

***Informe mensual de actividad de los volcanes  
Galeras, Cumbal, Chiles – Cerro Negro,  
Las Ánimas, Doña Juana y Azufral  
diciembre 2023***

San Juan de Pasto, enero de 2024

**SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO ©**

Héctor Julio Fierro Morales

**Director General**

John Makario Londoño

**Director Técnico de Geoamenazas**

Roberto Torres Corredor

**Coordinador Grupo Trabajo**

**Evaluación, Monitoreo y Diagnóstico de Dinámicas Geológicas**

Lourdes Narváez Medina

**Líder OVSPA**

**Autores**

Adriana Ortega Estupiñán

Betty Silva Parra

Darío Arcos Guerrero

Diego Mauricio Gómez Martínez

Jorge Mora Arroyo

John Meneses Muñoz

Jairo Ortiz Valencia

Oscar Cadena Ibarra

Paola Narváez Obando

Patricia Ponce Villarreal

Rafael Cárdenas Santacruz

Roberto Torres Corredor

Richard Mier Portilla

Yenny Hache Timaná

Grupo de Trabajo Observatorio Pasto

## Contenido

|   | Pág. |
|---|------|
| RESUMEN   | 16   |
| INTRODUCCIÓN  | 18   |
| 1. ACTIVIDAD DEL VOLCÁN GALERAS – DICIEMBRE DE 2023                                   | 19   |
| 1.1. Red de vigilancia  | 19   |
| 1.2. Sismología   | 24   |
| 1.3. Deformación  | 28   |
| 1.3.1. Inclínometría Electrónica  | 28   |
| 1.3.2. Estaciones GNSS Permanentes  | 29   |
| 1.3.3. Líneas Base  | 30   |
| 1.3.4. D_InSAR  | 31   |
| 1.3.5. Series Temporales de Deformación con MintPy                                    | 32   |
| 1.4. Electromagnetismo  | 33   |
| 1.5. Geoquímica   | 37   |
| 1.5.1. Muestreo de Gases de Origen Volcánico  | 37   |
| 1.5.1.1. Concentración de gas radón difuso en el suelo                                | 37   |
| 1.5.1.2. Estación Térmica Deformes  | 40   |
| 1.5.1.3. Estación Térmica Paisita   | 40   |
| 1.5.1.4. Muestreo de aguas en fuentes termales-Volcán Galeras                         | 40   |
| 1.5.1.5. Estación climatológica de Cráter   | 40   |
| 1.5.1.6. Dióxido de azufre- SO <sub>2</sub>   | 42   |
| 1.6. Actividad Superficial  | 42   |
| 1.7. Conclusiones   | 45   |
| 2. ACTIVIDAD DEL VOLCÁN CUMBAL – DICIEMBRE DE 2023                                    | 45   |
| 2.1. Red de Vigilancia  | 45   |
| 2.2. Sismología   | 48   |
| 2.3. Deformación  | 52   |
| 2.3.1. Inclínometría Electrónica  | 52   |
| 2.3.2. D_InSAR  | 53   |
| 2.4. Electromagnetismo  | 54   |
| 2.5. Geoquímica   | 54   |
| 2.5.1. Muestreo de aguas en fuentes termales  | 54   |
| 2.5.2. Estimación cualitativa de emisiones de Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )    | 54   |
| 2.6. Actividad Superficial  | 55   |
| 2.7. Conclusiones   | 58   |
| 3. ACTIVIDAD DE LOS VOLCANES CHILES Y CERRO NEGRO DE MAYASQUER -<br>DICIEMBRE DE 2023 | 58   |
| 3.1. Ubicación Geográfica   | 58   |
| 3.2. Red de Vigilancia  | 59   |
| 3.3. Sismología   | 61   |
| 3.4. Deformación  | 69   |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| 3.4.1.   | Inclinometría Electrónica   | 69  |
| 3.4.2.   | Estaciones GNSS Permanentes   | 71  |
| 3.4.3    | Líneas Base   | 75  |
| 3.4.4.   | D_InSAR   | 76  |
| 3.4.5.   | Serie Temporales de Deformación con MintPy  | 77  |
| 3.5.     | Electromagnetismo   | 77  |
| 3.6.     | Geoquímica  | 82  |
| 3.6.1.   | Estación térmica en fuente termal “Rincón Bello”                                  | 82  |
| 3.6.2.   | Muestreo de aguas en fuentes termales   | 83  |
| 3.7.     | Actividad Superficial   | 83  |
| 3.8.     | Conclusiones  | 83  |
| 4.       | ACTIVIDAD DE LOS VOLCANES LAS ÁNIMAS, DOÑA JUANA Y AZUFRAL –<br>DICIEMBRE DE 2023 | 84  |
| 4.1.     | Actividad de los Volcanes Doña Juana y Las Ánimas                                 | 85  |
| 4.1.1.   | Red de Vigilancia   | 85  |
| 4.1.2.   | Sismología  | 87  |
| 4.1.3.   | Deformación   | 89  |
| 4.1.3.1. | Inclinometría Electrónica   | 89  |
| 4.1.3.2. | Estaciones GNSS Permanentes   | 90  |
| 4.1.3.3. | Líneas Base   | 92  |
| 4.1.3.4. | D-InSAR   | 93  |
| 4.1.4.   | Electromagnetismo   | 94  |
| 4.1.5.   | Geoquímica  | 94  |
| 4.1.5.1. | Muestreo de aguas en fuentes termales – Volcanes Las Ánimas y Doña Juana          | 94  |
| 4.1.6.   | Actividad Superficial   | 94  |
| 4.1.7.   | Conclusiones  | 94  |
| 4.2.     | Actividad del Volcán AzufraI  | 94  |
| 4.2.1.   | Red de Vigilancia   | 94  |
| 4.2.2.   | Sismología  | 96  |
| 4.2.3.   | Deformación   | 99  |
| 4.2.3.1. | Inclinometría Electrónica   | 99  |
| 4.2.3.2. | Estaciones GNSS Permanentes   | 99  |
| 4.2.3.3. | Líneas Base   | 100 |
| 4.2.3.4. | D_InSAR   | 101 |
| 4.2.4.   | Electromagnetismo   | 102 |
| 4.2.5.   | Geoquímica  | 104 |
| 4.2.5.1. | Muestreo de aguas en fuentes termales   | 104 |
| 4.2.5.2. | Muestreo de gases de origen volcánico   | 104 |
| 4.2.5.3. | Estación térmica domo Mallama   | 104 |
| 4.2.5.4. | Estación Climatológica La Roca  | 105 |
| 4.2.6.   | Actividad Superficial   | 107 |
| 4.2.7.   | Conclusiones  | 110 |
| 5.       | CAMPO VOLCÁNICO MONOGENÉTICO GUAMUEZ – SIBUNDOY (PUTUMAYO) –<br>DICIEMBRE DE 2023 | 110 |

|        |                             |     |
|--------|-----------------------------|-----|
| 5.1.   | Red de Vigilancia           | 110 |
| 5.2.   | Deformación                 | 112 |
| 5.2.1. | Estaciones GNSS Permanentes | 112 |
| 5.2.2. | D- InSAR                    | 113 |
| 6.     | REFERENCIAS                 | 114 |

## Índice de figuras

|  | Pág. |
|--|------|
| <b>Figura 1.</b> Localización de las estaciones sísmicas y sensores de infrasonido que conformaron la red de vigilancia de Galeras en diciembre de 2023  | 20   |
| <b>Figura 2.</b> Localización de las estaciones para el seguimiento de la deformación (inclinómetros electrónicos y GNSS) y sensores de flujo de lodos, que conformaron la red de vigilancia de Galeras en diciembre de 2023   | 21   |
| <b>Figura 3.</b> Localización de las estaciones de campo magnético y eléctrico. Trampa Alcalina, ScanDOAS, sensores de gas Radón, termocuplas, fuentes termales y pluviómetros que conformaron la red de vigilancia de Galeras en diciembre de 2023                                | 22   |
| <b>Figura 4.</b> Histograma del porcentaje de funcionamiento de las estaciones que conformaron las redes de monitoreo telemétrico del volcán Galeras en diciembre de 2023  | 24   |
| <b>Figura 5.</b> Número diario de eventos volcánicos por tipo, registrados en Galeras durante noviembre y diciembre 2023; el recuadro indica el periodo evaluado   | 25   |
| <b>Figura 6.</b> Energía diaria liberada de eventos volcánicos por tipo, registrados en Galeras durante noviembre y diciembre 2023; el recuadro indica el periodo evaluado   | 26   |
| <b>Figura 7.</b> Sismos localizados en la zona de influencia de Galeras, diciembre 2023  | 27   |
| <b>Figura 8.</b> Sismogramas y espectro en frecuencia del evento VLP del 10 de diciembre a las 09:46 pm, en la componente vertical de algunas estaciones sísmicas del volcán Galeras   | 27   |
| <b>Figura 9.</b> Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) del inclinómetro electrónico Arles, instalado en el volcán Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 31 de diciembre de 2023  | 28   |
| <b>Figura 10.</b> Componentes de inclinación Tangencial y Radial ( $\mu\text{rad}$ ) del inclinómetro electrónico Huairatola, instalado en el volcán Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 31 de diciembre de 2023                               | 29   |
| <b>Figura 11.</b> Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) y registro de la temperatura del inclinómetro electrónico Calabozo, instalado en el volcán Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 31 de diciembre de 2023           | 29   |
| <b>Figura 12.</b> Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) y registro de la temperatura del inclinómetro electrónico Cobanegra, instalado en el volcán Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 31 de diciembre de 2023          | 29   |
| <b>Figura 13.</b> Variaciones en las direcciones Norte, Este y Altura de las estaciones GNSS Permanentes Cráter y Cobanegra, instaladas en Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 30 de diciembre de 2023, procesados con el software GAMIT/GLOBK | 30   |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 14.</b> Ubicación de las estaciones GNSS instaladas sobre la superficie de Galeras, dispuestas para el seguimiento de los cambios en la corteza volcánica. Los segmentos de color rojo indican las estaciones para las cuales se calculó líneas base   | 31 |
| <b>Figura 15.</b> Variaciones en distancia entre estaciones GNSS, líneas Base con soluciones cada 3 horas, las series temporales están entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2023. En la parte superior de cada serie, se etiquetan entre que estaciones fue determinada   | 31 |
| <b>Figura 16.</b> Desplazamientos calculados con la técnica D-InSAR para el par interferométrico del 3 y el 15 de diciembre de 2023, imágenes Sentinel-1, órbita descendente. Área de influencia volcán Galeras  | 32 |
| <b>Figura 17.</b> Desplazamientos obtenidos con imágenes Sentinel – 1 de orbita descendente, procesadas con el software ISCE para el área del complejo volcánico de Galeras, para el periodo comprendido entre el 15 de octubre de 2014 y el 27 de diciembre de 2023, del lado derecho se muestra la serie para la zona indicada con el triángulo, próxima al cráter principal, el cuadro de color negro indica un punto tomado como referencia para la generación de la serie | 32 |
| <b>Figura 18.</b> CMT-F en las estaciones de monitoreo magnético del CVG: FRA (verde), BAR (azul) y DEF (rojo), comparadas con el registro de la estación de referencia KOU (negra), y con el índice Kp (magenta); para el periodo entre septiembre y diciembre de 2023  | 35 |
| <b>Figura 19.</b> CMT-F en las estaciones de monitoreo magnético del volcán Galeras: FRA (verde), BAR (azul) y DEF (roja), comparadas con el registro de la estación de referencia KOU (negra), y con el índice Kp (magenta); para el periodo evaluado, correspondiente a diciembre de 2023  | 36 |
| <b>Figura 20.</b> Izq. CMT-F en las estaciones de monitoreo magnético del volcán Galeras: FRA, BAR y DEF; comparadas con el registro de la estación de referencia KOU, en diciembre de 2023. Der. Representación en frecuencia de las señales magnéticas evidenciando las frecuencias dominantes de un día, 12, ocho y seis horas, adicionalmente a frecuencias menores a 2.0 días   | 36 |
| <b>Figura 21.</b> Comportamiento de los promedios móviles del CMT, procesados y corregidos con base en la estación de referencia KOU, en las estaciones FRA (verde), BAR (azul) y DEF (rojo), comparadas con la serie temporal del comportamiento del índice Kp que define la intensidad de las tormentas geomagnéticas (magenta), para el periodo entre enero y diciembre de 2023   | 37 |
| <b>Figura 22.</b> Concentración radón difuso en suelo- estación Lavas entre julio y diciembre de 2023 (La línea negra representa la tendencia de los datos, calculada mediante el método de la media móvil para un periodo de 24 horas), el recuadro indica el periodo evaluado: Diciembre   | 38 |
| <b>Figura 23.</b> Concentración radón difuso en suelo - estación Lirios entre entre julio y diciembre de 2023, (La línea negra representa la tendencia de los datos, calculada mediante el método de la media móvil para un periodo de 24 horas), el recuadro indica el periodo evaluado: Diciembre  | 39 |
| <b>Figura 24.</b> Concentración radón difuso en suelo - estación Parques entre septiembre y diciembre de 2023, (La línea negra representa la tendencia de los datos, calculada mediante el método de la media móvil para un periodo de 24 horas)   | 39 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 25.</b> Comportamiento de los parámetros climatológicos evaluados con la estación Cráter que corresponden a pluviosidad (verde): acumulado de lluvias (azul); presión atmosférica (magenta); velocidad del viento (negro); rosa de los vientos con dirección de dispersión de los vientos en la zona; entre enero y diciembre de 2023 | 41 |
| <b>Figura 26.</b> Comportamiento de los parámetros climatológicos evaluados con la estación Cráter que corresponden a pluviosidad (verde): acumulado de lluvias (azul); presión atmosférica (magenta); velocidad del viento (negro); rosa de los vientos con dirección de dispersión de los vientos en la zona; en diciembre de 2023            | 41 |
| <b>Figura 27.</b> Comportamiento del parámetro de pluviosidad, evaluado en las estaciones MJAP y MJAB, para el periodo entre enero y diciembre de 2023  | 42 |
| <b>Figura 28.</b> Registro fotográfico de la emisión de gases observada desde la cámara ubicada en el sector de Barranco el día 2 de diciembre de 2023 a las 10: 26 a.m., (izquierda) y desde Bruma el día 4 de diciembre a las 12:18 a.m., (derecha)   | 43 |
| <b>Figura 29.</b> Registro fotográfico de la emisión de gases observada desde la cámara ubicada en el sector de Barranco el día 5 de diciembre de 2023 a las 4: 12 p.m., (izquierda) y desde Bruma el día 6 de diciembre a las 6:07 p.m., (derecha)   | 43 |
| <b>Figura 30.</b> Registro fotográfico de la emisión de gases observada desde la cámara ubicada en el sector de Bruma el día 7 de diciembre de 2023 a las 6: 04 a.m., (izquierda) y el día 14 de diciembre 2023 a las 2: 24 p.m., (derecha)   | 43 |
| <b>Figura 31.</b> Registro fotográfico de la emisión de gases observada desde la cámara ubicada en el sector de Bruma el día 15 de diciembre de 2023 a las 6: 44 a.m., (izquierda) y el día 17 de diciembre 2023 a las 6: 02 p.m., (derecha)  | 44 |
| <b>Figura 32.</b> Registro fotográfico de la emisión de gases observada desde la cámara ubicada en el sector de Bruma el día 18 de diciembre de 2023 a las 9: 41 a.m., (izquierda) y el día 19 de diciembre 2023 a las 6: 08 a.m., (derecha)  | 44 |
| <b>Figura 33.</b> Registro fotográfico de la emisión de gases observada desde la cámara ubicada en el sector de Barranco el día 20 de diciembre de 2023 a las 8: 00 a.m., (izquierda) y desde Bruma el día 21 de diciembre a las 6:24 p.m., (derecha)   | 44 |
| <b>Figura 34.</b> Registro fotográfico de la emisión de gases observada desde la cámara ubicada en el sector de Bruma el 22 de diciembre de 2023 a las 5:56 a.m. (izquierda) y desde Barranco el 23 de diciembre de 2023 a las 7:00 a.m. (derecha)  | 45 |
| <b>Figura 35.</b> Mapa de localización de las estaciones telemétricas y no telemétricas que hacen parte de la red de monitoreo del complejo volcánico de Cumbal durante diciembre de 2023   | 47 |
| <b>Figura 36.</b> Mapa de localización de las estaciones de deformación volcánica, inclinómetros electrónicos que forman parte de la red de vigilancia del Complejo Volcánico de Cumbal para el mes de diciembre de 2023  | 47 |
| <b>Figura 37.</b> Histograma del porcentaje de funcionamiento de las estaciones telemétricas que conformaron la red de monitoreo del complejo volcánico de Cumbal en diciembre de 2023  | 48 |
| <b>Figura 38.</b> Ocurrencia diaria de sismos volcánicos por tipo en el CVC, durante noviembre y diciembre 2023. El recuadro indica el periodo evaluado   | 49 |
| <b>Figura 39.</b> Energía diaria liberada de eventos volcánicos por tipo, registrados en el CVC durante noviembre y diciembre 2023; el recuadro indica el periodo evaluado  | 49 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 40.</b> Sismos localizados en el CVC, diciembre 2023   | 50 |
| <b>Figura 41.</b> Sismogramas, espectrogramas y espectros en frecuencia de tres eventos TOR de diciembre 2023 en la componente vertical de la estación Limones del CVC   | 51 |
| <b>Figura 42.</b> Sismogramas y espectro en frecuencia del evento VLP del 31 de diciembre a las 01:39 am, en la componente vertical de algunas estaciones sísmicas del CVC   | 52 |
| <b>Figura 43.</b> Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu$ rad) del inclinómetro electrónico La Mesa, instalado en el complejo volcánico de Cumbal, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 31 de diciembre de 2023  | 53 |
| <b>Figura 44.</b> Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu$ rad) y registro de temperatura del inclinómetro electrónico Limones, instalado en el complejo volcánico de Cumbal, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 31 de diciembre de 2023  | 53 |
| <b>Figura 45.</b> Desplazamientos calculados con la técnica D-InSAR para el par interferométrico del 3 y el 15 de diciembre de 2023, imágenes Sentinel-1, órbita descendente. Área del Complejo volcánico Cumbal   | 54 |
| <b>Figura 46.</b> Estimación cualitativa de SO <sub>2</sub> obtenido con la aplicación TROPOMI para los últimos 15 días de diciembre de 2023, el cuadrado de color rojo indica la ubicación del CVC. En la parte inferior se muestra las unidades de medida (DU) y su representación con la respectiva escala de colores | 55 |
| <b>Figura 47.</b> Imágenes de la emisión de gases ocurrida en el Complejo Volcánico de Cumbal captadas por la cámara ubicada en el sector del Punta Vieja el 1 de diciembre de 2023 a las 5: 23 p.m. (izquierda) y el 3 de diciembre de 2023 a las 6: 14 p.m. (derecha)  | 55 |
| <b>Figura 48.</b> Imágenes de la emisión de gases ocurrida en el Complejo Volcánico de Cumbal captadas por la cámara ubicada en el sector del Punta Vieja el 4 de diciembre de 2023 a las 6: 03 a.m. (izquierda) y el 5 de diciembre de 2023 a las 6: 19 p.m. (derecha)  | 56 |
| <b>Figura 49.</b> Imágenes de la emisión de gases ocurrida en el Complejo Volcánico de Cumbal captadas el 7 de diciembre de 2023 por la cámara ubicada en el sector de Boliche a las 5: 47 a.m., (izquierda) y punta vieja el día 14 de diciembre de 2023 a las 5: 57 p.m., (derecha)                                    | 56 |
| <b>Figura 50.</b> Imágenes de la emisión de gases ocurrida en el Complejo Volcánico de Cumbal captadas por la cámara ubicada en el sector del Punta Vieja el 15 de diciembre de 2023 a las 5: 29 p.m. (izquierda) y el 16 de diciembre de 2023 a las 5: 22 p.m. (derecha)  | 56 |
| <b>Figura 51.</b> Imágenes de la emisión de gases ocurrida en el Complejo Volcánico de Cumbal captadas por la cámara ubicada en el sector del Punta Vieja el 17 de diciembre de 2023 a las 6: 24 p.m. (izquierda) y el 18 de diciembre de 2023 a las 5: 09 p.m. (derecha)  | 57 |
| <b>Figura 52.</b> Imágenes de la emisión de gases ocurrida en el Complejo Volcánico de Cumbal captadas por la cámara ubicada en el sector del Punta Vieja el 19 de diciembre de 2023 a las 5: 30 p.m. (izquierda) y el 20 de diciembre de 2023 a las 7: 52 a.m. (derecha)  | 57 |
| <b>Figura 53.</b> Imágenes de la emisión de gases ocurrida en el Complejo Volcánico de Cumbal captadas por la cámara ubicada en el sector del Punta Vieja el 21 de diciembre de 2023 a las 7: 34 a.m. (izquierda) y el 23 de diciembre de 2023 a las 2: 46 p.m. (derecha)  | 57 |
| <b>Figura 54.</b> Imágenes de la emisión de gases ocurrida en el Complejo Volcánico de Cumbal captadas por la cámara ubicada en el sector del Punta Vieja el 24 de diciembre de 2023 a las 9: 13 p.m. (izquierda) y el 25 de diciembre de 2023 a las 5: 52 a.m. (derecha)  | 58 |
| <b>Figura 55.</b> Localización de los volcanes Chiles y Cerro Negro (izquierda) e imágenes de estos (derecha)  | 59 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 56.</b> Ubicación de las estaciones telemétricas y no telemétricas que hacen parte de la red de monitoreo de los volcanes Chiles y Cerro Negro para el mes de diciembre de 2023   | 60 |
| <b>Figura 57.</b> Histograma del porcentaje de funcionamiento de las estaciones que hacen parte de la red telemétrica de monitoreo de los volcanes Chiles y Cerro Negro en diciembre de 2023  | 61 |
| <b>Figura 58 .</b> Número diario de sismos en la zona de influencia de los volcanes Chiles y Cerro Negro de Mayasquer, noviembre y diciembre 2023, el recuadro indica el periodo evaluado   | 62 |
| <b>Figura 59.</b> Energía sísmica diaria en la zona de influencia de los volcanes Chiles y Cerro Negro de Mayasquer, noviembre y diciembre 2023. El recuadro indica el periodo evaluado   | 63 |
| <b>Figura 60.</b> Número diario de eventos VT en la zona de influencia de los volcanes Chiles y Cerro Negro de Mayasquer, enero a diciembre del 2023. El recuadro indica el periodo evaluado  | 64 |
| <b>Figura 61.</b> Energía de sismos volcánicos por tipo, Chiles y Cerro Negro de Mayasquer, enero a diciembre del 2023. El recuadro indica el periodo evaluado  | 64 |
| <b>Figura 62.</b> Numero diario y acumulado de eventos VT, LP, VLP e HIB, volcanes Chiles y Cerro Negro de Mayasquer, enero a diciembre del 2023. El recuadro indica el periodo evaluado  | 65 |
| <b>Figura 63.</b> Energía diaria y acumulada de eventos VT, LP, VLP e HIB, volcanes Chiles y Cerro Negro de Mayasquer, enero a diciembre del 2023. El recuadro indica el periodo evaluado   | 66 |
| <b>Figura 64.</b> Localizaciones de sismos VT, Chiles y Cerro Negro de Mayasquer, diciembre 2023  | 67 |
| <b>Figura 65.</b> Sismos VT con ML mayor o igual a 2, Chiles y Cerro Negro, diciembre 2023  | 68 |
| <b>Figura 66.</b> Sismogramas y espectro en frecuencia del evento VLP del 1 de diciembre a las 04:40 am, en la componente vertical de algunas estaciones sísmicas de los volcanes Chiles y Cerro Negro  | 69 |
| <b>Figura 67.</b> Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) del inclinómetro electrónico Morro, instalado en el volcán Chiles para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2022 y el 31 de diciembre de 2023                      | 70 |
| <b>Figura 68.</b> Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) del inclinómetro electrónico Chiles, instalado en el volcán Chiles, para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2022 y el 31 de diciembre de 2023                    | 70 |
| <b>Figura 69.</b> Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) del inclinómetro electrónico a Tola, instalado en el volcán Chiles, para el periodo comprendido entre el 2 de noviembre de 2022 y el 31 de diciembre de 2023                | 71 |
| <b>Figura 70.</b> Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) del inclinómetro electrónico Cerro Negro, instalado en el volcán del mismo nombre, para el periodo comprendido entre el 3 de diciembre de 2022 y el 31 de diciembre de 2023 | 71 |
| <b>Figura 71.</b> Ubicación de las estaciones GNSS permanentes dedicadas al monitoreo de los cambios en superficie del complejo volcánico Chiles – Cerro Negro, SGC (MORO, CGIP, CNGP, TOLP, CHLP, MOLP), e IGEPN (CENE, CHLW, CHLS, EANG)                | 72 |
| <b>Figura 72.</b> Variaciones en las direcciones Norte, Este y Altura de las estaciones GNSS TOLP y CHLP instaladas en Chiles, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 30 de diciembre de 2023                                     | 73 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 73.</b> Variaciones en las direcciones Norte, Este y Altura de la estación GNSS MORO instalada en Chiles, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 30 de diciembre de 2023  | 73 |
| <b>Figura 74.</b> Variaciones en las direcciones Norte, Este y Altura de las estaciones GNSS CNGP y MOLP, instaladas en Cerro Negro, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 30 de diciembre de 2023   | 74 |
| <b>Figura 75.</b> Variaciones en las direcciones Norte, Este y Altura de la estación GNSS CGIP, ubicada en cercanías del complejo volcánico Chiles – Cerro Negro en la estación multiparámetro Canguil, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 30 de diciembre de 2023  | 74 |
| <b>Figura 76.</b> Ubicación de las estaciones GNSS instaladas sobre la superficie del Complejo Volcánico Chiles – Cerro Negro, dispuestas para el seguimiento de los cambios en la corteza. Los trazos de color rojo indican las estaciones para las cuales se calculó líneas base  | 75 |
| <b>Figura 77.</b> Variaciones en distancia entre estaciones GNSS, líneas Base con soluciones cada 3 horas, las series temporales están entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2023. En la parte superior de cada serie, se etiquetan para las estaciones que fue determinada   | 76 |
| <b>Figura 78.</b> Desplazamientos calculados con la técnica D-InSAR para el par interferométrico del 3 y el 15 de diciembre de 2023, imágenes Sentinel-1, órbita descendente. Área de influencia del Complejo volcánico Chiles – Cerro Negro  | 76 |
| <b>Figura 79.</b> Desplazamientos obtenidos con imágenes Sentinel – 1 de orbita descendente, procesadas con el software ISCE para el área del complejo volcánico Chiles – Cerro Negro, para el periodo entre el 15 de octubre de 2014 y 27 de diciembre de 2023, del lado derecho se muestran las series para las zonas indicadas con el triángulo, diferenciando dos zonas: el volcán Chiles (superior) y el volcán Cerro Negro (inferior), el cuadro de color negro indica un punto tomado como referencia para la generación de las series | 77 |
| <b>Figura 80.</b> Comportamiento del CMT-F en la estación de monitoreo magnético del CVChCn: MORF (azul), comparan con estación de referencia KOUF (negra) y con los pronósticos de las tormentas geomagnéticas (índice Kp en magenta), para el periodo entre el septiembre y diciembre de 2023   | 80 |
| <b>Figura 81.</b> CMT-F en la estación de monitoreo magnético del CVCCN, MOR (azul) comparada con el registro de la estación de referencia KOU (negra), y con el índice Kp (magenta); para el periodo evaluado, correspondiente al mes de diciembre de 2023   | 81 |
| <b>Figura 82.</b> Izq. CMT-F en la estación de monitoreo magnético del CVChCn, MOR comparada con el registro de la estación de referencia KOU, para el mes de diciembre de 2023. Der. Espectro de la señal magnética evidenciando las frecuencias dominantes usuales de: un día, 12 horas y ocho horas, adicionalmente a las frecuencias propias de la señal, que son mayores a 2.0 días  | 81 |
| <b>Figura 83.</b> Comportamiento del promedio del CMT, procesados y corregidos con base en la estación de referencia KOU, en las estaciones MOR (azul), comparada con la serie temporal del comportamiento del índice Kp que define la intensidad de las tormentas geomagnéticas (magenta), para el periodo entre junio y diciembre de 2023   | 82 |
| <b>Figura 84.</b> Temperatura horaria en Fuente Termal Rincón Bello, durante los meses de agosto a diciembre, el recuadro azul representa el periodo evaluado: diciembre  | 83 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 85.</b> Localización de los volcanes de Colombia se resalta los del segmento sur, entre ellos están Galeras, Doña Juana, Azufral, Cumbal, Las Ánimas, Chiles, Cerro Negro y los monogenéticos de Guamuez Sibundoy monitoreados por el OVSPA - Servicio Geológico Colombiano                   | 85 |
| <b>Figura 86.</b> Localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo de los volcanes Doña Juana y Las Ánimas durante el mes de diciembre de 2023  | 86 |
| <b>Figura 87.</b> Histograma del porcentaje de funcionamiento de las estaciones que hacen parte de la red de monitoreo de los volcanes Doña Juana y Las Ánimas en diciembre de 2023   | 87 |
| <b>Figura 88.</b> Ocurrencia y energía diaria de sismos de fractura VT en la región de influencia de los volcanes Doña Juana y Las Ánimas, noviembre y diciembre 2023. El recuadro indica el periodo evaluado   | 88 |
| <b>Figura 89.</b> Localizaciones de sismos VT en Doña Juana y Las Ánimas, diciembre 2023  | 88 |
| <b>Figura 90.</b> Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) y registro de temperatura del inclinómetro electrónico Petroglifo, instalado en el volcán Las Ánimas, para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2022 y el 31 de diciembre de 2023                                | 89 |
| <b>Figura 91.</b> Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) y registro de temperatura del inclinómetro electrónico Altamira, instalado en el límite entre los volcanes Las Ánimas y Doña Juana, para el periodo comprendido entre el 18 de marzo de 2022 y el 31 de diciembre de 2023 | 89 |
| <b>Figura 92.</b> Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) y registro de temperatura del inclinómetro electrónico Lavas, instalado en el volcán Doña Juana, para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2022 y el 31 de diciembre de 2023                                     | 90 |
| <b>Figura 93.</b> Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) y registro de temperatura del inclinómetro electrónico Páramo, instalado en el volcán Doña Juana, para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2022 y el 31 de diciembre de 2023                                    | 90 |
| <b>Figura 94.</b> Variaciones en las direcciones Norte, Este y altura de las estaciones GNSS Lavas y Palma, instaladas sobre la superficie del volcán Doña Juana, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 30 de diciembre de 2023  | 91 |
| <b>Figura 95.</b> Variaciones en las direcciones Norte, Este y altura de las estaciones GNSS Ledezma y Petroglifo, instaladas sobre la superficie del complejo volcánico Doña Juana – Las Ánimas, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 30 de diciembre de 2023                | 91 |
| <b>Figura 96.</b> Ubicación de las estaciones GNSS instaladas sobre la superficie de Doña Juana y Las Ánimas, dispuestas para el seguimiento de los cambios en la corteza volcánica. El trazo de color rojo indica las estaciones para las cuales se calculó línea base                                 | 92 |
| <b>Figura 97.</b> Variaciones en distancia entre estaciones GNSS, línea Base con soluciones cada 3 horas, la serie temporal está entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2023. En la parte superior se etiqueta para las estaciones que fue determinada   | 93 |
| <b>Figura 98.</b> Desplazamientos calculados con la técnica D-InSAR para el par interferométrico del 3 y el 15 de diciembre de 2023, imágenes Sentinel-1, órbita descendente. Área del Complejo volcánico Doña Juana – Las Ánimas   | 93 |
| <b>Figura 99.</b> Localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo sísmico y geoquímico del volcán Azufral durante el mes de diciembre de 2023  | 95 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 100.</b> Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo en deformación, geofísica y cámara web del volcán Azufraal en el mes de diciembre de 2023  | 95  |
| <b>Figura 101.</b> Histograma del porcentaje de funcionamiento de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Azufraal durante diciembre de 2023   | 96  |
| <b>Figura 102.</b> Ocurrencia diaria de sismos volcánicos por tipo en Azufraal, noviembre y diciembre 2023. El recuadro indica el periodo evaluado   | 97  |
| <b>Figura 103.</b> Energía diaria de sismos volcánicos por tipo en Azufraal, noviembre y diciembre 2023. El recuadro indica el periodo evaluado  | 97  |
| <b>Figura 104.</b> Localizaciones de sismos VT en Azufraal, diciembre 2023   | 98  |
| <b>Figura 105.</b> Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu$ rad) y registro de temperatura del inclinómetro electrónico Roca, instalado en el volcán Azufraal, para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2022 y el 31 de diciembre de 2023                         | 99  |
| <b>Figura 106.</b> Variaciones en las direcciones Norte, Este y Altura de las estaciones GNSS Permanentes Lobo y Laguna instaladas en Azufraal, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 30 de diciembre de 2023, procesados con el software GAMIT/GLOBK     | 100 |
| <b>Figura 107.</b> Ubicación de las estaciones GNSS instaladas sobre la superficie de Azufraal, dispuestas para el seguimiento de los cambios en la corteza volcánica. Los trazos de color rojo indican las estaciones para las cuales se calculó líneas base                      | 101 |
| <b>Figura 108.</b> Variaciones en distancia entre estaciones GNSS, líneas Base con soluciones cada 3 horas, las series temporales están entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2023. En la parte superior de cada serie, se etiquetan para las estaciones que fue determinada | 101 |
| <b>Figura 109.</b> Desplazamientos calculados con la técnica D-InSAR para el par interferométrico del 3 y el 15 de diciembre de 2023, imágenes Sentinel-1, órbita descendente. Área de influencia volcán Azufraal  | 102 |
| <b>Figura 110.</b> Variaciones del campo eléctrico horizontal (CEH), en la estación de LOB (naranja), junto con el registro de lluvia de la estación Roca (azul), ubicada en la parte alta del volcán Azufraal, para el periodo entre septiembre y diciembre de 2023               | 103 |
| <b>Figura 111.</b> Variaciones del campo eléctrico horizontal (CEH), en la estación de LOB (naranja), junto con el registro de lluvia de la estación Roca (azul), ubicada en la parte alta del volcán Azufraal, durante diciembre de 2023  | 103 |
| <b>Figura 112.</b> Temperatura en Domo Mallama, agosto – diciembre de 2023, periodo evaluado: diciembre  | 104 |
| <b>Figura 113.</b> Valores de velocidad del viento, temperatura del aire, presión y radiación solar registrados en la estación climatológica La Roca, Volcán Azufraal agosto - diciembre de 2023 (región sombreada: diciembre)   | 106 |
| <b>Figura 114.</b> Rosa de los vientos con la dirección del viento de la estación Roca, en el periodo de julio a diciembre   | 106 |
| <b>Figura 115.</b> Registro de la lluvia desde la estación Roca, en el periodo de julio a diciembre de 2023  | 107 |
| <b>Figura 116.</b> Imágenes de emisión de gases del domo Mallama - volcán Azufraal registrada el 5 de diciembre 2023 a las 4: 37 p.m., (izquierda) y el 6 de diciembre de 2023 a las 3: 47 p.m., (derecha)., capturada desde la cámara WEB ubicada al suroccidente del volcán      | 108 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 117.</b> Imágenes de emisión de gases del domo Mallama - volcán Azufral registrada el 7 de diciembre 2023 a las 6: 12 a.m., (izquierda) y el 8 de diciembre de 2023 a las 7: 22 a.m., (derecha)., capturada desde la cámara WEB ubicada al suroccidente del volcán                           | 108 |
| <b>Figura 118.</b> Imágenes de emisión de gases del domo Mallama - volcán Azufral registrada el 14 de diciembre 2023 a las 5: 02 p.m., (izquierda) y el 15 de diciembre de 2023 a las 6: 12 a.m., (derecha)., capturada desde la cámara WEB ubicada al suroccidente del volcán                         | 108 |
| <b>Figura 119.</b> Imágenes de emisión de gases del domo Mallama - volcán Azufral registrada el 16 de diciembre 2023 a las 6: 12 p.m., (izquierda) y el 17 de diciembre de 2023 a las 6: 27 a.m., (derecha)., capturada desde la cámara WEB ubicada al suroccidente del volcán                         | 109 |
| <b>Figura 120.</b> Imágenes de emisión de gases del domo Mallama - volcán Azufral registrada el 18 de diciembre 2023 a las 6: 42 a.m., (izquierda) y el 19 de diciembre de 2023 a las 4: 32 p.m., (derecha)., capturada desde la cámara WEB ubicada al suroccidente del volcán                         | 109 |
| <b>Figura 121.</b> Imágenes de emisión de gases del domo Mallama - volcán Azufral registrada el 20 de diciembre 2023 a las 10: 57 a.m., (izquierda) y el 21 de diciembre de 2023 a la 1: 57 p.m., (derecha)., capturada desde la cámara WEB ubicada al suroccidente del volcán                         | 109 |
| <b>Figura 122.</b> Imágenes de emisión de gases del domo Mallama - volcán Azufral registrada el 25 de diciembre 2023 a las 7: 21 a.m., (izquierda) y el 26 de diciembre de 2023 a la 6: 47 a.m., (derecha)., capturada desde la cámara WEB ubicada al suroccidente del volcán                          | 110 |
| <b>Figura 123.</b> Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo en sismología, geofísica y fuentes termales en el campo volcánico monogenético Guamuez para el mes de diciembre de 2023  | 111 |
| <b>Figura 124.</b> Histograma del porcentaje de funcionamiento de las estaciones telemétricas que conformaron la red de monitoreo del campo volcánico monogenético Guamuez durante el mes de diciembre de 2023   | 112 |
| <b>Figura 125.</b> Variaciones en las direcciones Norte, Este y Altura de la estación GNSS Permanente Colón, instalada por el IGAC en el Municipio de Colón (Putumayo), para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 30 de diciembre de 2023, procesados con el software GAMIT/GLOBK | 113 |
| <b>Figura 126.</b> Desplazamientos calculados con la técnica D-InSAR para el par interferométrico del 3 y el 15 de diciembre de 2023, imágenes Sentinel-1, órbita descendente. Área de influencia del campo volcánico monogenético Guamuez (Sibundoy – Putumayo)                                       | 114 |

## Índice de tablas

|   | Pág. |
|---|------|
| <b>Tabla 1.</b> Estaciones sísmicas y sensores acústicos de la red de monitoreo de Galeras para el mes de diciembre de 2023                             | 19   |
| <b>Tabla 2.</b> Inclínómetros electrónicos telemétricos que forman parte de la red de vigilancia en deformación del volcán Galeras en diciembre de 2023 | 21   |
| <b>Tabla 3.</b> Estaciones GNSS telemétricas que forman parte de la red de vigilancia en deformación del volcán Galeras en diciembre de 2023            | 22   |
| <b>Tabla 4.</b> Estaciones que conforman la red de instrumentos ScanDOAS del proyecto NOVAC en el volcán Galeras en diciembre de 2023                   | 23   |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabla 5.</b> Estaciones que monitorean las variaciones del campo potencial eléctrico y magnético ocasionadas por la actividad del volcán Galeras   | 23  |
| <b>Tabla 6.</b> Estaciones para el monitoreo de gas Radón instaladas sobre la vía de acceso a Galeras   | 23  |
| <b>Tabla 7.</b> Número de sismos volcánicos por tipo en Galeras, noviembre y diciembre 2023   | 24  |
| <b>Tabla 8.</b> Energía de eventos volcánicos por tipo en Galeras, noviembre y diciembre 2023   | 25  |
| <b>Tabla 9.</b> Sismo con ML de 1.6, volcán Galeras, diciembre 2023   | 27  |
| <b>Tabla 10.</b> Valores de concentración de radón en unidades de Bq/m <sup>3</sup> - estación Lavas - Volcán Galeras, noviembre - diciembre de 2023  | 38  |
| <b>Tabla 11.</b> Valores de concentración de radón en unidades de Bq/m <sup>3</sup> - estación Lirios - Volcán Galeras, noviembre - diciembre de 2023 | 39  |
| <b>Tabla 12.</b> Valores de concentración de radón en unidades de Bq/m <sup>3</sup> - estación Parques - Volcán Galeras, de 2023                      | 40  |
| <b>Tabla 13.</b> Estaciones que conformaron la red de vigilancia de la actividad del complejo volcánico de Cumbal en diciembre de 2023                | 46  |
| <b>Tabla 14.</b> Número de sismos volcánicos por tipo en el CVC, noviembre y diciembre 2023   | 48  |
| <b>Tabla 15.</b> Energía de eventos volcánicos por tipo en el CVC, noviembre y diciembre 2023   | 49  |
| <b>Tabla 16.</b> Sismos con ML de 2.0 y 2.2 en el CVC, diciembre 2023   | 50  |
| <b>Tabla 17.</b> Estaciones que conforman la red de vigilancia de la actividad de los volcanes Chiles y Cerro Negro                                   | 60  |
| <b>Tabla 18.</b> Número de eventos volcánicos por tipo, Chiles - Cerro Negro, noviembre y diciembre 2023  | 62  |
| <b>Tabla 19.</b> Energía de eventos volcánicos por tipo, Chiles - Cerro Negro, noviembre y diciembre 2023   | 62  |
| <b>Tabla 20.</b> Número y energía mensual de eventos volcánicos por tipo, Chiles - Cerro Negro, 2023  | 65  |
| <b>Tabla 21.</b> Sismos VT con ML entre 2.6 y 4.4, Chiles - Cerro Negro, diciembre 2023   | 68  |
| <b>Tabla 22.</b> Valores de temperatura horario en ° C – FT Rincón Bello - Volcán Chiles de los meses noviembre y diciembre de 2023                   | 83  |
| <b>Tabla 23.</b> Estaciones que forman parte de la red de vigilancia de la actividad de los volcanes Doña Juana y Las Ánimas en diciembre de 2023     | 86  |
| <b>Tabla 24.</b> Número de eventos volcánicos por tipo, Doña Juana y Las Ánimas, noviembre y diciembre 2023   | 87  |
| <b>Tabla 25.</b> Energía de eventos volcánicos por tipo, Doña Juana y Las Ánimas, noviembre y diciembre 2023  | 87  |
| <b>Tabla 26.</b> Sismo con ML de 1.0, Doña Juana y Las Ánimas, diciembre 2023   | 88  |
| <b>Tabla 27.</b> Estaciones que conformaron la red de vigilancia del volcán Azufral en el mes de diciembre de 2023                                    | 95  |
| <b>Tabla 28.</b> Número de eventos volcánicos por tipo en Azufral, noviembre y diciembre 2023   | 97  |
| <b>Tabla 29.</b> Energía de eventos volcánicos por tipo en Azufral, noviembre y diciembre 2023  | 98  |
| <b>Tabla 30.</b> Sismos con ML de 1.2 y 1.1, volcán Azufral, diciembre 2023   | 98  |
| <b>Tabla 31.</b> Valores de temperatura en ° C - Domo Mallama - Volcán Azufral noviembre y diciembre de 2023  | 105 |
| <b>Tabla 32.</b> Datos parámetros estación climatológica La Roca – diciembre de 2023  | 107 |

**Tabla 33.** Estaciones que conformaron la red de vigilancia del campo volcánico monogenético Guamuez ubicados en el Departamento del Putumayo para el mes de diciembre de 2023 111

## Resumen

Para el mes de diciembre se registraron 3091 eventos en el volcán Galeras, presentado respecto al mes de noviembre un incremento en su valor del 4%, predominando la sismicidad asociada con la fractura de roca con 2366 eventos volcano tectónicos (VT), seguida por la sismicidad relacionada con movimiento transitorio de fluidos con 536 eventos (LP). El pico de ocurrencia sísmica se presentó el 7 de diciembre con 202 eventos. El total de la energía liberada para diciembre fue de  $5.16 \times 10^{13}$  ergios. Se localizaron 128 sismos VT en inmediaciones de la cima volcánica, 94 eventos en distancias entre 0 y 23 km con profundidades menores de 3 km respecto a la cima (4200 m), los sismos restantes ubicados de manera dispersa en distancias entre 2.7 y 19 km, con profundidades entre 2.4 y 17 km con respecto a la cima (4200 m). La mayoría de los eventos tiene baja energía, se destaca el evento con ML de 1.6, registrado el 19 de diciembre a las 21:49:50 hora local, a una profundidad de 17 km.

