

**SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO
OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO Y SISMOLÓGICO DE PASTO**

Actividad del Complejo Volcánico Chiles-Cerro Negro

Informe Técnico Extraordinario

Por:
Roberto Torres Corredor
Lourdes Narváez Medina
Darío Arcos Guerrero
Patricia Ponce Villarreal
Oscar Cadena Ibarra
Paola Narváez Obando
Yenny Hache

San Juan de Pasto, agosto de 2023

1. RESUMEN

En la zona del Complejo Volcánico Chiles – Cerro Negro y en el transcurso de 2023, se destaca incrementos en las tasas de deformación y de ocurrencia sísmica entre marzo a junio y la más reciente desde el 5 de agosto. Aunque la sismicidad dominante estuvo asociada con la ocurrencia de eventos relacionados con fallamiento frágil en la roca (sismos tipo volcano-tectónico) se destaca el notorio aumento de sismos relacionados con actividad de fluidos (sismos tipo largo-período), obteniéndose un valor máximo diario de 522 el 26 de mayo. Adicionalmente, otro aspecto a destacar es que la localización de las fuentes sísmicas de los VT estuvo constreñida en relación con otros enjambres sísmicos pasados. En el enjambre que aconteció entre marzo-junio, el sismo de mayor magnitud fue de 4.3 el 25 de abril, y para el enjambre que se inició el 5 de agosto, los eventos más destacados tuvieron magnitudes de 3.5 el 6 y 7 de agosto. Estos cambios sugieren la evolución de la actividad en CVCCN posiblemente asociados a una fuente magmática relativamente más próxima a la superficie.

2. ANTECEDENTES

En agosto de 2013, a través de la red de monitoreo instalada en el Complejo Volcánico Cumbal, localizada al norte de los volcanes Chiles y Cerro Negro, se detectó una importante actividad sísmica que incluyó sismos que fueron sentidos por los residentes de las poblaciones vecinas a la frontera entre Colombia y Ecuador (Chiles y Tufiño respectivamente) que se asoció con una posible actividad de alguno de estos volcanes, lo que motivó a que el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN, Ecuador) instalaran, a partir de noviembre de 2013, una red compartida de monitoreo de estaciones sísmicas de banda ancha, así como de inclinómetros electrónicos y estaciones cGPS (Figura 1). Desde el inicio en operación de la red sísmica y hasta julio de 2023, se tiene en catálogo con un registro de más de 1'200.000 sismos volcano-tectónicos (VT) asociados con fractura frágil en la roca volcánica debido a variaciones en el campo de esfuerzos, con altas tasas de ocurrencia, energía y una migración de las fuentes sísmicas desde el SE (Potrerillos) aproximándose hacia el S del volcán Chiles principalmente. Otro rasgo que se destaca con la sismicidad VT, es que en algunos sismos y durante ciertos periodos de tiempo, han mostrado en sus formas de onda y espectro, una componente de muy largo periodo (VLP). Desde octubre de 2014 se detectaron sismos VLP, los cuales se interpretan como cambios de volumen o transporte de masa desencadenados por perturbaciones de presión transitoria generadas por movimiento de fluidos, que se localizaron al S del volcán Chiles y algunos pocos debajo de la cima de este volcán. Otro punto por resaltar es la ocurrencia de sismos de largo-periodo (LP) que se interpretan como resonancia en cavidades con circulación de fluidos magmáticos o hidrotermales excitadas por presiones transitorias, a partir de junio de 2015 con una mayor tasa de ocurrencia a partir de mayo de 2023. Los principales incrementos en el número y energía de sismos VT ocurrieron en agosto - octubre de 2013 (observaciones en la red sísmica del Complejo Volcánico de Cumbal), marzo – mayo de 2014, septiembre - diciembre de 2014, marzo-noviembre de 2018, mayo – octubre de 2022, marzo – junio de 2023 y agosto de 2023. Muchos de los sismos VT, generalmente con magnitudes superiores a 2.5 han sido sentidos por pobladores de la zona de influencia del CVCCN, siendo los más relevantes: 16 de octubre de 2013, 30 de abril de 2014, 20 de octubre de 2014, 21 de marzo de 2018, 14 de febrero de 2019, 25 de julio de 2022, 25 de abril de 2023, con magnitudes de 4.3, 4.6, 5.6, 3.7, 4.9, 5.7 y 4.3 respectivamente (Figuras 2a y 2d). Estos incrementos que se han registrado de manera fluctuante han estado acompañados por una continua deformación que principalmente se evidencia con las series interferométricas en la zona

del volcán Chiles y de inclinometría electrónica (Figura 2g y 2h), cambios que también se han observado en las estaciones de cGPS desde su instalación (Figura 2f) principalmente en las cercanas al volcán Chiles. Se destaca que algunas variaciones en las tasas de deformación han precedido o han acompañado los incrementos de la sismicidad. Estos cambios en el comportamiento de la actividad volcánica hasta la fecha no se han reflejado en la ocurrencia de actividad eruptiva.

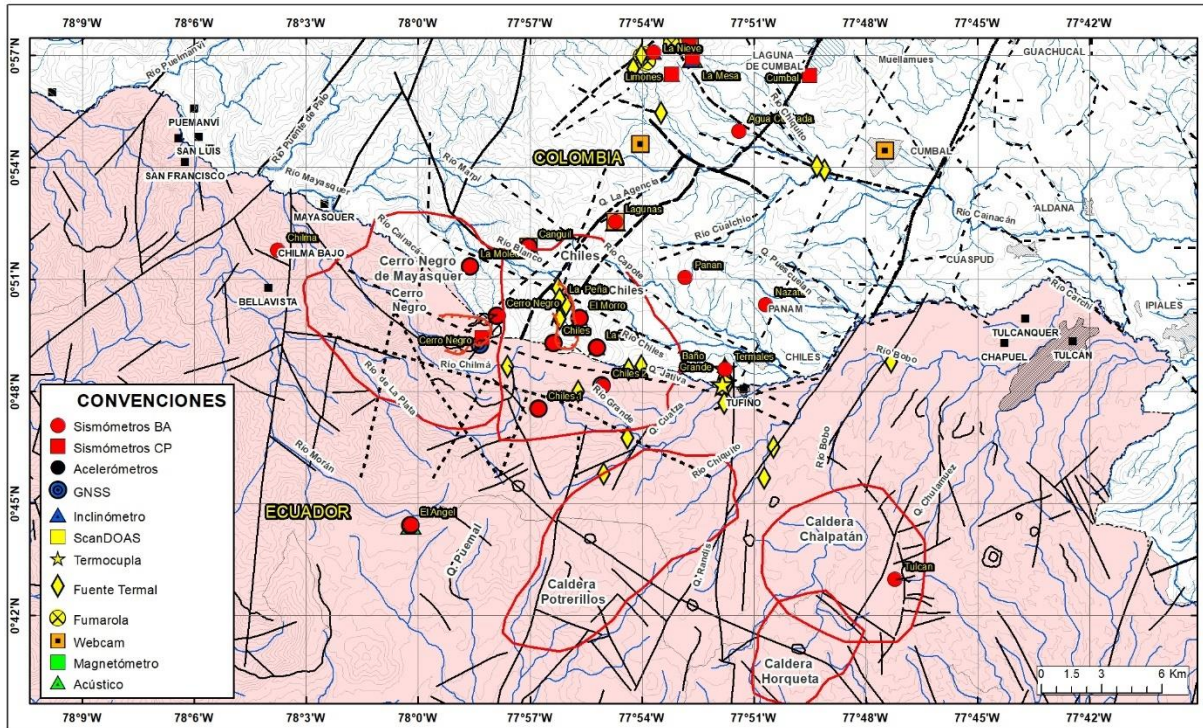


Figura 1. Localización de estaciones telemétricas (sismómetros, inclinómetros y cGPS) y sitios de muestreo en fuentes termales para la vigilancia volcánica del CVCCN.

