



Caracterización de enjambres sísmicos y su diferencia con secuencias sísmicas en Venezuela

Characterization of seismic swarms and their differences with seismic sequences in Venezuela

Dailys González

Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas
Departamento de Geofísica
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5123-9024>
dailysgonzalezr@gmail.com
Caracas-Venezuela

Resumen

Venezuela, se encuentra ubicada en una región tectónicamente activa, en donde experimenta actividad sísmica debido a la interacción entre las placas del Caribe y Sudamericana. Una de las actividades sísmicas que destacan son los enjambres sísmicos, son una sucesión de sismos de magnitudes similares que ocurren en períodos cortos y en zonas localizadas, los cuales se diferencian notablemente de las secuencias sísmicas convencionales, caracterizadas por un sismo principal de mayor magnitud seguido por réplicas. Este ensayo examina las características distintivas de los enjambres sísmicos en comparación con las secuencias típicas de terremotos en el contexto tectónico de Venezuela. A través, del análisis de casos registrados en el estado Carabobo y otras regiones del país, en donde se abordan las causas geológicas y geofísicas subyacentes, incluyendo el movimiento de fallas locales, la migración de fluidos y la interacción de las principales estructuras tectónicas. También se exploran los mecanismos naturales y antropogénicos que pueden influir en estos eventos en Venezuela, como la actividad hidrotermal y las intervenciones humanas. Además, se destaca la importancia del monitoreo sismológico, el mapeo de fallas activas y la educación comunitaria para diferenciar estos fenómenos y mitigar sus impactos. Este estudio busca proporcionar a la comunidad geocientífica herramientas para una mejor comprensión y gestión de los enjambres sísmicos en Venezuela, fomentando así una mayor resiliencia ante los riesgos sísmicos en el país.

Palabras clave:

Enjambre; sismos; hidrotermal; secuencia; fallas

Abstract

Venezuela is located in a tectonically active region, where it experiences seismic activity due to the interaction between the Caribbean and South American plates. One of the seismic activities that stand out are seismic swarms, which are a succession of earthquakes of similar magnitudes that occur in short periods and in localized areas, which differ significantly from conventional seismic sequences, characterized by a main earthquake of greater magnitude followed by aftershocks. This essay examines the distinctive characteristics of seismic swarms compared to typical earthquake sequences in the tectonic context of Venezuela. Through the analysis of cases recorded in the state of Carabobo and other regions of the country, where the underlying geological and geophysical causes are addressed, including the movement of local faults, fluid migration and the interaction of the main tectonic structures. The natural and anthropogenic mechanisms that may influence these events in Venezuela, such as hydrothermal activity and human interventions, are also explored. In addition, the importance of seismological monitoring, mapping of active faults, and community education to differentiate these phenomena and mitigate their impacts is highlighted. This study seeks to provide the geoscientific community with tools for a better understanding and management of seismic swarms in Venezuela, thus fostering greater resilience to seismic risks in the country.

Keywords:

Swarm; earthquakes; hydrothermal; sequence; faults

Introducción

Venezuela, ubicada en una zona de intensa actividad tectónica debido a la interacción de las placas del Caribe y Sudamericana (Ughi, 2013), presenta patrones sísmicos diversos que incluyen tanto sismos aislados como enjambres sísmicos. Estos últimos se caracterizan por la ocurrencia de múltiples eventos de magnitudes similares, sin un sismo principal dominante, y son causados por diversos factores, entre ellos tensiones tectónicas, movimientos de fluidos subterráneos y actividad volcánica o antropogénica. Comprender estos fenómenos es esencial para diferenciar los enjambres sísmicos de las secuencias sísmicas típicas y evaluar su impacto en las regiones afectadas.

Mogi (1963) propone tres tipos diferentes de secuencias sísmicas (Figura N° 1):