Para el complejo volcánico de Cumbal (CVC) durante el mes de diciembre de 2023 se observó un incremento de 2.5 veces su valor en comparación con el mes anterior, pasando de 1050 a 2654 eventos, de los cuales el 84% se asociaron con procesos de fractura de roca (VT), seguidos por el 10% de sismos generados por movimientos de fluidos de fuente transitoria al interior de los conductos volcánicos. El pico de ocurrencia se registró el 21 de diciembre con 198 eventos. La energía se aumentó en el diciembre pasando de  $5.93 \times 10^{09}$  ergios a  $2.90 \times 10^{11}$  ergios. Se localizaron 21 sismos de bajo nivel energético, ubicados en inmediaciones del cráter La Plazuela en distancias entre 0.2 y 2 km y profundidades menores de 2 km, 3 sismos se ubicaron en distancias entre 3.7 y 9.7 km y profundidades entre 4 y 6 km con respecto a la altura de referencia (4700 m). La magnitud de los sismos es pequeña se destacan los eventos con magnitud local de 2.0 y 2.2, ubicados a 9.7 km al oriente del cráter La Plazuela y a 3.7 km al noroccidente del mismo cráter.

Para el mes de diciembre en el complejo volcánico de Chiles y Cerro (CVCCN), la sismicidad se incrementó pasando de 14852 a 31358 eventos con respecto al mes anterior, el mayor aporte provino de los sismos asociados con fractura de material cortical con 28988 eventos que representan el 92% del total. El pico de ocurrencia se registró el 11 de diciembre con 2644 eventos. La energía sísmica paso de  $.09 \times 10^{16}$  ergios a  $3.87 \times 10^{18}$  ergios incrementándose 355 veces su valor con respecto al mes de noviembre. El pico de energía se registró el 11 de diciembre con  $3.44 \times 10^{18}$  ergios. El número total de eventos VT fue de 283048 con una energía de  $8.11 \times 10^{18}$  ergios. Se localizaron 2848 sismos ubicados principalmente al sur del volcán Chiles en distancias hasta de 4 km y profundidades menores de 6 km con respecto a la cima del Chiles (4700 m) y ML máxima de 4.4. Se destacan 4 eventos reportados como sentidos en el resguardo Indígena de Chiles, el primero ocurrió el 10 de diciembre a las 3:01 pm, ubicado a 1.8 km al sur de Chiles, con profundidad de 4 km y magnitud local de 2.9, el segundo evento ocurrió el 11 de diciembre a las 2:36:21 am ubicado a 1.5 km al sur sureste de Chiles con profundidad de 4 km y ML máxima de 4.4, el tercer evento ocurrió el 11 de diciembre a las 2:36:59 am ubicado a 1.4 km al sur sureste de Chiles, con profundidad de 5 km y ML de 2.7, el

cuarto evento ocurrido el 27 de diciembre a las 1:33 am ubicado a 1.7 km al sur de Chiles , con profundidad de 5 km y ML de 2.8.

Los volcanes Doña Juana y las Ánimas se observó una disminución en la energía sísmica. Se registro 13 sismos de fractura de material cortical con una energía liberada de  $1.76 \times 10^{12}$  ergios. Se localizaron 8 eventos en distancias entre 3 y 6 km en la región de los volcanes Doña Juana y las Ánimas, profundidades entre 2 y 11 km con respecto a la altura de referencia (4200 m) y ML de 1.0

En el mes de diciembre de 2023 se presentó un incremento en la sismicidad del volcán Azufral pasando de 27 a 151 eventos, todos ellos asociados con fractura de roca (VT). La energía presento un incremento pasando de  $1.53 \times 10^{11}$  ergios a  $3.02 \times 10^{11}$  ergios. Los sismos se ubicaron de manera dispersa en distancias entre 0.2 y 13 km del domo Mallama, profundidades entre 1 y 17 km respecto a la cima (4000 m) y magnitud local de 1.2

## Introducción

Durante el mes de noviembre de 2023, el SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO - Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (OVSPA), continuó con su misión institucional de vigilar la actividad de los volcanes Galeras, Cumbal, Chiles, Cerro Negro, Azufral, Doña Juana y Las Ánimas, mediante el monitoreo continuo y en tiempo real, durante las 24 horas del día, desde diferentes áreas de estudio. Esto permitió evaluar el estado de alerta por actividad de cada uno de estos volcanes.

El estado y manifestaciones de un volcán pueden variar a través del tiempo y por ello surge el monitoreo volcánico, el cual consiste en la observación y el estudio de los cambios ocurridos en diferentes fases de actividad de un volcán, mediante la aplicación de una serie de disciplinas geofísicas, geoquímicas y geológicas. Los cambios en el comportamiento de la actividad son el reflejo de distintos procesos al interior del sistema volcánico y pueden ser provocados por procesos hidrotermales o magmáticos que conllevan a variaciones de presión, temperatura, cambios en el estado de esfuerzos de la corteza, movimiento de material fluido (magma, volátiles o gases) desde niveles más profundos a reservorios más someros o a la superficie misma.

El análisis presentado en este informe corresponde a los resultados preliminares derivados del procesamiento de los datos instrumentales y de las observaciones directas de la actividad volcánica. Se realiza también una recopilación del funcionamiento de los equipos que conforman la red de monitoreo de cada volcán en sus diferentes áreas de estudio.

## 1. Actividad del volcán Galeras – diciembre de 2023

### 1.1. Red de vigilancia

Para el mes de diciembre de 2023, la red de vigilancia del volcán Galeras estuvo conformada por:

- Dieciocho estaciones sísmicas telemétricas triaxiales: una de corto periodo (2) y dieciséis de banda ancha (Figura 1, Tabla 1).
- Seis sensores de infrasonido (Figura 1, Tabla 1).
- Cinco cámaras de video telemétricas para registro de la actividad superficial, una instalada en la sede del OVSPA, otra en la población de Consacá al occidente, otras al noroccidente en Barranco Alto y Bruma al sur del cono activo y otra, en Morasurco (Figura 1).
- Ocho inclinómetros electrónicos con transmisión telemétrica (Figura 2, Tabla 2).
- Once estaciones permanentes GNSS (Sistema Global de Navegación Satelital) telemétricas (Figura 2, Tabla 3).
- Dos estaciones para monitoreo y seguimiento térmico: Paisita y Deformes.
- Muestreo geoquímico de aguas en 5 manantiales termales.
- Dos estaciones telemétricas para monitoreo de flujos de lodos, compuestas por un geófono y un pluviómetro, instaladas en la cuenca del río Mijitayo (Figura 2).
- Tres estaciones ScanDOAS telemétricas para detección de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) (Figura 3, Tabla 4).
- Tres estaciones de medición de campo Magnético, Deformes, Frailejón y Barranco y dos estaciones de medición de campo eléctrico en Frailejón y Barranco (Figura 3, Tabla 5).
- Tres estaciones telemétricas para la medición de emisiones del isótopo de gas Radón (Rn<sub>222</sub>) proveniente del suelo denominadas Lavas 1, Parques y Lirios ubicadas hacia el sector oriental del edificio volcánico (Figura 3, Tabla 6).

La red instrumental telemétrica de monitoreo y vigilancia del volcán Galeras presentó un porcentaje promedio de funcionamiento del 92% (Figura 4).

**Tabla 1.** Estaciones sísmicas y sensores acústicos de la red de monitoreo de Galeras para el mes de diciembre de 2023

| Estación      | Código | Transmisión de Datos | Tipo de Sensor         | Componente | Distancia al Cráter [Km] | Dirección respecto al Cráter | Altitud [m] |
|---------------|--------|----------------------|------------------------|------------|--------------------------|------------------------------|-------------|
| Mijitayo Alto | MJAP   | Digital              | Acelerómetros          | Triaxial   | 2,8                      | SE                           | 3550        |
| Mijitayo Bajo | MJBP   | Digital              | Acelerómetros          | Triaxial   | 4,7                      | SE                           | 3150        |
| Cóndor        | CONP   | Digital              | Sismómetro Banda Ancha | Triaxial   | 4,4                      | SW                           | 3977        |
| Calabozo      | CAVP   | Digital              | Sismómetro Banda Ancha | Triaxial   | 6,9                      | WSW                          | 2313        |
| Morasurco     | MORP   | Digital              | Sismómetro Banda Ancha | Triaxial   | 13,7                     | ENE                          | 3504        |

Informe mensual de actividad de los volcanes Galeras, Cumbal, Chiles – Cerro Negro, Las Ánimas, Doña Juana y Azufreal – diciembre 2023

|            |      |         |                        |          |       |     |      |
|------------|------|---------|------------------------|----------|-------|-----|------|
| Anganoy    | ANGP | Digital | Sismómetro Banda Ancha | Triaxial | 0,7   | E   | 4227 |
| Cufiño     | CUVP | Digital | Sismómetro Banda Ancha | Triaxial | 1,4   | ENE | 3828 |
| Cráter     | CRAP | Digital | Sismómetro Banda Ancha | Triaxial | 1,5   | SW  | 4032 |
| Urcunina   | URCP | Digital | Sismómetro Banda Ancha | Triaxial | 2,4   | ESE | 3494 |
| Arlés      | ARLP | Digital | Sismómetro Banda Ancha | Triaxial | 4     | WNW | 3450 |
| Cobanegra  | COBP | Digital | Sismómetro Banda Ancha | Triaxial | 4,3   | SSE | 3625 |
| Nariño     | NARP | Digital | Sismómetro Banda Ancha | Triaxial | 5,2   | NNW | 2846 |
| Obonuco    | OBOP | Digital | Sismómetro Banda Ancha | Triaxial | 5,4   | SE  | 3021 |
| Ingenio    | INGP | Digital | Sismómetro Banda Ancha | Triaxial | 7     | WNW | 2890 |
| San Felipe | FELP | Digital | Sismómetro Banda Ancha | Triaxial | 7,6   | SW  | 3491 |
| Tosoabí    | TOSP | Digital | Sismómetro Banda Ancha | Triaxial | 10,6  | ENE | 2631 |
| Achalay    | ACHP | Digital | Sismómetro Banda Ancha | Triaxial | 0,6   | N   | 4134 |
| Vivi       | VIVP | Digital | Sísmica CP Triaxial    | Triaxial | 11,44 | SE  | 2635 |
| Loma Larga | LOMP | Digital | Sísmica CP Triaxial    | Triaxial | 14,2  | NNO | 2393 |
| Cráter     | CRAP | Digital | Sensor de infrasonido  | Uniaxial | 1,5   | S   | 4032 |
| Calabozo   | CALP | Digital | Sensor de infrasonido  | Uniaxial | 6,9   | WSW | 2313 |
| Ingenio    | INGP | Digital | Sensor de infrasonido  | Uniaxial | 7     | WNW | 2890 |

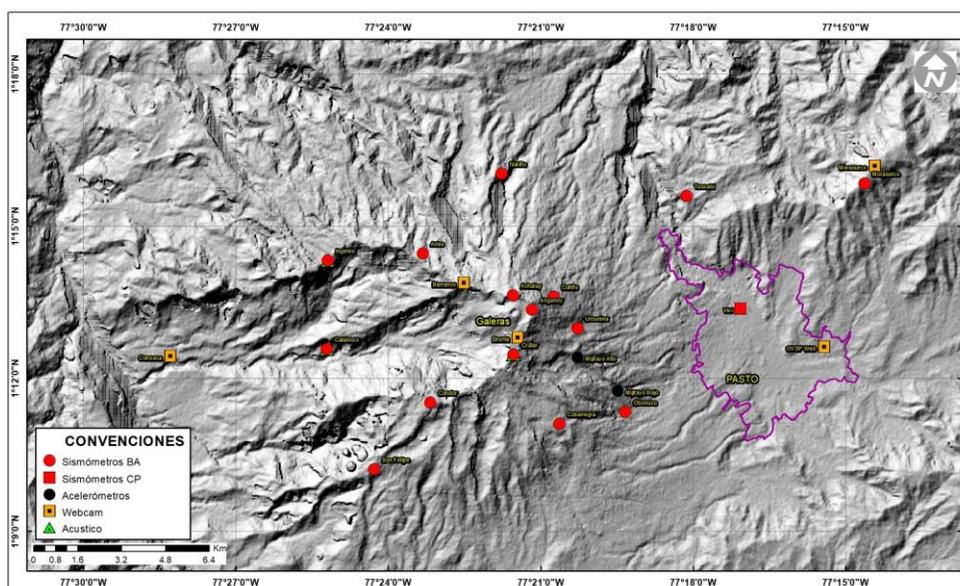
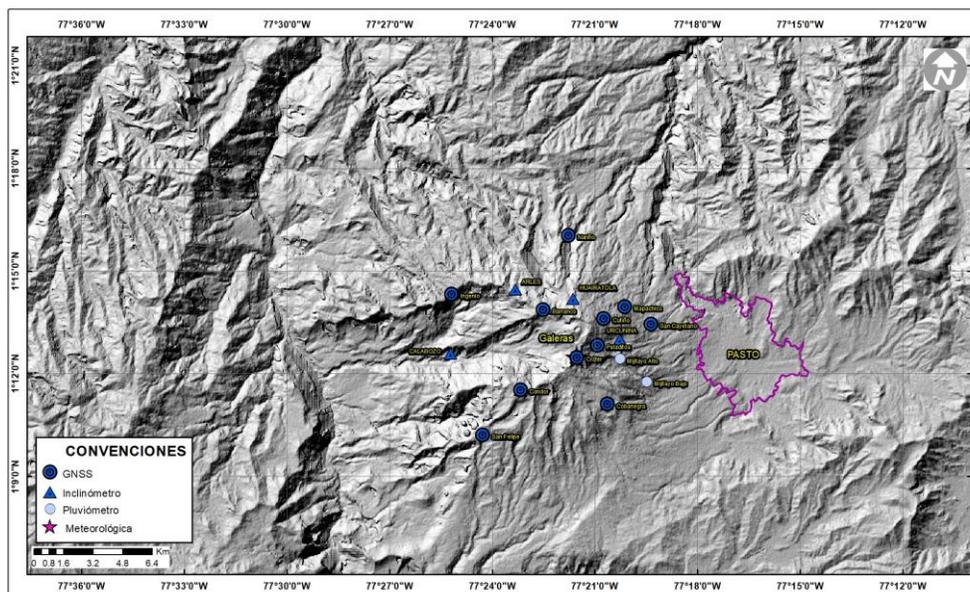


Figura 1. Localización de las estaciones sísmicas y sensores de infrasonido que conformaron la red de vigilancia de Galeras en diciembre de 2023



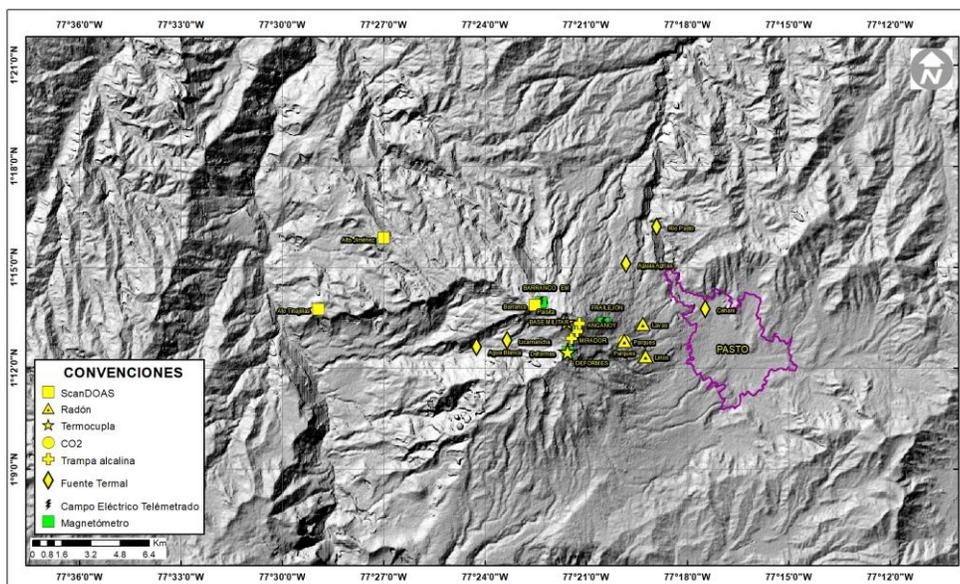
**Figura 2.** Localización de las estaciones para el seguimiento de la deformación (inclinómetros electrónicos y GNSS) y sensores de flujo de lodos, que conformaron la red de vigilancia de Galeras en diciembre de 2023

**Tabla 2.** Inclinómetros electrónicos telemétricos que forman parte de la red de vigilancia en deformación del volcán Galeras en diciembre de 2023

| Inclinómetros Electrónicos | Distancia al Cráter [Km] | Ubicación respecto al Cráter Principal | Altitud [m] |
|----------------------------|--------------------------|--|-------------|
| Cráter                     | 0,8                      | E                                      | 4032        |
| Peladitos                  | 1,4                      | SE                                     | 3933        |
| Huairatola                 | 1,7                      | N                                      | 3745        |
| Urcunina                   | 2,3                      | ESE                                    | 3494        |
| Cobanegra                  | 3,9                      | SSE                                    | 3625        |
| Arlés                      | 4                        | NW                                     | 3450        |
| Cóndor                     | 4,9                      | SW                                     | 3977        |
| Calabozo                   | 7,1                      | WSW                                    | 2313        |

**Tabla 3.** Estaciones GNSS telemétricas que forman parte de la red de vigilancia en deformación del volcán Galeras en diciembre de 2023

| Estaciones GNSS Permanentes | Distancia al Cráter [km] | Ubicación respecto al Cráter Principal | Altitud [m] |
|-----------------------------|--------------------------|--|-------------|
| Cráter                      | 1.5                      | SW                                     | 4032        |
| Cóndor                      | 7.6                      | SW                                     | 3977        |
| Barranco                    | 2.6                      | NW                                     | 3904        |
| San Cayetano                | 4.1                      | E                                      | 3047        |
| Ingenio                     | 7                        | WNW                                    | 2890        |
| Cufiño                      | 1.4                      | ENE                                    | 3828        |
| Peladitos                   | 1.4                      | SE                                     | 3933        |
| Nariño                      | 5                        | NNW                                    | 2846        |
| Cobanegra                   | 3.9                      | SSE                                    | 3625        |
| Mapachico                   | 2.9                      | NE                                     | 3284        |
| San Felipe                  | 7.6                      | SW                                     | 2846        |



**Figura 3.** Localización de las estaciones de campo magnético y eléctrico. Trampa Alcalina, ScanDOAS, sensores de gas Radón, termocuplas, fuentes termales y pluviómetros que conformaron la red de vigilancia de Galeras en diciembre de 2023

**Tabla 4.** Estaciones que conforman la red de instrumentos ScanDOAS del proyecto NOVAC en el volcán Galeras en diciembre de 2023

| Estación        | Distancia al Cráter [km] | Ángulo del Scan (°) | Altura de referencia de la pluma *(m) | Dirección compás (°contra-azimut) | Ubicación respecto al cráter | Altitud [m] |
|-----------------|--------------------------|---------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------|
| Barranco        | 7.9                      | 60                  | 1600                                  | 131                               | NNW                          | 3904        |
| Alto Jiménez    | 10.8                     | 90                  | 1800                                  | 115                               | WNW                          | 2402        |
| Alto Tinajillas | 13.3                     | 60                  | 2100                                  | 94                                | WNW                          | 2095        |

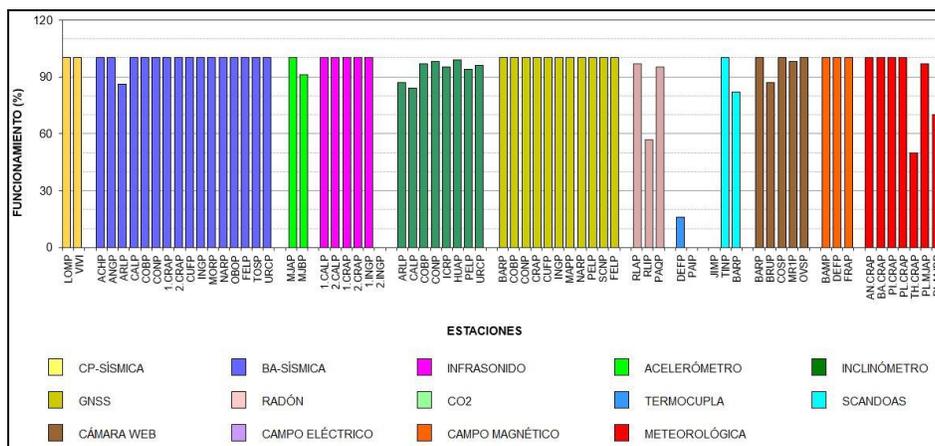
\* Altura de referencia de la pluma respecto a la cima de Galeras (aproximadamente 4200 msnm)

**Tabla 5.** Estaciones que monitorean las variaciones del campo potencial eléctrico y magnético ocasionadas por la actividad del volcán Galeras

| Estación    | Transmisión de datos | Tipo de Sensor | Componente | Distancia al Cráter [km] | Dirección respecto al Cráter Principal | Altitud [m] |
|-------------|----------------------|----------------|------------|--------------------------|--|-------------|
| Frailejón   | Digital              | Magnético      | Triaxial   | 2,7                      | E                                      | 3729        |
| Barranco EM | Digital              | Magnético      | Triaxial   | 2                        | NW                                     | 3836        |
| Deformes    | Digital              | Magnético      | Triaxial   | 1,9                      | SSE                                    | 415         |

**Tabla 6.** Estaciones para el monitoreo de gas Radón instaladas sobre la vía de acceso a Galeras

| Estación | Distancia al Cráter [km] | Ubicación respecto al Cráter Principal | Altitud [m] |
|----------|--------------------------|--|-------------|
| Parques  | 3,6                      | ESE                                    | 3350        |
| Lavas    | 4,5                      | NE                                     | 3260        |
| Lirios   | 4,7                      | ESE                                    | 3050        |



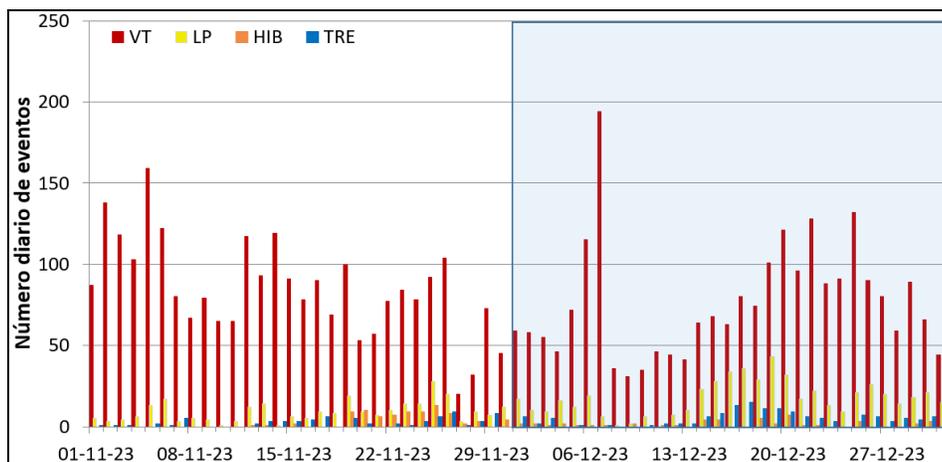
**Figura 4.** Histograma del porcentaje de funcionamiento de las estaciones que conformaron las redes de monitoreo telemétrico del volcán Galeras en diciembre de 2023

## 1.2. Sismología

En diciembre la ocurrencia sísmica incrementó 4%, al pasar de 2982 a 3091 eventos, con respecto al mes noviembre. El mayor aporte en la ocurrencia provino de los sismos asociados con fractura de roca (VT) con 2366 eventos que representan el 77%, seguido de los sismos asociados con tránsito de fluidos de fuente transitoria (LP) con 536 eventos, que representan el 17%; seguido de los eventos asociados con tránsito de fluidos de fuente persistente o episodios de Tremor (TRE), con 143 eventos que representan el 5% y finalmente los eventos de tipo híbrido que combinan fractura de roca y tránsito de fluidos (HIB) con 46 eventos que representan el 1% del total. El 7 de diciembre se registró el pico de ocurrencia con 202 eventos (194 VT, 6 LP, 1 Tre y 1 HIB) (Tabla 7, Figura 5).

**Tabla 7.** Número de sismos volcánicos por tipo en Galeras, noviembre y diciembre 2023

| Periodo<br>Evaluado | Número de eventos por tipo |     |     |     |       |
|---------------------|----------------------------|-----|-----|-----|-------|
|                     | VT                         | LP  | TRE | HIB | TOTAL |
| Noviembre 2023      | 2555                       | 271 | 72  | 84  | 2982  |
| Diciembre 2023      | 2366                       | 536 | 143 | 46  | 3091  |

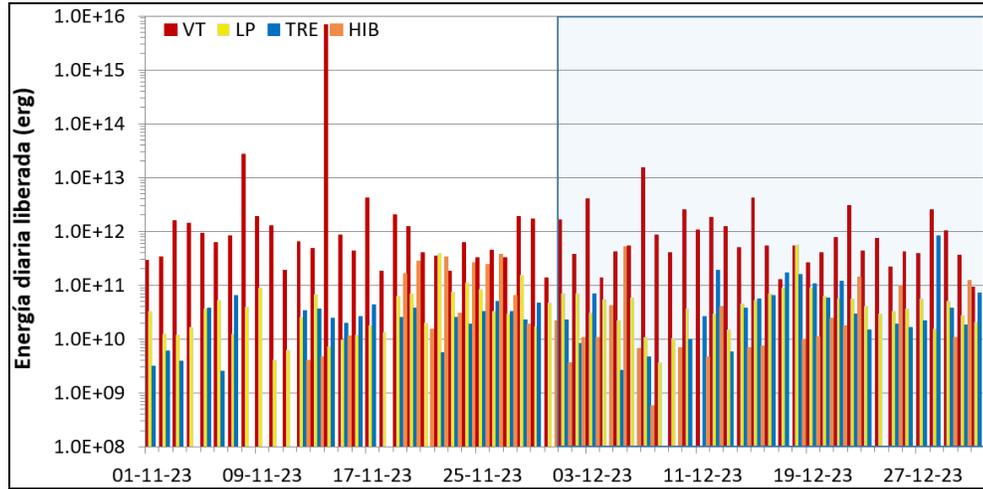


**Figura 5.** Número diario de eventos volcánicos por tipo, registrados en Galeras durante noviembre y diciembre 2023; el recuadro indica el periodo evaluado

La energía sísmica disminuyó 134 veces, pasando de a  $6.91 \times 10^{15}$  ergios a  $5.16 \times 10^{13}$  ergios, siendo el mayor aporte de los eventos asociados con fractura de roca VT, con  $4.66 \times 10^{13}$  ergios, que corresponde al 91%, seguido de los episodios de tremor TRE que liberaron una energía de  $2.18 \times 10^{12}$  ergios, correspondiente al 4%, seguido de los eventos LP que liberaron una energía de  $1.78 \times 10^{12}$  ergios, correspondiente al 3% y finalmente los eventos de tipo híbrido HIB que liberaron una energía de  $1.10 \times 10^{12}$  ergios, correspondiente al 2% (Tabla 8 y Figura 6). El 7 de diciembre se registró el pico energético con  $1.51 \times 10^{13}$  ergios, debido 202 eventos.

**Tabla 8.** Energía de eventos volcánicos por tipo en Galeras, noviembre y diciembre 2023

| Periodo<br>Evaluado | Número de eventos por tipo |          |          |          |          |
|---------------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------|
|                     | VT                         | LP       | TRE      | HIB      | TOTAL    |
| Noviembre 2023      | 6.90E+15                   | 1.54E+12 | 5.97E+11 | 1.83E+12 | 6.91E+15 |
| Diciembre 2023      | 4.66E+13                   | 1.78E+12 | 2.18E+12 | 1.10E+12 | 5.16E+13 |



**Figura 6.** Energía diaria liberada de eventos volcánicos por tipo, registrados en Galeras durante noviembre y diciembre 2023; el recuadro indica el periodo evaluado

Fueron localizados 128 sismos VT, la mayoría agrupados en inmediaciones de la cima volcánica, con 94 eventos que se ubicaron en distancias entre 0 y 2.3 km, con profundidades menores de 3 km con respecto a la cima (4200 m) y ML máxima de 1. El resto de sismos se ubicaron de manera dispersa en la región volcánica, en distancias entre 2.7 y 19 km, con profundidades entre 2.4 y 17 km con respecto a la cima (4200 m) y ML máxima de 1.6. La magnitud local de la mayoría de los sismos es pequeña, pues son eventos de baja energía, solamente se destaca el evento VT con ML de 1.6, cuyas características se consignan en la Tabla 9.

En diciembre en Galeras se registraron 3 eventos asociados con movimiento de fluidos de fuente transitoria que presentan muy baja frecuencia, denominados VLP. En la Figura 8 se muestra el sismograma y el espectro en frecuencia del evento registrado el 10 de diciembre a las 09:46 p.m. (11 de diciembre, 02:46 UTC), en la componente vertical de 5 estaciones ubicadas cerca de la cima de Galeras a distancias entre 0.9 y 3.8 km; este evento mostró un pico dominante en las bajas frecuencias entre 0.66 y 0.83 Hz o un periodo entre 1.2 y 1.6 segundos; una localización aproximada con primeros arribos lo ubica a 1 km al oriente de la cima de Galeras con profundidad menor de 1 km. La energía de los eventos VLP de diciembre alcanzó un valor de  $8.83 \times 10^9$  ergios.

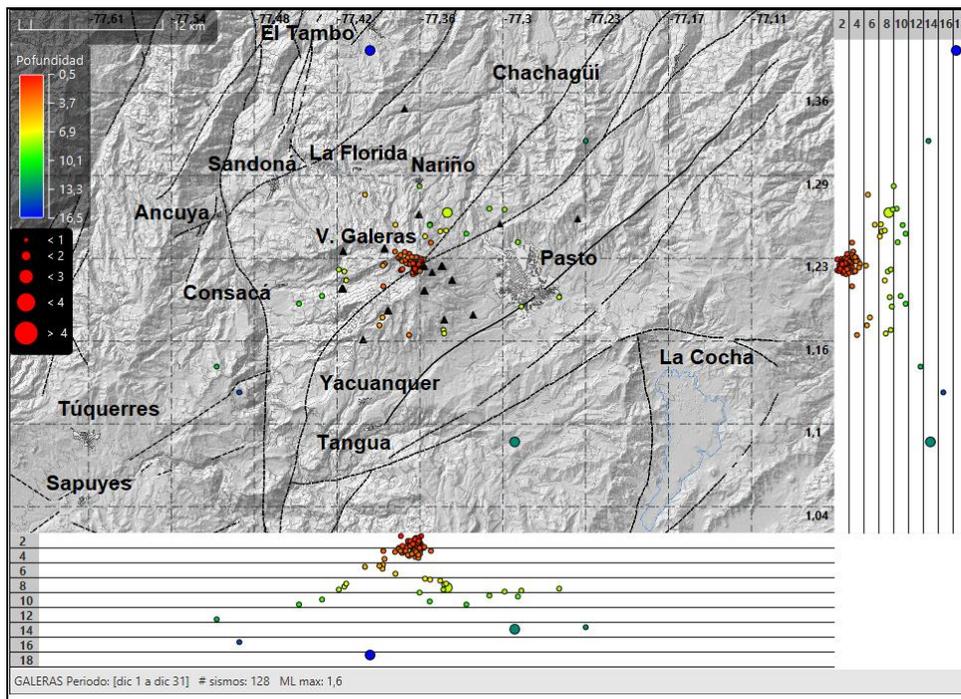


Figura 7. Sismos localizados en la zona de influencia de Galeras, diciembre 2023

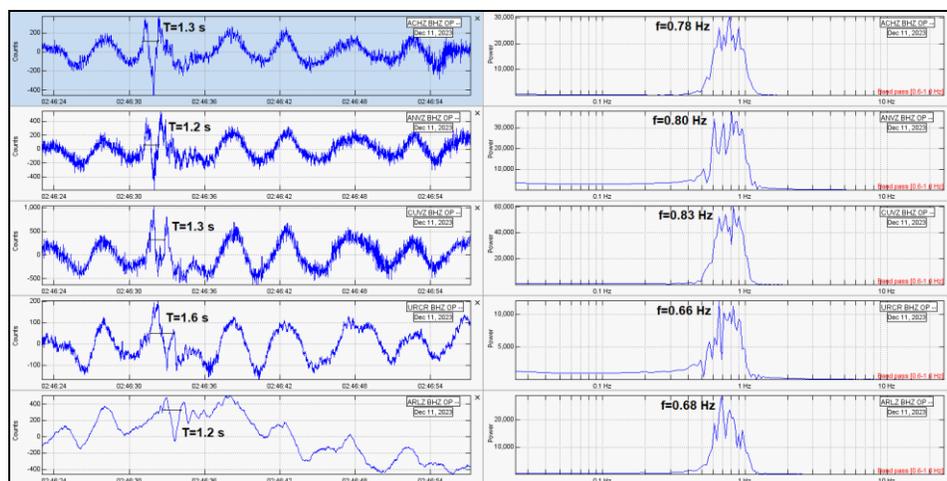


Figura 8. Sismogramas y espectro en frecuencia del evento VLP del 10 de diciembre a las 09:46 pm, en la componente vertical de algunas estaciones sísmicas del volcán Galeras

Tabla 9. Sismo con  $M_L$  de 1.6, volcán Galeras, diciembre 2023

| Fecha      | Hora local | Latitud | Longitud | Prof. km | $M_L$ |
|------------|------------|---------|----------|----------|-------|
| 19/12/2023 | 21:49:50   | 1.3900  | -77.3950 | 17       | 1.6   |

### 1.3. Deformación

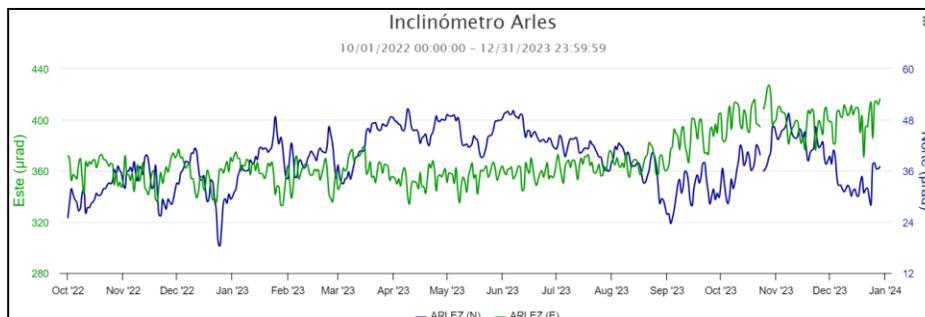
Para el periodo evaluado, la red telemétrica de deformación estuvo conformada por 8 inclinómetros electrónicos y 11 estaciones GNSS Permanentes.

#### 1.3.1. Inclinometría Electrónica

Posterior al incremento registrado entre septiembre y los primeros días de noviembre en las componentes Norte y Este de los inclinómetros Arles y Huairatola, el comportamiento ascendente persiste en la componente Radial de Huairatola, a la vez que se observa una tendencia hacia la estabilización en los demás registros (Figuras 9 y 10).

Desde octubre de 2023 se observan tendencias descendentes en las componentes de inclinación Norte y Este de Calabozo, registrando cerca de 27 y 21  $\mu\text{rad}$  respectivamente (Figura 11).

Para las demás estaciones de inclinometría se ha observado estabilidad en sus componentes, con cambios mínimos influenciados por las condiciones climáticas locales reflejados en los datos de temperatura, a manera de ejemplo se presenta la serie temporal de la estación Cobanegra (Figura 12).