3. MANIFESTACIONES DE LA ACTIVIDAD

A partir del 9 de marzo de 2023 el CVCCN mostró un nuevo incremento en su actividad sísmica (Figuras 2a y 3). En su gran mayoría los sismos registrados fueron VT, sin embargo, este nuevo enjambre estuvo precedido por sismos VLP (Figura 2b), adicionalmente a lo largo del enjambre hubo un incremento paulatino de sismos LP (Figura 2c) y que han disminuido en número a partir de junio de 2023. El enjambre tuvo su máximo de ocurrencia el día 10 de marzo, totalizando cerca de 10200 sismos VT que corresponde al número diario más alto desde el inicio del monitoreo instrumental continuo del CVCCN (Figura 2a); el sismo con la magnitud máxima para este enjambre fue de 4.3 el 25 de abril (Figura 2d). En la Figura 3a se observa un detalle del enjambre de sismos VT dentro del cual se aprecia un reciente incremento a partir del 5 de agosto, con un máximo diario de 4095 para el 6 de agosto. Aunque la sismicidad fue dominada por eventos VT asociados con fracturamiento de roca, se destaca el notorio aumento de sismos LP relacionados con actividad de fluidos, obteniéndose la mayor tasa de ocurrencia desde el inicio del

monitoreo del CVCCN con un valor diario de 522 el 26 de mayo (Figura 3b) y donde la proporción entre la ocurrencia de LP a VT fue cercana al 50% (Figura 3c).

En cuanto a la sismicidad VLP que se registró durante el actual enjambre, se muestran dos ejemplos de formas de onda y espectrogramas, uno registrado al inicio del enjambre el 9 de marzo, y otro más reciente del 3 de agosto que antecedió el incremento observado a partir del 5 de agosto. En el primer caso, el sismo se registró en 12 estaciones de la red de vigilancia del volcán Chiles (Figura 4). Este sismo muestra una banda con energía por debajo de 0.5 Hz que se aprecia claramente en todas las estaciones que lo registraron; el segundo ejemplo, del 3 de agosto tiene menor nivel energético y fue registrado por 6 estaciones de la red, de las cuales se presenta la información en 5 estaciones (Figura 5); al igual que en el primer ejemplo, este sismo contiene información espectral por debajo de los 0.5 Hz con la diferencia que los picos de fuente no son tan claros como en el caso anterior, probablemente debido a que la relación señal-ruido no es lo suficientemente favorable. Este tipo de sismos han estado presentes generalmente antecediendo incrementos en la sismicidad VT y LP en el CVCCN.

A partir del 9 de marzo de 2023 se han localizado 3263 sismos con magnitudes mayores a 1.0 (Figura 6a); en su gran mayoría estos sismos forman una fuente ubicada epicentralmente desde la cima hasta unos 4.5 km hacia el S y profundidades entre los 2 y 6 km. La Figura 6b por su parte muestra la localización de los sismos VT registrados entre el 5 de agosto y el momento de elaboración de este informe. Se observa que esta sismicidad no presenta sismos tan cercanos al edificio de Chiles, tal como lo ocurrido a partir del 9 de marzo del presente año.

Un análisis más detallado de la localización de sismos utilizando la técnica de doble diferencia, indica que la sismicidad VT entre marzo y mayo de 2023 se encuentra aún más concentrada con tendencia a alargarse hacia el sector S del volcán Chiles (Figura 7) y en profundidad con una tendencia superficializándose de S a N con lo que parecen ser dos fuentes que dejan una zona libre de sismos entre ellas. Se destacan dos aspectos relacionados con esta información: 1) la escasa sismicidad en los 2 primeros kilómetros debajo de la cima de Chiles, lo que probablemente indica que la presión interna del sistema no es capaz de alcanzar con suficiente energía esta zona para iniciar un proceso de fracturamiento 2) la presencia de una zona probablemente con características más plásticas a una profundidad de unos 6 km donde la sismicidad de fractura es escasa también.

Por otro lado, el análisis de correlación cruzada para los primeros días del enjambre entre el 9 y el 26 de marzo, muestra cerca de 130 familias, de las cuales 11 son las más numerosas y con recurrencia desde el inicio del enjambre. Las familias se formaron a partir de un criterio mínimo de 0.7 en el coeficiente de correlación entre las formas de onda. Dado que la gran mayoría de sismos del enjambre iniciado el 9 de marzo son VT, es probable que la diferencia entre familias radique en la forma de acción de las fuente y diferencias en la posición de éstas, lo que implica la existencia de una variedad de mecanismos de fuente en la zona. En la Figura 8 se observan algunas características de una de las familias más numerosas, como el apilado de sus formas de onda, apilado de su espectro, amplitud, tiempo entre un evento y el siguiente y finalmente el coeficiente de correlación. Se destaca que a pesar de que se exigió un valor mínimo de 0.7 en el coeficiente de correlación, existen pares de sismos que superan ese valor, especialmente desde el inicio hasta el 15 de marzo. Otro aspecto interesante es que la acción de la familia de mayor temporalidad cesa antes del 15 de marzo y tras un periodo de reposo reaparece a partir del 23 de marzo.