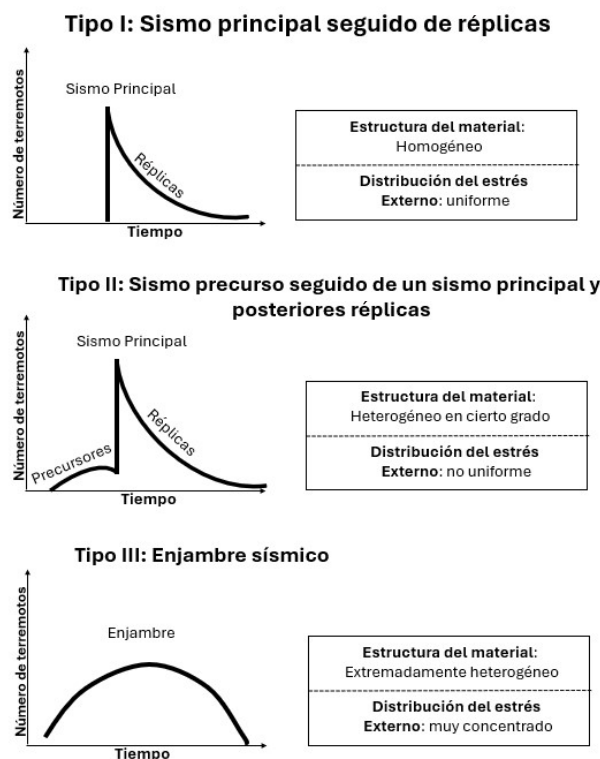
a) Sismo principal que es seguido por una serie de réplicas de magnitud y frecuencia decrecientes; esta primera

secuencia ocurre típicamente en material homogéneo con un estrés externo uniforme.

b) Una acumulación lenta de sismicidad (conocidos premonitorios) que conduce a una secuencia de tipo I; esta segunda secuencia tiende a ocurrir en material que es heterogéneo hasta cierto punto, o una densidad de fractura moderada, con un estrés externo no uniforme.

c) Por último, propone una secuencia en donde hay un aumento y decaimiento gradual de la sismicidad en el tiempo sin un sismo principal definido. Esta secuencia es conocida como enjambre sísmico, se produce en materiales extremadamente heterogéneos o con alta densidad de fracturas, con una tensión externa muy concentrada.

Figura N° 1. Tipos de secuencias sísmicas y sus relaciones con las estructuras de los materiales y las tensiones aplicadas



Fuente: Modificado de Mogi (1963).

Entendemos de lo anterior, que las réplicas son terremotos más pequeños que siguen a los terremotos o sismos principales y son causados por ajustes de la falla que se rompió durante el terremoto principal. El objetivo de estas réplicas es buscar un nuevo estado relajado después del terremoto principal, esto se debe porque cuando ocurre un terremoto, el estado de tensión alrededor del terremoto cambia dramáticamente, por lo tanto, los alrededores de la Tierra deben volver a algún tipo de equilibrio y ese es el proceso que produce réplicas. Puede ocurrir que durante el ajuste ocurre un evento mayor que el primer terremoto fuerte, ese se convierte en el sismo principal y todos los eventos anteriores se convierten en precursores.

El tiempo que tarde en disiparse las réplicas dependerá de la magnitud del sismo principal, por ejemplo, un terremoto de magnitud 5,7 pueden durar meses, pero los terremotos más grandes como 6,5 las secuencias de réplicas pueden durar un año aproximadamente, mientras que uno de magnitud 8 a 9 pueden durar décadas en disiparse.

Las secuencias de tipo III que es de interés en este ensayo también conocido como enjambres de terremotos tienen una clasificación que sale de Mogi (1963), identificándose dos tipos principales:

a) Enjambres sísmicos asociados a la actividad volcánica:

estos enjambres ocurren típicamente en regiones volcánicas y están relacionados con la intrusión o migración de magma dentro de la corteza terrestre. La actividad es sostenida por el movimiento de fluidos magmáticos que generan múltiples eventos sísmicos de magnitudes similares.

b) Enjambres sísmicos de origen tectónico: estos eventos se producen debido al reajuste de tensiones en fallas activas o estructuras tectónicas. En este caso, no hay un evento principal dominante, sino que las fallas liberan energía de manera distribuida en un periodo corto.

Además de los anteriores también se puede mencionar enjambres sísmicos causados por factores antropogénicos, es decir, aquellos relacionados con actividades humanas, como la extracción de recursos o la inyección de fluidos, podrían considerarse parte de esta clasificación en

estudios posteriores derivados de las ideas originales de Mogi (1963). Sin mencionar, que los fluidos magmáticos no son los únicos que se pueden encontrar en nuestra corteza también están los fluidos hidrotermales, como agua caliente y vapor, en sistemas geotérmicos o la infiltración o el drenaje de agua subterránea que pueden alterar las tensiones en las rocas y provocar fracturas y desencadenar enjambres sísmicos.

