

Evidencia de deslizamiento intermitente (*Stick-Slip*) a lo largo del deslizamiento en el Parque Nacional del Agua Juan Castro Blanco, Aguas Zarcas, Costa Rica.

Julián Rodríguez, Esteban Chaves

Introducción y problema de estudio

El sector de estudio se encuentra en el distrito de Aguas Zarcas, en el cantón de San Carlos, una zona geológicamente diversa, asociada con el complejo volcánico Platanar-Porvenir-Volcán Viejo. El sitio se caracteriza por la presencia de fallas como la falla Viejo-Agua Zarcas, la cual influye en los frecuentes deslizamientos de la zona. En particular, el deslizamiento del 16 de julio del 2023 en el Parque Nacional del Agua Juan Castro Blanco desencadenó una serie de eventos sísmicos de baja frecuencia (LFEs o *Low Frequency Earthquakes*), los cuales se caracterizan por tener registros sísmicos de baja frecuencia (1-10 Hz).

Estos sismos son detectados mediante una red de nodos sísmicos instalada en mayo de 2024 por el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI), colocados con el fin de analizar la microsismicidad del sector (Figura 1).



Figura 1. Sector de estudio, la fotografía en la parte inferior muestra una vista oblicua del deslizamiento desde el sur, obtenida de Madrigal y Esquivel (2023).

La identificación de más de 1500 LFEs, con alta similitud en su forma de onda y tiempos de arribo, sugiere la existencia de familias de sismos repetidos (REs o *Repeated Earthquakes*), los cuales generan la misma forma de onda con cada ruptura, en distintos

tiempos, producto de la ruptura de las mismas asperezas o asperezas muy cercanas, lo cual se ha seguido observando en LFEs posteriores. La presente investigación pretende explicar el origen de estos sismos de baja frecuencia y porqué se repiten, además de entender si esta ocurrencia se debe a factores de propagación de ondas en un medio altamente heterogéneo, o si son producto de la dinámica de la fuente sísmica asociada con el deslizamiento y las zonas de falla locales, esto a partir del uso de *Template Matching* para encontrar LFEs en registros sísmicos de 24 horas.

Este proceso es de particular interés ya que la actividad sísmica repetitiva en zonas de deslizamientos activos puede ser un indicador de procesos de deformación lenta, o sismos lentos, tal y como se han observado en zonas de subducción. Además, de acuerdo con trabajos anteriores, la ocurrencia de LFEs está mayormente asociada a zonas de falla donde existe una alta presión de poro y una alta heterogeneidad geométrica y reológica del material en la falla, por lo que en este caso es de alta importancia de estudio por la escasez de trabajos de investigación afines en el país y el mundo.

Metodología

Análisis bibliográfico: Previo al inicio del trabajo, se realizó un estudio de bibliografía histórica y reciente para lograr comprender la dinámica geológica, tectónica, geomorfológica e hidrogeológica del sitio, con el fin de correlacionar esto con el posterior análisis en campo y los resultados obtenidos a lo largo del análisis de datos.

Gira de campo: Se realizó una visita al sitio, a través del sendero ubicado en las instalaciones de COOPELESCA, con el fin principal de recolectar los nodos instalados previamente en el sendero rumbo a Pozo Verde, pero a su vez analizar las condiciones del suelo y las fracturas asociadas al deslizamiento ocurrido en el PNJCB (Parque Nacional Juan Castro Blanco), así como realizar confirmación de campo en cuanto a las condiciones geomorfológicas y geológicas del sitio.

Procesamiento y análisis de datos sismológicos: A partir de los datos recolectados por la estación semipermanente MTSG, del OVSICORI, se identificaron los arribos de ondas primarias y secundarias de 18 sismos de baja frecuencia, ocurridos en los días 13, 16 y 17 de noviembre de 2024, con el fin de ver su dinámica hipocentral y amplitud en el tiempo y encontrar tendencias generales de los datos.

A partir de estos sismos, se realizó un procesamiento mediante *Template Matching*, utilizando los 18 sismos previamente estudiados como plantillas, y así encontrar sismos similares en registros de 24 horas obtenidos de la estación MTSG, en un rango temporal entre el 1 de noviembre y el 31 de diciembre del 2024. El proceso se realizó utilizando la librería de Python EQcorrscan, con el fin de detectar sismos con un límite (*threshold*) de valores de correlación cruzada mayores a 0.85.

Posterior a esto, se analizaron los sismos obtenidos para encontrar familias de sismos repetidos de baja frecuencia entre las plantillas, eliminando las detecciones de señales anómalas o de ruido que no corresponden a señales sísmicas reales, así como familias que solamente detectaron su propia señal, para identificar familias definitivas.

Se realizaron análisis de tiempo de ocurrencia y cambios en la correlación cruzada en el tiempo, para encontrar tendencias temporales entre familias, así como encontrar los rangos de frecuencias entre los sismos encontrados por familia, para entender y confirmar la dinámica espectral de los LFEs.

Las figuras se realizaron usando las librerías básicas de Python (numpy, scipy, matplotlib y pandas) así como el uso de la librería obspy para el procesado y manejo de trazas sísmicas y otros datos sísmicos obtenidos. Los mapas se realizaron usando QGIS, con la base satelital de Google, en el sistema de coordenadas CRTM05.

Contexto geológico y tectónico

El sector en estudio se encuentra ubicado principalmente sobre depósitos cuaternarios provenientes del complejo volcánico Platanar-Porvenir-Volcán Viejo. En superficie se observan bloques provenientes de coladas de composición andesítica, descritos por Dóndoli (1950) y posteriormente descritos por Huapaya et al (2021) como la unidad Paleo Platanar, además se observan flujos piroclásticos y lahares a lo largo de toda la cuenca del Río Aguas Zarcas.

Estos depósitos presentan una alta meteorización y alteración hidrotermal, asociada principalmente a los depósitos de azufre y aguas termo-minerales asociados al complejo volcánico, los cuales generaron cambios físicos y químicos a profundidad (Peraldo Huertas et al, 2024). Principalmente esta unidad se observa como depósitos clásticos brechosos en la Unidad Depósitos de deslizamiento, de edad Holoceno, donde se observan en una matriz arcillosa-arenosa de coloración amarillenta, poco consolidada y muy alterada, como se observa en la Figura 2.



Figura 2. Material altamente alterado en una de las fracturas del sector de estudio, se nota la poca rigidez del material, característica que se repite en la mayoría de las fracturas observadas.

Como se observa en la Figura 3, en el sitio se encuentra una gran cantidad de agrrietamientos y fracturas, las cuales poseen separaciones desde milimétricas hasta decimétricas, con longitudes métricas en su mayoría, se midieron en campo la dirección de

aproximadamente 10 de las mismas a lo largo del sendero, con dirección generalmente NNE, las cuales concuerdan con la dirección principal de las laderas del deslizamiento.