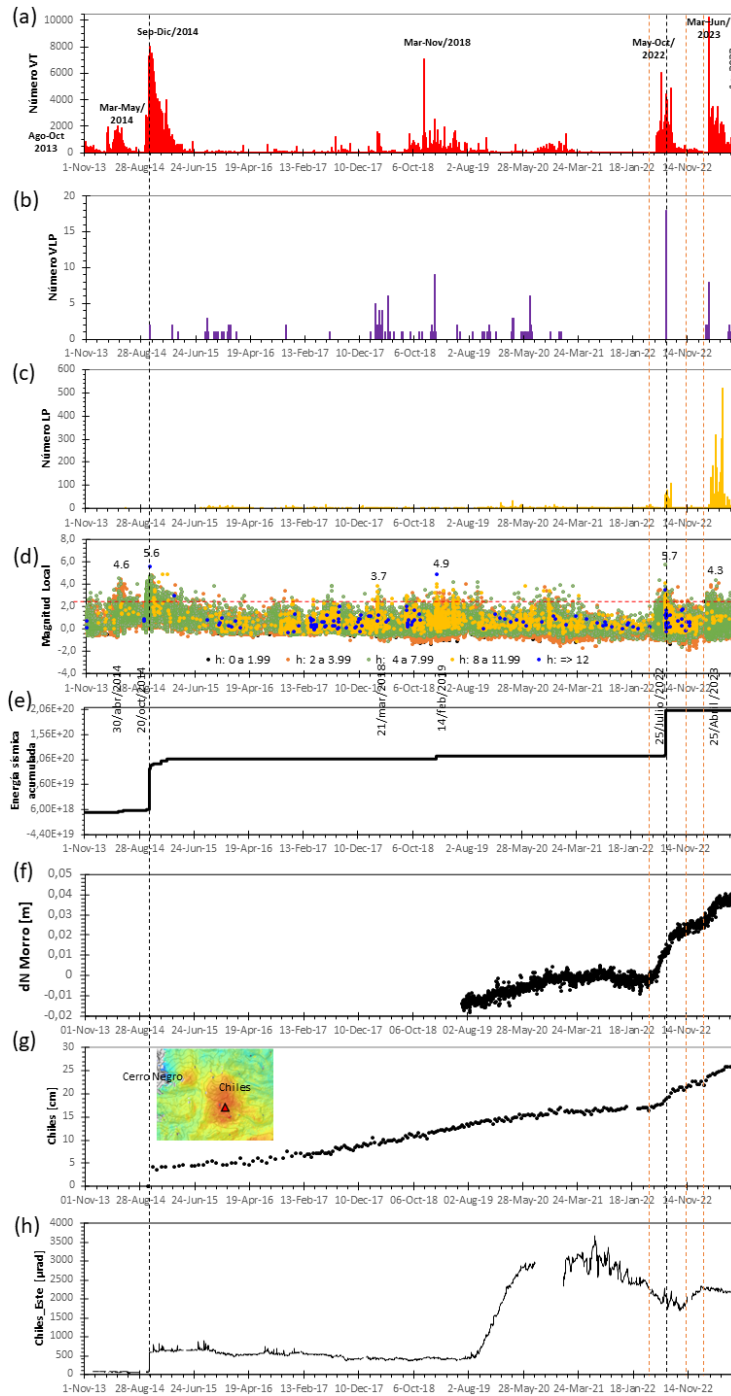


Figura 2. Ocurrencia diaria de sismos en el CVCCN desde noviembre de 2013 a agosto 9 de 2023 a) VT, b) VLP, c) LP. En d) magnitudes locales, e) energía sísmica acumulada liberada, f) desplazamiento en la dirección N en metros del cGPS el Morro, g) desplazamientos en la dirección LOS de la zona indicada por el triángulo en el volcán Chiles, y h) inclinación en la componente E del inclinómetro electrónico Chiles (Fuente: SGC). Las líneas verticales negras discontinuas destacan el tiempo en el que ocurrieron los sismos de magnitudes locales 5.6 el 20 de octubre 2014 y 5,7 el 25 de julio de 2022 y las líneas verticales anaranjadas discontinuas resaltan los periodos de incremento en la deformación y de los enjambres en 2022 y 2023.

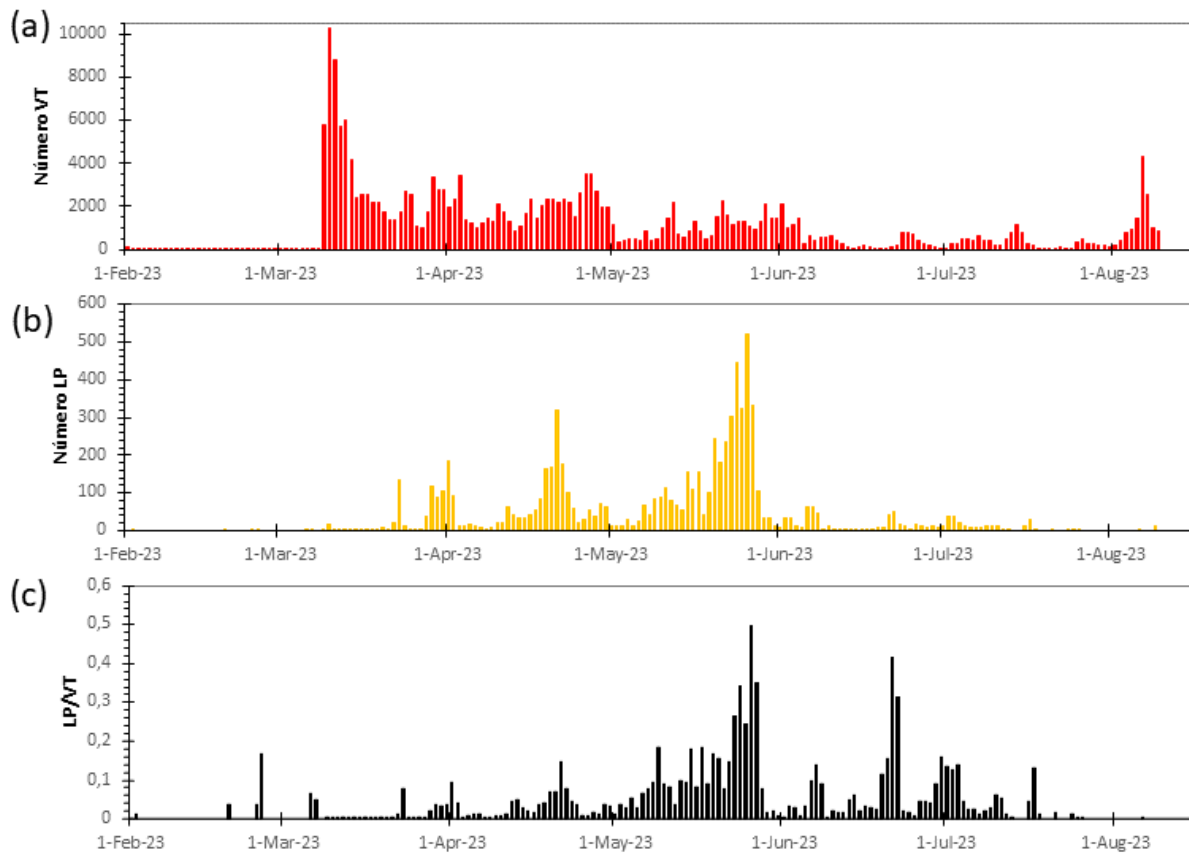


Figura 3. Ocurrencia diaria de eventos para el periodo entre el 1 de febrero y el 9 de agosto de 2023 a) VT, b) LP y c) relación del número de LP a VT.