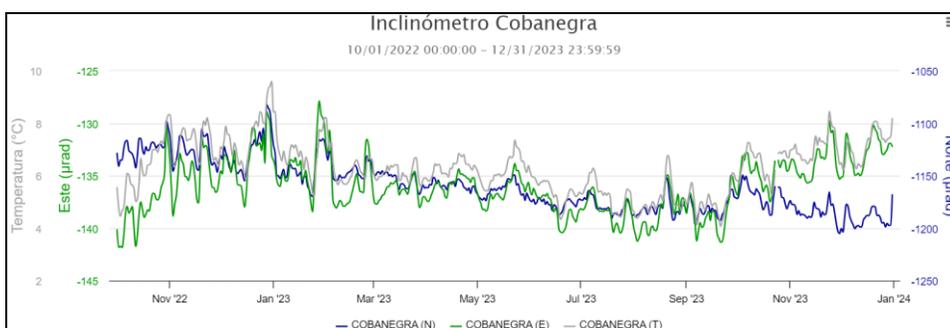
**Figura 9.** Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) del inclinómetro electrónico Arles, instalado en el volcán Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 31 de diciembre de 2023



**Figura 10.** Componentes de inclinación Tangencial y Radial ( $\mu\text{rad}$ ) del inclinómetro electrónico Huairatola, instalado en el volcán Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 31 de diciembre de 2023



**Figura 11.** Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) y registro de la temperatura del inclinómetro electrónico Calabozo, instalado en el volcán Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 31 de diciembre de 2023



**Figura 12.** Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) y registro de la temperatura del inclinómetro electrónico Cobanegra, instalado en el volcán Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 31 de diciembre de 2023

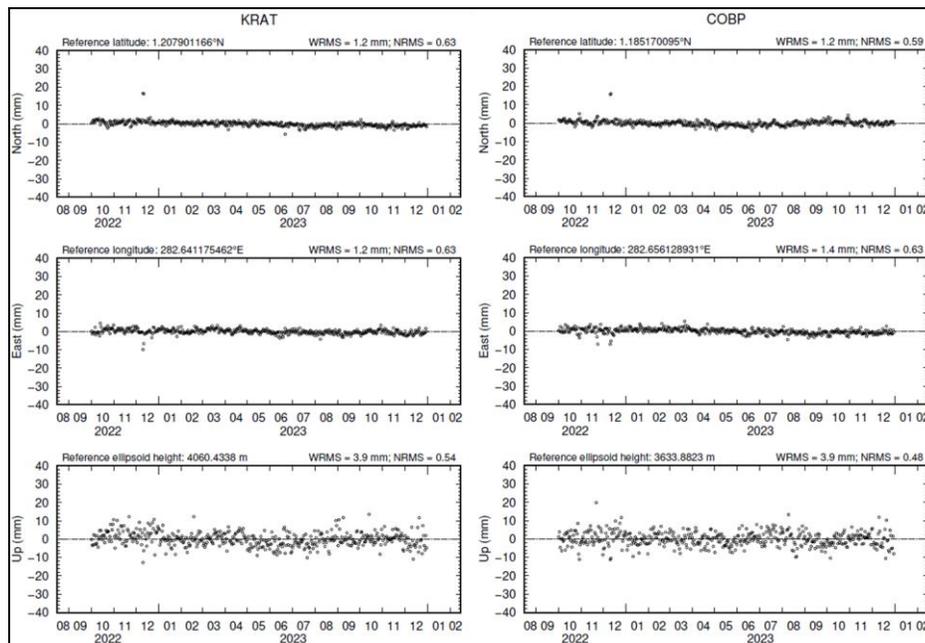
### 1.3.2. Estaciones GNSS Permanentes

La red GNSS para Galeras está conformada por 11 estaciones permanentes, Cráter y Barranco se instalaron en agosto y octubre de 2011 respectivamente, San Cayetano, en octubre de 2012, las estaciones Chiguaco e Ingenio se instalaron en abril de 2014, Cóndor se reinstaló en febrero de 2015, Cufiño y Peladitos se instalaron en octubre de 2016, Nariño y Condor-2, en marzo de

2017 y Cobanegra en abril de 2017 y el 14 de diciembre de 2018, se instaló la estación Mapachico. Desafortunadamente el 4 de septiembre de 2019 personas inescrupulosas sustrajeron del sitio de instalación los equipos de la estación GNSS Chiguaco, ubicada al norte del volcán.

Para el análisis se contempló el procesamiento Baseline, mediante el software GAMIT/GLOBK 10.71. Utilizando efemérides finales, parámetros numéricos que describen las posiciones precisas de los satélites.

Las estaciones que forman parte de la red de GNSS en el volcán Galeras continúan mostrando tendencias estables, tanto en las direcciones Norte y Este, como en la componente Vertical. En la Figura 13, a manera de ejemplo, se presentan el comportamiento de las estaciones GNSS Cráter y Cobanegra.

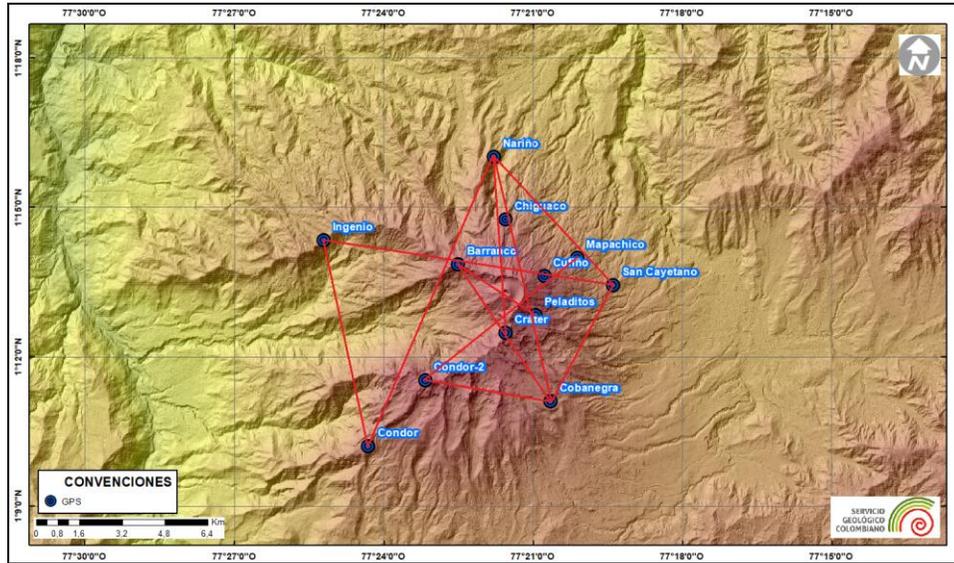


**Figura 13.** Variaciones en las direcciones Norte, Este y Altura de las estaciones GNSS Permanentes Cráter y Cobanegra, instaladas en Galeras, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 30 de diciembre de 2023, procesados con el software GAMIT/GLOBK

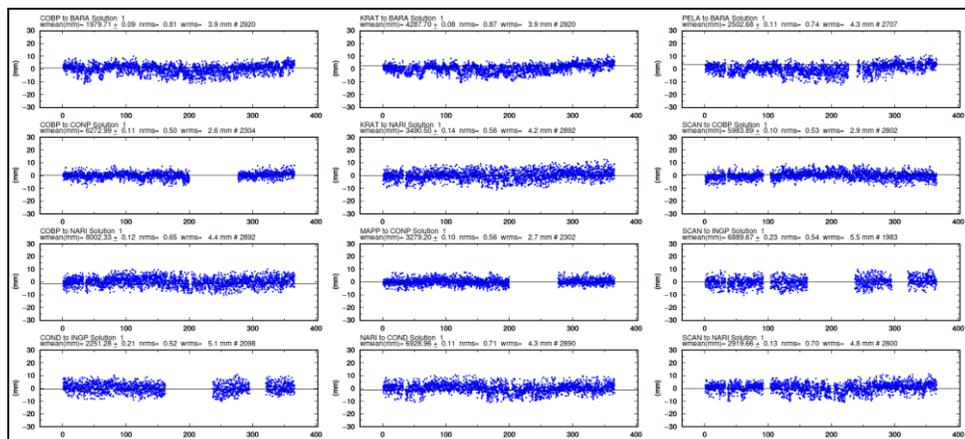
### 1.3.3. Líneas Base

Realizando un procesamiento diferencial con una solución cada tres horas, podemos obtener líneas base entre estaciones GNSS, series temporales que nos indican la variación en distancia entre una y otra estación, medida cada tres horas, es posible realizar el arreglo entre estaciones como mejor convenga, en la Figura 14, se muestra la ubicación de las estaciones

GNSS y las estaciones propuestas para la solución, y en la Figura 15, se muestran las variaciones en distancia con las soluciones cada tres horas usando orbitas rápidas.



**Figura 14.** Ubicación de las estaciones GNSS instaladas sobre la superficie de Galeras, dispuestas para el seguimiento de los cambios en la corteza volcánica. Los segmentos de color rojo indican las estaciones para las cuales se calculó líneas base

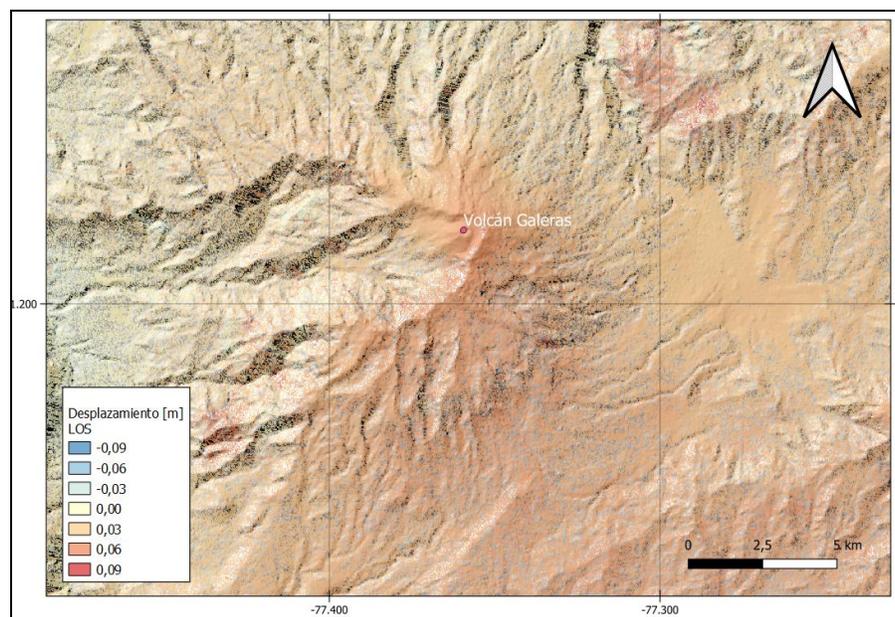


**Figura 15.** Variaciones en distancia entre estaciones GNSS, líneas Base con soluciones cada 3 horas, las series temporales están entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2023. En la parte superior de cada serie, se etiquetan entre que estaciones fue determinada

### 1.3.4. D\_InSAR

En la Figura 16, se muestra el mapa de desplazamiento para la zona del volcán Galeras obtenido con procesamiento interferométrico diferencial, utilizando el software ISCE haciendo uso de un par de imágenes de Radar de Apertura Sintética Sentinel -1 de la Agencia Espacial

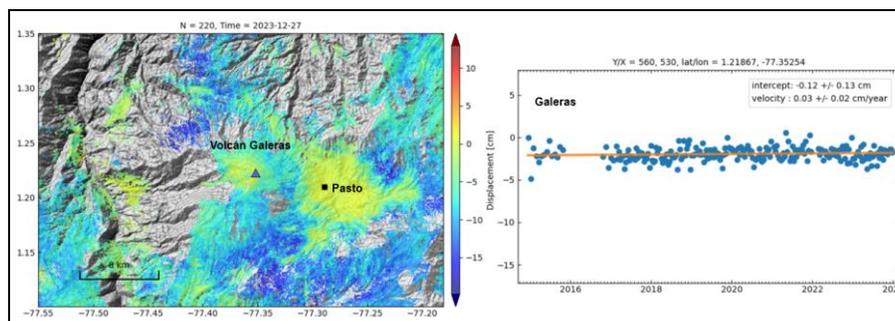
Europea (ESA) de órbita descendente. Para el periodo evaluado con esta técnica de procesamiento no se observa ningún patrón de deformación.



**Figura 16.** Desplazamientos calculados con la técnica D-InSAR para el par interferométrico del 3 y el 15 de diciembre de 2023, imágenes Sentinel-1, órbita descendente. Área de influencia volcán Galeras

### 1.3.5. Series Temporales de Deformación con MintPy

En la Figura 17 se presentan las series temporales obtenidas con el procesamiento interferométrico de imágenes Sentinel – 1 de órbita descendente (Agencia Espacial Europea (ESA)), con el software ISCE y el apilamiento con MintPY (Miami InSAR time – series software in Python) para la zona del complejo volcánico Galeras, observando estabilidad con esta técnica.



**Figura 17.** Desplazamientos obtenidos con imágenes Sentinel – 1 de órbita descendente, procesadas con el software ISCE para el área del complejo volcánico de Galeras, para el periodo comprendido entre el 15 de octubre de 2014 y el 27 de diciembre de 2023, del lado derecho se muestra la serie para la zona indicada con el triángulo, próxima al cráter principal, el cuadro de color negro indica un punto tomado como referencia para la generación de la serie

#### 1.4. Electromagnetismo

Durante diciembre de 2023, el monitoreo electromagnético en la zona del Complejo Volcánico de Galeras (CVG) se realizó a partir del procesamiento y análisis de los datos registrados en las estaciones magnéticas: Frailejón (FRA), Barranco (BAR) y Deformes (DEF). Estas estaciones se ubican en la parte alta del volcán Galeras y cuentan con sensores magnéticos triaxiales tipo Fluxgate, que miden la intensidad de campo magnético total de la Tierra (CMT-F), en sus tres direcciones: X, Y y Z; en el lugar donde estos sensores se encuentran instalados.

A partir de la información obtenida de las estaciones magnéticas del CVG, se calculan los valores del campo magnético total de la Tierra, en la zona donde estos sensores están instalados. Adicionalmente, las estaciones de monitoreo magnético registran las señales electromagnéticas externas ocasionadas por efectos de las tormentas geomagnéticas y tormentas solares; por lo anterior es necesario aplicar metodologías que ayuden a identificar y tratar de eliminar o minimizar los efectos de las componentes magnéticas que no tienen relación con los procesos locales, que son el objetivo del monitoreo magnético en zonas volcánicas, puesto que, estas variaciones magnéticas locales pueden estar asociados con la actividad volcánica y hacen parte de los registros que llegan al OVSPA.

Para identificar las señales magnéticas externas a la Tierra, en las estaciones de monitoreo magnético, en zonas volcánicas de Nariño se toman los registros de una estación magnética lejana a la zona de estudio, denominada como estación de referencia; para el caso del monitoreo de los volcanes de Nariño se cuenta con los registros de la estación de referencia Kourou (KOU) (Figura 18). KOU pertenece a la Red de Monitoreo Magnético Global del Instituto Central de Magnetismo Terrestre de Francia - (BCMT, por sus siglas en francés, Bureau Central de Magnetisme Terrestre). KOU está ubicada en Guayana Francesa y cuenta con datos abiertos y en tiempo real (<http://dx.doi.org/10.18715/BCMT.MAG.VAR> - <https://datacenter.ipgp.fr/networks/detail/BCMT/BCMT.MAG.VAR/>). La información de la estación KOU es fundamental, pues nos permite comparar con los registros de las estaciones magnéticas que monitorean el CVG; así como también para verificar si las señales anómalas corresponden a efectos externos o no y, tratar de minimizar estos efectos generados por fenómenos electromagnéticos externos en los datos de las estaciones ubicadas en la zona de Galeras.

Existen tres tipos de fenómenos magnéticos externos asociados con la actividad eruptiva del Sol que pueden afectar las condiciones de la magnetosfera externa de la Tierra e inducir hacia el interior del planeta efectos de la actividad magnética externa, estos fenómenos son: tormentas geomagnéticas, tormentas de radiación solar y apagones de radio. El Centro de Predicción del Clima Espacial (SWPC, por sus siglas en inglés - Space Weather Prediction Center), que pertenece a la Administración Nacional del Océano y Atmósfera (NOAA, por sus siglas en inglés - National Oceanic and Atmospheric Administration - <https://www.swpc.noaa.gov/>), es una de las organizaciones encargadas de estudiar este tipo de fenómenos y generar alertas del clima espacial, asociadas con la ocurrencia de los fenómenos magnéticos del Sol . Esta actividad solar se propaga hasta la Tierra y, dependiendo

de su intensidad podrían ocasionar problemas eléctricos, de comunicaciones e incluso afectaciones en la salud. La intensidad de estas alertas se representa con el índice Kp, que tiene una escala entre uno (valor mínimo) y nueve (valor máximo). Cada índice describe la intensidad de las perturbaciones ambientales y los efectos físicos en la Tierra (<https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>).

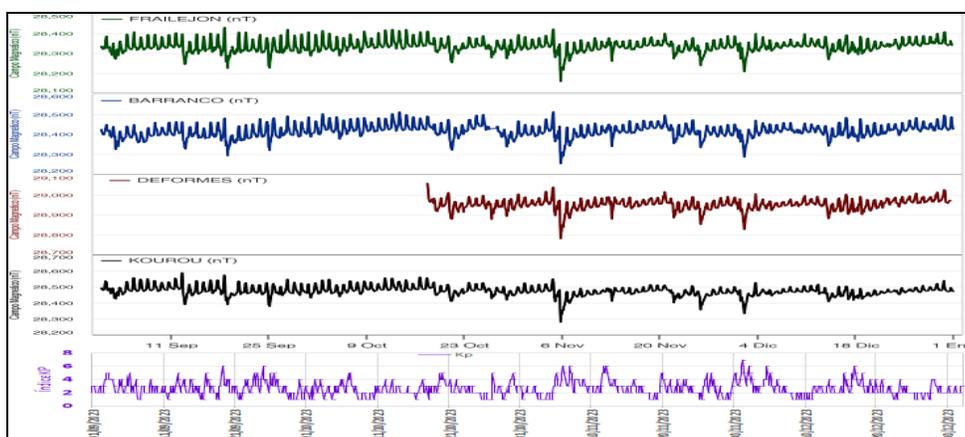
Para el procesamiento y análisis de la información magnética, el OVSP consulta tanto los pronósticos de los índices Kp como las alertas asociadas con este tipo de tormentas que afectan el clima espacial y que son reportados por el SWPC. Esta información nos permite conocer los pronósticos de ocurrencia de estas tormentas solares, identificarlas en los registros de las estaciones magnéticas del CVG y, tratar de minimizar sus efectos con base en el procesamiento que se hace con la estación de referencia KOU, y así evitar interpretarlas como efectos del fenómeno volcánico. En general, las tormentas geomagnéticas que producen mayor perturbación en los registros de las estaciones de monitoreo magnético del CVG son aquellas con índice Kp  $\geq 4$  y sus efectos se evidencian tanto en el incremento o disminución de la amplitud de las señales, así como en su contenido frecuencial, identificándose un mayor contenido de altas frecuencias.

En el periodo entre septiembre y diciembre de 2023, las series temporales de las estaciones de monitoreo magnético del CVG muestran entre septiembre y mediados de octubre un valor de CMT-F, en general estable, con variaciones día noche de alrededor de 85 nT en FRA, 70 nT en BAR y 90 nT en KOU; en tanto que para el resto del año, debido a la ocurrencia de las tormentas geomagnéticas externas, de energía importante; específicamente aquellas con índice Kp  $\geq 4$ , las amplitudes de variación día-noche incrementan sustancialmente, pero los días posteriores estas amplitudes disminuyen a valores de aproximadamente 45 nT en FRA, 60 nT en BAR, 60 nT en DEF y 40 nT en KOU; así como también se evidencia variaciones en el contenido frecuencial de las señales (Figura 18).

Las variaciones importantes en la amplitud del CMT se asociaron con los efectos de las tormentas geomagnéticas que al incidir sobre la magnetósfera de la Tierra perturban el CMT y por ende las amplitudes registradas en las estaciones. Estas tormentas se corroboran con los pronósticos de tormentas emitidos por la NOAA, en sus índices Kp. La amplitud de perturbación en cada estación magnética dependerá de la intensidad y duración de estas tormentas en la zona donde éstas se ubican (Figura 18).

Entre las tormentas geomagnéticas más relevantes registradas entre septiembre y diciembre de 2023 está la ocurrida el 1 y 2 de diciembre de 2023 con Kp  $\geq 7$  y posteriormente aquellas de índice Kp  $\geq 6$ . Estas tormentas generalmente están antecedidas por valores de Kp de 4, 5 y 6, cuando las tormentas inician, y son seguidas por tormentas de valores de Kp de 6, 5 y 4, cuando las tormentas se van atenuando. Las variaciones máximas de amplitud del CMT-F, debidas a las tormentas entre el 1 y 2 de diciembre fueron de aproximadamente 145 nT en FRA, 115 nT en BAR, 120 nT en DEF y 100 nT en KOU; las ocurridas por las tormentas del 19 de septiembre fueron de: 222 nT en FRA, 206 nT para BAR y 198 nT en KOU; para las tormentas del 25 de septiembre de 2023 fueron de: 169 nT para FRA, 180 nT para BAR y 157 nT para KOU. Las

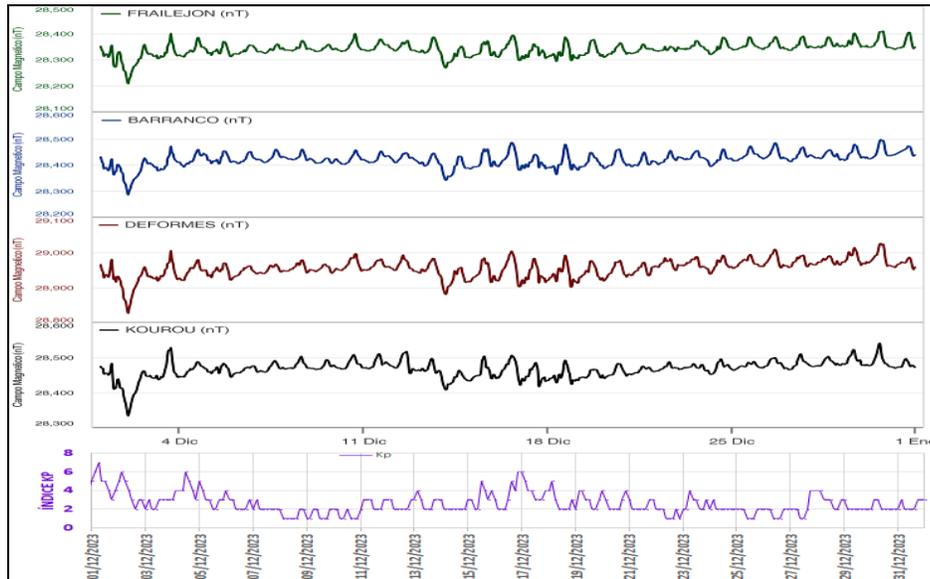
máximas amplitudes de las tormentas entre el 5 y 7 de noviembre fueron de 220 nT para FRA; 220 nT para BAR; 225 nT para DEF y 205 nT para KOU. Las amplitudes máximas de las tormentas del 11 y 12 de noviembre de 2023 fueron de: 110 nT para FRA; 115 para BAR; 110 en DEF y 105 en KOU. Estos valores evidencian que las tormentas que mayor afectación generaron en los registros de las estaciones de monitoreo magnético del CVG, en los cuatro meses evaluados fueron las ocurridas entre el 5 y 7 de noviembre (Figura 18). Se resaltan también las tormentas magnéticas con Kp de 5 que se presentaron en octubre, entre el 6 y 7; entre el 19 y 20 y entre el 26 y 30 de octubre de 2023, que aun cuando son más bajas, generaron efectos en los registros magnéticos, tanto en amplitud, como se evidencia entre el 20 y 21 de octubre, así como también para el periodo entre el 27 y 30 del mes, donde se generan modificaciones tanto en amplitud como en las frecuencias usuales de registro.



**Figura 18.** CMT-F en las estaciones de monitoreo magnético del CVG: FRA (verde), BAR (azul) y DEF (rojo), comparadas con el registro de la estación de referencia KOU (negra), y con el índice Kp (magenta); para el periodo entre septiembre y diciembre de 2023

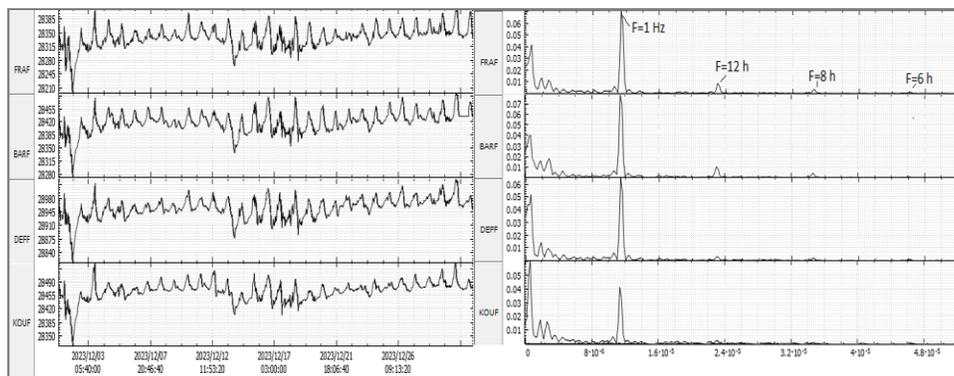
Los registros magnéticos de diciembre iniciaron con grandes perturbaciones, tanto en amplitud como en el contenido de frecuencias, ocasionadas por las tormentas geomagnéticas con valor de índice Kp de 7. Estas perturbaciones hacen descender el valor del nivel base, así como los valores usuales de amplitudes día-noche. Posteriormente, cuando el efecto va disminuyendo, la serie temporal trata de recuperar la tendencia del CMT y los valores de amplitudes de variación día-noche; sin embargo, las tormentas del 13, 15 y 17 de diciembre, vuelven a alterar los registros, es por eso por lo que la tendencia del CMT-F en las estaciones de monitoreo magnético del CVG, durante diciembre muestran dos ciclos ocasionados por estos fenómenos (Figura 19). Estos efectos se corroboran con los registros obtenidos de la estación de referencia KOU, que muestran los mismos fenómenos descritos y, con los reportes del NOAA, sobre los pronósticos de las tormentas geomagnéticas (Figura 19).

En promedio, el valor de CMT-F en FRA fue de alrededor de 28.340 nT, con variaciones diarias promedio de 50 nT; para BAR de 28.425 nT, con variaciones diarias en promedio de 55 nT; para DEF 28.960 nT, con variaciones diarias en promedio de 60 nT y un valor de CMT-F en KOU de aproximadamente 28.480 nT, con variaciones diarias en promedio de 40 nT (Figura 19).



**Figura 19.** CMT-F en las estaciones de monitoreo magnético del volcán Galeras: FRA (verde), BAR (azul) y DEF (roja), comparadas con el registro de la estación de referencia KOU (negra), y con el índice Kp (magenta); para el periodo evaluado, correspondiente a diciembre de 2023

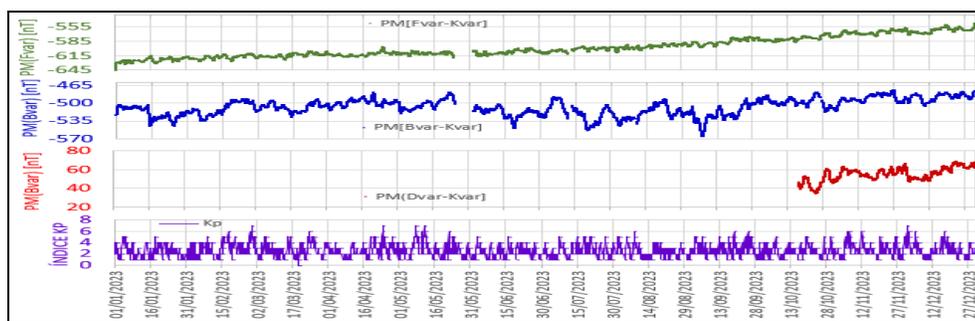
En el dominio de las frecuencias se identifican pulsos asociados con variaciones seculares de valores de un día, 12 horas, ocho horas y eventualmente de seis horas; adicionalmente a estas frecuencias se identifican frecuencias más bajas que se asocian con los largos periodos que se generan, posiblemente por los efectos de las tormentas geomagnéticas (Figura 20).



**Figura 20.** Izq. CMT-F en las estaciones de monitoreo magnético del volcán Galeras: FRA, BAR y DEF; comparadas con el registro de la estación de referencia KOU, en diciembre de 2023. Der. Representación en frecuencia de las señales magnéticas evidenciando las frecuencias dominantes de un día, 12, ocho y seis horas, adicionalmente a frecuencias menores a 2.0 días

En el procesamiento de las series temporales, para obtener las variaciones locales del campo magnético, se usa el valor teórico del CMT, (IGRF-13), y posteriormente se relacionan con la estación de referencia KOU. Este procesamiento permite obtener las variaciones locales y

minimizar los efectos debidos a las tormentas geomagnéticas. La correlación de los datos de las estaciones magnéticas en Galeras se realiza con los datos de la estación de referencia KOU. Este procesamiento permite disminuir significativamente las variaciones día-noche y principalmente aquellas variaciones asociadas con la perturbación de las tormentas magnéticas. Sin embargo, pese al procesamiento que se realiza, los efectos que generan las tormentas con índices Kp mayores de 5 persisten en los registros; en estos casos se descarta que estos efectos estén asociados con actividad volcánica (Figura 21). Analizando las series para todo el 2023, se identifica en FRA una tendencia de ascenso suave, aun cuando entre mediados de abril y mayo se muestra casi estable, posteriormente, la componente residual del campo magnético continua con la tendencia ascendente que se mantuvo hasta final del año 2023, con un acumulado de alrededor de 71 nT y una tasa de variación de 0.2 nT/día. En BAR, en general se muestran variaciones alrededor de un valor promedio; sin embargo, desde mediados de septiembre se puede ver una ligera tendencia ascendente, que hasta el momento muestra un ascenso de alrededor de 38 nT, con una tasa de variación de alrededor de 0.4 nT/día; y para DEF, desde mediados de octubre, cuando la estación volvió a funcionar nuevamente, hasta finales de diciembre de 2023 lleva un acumulado de aproximadamente 75 nT y una variación diaria promedio 0.3 nT/día (Figura 21). la tendencia que se viene registrando en estas series evidencian que, aun cuando son variaciones bajas del campo magnético local, se deben continuar con el seguimiento para poder identificar posibles precursores de algún cambio importante en los registros, principalmente porque la tendencia de las series temporales procesadas muestra un patrón ascendente que puede estar indicando un cambio lento en las manifestaciones magnéticas de la actividad del volcán.



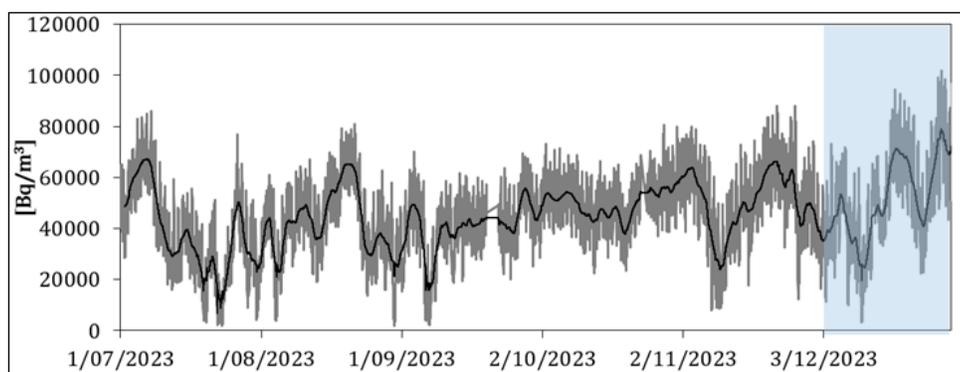
**Figura 21.** Comportamiento de los promedios móviles del CMT, procesados y corregidos con base en la estación de referencia KOU, en las estaciones FRA (verde), BAR (azul) y DEF (rojo), comparadas con la serie temporal del comportamiento del índice Kp que define la intensidad de las tormentas geomagnéticas (magenta), para el periodo entre enero y diciembre de 2023

## 1.5. Geoquímica

### 1.5.1. Muestreo de Gases de Origen Volcánico

#### 1.5.1.1. Concentración de gas radón difuso en el suelo

El radón 222, es un producto en la cadena de descomposición nuclear del uranio 238, con una vida media de 3.85 días. Dado que las emanaciones de radón son uno de los posibles precursores de sismos y erupciones volcánicas, en zona de influencia del volcán Galeras, se tiene instalado tres estaciones para el seguimiento de las concentraciones de este gas (Figura 3 de red de vigilancia). En las siguientes figuras y tablas se muestra los respectivos registros de las estaciones, en las figuras, se observa que los registros presentan oscilaciones diferentes entre sí, posiblemente debido a que las concentraciones de radón se encuentran influenciadas por factores externos tales como: temperatura, precipitación, porosidad del suelo, presión atmosférica, humedad relativa, entre otros (Dadong, Hiromi, & Takao, 2004; García, 2000; González, 2018), las cuales dependen del sitio donde se han instalado. La Figura 22 y Tabla 10 presenta información correspondiente a los registros de concentración en la estación Lavas, en su comportamiento fluctuante, para diciembre, se observa descenso y ascenso en los valores de concentración, pero dentro de la línea base de comportamiento estabilidad en sus valores.

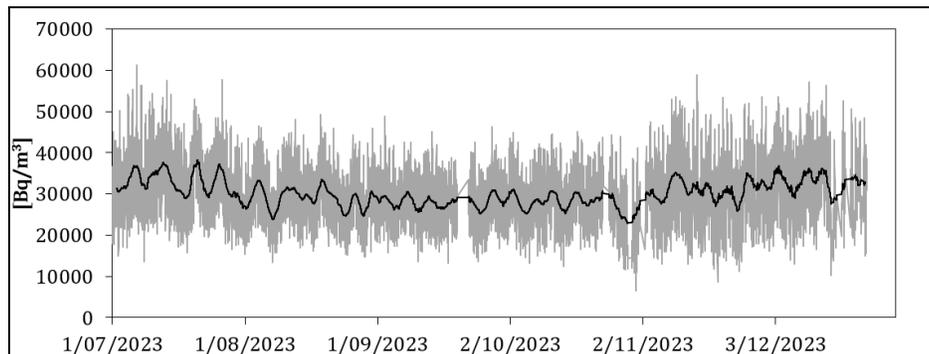


**Figura 22.** Concentración radón difuso en suelo- estación Lavas entre julio y diciembre de 2023 (La línea negra representa la tendencia de los datos, calculada mediante el método de la media móvil para un periodo de 24 horas), el recuadro indica el periodo evaluado: Diciembre

**Tabla 10.** Valores de concentración de radón en unidades de Bq/m<sup>3</sup>- estación Lavas - Volcán Galeras, noviembre - diciembre de 2023

| Valor    | Noviembre | Diciembre |
|----------|-----------|-----------|
| Mínimo   | 7836      | 3014      |
| Promedio | 50793     | 54552     |
| Máximo   | 88063     | 101654    |

Para estación Lirios, su comportamiento se muestra en la Figura 23 y la estadística básica en la Tabla 11. En el periodo graficado, se observa estabilidad en su registro

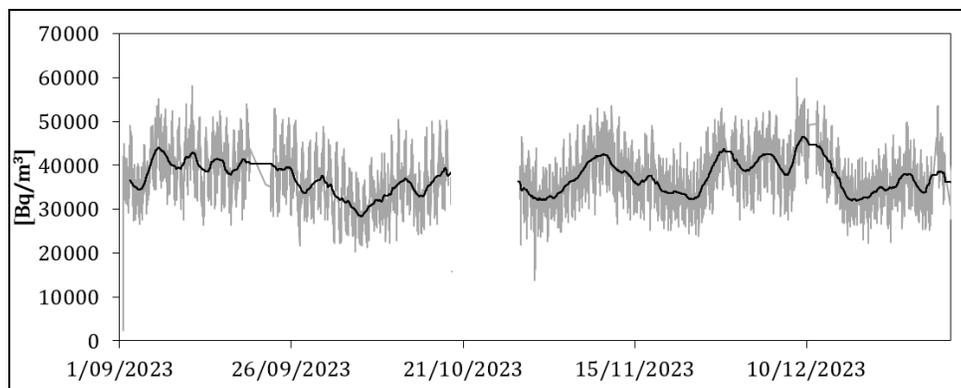


**Figura 23.** Concentración radón difuso en suelo - estación Lirios entre julio y diciembre de 2023, (La línea negra representa la tendencia de los datos, calculada mediante el método de la media móvil para un periodo de 24 horas), el recuadro indica el periodo evaluado: Diciembre

**Tabla 11.** Valores de concentración de radón en unidades de  $Bq/m^3$ - estación Lirios - Volcán Galeras, noviembre - diciembre de 2023

| Valor    | Noviembre | Diciembre |
|----------|-----------|-----------|
| Mínimo   | 8606      | 10129     |
| Promedio | 30982     | 32617     |
| Máximo   | 58887     | 57130     |

La Figura 24 y Tabla 12 presenta información correspondiente a los registros de concentración en la estación Parques, en septiembre de 2023 se recuperó nuevamente la estación, después de trabajos realizados en campo. En su registro, no se observaron variaciones apreciables, indicando que sus valores son estables.



**Figura 24.** Concentración radón difuso en suelo - estación Parques entre septiembre y diciembre de 2023, (La línea negra representa la tendencia de los datos, calculada mediante el método de la media móvil para un periodo de 24 horas)

**Tabla 12.** Valores de concentración de radón en unidades de Bq/m<sup>3</sup>- estación Parques - Volcán Galeras, de 2023

| Valor    | Noviembre | Diciembre |
|----------|-----------|-----------|
| Mínimo   | 22719     | 16449     |
| Promedio | 36983     | 36534     |
| Máximo   | 53499     | 59959     |

De las gráficas y tablas correspondientes a las concentraciones de radón en el volcán Galeras, se observan oscilaciones que probablemente están relacionadas con factores diferentes a la actividad volcánica, ya que la actividad sísmica y de deformación presentan niveles bajos en el periodo evaluado.

#### **1.5.1.2. Estación Térmica Deformes**

Estación por fuera.

#### **1.5.1.3. Estación Térmica Paisita**

Estación por fuera.

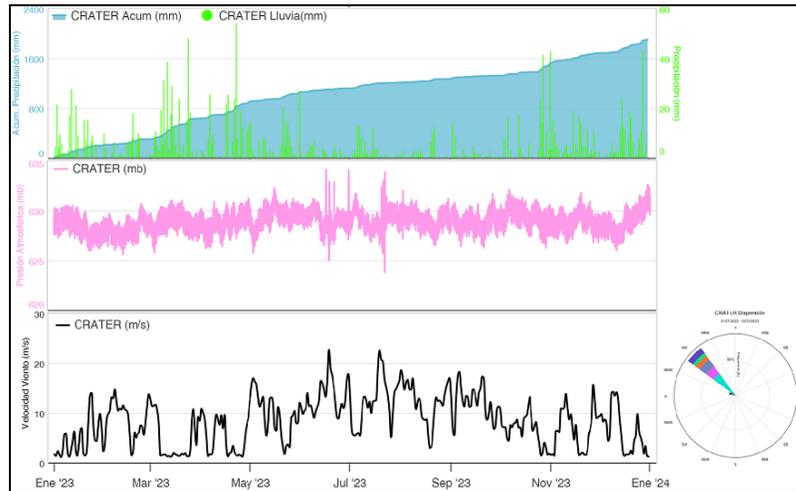
#### **1.5.1.4. Muestreo de aguas en fuentes termales-Volcán Galeras**

No se realizó muestreo en este periodo.

#### **1.5.1.5. Estación climatológica de Cráter**

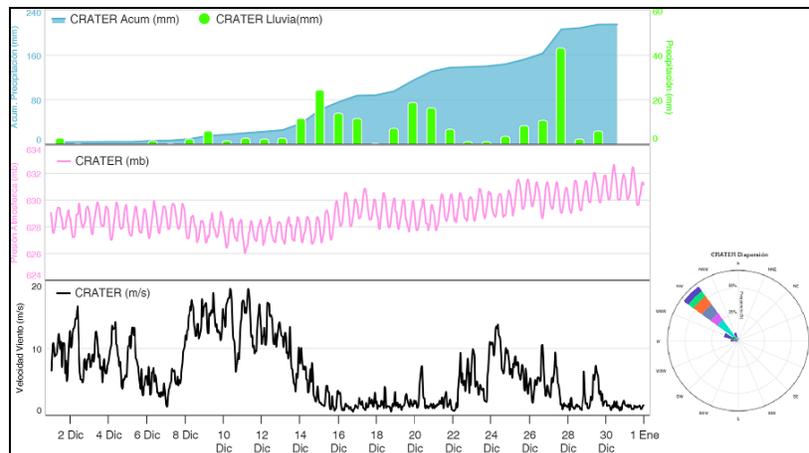
Los parámetros climatológicos se evalúan con base en los registros de la estación climatológica Cráter ubicada en la parte alta del volcán Galeras. Esta estación cuenta con un sensor para estimar la pluviosidad de la zona, sensor de medición de la presión atmosférica en el sitio y dos sensores más para medición de los parámetros de velocidad y dirección del viento.

Las mediciones de pluviosidad, para el periodo entre enero y diciembre de 2023 registraron lluvias fuertes entre marzo y mayo y posteriormente desde finales de octubre y hasta finales de diciembre se muestran lluvias moderadas. El acumulado de precipitación entre enero y diciembre fue de 1.896 mm (Figura 25), mientras que el acumulado, solo para el mes de diciembre fue de 214 mm (Figura 26); los valores de presión atmosférica, durante el transcurso del 2023 este parámetro ha mantenido un valor promedio de alrededor de 629 mbar, con variaciones día-noche de alrededor de 2 mbar (Figuras 25 y 26); valores que se mantienen hasta finales del 2023. En cuanto a los reportes de velocidad del viento, los meses con valores más bajos fueron enero abril y algunos días de mayo, con valores entre 1.1 y 6 m/s, en tanto que entre junio y octubre los valores estuvieron entre 1.1 y 22.7 m/s y los valores entre noviembre y diciembre estuvieron entre 1.5 y 15.0 m/s (Figuras 25 y 26). En general la dirección de dispersión predominante del viento en el año ha sido 315°NW (Figuras 25 y 26).