Aplicar este marco al contexto venezolano permite identificar casos en los que la interacción de fallas activas, como los sistemas de Falla de Boconó, San Sebastián o El Pilar, podrían estar generando enjambres sísmicos en lugar de secuencias del tipo I o II. En este ensayo, se abordará la caracterización de los enjambres sísmicos en Venezuela, analizando sus causas geológicas y su distinción frente a las secuencias sísmicas convencionales. Este análisis se apoyará en la literatura científica y en estudios realizados llevados a cabo por instituciones locales como Funvisis, buscando proporcionar herramientas útiles para la comunidad profesional en geociencias.

Desarrollo

Definición y caracterización de enjambres sísmicos

Un enjambre sísmico es una serie de eventos sísmicos de magnitudes similares que ocurren en una misma región durante un período de tiempo corto, sin que se distinga un sismo principal que domine en términos de liberación de energía. Esto lo diferencia de las secuencias sísmicas típicas, como las formadas por un sismo principal seguido de réplicas, en las que el evento inicial concentra la mayor parte de la liberación de energía (Mogi, 1963).

Características principales

- **Ausencia de sismo principal dominante:** en un enjambre, no hay un evento que sobresalga claramente como el principal, a diferencia de las secuencias típicas. Esto refleja una liberación más uniforme de energía (Mogi, 1963).



- **Magnitudes similares:** los eventos en un enjambre tienen magnitudes comparables, con pocas variaciones significativas, lo que contrasta con las réplicas de un sismo principal, que suelen disminuir en magnitud con el tiempo (Vidale *et al.*, 2006).

- **Distribución temporal:** los enjambres suelen desarrollarse en un corto período, pero pueden durar días, semanas o meses, dependiendo de los factores tectónicos o volcánicos involucrados (Hill, 1977).

- **Asociación geológica:** los enjambres están comúnmente vinculados a procesos como el movimiento de fluidos en el subsuelo, la actividad volcánica o la reactivación de fallas tectónicas (Vidale *et al.*, 2006; Shelly *et al.*, 2016).

En las secuencias de tipo I, como ya se mencionó, es donde el evento principal libera la mayor parte de la energía acumulada en una falla, en donde las réplicas de un sismo principal tienden a seguir la ley de Omori, donde la frecuencia de eventos decrece con el tiempo, algo que no es característico en los enjambres sísmicos (Hill, 1977). La ley de Omori, propuesta por Fusakichi Omori en 1894 y describe cómo la frecuencia de réplicas disminuye con el tiempo tras un sismo principal. Esta ley establece que el número de réplicas $N(t)$ en un tiempo t después del sismo principal sigue una relación inversa:

$$N(t) = \frac{K}{(c + t)^p}$$

Donde:

K: es una constante proporcional al número inicial de réplicas.

c: es un parámetro que evita la divergencia en $t=0$.

p: es un exponente que típicamente tiene un valor cercano a 1 en la mayoría de los casos.

Mientras que, en un enjambre la liberación ocurre de manera distribuida. Para identificar los enjambres también se han creado algoritmos, como el diseñado por Waite (1999), usado en el catálogo de Yellowstone que es una región volcánica de los Estados Unidos famosa por sus

enjambres sísmicos relacionados con el movimiento de magma y fluidos hidrotermales. Este algoritmo especifica enjambres en función de los tiempos y las distancias entre los eventos según la definición de enjambre de Mogi (1963), considerando la densidad de eventos en períodos de tiempo específicos y las magnitudes relativamente homogéneas que caracterizan a los enjambres. Entonces un enjambre se define si se cumplen los siguientes criterios (Farrell *et al.*, 2009):

- a) El máximo del número diario de eventos en la secuencia (N_d) es mayor que el doble de la raíz cuadrada de la duración del enjambre en días (T):

$$N_d > 2\sqrt{T}$$

- b) El número total de terremotos en una secuencia E_T es al menos 10.

Contexto geotectónico de Venezuela

Venezuela está situada en un entorno tectónico complejo, dominado por la interacción entre la placa del Caribe y la placa Sudamericana. La convergencia y el movimiento lateral de estas placas a lo largo de millones de años han dado lugar a un sistema de fallas activas que definen la sismicidad del país. Entre estas, destacan tres sistemas de fallas principales Boconó, El Pilar y San Sebastián.