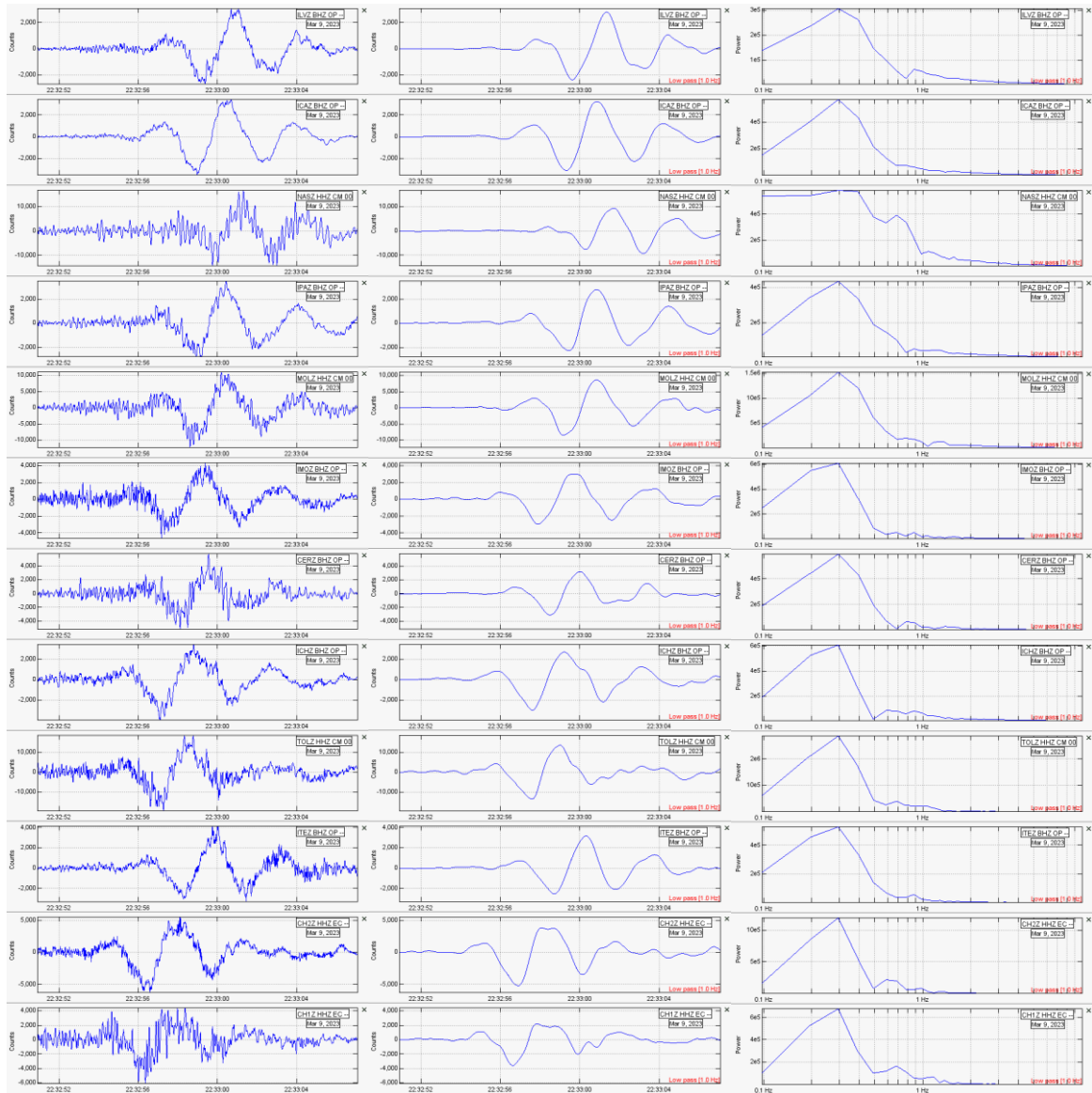


Figura 4. Sismograma sin filtrar (izquierda), sismograma filtrado -Lowpass 1 Hz (centro) y espectros de frecuencia (derecha) para 12 estaciones de la red sísmica del CVCCN de un sismo VLP registrado el día 9 de marzo de 2023.

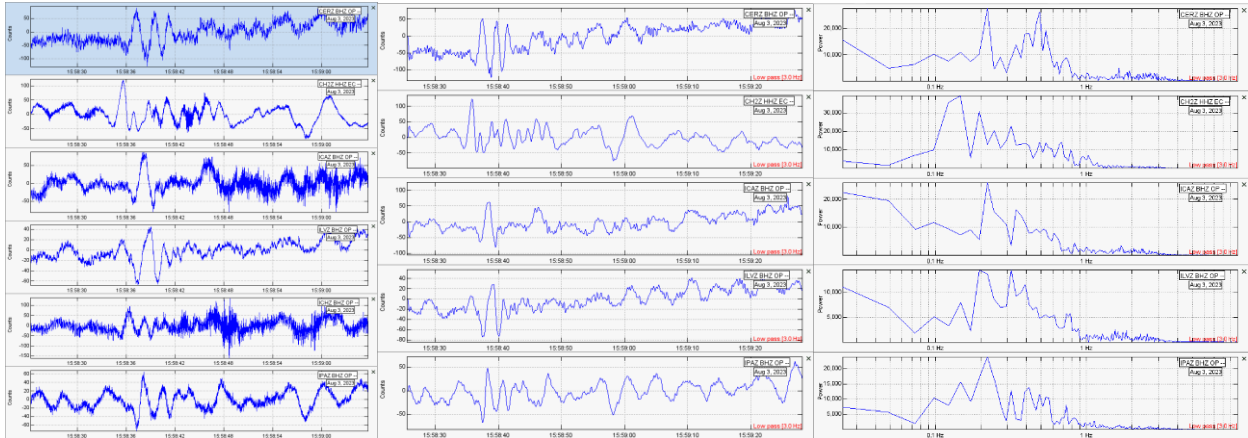


Figura 5. Sismograma sin filtrar (izquierda), sismograma filtrado -Lowpass 3 Hz (centro) y espectros de frecuencia (derecha) para 5 estaciones de la red sísmica del CVCCN de un sismo VLP registrado el día 3 de agosto de 2023.

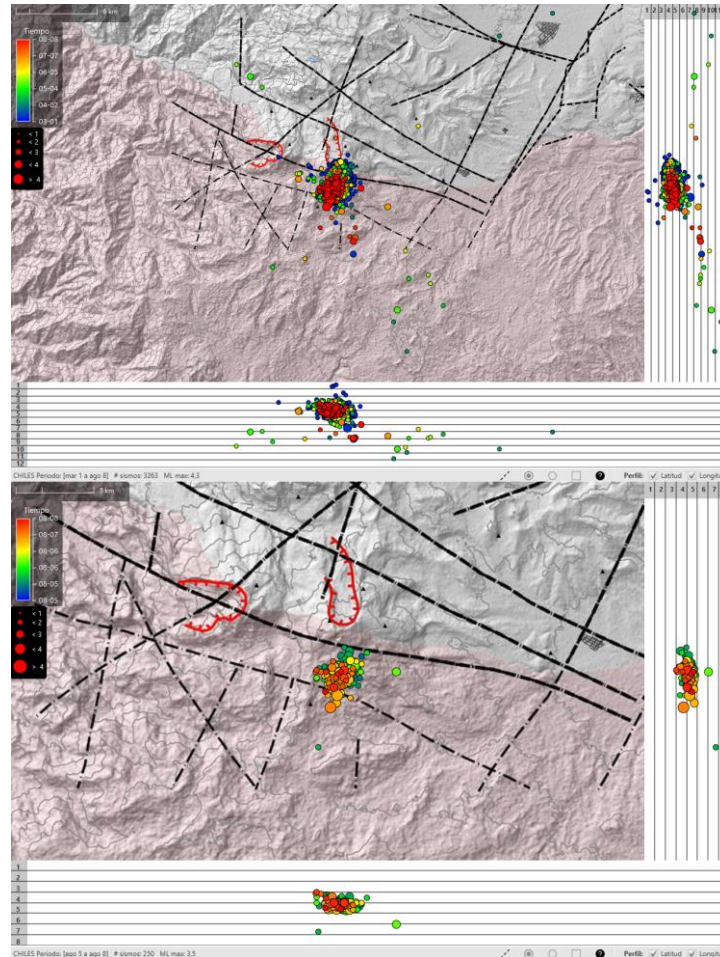


Figura 6. Mapas de localizaciones de los eventos sísmicos entre el 9 de marzo de 2023 y 8 de agosto de 2023 (superior) y entre el 5 y el 8 de agosto de 2023 (inferior).