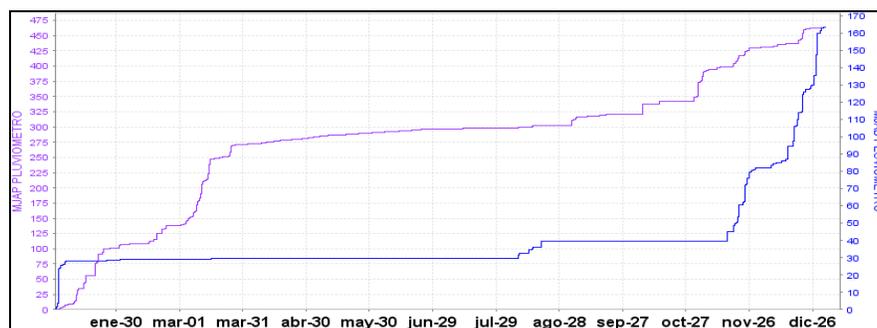


**Figura 25.** Comportamiento de los parámetros climatológicos evaluados con la estación Cráter que corresponden a pluviosidad (verde): acumulado de lluvias (azul); presión atmosférica (magenta); velocidad del viento (negro); rosa de los vientos con dirección de dispersión de los vientos en la zona; entre enero y diciembre de 2023

El registro de lluvias, a partir de los sensores ubicados en las estaciones de Mijitayo Alto (MJAP) y Mijitayo Bajo (MJAB), en la parte alta y media del volcán Galeras, muestran en MJAP dos periodos de lluvias fuertes; la primera entre enero y el 25 de marzo y la segunda entre el 2 de septiembre y finales del 2023; el total de lluvias durante el 2023 en MJAP fue de 463 mm. En la estación MJAB se identifican tres periodos importantes; el primero en enero, el segundo, a mediados de agosto y el tercero desde el 15 de noviembre hasta finales de diciembre; el total de lluvia acumulada en este pluviómetro fue de 163 mm (Figura 27).



**Figura 26.** Comportamiento de los parámetros climatológicos evaluados con la estación Cráter que corresponden a pluviosidad (verde): acumulado de lluvias (azul); presión atmosférica (magenta); velocidad del viento (negro); rosa de los vientos con dirección de dispersión de los vientos en la zona; en diciembre de 2023



**Figura 27.** Comportamiento del parámetro de pluviosidad, evaluado en las estaciones MJAP y MJAB, para el periodo entre enero y diciembre de 2023

#### 1.5.1.6. Dióxido de azufre- $SO_2$

No se ha detectado emisiones de  $SO_2$

#### 1.6. Actividad Superficial

La actividad superficial se documentó a partir de observaciones directas desde la cima del OVSP, de los reportes de las comisiones de personal de campo, y de videos e imágenes de las cámaras instaladas en el OVSP, Consacá, Barranco y Bruma.

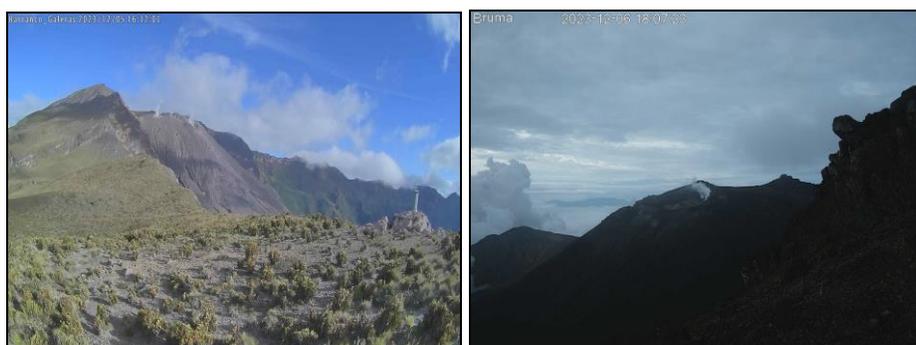
Durante los 2, 4, 5, 6, 7, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22 y 23 del mes de diciembre del 2023, se observó emisión de gases desde las cámaras web de Barranco y Bruma.

Los principales focos de emisión se ubican en el cráter principal, campos fumarólicos de El Paisita al norte del cono activo y el cráter secundario de Las Chavas al occidente del cono volcánico, son columnas de color blanco, poca altura y dispersión variable por acción del viento.

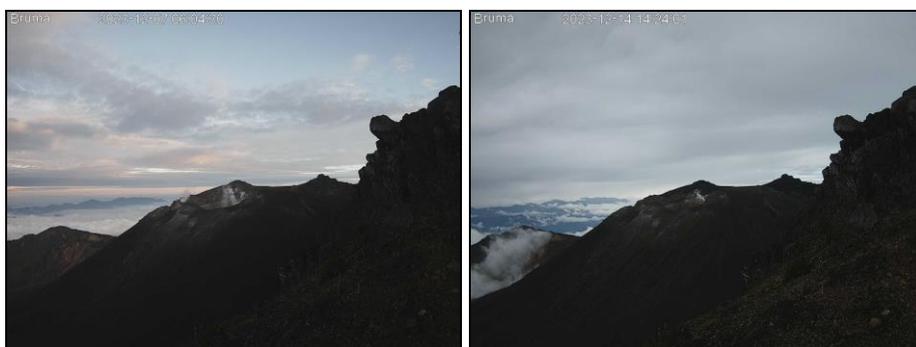
En las Figuras 28 a 34 se presentan algunas imágenes asociadas a procesos de emisión de gases de Galeras.



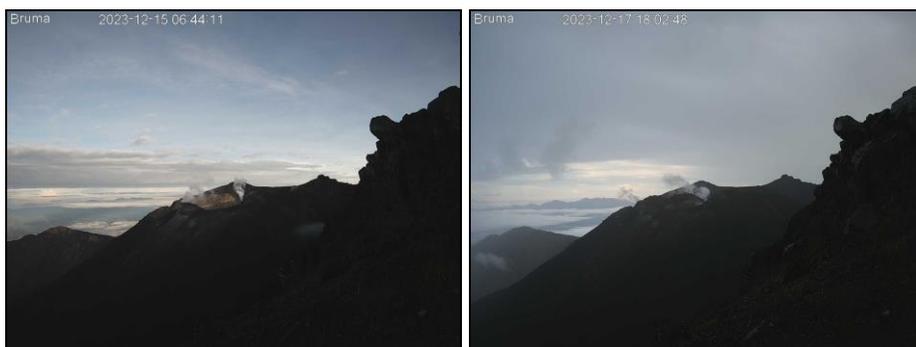
**Figura 28.** Registro fotográfico de la emisión de gases observada desde la cámara ubicada en el sector de Barranco el día 2 de diciembre de 2023 a las 10: 26 a.m., (izquierda) y desde Bruma el día 4 de diciembre a las 12:18 a.m., (derecha)



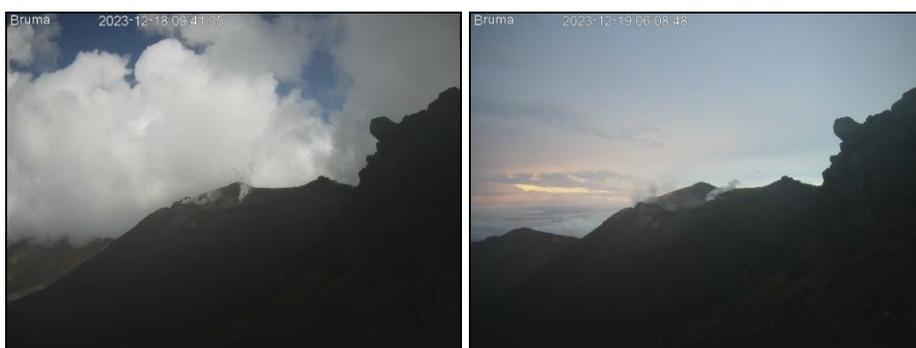
**Figura 29.** Registro fotográfico de la emisión de gases observada desde la cámara ubicada en el sector de Barranco el día 5 de diciembre de 2023 a las 4: 12 p.m., (izquierda) y desde Bruma el día 6 de diciembre a las 6:07 p.m., (derecha)



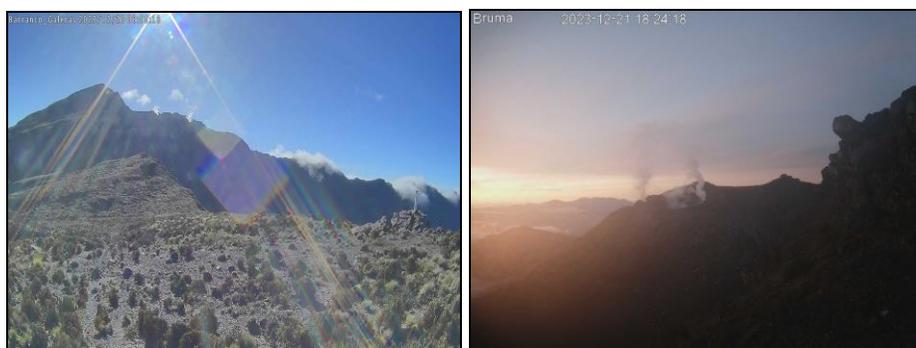
**Figura 30.** Registro fotográfico de la emisión de gases observada desde la cámara ubicada en el sector de Bruma el día 7 de diciembre de 2023 a las 6: 04 a.m., (izquierda) y el día 14 de diciembre 2023 a las 2: 24 p.m., (derecha)



**Figura 31.** Registro fotográfico de la emisión de gases observada desde la cámara ubicada en el sector de Bruma el día 15 de diciembre de 2023 a las 6: 44 a.m., (izquierda) y el día 17 de diciembre 2023 a las 6: 02 p.m., (derecha)



**Figura 32.** Registro fotográfico de la emisión de gases observada desde la cámara ubicada en el sector de Bruma el día 18 de diciembre de 2023 a las 9: 41 a.m., (izquierda) y el día 19 de diciembre 2023 a las 6: 08 a.m., (derecha)



**Figura 33.** Registro fotográfico de la emisión de gases observada desde la cámara ubicada en el sector de Barranco el día 20 de diciembre de 2023 a las 8: 00 a.m., (izquierda) y desde Bruma el día 21 de diciembre a las 6:24 p.m., (derecha)



**Figura 34.** Registro fotográfico de la emisión de gases observada desde la cámara ubicada en el sector de Bruma el 22 de diciembre de 2023 a las 5:56 a.m. (izquierda) y desde Barranco el 23 de diciembre de 2023 a las 7:00 a.m. (derecha)

### 1.7. Conclusiones

- En diciembre 2023 en el volcán Galeras se registró un leve incremento en la ocurrencia y disminución en la energía sísmica; en su gran mayoría los sismos fueron asociados con fractura de material cortical, con magnitud local máxima de 1.6.
- Los registros de concentración de gas radón Rn 222, muestran estabilidad en el periodo de evaluación, en consistencia con los bajos niveles de actividad sísmica y deformación.
- La evaluación de la actividad del volcán Galeras en diciembre 2023 permitió mantener el estado de **ALERTA AMARILLA** 🟡 : “Volcán activo con cambios en el comportamiento del nivel base de los parámetros monitoreados y otras manifestaciones”.

## 2. Actividad del volcán Cumbal – diciembre de 2023

### 2.1. Red de Vigilancia

En diciembre de 2023 la red de vigilancia del complejo volcánico de Cumbal estuvo conformada por:

- Cinco estaciones sísmicas telemétricas: Tres de banda ancha y dos de corto periodo, todas ellas triaxiales (Figura 35, Tabla 13).
- Un sensor de presión acústica ubicado en el sitio de la estación sismológica La Mesa (Figura 35).
- Tres cámaras de video permanente para observación y seguimiento de la actividad superficial, una instalada en el municipio de Cumbal, otra en el sitio de la estación Punta Vieja y otra, en el sector del Boliche (Figura 35).
- Cuatro inclinómetros electrónicos telemétricos, dispuestos para el seguimiento de los cambios en superficie (Figura 36, Tabla 13).

- Muestreo geoquímico de aguas en cinco manantiales termales y muestreo de gases en 12 campos fumarólicos.

Para el periodo evaluado las estaciones telemétricas tuvieron en promedio un porcentaje de funcionamiento del 98% (Figura 37).

**Tabla 13.** Estaciones que conformaron la red de vigilancia de la actividad del complejo volcánico de Cumbal en diciembre de 2023

| Estación      | Código | Transmisión de Datos | Tipo de Sensor           | Componente     | Distancia al Cráter Mundo Nuevo [Km] | Ubicación respecto al Cráter Mundo Nuevo | Altitud [m] |
|---------------|--------|----------------------|--------------------------|----------------|--------------------------------------|--|-------------|
| La Nieve      | NIEP   | Digital              | Sismómetro Banda Ancha   | Triaxial       | 0,2                                  | E  | 4696        |
| Limonos       | LIMP   | Digital              | Sismómetro Corto periodo | Triaxial       | 1,5                                  | SE                                       | 4232        |
| Punta Vieja   | VIEP   | Digital              | Sismómetro Banda Ancha   | Triaxial       | 2,0                                  | NE                                       | 4519        |
| La Mesa       | MESP   | Digital              | Sismómetro Corto periodo | Triaxial       | 2,5                                  | ESE                                      | 4270        |
| Agua Colorada | ACOP   | Digital              | Sismómetro Banda Ancha   | Triaxial       | 6,1                                  | ESE                                      | 3505        |
| La Nieve      | NIEP   | Digital              | Inclinómetro Electrónico | Biaxial        | 0,2                                  | E  | 4696        |
| Limonos       | LIMP   | Digital              | Inclinómetro Electrónico | Biaxial        | 1,5                                  | SE                                       | 4232        |
| Punta Vieja   | VIEP   | Digital              | Inclinómetro Electrónico | Biaxial        | 2,0                                  | NE                                       | 4519        |
| La Mesa       | MESP   | Digital              | Inclinómetro Electrónico | Biaxial        | 2,5                                  | ESE                                      | 4270        |
| La Mesa       | MESP   | Digital              | Sensor de Infrasonido    | Unidireccional | 2,5                                  | ESE                                      | 4270        |

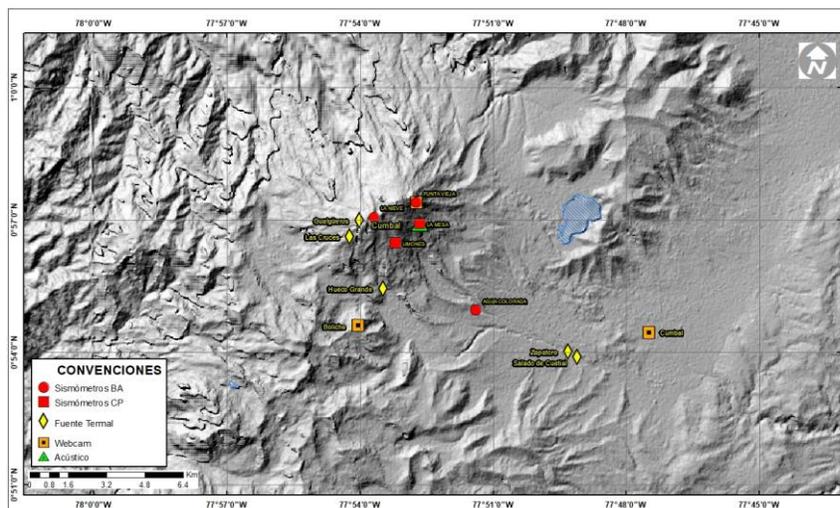


Figura 35. Mapa de localización de las estaciones telemétricas y no telemétricas que hacen parte de la red de monitoreo del complejo volcánico de Cumbal durante diciembre de 2023

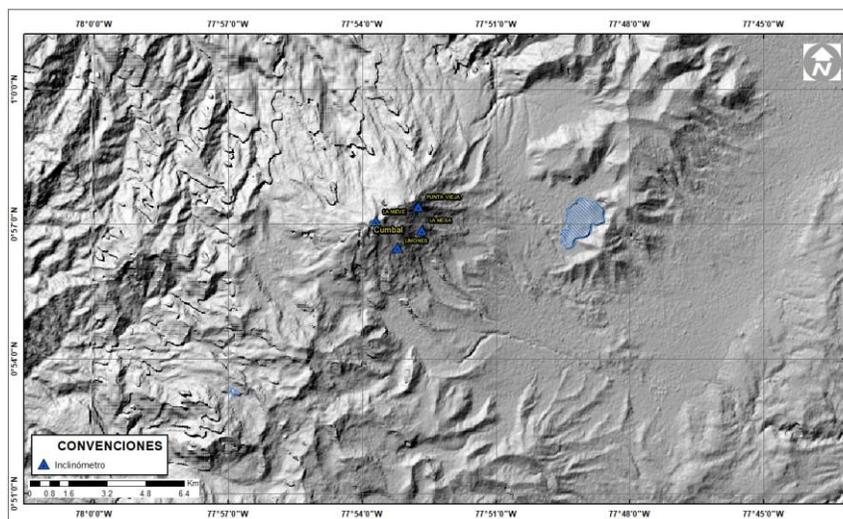
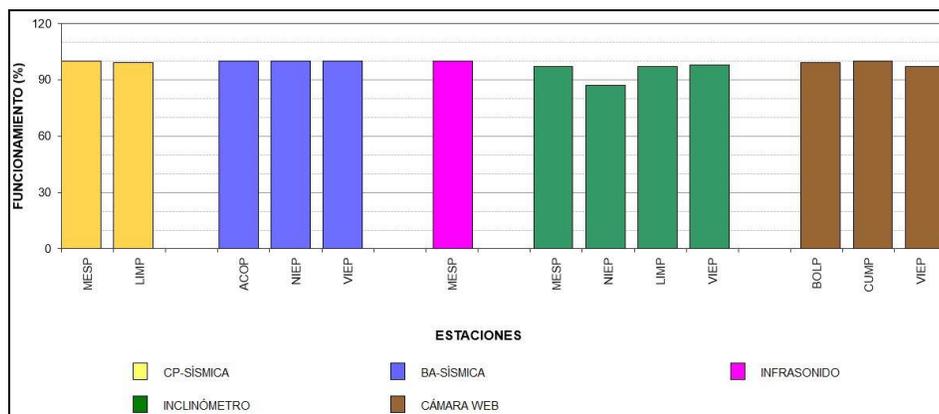


Figura 36. Mapa de localización de las estaciones de deformación volcánica, inclinómetros electrónicos que forman parte de la red de vigilancia del Complejo Volcánico de Cumbal para el mes de diciembre de 2023



**Figura 37.** Histograma del porcentaje de funcionamiento de las estaciones telemétricas que conformaron la red de monitoreo del complejo volcánico de Cumbal en diciembre de 2023

## 2.2. Sismología

La ocurrencia sísmica de diciembre en el complejo volcánico de Cumbal (CVC) incrementó 2.5 veces su valor, pasando de 1050 a 2654 eventos, con respecto al mes anterior. Los sismos asociados con fractura de roca de material cortical (VT) proporcionaron la mayor ocurrencia con 2223 eventos que equivalen al 84%; seguida de 263 sismos asociados con tránsito de fluidos al interior de los conductos volcánicos de fuente transitoria (LP), que equivalen al 10%; seguida de 154 episodios de tremor (TRE) que equivalen al 6% y solamente se registraron 14 eventos de tipo híbrido (HIB) que equivalen al 1% del total (Tabla 14, Figura 38). El pico de ocurrencia se registró el 21 de diciembre con 198 eventos (181 VT, 13 LP y 4 TRE).

**Tabla 14.** Número de sismos volcánicos por tipo en el CVC, noviembre y diciembre 2023

| Periodo<br>Evaluado | Número de eventos por tipo |     |     |     |       |
|---------------------|----------------------------|-----|-----|-----|-------|
|                     | VT                         | LP  | TRE | HIB | TOTAL |
| Noviembre 2023      | 971                        | 74  | 1   | 4   | 1050  |
| Diciembre 2023      | 2223                       | 263 | 154 | 14  | 2654  |

En el CVC la energía sísmica incrementó 49 veces su valor, pasando de  $5.93 \times 10^9$  ergios a  $2.90 \times 10^{11}$  ergios. La sismicidad asociada con tránsito de fluidos de fuente transitoria (LP) produjo el mayor aporte energético con  $1.42 \times 10^{11}$  ergios, equivalente al 49%; seguida de la energía de los eventos de fractura VT con  $1.41 \times 10^{11}$  ergios, que equivalen al 48%; los episodios de tremor registraron una energía de  $7.02 \times 10^9$  ergios, que equivale al 2% y los eventos de tipo híbrido registraron una energía de  $4.20 \times 10^8$  ergios (Tabla 15, Figura 39). El pico energético se registró el 11 de diciembre con  $1.39 \times 10^{11}$  ergios, debida a 59 eventos (50 VT, 7 LP, 1 TRE y 1 HIB).

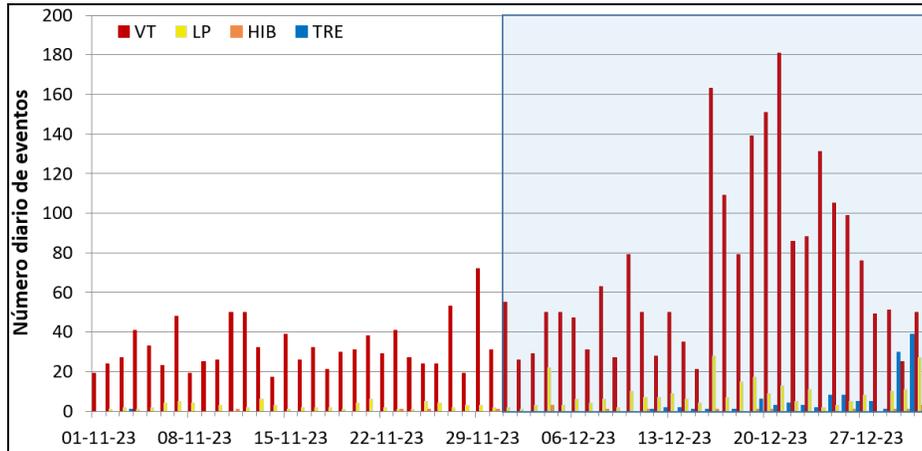


Figura 38. Ocurrencia diaria de sismos volcánicos por tipo en el CVC, durante noviembre y diciembre 2023. El recuadro indica el periodo evaluado

Tabla 15. Energía de eventos volcánicos por tipo en el CVC, noviembre y diciembre 2023

| Periodo Evaluado | Energía de eventos volcánicos por tipo |          |          |          |          |
|------------------|--|----------|----------|----------|----------|
|                  | VT                                     | LP       | TRE      | HIB      | TOTAL    |
| Noviembre 2023   | 5.10E+09                               | 8.13E+08 | 7.97E+06 | 9.18E+06 | 5.93E+09 |
| Diciembre 2023   | 1.41E+11                               | 1.42E+11 | 7.02E+09 | 4.20E+08 | 2.90E+11 |

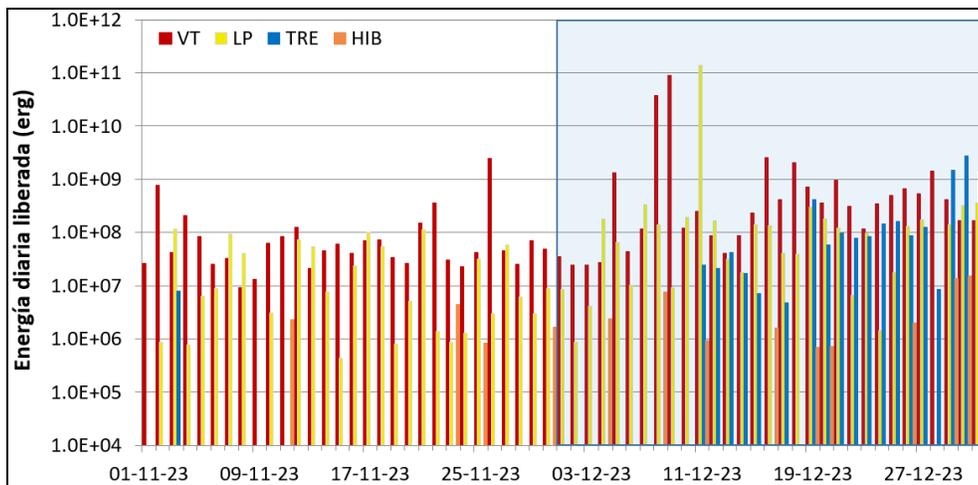


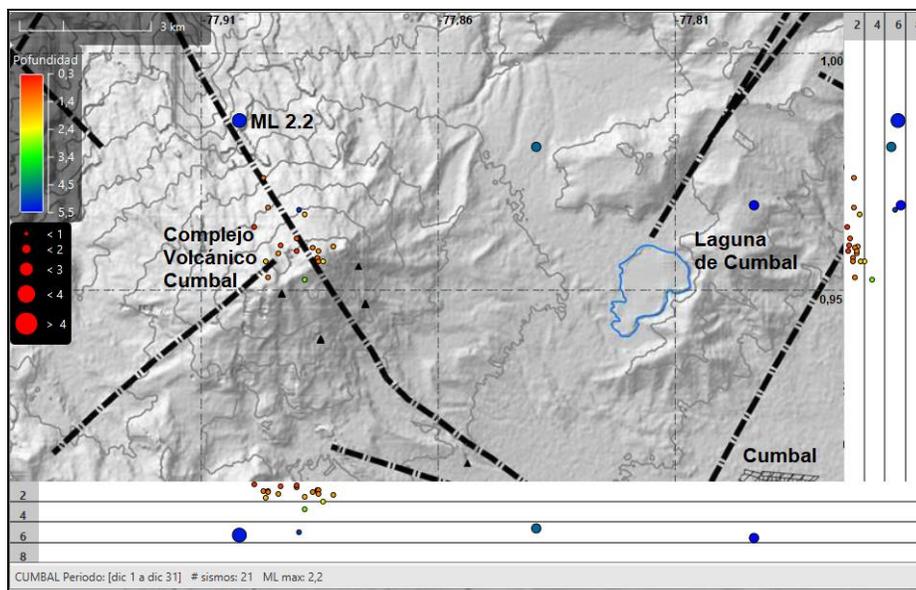
Figura 39. Energía diaria liberada de eventos volcánicos por tipo, registrados en el CVC durante noviembre y diciembre 2023; el recuadro indica el periodo evaluado

Fueron localizados 21 sismos la mayoría de baja energía y ubicados en inmediaciones de los cráteres activos de La Plazuela al noreste del CVC y Mundo Nuevo al suroccidente del CVC (Figura 40), en distancias entre 0.2 y 2 km, con profundidades menores de 2 km con respecto a la altura de referencia (4700 m). Tres sismos se ubicaron dispersos en la región volcánica en distancias entre 3.7 y 9.7 km, con profundidades entre 4 y 6 km con respecto a la altura de

referencia (4700 m) y magnitud local máxima de 2.2 sin reporte de sismo sentido. La magnitud local de los sismos es pequeña, pues son eventos de baja energía, solamente se destacan los eventos con magnitud local de 2.0 y 2.2, el primero ubicado a 9.7 km al oriente del cráter La Plazuela y el segundo ubicado a 3.7 km al noroccidente del cráter La Plazuela y sus características de localización se muestran en la Tabla 16. Ninguno de estos eventos se reportó sentido.

**Tabla 16.** Sismos con ML de 2.0 y 2.2 en el CVC, diciembre 2023

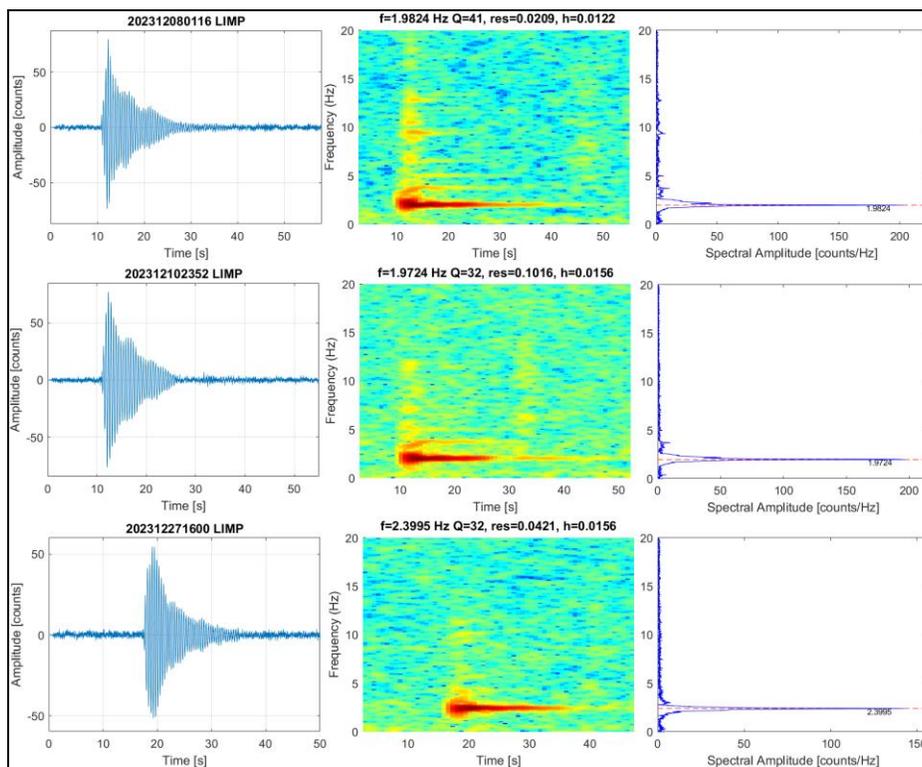
| Fecha     | Hora local | Latitud | Longitud | Prof. Km | ML  |
|-----------|------------|---------|----------|----------|-----|
| 8/12/2023 | 18:11:26   | 0.9680  | -77.7965 | 6        | 2.0 |
| 9/12/2023 | 14:41:04   | 0.9855  | -77.9022 | 5        | 2.2 |



**Figura 40.** Sismos localizados en el CVC, diciembre 2023

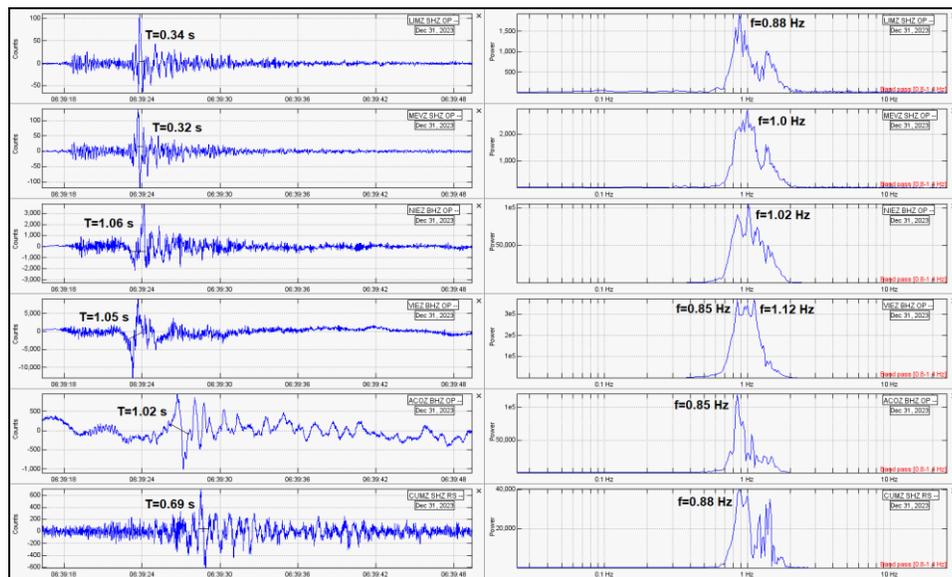
En el CVC se registraron 12 eventos tipo Tornillo (TOR) de baja energía en diciembre, caracterizados por el decaimiento lento de su coda y espectros en frecuencia con uno o varios picos. A manera de ejemplo, en la Figura 41 se muestra la señal, el espectrograma y el espectro de tres eventos TOR, en la componente vertical de la estación Limones del CVC. Los espectros en frecuencia de estos eventos muestran un pico dominante en 2.0 Hz y 2.4 Hz (Figura 41). Otros eventos TOR muestran el pico dominante en 2.2 y 2.6 Hz y algunos muestran adicionalmente otros picos frecuenciales en 3.8, 5.0, 5.6 y 6.5 Hz.

La energía de los eventos TOR de diciembre en el CVC alcanzó un valor de  $1.40 \times 10^{11}$  ergios. Las señales sísmicas y los componentes espectrales de los eventos tipo TOR del CVC indican que están asociados con movimiento de fluidos que implican resonancia en los conductos volcánicos que los contienen, relacionados principalmente con el sistema hidrotermal del CVC.



**Figura 41.** Sismogramas, espectrogramas y espectros en frecuencia de tres eventos TOR de diciembre 2023 en la componente vertical de la estación Limones del CVC

En diciembre en el CVC se registraron 8 eventos asociados con movimiento de fluidos de fuente transitoria que presentan muy baja frecuencia, denominados VLP. En la Figura 42 se muestra el sismograma y el espectro en frecuencia del evento registrado el 31 de diciembre a la 01:39 a.m. (06:39 UTC), en la componente vertical de 6 estaciones ubicadas en el complejo volcánico a distancias entre 0.7 y 7 km; este evento mostró un pico dominante en las bajas frecuencias entre 0.85 y 1.12 Hz, el periodo en las estaciones de banda ancha es de 1 segundo; una localización aproximada con primeros arribos lo ubica a 0.3 km al occidente suroccidente del cráter La Plazuela con profundidad menor de 2 km. La energía de los eventos VLP de diciembre en el CVC alcanzó un valor de  $2.48 \times 10^{08}$  ergios.



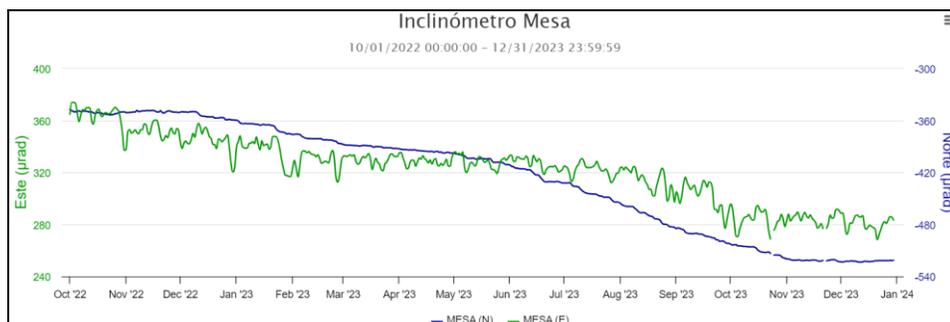
**Figura 42.** Sismogramas y espectro en frecuencia del evento VLP del 31 de diciembre a las 01:39 am, en la componente vertical de algunas estaciones sísmicas del CVC

### 2.3. Deformación

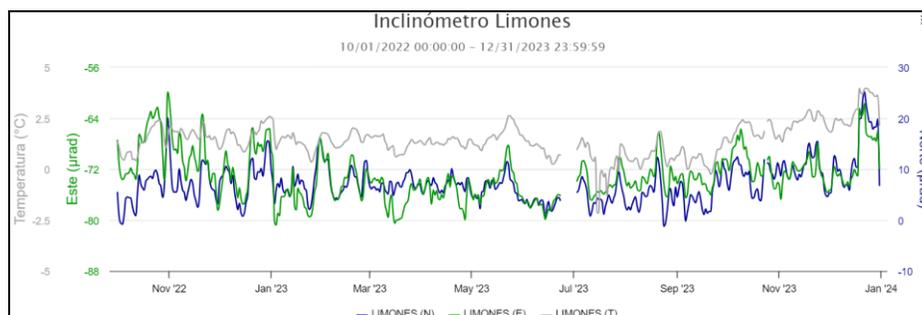
Para el periodo evaluado, la red de deformación estuvo conformada por cuatro inclinómetros electrónicos. El 21 de noviembre de 2023 se realizó mantenimiento correctivo en la estación La Nieve recuperando el registro del inclinómetro electrónico.

#### 2.3.1. Inclinometría Electrónica

El 22 de noviembre de 2023 en mantenimiento preventivo en la estación multiparámetro La Mesa se niveló el sensor de inclinometría, observando estabilidad posterior a las tendencias descendentes que se tenía en las componentes tanto Norte, como Este (Figura 43). Las otras tres estaciones de inclinometría que conforman la red de deformación presentan estabilidad, algunas de las variaciones en los registros están asociados a las fluctuaciones de temperatura imperantes en la zona. A manera de ejemplo en la Figura 44 se presentan las series temporales de las componentes Norte y Este del inclinómetro electrónico Limones.



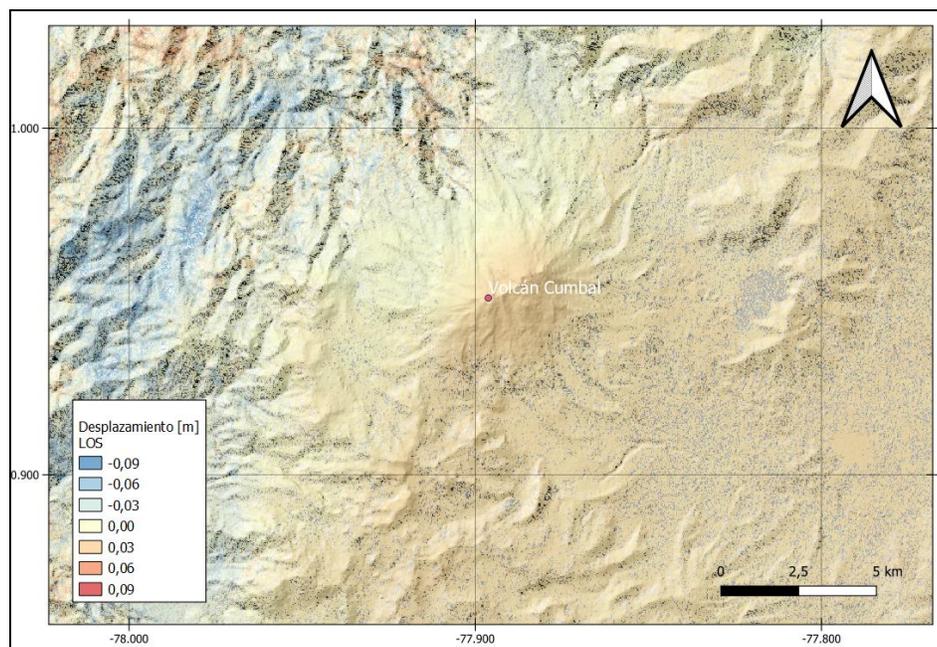
**Figura 43.** Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) del inclinómetro electrónico La Mesa, instalado en el complejo volcánico de Cumbal, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 31 de diciembre de 2023



**Figura 44.** Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) y registro de temperatura del inclinómetro electrónico Limones, instalado en el complejo volcánico de Cumbal, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 31 de diciembre de 2023

### 2.3.2. D\_InSAR

En la Figura 45, se muestra el mapa de desplazamiento para la zona volcánica de Cumbal obtenido con procesamiento interferométrico diferencial, utilizando el software ISCE haciendo uso de un par de imágenes de Radar de Apertura Sintética Sentinel -1 de la Agencia Espacial Europea (ESA) de orbita descendente. Para el periodo evaluado con esta técnica de procesamiento no se observa ningún patrón de deformación.



**Figura 45.** Desplazamientos calculados con la técnica D-InSAR para el par interferométrico del 3 y el 15 de diciembre de 2023, imágenes Sentinel-1, órbita descendente. Área del Complejo volcánico Cumbal

## 2.4. Electromagnetismo

Cumbal no cuenta con monitoreo electromagnético.