El sitio está controlado por la falla Aguas Zarcas, la cual fue descrita por Montero et al (1998) y posteriormente Montero et al (2010) como una falla de alto ángulo, oblicua con un desplazamiento de rumbo dextral y una componente normal. La falla se extiende alrededor de 25 km en dirección N9E, desde el Volcán Viejo, siguiendo el valle lineal del Río Aguas Zarcas hasta el sector norte del pueblo de Aguas Zarcas (Montero et al, 1998; Denyer et al, 2003).

En cuanto a las morfologías del sitio, se observan laderas suavizadas en el sendero hacia Pozo Verde, las cuales responden al relleno de un lahar, compuesto de los materiales antes descritos, a su vez las laderas de la cuenca, desde su sector más distal aguas abajo hasta la parte proximal de la cabecera de la cuenca muestran reptación intensa, así como la presencia de algunas cárcavas (Figura 3).

A su vez, se evidencia una elevada saturación del suelo en el sitio de estudio, lo que generó dificultades en la extracción de los nodos sísmicos debido a la excesiva acumulación de agua en el subsuelo.



Figura 3. Características del terreno encontradas en campo. A: Sector de la cuenca del río Aguas Zarcas relleno por depósitos de lahar y otros clastos volcánicos poco consolidados. B: Reptación en las laderas de la cuenca, en este caso, en la parte distal de la misma. C: Condición del terreno en el que se encontraba enterrado uno de los nodos.

Resultados y discusión

A continuación, se muestran los resultados obtenidos a partir de los datos sismológicos del sector de estudio.

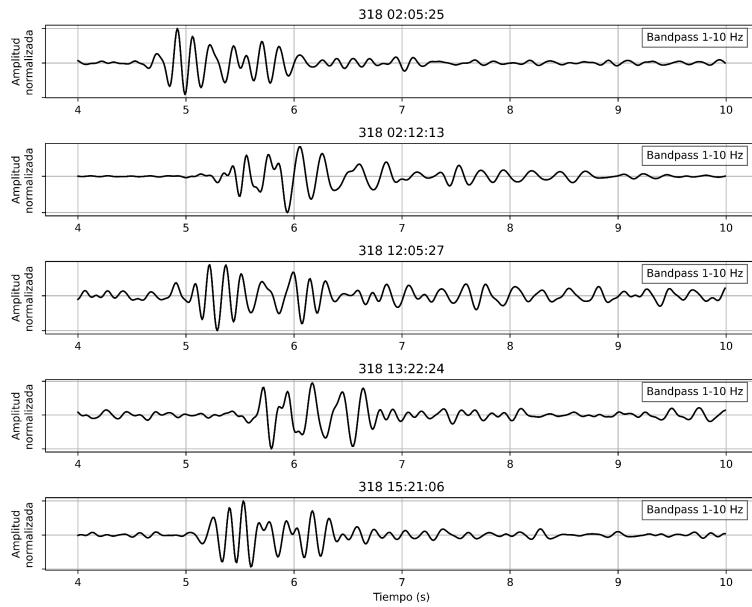


Figura 4. Algunos ejemplos de los sismos plantilla de baja frecuencia obtenidos en la estación permanente MTSG en el sector de estudio. Se presentan los sismogramas de la componente HHZ, correspondientes a las plantillas 01, 02, 03, 04, 05 y 06.

Como se observa en la Figura 4, los sismos poseen formas de onda muy similares además de valles y crestas con patrones parecidos, los arribos de las ondas primarias y secundarias poseen diferencias entre los eventos en su mayoría menores a los 0.2 segundos, las amplitudes también poseen similitudes en la mayoría de los sismogramas, con amplitudes menores a los 10 Hz en promedio, lo cual indica la naturaleza repetitiva y común de los sismos de baja frecuencia y los sismos repetidos.

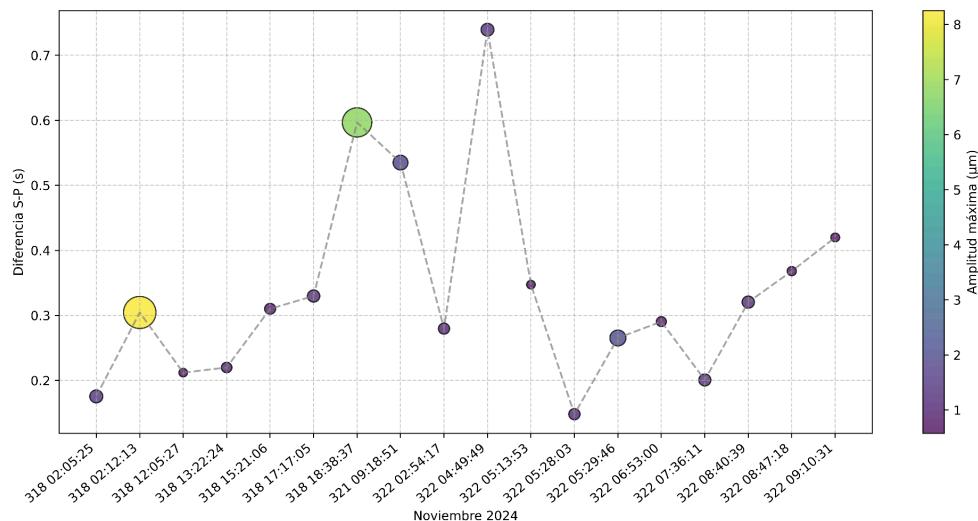


Figura 5. Gráfico de las diferencias en los arribos de las ondas primarias y secundarias con respecto al tiempo de ocurrencia de los 18 sismos plantilla utilizados, además, entre mayor sea la amplitud máxima del sismo, mayor es el tamaño del marcador del sismo.

En la Figura 5 se observa que 12 de los 18 sismos en estudio se encuentran entre los 1.6 km y 3.2 km de distancia de la estación MTSG, lo que indica que estos se encuentran posiblemente en el mismo sector de la falla, y provienen de la misma aspereza. 11 de esos 12 sismos poseen amplitudes máximas menores a los 2 micrómetros, por lo que no solo provienen de la misma fuente sísmica, sino que poseen desplazamientos similares en su mayoría, en un periodo de 5 días.

Los valores que poseen cambios distintos al promedio, especialmente los ocurridos el 13 de noviembre a las 2:12 UTC y a las 18:38 UTC, así como el ocurrido el 17 de noviembre a las 04:49 UTC, el primero posee una distancia de la estación sísmica similar al promedio, mientras que la segunda se encuentra a una distancia aproximada de 4.8 km y el tercero a una distancia de 6 km de la estación, lo cual indica que podría haber un sector de la falla que no estaba deslizándose anteriormente, al menos entre los 18 sismos en estudio.

En cuanto a los sismos del 13 de noviembre antes mencionados, ambos poseen amplitudes máximas de desplazamiento mayores a los 6 micrómetros, esto indica que hubo un aumento repentino en el desplazamiento en la falla, lo cual podría relacionarse con una ruptura considerablemente mayor de sectores más profundos de la misma, pudiendo ser disparadores de agrietamientos y fracturas en superficie, las cuales, desde noviembre del 2024 hasta enero del 2025 han aumentado su tamaño (Figura 6).