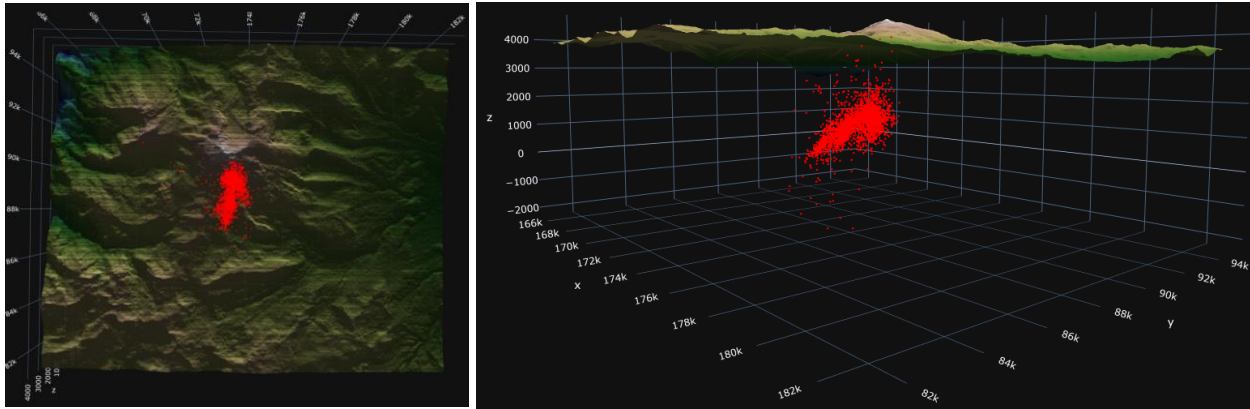


Figura 7. Localización relativa de sismos registrados entre marzo y mayo de 2023, (derecha) vista en planta, (izquierda) vista desde el sureste.

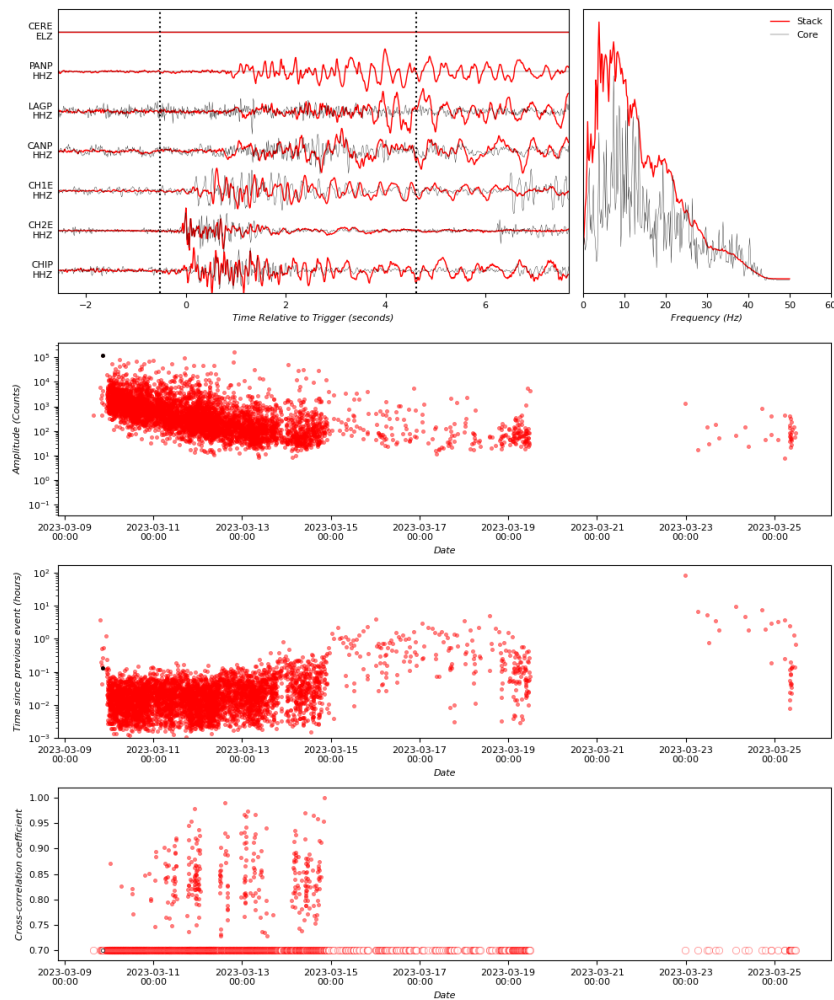


Figura 8. Características de una de las familias más numerosas entre el 9 y el 26 de marzo de 2023. De arriba hacia abajo: apilado de formas de onda y espectros, amplitud, tiempo entre sismos y coeficientes de correlación.

Adicionalmente, el análisis de correlación cruzada para la sismicidad LP, entre mediados de marzo y finales de mayo de 2023, periodo en que este tipo de sismicidad mostró su mayor tasa de ocurrencia desde el inicio del monitoreo instrumental (más de 500 sismos/día), indicando únicamente 3 familias, de las cuales solamente una es relevante por el número de sismos que contiene (Figura 9), lo que sugiere probablemente la existencia de una única fuente de sismicidad LP no destructiva. Desde junio de 2023 a la fecha, la cantidad de sismos LP volvió a números por debajo de 10 por día, incluyendo periodos de algunas semanas en las que no se registraron estos eventos.

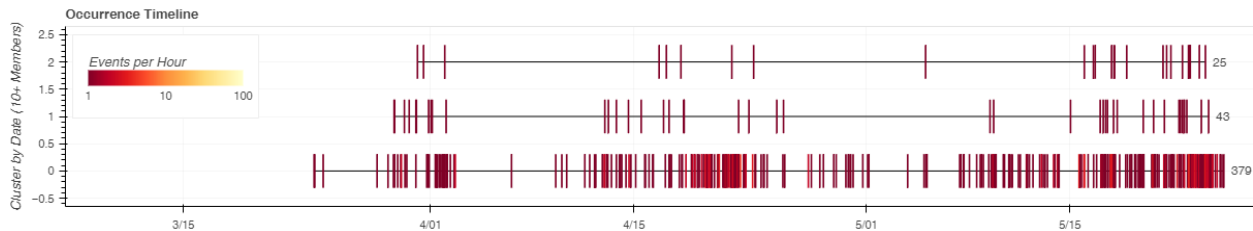


Figura 9. Familias de sismos LP entre mediados de marzo y finales de mayo de 2023. Se encontraron 3 familias (secuencias horizontales), de las cuales la inferior es la que contiene la gran mayoría de sismos LP para el periodo analizado.

En la Figura 10 se muestra la localización y los mecanismos focales de 5 sismos registrados entre mayo y agosto de 2023 con magnitudes locales (M_L) entre 3.2 y 4.1. Los mecanismos focales de 4 de estos sismos se asocian con mecanismos de fallas transcurrentes y uno de falla inversa. Un análisis más detallado de las soluciones calculadas muestra en general la presencia de una componente importante de dipolo lineal compensado (CLVD) asociado a procesos de No Doble-Cupla, tales como rupturas internas dentro de la corteza, apertura de grietas bajo tensión o sismos casi simultáneos en fallas cercanas bajo tensión, una escasa componente puramente isotrópica (en ningún caso nula) asociada a explosión o implosión, produciendo solo movimientos longitudinales que tienen la misma amplitud en todas las direcciones, sin embargo, el mecanismo dominante en los 5 sismos, corresponde a una componente de Doble Cupla (DC) asociado a una mecánica de cizalla en la corteza, correspondientes al movimiento de corte en fallas planas. La interpretación de la componente CLVD en el mecanismo focal de un sismo puede ser particularmente interesante y relevante debido a la presencia de procesos volcánicos y la interacción entre las fuerzas tectónicas y el comportamiento magmático. La presencia de un valor alto en la componente CLVD podría interpretarse como una intrusión magmática a través de fracturas, inestabilidad tectónica con interacción con la actividad volcánica, o por expansión y compresión lateral relacionadas con cambios en la presión y la distribución de fluidos, incluidos gases y fluidos volcánicos dentro de cavidades y fracturas en la corteza.