## 2.5. Geoquímica

### 2.5.1. Muestreo de aguas en fuentes termales

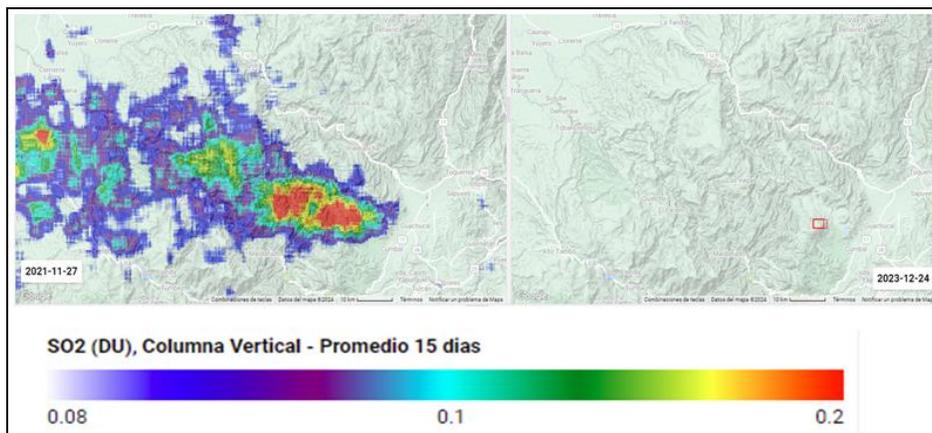
En el mes de diciembre no se realizó esta actividad.

### 2.5.2. Estimación cualitativa de emisiones de Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)

El satélite Sentinel-5 Precursor (S-5P), lanzado en el año 2017 por la Agencia Espacial Europea (ESA) para monitorear la calidad del aire, cuenta con el instrumento TROPOMI (Instrumento de Monitoreo TROPOsférico), el cual es un sensor multiespectral que registra concentraciones de ozono, metano, formaldehído, aerosol, monóxido de carbono, óxido de nitrógeno y dióxido de azufre (Google Earth Engine, 2018). Dado que permite realizar estimaciones de SO<sub>2</sub>, actualmente se realiza seguimiento a los registros obtenidos mediante este satélite en la zona del Complejo Volcánico de Cumbal (CVC) a través de la aplicación “Explorador TROPOMI Latinoamérica - 15 días” desarrollada por el ingeniero Carlos Laverde del SGC (Laverde, 2020).

En la Figura 46 se muestra el comportamiento de las emisiones de SO<sub>2</sub>, en la imagen de la izquierda se presenta las estimaciones para el periodo del 7 al 21 de noviembre con fecha

central en 15 de noviembre de 2021, se muestra este periodo porque fue uno de los cuales las emisiones de SO<sub>2</sub> se alcanzaron a detectar mediante esta metodología. En la imagen de la derecha se observa las imágenes de los últimos 15 días del mes de diciembre de 2023, en la que no se observa detección de este gas en el rango 0.08 a 0.2 unidades Dobson (DU).

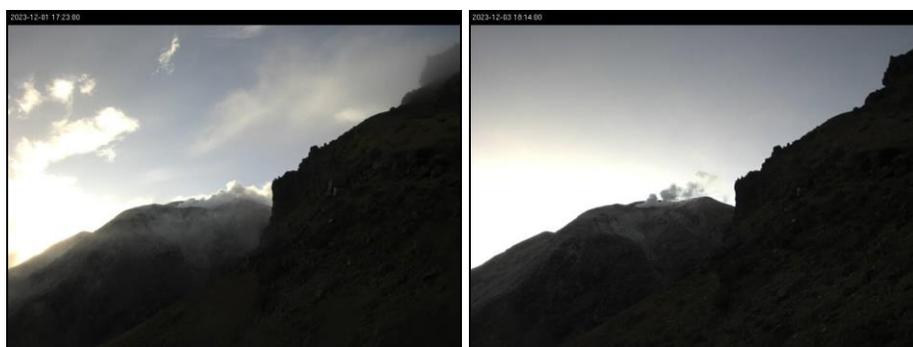


**Figura 46.** Estimación cualitativa de SO<sub>2</sub> obtenido con la aplicación TROPOMI para los últimos 15 días de diciembre de 2023, el cuadrado de color rojo indica la ubicación del CVC. En la parte inferior se muestra las unidades de medida (DU) y su representación con la respectiva escala de colores

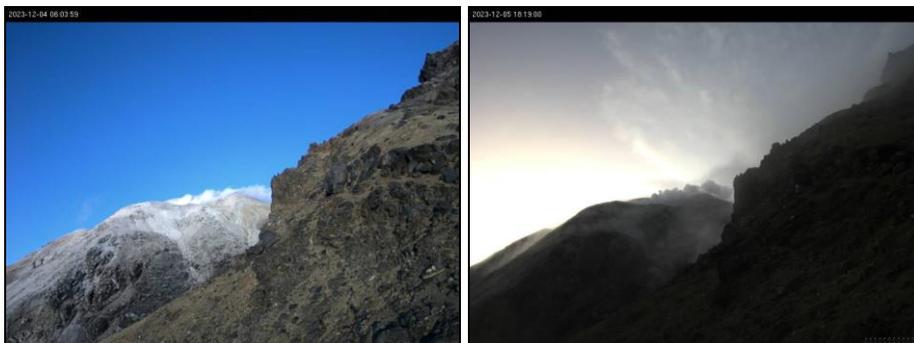
## 2. 6. Actividad Superficial

Los días 1, 3, 5, 7, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 24 y 25 de diciembre de 2023, con las cámaras web de Cumbal y del Boliche se observaron emisiones de gases desde el campo fumarólico El Verde, con pequeñas columnas de gas de color blanco y dispersión variable por acción del viento.

En las Figuras 47 a 54 se presentan algunas imágenes asociadas a procesos de emisión de gases del complejo volcánico de Cumbal.



**Figura 47.** Imágenes de la emisión de gases ocurrida en el Complejo Volcánico de Cumbal captadas por la cámara ubicada en el sector del Punta Vieja el 1 de diciembre de 2023 a las 5: 23 p.m. (izquierda) y el 3 de diciembre de 2023 a las 6: 14 p.m. (derecha)



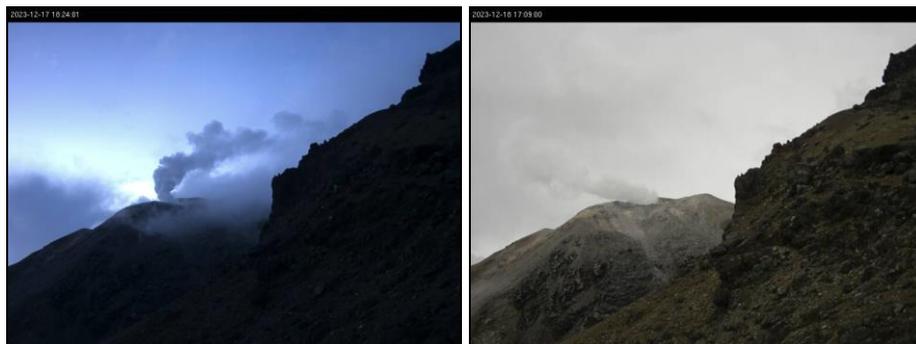
**Figura 48.** Imágenes de la emisión de gases ocurrida en el Complejo Volcánico de Cumbal captadas por la cámara ubicada en el sector del Punta Vieja el 4 de diciembre de 2023 a las 6: 03 a.m. (izquierda) y el 5 de diciembre de 2023 a las 6: 19 p.m. (derecha)



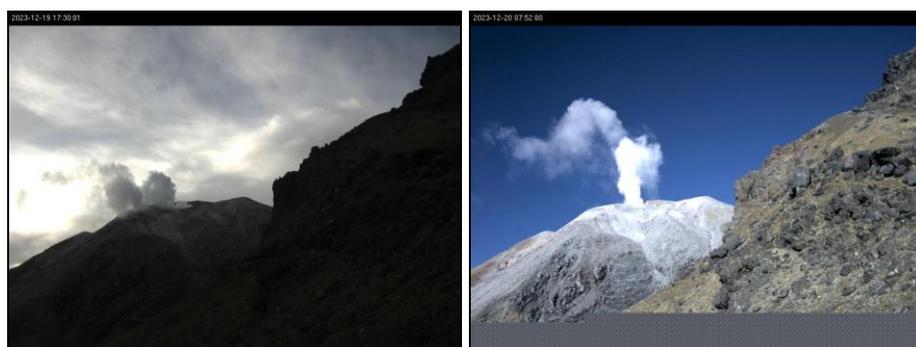
**Figura 49.** Imágenes de la emisión de gases ocurrida en el Complejo Volcánico de Cumbal captadas el 7 de diciembre de 2023 por la cámara ubicada en el sector de Bolicho a las 5: 47 a.m., (izquierda) y punta vieja el día 14 de diciembre de 2023 a las 5: 57 p.m., (derecha)



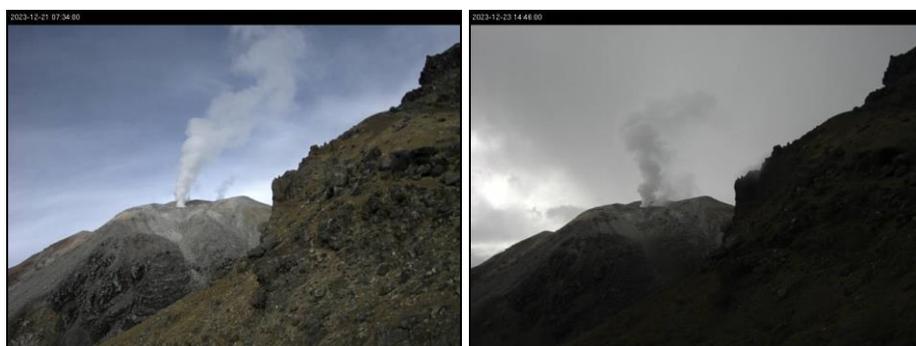
**Figura 50.** Imágenes de la emisión de gases ocurrida en el Complejo Volcánico de Cumbal captadas por la cámara ubicada en el sector del Punta Vieja el 15 de diciembre de 2023 a las 5: 29 p.m. (izquierda) y el 16 de diciembre de 2023 a las 5: 22 p.m. (derecha)



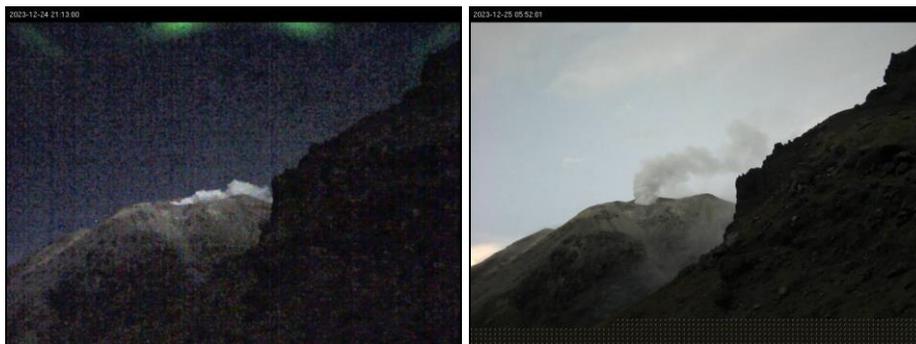
**Figura 51.** Imágenes de la emisión de gases ocurrida en el Complejo Volcánico de Cumbal captadas por la cámara ubicada en el sector del Punta Vieja el 17 de diciembre de 2023 a las 6: 24 p.m. (izquierda) y el 18 de diciembre de 2023 a las 5: 09 p.m. (derecha)



**Figura 52.** Imágenes de la emisión de gases ocurrida en el Complejo Volcánico de Cumbal captadas por la cámara ubicada en el sector del Punta Vieja el 19 de diciembre de 2023 a las 5: 30 p.m. (izquierda) y el 20 de diciembre de 2023 a las 7: 52 a.m. (derecha)



**Figura 53.** Imágenes de la emisión de gases ocurrida en el Complejo Volcánico de Cumbal captadas por la cámara ubicada en el sector del Punta Vieja el 21 de diciembre de 2023 a las 7: 34 a.m. (izquierda) y el 23 de diciembre de 2023 a las 2: 46 p.m. (derecha)



**Figura 54.** Imágenes de la emisión de gases ocurrida en el Complejo Volcánico de Cumbal captadas por la cámara ubicada en el sector del Punta Vieja el 24 de diciembre de 2023 a las 9: 13 p.m. (izquierda) y el 25 de diciembre de 2023 a las 5: 52 a.m. (derecha)

## 2.7. Conclusiones

- Mediante la aplicación “Explorador TROPOMI Latinoamérica - 15 días”, para el periodo evaluado no se observa detección de emisiones de SO<sub>2</sub> desde el Complejo Volcánico de Cumbal.
- En el Complejo Volcánico de Cumbal (CVC) en diciembre se registró incremento en la ocurrencia y en la energía de los sismos, predominando la sismicidad asociada con fractura de roca al interior de la estructura volcánica, destacándose el registro de dos sismos con ML de 2.0 y 2.2, los cuales no se reportaron como sentidos.
- La evaluación de la actividad del CVC en diciembre 2023 permitió mantener el estado de **ALERTA AMARILLA** ■ : “Volcán activo con cambios en el comportamiento del nivel base de los parámetros monitoreados y otras manifestaciones”.

## 3. Actividad de los volcanes Chiles y Cerro Negro de Mayasquer - diciembre de 2023

### 3.1. Ubicación Geográfica

Los volcanes Chiles y Cerro Negro se ubican al suroeste del país, en el departamento de Nariño, en la frontera entre Colombia y Ecuador. Con una altura de 4748 msnm, Chiles se localiza a unos 15.5 Km al suroeste del Complejo Volcánico Cumbal y el volcán Cerro Negro, con una altura de 4470 msnm, se localiza a 16.5 km al suroeste del complejo volcánico Cumbal (Figura 55).

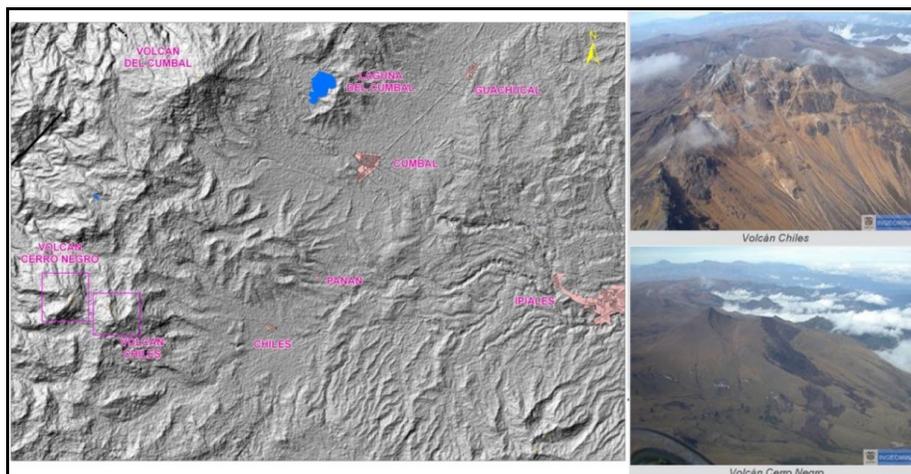


Figura 55. Localización de los volcanes Chiles y Cerro Negro (izquierda) e imágenes de estos (derecha)

### 3.2. Red de Vigilancia

La red de monitoreo de los volcanes Chiles y Cerro Negro para el mes de diciembre de 2023 estuvo conformada por (Figura 56, Tabla 17):

- Nueve estaciones sísmicas de Banda Ancha.
- Un acelerómetro.
- Cuatro inclinómetros electrónicos (Chiles, Morro, Cerro Negro y La Tola).
- Cinco sensores de presión acústica (dos en Canguil, dos en Lagunas y uno en El Moro).
- Una estación para monitoreo y seguimiento de cambios térmicos (En el sector de Rincón Bello).
- Dos estaciones cámaras web (Canguil y Lagunas).
- Seis estaciones GNSS Permanentes (Morro, Canguil, Cerro Negro, Chiles, Tola y Moledora).
- Una termocupla denominada Rincón Bello.

Además, se cuenta con una red de muestreo de aguas en fuentes termales y fuentes frías (Figura 56, Tabla 17).

Informe mensual de actividad de los volcanes Galeras, Cumbal, Chiles – Cerro Negro, Las Ánimas, Doña Juana y Azuftral – diciembre 2023

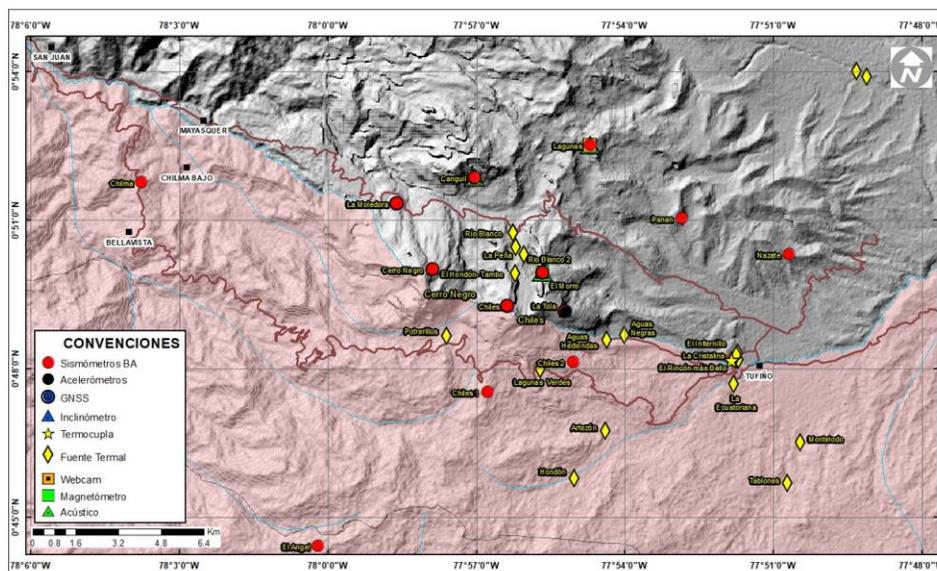


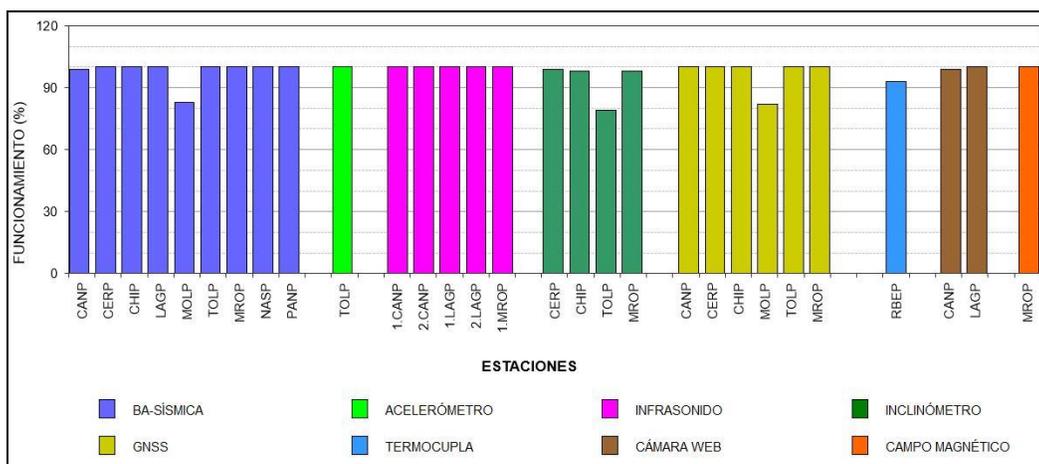
Figura 56. Ubicación de las estaciones telemétricas y no telemétricas que hacen parte de la red de monitoreo de los volcanes Chiles y Cerro Negro para el mes de diciembre de 2023

Tabla 17. Estaciones que conforman la red de vigilancia de la actividad de los volcanes Chiles y Cerro Negro

| Estación    | Código  | Transm. de Datos | Tipo de Sensor           | Componente     | Distancia respecto a Chiles [Km] | Dirección respecto al volcán Chiles | Altitud [m] |
|-------------|---------|------------------|--------------------------|----------------|----------------------------------|-------------------------------------|-------------|
| Chiles      | CHIP    | Digital          | Sismómetro Banda Ancha   | Triaxial       | 1                                | WNW                                 | 4478        |
| Chiles      | CHIP    | Digital          | Inclínómetro Electrónico | Biaxial        | 1                                | WNW                                 | 4478        |
| Chiles      | CHIP    | Digital          | GNSS                     | Triaxial       | 1                                | WNW                                 | 4478        |
| C. Negro    | CERP    | Digital          | Sismómetro Banda Ancha   | Triaxial       | 4                                | WNW                                 | 4216        |
| C. Negro    | CERP    | Digital          | Inclínómetro Electrónico | Biaxial        | 4                                | WNW                                 | 4216        |
| C. Negro    | CERP    | Digital          | GNSS                     | Triaxial       | 4                                | WNW                                 | 4216        |
| Canguil     | CANP    | Digital          | Sismómetro Banda Ancha   | Triaxial       | 5,8                              | NNW                                 | 3788        |
| Canguil     | CANP    | Digital          | GNSS                     | Triaxial       | 5,8                              | NNW                                 | 3788        |
| A. Canguil  | A1.CANP | Digital          | Sensor de Infrasonido    | Unidireccional | 5,8                              | NNW                                 | 3788        |
| A. Canguil  | A2.CANP | Digital          | Sensor de Infrasonido    | Unidireccional | 5,8                              | NNW                                 | 3788        |
| Las Lagunas | LAGP    | Digital          | Sismómetro Banda Ancha   | Triaxial       | 7,1                              | NNE                                 | 4107        |
| Lagunas     | A1.LAGP | Digital          | Sensor de Infrasonido    | Unidireccional | 7,1                              | NNE                                 | 4107        |
| Lagunas     | A2.LAGP | Digital          | Sensor de Infrasonido    | Unidireccional | 7,1                              | NNE                                 | 4107        |
| Panam       | PANP    | Digital          | Sismómetro Banda Ancha   | Triaxial       | 7,4                              | NE                                  | 3750        |
| El Morro    | MROP    | Digital          | Sismómetro Banda Ancha   | Triaxial       | 2,3                              | NNE                                 | 4068        |
| El Morro    | MROP    | Digital          | Inclínómetro Electrónico | Biaxial        | 2,3                              | NNE                                 | 4068        |
| Morro       | MROP    | Digital          | Magnetómetro             | Biaxial        | 2,3                              | NNE                                 | 4068        |

|              |      |         |                          |                |       |     |      |
|--------------|------|---------|--------------------------|----------------|-------|-----|------|
| El Morro     | MROP | Digital | GNSS                     | Triaxial       | 2,3   | NNE | 4068 |
| Moledora     | MOLP | Digital | Sismómetro Banda Ancha   | Triaxial       | 5,1   | NW  | 3362 |
| Moledora     | MOLP | Digital | GNSS                     | Triaxial       | 5,1   | NW  | 3362 |
| La Tola      | TOLP | Digital | Sismómetro Banda Ancha   | Triaxial       | 2,07  | NE  | 4266 |
| La Tola      | TOLP | Digital | Acelerómetro             | Triaxial       | 2,07  | NE  | 4266 |
| La Tola      | TOLP | Digital | Inclinómetro Electrónico | Biaxial        | 2,07  | NE  | 4266 |
| La Tola      | TOLP | Digital | GNSS                     | Triaxial       | 2,07  | NE  | 4266 |
| Nazate       | NASP | Digital | Sismómetro Banda Ancha   | Triaxial       | 10,53 | NNE | 3456 |
| Rincón Bello | RBEP | Digital | Termocupla               | Unidireccional | 8.7   | NE  | 3295 |

En el periodo evaluado, las estaciones de la red telemétrica instalada para el monitoreo de los volcanes Chiles y Cerro Negro presentaron un funcionamiento promedio del 98% (Figura 57).



**Figura 57.** Histograma del porcentaje de funcionamiento de las estaciones que hacen parte de la red telemétrica de monitoreo de los volcanes Chiles y Cerro Negro en diciembre de 2023

### 3.3. Sismología

La ocurrencia sísmica en Chiles y Cerro Negro de Mayasquer en diciembre incrementó 2.1 veces su valor pasando de 14852 a 31358 eventos (Tabla 18, Figura 58). El mayor aporte provino de la sismicidad asociada con fractura de material cortical (VT) con 28988 eventos que representan el 92% del total; seguido de 2266 eventos asociados con movimiento de fluidos de fuente transitoria (LP) que representan el 7%; también se registraron 23 eventos asociados con movimiento de fluidos de fuente transitoria de muy baja frecuencia (VLP), 77 eventos de tipo híbrido (HIB) y 4 episodios de tremor (TRE) (Tabla 18, Figura 58), que en conjunto representan el 1% del total. El pico de ocurrencia sísmica se registró el 11 de diciembre, con 2644 eventos (2615 VT, 27 LP y 2 HIB) (Figura 58).

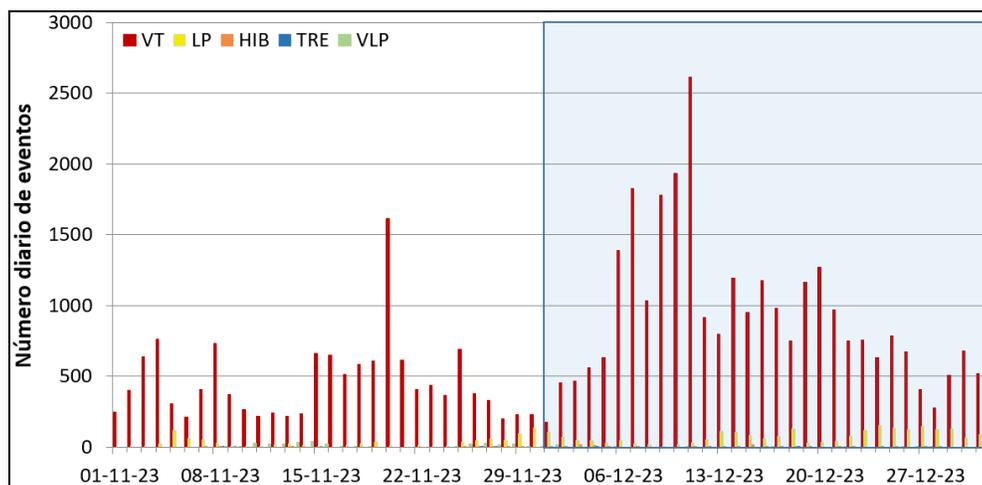
**Tabla 18.** Número de eventos volcánicos por tipo, Chiles - Cerro Negro, noviembre y diciembre 2023

| Periodo Evaluado | Número de eventos por tipo |      |     |     |     |       |
|------------------|----------------------------|------|-----|-----|-----|-------|
|                  | VT                         | LP   | VLP | TRE | HIB | TOTAL |
| Noviembre 2023   | 13711                      | 838  | 277 | 7   | 19  | 14852 |
| Diciembre 2023   | 28988                      | 2266 | 23  | 4   | 77  | 31358 |

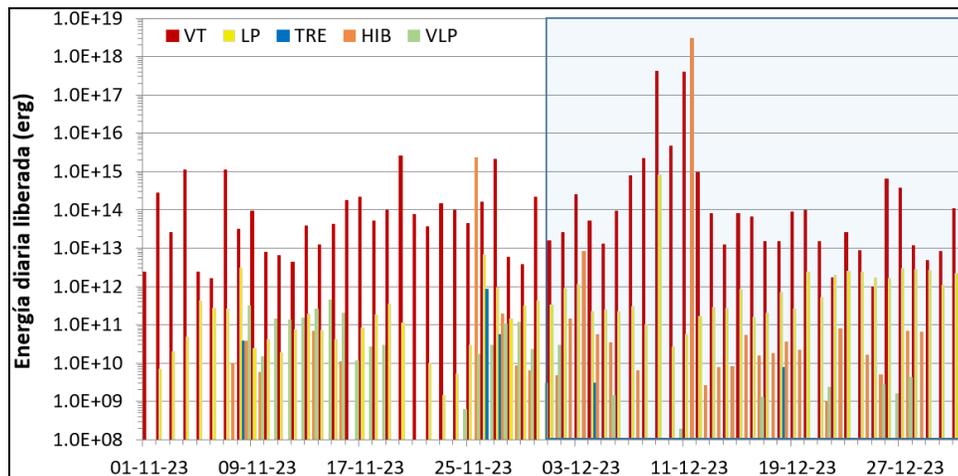
Como en los meses anteriores, la energía sísmica ha venido fluctuando y en diciembre 2023 incrementó 355 veces su valor, al pasar de  $1.09 \times 10^{16}$  ergios a  $3.87 \times 10^{18}$  ergios (Tabla 19, Figura 59), correspondiendo un 79% a la energía de los eventos de tipo híbrido HIB que muestran el efecto simultáneo de los procesos de fractura y tránsito de fluidos en su forma de onda con  $3.04 \times 10^{18}$  ergios y un 21% a la energía de los eventos asociados con fractura de roca VT con  $8.30 \times 10^{17}$  ergios; la energía de los otros tipos de eventos es muy baja en comparación y queda inmersa en el valor de la energía de los VT e HIB (Tabla 19, Figura 59). El pico energético se registró el 11 de diciembre con  $3.44 \times 10^{18}$  ergios, principalmente debida a un sismo híbrido con magnitud local de 4.4 (Figura 59).

**Tabla 19.** Energía de eventos volcánicos por tipo, Chiles - Cerro Negro, noviembre y diciembre 2023

| Periodo Evaluado | Energía de eventos volcánicos por tipo |          |          |          |          |          |
|------------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|
|                  | VT                                     | LP       | VLP      | TRE      | HIB      | TOTAL    |
| Noviembre 2023   | 8.60E+15                               | 1.39E+13 | 2.02E+12 | 9.41E+11 | 2.29E+15 | 1.09E+16 |
| Diciembre 2023   | 8.30E+17                               | 8.48E+14 | 4.58E+10 | 1.08E+10 | 3.04E+18 | 3.87E+18 |

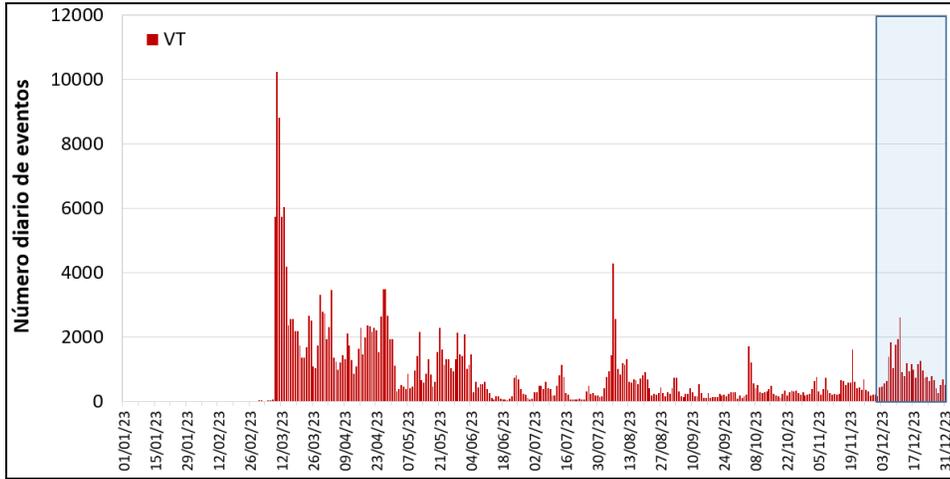


**Figura 58 .** Número diario de sismos en la zona de influencia de los volcanes Chiles y Cerro Negro de Mayasquer, noviembre y diciembre 2023, el recuadro indica el periodo evaluado



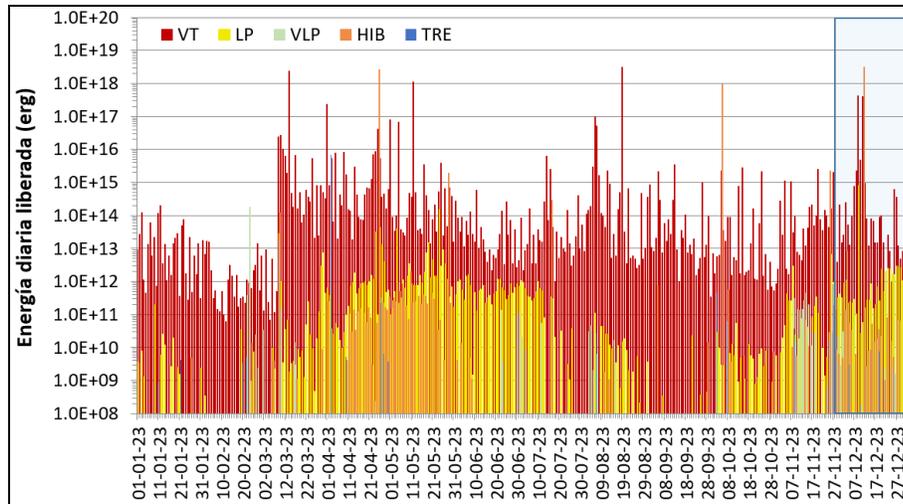
**Figura 59.** Energía sísmica diaria en la zona de influencia de los volcanes Chiles y Cerro Negro de Mayasquer, noviembre y diciembre 2023. El recuadro indica el periodo evaluado

Teniendo en cuenta todo el año 2023 y en especial el periodo entre el 9 de marzo con el inicio del enjambre sísmico mayor, hasta el 31 de diciembre, se ha observado que la ocurrencia y energía de eventos VT disminuyó con respecto al enjambre y después se han presentado fluctuaciones tanto en el número como en la energía diaria; el número total de eventos VT en el año 2023 fue de 283048 con una energía de  $8.11 \times 10^{18}$  ergios (Tabla 20, Figuras 60, 5.2.4, 5.2.5 y 5.2.6), indicando un marcado predominio sobre los otros tipos de eventos. En el año 2023 se ha registrado el mayor número de eventos LP, VLP e HIB en comparación con años anteriores, indicando fluctuación en la ocurrencia y la energía, también se han registrado esporádicamente episodios de Tremor. El número total de eventos LP en 2023 fue de 10663 con una energía de  $1.29 \times 10^{15}$  ergios. En total se registraron 362 VLP con una energía de  $2.02 \times 10^{14}$  ergios. Se registraron 289 eventos que combinan los procesos de fractura y movimiento de fluidos o de tipo híbrido HIB con una energía de  $6.60 \times 10^{18}$  ergios (Tabla 20, Figuras 61, 62 y 63). El registro esporádico de episodios de tremor TRE en el 2023 alcanzó un total de 24 eventos con una energía de  $6.61 \times 10^{15}$  ergios (Tabla 20, Figura 61).



**Figura 60.** Número diario de eventos VT en la zona de influencia de los volcanes Chiles y Cerro Negro de Mayasquer, enero a diciembre del 2023. El recuadro indica el periodo evaluado

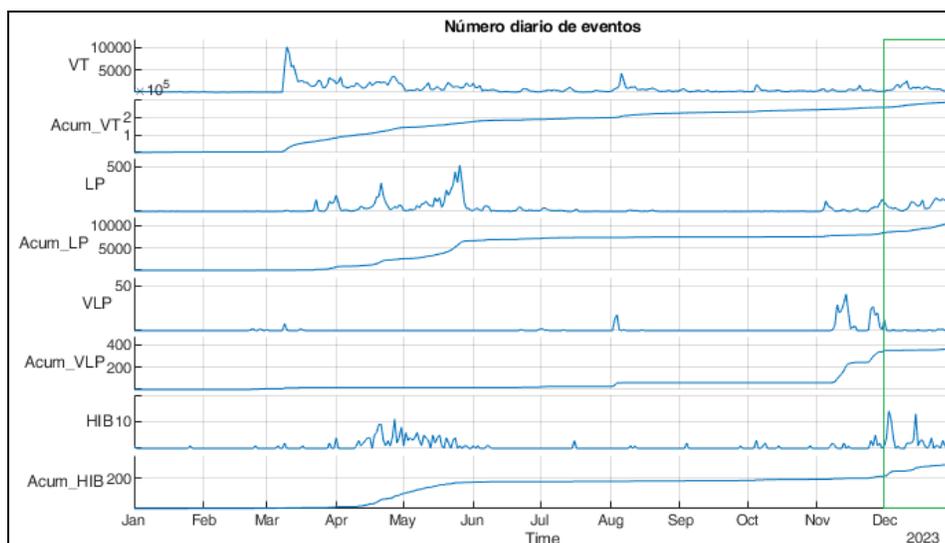
En la Figura 62 se muestra el comportamiento de las series de datos correspondientes al número diario de eventos y su acumulado, para la sismicidad VT, LP, VLP e HIB, entre el primero de enero y el 31 de diciembre del 2023. De manera similar para el mismo periodo de tiempo, en la Figura 63 se muestra la relación de la energía diaria y la energía acumulada de la sismicidad VT, LP, VLP e HIB.