Los enjambres sísmicos en Venezuela están directamente relacionados con el movimiento y la reactivación de estas fallas principales. Estos enjambres se producen en respuesta a la acumulación y liberación de esfuerzos tectónicos, influenciados por la acumulación de tensión en zonas complejas y por el movimiento de los fluidos que en el caso de Venezuela al no tener volcanes o cámaras magmáticas registrados los enjambres sísmicos se debe a la liberación de la energía por la acumulación de tensión en zonas tectónicas complejas y por los fluidos subterráneos como el agua.

Causas de los enjambres sísmicos

Las causas de los enjambres sísmicos en Venezuela están estrechamente relacionadas con su complejo contexto geotectónico. El país se encuentra en la zona de interacción entre las placas tectónicas del Caribe y Sudamérica, caracterizada por la presencia de los importantes sistemas de fallas activas como la de El Pilar, San Sebastián y Boco-nó. Estas fallas generan tensiones tectónicas acumuladas que son liberadas en forma constante. En el caso de los enjambres sísmicos, son generados en áreas donde estas estructuras interceptan con sistemas geológicos secundarios o fenómenos hidrotermales.

Relación de las causas de los enjambres sísmicos con el contexto de Venezuela

- **Interacción entre placas tectónicas:** la convergencia y desplazamiento lateral entre las placas del Caribe y Sudamérica inducen tensiones significativas en el terreno. Las fallas transformantes como la de El Pilar son sitios activos para la ocurrencia de enjambres sísmicos debido a la liberación localizada de energía acumulada.

- **Fallas activas:** las fallas principales del país son el conducto principal en el cual se desplazan los fluidos que causan el origen de enjambres sísmicos en áreas cercanas a sus trazas. Por ejemplo, en el estado Mérida, la Falla de Boconó, como parte de la actividad tectónica de los Andes de Mérida, está relacionada con enjambres sísmicos y fenómenos hidrotermales en localidades como El Vigía o La Lagunillas (Urbani, 2008 y Barrios, 2019).

- **Fenómenos hidrotermales:** las áreas con actividad hidrotermal, como Las Trincheras en Valencia y zonas cercanas a El Vigía, y muchas otras están asociadas con el flujo de agua calentada a profundidades no mayor a 2 km. Este proceso puede generar fracturamiento inducido, facilitando enjambres sísmicos al liberar tensiones en las rocas cercanas. En Las Trincheras, estado Carabobo se han documentado sismos relacionados con sistemas geotérmico local (Hernández y Sánchez, 2004 y González, 2019).

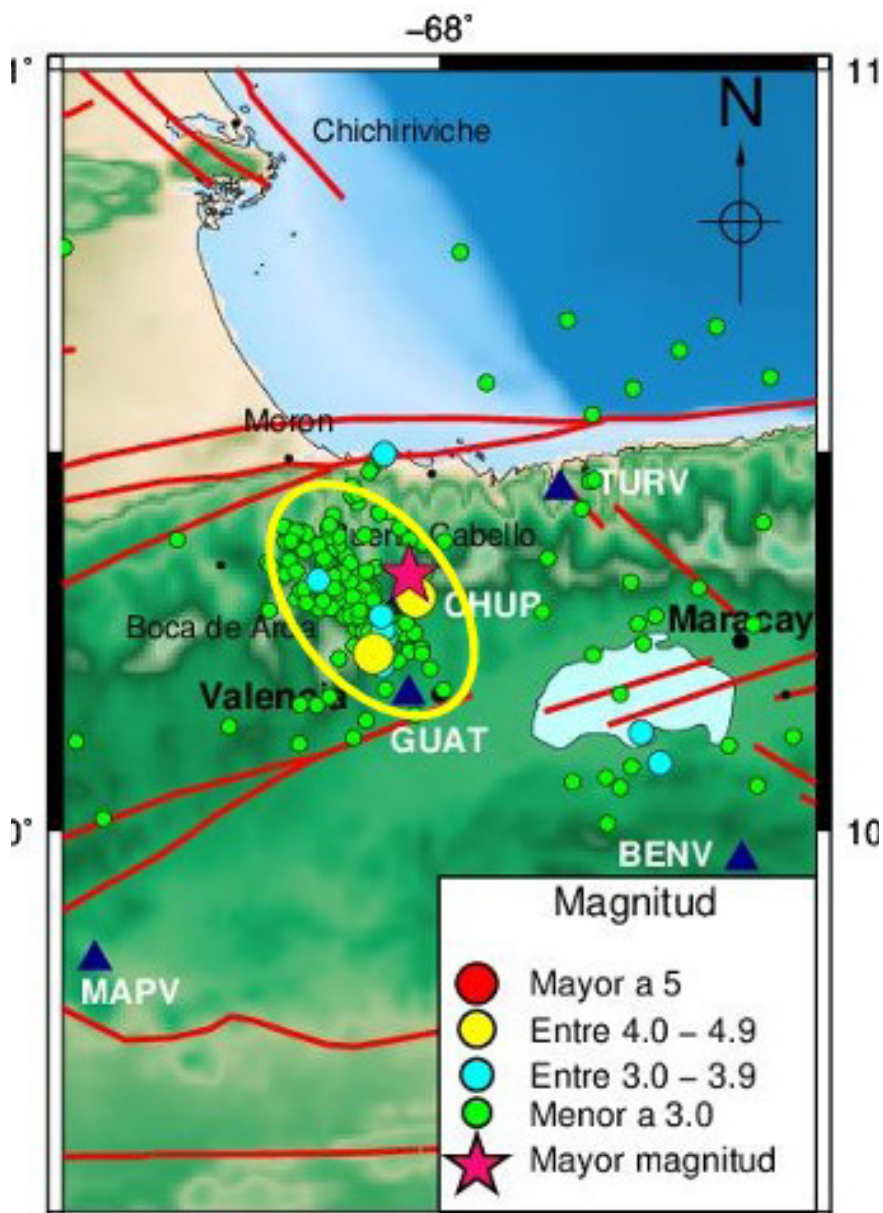
- **Microtectónica y liberación de tensiones locales:** las fallas secundarias y zonas de interacción de menor escala dentro de las grandes estructuras tectónicas también son responsables de enjambres sísmicos. Por ejemplo, los enjambres registrados en Güiria (2013) se relacionan con el movimiento de la falla de El Pilar y su impacto en la corteza superficial.

