación de la ReSiQ. La CEPCQ realizó gestiones en diferentes periodos para la adquisición de sismógrafos y la construcción de casetas. El CEIEPAA de la FMVZ y la ENES-Juriquilla contribuyeron con el terreno y la construcción de la caseta de Tequisquiapan, respectivamente. La Unidad de Servicios Para la Educación Básica en el Estado de Querétaro (USEBEQ) y el Colegio de Bachilleres del Estado de Querétaro (COBAQ) facilitaron la construcción de casetas en sus planteles.

REFERENCIAS

- Aguirre-Díaz, G. J., Nieto-Obregón, J., & Zúñiga, F. R. (2005). Seismogenic basin and range and intra-arc normal faulting in the central Mexican Volcanic Belt, Querétaro, México. *Geological Journal*, 40, 215–243.
- Alaniz-Alvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., & Ferrari, L. (1998). Effect of strain rate in the distribution of monogenetic and polygenetic volcanism in the Transmexican volcanic belt. *Geology*, 26, 591–594.
- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., Orozco-Esquivel, M. T., Vasallo, L.F. & Shunshan, X. (2002). El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende; implicaciones en la deformación posteoceánica del centro de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 55, 12–29.
- Bath, M. (1979?). *Introduction to Seismology*, 2a Edición. Birkhäuser, 428 pp.
- Birch, F., (1960). The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, part 1. *Journal of Geophysical Research*, 65, 1083–1102. <https://doi.org/10.1029/JZ065i004p01083>
- Birch, F., (1961). The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, part 2. *Journal of Geophysical Research*, 66, 2199–2224. <https://doi.org/10.1029/JZ066i007p02199>

- Bormann, P. (ed.), (2012). *New Manual of Seismological Observatory Practice*. Vol. 1 and Vol. 2, IASPEI, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam; electronic edition, accessible via <https://bib.telegrafenberg.de/publizieren/bibliotheksverlag/nmsop>; DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP_r1
- Botero-Santa, P. A., Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, Á. F., López Martínez, M., Levresse, G., Xu, S.-S., & Ortega-Obregón, C. (2015). Origen y desarrollo de la cuenca El Bajío en el sector central de la Faja Volcánica Transmexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(1), 84–98.
- Carrillo-Martínez, M. (1997). *Hoja Zimapán 14Q-e (7), Resumen de la geología de la hoja Zimapán, estados de Hidalgo y Querétaro*. México, D.F., Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. Carta Geológica de México, serie de 1: 100,000.
- Carvalho, J., Vieira Barros, L., & Zahradník, J. (2016). Focal mechanisms and moment magnitudes of micro-earthquakes in central Brazil by waveform inversion with quality assessment and inference of the local stress field. *Journal of South American Earth Sciences*, 71, 333–343. <https://doi.org/10.1029/JZ066i007p02199>
- Castro, R. R., Mendoza-Camberos, A., & Pérez-Vertti, A. (2018). The Broadband Seismological Network (RESBAN) of the Gulf of California, Mexico. *Seismological Research Letters*, 89(2A), 338–342.
- Chávez Cabello, G., Torres Ramos, J. A., Porras Vázquez, N. D., Cossio Torres, T., & Aranda Gómez, J. J. (2011). Evolución estructural del frente tectónico de la Sierra Madre Oriental en el Cañón Santa Rosa, Linares, Nuevo León. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(2), 253–270.
- Chen, Z., Wang, Z., Wu, S., Wang, Y., & Gao, J. (2022). MagInfoNet: Magnitude estimation using seismic information augmentation and graph transformer. *Earth and Space Science*, 9, e2022EA002580. <https://doi.org/10.1029/2022EA002580>
- Dávalos-Álvarez, O. G., Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Álvarez, S. A., & Gómez-González, J. M. (2005). Las fases de deformación Cenozoica en la región de Huimilpan, Querétaro y su relación con la sismicidad local. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(2), 129–147.