Figura 6. Evolución de las fracturas en el sector de estudio, con un aumento considerable en la separación de las mismas, las cuales concuerdan con la dirección NNE, principalmente, de las laderas del deslizamiento de Aguas Zarcas en 2023.

Utilizando los 18 sismos plantilla se realizó el proceso de Template Matching, dando como resultado la identificación de 9 familias de sismos de baja frecuencia, los cuales se muestran en la figura 7.

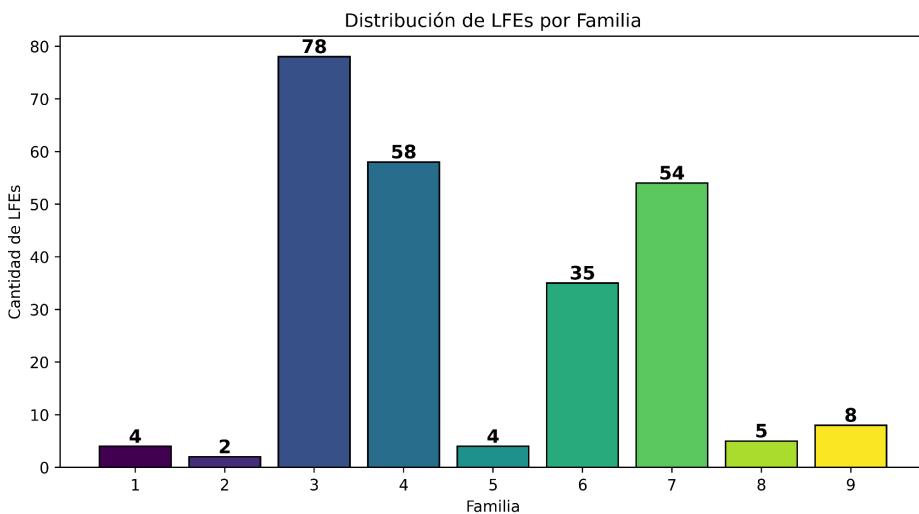


Figura 7. Histograma de las 9 familias de sismos de baja frecuencia (LFEs) repetidos, a partir del uso de *Template Matching*.

Se encontraron 4 familias con un cantidad considerable de LFEs, y 5 familias con una cantidad menor de sismos que las anteriores, pero en general se presentan sismos con coeficientes de correlación en promedio de 0.9, para un total de 248 sismos de baja frecuencia repetidos, distribuidos en 9 familias detectadas en un rango temporal de dos meses.

En cuanto a los resultados de las detecciones obtenidas por familia, se observó una tendencia general entre las detecciones de todas las familias, en la figura 8 se muestra la tendencia temporal de los coeficientes de correlación para la familia 6, la cual se usará para ejemplificar la dinámica general de todas las familias. Los datos obtenidos para las demás familias pueden consultarse en el material complementario ubicado al final de este informe.

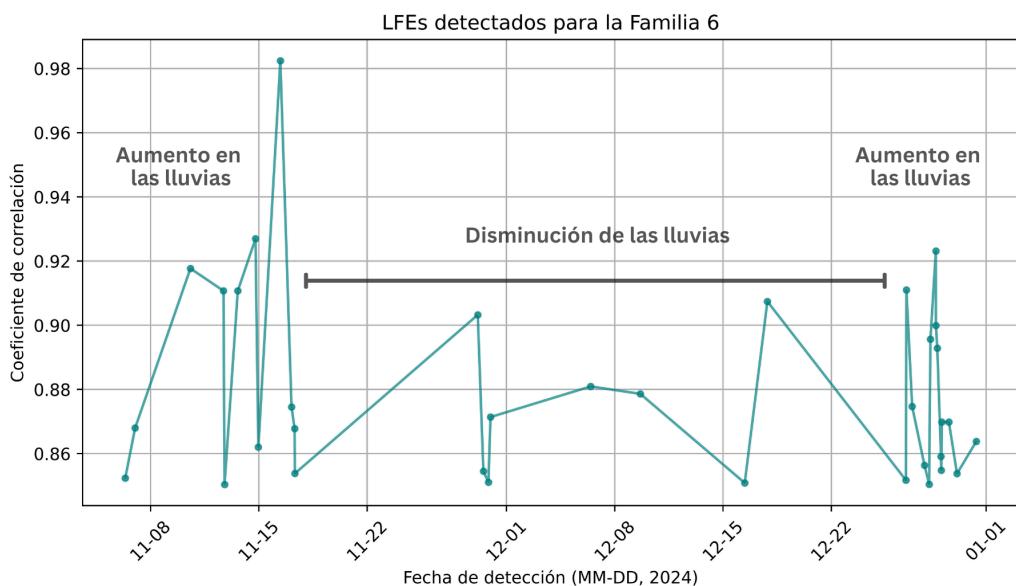


Figura 8. Resultado de la identificación de LFEs para la Familia 6, se muestra el coeficiente de correlación entre el template y cada uno de los sismos detectados a lo largo del tiempo.

Como se observa en la figura 8, los datos indican un aumento en la cantidad de LFEs en 2 clústers principales, uno a mediados de noviembre 2024 y otro hacia finales de diciembre 2024, estos picos coinciden en todas las familias, mostrando una tendencia general en los eventos. Según registros del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), durante mediados de noviembre y hacia finales de diciembre, se dio un aumento general en las lluvias y la saturación de suelos, lo cual coincide temporalmente con los clústers de LFEs observados en las detecciones. (Figura 9).