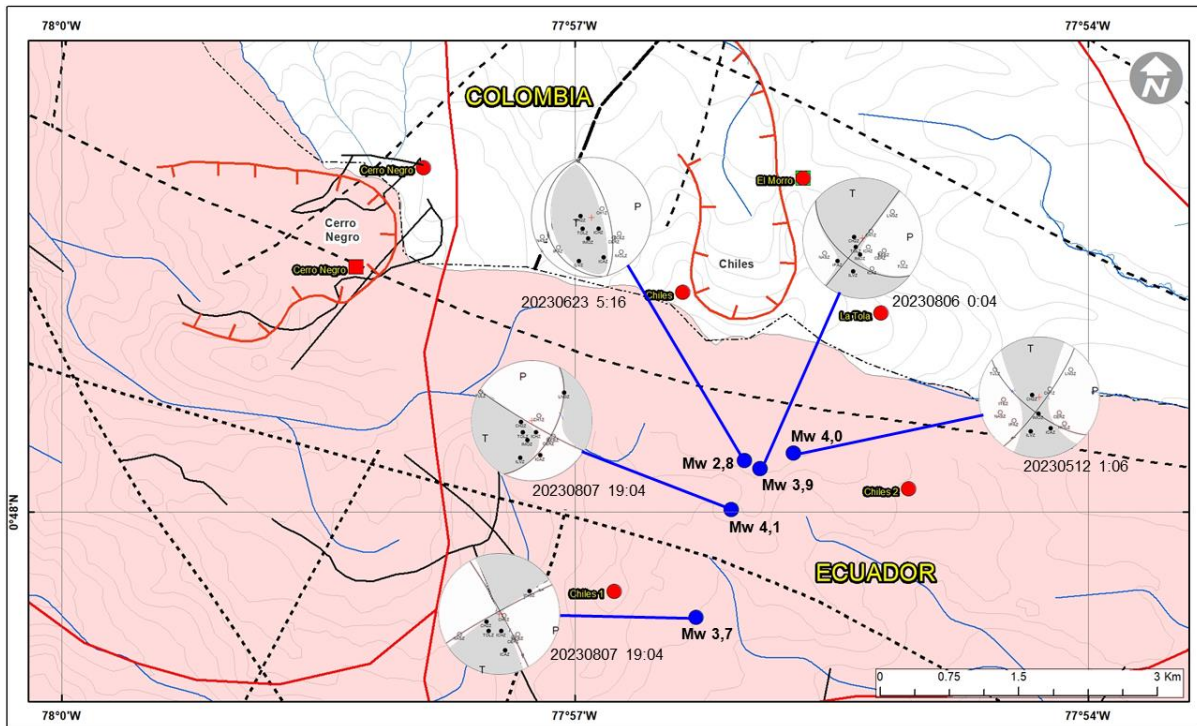


Figura 10. Localización y mecanismo focal para 5 sismos VT registrados entre mayo y agosto de 2023 en el CVCCN.

En la Figura 11 se muestran las series de datos que corresponde a la estación CHLS ubicada hacia el sector SE de la cima del volcán Chiles (Figura 1), resaltando dos de los periodos en los cuales se ha incrementado la tasa de deformación, el primero de ellos entre mayo y noviembre de 2022 (color azul de la Figura 11) y el segundo entre febrero y junio de 2023, precediendo en ambos casos el incremento de la tasa de ocurrencia de los VLP, VT y en el segundo caso también de LP; observado fluctuaciones en los registros de las componentes horizontales y manteniendo la tendencia ascendente en la Vertical, describiendo un patrón deformativo inflacionario. Con el actual incremento en la ocurrencia sísmica que se inició el 5 de agosto, adicionalmente se evidencia hacia finales de la serie temporal un cambio en la pendiente de la componente N (color verde en la Figura 11).

En las Figuras 12 y 13, las flechas verdes ilustran la dirección y magnitud del vector resultante, el cual se ha calculado para los dos periodos considerando las variaciones en las componentes horizontales registradas por las estaciones cGPS. En color azul, las flechas indican la variación de la magnitud de la componente vertical en las distintas estaciones. El vector resultante obtenido sugiere un patrón de inflación concordante con una fuente sísmica ubicada hacia al SSE del volcán Chiles.

La serie temporal obtenida con el procesamiento interferométrico de imágenes Sentinel – 1 de órbita descendente (ESA), con el software ISCE y el apilamiento con MintPY (Miami InSAR time – series software in Python) para la zona del CVCCN (Figura 14), es coincidente con el proceso inflacionario observado por la red de cGPS.

De la Figura 14 se puede inferir al menos tres zonas de deformación, una al S del Chiles, otra en Cerro Negro y la tercera en la caldera de Potrerillos (respuesta al sismo ocurrido el 25 de julio de 2022).

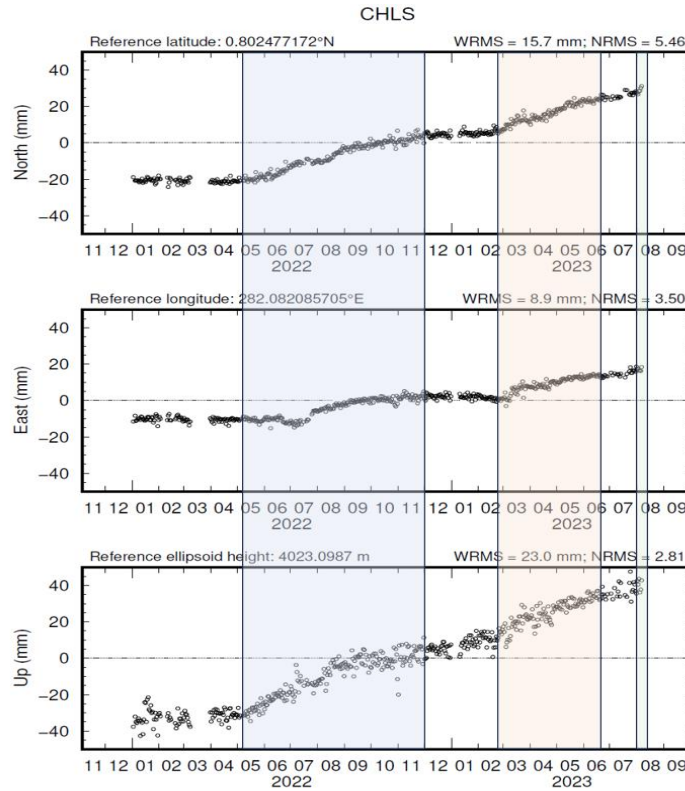


Figura 11. Series temporales de datos de desplazamientos registrados en las direcciones N, E y Vertical (U) por la estación cGPS CHLS, ubicada en el flanco SE del volcán Chiles, entre enero de 2022 y agosto 6 de 2023. Las franjas de color resaltan los periodos en los cuales se ha incrementado la tasa de deformación del terreno.