- D'Alessandro, A., & Stickney, M. (2012). Montana Seismic Network Performance: An Evaluation through the SNES Method. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(1), 73–87. doi: 10.1785/0120100234
- del Río Varela, P., Nieto-Samaniego A., Alaniz-Álvarez S., Ángeles-Moreno E., Escalona- Alcázar F., & del Pilar-Martínez, A. (2020). Geología y estructura de las sierras de Guanajuato y Codornices, Mesa Central, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 72(1), A071019. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2020v72n1a071019>
- Dickinson, W. R. (2009). Anatomy and global context of the North American Cordillera. En S. Muhlburg Kay, V. A. Ramos, & W. R. Dickinson (Eds.), *Backbone of the Americas: Shallow Subduction, Plateau Uplift, and Ridge and Terrane Collision*. [https://doi.org/10.1130/2009.1204\(01\)](https://doi.org/10.1130/2009.1204(01))
- Dziewonski, A. M., & Anderson, D. L. (1981). Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25(4), 297–356. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7)
- Earle, P., Bittenbinder, A., Bogaert, B. & Johnson, C. (2003). Turn to the worm: Seismic network operation using the USGS Earthworm system, in Observations and Research Facilities for European Seismology (ORFEUS). *Electronic Newsletter*, 5(1), <http://www.orfeus-eu.org/Organization/Newsletter/vol5no1/earthworm.html>
- Espinasa-Pereña, R., Arámbula, R., Ramos, S., Sieron, K., Capra, L., Hernández-Oscoy, A., Alatorre, M., & Córdoba Montiel, F. (2021). Monitoring volcanoes in Mexico. *Volcanica*, 4(S1), 223–246. doi: 10.30909/vol.04.S1.223246
- Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LIII, 84–92.
- Friberg, P., Lisowski, S., Dricker, I., & Hellman, S. (2010). *Earthworm in the 21st century*. En European Geosciences Union General Assembly, 2–7 May 2010, Vienna, Austria, 12654 p.
- García de León Martínez, L. (2018). *Análisis de microsismicidad en el municipio de Peñamiller y su relación con el marco tectónico regional*. [Tesis de Licenciatura, Ingeniero Geólogo], Universidad Autónoma de Zacatecas.
- Ghasemi I, H., Itikarai, I., Hazelwood, M., Mckee, Ch., & Allen, T. (2018). *A low-cost seismic network for Papua New Guinea*. Australian Earthquake Engineering Society 2018 Conference, Perth, WA, Australia.
- Gardner G. H. F., Gardner, L. W., Gregory, A. R. (1974). Formation velocity and density– the diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, 39, 770–780. <https://doi.org/10.1190/1.1440465>
- Güven, C., Lorraine Wolf, L.W., Tuttle, M.P., & Rogers, S.R. (2023). The influence of sedimentary architecture on the formation of earthquake-induced liquefaction features: A case study in the New Madrid seismic zone. *Engineering Geology*, 312, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106946>
- Havskov, J., Ottemöller, L., Trnkoczy, A., & Bormann, P. (2012). Seismic Networks. En P. Bormann,(Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP- 2)*, Potsdam. Deutsches Geoforschungszentrum GFZ, 1–65. https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch8
- Hauksson, E. (2011). California Integrated Seismic Network (CISN). En Bormann, P. (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice*, (1–2), (NMSOP-2), Potsdam; electronic edition, accessible via <https://bib.telegrafenberg.de/publizieren/bibliotheksverlag/nmsop/nmsop-2002>
- Helmholtz-Centre Potsdam GFZ German Research Centre for Geosciences; GEMPA GmbH (2008). *The SeisComP seismological software package*. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/GFZ.2.4.2020.003>
- Herrmann, R. B., & Canas, J. A. (1978). Focal mechanism studies in the New Madrid seismic zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 68 (4), 1095–1102. <https://doi.org/10.1785/BSSA0680041095>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020. Información Demográfica y Social*. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html#Resultados_generales (última consulta: 25 de febrero de 2025).
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (1910a). *Tercer Censo de Población de los Estados Unidos Mexicanos 1910. Número de habitantes de la República por entidades federales*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/1910>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (1910b). *Tercer Censo de Población de los Estados Unidos Mexicanos 1910. Altitud y Población por seco de las capitales de las entidades federativas*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/1910>
- Johnson, C. E., Bittenbinder, A., Bogaert, B., Dietz, L. & Kohler, W. (1995). Earthworm: A flexible approach to seismic network processing. *Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS) Newsletter*, 14, 1–4.