Estudios de casos en Venezuela

En Venezuela se han realizados diversos estudios sobre la actividad tectónica que se desarrolla a lo largo de los tres principales sistemas de fallas, pero muy pocos distinguiendo los causados por fallas de aquellos originados por el desplazamiento de los fluidos. Es de suma importancia identificar y distinguirlos ya que ayuda a comprender mejor las fuerzas tectónicas subyacentes y su relación con procesos geológicos locales (Mogi, 1963).

En el estado Carabobo, por ejemplo, anualmente se registran centenares de eventos sísmicos, es una de las zonas del país en donde la actividad sísmica es constante, y un comportamiento similar se ha observado en otras zonas como Mérida y en el estado Sucre. Ciertamente, no todos los casos están relacionados con actividad geotérmica, sin embargo, la actividad que ocurre en las Trincheras, estado Carabobo es uno donde si se puede asegurar que un gran porcentaje de estos eventos están relacionados con la actividad geotérmica. En el año 2018, se hizo un estudio de relocalización de un enjambre sísmico (González, 2019) en donde un gran número de los eventos relocalizados se encuentran en los primeros 5 km (Figura N° 2), estos eventos pudieron asociarse con la actividad geotérmica de esta región.

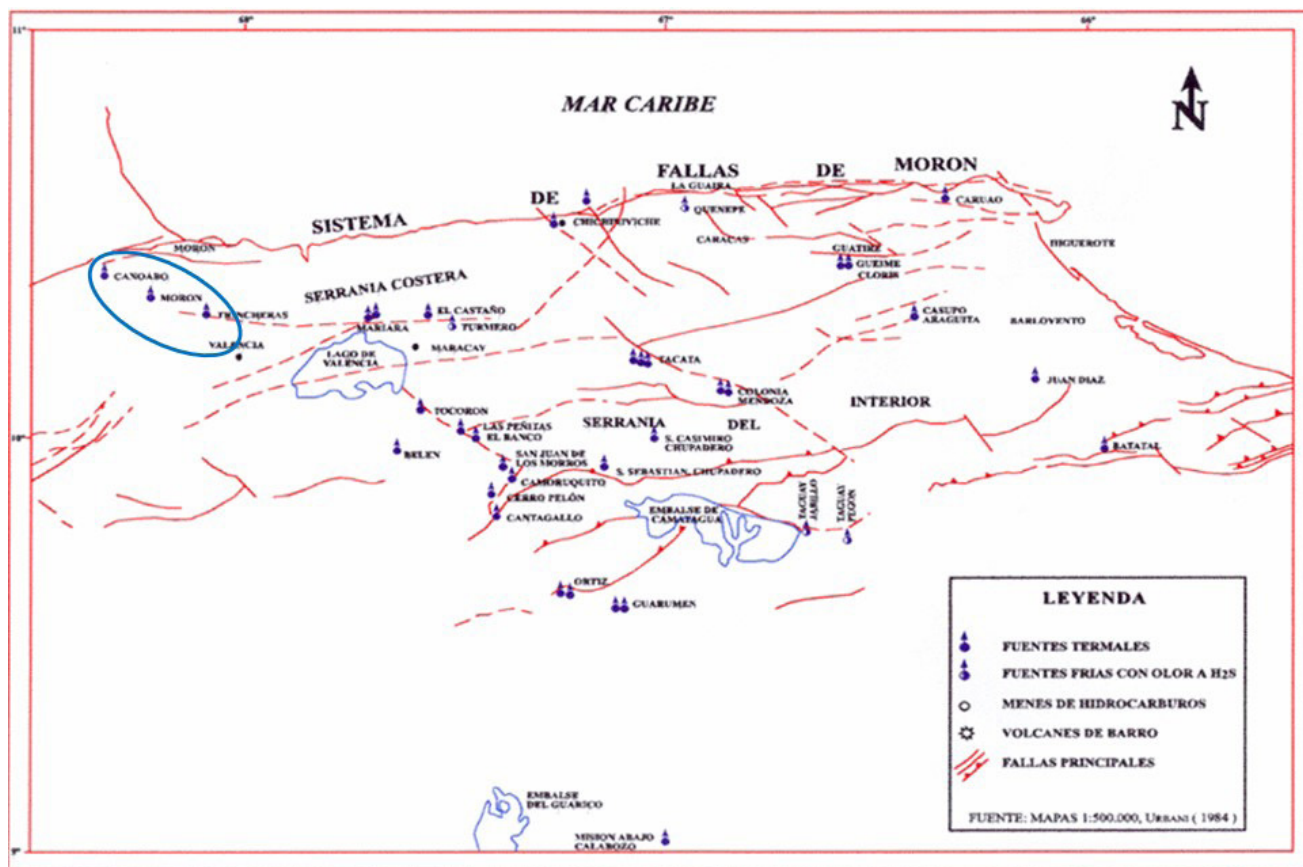
Figura N° 2. Ubicación de los eventos relocados en Las Trincheras estado Carabobo



Fuente: Tomado de González (2019).

En esta región se han identificado tres fuentes termales que coinciden con la distribución de los eventos registrados por Funvisis (Figura N° 3).

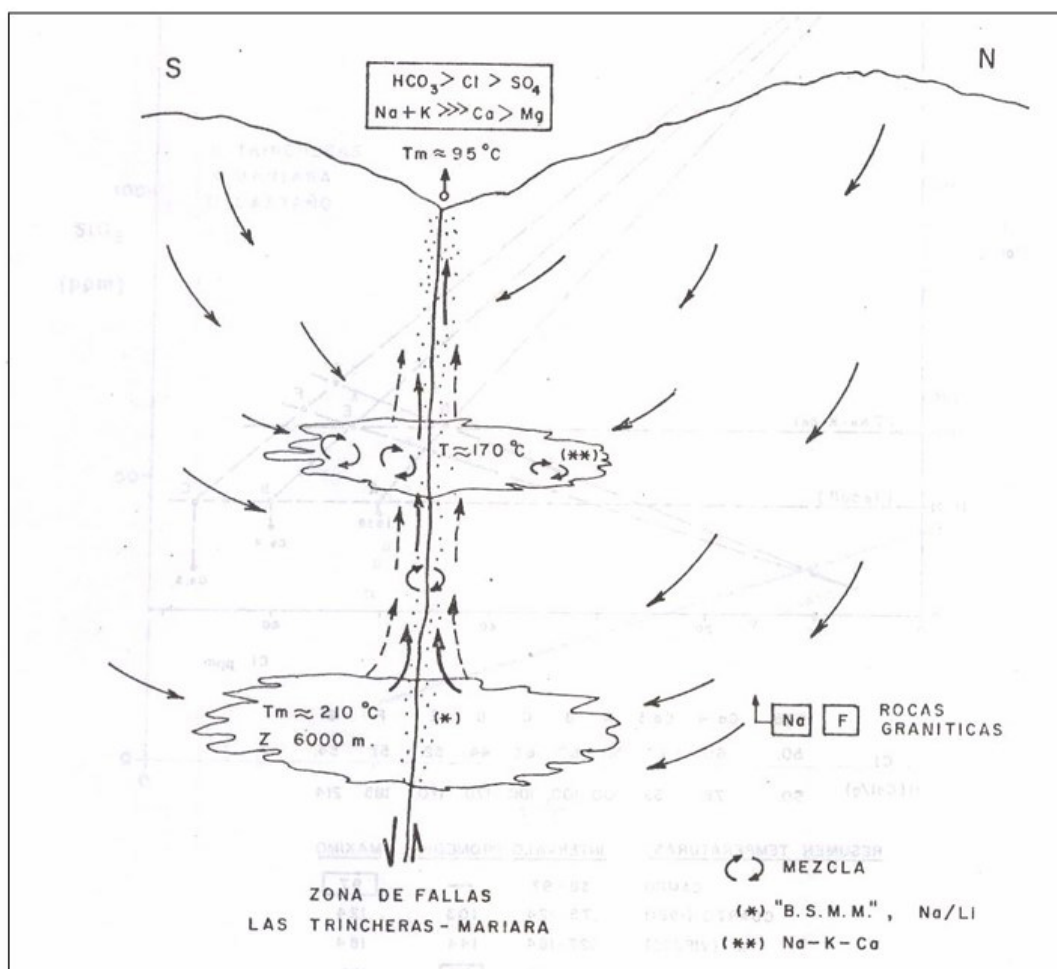
Figura N° 3. Sistema geotermal de la región central