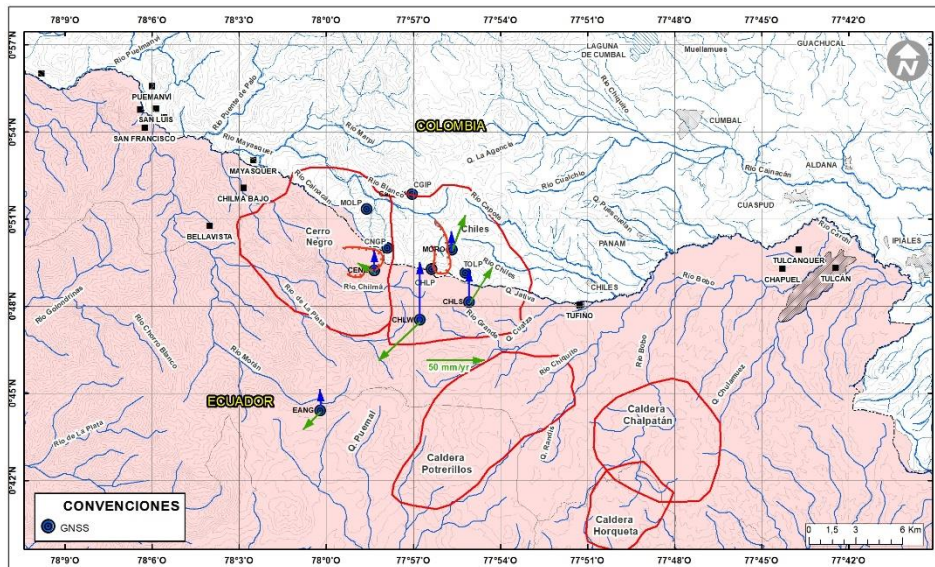


Figura 12. Vectores resultantes de deformación. Variaciones de las componentes horizontal (verde) y vertical (azul) de las estaciones cGPS ubicadas sobre el CVCCN para el periodo entre el 5 de mayo y noviembre de 2022.

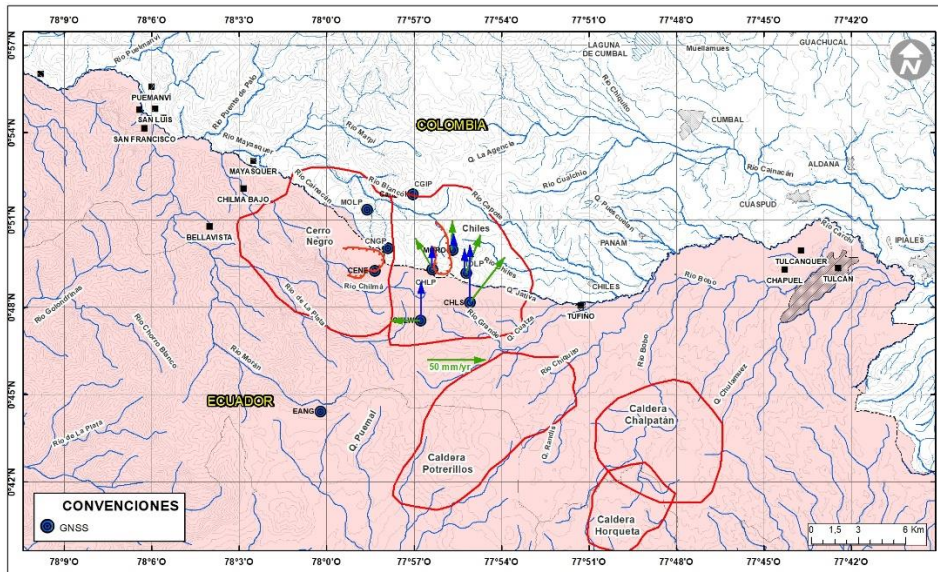


Figura 13. Vectores resultantes de deformación. Variaciones de las componentes horizontal (verde) y vertical (azul) de las estaciones cGPS ubicadas sobre el CVCCN para el periodo entre el 22 de febrero y junio de 2023.

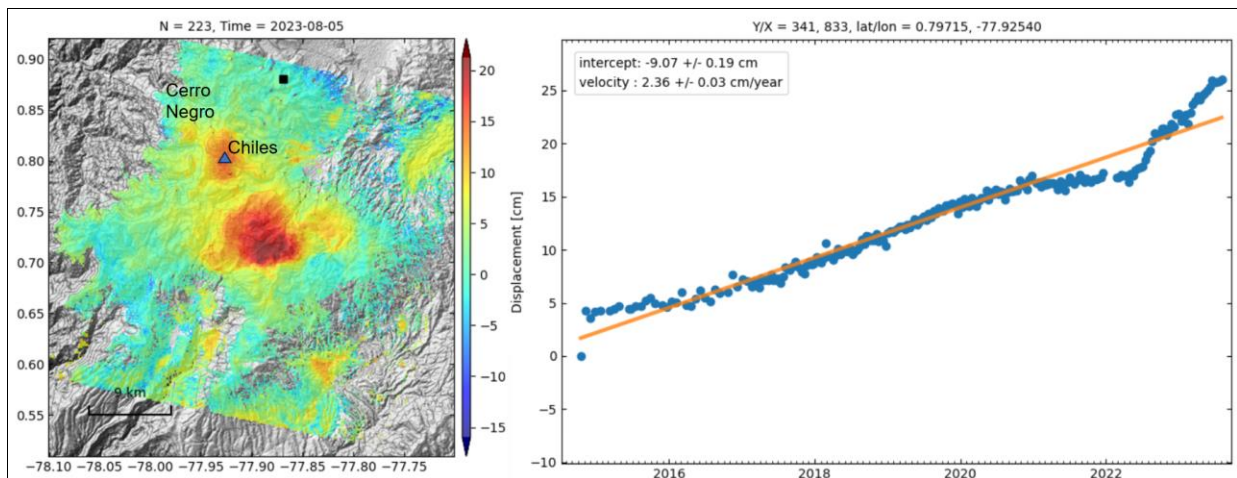


Figura 14. Desplazamientos en la dirección LOS para el CVCCN entre el 15 de octubre de 2014 y el 5 de agosto de 2023, de lado derecho se muestra la serie temporal de la zona indicada por el triángulo en el volcán Chiles (panel izquierdo). El cuadro de color negro indica un punto tomado como referencia para la generación de las series.

En cuanto a parámetros fisicoquímicos no se observa cambios significativos en la fuente termal Baño Grande (Figuras 1 y 15). En manantial termal La Peña se tuvo un ligero incremento en los valores de dióxido de carbono (CO_2) pasando de $1.2 \text{ g/m}^2/\text{s}$ el 28 de julio de 2022 a $1.6 \text{ g/m}^2/\text{s}$ el 14 de julio de 2023, y se resalta la presencia de aves muertas.