- Langridge, R.M., Weldon II, R.J., Moya, J.C., & Suárez, G. (2000). *Paleoseismology of the 1912 Acambay earthquake and the Acambay-Tixmadejé fault, Trans-Mexican Volcanic Belt*. *Journal of Geophysical Research*, 105, 3019–3037. doi: 10.1029/1999JB900239.
- Lay, T., & Wallace, T. (1995). *Modern Global Seismology*. Academic Press, Inc., Cambridge, MA, 521 pp.
- Lee, W. H. K., & Lahr, J. C. (1972). *HYPO71: a computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes*. USGS Open-File Report, 72–22. <https://doi.org/10.3133/ofr72224>
- León Loya, R. A. (2014). *Estado y clasificación de la microsismicidad en parte central de la Sierra Madre Oriental*. [Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México].
- Lienert, B. R. & Havskov, J. (1995). *A Computer Program for Locating Earthquakes Both Locally and Globally*. *Seismological Research Letters*, 66(5), 26–36. doi: <https://doi.org/10.1785/gssrl.66.5.26>
- Lienert, B. R. E., Berg, E., & Frazer, L. N. (1986). Hypocenter: An earthquake location method using centered, scaled, and adaptively least squares. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 76(3), 771–783.
- Lomax, A., Satriano, C., & Vassallo, M. (2012). Automatic Picker Developments and Optimization: FilterPicker—a Robust, Broadband Picker for Real-Time Seismic Monitoring and Earthquake Early Warning. *Seismological Research Letters*, 83(3), 531–540, doi: 10.1785/gssrl.83.3.531.
- Longuet-Higgins, M. S. (1950). A Theory of the origin of microseisms, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 243(857), 1–35

- López Valdivia, E. N. (2014). *Aplicación de métodos geofísicos en el estudio de la estructura cortical superficial en la parte central de la Sierra Gorda, Querétaro*. [Tesis de Maestría]. Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Magotra, N., Ahmed, N., & Chael, E. (1987). Seismic event detection and source location using single-station (three-component) data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(3), 958-971.
- Miccolis, S., Filippucci, M., de Lorenzo, S., Frepoli, A., Pierri, P., & Tallarico, A. (2021). Seismogenic Structure Orientation and Stress Field of the Gargano Promontory (Southern Italy) From Microseismicity Analysis. *Frontiers in Earth Science*, 9, 589332. doi: 10.3389/feart.2021.589332
- Mooney, W. D., Barrera-López, C., Suárez, M. G., & Castelblanco, M. A. (2023). Earth Crustal Model 1 (ECM1): A 1° 1° Global Seismic and Density Model. *Earth-Science Reviews*, 243, 727-747. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104493
- Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Álvarez, S. A., & Camprubí Cano, A. (2005). La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 285-318. http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2005v57n3a3
- Nieto-Samaniego, A. F., Barajas-Gea, C. I., Gómez-González, J. M., Rojas, A., Alaniz-Álvarez, S. A., & Xu, S. (2012). Geología, evolución estructural (Eoceno al actual) y eventos sísmicos del Graben Santiaguillo, Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29, 115-130.
- Nieto-Samaniego, A. F., Del Pilar-Martínez, A., Suárez-Arias, A. M., Angeles-Moreno, E., Alaniz-Álvarez, S. A., Levresse, G., Xu, S., Olmos-Moya, M. J. P., Báez-López, J. A. (2023). Una revisión de la geología y evolución tectónica cenozoicas de la Mesa Central de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 40(2), 187-213.
- Núñez-Cornú, F. J., Sandoval, J. M., Alarcón, E., Gómez, A., Suárez-Plascencia, C., Núñez, D., Trejo-Gómez, E., Sánchez Mariscal, O., Candelas Ortiz, J. G., & Zúñiga-Medina, L. M. (2018). The Jalisco Seismic Accelerometric Telemetric Network (RESA). *Seismological Research Letters*, 89(2A), 363-372. doi: 10.1785/0220170157
- Nuttli, O. W. (1973). The Mississippi Valley Earthquakes of 1811 and 1812: Intensities, Ground Motion, and Magnitudes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 63 (1), 227-248. https://doi.org/10.1785/BSSA0630010227
- Olivieri, M., & Clinton, J. (2012). An almost fair comparison between Earthworm and SeisComp3. *Seismological Research Letters*, 83(4), 720-727. https://doi.org/10.1785/0220110111
- Orton, A. M., Wang, Z., Wang, L., & Woolery, E. W. (2016). *Earthquake Hazard Mitigation in the New Madrid Seismic Zone*. Kentucky Geological Survey, University of Kentucky, Lexington. Science and Public Policy, Report of Investigations 32 Series XII., 43 pp.