Fuente: Modificado de Urbani (1989).

El área de Las Trincheras es conocida por la presencia de manantiales termales con temperaturas de hasta 90,3 °C, caracterizadas por una circulación profunda de aguas subterráneas calentadas geotérmicamente. Aunque no hay evidencia de vulcanismo, la actividad hidrotermal en esta región se asocia con el gradiente geotérmico y fallas activas locales (Figura N° 4). Estos procesos pueden generar microfracturas y acumulaciones de tensiones que, al liberarse, producen enjambres sísmicos. La actividad tectónica vinculada a la falla y los movimientos asociados facilitan la generación de estos eventos sísmicos de baja magnitud.

Figura N° 4. Modelo esquemático de las fuentes termales de Las Trincheras en el estado Carabobo



Fuente: Tomado de Urbani (1991).

De la misma forma en que los eventos sísmicos registrados en el estado Carabobo pueden estar vinculados a la actividad geotérmica, es posible establecer relaciones similares con otros enjambres sísmicos ocurridos en distintas regiones del país.

Importancia del monitoreo y la investigación

Los enjambres no necesariamente indican un gran terremoto inminente, pero pueden causar daños acumulativos debido a la repetición de eventos en áreas vulnerables.

Las secuencias típicas, al centrarse en un gran sismo inicial, pueden demandar medidas de respuesta más inmediatas para mitigar daños extensos. El monitoreo y la investigación sísmica desempeñan un papel fundamental en la mitigación de riesgos en Venezuela, al ser un país situado en una región altamente activa tectónicamente debido a la interacción entre las placas del Caribe y Sudamérica. Instituciones como Funvisis lideran la vigilancia de la actividad sísmica mediante una red nacional de estaciones sísmicas, proporcionando datos en tiempo real sobre eventos como

enjambres sísmicos y secuencias de réplicas. Esta información no solo permite identificar patrones de actividad en áreas vulnerables, como las asociadas a las fallas de El Pilar, San Sebastián y Boconó, sino que también respalda la educación pública y las alertas tempranas, esenciales para reducir el impacto de los sismos en las comunidades afectadas.

Los datos generados por investigaciones sismológicas como esta tienen aplicaciones prácticas directas, como la planificación urbana en zonas de riesgo y el diseño de infraestructura resiliente que cumpla con normas sismorresistentes. Además, estudios específicos, como los realizados en Las Trincheras (Carabobo), así como alrededor de los principales sistemas de fallas y aquellos que han vinculado la actividad tectónica con procesos hidrotermales, pueden contribuir en la generación de modelos predictivos que mejoran la preparación ante eventos sísmicos. Estas iniciativas resaltan cómo el monitoreo y análisis continuo no solo contribuyen a la comprensión científica de los fenómenos sísmicos, sino que también fortalecen la capacidad de respuesta y adaptación frente a amenazas naturales en Venezuela.