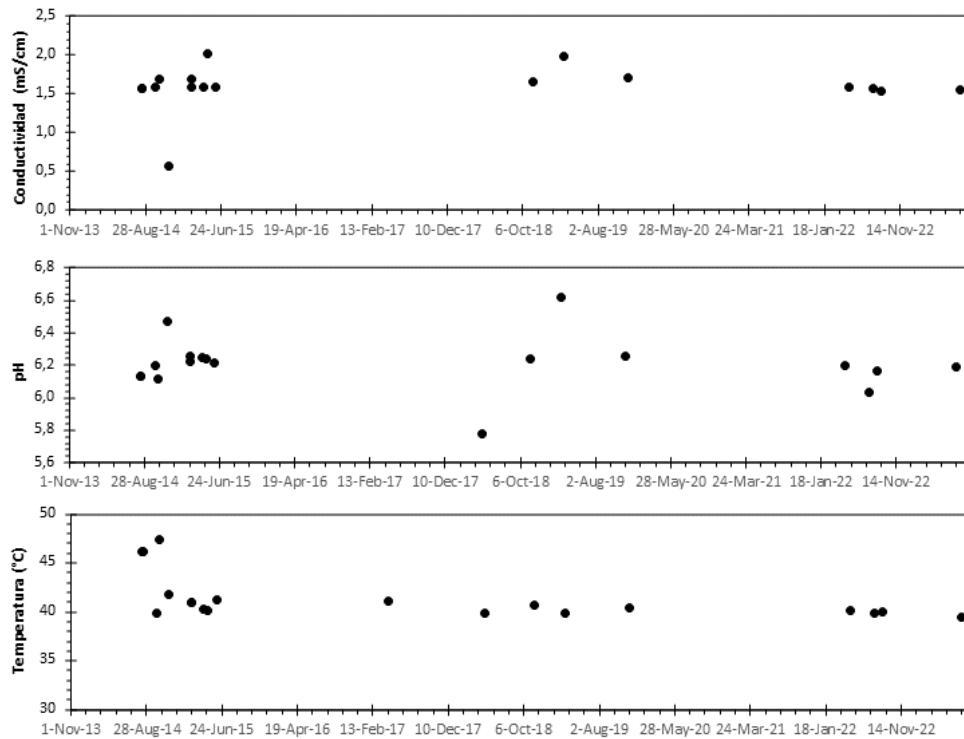


Figura 15. Parámetros fisicoquímicos de la fuente termal Baño Grande entre 2014 y 2023.

El 11 de julio del 2023 se realizó una visita al sector de la Laguna La Turquesa específicamente al sitio conocido como el cerro el Picacho en la cima del volcán Chiles que, de acuerdo con reportes realizados hacia finales del mes de mayo, por habitantes de la región, se presenta una zona de agrietamientos. Las grietas existentes tienen longitudes aproximadas entre 10 y 20 m, con profundidades entre 0.5 m y 10 m y anchos entre 0.40 m a 2.42 m. Las grietas muestran una dirección preferencial hacia el SW (Figura 16). No se evidenciaron anomalías térmicas ni otras manifestaciones de actividad superficial en las grietas. Estas grietas que se presentan a lo largo de depósitos volcanoclásticos (corrientes de densidad piroclástica) son fácilmente deleznable sin llegar a afectar los grandes depósitos de flujos de lava que conforman la ladera del volcán Chiles, no son nuevas, y sus cambios pueden obedecer a la intensa actividad sísmica aunada a la fuerte temporada de lluvias de los meses previos y a la pendiente del terreno.

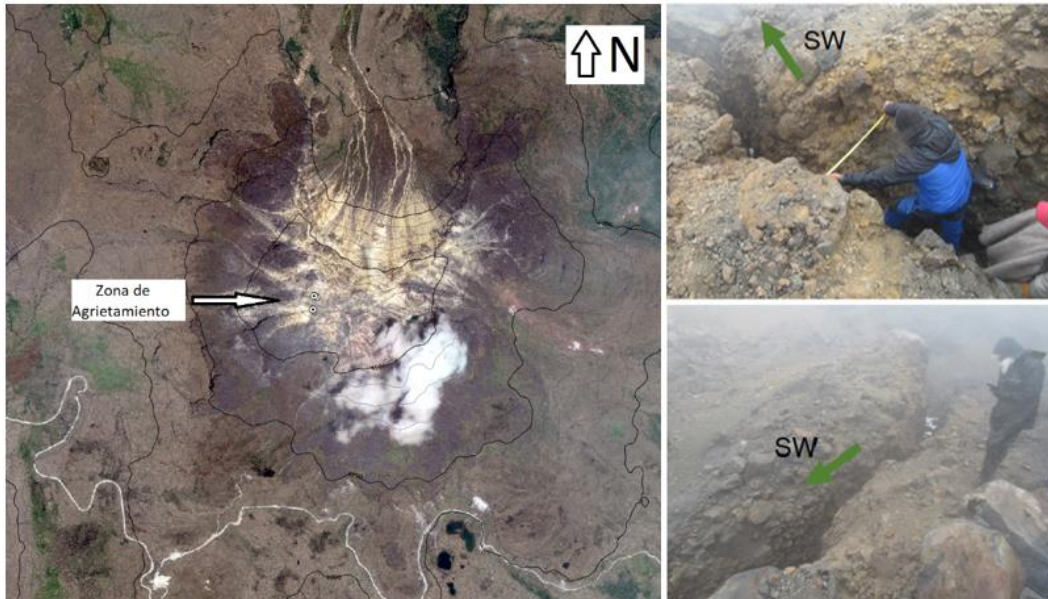


Figura 16. Localización de la zona de agrietamientos en la cima del volcán Chiles y orientación de las grietas en el sector del Cerro El Picacho en la cima del volcán Chiles.

Conclusiones

La actividad en la región del CVCCN continúa evolucionando, mostrando cambios entre los que se destacan:

1. En el transcurso de 2022 y 2023, continua la deformación con incrementos en la tasa deformativa en los periodos mayo-noviembre de 2022 y febrero-junio de 2023 especialmente en el volcán Chiles. También se destaca ligeramente una variación a partir del 5 de agosto de 2023.
2. Los incrementos en las tasas de deformación han estado acompañados por enjambres de sismos VT y LP, siendo el de mayor recurrencia el de 2023. Se destaca que durante el periodo marzo-junio se registraron las mayores tasas de ocurrencia sísmica: 10227 sismos VT para el 10 marzo y 522 LP para el 26 de mayo. Estos valores de ocurrencia diaria son los más altos observados desde el inicio del monitoreo continuo instrumentado del CVCCN.
3. Otro aspecto para destacar es que la localización de las fuentes sísmicas de los VT ha mostrado una migración distal desde el SE a proximal al S del volcán Chiles, además que en 2023 las fuentes sísmicas muestran una agrupación en el espacio.
4. Estos cambios sugieren la evolución de la actividad en CVCCN posiblemente asociados a una fuente magmática que conlleva a variaciones en la presión y la distribución de fluidos, incluidos gases y fluidos volcánicos dentro de cavidades y fracturas en la corteza relativamente más próxima al complejo volcánico y a la superficie.

Escenarios Posibles

Como posibles escenarios de acuerdo con la evolución de la actividad en el CVCCN y las experiencias que se tienen en la vigilancia volcánica se consideran:

1. Que continúen fluctuaciones en la actividad sísmica VT como ha venido ocurriendo desde el inicio de la vigilancia en 2013: incrementos en la sismicidad con la posibilidad de eventos de magnitud similares o mayores a las acontecidas el 20 de octubre de 2014 y 25 de julio de 2022. La ocurrencia de sismos de mayor magnitud puede generar inestabilidad en laderas, deslizamientos, así como daños estructurales en edificaciones.
2. Incremento en la ocurrencia de sismos LP y la aparición de tremor volcánico asociados con la actividad de fluidos magmáticos e hidrotermales.
3. Procesos deformativos acompañando la actividad sísmica.
4. Manifestaciones de actividad superficial asociadas con cambios fisicoquímicos de las fuentes termales y formación de grietas en superficie.