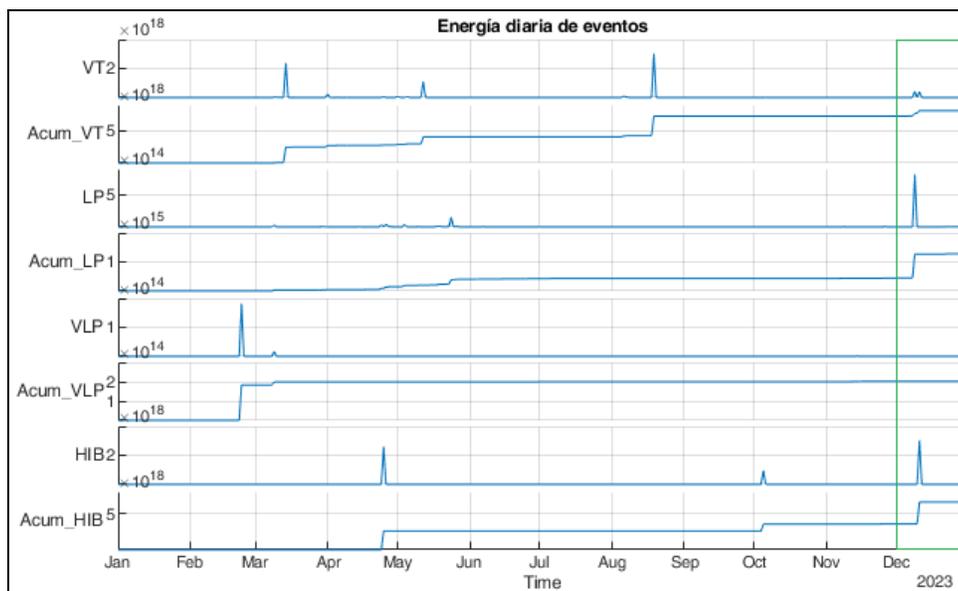
**Figura 61.** Energía de sismos volcánicos por tipo, Chiles y Cerro Negro de Mayasquer, enero a diciembre del 2023. El recuadro indica el periodo evaluado

**Tabla 20.** Número y energía mensual de eventos volcánicos por tipo, Chiles - Cerro Negro, 2023

| NUMERO  | VT     | LP    | VLP | TRE | HIB | TOTAL  | ENERGIA | VT       | LP       | VLP      | TRE      | HIB      | TOTAL    |
|---------|--------|-------|-----|-----|-----|--------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 2023-01 | 3257   | 15    | 0   | 2   | 2   | 3276   | 2023-01 | 8.39E+14 | 2.89E+11 | 0.00E+00 | 5.06E+09 | 8.35E+09 | 8.39E+14 |
| 2023-02 | 1060   | 8     | 6   | 2   | 1   | 1077   | 2023-02 | 9.15E+13 | 4.43E+10 | 1.82E+14 | 8.76E+09 | 1.38E+10 | 2.74E+14 |
| 2023-03 | 76970  | 580   | 13  | 0   | 6   | 77569  | 2023-03 | 2.48E+18 | 4.08E+13 | 1.68E+13 | 0.00E+00 | 1.20E+14 | 2.48E+18 |
| 2023-04 | 58876  | 2011  | 0   | 5   | 88  | 60980  | 2023-04 | 3.30E+17 | 1.08E+14 | 0.00E+00 | 6.61E+15 | 2.59E+18 | 2.93E+18 |
| 2023-05 | 32436  | 4034  | 0   | 0   | 76  | 36546  | 2023-05 | 1.26E+18 | 2.55E+14 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.90E+15 | 1.26E+18 |
| 2023-06 | 13782  | 517   | 3   | 0   | 4   | 14306  | 2023-06 | 2.03E+15 | 1.88E+13 | 2.35E+11 | 0.00E+00 | 2.34E+10 | 2.05E+15 |
| 2023-07 | 9859   | 237   | 6   | 0   | 3   | 10105  | 2023-07 | 1.03E+16 | 8.13E+12 | 2.15E+11 | 0.00E+00 | 2.95E+14 | 1.06E+16 |
| 2023-08 | 25082  | 104   | 34  | 1   | 2   | 25223  | 2023-08 | 3.18E+18 | 3.42E+11 | 1.02E+11 | 2.80E+10 | 2.87E+09 | 3.18E+18 |
| 2023-09 | 7858   | 5     | 0   | 0   | 3   | 7866   | 2023-09 | 8.64E+15 | 2.43E+10 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 7.75E+11 | 8.64E+15 |
| 2023-10 | 11169  | 48    | 0   | 3   | 8   | 11228  | 2023-10 | 8.38E+15 | 1.90E+11 | 0.00E+00 | 5.31E+11 | 9.62E+17 | 9.70E+17 |
| 2023-11 | 13711  | 838   | 277 | 7   | 19  | 14852  | 2023-11 | 8.60E+15 | 1.39E+13 | 2.02E+12 | 9.41E+11 | 2.29E+15 | 1.09E+16 |
| 2023-12 | 28988  | 2266  | 23  | 4   | 77  | 31358  | 2023-12 | 8.30E+17 | 8.48E+14 | 4.58E+10 | 1.08E+10 | 3.04E+18 | 3.87E+18 |
| TOTAL   | 283048 | 10663 | 362 | 24  | 289 | 294386 | TOTAL   | 8.12E+18 | 1.29E+15 | 2.01E+14 | 6.61E+15 | 6.60E+18 | 1.47E+19 |

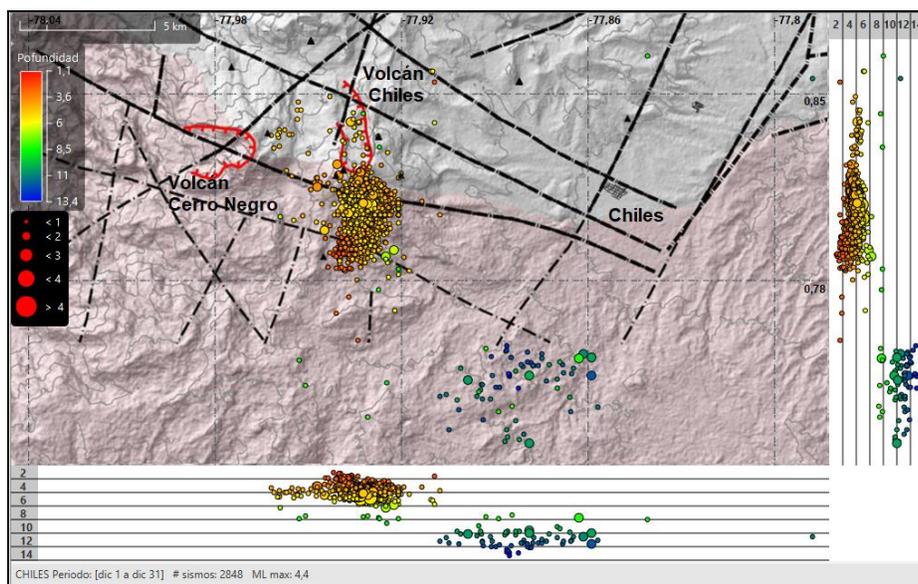


**Figura 62.** Numero diario y acumulado de eventos VT, LP, VLP e HIB, volcanes Chiles y Cerro Negro de Mayasquer, enero a diciembre del 2023. El recuadro indica el periodo evaluado



**Figura 63.** Energía diaria y acumulada de eventos VT, LP, VLP e HIB, volcanes Chiles y Cerro Negro de Mayasquer, enero a diciembre del 2023. El recuadro indica el periodo evaluado

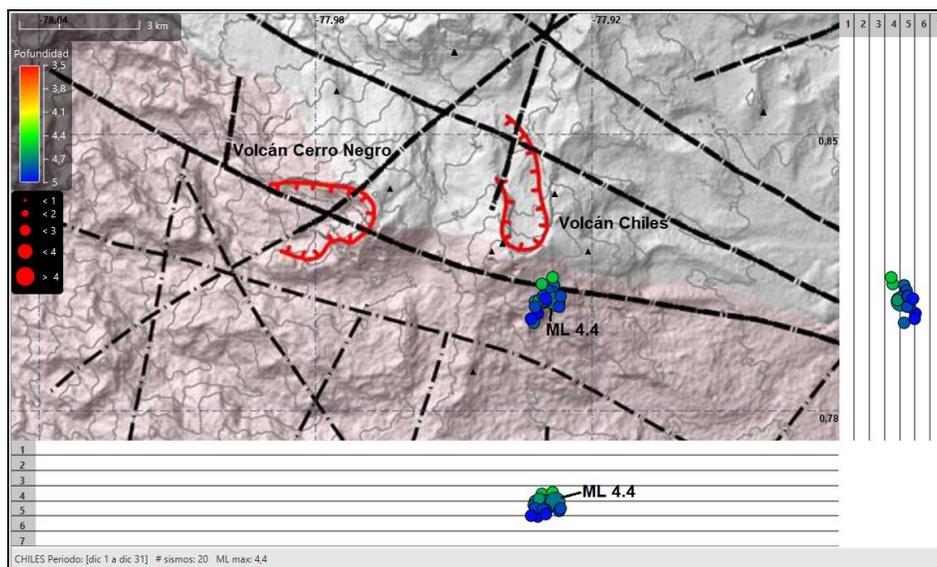
Se localizaron 2848 sismos (Figura 64), la gran mayoría ubicados al sur del volcán Chiles, en distancias hasta de 4 km, con profundidades menores de 6 km, con respecto a su cima (4700 m) y ML máxima de 4.4; un grupo de sismos se ubicó de manera dispersa al suroriente, en distancias entre 8 y 12 km, con profundidades entre 7 y 13 km y ML máxima de 1.9; algunos eventos se ubicaron de manera dispersa en la región de los dos volcanes, en general en distancias entre 0.5 y 17 km, con profundidades entre 2 y 11 km, con respecto a la cima de Chiles (4700 m) y ML máxima de 1.2. Se registraron 20 eventos con ML entre 2 y 4.4, ubicados hacia el sur sureste del volcán Chiles, en distancias entre 0.9 y 2 km y profundidad entre 3.5 y 5 km con respecto a su cima (Figuras 64 y 65).



**Figura 64.** Localizaciones de sismos VT, Chiles y Cerro Negro de Mayasquer, diciembre 2023

Se destaca 4 eventos que se reportaron sentidos en el resguardo indígena de Chiles. El primero ocurrió el 10 de diciembre a las 3:01 pm, con magnitud local de 2.9, fue ubicado a 1.8 km al sur de Chiles con profundidad de 4 km; el segundo evento sentido fue el más energético del mes, se renombró como de tipo híbrido por mostrar en su forma de onda los procesos asociados tanto a fractura de roca como a tránsito de fluidos, ocurrió el 11 de diciembre a las 2:36:21 am, con magnitud local de 4.4, fue ubicado a 1.5 km al sur sureste de Chiles con profundidad de 4 km (Tabla 21, Figuras 64 y 65); el tercer evento sentido ocurrió el 11 de diciembre a las 2:36:59 am, con magnitud local de 2.7, fue ubicado a 1.4 km al sur sureste de Chiles con profundidad de 5 km; el cuarto evento sentido ocurrió el 27 de diciembre a las 1:33 am, con magnitud local de 2.8, fue ubicado a 1.7 km al sur de Chiles con profundidad de 5 km (Tabla 21, Figuras 64 y 65).

La gran mayoría de eventos son de baja energía, solamente 8 sismos alcanzaron una magnitud local entre 2.6 y 4.4 y en la Tabla 21 se consignan sus características de localización (Figuras 64 y 65; los eventos sentidos se marcan en color gris.



**Figura 65.** Sismos VT con ML mayor o igual a 2, Chiles y Cerro Negro, diciembre 2023

**Tabla 21.** Sismos VT con ML entre 2.6 y 4.4, Chiles - Cerro Negro, diciembre 2023

| Fecha      | Hora local | Latitud | Longitud | Prof. Km | ML  |
|------------|------------|---------|----------|----------|-----|
| 7/12/2023  | 13:07:35   | 0.8093  | -77.9280 | 4        | 2.6 |
| 8/12/2023  | 21:41:23   | 0.8108  | -77.9297 | 4        | 2.8 |
| 9/12/2023  | 02:33:42   | 0.8073  | -77.9272 | 4        | 2.7 |
| 10/12/2023 | 15:01:42   | 0.8022  | -77.9315 | 4        | 2.9 |
| 11/12/2023 | 02:36:21   | 0.8068  | -77.9265 | 4        | 4.4 |
| 11/12/2023 | 02:36:58   | 0.8068  | -77.9287 | 5        | 2.7 |
| 26/12/2023 | 09:29:11   | 0.8082  | -77.9293 | 5        | 2.7 |
| 27/12/2023 | 01:33:09   | 0.8032  | -77.9320 | 5        | 2.8 |

Se registraron 23 eventos asociados con movimiento de fluidos de fuente transitoria que presentan muy baja frecuencia, denominados VLP. En la Figura 42 se muestra el sismograma y el espectro en frecuencia del evento registrado el 1 de diciembre a las 04:40 a.m. (09:40 UTC), en la componente vertical de 5 estaciones ubicadas cerca de la cima de Chiles a distancias entre 0.7 y 6.7 km; este evento mostró un pico dominante en las bajas frecuencias entre 0.7 y 1.1 Hz o un periodo entre 0.9 y 1.4 segundos, el periodo medido directamente en la onda varía entre 0.9 y 1.2 segundos; una localización aproximada con primeros arribos lo ubica a 3.4 km al sur de la cima de Chiles con profundidad menor de 1 km.

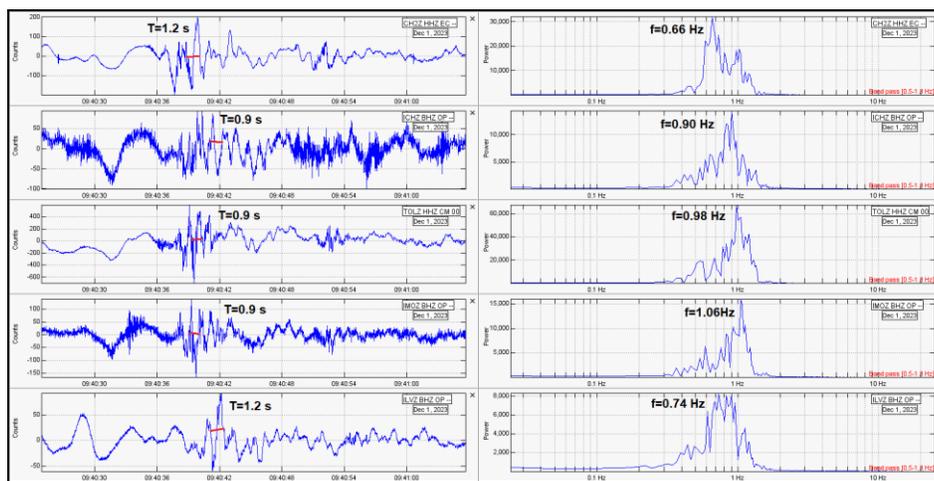


Figura 66. Sismogramas y espectro en frecuencia del evento VLP del 1 de diciembre a las 04:40 am, en la componente vertical de algunas estaciones sísmicas de los volcanes Chiles y Cerro Negro

### 3.4. Deformación

Para el seguimiento de los cambios deformativos del terreno sobre la superficie del complejo volcánico Chiles - Cerro Negro, se tiene instalado del lado colombiano por parte del SGC – OVSPA, cuatro inclinómetros electrónicos, tres instalados en el volcán Chiles y uno en el volcán Cerro Negro, y seis estaciones GNSS permanentes instaladas alrededor del complejo volcánico. Adicionalmente del lado ecuatoriano se tienen cuatro estaciones GNSS Permanentes instaladas por el IGEPN.

#### 3.4.1. Inclímetría Electrónica

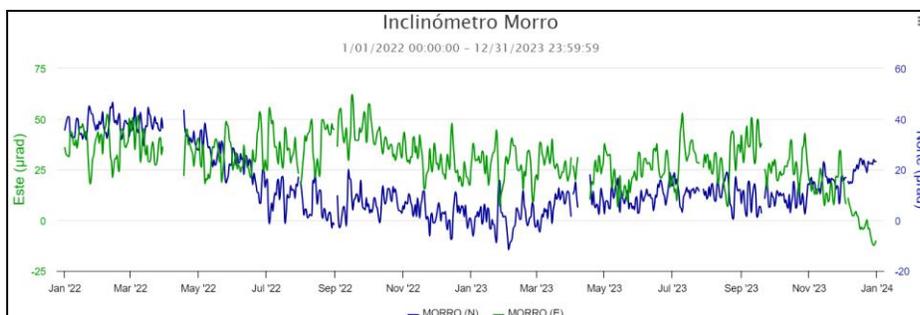
El inclinómetro El Morro, presentó desde su instalación en julio de 2019 una tendencia descendente en su componente Norte la cual incrementa su pendiente hacia finales de abril de 2022, la variación entre julio de 2019 y abril de 2022 es de unos 20  $\mu$ rad; a partir de abril y hasta julio de 2022 se muestra un cambio más notable que acumula unos 35  $\mu$ rad. Luego de este periodo, se observó un ligero ascenso de unos 25  $\mu$ rad entre febrero y abril de 2023, posteriormente y hasta el 30 de noviembre esta componente presenta estabilidad (Figura 67). En la componente Este entre septiembre y noviembre de 2022 se observó un pequeño descenso cercano a los 20  $\mu$ rad, luego de esto se observa estabilidad. En la primera semana de diciembre se cambió de sitio el inclinómetro electrónico, se ubicó junto con el sensor sísmico en el mismo sistema de protección, desde entonces se observa una ligera tendencia descendente en la componente Este acumulando cerca de 22  $\mu$ rad, en Norte se tiene un comportamiento ascendente que registra 10  $\mu$ rad.

Para el inclinómetro Chiles, continua los cambios observados en sus componentes de inclinación, en la Este persiste la tendencia ascendente registrando 146  $\mu$ rad desde el 15 de

julio de 2023, en contraste se tiene un comportamiento levemente descendente en la Norte acumulando cerca de 169  $\mu\text{rad}$  para el mismo periodo (Figura 68).

Las componentes de inclinación de la estación La Tola presentan estabilidad, algunas de las variaciones en los registros están asociados a las fluctuaciones de temperatura imperantes en la zona (Figura 69). El salto observado el 11 de diciembre en las componentes de inclinación del sensor fue provocado por un sismo de magnitud 4,4, registrado a las 2:36:20 a.m.

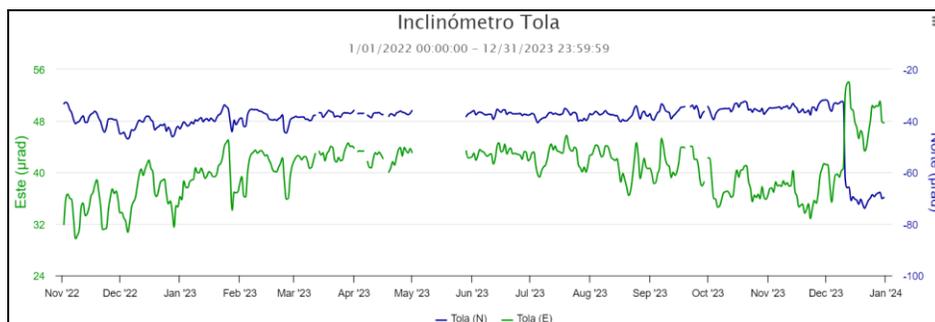
En inicios de diciembre de 2022, en mantenimiento correctivo en la estación Cerro Negro, se decidió cambiar el inclinómetro electrónico, dado que con el anterior equipo no se tenía certeza de su correcto funcionamiento, en la Figura 70, se muestra el registro del nuevo inclinómetro electrónico, desde diciembre de 2022 hasta mayo de 2023, se observó una ligera tendencia descendente en la componente Este, posteriormente un ascenso entre mayo y finales de junio de 2023. Desde inicios del mes de septiembre se observa un comportamiento ascendente en sus dos componentes, acumulando 66  $\mu\text{rad}$  la Este y 7  $\mu\text{rad}$ , la Norte, posteriormente desde finales de diciembre, tiende a estabilizarse.



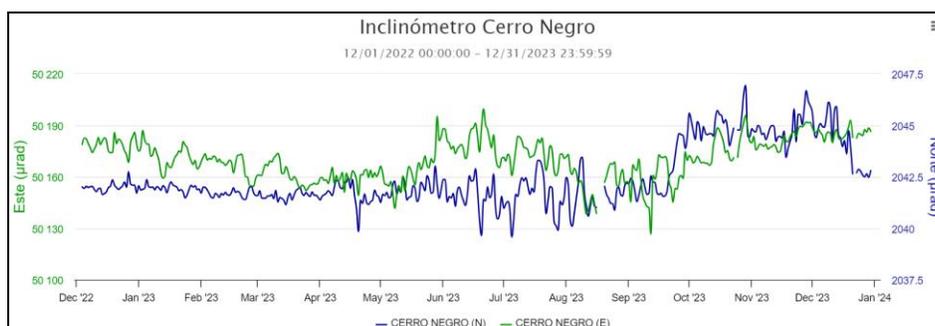
**Figura 67.** Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) del inclinómetro electrónico Morro, instalado en el volcán Chiles para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2022 y el 31 de diciembre de 2023



**Figura 68.** Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) del inclinómetro electrónico Chiles, instalado en el volcán Chiles, para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2022 y el 31 de diciembre de 2023



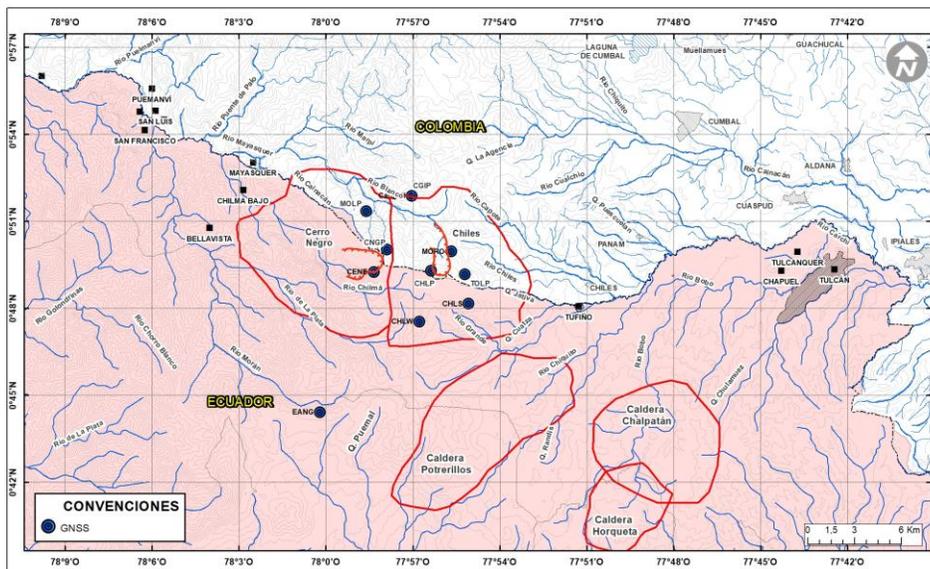
**Figura 69.** Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) del inclinómetro electrónico a Tola, instalado en el volcán Chiles, para el periodo comprendido entre el 2 de noviembre de 2022 y el 31 de diciembre de 2023



**Figura 70.** Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) del inclinómetro electrónico Cerro Negro, instalado en el volcán del mismo nombre, para el periodo comprendido entre el 3 de diciembre de 2022 y el 31 de diciembre de 2023

### 3.4.2. Estaciones GNSS Permanentes

Sobre la superficie del complejo volcánico Chiles – Cerro Negro por parte del SGC – OVS Pasto se tienen instaladas seis estaciones GNSS Permanentes y del IGEPN se tienen cuatro estaciones GNSS, en la Figura 71 se muestra su ubicación. Debido a problemas con uno de los servidores del IGEPN en el cual se compartían los datos de las estaciones CHLS y CHLW, no ha sido posible realizar este intercambio de información por lo cual se tiene procesado estas estaciones hasta el 20 de octubre de 2023.



**Figura 71.** Ubicación de las estaciones GNSS permanentes dedicadas al monitoreo de los cambios en superficie del complejo volcánico Chiles – Cerro Negro, SGC (MORO, CGIP, CNGP, TOLP, CHLP, MOLP), e IGEPN (CENE, CHLW, CHLS, EANG)

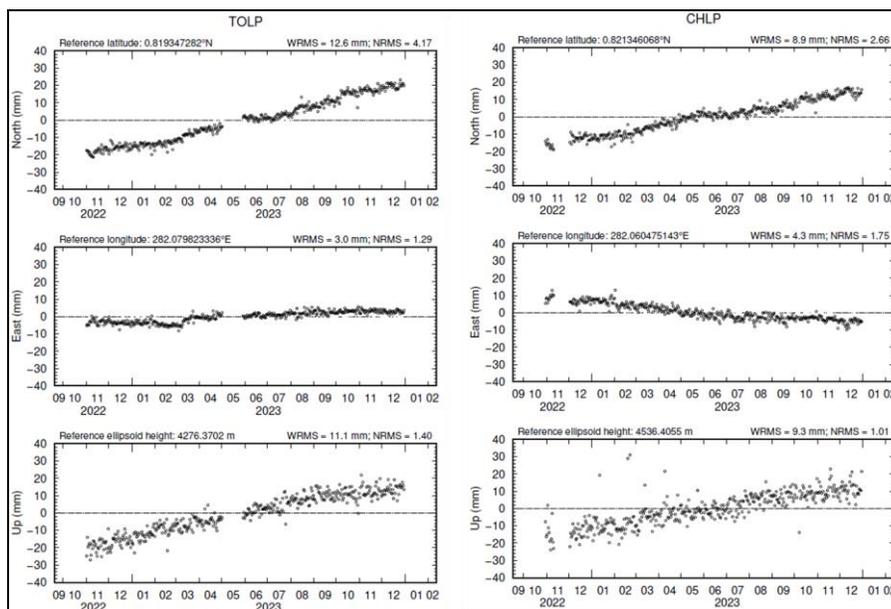
Para el análisis se contempló un procesamiento Baseline, mediante el software GAMIT/GLOBK 10.71, haciendo uso de efemérides finales, parámetros numéricos que describen las posiciones precisas de los satélites.

Es importante destacar que se tiene un comportamiento ascendente en las direcciones Norte y vertical de algunas de las estaciones, así como variaciones ascendentes y descendentes en la dirección Este, dependiendo de la ubicación de la estación GNSS.

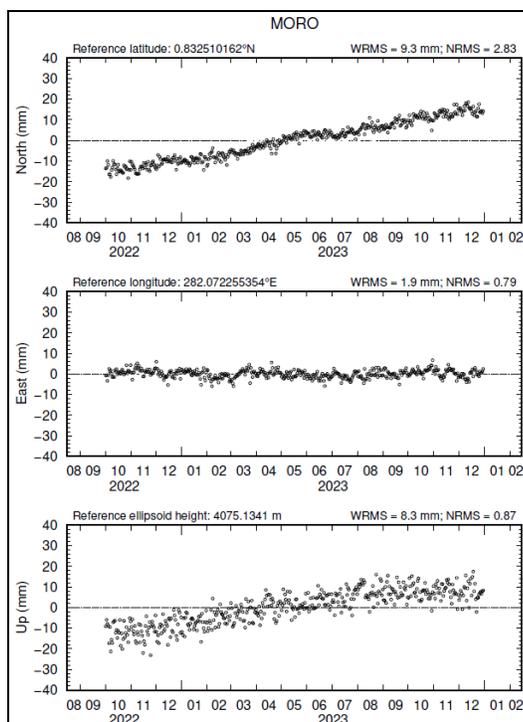
En particular, se han identificado periodos en los cuales la pendiente de las series temporales ha experimentado aumentos significativos, especialmente en la dirección Norte. Este incremento en la pendiente de las mediciones ha estado acompañado con aumento en la actividad sísmica, principalmente en el número de eventos, observando de igual forma cambios resaltables en la tasa de deformación, primordialmente en las estaciones más próximas al cráter del volcán Chiles (Figuras 72 y 73).

En la estación CNGP, ubicada sobre el edificio volcánico de Cerro Negro, se ha observado una tendencia levemente ascendente en la dirección Norte y descendente en la Este (Figura 74). En la estación MOLP, se ha registrado estabilidad en las mediciones (Figura 74).

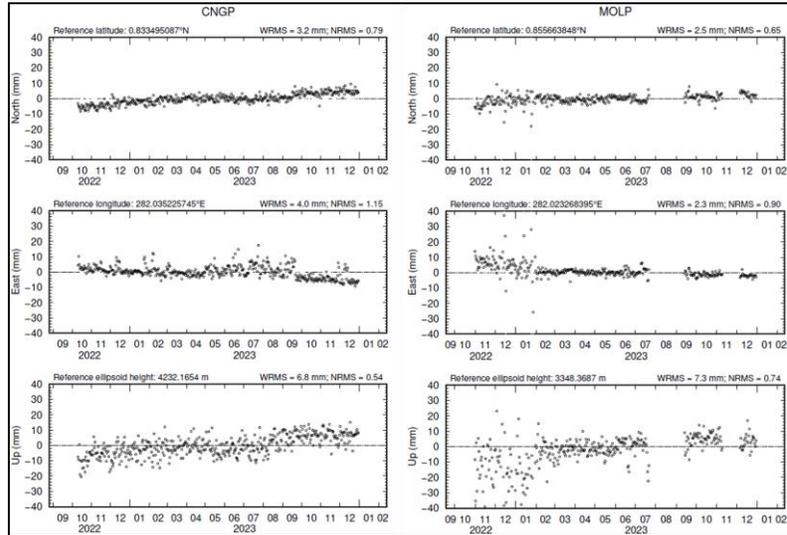
Para la estación Canguil (CGIP) se observa un leve comportamiento ascendente en la dirección Norte (Figura 75).



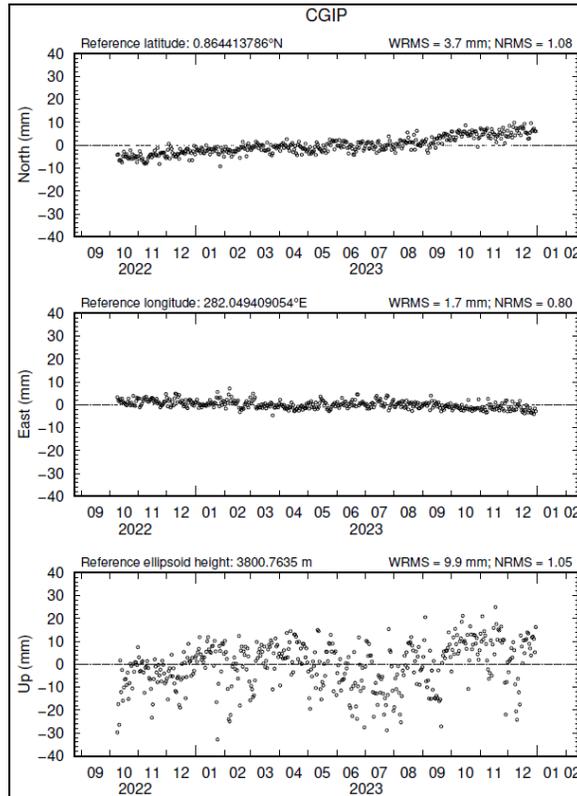
**Figura 72.** Variaciones en las direcciones Norte, Este y Altura de las estaciones GNSS TOLP y CHLP instaladas en Chile, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 30 de diciembre de 2023



**Figura 73.** Variaciones en las direcciones Norte, Este y Altura de la estación GNSS MORO instalada en Chile, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 30 de diciembre de 2023



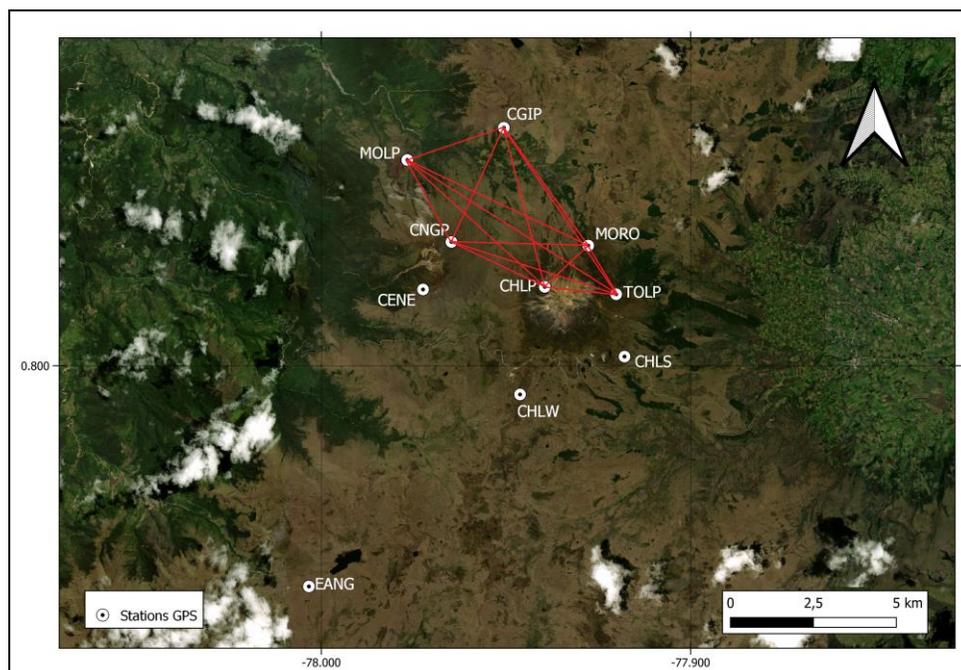
**Figura 74.** Variaciones en las direcciones Norte, Este y Altura de las estaciones GNSS CNGP y MOLP, instaladas en Cerro Negro, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 30 de diciembre de 2023



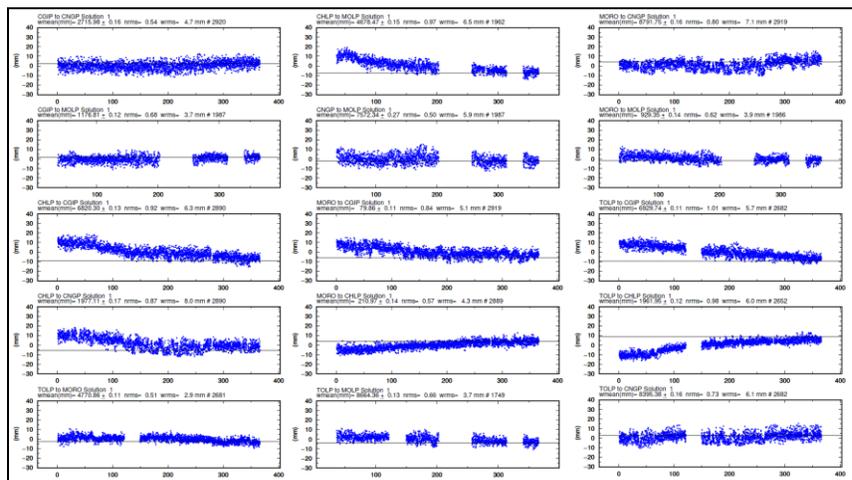
**Figura 75.** Variaciones en las direcciones Norte, Este y Altura de la estación GNSS CGIP, ubicada en cercanías del complejo volcánico Chiles – Cerro Negro en la estación multiparámetro Canguil, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 30 de diciembre de 2023

### 3.4.3 Líneas Base

Realizando un procesamiento diferencial con una solución cada tres horas, podemos obtener líneas base entre estaciones GNSS, series temporales que nos indican la variación en distancia entre una y otra estación, medida cada tres horas, es posible realizar el arreglo entre estaciones como mejor convenga, en la Figura 76, se muestra la ubicación de las estaciones GNSS y las estaciones propuestas para la solución, y en la Figura 77, se muestran las variaciones en distancia con las soluciones cada tres horas usando orbitas rápidas.



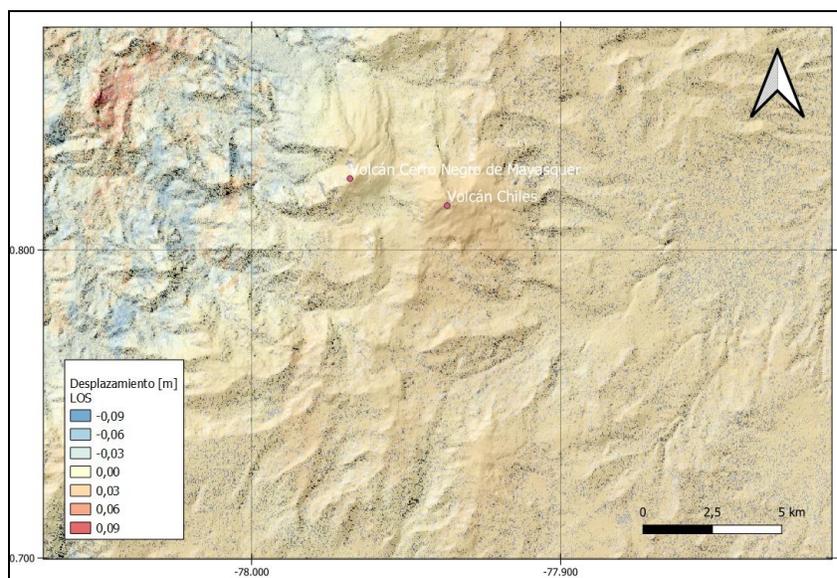
**Figura 76.** Ubicación de las estaciones GNSS instaladas sobre la superficie del Complejo Volcánico Chiles – Cerro Negro, dispuestas para el seguimiento de los cambios en la corteza. Los trazos de color rojo indican las estaciones para las cuales se calculó líneas base



**Figura 77.** Variaciones en distancia entre estaciones GNSS, líneas Base con soluciones cada 3 horas, las series temporales están entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2023. En la parte superior de cada serie, se etiquetan para las estaciones que fue determinada

### 3.4.4. D\_InSAR

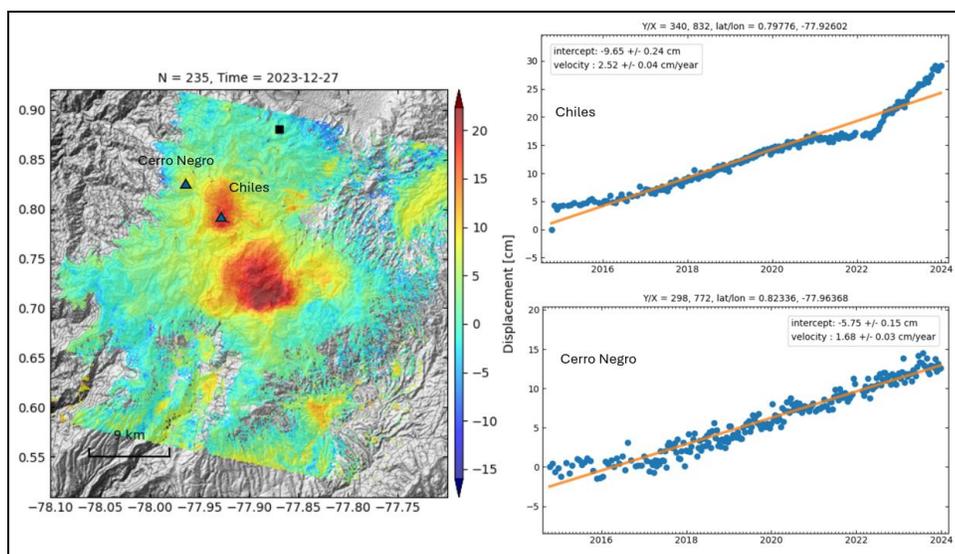
En la Figura 78, se muestra el mapa de desplazamiento para la zona volcánica de Chiles y Cerro Negro obtenido con procesamiento interferométrico diferencial, utilizando el software ISCE haciendo uso de un par de imágenes de Radar de Apertura Sintética Sentinel -1 de la Agencia Espacial Europea (ESA) de orbita descendente. Para el periodo evaluado con esta técnica de procesamiento no se observan patrones de deformación.



**Figura 78.** Desplazamientos calculados con la técnica D-InSAR para el par interferométrico del 3 y el 15 de diciembre de 2023, imágenes Sentinel-1, órbita descendente. Área de influencia del Complejo volcánico Chiles – Cerro Negro

### 3.4.5. Series Temporales de Deformación con MintPy

En la Figura 79 se presentan las series temporales obtenidas con el procesamiento interferométrico de imágenes Sentinel – 1 de orbita descendente, con el software ISCE y el apilamiento con MintPY (Miami InSAR time – series software in Python) para la zona del complejo volcánico Chiles – Cerro Negro, diferenciando dos zonas de deformación, una en Cerro Negro y otra en el volcán Chiles.



**Figura 79.** Desplazamientos obtenidos con imágenes Sentinel – 1 de orbita descendente, procesadas con el software ISCE para el área del complejo volcánico Chiles – Cerro Negro, para el periodo entre el 15 de octubre de 2014 y 27 de diciembre de 2023, del lado derecho se muestran las series para las zonas indicadas con el triángulo, diferenciando dos zonas: el volcán Chiles (superior) y el volcán Cerro Negro (inferior), el cuadro de color negro indica un punto tomado como referencia para la generación de las series

### 3.5. Electromagnetismo

En diciembre de 2023, el monitoreo electromagnético en la zona de influencia del Complejo volcánico Chiles-Cerro Negro (CVCCN) se realizó con base en el procesamiento y análisis de la información registrada en la estación de monitoreo magnético Morro (MOR), que cuenta con un sensor magnético triaxial tipo Fluxgate, que registra la intensidad de campo magnético total de la Tierra (CMT-F), en sus tres componentes X, Y y Z; en el sitio donde está instalado el sensor. Entre el 27 de enero y el 26 de mayo de 2023, la componente vertical (Z), del sensor magnético de la estación MOR no funcionó, por lo tanto, los registros de este año se reportan desde junio cuando finalmente se recuperó el funcionamiento de esta componente y se obtuvo el valor total del campo magnético (CMT-F).

Con base en la información obtenida de la estación de monitoreo magnético del CVChCn, se calcularon los valores del campo magnético total de la Tierra, en la zona donde el sensor está

instalado. Adicionalmente, la estación MOR registran las señales electromagnéticas externas ocasionadas por efectos de las tormentas geomagnéticas y tormentas solares; por lo tanto es necesario aplicar metodologías que ayuden a identificar y tratar de eliminar o minimizar los efectos de las componentes magnéticas que no tienen relación con los procesos locales, que son el objetivo del monitoreo magnético en zonas volcánicas, puesto que, estas variaciones magnéticas locales pueden estar asociados con la actividad volcánica y hacen parte de los registros que llegan al OVSPA.

Para identificar las señales magnéticas externas a la Tierra, en las estaciones de monitoreo magnético, en zonas volcánicas de Nariño se toman los registros de una estación magnética lejana a la zona de estudio, denominada como estación de referencia; para el caso del monitoreo de los volcanes de Nariño se cuenta con los registros de la estación de referencia Kourou (KOU) (Figura 80). KOU pertenece a la Red de Monitoreo Magnético Global del Instituto Central de Magnetismo Terrestre de Francia - (BCMT, por sus siglas en francés, Bureau Central de Magnetisme Terrestre). KOU está ubicada en Guayana Francesa y cuenta con datos abiertos y en tiempo real (<http://dx.doi.org/10.18715/BCMT.MAG.VAR> - <https://datacenter.ipgp.fr/networks/detail/BCMT/BCMT.MAG.VAR/>). La información de la estación KOU es fundamental, pues nos permite comparar con los registros de la estación magnética MOR que monitorean el CVChCn; así como también para verificar si las señales anómalas corresponden a efectos externos o no y, tratar de minimizar estos efectos generados por fenómenos electromagnéticos externos en los datos de las estaciones ubicadas en la zona de Chiles – Cerro Negro.

Existen tres tipos de fenómenos magnéticos externos asociados con la actividad eruptiva del Sol que pueden afectar las condiciones de la magnetosfera externa de la Tierra e inducir hacia el interior del planeta efectos de la actividad magnética externa, estos fenómenos son: tormentas geomagnéticas, tormentas de radiación solar y apagones de radio. El Centro de Predicción del Clima Espacial (SWPC, por sus siglas en inglés - Space Weather Prediction Center), que pertenece a la Administración Nacional del Océano y Atmósfera (NOAA, por sus siglas en inglés - National Oceanic and Atmospheric Administration - <https://www.swpc.noaa.gov/>), es una de las organizaciones encargadas de estudiar este tipo de fenómenos y generar alertas del clima espacial, asociadas con la ocurrencia de los fenómenos magnéticos del Sol . Esta actividad solar se propaga hasta la Tierra y, dependiendo de su intensidad podrían ocasionar problemas eléctricos, de comunicaciones e incluso afectaciones en la salud. La intensidad de estas alertas se representa con el índice Kp, que tiene una escala entre uno (valor mínimo) y nueve (valor máximo). Cada índice describe la intensidad de las perturbaciones ambientales y los efectos físicos en la Tierra (<https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>).