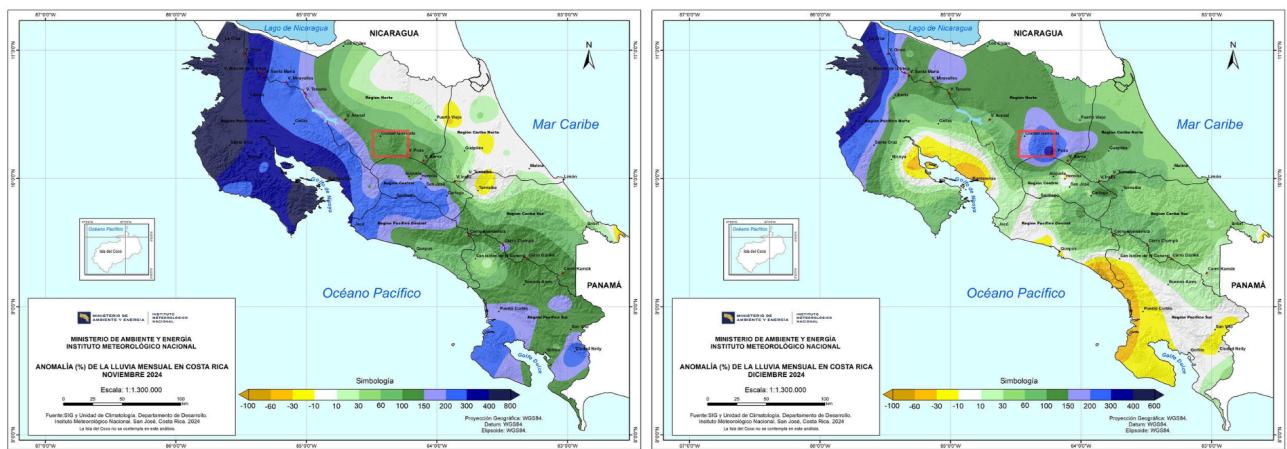


Figura 9. Mapas de anomalía porcentual de la lluvia por región climática, modificado de Instituto Meteorológico Nacional (2024a) e Instituto Meteorológico Nacional (2024b): A. Durante noviembre 2024 y B. Durante diciembre 2024, períodos que coinciden con el aumento de lluvias y saturación del suelo en la parte central-norte del país, el recuadro rojo indica el sector en donde se encuentra el área de estudio.

En la Figura 10, se observa la tendencia temporal del tiempo de ocurrencia entre las detecciones para la familia 6.

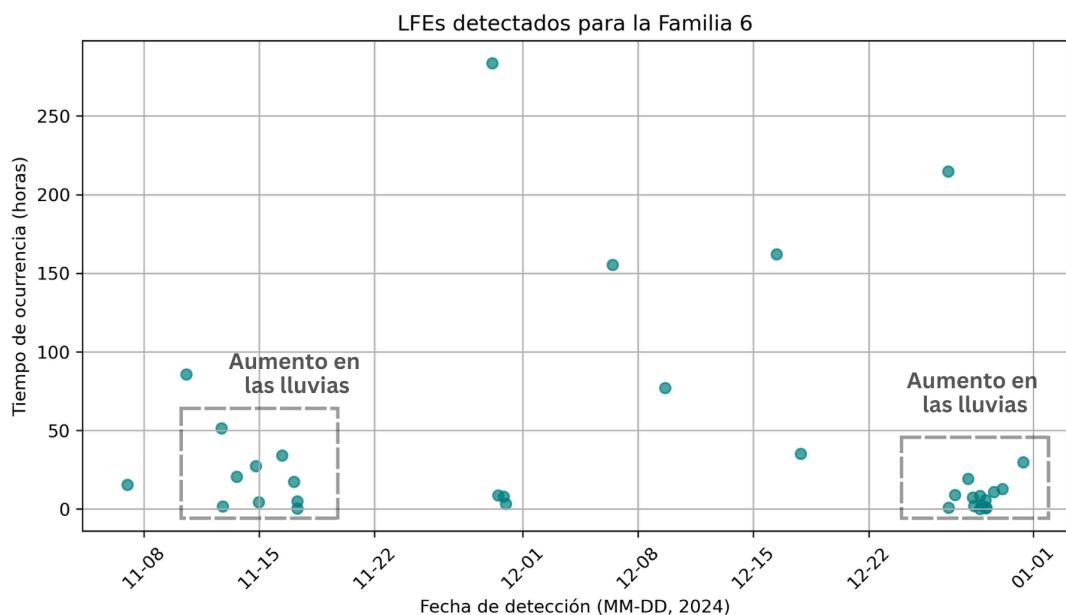


Figura 10. Cambios en los períodos de ocurrencia de LFEs en el tiempo para la Familia 6.

Al igual que en la figura 8, en la figura 10 se observan los mismos clústeres encontrados a mediados de noviembre y diciembre, pero en este caso se observa que el tiempo de ocurrencia entre eventos para el mes de diciembre es de menos de un dia, cuando en el clúster de noviembre la tendencia general era de un sismo de baja frecuencia cada uno o dos días, a tener ocurrencias de LFEs cada 10-12 horas, lo cual concuerda con un aumento drástico en las precipitaciones y la saturación del suelo para diciembre del 2024, siendo el más lluvioso de los últimos 20 años (Mena, 2025).

Seguido a estos resultados, la figura 11 muestra la coherencia espectral entre las formas de onda de cada LFEs detectado para la familia 6.

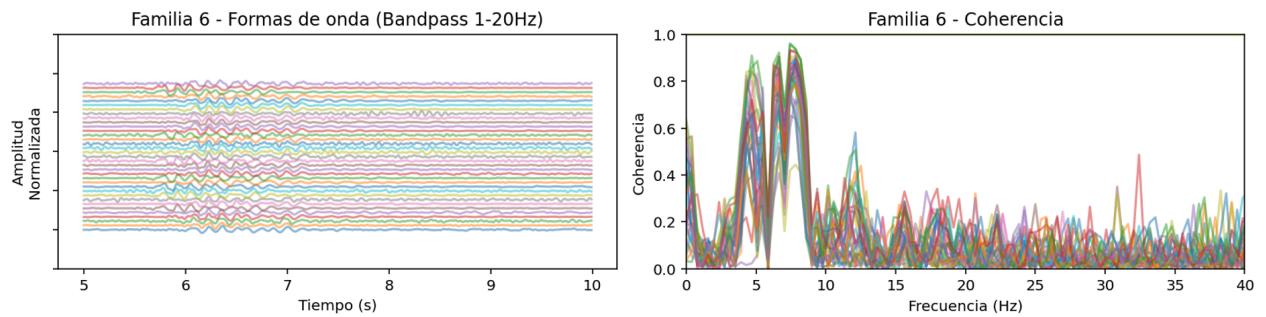


Figura 11. Coherencia espectral para los LFEs de la familia 6. En el panel izquierdo se observan las formas de onda de todos los eventos detectados, y a su vez en el panel derecho se muestra la coherencia espectral de todos los sismos.

Como se observa en la coherencia obtenida, los eventos irradiaron frecuencias en un rango promedio entre 3-10 Hz, por lo que confirma que estos son eventos repetidos de baja frecuencia, donde a rangos mayores de frecuencia lo único visible es ruido y no están asociados con el evento principal.

A partir de estos análisis, y observando la estrecha relación temporal entre las tendencias de los datos con las condiciones del terreno y las precipitaciones, se plantea la hipótesis que los eventos de baja frecuencia suceden por la heterogeneidad del medio, asociado a depósitos de baja rigidez. Estos suelos, junto a las lluvias y la saturación de éste, aumentan la presión de poro en el medio, disminuyendo así el esfuerzo efectivo de la falla, lo que genera que la aspereza rompa y la energía se libere de manera más progresiva, asociado a la baja velocidad de ruptura en un medio altamente heterogéneo. Es por ello que se plantea que el generador principal de LFEs se asocia con el medio por el que viajan las ondas, produciendo un deslizamiento lento (*Slow Slip Events*, o SSE, comúnmente asociados a LFEs), pero constante, en el plano de falla.