- Ottmøller, L., Voss, P. H., & Havskov, J. (2021). *SEISAN Earthquake Analysis Software for Windows, Solaris, Linux and Macosx, Version 12.0*. University of Bergen, 607 pp. ISBN 978-82-8088-501-2. URL http://seisan.info.
- Padilla y Sánchez, R. J. (2007). Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59(1), 19-42.
- Pollitz, F. F., Kellogg, L., & Bürgmann, R. (2001). Sinking Mafic Body in a Reactivated Lower Crust: A Mechanism for Stress Concentration at the New Madrid Seismic Zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(6), 1882-1897. doi:10.1785/0120000277
- Quintanar, L., Cárdenas-Ramírez, A., Bello-Segura, D. I., Espíndola, V. H., Pérez-Santana, J. A., Cárdenas-Monroy, C., Carmona-Gallegos, A.L., & Rodríguez-Rasilla, I. (2018). A Seismic Network for the Valley of Mexico: Present Status and Perspectives. *Seismological Research Letters*, 89(2A), 356-362.
- Ross, Z. E., & Ben-Zion, Y. (2014). Automatic picking of direct P, S seismic phases and fault zone head waves. *Geophysical Journal International*, 199, 368-381. doi: 10.1093/gji/ggu267
- Sauceda Cruz, L., 2022, *Estudio integral de microsismicidad en la Sierra Gorda de Querétaro*. [Tesis de Licenciatura, Ingeniero en Geociencias]. Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza, Puebla.
- Servicio Sismológico Nacional (SSN) (2025). *Catálogo de sismos*. Extraído de http://www.2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/ doi: 10.21766/SSNMX/EC/MX consultado el en marzo de 2025.
- Spica, Z., Pertone, M., Calò, M., Legrand, D., Córdoba-Montiel, F., & Iglesias, A. (2016). 3-D shear wave velocity model of Mexico and South US: bridging seismic networks with ambient noise cross-correlations (C1) and correlation of coda of correlations (C3). *Geophysical Journal International*, 206(3), 1795-1813. doi:10.1093/gji/ggw240
- Suter, M., Carrillo-Martínez, M., & Quintero-Legorreta, O. (1996). Macroseismic Study of Shallow Earthquakes in the Central and Eastern Parts of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(6), 1952-1963.
- Vassallo, M., Satriano, C., & Lomax, A. (2012). Automatic picker developments and optimization: A strategy for improving the performances of automatic phase pickers. *Seismological Research Letters*, 83(3), 541-554. doi: 10.1785/gssrl.83.3.541
- Vázquez-Serrano, A., Tolson, G., Fits Diaz, E. F., Chévez Cabello, G. (2018). Influence of pre-tectonic carbonate facies architecture on deformation patterns of syntectonic turbidites, an example from the central Mexican fold-thrust belt. *Journal of Structural Geology*, 109, 127-139. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.02.004
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., Tian, D. (2019). The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 5556-5564. https://doi.org/10.1029/2019GC008515
- Zúñiga, F. R., Pacheco, J. F., Guzmán-Speziale, M., Aguirre-Díaz, G. J., Espíndola, V. H., & Nava, E. (2003). The Sanfandila earthquake sequence of 1998, Querétaro, Mexico; activation of an undocumented fault in the northern edge of central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics*, 356, 229-238.
- Zúñiga, F. R., Gómez-González, J. M., Guzmán-Speziale, M. (2009). La sismicidad de Querétaro. En A. Cortés-Silva, J., Arzate-Flores, A. A., Lozano-Guzmán, *El Valle de Querétaro y su geotorno*, Tomo I. (1-9). CONCYTEQ.