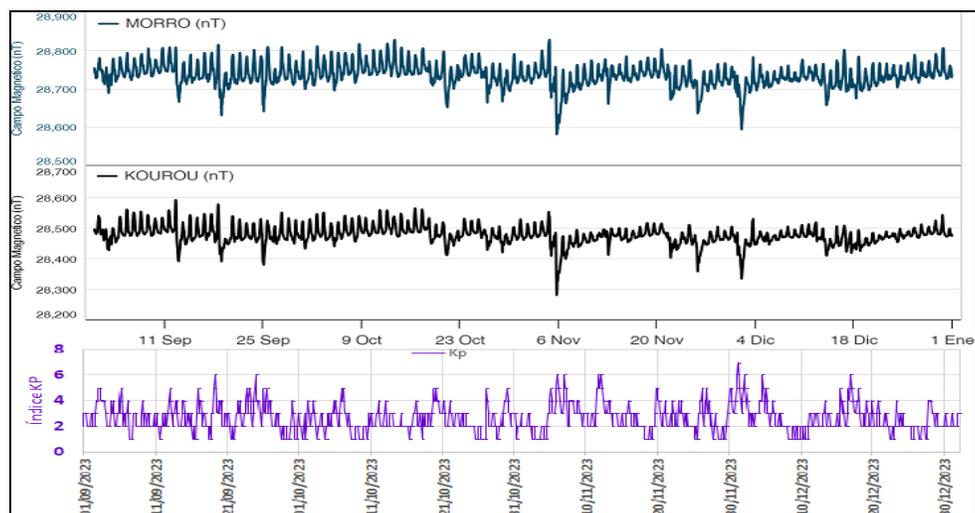
Para el procesamiento y análisis de la información magnética, el OVSP consulta tanto los pronósticos de los índices Kp como las alertas asociadas con este tipo de tormentas que afectan el clima espacial y que son reportados por el SWPC. Esta información nos permite conocer los pronósticos de ocurrencia de estas tormentas solares, identificarlas en los registros de la estación magnéticas MOR del CVChCn y, tratar de minimizar sus efectos con base en el

procesamiento que se hace con la estación de referencia KOU, y así evitar interpretarlas como efectos del fenómeno volcánico. En general, las tormentas geomagnéticas que producen mayor perturbación en los registros de la estación de monitoreo magnético del CVChCn son aquellas con índice  $K_p \geq 4$  y sus efectos se evidencian tanto en el incremento o disminución de la amplitud de las señales, así como en su contenido frecuencial, identificándose un mayor contenido de altas frecuencias.

En el periodo entre septiembre y diciembre de 2023, la serie temporal de la estación magnética MOR muestra dos tendencias. La primera entre septiembre y mediados de octubre un valor de CMT-F, con tendencia estable y variaciones día-noche de alrededor de 90 nT en MOR, al igual que en KOU, que tuvo variaciones día-noche promedio de 90 nT. Para la segunda parte del periodo evaluado, debido a la ocurrencia de tormentas geomagnéticas externas de energía importante; específicamente aquellas con índice  $K_p \geq 4$ , las amplitudes de variación día-noche incrementan sustancialmente durante la ocurrencia de la perturbación y los días posteriores estas amplitudes disminuyen a valores de aproximadamente 60 nT en MOR y 40 nT en KOU; así como también se evidencia variaciones en el contenido frecuencial de las señales (Figura 80).

Las variaciones importantes en la amplitud del CMT se asociaron con los efectos de las tormentas geomagnéticas que al incidir sobre la magnetósfera de la Tierra perturban el CMT y por ende las amplitudes registradas en las estaciones. Estas tormentas se corroboran con los pronósticos de tormentas emitidos por la NOAA, en sus índices  $K_p$ . La amplitud de perturbación en cada estación magnética dependerá de la intensidad y duración de estas tormentas en la zona donde éstas se ubican (Figura 80).

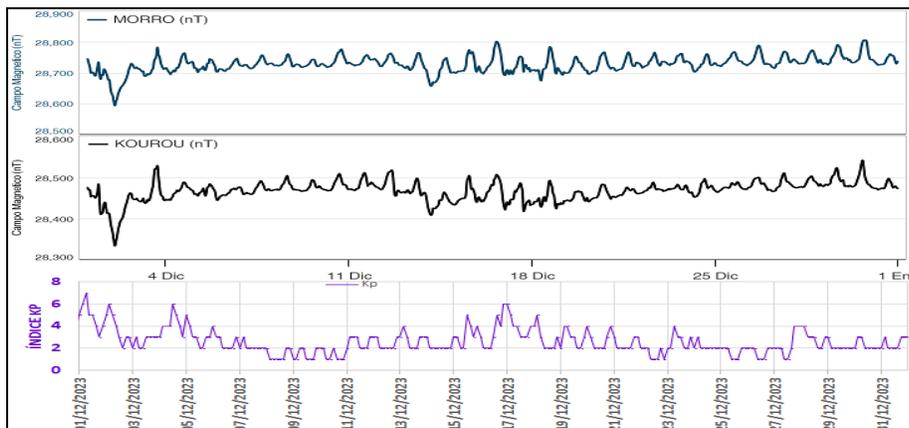
Entre las tormentas geomagnéticas más relevantes registradas entre septiembre y diciembre de 2023 está la ocurrida el 1 y 2 de diciembre de 2023 con  $K_p \geq 7$  y posteriormente aquellas de índice  $K_p \geq 6$ . Estas tormentas generalmente están antecedidas por valores de  $K_p$  de 4, 5 y 6, cuando las tormentas inician, y son seguidas por tormentas de valores de  $K_p$  de 6, 5 y 4, cuando las tormentas se van atenuando. Las variaciones máximas de amplitud del CMT-F, debidas a las tormentas entre el 1 y 2 de diciembre fueron de aproximadamente 140 nT en MOR y 100 nT en KOU; las amplitudes generadas por las tormentas del 19 de septiembre fueron de alrededor de 205 nT para MOR y 198 nT en KOU; para las tormentas del 25 de septiembre de 2023 fueron de: 200 nT para MOR y 157 nT para KOU. Las máximas amplitudes de las tormentas entre el 5 y 7 de noviembre fueron de 205 nT para MOR y 205 nT para KOU. Las amplitudes máximas de las tormentas del 11 y 12 de noviembre de 2023 fueron de: 110 nT para MOR y 105 en KOU. Estos valores evidencian que en general, la estación MOR se ve fuertemente afectada por las tormentas magnéticas de índice  $K_p \geq 5$ . Se resaltan las tormentas magnéticas con  $K_p$  de 5 ocurridas en octubre, entre el 6 y 7; entre el 19 y 20 y entre el 26 y 30 de octubre de 2023, que aun cuando son más bajas, generaron efectos en los registros magnéticos, tanto en amplitud, como se evidencia entre el 20 y 21 de octubre, así como también para el periodo entre el 27 y 30 del mes, donde se generan modificaciones tanto en amplitud como en las frecuencias usuales de registro.



**Figura 80.** Comportamiento del CMT-F en la estación de monitoreo magnético del CVChCn: MORF (azul), comparan con estación de referencia KOUF (negra) y con los pronósticos de las tormentas geomagnéticas (índice Kp en magenta), para el periodo entre el septiembre y diciembre de 2023

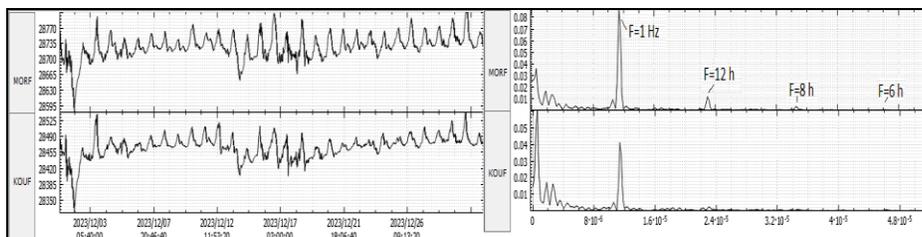
En diciembre de 2023, los registros de MOR iniciaron con grandes perturbaciones, tanto en amplitud como en el contenido de frecuencias ocasionadas por las tormentas geomagnéticas con valor de índice Kp de 7 ocurridas en estas fechas. Estas perturbaciones hacen descender el valor del nivel base del CMT-F, así como también las amplitudes de variación día-noche. Posteriormente, cuando el efecto de la tormenta disminuye, la serie temporal trata de recuperar la tendencia del CMT-F y las variaciones día-noche disminuyen también; sin embargo, la ocurrencia de nuevas tormentas, como son las del 13, 15 y 17 de diciembre, vuelven a alterar los registros, es por eso que la tendencia del CMT-F en la estación MOR en diciembre tuvo principalmente dos ciclos ocasionados por estos fenómenos (Figura 81). Estos efectos se corroboran con los registros obtenidos de la estación de referencia KOU, que muestran los mismos fenómenos descritos y, con los reportes del NOAA, sobre los pronósticos de las tormentas geomagnéticas (Figura 81).

En promedio, el valor de CMT-F en MOR fue de alrededor de 28.730 nT y variaciones diarias promedio de 70 nT y en KOU de aproximadamente 28.480 nT y variaciones diarias en promedio de 40 nT (Figura 81).



**Figura 81.** CMT-F en la estación de monitoreo magnético del CVCCN, MOR (azul) comparada con el registro de la estación de referencia KOU (negra), y con el índice Kp (magenta); para el periodo evaluado, correspondiente al mes de diciembre de 2023

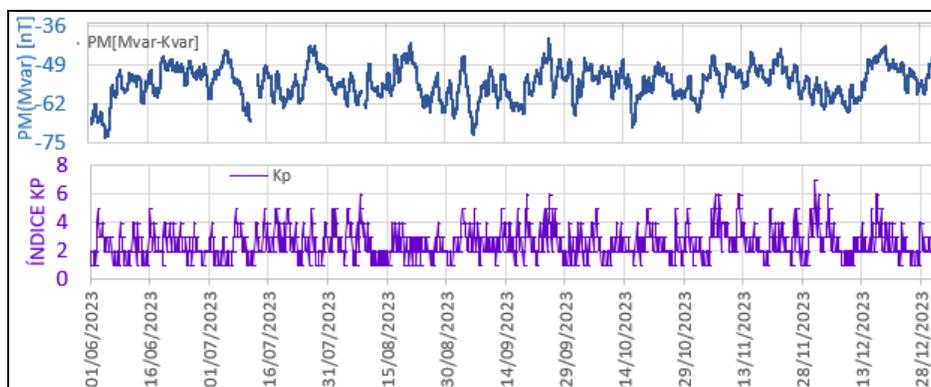
En el dominio de las frecuencias, se identifican aquellas asociadas con las variaciones seculares de un día, 12 horas, ocho horas y eventualmente de seis horas; adicionalmente a estas frecuencias se identificaron frecuencias más bajas que se asocian con los largos periodos que se generan, posiblemente debidos a los efectos de las tormentas geomagnéticas (Figura 82).



**Figura 82.** Izq. CMT-F en la estación de monitoreo magnético del CVChCn, MOR comparada con el registro de la estación de referencia KOU, para el mes de diciembre de 2023. Der. Espectro de la señal magnética evidenciando las frecuencias dominantes usuales de: un día, 12 horas y ocho horas, adicionalmente a las frecuencias propias de la señal, que son mayores a 2.0 días

Al procesar las series temporales, para obtener las variaciones locales del campo magnético, se usa el valor teórico del CMT, (IGRF-13) de la estación MOR, y posteriormente se relacionan con la estación de referencia KOU. Este procesamiento permite obtener las variaciones locales y minimizar los efectos debidos a las tormentas geomagnéticas. La correlación de los datos de las estación MOR se realiza con los de la estación de referencia KOU; este procesamiento permite disminuir significativamente las variaciones día-noche y principalmente aquellas variaciones asociadas con la perturbación de las tormentas magnéticas; aun cuando, eventualmente pese a todo el procesamiento que se realiza, cuando las tormentas tienen índices Kp mayores de 5, estas perturbaciones se mantienen, en menor escala, en los registros magnéticos; en estos casos se descarta que estas perturbaciones estén asociados con actividad volcánica (Figura 83). Analizando la serie procesada en el período entre junio y diciembre de

2023, MOR mantiene un comportamiento en general estable, oscilando alrededor de un valor promedio de 55 nT, con oscilaciones máximas de 22 nT. Entre finales de noviembre y diciembre se observa unas variaciones oscilantes de la tendencia, que podrían indicar una ligera tendencia ascendente en este período; sin embargo, es necesario continuar monitoreando el comportamiento para definir claramente si se trata de una tendencia al ascenso o si son oscilaciones ocasionales de la serie magnética (Figura 83).



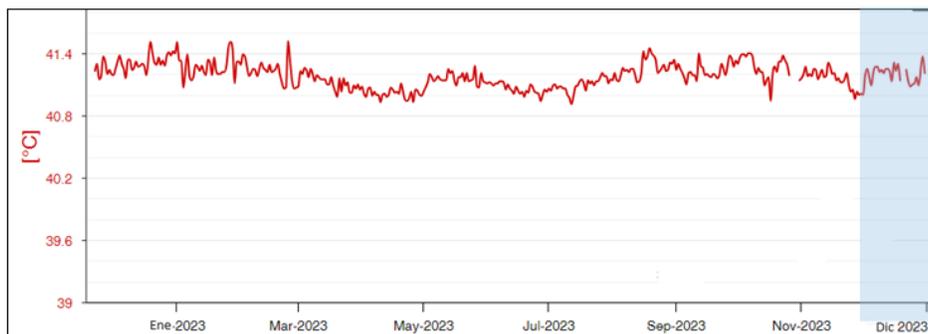
**Figura 83.** Comportamiento del promedio del CMT, procesados y corregidos con base en la estación de referencia KOU, en las estaciones MOR (azul), comparada con la serie temporal del comportamiento del índice Kp que define la intensidad de las tormentas geomagnéticas (magenta), para el periodo entre junio y diciembre de 2023

El procesamiento de los registros magnéticos en la estación de monitoreo magnético, MOR, muestra variaciones diarias de los campos magnéticos locales muy bajos que aún no estarían reflejando las características de la intensa actividad sísmica que presenta este complejo volcánico en el momento.

### 3.6. Geoquímica

#### 3.6.1. Estación térmica en fuente termal “Rincón Bello”

Desde noviembre de 2022 se cuenta con una termocupla para el registro de temperatura de manera telemétrica en la fuente termal del balneario Rincón Más Bello, en la vereda la Calera del corregimiento de Chiles- Cumbal. A continuación, se observa el registro en lo corrido del año (Figura 84 y Tabla 22), que muestra variaciones día- noche, las cuales son inferiores a 1°C, encontrándose dentro del rango de precisión de la termocupla instalada, de tal manera que el comportamiento de la temperatura en la fuente termal Rincón Bello, continúa siendo estable.



**Figura 84.** Temperatura horaria en Fuente Termal Rincón Bello, durante los meses de agosto a diciembre, el recuadro azul representa el periodo evaluado: diciembre

**Tabla 22.** Valores de temperatura horario en ° C – FT Rincón Bello - Volcán Chiles de los meses noviembre y diciembre de 2023

| Valor    | Noviembre | Diciembre |
|----------|-----------|-----------|
| Mínimo   | 41.3      | 41.1      |
| Promedio | 41.5      | 41.2      |
| Máximo   | 41.6      | 41.9      |

### 3.6.2. Muestreo de aguas en fuentes termales

No se realizó en este periodo

### 3.7. Actividad Superficial

Durante el mes de diciembre de 2023 no se tuvo reportes relacionados con actividad superficial del Complejo Volcánico Chiles – Cerro Negro.

### 3.8. Conclusiones

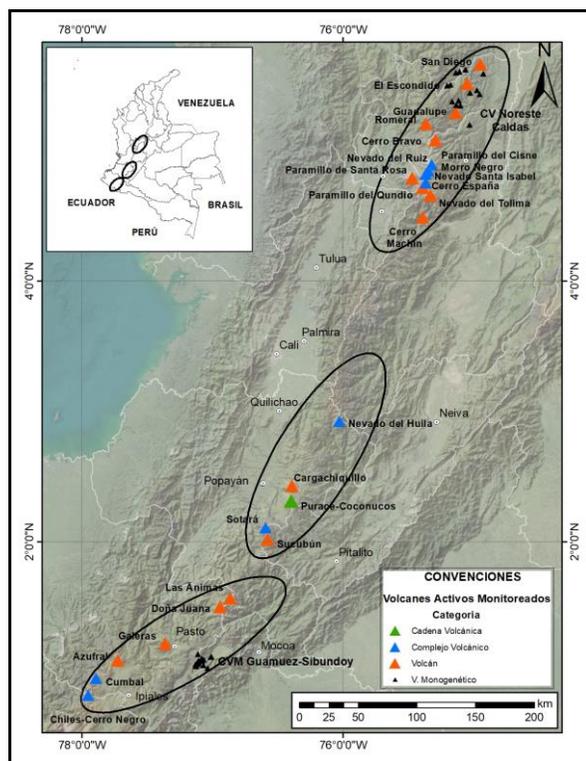
- En diciembre 2023, la sismicidad en la zona de influencia de los volcanes Chiles y Cerro Negro de Mayasquer, mostró incremento en su ocurrencia y energía con respecto a lo registrado en el mes anterior, con predominio de la sismicidad asociada con fractura de roca al interior del volcán (VT). Continúa el registro de eventos asociados con movimiento de fluidos al interior de los conductos volcánicos de fuente transitoria LP, algunos de ellos con muy baja frecuencia VLP. Se registraron 20 eventos con magnitud local entre 2 y 4.4, ubicados hacia el sur sureste del volcán Chiles, en distancias entre 0.9 y 2 km y profundidad entre 3.5 y 5 km con respecto a su cima. Cuatro eventos con ML de 2.7, 2.8, 2.9 y 4.4 se reportaron sentidos en la zona de influencia volcánica.
- Durante el año 2023 se ha registrado el mayor número de eventos asociados con movimiento de fluidos de fuente transitoria (LP) algunos de ellos con muy baja

frecuencia (VLP) desde que se inició el monitoreo instrumental. Entre el 1 de enero y el 31 de diciembre del 2023 se ha registrado un número total de 10663 LP y 362 VLP.

- La actividad actual en la zona de los volcanes Chiles y Cerro Negro se interpreta como una intrusión magmática en profundidad que hasta el momento no ha tenido manifestaciones en superficie y que ha presentado variaciones en los niveles de ocurrencia, energía, localización y tipo de sismicidad, indicando que aún no se ha retornado a un estado de equilibrio; por lo tanto, persiste la probabilidad de que se presenten sismos con magnitudes significativas que podrían ser sentidos por habitantes de la zona de influencia de los volcanes Chiles y Cerro Negro, o que se presente otro tipo de cambios asociados con el proceso volcánico. El SGC y el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica del Ecuador, permanecen atentos a la actividad volcánica, para informar oportunamente los cambios que se puedan detectar.
- En el seguimiento de la temperatura del manantial Rincón Bello, desde la estación de temperatura, se observa estabilidad.
- Es importante resaltar que se tiene un comportamiento ascendente en las direcciones Norte y vertical de algunas de las estaciones, y ascendente y descendente en la dirección Este dependiendo de la ubicación de la estación. Se han observado periodos en los cuales incrementa la pendiente de las series temporales, principalmente en la dirección Norte, lo cual ha estado acompañado de aumento en el número de sismos, observando de igual forma cambios resaltables en la tasa de deformación, primordialmente en las estaciones más próximas al cráter del volcán Chiles evidenciando un proceso deformativo inflacionario, proceso que igualmente se evidencia mediante la técnica de monitoreo interferométrico.
- La evaluación de la actividad de los volcanes Chiles y Cerro Negro de Mayasquer en diciembre 2023 permitió mantener el estado de ALERTA AMARILLA ■: “Volcán activo con cambios en el comportamiento del nivel base de los parámetros monitoreados y otras manifestaciones”.

#### **4. Actividad de los volcanes Las Ánimas, Doña Juana Y AzufraI – diciembre de 2023**

Como parte de la misión institucional, el Servicio Geológico Colombiano a través del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (OVSPA), tiene como función el estudio de los volcanes activos de Nariño. Para el cumplimiento de esta tarea el OVSPA continuó con el monitoreo permanente de los volcanes Las Ánimas, Doña Juana y AzufraI (Figura 85).



**Figura 85.** Localización de los volcanes de Colombia se resalta los del segmento sur, entre ellos están Galeras, Doña Juana, Azufral, Cumbal, Las Ánimas, Chiles, Cerro Negro y los monogénicos de Guamuez Sibundoy monitoreados por el OVSPA - Servicio Geológico Colombiano

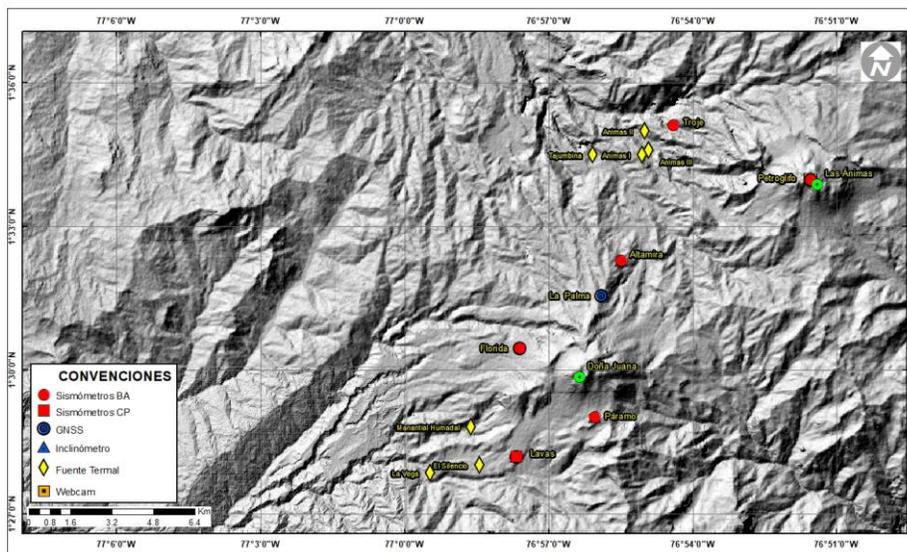
La información obtenida por los diferentes métodos geofísicos y geoquímicos de vigilancia se viene analizando de manera periódica con el propósito de obtener un conocimiento básico del fenómeno volcánico e identificar de manera oportuna un posible cambio en la actividad y realizar el diagnóstico del nivel de actividad.

#### 4.1. Actividad de los Volcanes Doña Juana y Las Ánimas

##### 4.1.1. Red de Vigilancia

La red de monitoreo de los volcanes Doña Juana y Las Ánimas está conformada por cuatro estaciones sísmicas de banda ancha y una de corto periodo, cuatro inclinómetros electrónicos y tres estaciones GNSS permanentes, adicionalmente en el sector de Petroglifo se tiene instalada una cámara web (Figura 86, Tabla 23). Además, se tiene la señal de la estación sísmica La Cruz que pertenece a la Red Sismológica Nacional de Colombia, RSNC (Figura 86). Muestreo geoquímico de aguas en 6 manantiales termales.

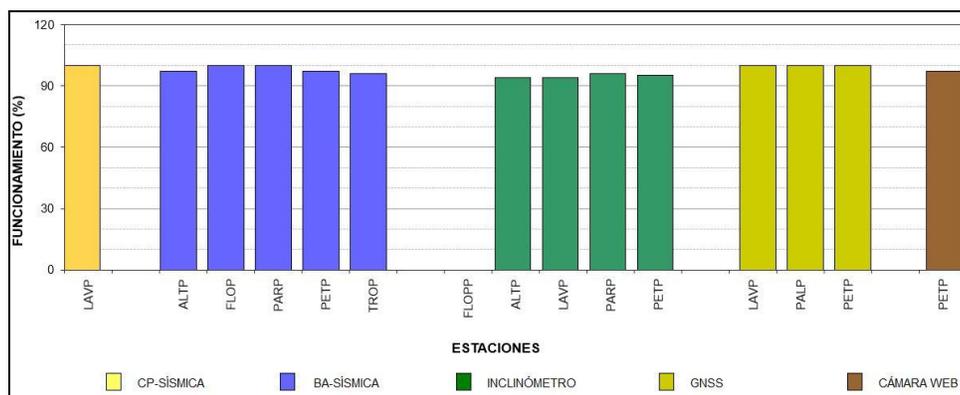
En el periodo evaluado, las estaciones de la red telemétrica instaladas para el monitoreo de los volcanes Doña Juana y Las Ánimas tuvieron un funcionamiento promedio del 98% (Figura 87).



**Figura 86.** Localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo de los volcanes Doña Juana y Las Ánimas durante el mes de diciembre de 2023

**Tabla 23.** Estaciones que forman parte de la red de vigilancia de la actividad de los volcanes Doña Juana y Las Ánimas en diciembre de 2023

| Estación   | Código | Transm. de Datos | Tipo de Sensor           | Componente | Dist. a Doña Juana [Km] | Dir. respecto a Doña Juana | Dist. a Las Ánimas [Km] | Dir. respecto a Las Ánimas | Altitud [m] |
|------------|--------|------------------|--------------------------|------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------|
| Páramo     | PARP   | Digital          | Sismómetro Banda Ancha   | Triaxial   | 2.1                     | SSE                        | 12.3                    | SW                         | 3137        |
| Páramo     | PARP   | Digital          | Inclínómetro Electrónico | Biaxial    | 2.1                     | SSE                        | 12.3                    | SW                         | 3533        |
| Lavas      | LAVP   | Digital          | Sismómetro Corto Periodo | Triaxial   | 4.1                     | SW                         | 15.5                    | SW                         | 2954        |
| Lavas      | LAVP   | Digital          | Inclínómetro Electrónico | Biaxial    | 4.1                     | SSW                        | 15.5                    | SW                         | 2954        |
| Lavas      | LAVP   | Digital          | GNSS                     | Triaxial   | 4.1                     | SSW                        | 15.5                    | SW                         | 2954        |
| La Palma   | PALP   | Digital          | GNSS                     | Triaxial   | 2.7                     | NNE                        | 9                       | SW                         | 3477        |
| Altamira   | ALTP   | Digital          | Sismómetro Banda Ancha   | Triaxial   | 4.1                     | NNE                        | 7,9                     | SW                         | 3137        |
| Altamira   | ALTP   | Digital          | Inclínómetro Electrónico | Biaxial    | 4.1                     | NNE                        | 7,9                     | SW                         | 3137        |
| Petroglifo | PETP   | Digital          | Sismómetro Banda Ancha   | Triaxial   | 8.9                     | NNE                        | 4,6                     | W                          | 2905        |
| Florida    | FLOP   | Digital          | Sismómetro Banda Ancha   | Triaxial   | 2.6                     | WNW                        | 13.1                    | SW                         | 3171        |
| Petroglifo | PETP   | Digital          | Inclínómetro Electrónico | Biaxial    | 8.9                     | NNE                        | 4,6                     | W                          | 2905        |
| Petroglifo | PETP   | Digital          | GNSS                     | Triaxial   | 8.9                     | NNE                        | 4,6                     | W                          | 2905        |
| Florida    | FLOP   | Digital          | GNSS                     | Triaxial   | 2.6                     | WNW                        | 13.1                    | SW                         | 3171        |
| Troje      | TROP   | Digital          | Sismómetro Banda Ancha   | Triaxial   | 9.6                     | NE                         | 6,2                     | NW                         | 2726        |



**Figura 87.** Histograma del porcentaje de funcionamiento de las estaciones que hacen parte de la red de monitoreo de los volcanes Doña Juana y Las Ánimas en diciembre de 2023

#### 4.1.2. Sismología

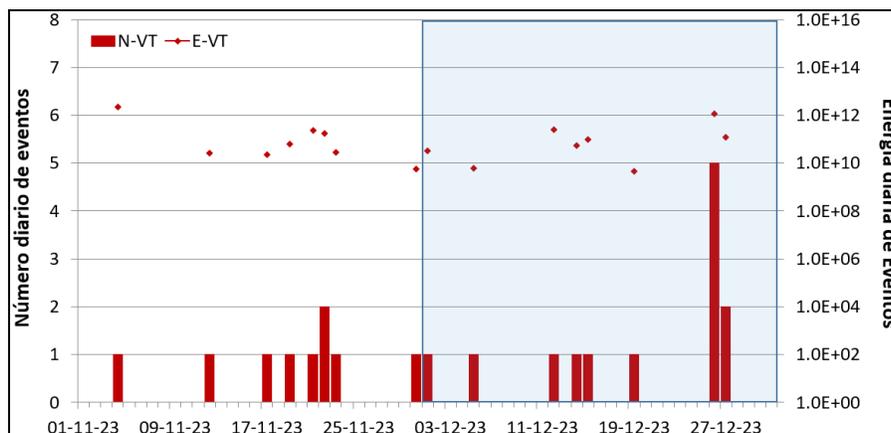
En diciembre dentro de niveles bajos de actividad y con respecto al mes anterior, se observó incremento en la ocurrencia y disminución en la energía sísmica en la zona de influencia de los volcanes Doña Juana y Las Ánimas, con el registro de 13 sismos asociados con fractura de material cortical (VT) que liberaron una energía de  $1.76 \times 10^{12}$  ergios (Figura 88, Tablas 24) y 25).

**Tabla 24.** Número de eventos volcánicos por tipo, Doña Juana y Las Ánimas, noviembre y diciembre 2023

| Periodo<br>Evaluado | Número de eventos por tipo |    |     |     |       |
|---------------------|----------------------------|----|-----|-----|-------|
|                     | VT                         | LP | TRE | HIB | TOTAL |
| Noviembre 2023      | 9                          | 0  | 0   | 0   | 9     |
| Diciembre 2023      | 13                         | 0  | 0   | 0   | 13    |

**Tabla 25.** Energía de eventos volcánicos por tipo, Doña Juana y Las Ánimas, noviembre y diciembre 2023

| Periodo<br>Evaluado | Energía de eventos volcánicos por tipo |          |          |          |          |
|---------------------|--|----------|----------|----------|----------|
|                     | VT                                     | LP       | TRE      | HIB      | TOTAL    |
| Noviembre 2023      | 2.82E+12                               | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.82E+12 |
| Diciembre 2023      | 1.76E+12                               | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.76E+12 |



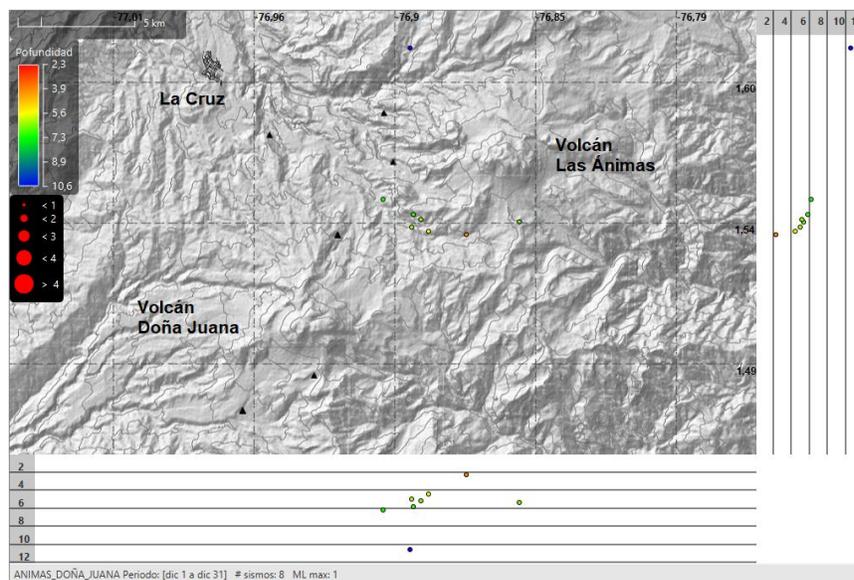
**Figura 88.** Ocurrencia y energía diaria de sismos de fractura VT en la región de influencia de los volcanes Doña Juana y Las Ánimas, noviembre y diciembre 2023. El recuadro indica el periodo evaluado

Fueron localizados 8 eventos VT que se ubicaron de manera dispersa en la región de los volcanes Doña Juana y Las Ánimas, en distancias entre 3 y 6 km, con profundidades entre 2 y 11 km con respecto a la altura de referencia (4200 m) y magnitud local máxima de 1.0 (Figura 89).

Los sismos VT localizados son de baja energía, solamente uno alcanzó una magnitud local de 1.0 y en la Tabla 26 se consignan sus características de localización.

**Tabla 26.** Sismo con ML de 1.0, Doña Juana y Las Ánimas, diciembre 2023

| Fecha      | Hora local | Latitud | Longitud | Prof. Km | ML  |
|------------|------------|---------|----------|----------|-----|
| 26/12/2023 | 16:52:22   | 1.5390  | -76.8940 | 5.0      | 1.0 |



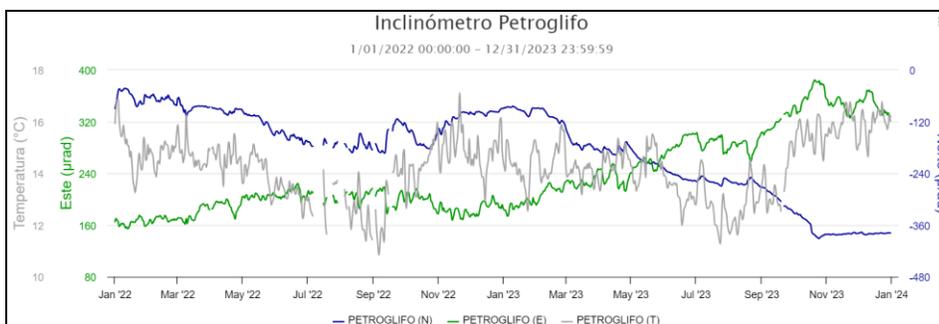
**Figura 89.** Localizaciones de sismos VT en Doña Juana y Las Ánimas, diciembre 2023

### 4.1.3. Deformación

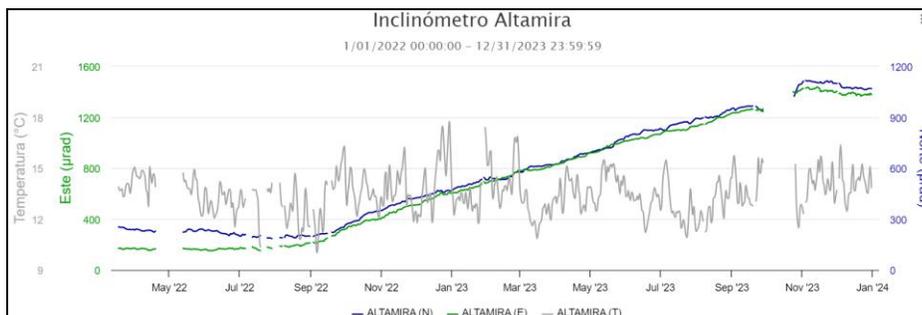
#### 4.1.3.1. Inclínometría Electrónica

En la Figura 90, se presenta el registro del inclinómetro Petroglifo, observando que las variaciones en las componentes están directamente relacionadas con los cambios en el sensor de temperatura, por lo tanto, se considera estable.

En la Figura 91 se muestra el registro del inclinómetro Altamira, posterior al mantenimiento realizado hacia finales de octubre de 2023 donde fue posible reanudar las medidas de inclinación con este sensor, observando estabilidad en sus componentes.



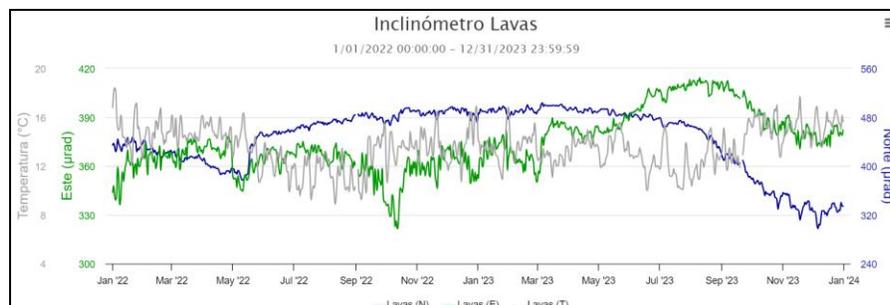
**Figura 90.** Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) y registro de temperatura del inclinómetro electrónico Petroglifo, instalado en el volcán Las Ánimas, para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2022 y el 31 de diciembre de 2023



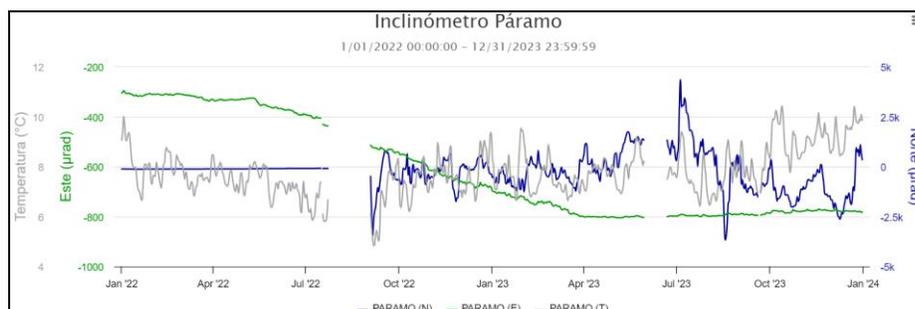
**Figura 91.** Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) y registro de temperatura del inclinómetro electrónico Altamira, instalado en el límite entre los volcanes Las Ánimas y Doña Juana, para el periodo comprendido entre el 18 de marzo de 2022 y el 31 de diciembre de 2023

En cuanto al volcán Doña Juana luego del comportamiento levemente ascendente mostrado por la componente Norte del inclinómetro Lavas, se observa un cambio de tendencia, en descenso desde el 25 de marzo de 2023, el cual acumula cerca de 189  $\mu\text{rad}$ , mientras tanto la Este presentó un ligero ascenso desde el 5 de mayo de 2023 hasta la primera semana de agosto con 33  $\mu\text{rad}$  (Figura 92), posteriormente muestra descenso y desde inicio de diciembre de 2023 tiende a estabilizarse.

En la Figura 93 se muestran los registros de las componentes de inclinación de Páramo, este sensor presenta variaciones muy altas en la componente Norte por lo cual hacia finales del mes de marzo de 2023 fue necesario visitar la estación en campo, se niveló el sensor, pero la componente Norte continúa mostrando fluctuaciones en su registro, sin describir alguna tendencia claramente diferenciable, por lo cual se considera estabilidad en sus dos componentes.



**Figura 92.** Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) y registro de temperatura del inclinómetro electrónico Lavas, instalado en el volcán Doña Juana, para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2022 y el 31 de diciembre de 2023



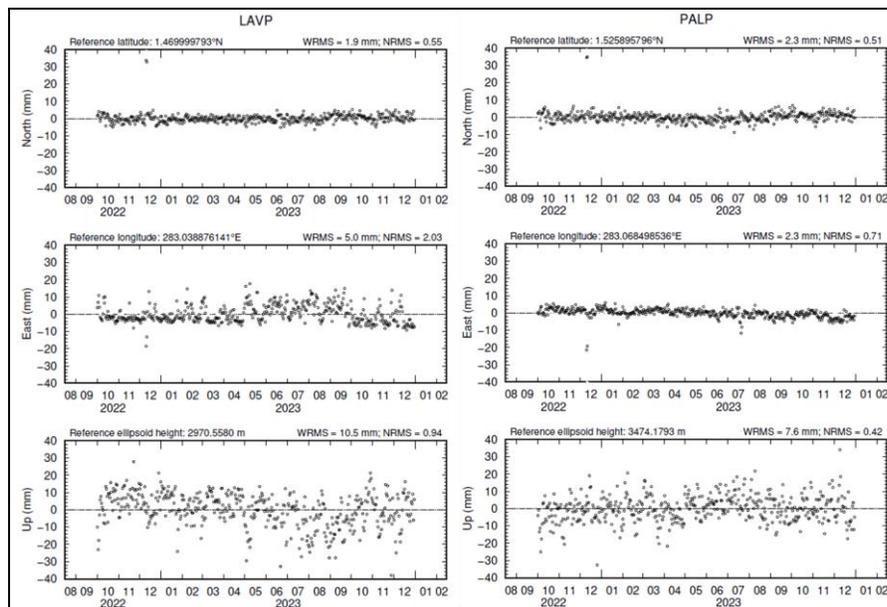
**Figura 93.** Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) y registro de temperatura del inclinómetro electrónico Páramo, instalado en el volcán Doña Juana, para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2022 y el 31 de diciembre de 2023

#### 4.1.3.2. Estaciones GNSS Permanentes

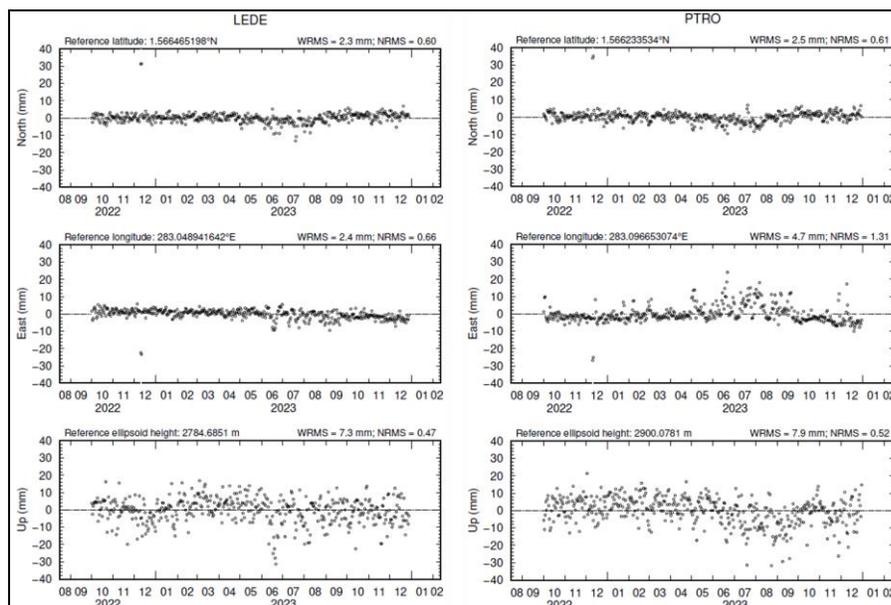
Para el periodo evaluado se tienen sobre la superficie del Volcán Doña Juana, tres estaciones GNSS Permanentes, La Palma, Lavas y Florida, esta última instalada desde el 2 de noviembre de 2023, y en el volcán Las Ánimas se tiene un GNSS emplazado en el sitio de la estación multiparámetro Petroglifo. Adicionalmente se cuenta con información de la estación GNSS LEDE, instalada en cercanías del volcán Doña Juana por el grupo de trabajo GeORED – SGC.