Esto indica que el deslizamiento de Aguas Zarcas está activo y ligado al campo gravitacional y el movimiento lento de masa altamente inestable y poco consolidada, lo cual se hace más visible en periodos de altas precipitaciones y saturación del suelo, donde la falla posee una menor fricción y permite deslizamientos pequeños y lentos en periodos de ocurrencia más cortos.

Conclusiones y recomendaciones

Se encontraron 9 familias de sismos de baja frecuencia repetidos en el área de estudio, donde se plantea que el medio por el que viajan las ondas es el principal generador de estos, por su gran relación con las condiciones del terreno y las precipitaciones en el sitio, mostrando clústeres de los mismos en períodos de saturación del suelo. Esto muestra que el deslizamiento sigue activo e inestable, principalmente ante eventos de alta precipitación en la cuenca.

Se recomienda seguir monitoreando el deslizamiento y las tendencias en los LFEs a futuro, especialmente durante períodos de alta saturación del suelo. De igual forma, se recomienda aplicar esta metodología a eventos previos o durante el deslizamiento del 2023, para observar si las tendencias eran las mismas antes del evento principal. También se recomienda realizar futuros estudios donde se analice la fuente sísmica de manera aislada, para evaluar variaciones en la fuente y en el medio y así comprobar el efecto de cada uno en la generación de estos eventos.

Referencias bibliográficas:

- Chamberlain, C. J., Hopp, C. J., Boese, C. M., Warren-Smith, E., Chambers, D., Chu, S. X., Michailos, K., Townend, J., *EQcorrscan: Repeating and near-repeating earthquake detection and analysis in Python*. Seismological Research Letters, 2017.
- Chaves, E. J., Müller, C., Alvarado, G. E., Hajaji, S., Campos, N., & Avard, G. (2024). *El deslizamiento y los flujos de escombros con troncos en el río Aguas Zarcas (julio 2023), San Carlos, Costa Rica: caracterización y vigilancia geodinámica*. Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional.
- Denyer, P., Montero, W., & Alvarado, G. E. (2003). *Atlas tectónico de Costa Rica*. Editorial Universidad de Costa Rica. (p. 79).
- Dondoli, C. (1950). *Informe sobre el yacimiento de azufre denominado “El Congo”*. Universidad de Costa Rica (Trabajo reimpreso en 1965, Informes técnicos y notas geológicas, 19).
- Huapaya, A. S., Rodríguez, E., y Ceciliano, A. (2021). *Mapa geológico 1:50 000 Hoja 3346-IV Quesada*. Dirección de Geología y Minas, Minae.
- Instituto Meteorológico Nacional (2024a). *Anomalía (%) de la lluvia mensual en Costa Rica: Noviembre 2024 [Mapa]*. IMN.
- Instituto Meteorológico Nacional (2024b). *Anomalía (%) de la lluvia mensual en Costa Rica: Diciembre 2024 [Mapa]*. IMN.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2025). *Pronóstico Estacional – Noviembre 2024 a enero 2025* [Informe técnico]. <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/29808/PerspClimaCR-202409/7395c159-864d-4c23-b684-c2e345679507>
- Madrigal, J. y Esquivel, L. (2023). *Deslizamiento Quebrada Oro Parque Nacional Juan Castro Blanco Subcuenca Superior del Río Aguas Zarcas*. Informe Interno CNE-UIAR-INF-0956-2023.
- Mena, M. (2025, 9 de enero). *Diciembre 2024 rompió récords como el más lluvioso en 24 años en Costa Rica*. El Observador.

<https://observador.cr/diciembre-2024-rompe-records-como-el-mas-lluvioso-en-24-anos-acumulados-historicos-en-casi-todas-las-provincias/>

Montero, W., Denyer, P., Barquero, R., Alvarado, G. E., Cowan, H., Machette, M., Haller, K., & Dart, R. (1998). *Map and database of Quaternary faults and folds in Costa Rica and its offshore regions* [Reporte preliminar]. U.S. Geological Survey.

Montero, W., Soto, G., Alvarado, E., & Rojas, W. (2010). División del deslizamiento tectónico y transtensión en el macizo del volcán Poás (Costa Rica), basado en estudios neotectónicos y de sismicidad histórica. *Revista Geológica de América Central*, 43, 13-36. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i43.3456>

Peraldo Huertas, G., Badilla Coto, E., & Quesada Román, L. (2024). Inestabilidad compleja de la cabecera del río Aguas Zarcas. *Revista Geológica de América Central*, 71. <https://doi.org/10.15517/rgac.2024.62568>

Material complementario (Anexo):

En el siguiente apartado se muestran los resultados obtenidos para las familias de LFEs restantes detectadas.

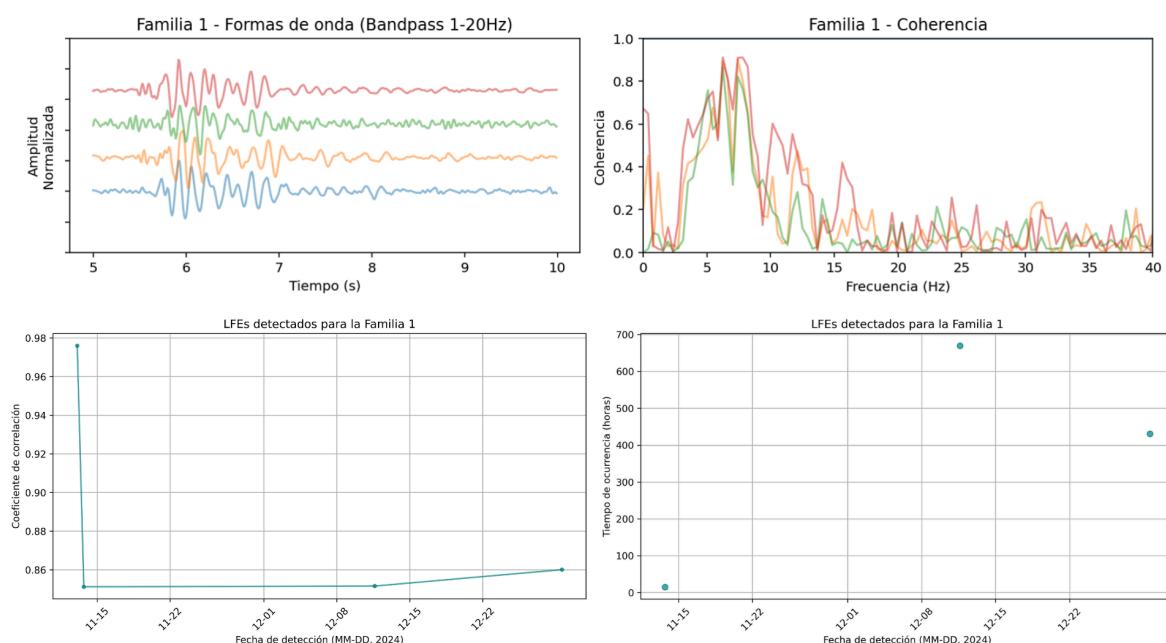


Figura A1. Resultados obtenidos para los LFEs detectados en la Familia 1. En el panel superior izquierdo se observan las formas de onda de los eventos y en el panel superior derecho se muestra la coherencia de los mismos. A su vez, en el panel inferior izquierdo, se observa la dinámica del coeficiente de correlación de los eventos con respecto al tiempo, y en el panel inferior derecho se muestra el tiempo de ocurrencia de los LFEs en el tiempo.