Conclusión

Los enjambres y las secuencias sísmicas típicas representan patrones diferentes de actividad tectónica, con implicaciones únicas en la interpretación y manejo del riesgo sísmico. Los enjambres se caracterizan por la ocurrencia de numerosos eventos de magnitudes similares en un período corto, sin un sismo principal dominante, y a menudo están vinculados a tensiones locales, intrusiones magmáticas o fenómenos hidrotermales. En contraste, las secuencias sísmicas típicas suelen presentar un sismo principal de mayor magnitud seguido por réplicas que disminuyen en frecuencia e intensidad, obedeciendo generalmente a la ley de Omori. Esta distinción es esencial para la correcta interpretación de la dinámica tectónica, especialmente en un país como Venezuela, donde los enjambres han sido reportados en regiones asociadas a fallas activas.

Para mejorar la comprensión y el manejo de los enjambres sísmicos en Venezuela, se proponen varias recomendaciones. Primero, se deben reforzar las capacidades de monitoreo mediante la expansión de la red de estaciones sísmicas, especialmente en zonas de alto riesgo. Segundo, es crucial fomentar la investigación interdisciplinaria que combine análisis tectónico, hidrogeológico y de modelos predictivos. Además, la educación y sensibilización pública deben ser priorizadas para garantizar que las comunidades comprendan la naturaleza de los enjambres sísmicos y las medidas de autoprotección. Finalmente, es necesario actualizar y aplicar estrictamente las normativas de construcción sismorresistente, especialmente en áreas cercanas a las fallas activas, para minimizar los impactos de eventos sísmicos recurrentes. Estas medidas fortalecerán la resiliencia del país frente a fenómenos tectónicos complejos y contribuirán a una planificación territorial más segura y sostenible.

Referencias

- Barrios, I.; Rendón, H.; Schmitz, M.; Martínez, A. y Alvarado, L. (2019). Relocalización absoluta y relativa de la secuencia sísmica de la Lagunillas, estado Mérida, Venezuela. *Revista de la facultad de ingeniería. UCV*.
- Farrell, J.; Husen, S. y Smith, R. (2009). Earthquake swarm and b-value characterization of the Yellowstone volcano-tectonic system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 188 (2009) 260–276.
- González, D. (2019). Relocalización de la secuencia de sismos ocurridos en Valencia, estado Carabobo entre abril y septiembre de 2018. Presentado ante la Ilustre Universidad Simón Bolívar como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Geofísico. 176p.
- Hernández, D. y Sánchez, S. (2004). Distribución, caracterización y marco geológico de las aguas termales en Venezuela. Presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al título de Ingeniero Geólogo. 819p.
- Hill, D. (1977). A model for earthquake swarms. *Journal of Geophysical Research*, 82(8), 1347–1352.

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, 3. Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo 41, 615–658.

Omori, F. (1894). On aftershocks of earthquakes. Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo, 7, 111–200.

Ughi, A.; González, D. y Toloza, A. (2013). Delimitación del margen de placa entre Suramérica y el Caribe al norte de Venezuela mediante el realzado de la anomalía gravimétrica. Geoacta, 38(2), 140-152.

Urbani, F. (1984e). Cálculos geotermométricos y tipos de aguas para las fuentes termales de la región central. Geotermia, UCV, Caracas, (10-3): 428

Urbani, F. (1989b). Geothermal reconnaissance of northeastern Venezuela. Geothermics. Inglaterra. UCV, Dept. Geología, Centro de documentación de información geotérmica nacional. Caracas, Inédito.

Urbani, F. (1991e). Modelos geológicos e hidrológicos de diversas fuentes termales de Venezuela. Caracas.

Urbani, F. (2008). Las aguas termales en Venezuela y su contexto geológico. Informe técnico, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Caracas, Venezuela.

Vidale, J. E.; Boyle, K. y Shearer, P. (2006). Crustal earthquake bursts in California and Japan: Their patterns and relation to volcanoes. Geophysical Research Letters, 33(20), L20313. doi:10.1029/2006GL027723

Shelly, D.; Hill, D. y Farrell, J. (2016). Anatomy of a volcanic earthquake swarm: Long Valley Caldera, 2014. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121(3), 1776–1795.

Waite, G. (1999). Seismicity of the Yellowstone Plateau: space-time patterns and stresses from focal mechanism inversion, M. S. thesis, University of Utah, Salt Lake City.