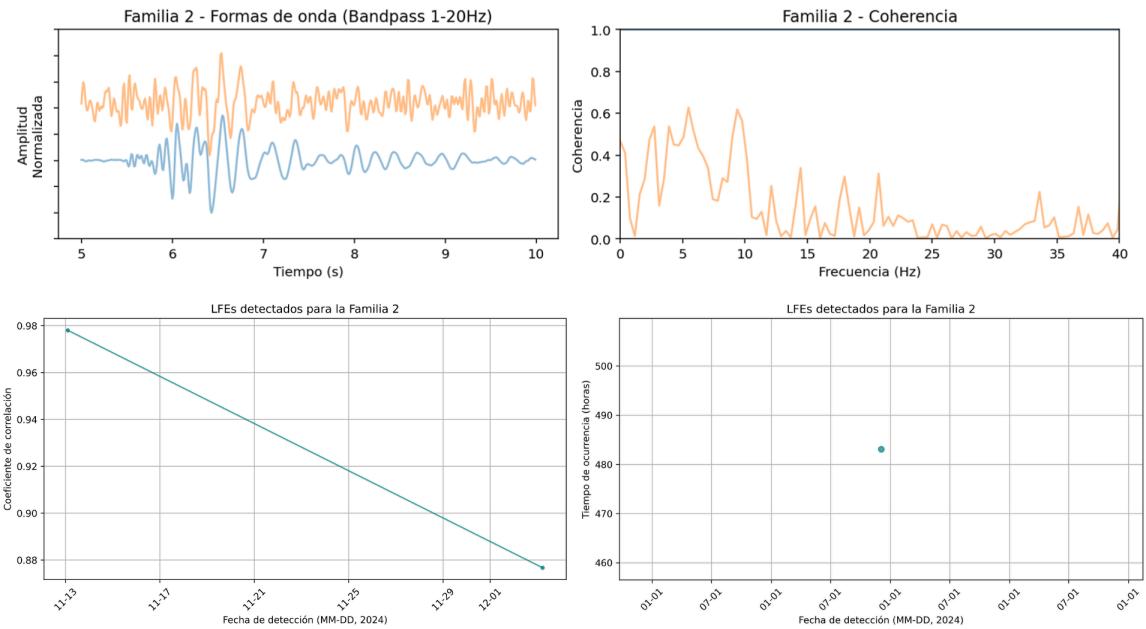


Figura A2. Resultados obtenidos para los LFEs detectados en la Familia 2. En el panel superior izquierdo se observan las formas de onda de los eventos y en el panel superior derecho se muestra la coherencia de los mismos. A su vez, en el cuadro inferior izquierdo, se observa la dinámica del coeficiente de correlación de los eventos con respecto al tiempo, y en el panel inferior derecho se muestra el tiempo de ocurrencia de los LFEs en el tiempo.

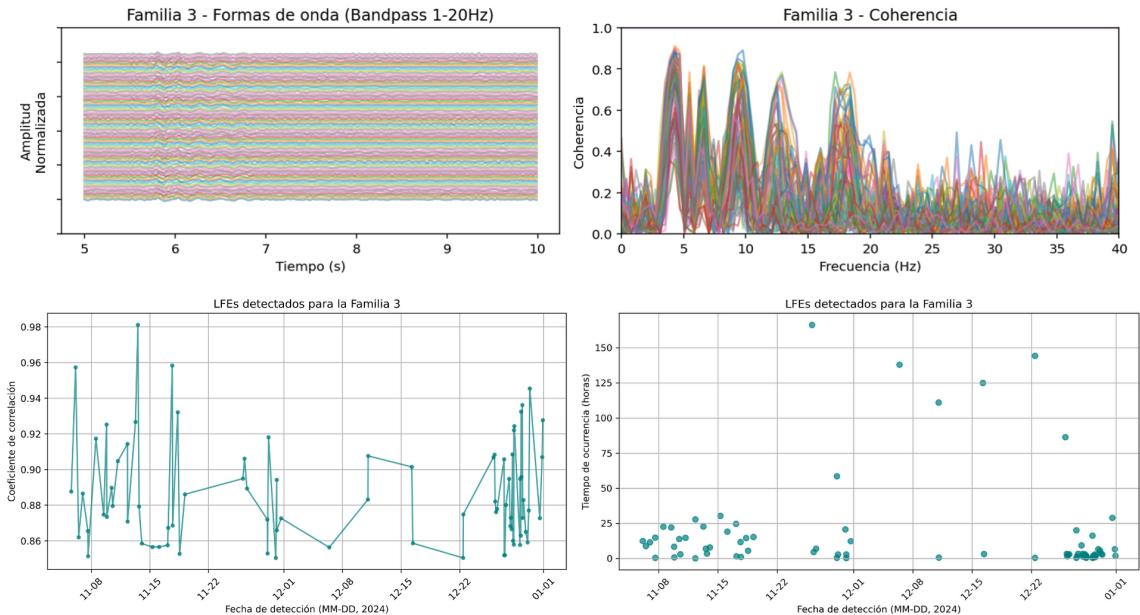


Figura A3. Resultados obtenidos para los LFEs detectados en la Familia 3. En el panel superior izquierdo se observan las formas de onda de los eventos y en el panel superior derecho se muestra la coherencia de los mismos. A su vez, en el cuadro inferior izquierdo, se observa la dinámica del coeficiente de correlación de los eventos con respecto al tiempo, y en el panel inferior derecho se muestra el tiempo de ocurrencia de los LFEs en el tiempo.

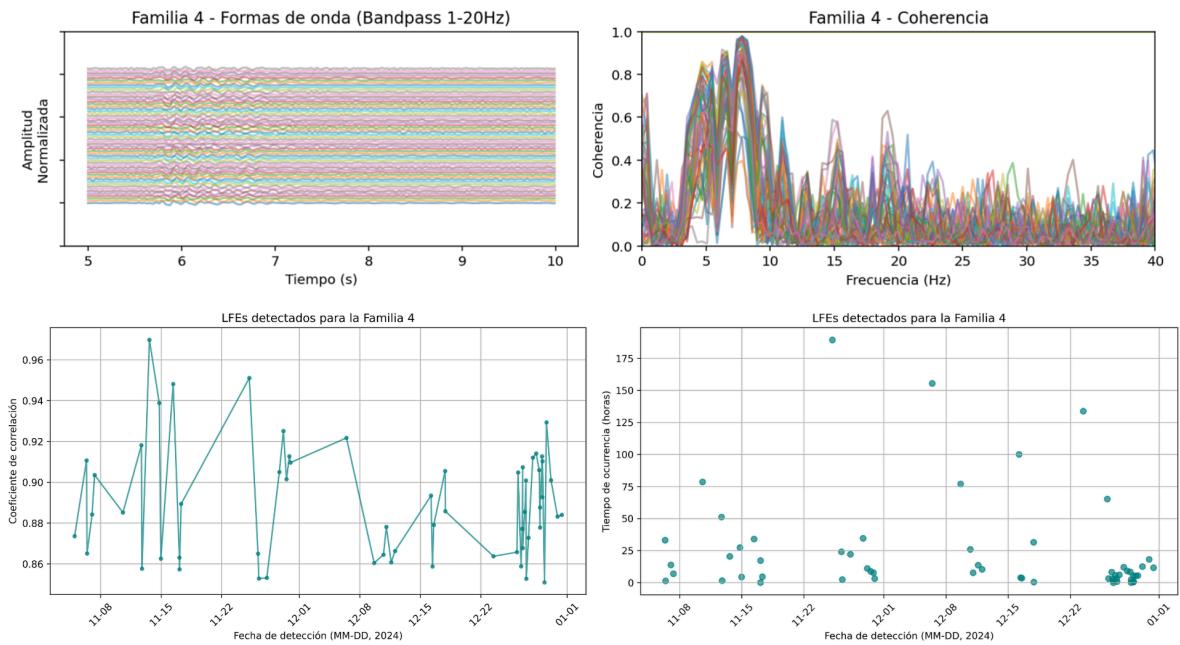


Figura A4. Resultados obtenidos para los LFEs detectados en la Familia 4. En el panel superior izquierdo se observan las formas de onda de los eventos y en el panel superior derecho se muestra la coherencia de los mismos. A su vez, en el cuadro inferior izquierdo, se observa la dinámica del coeficiente de correlación de los eventos con respecto al tiempo, y en el panel inferior derecho se muestra el tiempo de ocurrencia de los LFEs en el tiempo.

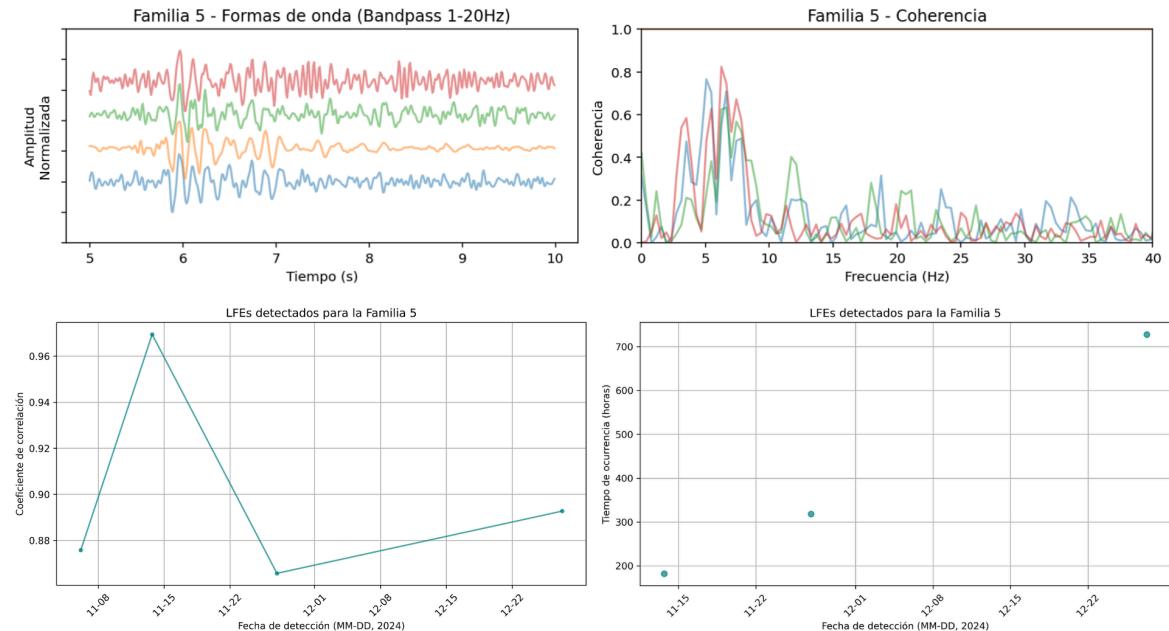


Figura A5. Resultados obtenidos para los LFEs detectados en la Familia 5. En el panel superior izquierdo se observan las formas de onda de los eventos y en el panel superior derecho se muestra la coherencia de los mismos. A su vez, en el cuadro inferior izquierdo, se observa la dinámica del coeficiente de correlación de los eventos con respecto al tiempo, y en el panel inferior derecho se muestra el tiempo de ocurrencia de los LFEs en el tiempo.

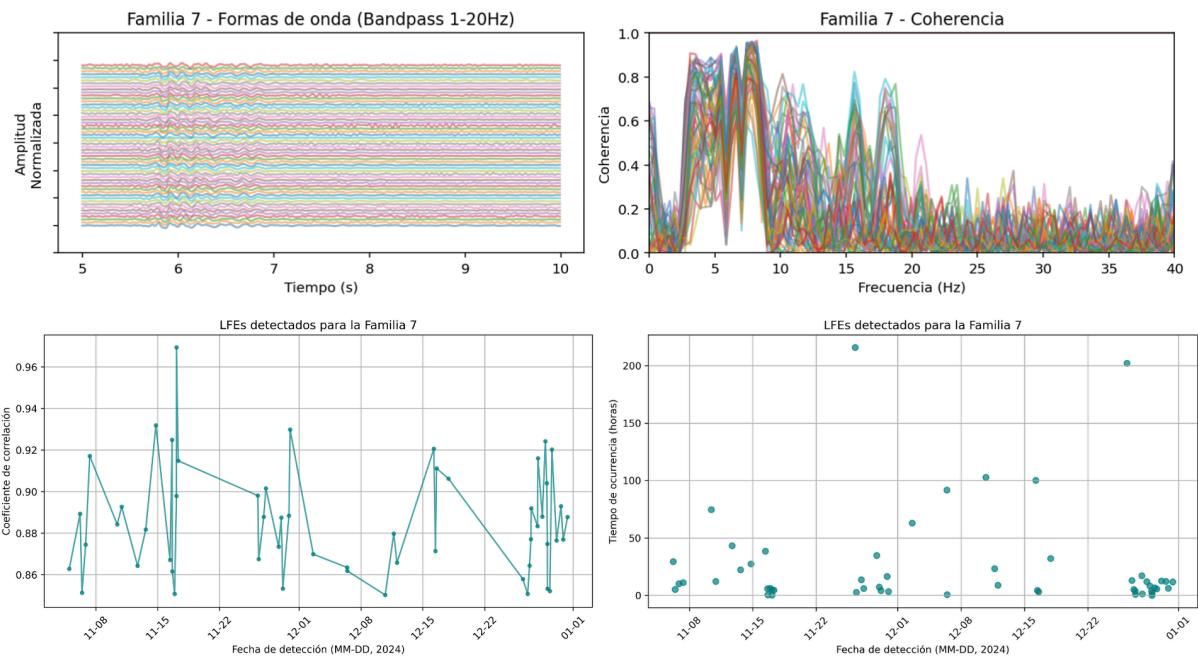


Figura A6. Resultados obtenidos para los LFEs detectados en la Familia 7. En el panel superior izquierdo se observan las formas de onda de los eventos y en el panel superior derecho se muestra la coherencia de los mismos. A su vez, en el cuadro inferior izquierdo, se observa la dinámica del coeficiente de correlación de los eventos con respecto al tiempo, y en el panel inferior derecho se muestra el tiempo de ocurrencia de los LFEs en el tiempo.

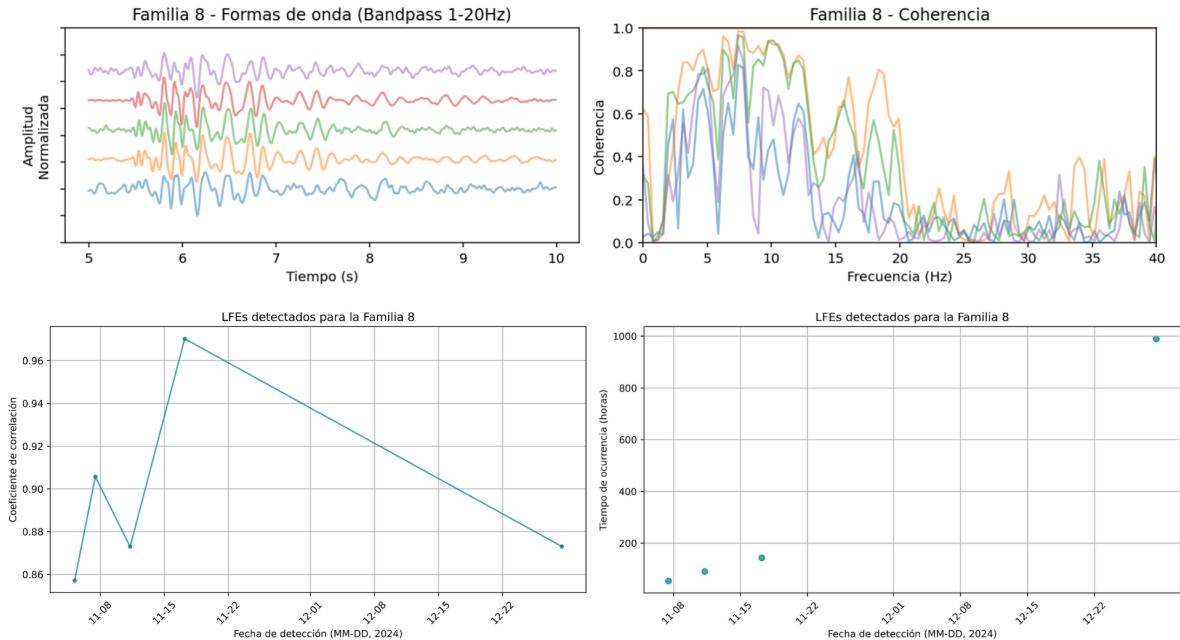


Figura A7. Resultados obtenidos para los LFEs detectados en la Familia 8. En el panel superior izquierdo se observan las formas de onda de los eventos y en el panel superior derecho se muestra la coherencia de los mismos. A su vez, en el panel inferior izquierdo, se observa la dinámica del coeficiente de correlación de los eventos con respecto al tiempo, y en el panel inferior derecho se muestra el tiempo de ocurrencia de los LFEs en el tiempo.

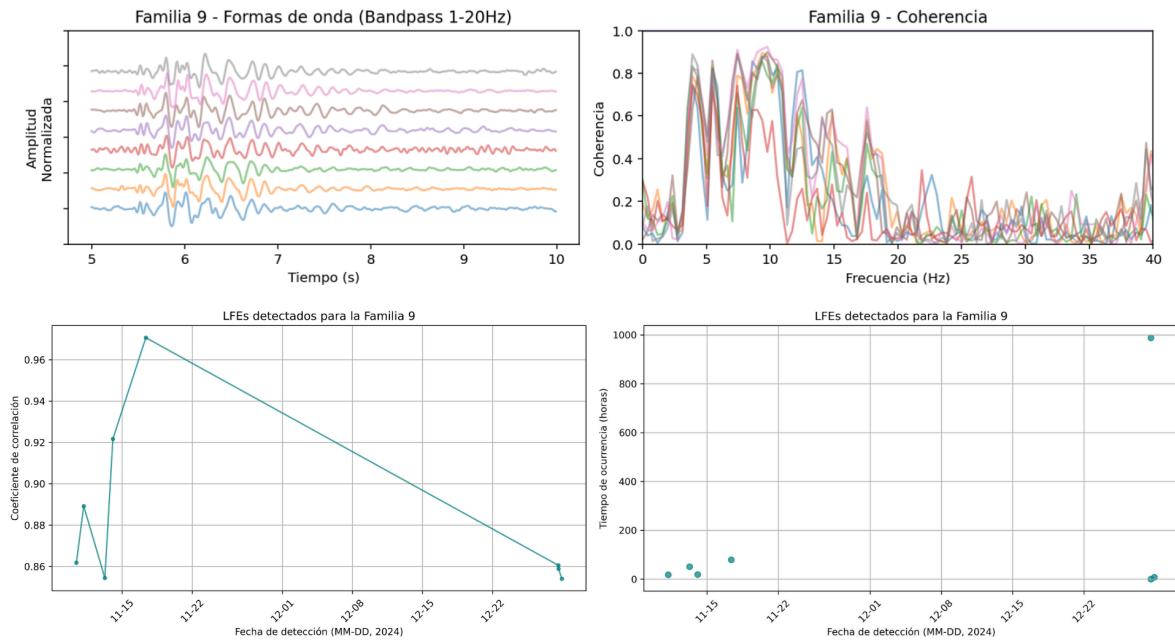


Figura A8. Resultados obtenidos para los LFEs detectados en la Familia 9. En el panel superior izquierdo se observan las formas de onda de los eventos y en el panel superior derecho se muestra la coherencia de los mismos. A su vez, en el cuadro inferior izquierdo, se observa la dinámica del coeficiente de correlación de los eventos con respecto al tiempo, y en el panel inferior derecho se muestra el tiempo de ocurrencia de los LFEs en el tiempo.