Para el análisis se contempló el procesamiento Baseline, mediante el software GAMIT/GLOBK 10.71. Utilizando efemérides finales, parámetros numéricos que describen las posiciones precisas de los satélites. En las Figuras 94 y 95 se indica el comportamiento de las estaciones

GNSS Lavas, La Palma, Petroglifo y Ledezma, observando estabilidad en las direcciones Norte, Este y Vertical.



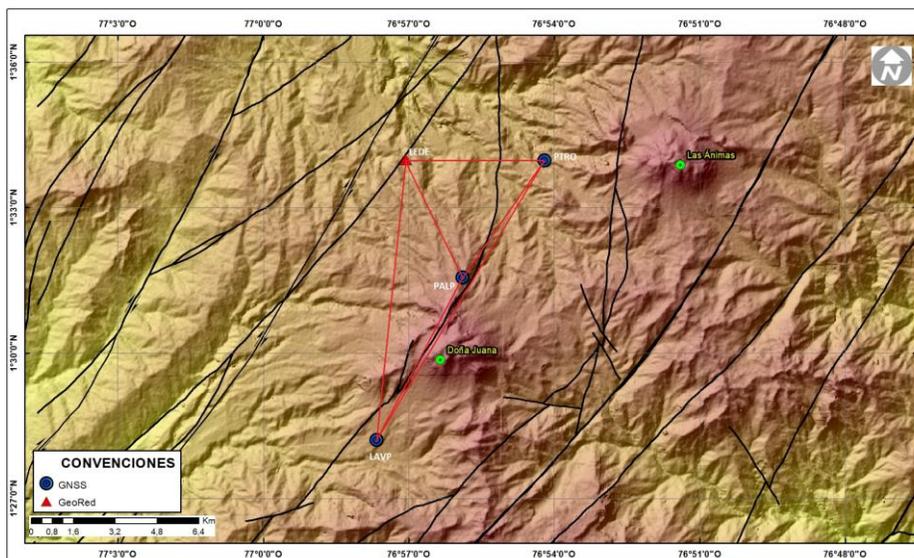
**Figura 94.** Variaciones en las direcciones Norte, Este y altura de las estaciones GNSS Lavas y Palma, instaladas sobre la superficie del volcán Doña Juana, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 30 de diciembre de 2023



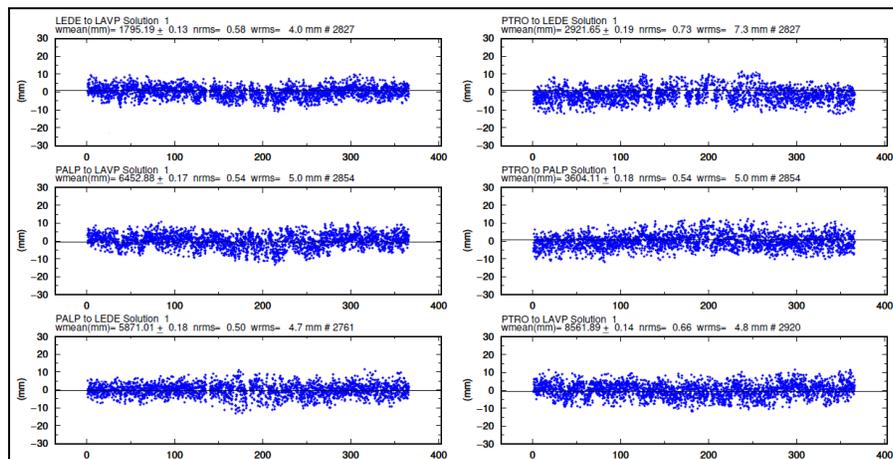
**Figura 95.** Variaciones en las direcciones Norte, Este y altura de las estaciones GNSS Ledezma y Petroglifo, instaladas sobre la superficie del complejo volcánico Doña Juana – Las Ánimas, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 30 de diciembre de 2023

#### 4.1.3.3. Líneas Base

Realizando un procesamiento diferencial con una solución cada tres horas, podemos obtener líneas base entre estaciones GNSS, series temporales que nos indican la variación en distancia entre una y otra estación, para el volcán Doña Juana se tienen instaladas tres estaciones GNSS Permanentes y en Las Ánimas, una estación; la estación LEDE fue instalada por el grupo de trabajo GeoRED - SGC, en la Figura 96, se muestra su ubicación y en la Figura 97, se muestra las variaciones en distancia con las soluciones cada tres horas usando orbitas rápidas; observando estabilidad en estas series temporales.



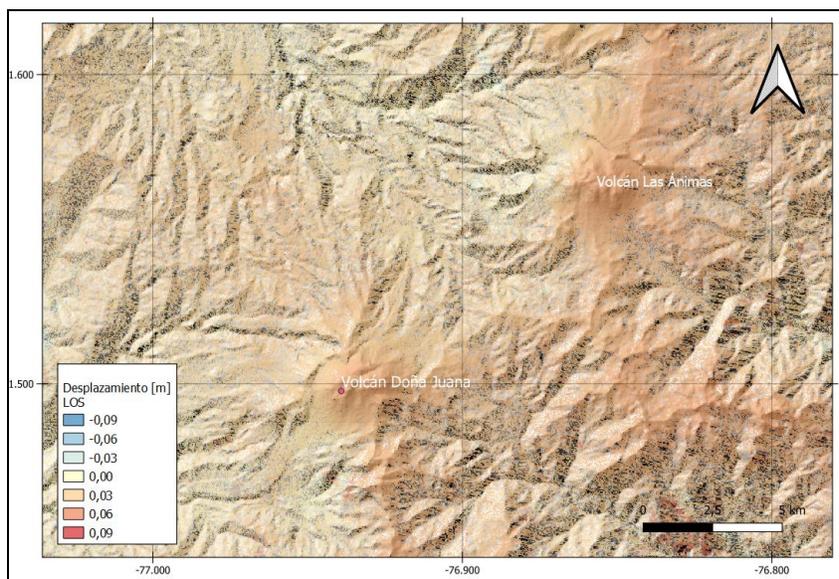
**Figura 96.** Ubicación de las estaciones GNSS instaladas sobre la superficie de Doña Juana y Las Ánimas, dispuestas para el seguimiento de los cambios en la corteza volcánica. El trazo de color rojo indica las estaciones para las cuales se calculó línea base



**Figura 97.** Variaciones en distancia entre estaciones GNSS, línea Base con soluciones cada 3 horas, la serie temporal está entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2023. En la parte superior se etiqueta para las estaciones que fue determinada

#### 4.1.3.4. D-InSAR

En la Figura 98, se muestra el mapa de desplazamiento para la zona volcánica de Doña Juana y Las Ánimas obtenido con procesamiento interferométrico diferencial, utilizando el software ISCE haciendo uso de un par de imágenes de Radar de Apertura Sintética Sentinel -1 de la Agencia Espacial Europea (ESA) de órbita descendente. Para el periodo evaluado con esta técnica de procesamiento no se observa ningún patrón de deformación.



**Figura 98.** Desplazamientos calculados con la técnica D-InSAR para el par interferométrico del 3 y el 15 de diciembre de 2023, imágenes Sentinel-1, órbita descendente. Área del Complejo volcánico Doña Juana – Las Ánimas

#### **4.1.4. Electromagnetismo**

Los volcanes Animas – Doña Juana no cuentan con monitoreo electromagnético.

#### **4.1.5. Geoquímica**

##### **4.1.5.1. Muestreo de aguas en fuentes termales – Volcanes Las Ánimas y Doña Juana**

Para el mes de diciembre no se llevó a cabo ninguna actividad al respecto.

#### **4.1.6. Actividad Superficial**

Durante el mes de diciembre de 2023 no se tuvo reportes relacionados con actividad superficial del Complejo Volcánico Doña Juana y Las Ánimas.

#### **4.1.7. Conclusiones**

En diciembre se mantuvieron los niveles bajos de actividad en la zona de influencia de los volcanes Doña Juana y Las Ánimas, indicando leve incremento en la ocurrencia y disminución en la energía de los sismos, todos ellos asociados con fractura de material cortical, con ML máxima de 1.0.

La evaluación de la actividad de los volcanes Doña Juana y Las Ánimas en diciembre 2023 permitió mantener el estado de **ALERTA VERDE** ●: “Volcán activo en reposo”.

#### **4.2. Actividad del Volcán Azufral**

##### **4.2.1. Red de Vigilancia**

En la Figura 99 se muestra la disposición de las estaciones instaladas para el monitoreo de la actividad sísmica y de deformación cortical del volcán Azufral, las cuales son: La Roca, Chaitán, Laguna Verde, Ventana, Lobo y Mallama, las dos primeras cuentan con sensores sísmicos e inclinómetros electrónicos, Laguna Verde, Ventana, Lobo y Mallama cuentan con sensores sísmicos; además, Laguna Verde, Roca, Ventana y Lobo cuentan con GNSS, adicionalmente se tienen dos cámaras web para el seguimiento de la actividad superficial y una termocupla. En la Tabla 27 se consignan algunas de sus características.

De igual forma, se cuenta con una estación meteorológica La Roca, que consta de un anemómetro ultrasónico, barómetro, piranómetro, pluviómetro y un termómetro-higrómetro (Figura 100).

También se tienen sensores para medición de campo magnético y eléctrico, ubicados hacia el sector de la estación multiparamétrica Lobo.

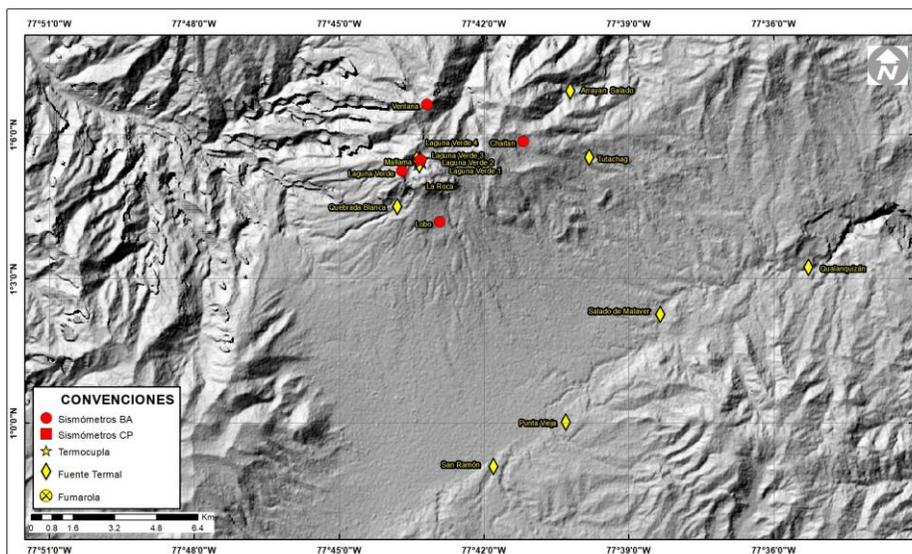


Figura 99. Localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo sísmico y geoquímico del volcán Azufral durante el mes de diciembre de 2023

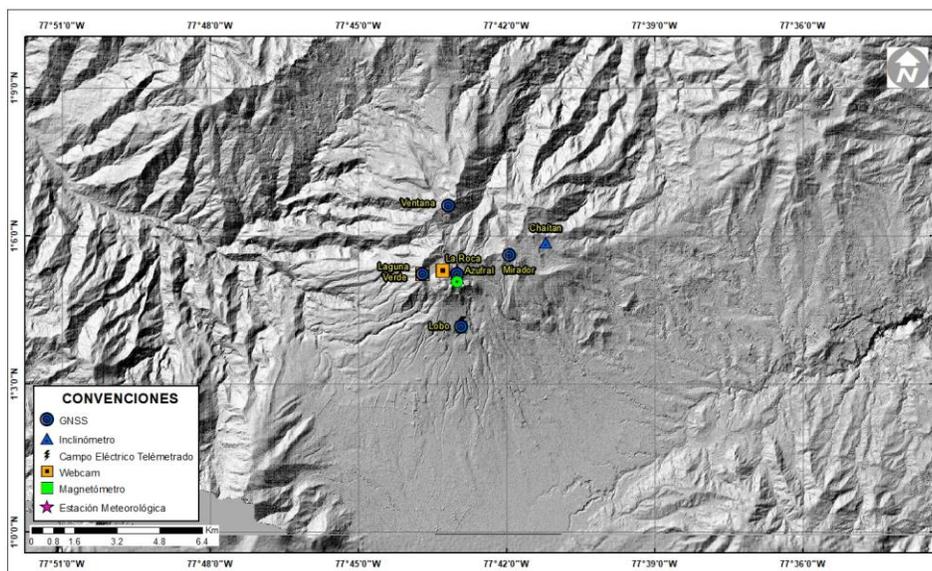


Figura 100. Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo en deformación, geofísica y cámara web del volcán Azufral en el mes de diciembre de 2023

Tabla 27. Estaciones que conformaron la red de vigilancia del volcán Azufral en el mes de diciembre de 2023

| Estación | Código | Transm. De Datos | Tipo de Sensor           | Componente | Distancia a la Laguna Verde [Km] | Ubicación respecto a la Laguna Verde | Altitud [m] |
|----------|--------|------------------|--------------------------|------------|----------------------------------|--------------------------------------|-------------|
| La Roca  | ROCP   | Digital          | Sismómetro Corto periodo | Triaxial   | 1.2                              | E                                    | 4021        |

Informe mensual de actividad de los volcanes Galeras, Cumbal, Chiles – Cerro Negro, Las Ánimas, Doña Juana y Azufraal – diciembre 2023

|              |      |         |                           |          |     |     |      |
|--------------|------|---------|---------------------------|----------|-----|-----|------|
| Chaitán      | CHAP | Digital | Sismómetro de Banda Ancha | Triaxial | 4.3 | ENE | 3730 |
| Laguna Verde | LAGP | Digital | Sismómetro de Banda Ancha | Triaxial | 0.5 | NW  | 3921 |
| Lobo         | LOBP | Digital | Sismómetro de Banda Ancha | Triaxial | 2.4 | SE  | 3569 |
| Mallama      | MALP | Digital | Sismómetro de Banda Ancha | Triaxial | 0.5 | NW  | 3606 |
| Ventana      | VENP | Digital | Sismómetro de Banda Ancha | Triaxial | 2.5 | NE  | 3981 |
| La Roca      | ROCP | Digital | Inclinómetro electrónico  | Biaxial  | 1.2 | E   | 4021 |
| Chaitán      | CHAP | Digital | Inclinómetro electrónico  | Biaxial  | 4.3 | ENE | 3730 |
| Mallama      | MALP | Digital | Termocupla                | Uniaxial | 0.5 | NW  | 3606 |
| Lobo_EM      | LBMP | Digital | Autopotencial             | Biaxial  | 0,5 | SE  | 3569 |
| Lobo_EM      | LBMP | Digital | Magnetómetro              | Biaxial  | 0,5 | SE  | 3569 |
| La Roca      | ROCP | Digital | GNSS                      | Triaxial | 1.2 | E   | 4021 |
| Laguna Verde | LAGP | Digital | GNSS                      | Triaxial | 0.5 | SW  | 3921 |
| Lobo         | LOBP | Digital | GNSS                      | Triaxial | 2.4 | SE  | 3569 |
| Ventana      | VENP | Digital | GNSS                      | Triaxial | 2.5 | NE  | 3981 |
| Mirador      | MIRP | Digital | GNSS                      | Triaxial | 2.9 | ENE | 3906 |
| Laguna Verde | LVRP | Digital | Cámara web                | Triaxial | 0.5 | NW  | 3921 |
| Mallama      | MALP | Digital | Cámara web                | Triaxial | 0.5 | NW  | 3606 |

En general, la red de monitoreo telemétrico del volcán Azufraal alcanzó un porcentaje promedio de operación del 95% para este mes (Figura 101).

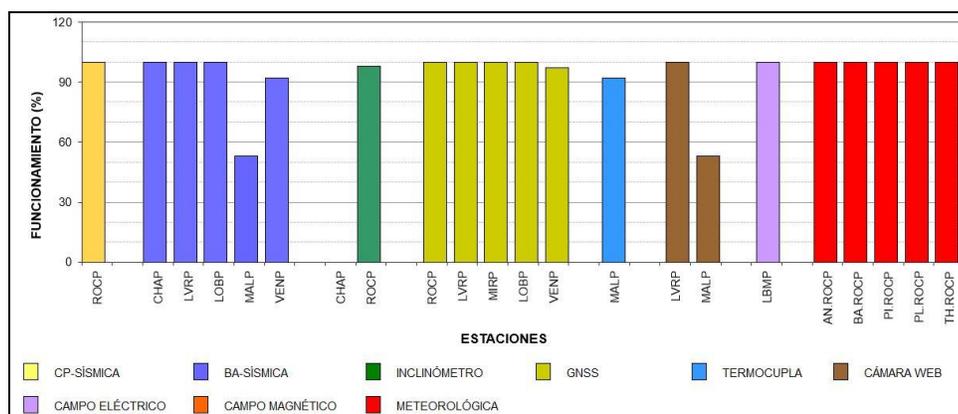


Figura 101. Histograma del porcentaje de funcionamiento de las estaciones que conformaron la red de monitoreo del volcán Azufraal durante diciembre de 2023

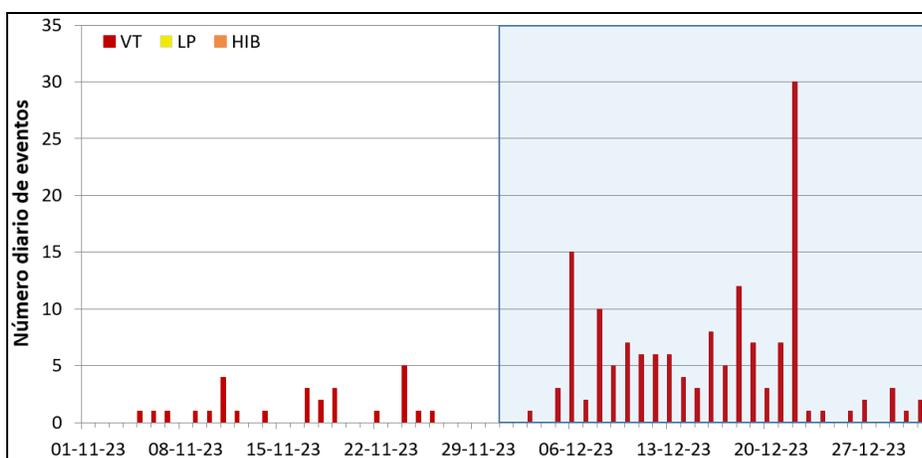
#### 4.2.2. Sismología

En diciembre se mantuvieron los niveles bajos de actividad en el volcán Azufraal, indicando un incremento en la ocurrencia sísmica con respecto a lo registrado en noviembre, pasando de 27

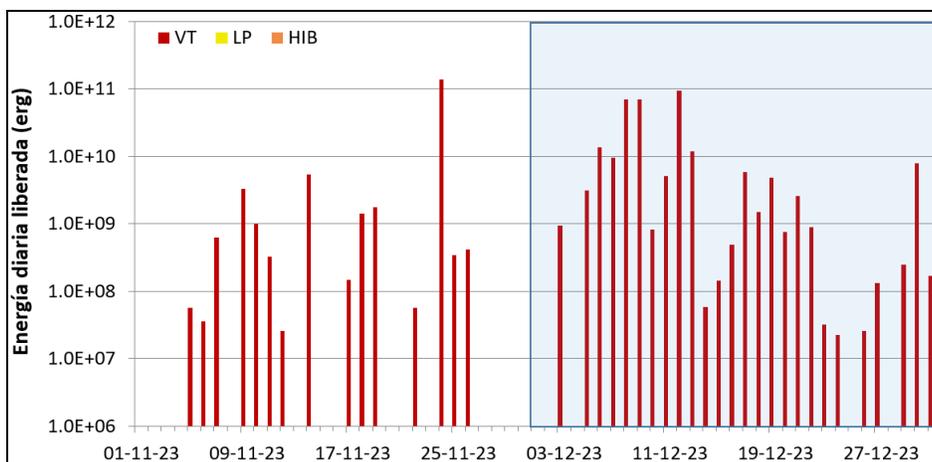
a 151 eventos, todos ellos asociados con fractura de material cortical VT (Figura 102, Tabla 28). La energía sísmica también incrementó su valor, pasando de  $1.53 \times 10^{11}$  ergios a  $3.02 \times 10^{11}$  ergios (Tabla 29, Figura 103).

**Tabla 28.** Número de eventos volcánicos por tipo en Azufral, noviembre y diciembre 2023

| Periodo<br>Evaluado | Número de eventos por tipo |    |     |     |       |
|---------------------|----------------------------|----|-----|-----|-------|
|                     | VT                         | LP | TRE | HIB | TOTAL |
| Noviembre 2023      | 27                         | 0  | 0   | 0   | 27    |
| Diciembre 2023      | 151                        | 0  | 0   | 0   | 151   |



**Figura 102.** Ocurrencia diaria de sismos volcánicos por tipo en Azufral, noviembre y diciembre 2023. El recuadro indica el periodo evaluado



**Figura 103.** Energía diaria de sismos volcánicos por tipo en Azufral, noviembre y diciembre 2023. El recuadro indica el periodo evaluado

**Tabla 29.** Energía de eventos volcánicos por tipo en Azufral, noviembre y diciembre 2023

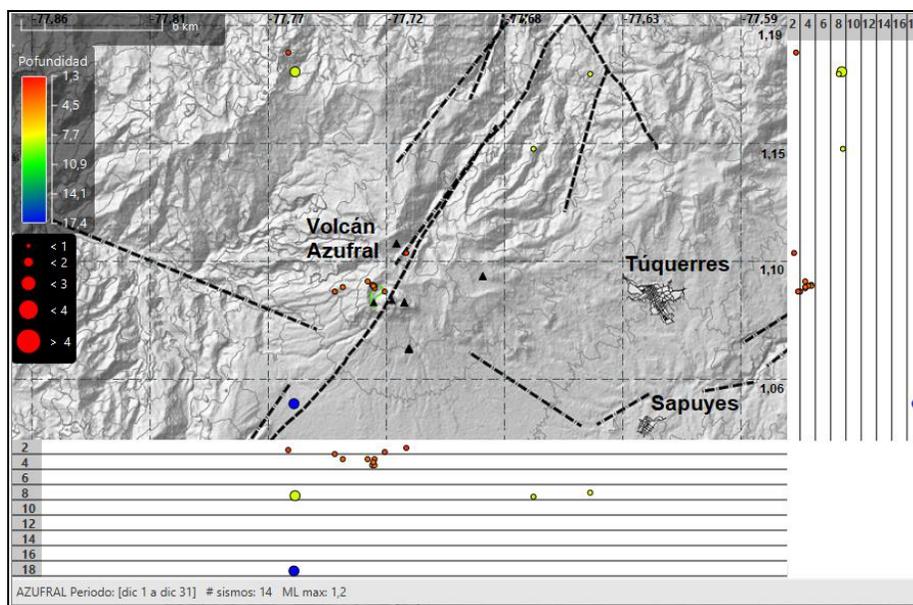
| Periodo<br>Evaluado | Energía de eventos volcánicos por tipo |          |          |          |          |
|---------------------|--|----------|----------|----------|----------|
|                     | VT                                     | LP       | TRE      | HIB      | TOTAL    |
| Noviembre 2023      | 1.53E+11                               | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.53E+11 |
| Diciembre 2023      | 3.02E+11                               | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 3.02E+11 |

Fueron localizados 14 sismos que se ubicaron de manera dispersa en la región volcánica, en distancias entre 0.2 y 13 km del domo Mallama, con profundidades entre 1 y 17 km con respecto a la altura de referencia (4000 m) y magnitud local máxima de 1.2 (Figura 104).

La magnitud local de los sismos es pequeña, pues son eventos de baja energía, solamente dos de ellos alcanzaron una magnitud local de 1.1 y 1.2 y en la Tabla 30 se muestran sus características de localización.

**Tabla 30.** Sismos con ML de 1.2 y 1.1, volcán Azufral, diciembre 2023

| Fecha      | Hora local | Latitud | Longitud | Prof. Km | ML  |
|------------|------------|---------|----------|----------|-----|
| 17/12/2023 | 12:35:49   | 1.1740  | -77.7563 | 8        | 1.2 |
| 17/12/2023 | 15:33:53   | 1.0457  | -77.7568 | 17       | 1.1 |



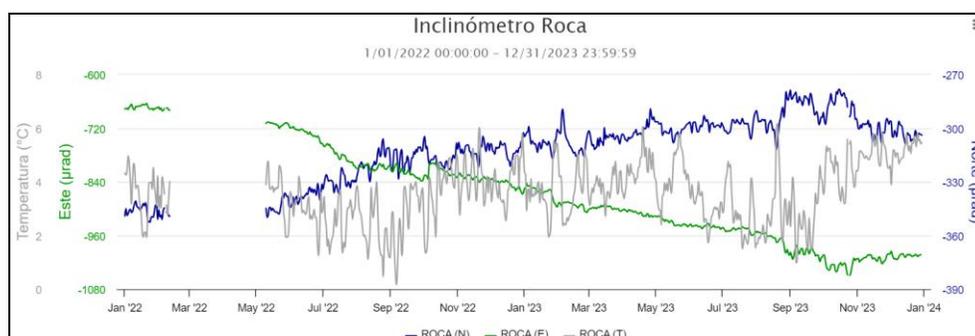
**Figura 104.** Localizaciones de sismos VT en Azufral, diciembre 2023

### 4.2.3. Deformación

La red de deformación del volcán Azufraal cuenta con dos inclinómetros electrónicos y cinco estaciones GNSS permanentes. Debido a problemas con el sensor de inclinometría de la estación Chaitán, se decide retirarlo el 23 de agosto de 2023.

#### 4.2.3.1. Inclinometría Electrónica

Después de las variaciones observadas desde 2018, que incluyeron una tendencia ascendente en la componente de inclinación Norte y una tendencia descendente en la Este de la estación La Roca, estas tendencias tienden a estabilizarse a partir de principios de octubre de 2023 (Figura 105).

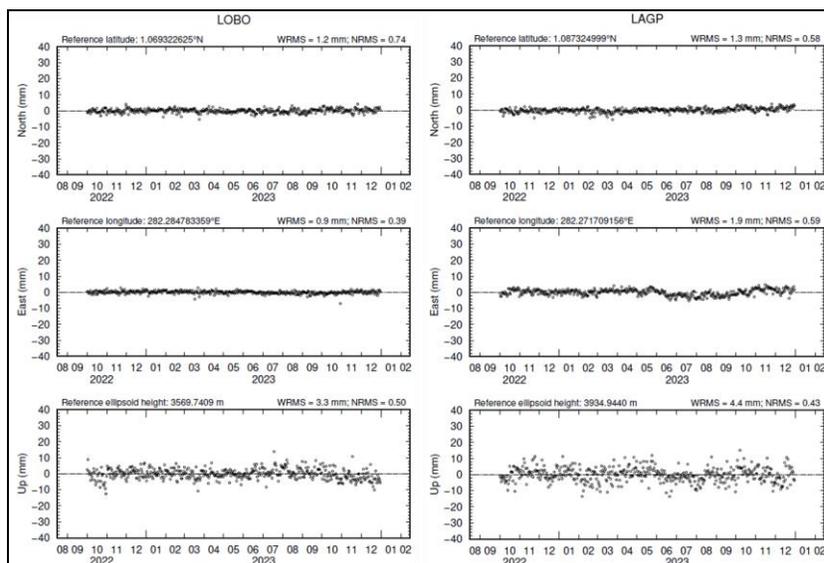


**Figura 105.** Componentes de inclinación Norte y Este ( $\mu\text{rad}$ ) y registro de temperatura del inclinómetro electrónico Roca, instalado en el volcán Azufraal, para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2022 y el 31 de diciembre de 2023

#### 4.2.3.2. Estaciones GNSS Permanentes

Para el periodo evaluado se tienen sobre la superficie del Volcán Azufraal, cinco estaciones GNSS Permanentes, La Roca, Laguna, Lobo, Ventana y Mirador, esta última instalada desde el 10 de noviembre de 2023.

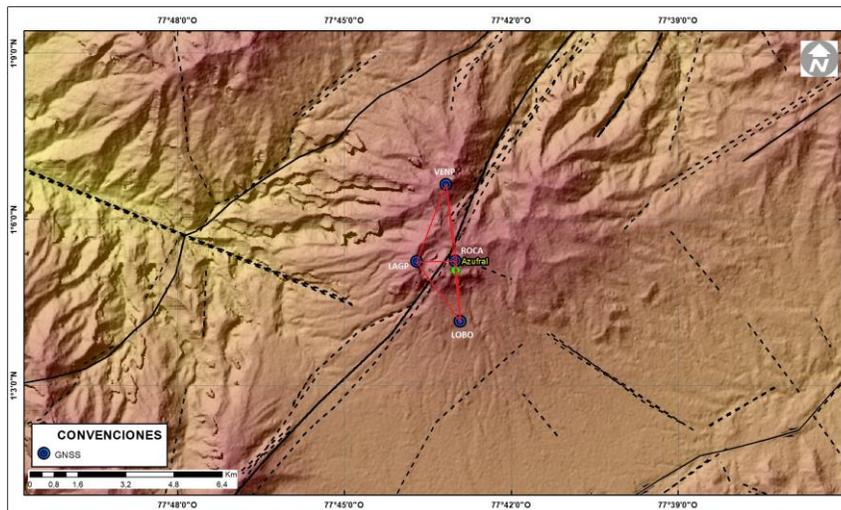
Para el análisis se contempló el procesamiento Baseline, mediante el software GAMIT/GLOBK 10.71. Utilizando efemérides finales, parámetros numéricos que describen las posiciones precisas de los satélites. En la Figura 106, a manera de ejemplo se muestra el comportamiento de las direcciones Norte, Este y Altura de los GNSS Lobo y Laguna evidenciando estabilidad en estas series temporales.



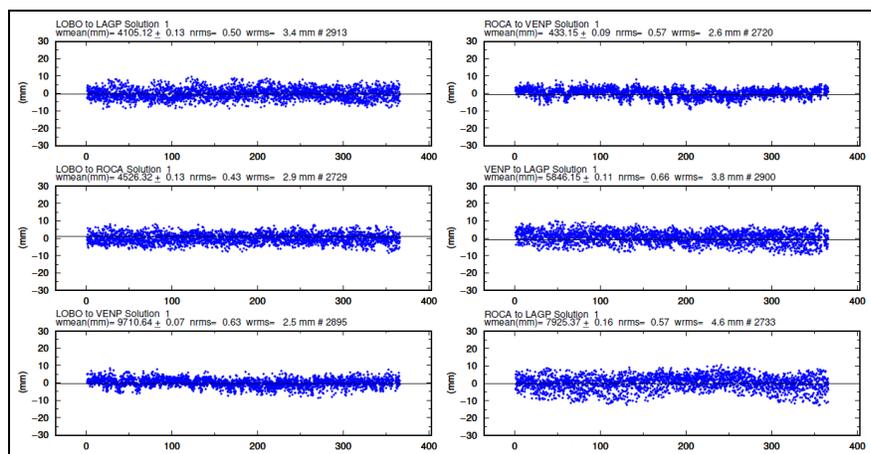
**Figura 106.** Variaciones en las direcciones Norte, Este y Altura de las estaciones GNSS Permanentes Lobo y Laguna instaladas en Azufral, para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 30 de diciembre de 2023, procesados con el software GAMIT/GLOBK

#### 4.2.3.3. Líneas Base

Realizando un procesamiento diferencial con una solución cada tres horas, podemos obtener líneas base entre estaciones GNSS, series temporales que nos indican la variación en distancia entre una y otra estación, medida cada tres horas, es posible realizar el arreglo entre estaciones como mejor convenga, en la Figura 107, se muestra la ubicación de las estaciones GNSS y las estaciones propuestas para la solución, y en la Figura 108, se muestran las variaciones en distancia con las soluciones cada tres horas usando orbitas rápidas, en general se observa estabilidad en estas series temporales.



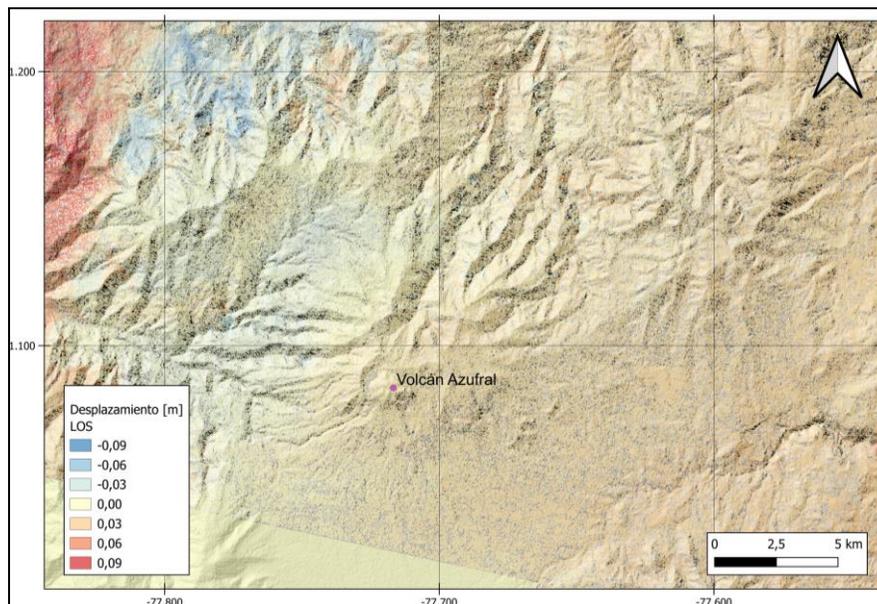
**Figura 107.** Ubicación de las estaciones GNSS instaladas sobre la superficie de Azufral, dispuestas para el seguimiento de los cambios en la corteza volcánica. Los trazos de color rojo indican las estaciones para las cuales se calculó líneas base



**Figura 108.** Variaciones en distancia entre estaciones GNSS, líneas Base con soluciones cada 3 horas, las series temporales están entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2023. En la parte superior de cada serie, se etiquetan para las estaciones que fue determinada

#### 4.2.3.4. D\_InSAR

En la Figura 83, se muestra el mapa de desplazamiento para la zona volcánica de Azufral obtenido con procesamiento interferométrico diferencial, utilizando el software ISCE haciendo uso de un par de imágenes de Radar de Apertura Sintética Sentinel -1 de la Agencia Espacial Europea (ESA) de orbita descendente. Para el periodo evaluado con esta técnica de procesamiento no se observa ningún patrón de deformación.

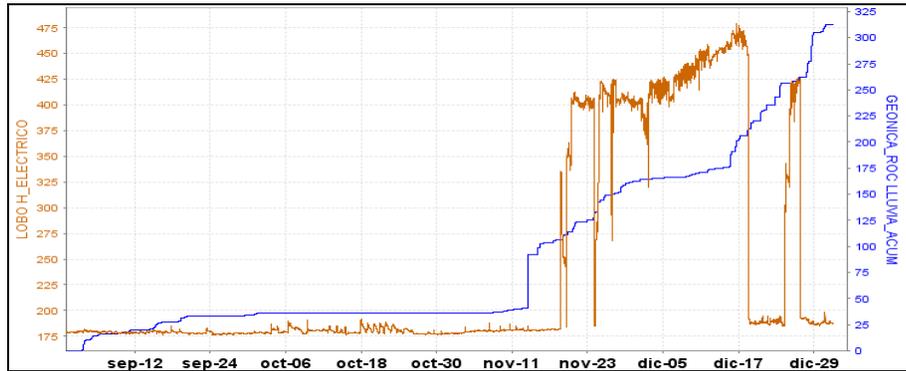


**Figura 109.** Desplazamientos calculados con la técnica D-InSAR para el par interferométrico del 3 y el 15 de diciembre de 2023, imágenes Sentinel-1, órbita descendente. Área de influencia volcán Azufral

#### 4.2.4. Electromagnetismo

En diciembre de 2023, el monitoreo electromagnético, en la zona de influencia del volcán Azufral se realizó con la información que se registra a través de la estación de monitoreo eléctrico Lobo (LOB) que cuenta con dos dipolos dispuestos en dirección NS y EW, para medir el campo eléctrico horizontal (CEH) en la zona de estudio. Sin embargo, al parecer las condiciones de fuertes lluvias que afectan la zona donde se encuentra instalada la estación, desde inicios del mes de noviembre, han generado un mal funcionamiento del dipolo eléctrico NS, por lo que la componente horizontal resultante está mostrando un comportamiento muy variable.

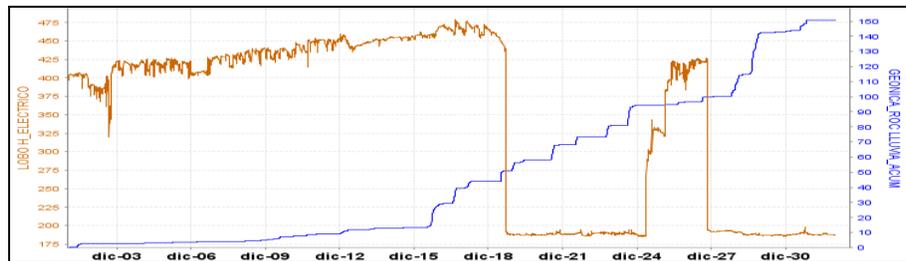
Entre septiembre y diciembre de 2023, se identificó que a partir de 13 de noviembre inició un periodo de fuertes lluvias en la zona ocasionando que la componente NS del dipolo eléctrico horizontal comenzara a mostrar un mal funcionamiento, generando pulsos que incrementan el nivel base de la serie de datos en alrededor de 220 mV, pasando de un nivel promedio de alrededor de 180 mV a 400 mV, y aun cuando eventualmente la serie temporal regresa al nivel base, posiblemente porque el medio alcanza a drenar el exceso de lluvia, pero la presencia constante de agua lluvia hace que el medio vuelva a saturar y que se sigan dando los pulsos (Figura 110).



**Figura 110.** Variaciones del campo eléctrico horizontal (CEH), en la estación de LOB (naranja), junto con el registro de lluvia de la estación Roca (azul), ubicada en la parte alta del volcán Azufraal, para el periodo entre septiembre y diciembre de 2023

Posiblemente el incremento de las lluvias, del 13 de noviembre, repercuten en los valores del CEH, que muestran un salto el 18 de noviembre y se mantiene de manera casi permanente hasta el 18 de diciembre, cuando la serie temporal regresa nuevamente al valor base usual, de alrededor de 188 mV y se mantiene hasta aproximadamente el 24 de diciembre cuando nuevamente se genera un salto, que se mantiene hasta el 26 de diciembre, cuando vuelve nuevamente al valor inicial y posteriormente se mantiene en el nivel de alrededor de 190 mV, hasta finalizar diciembre (Figura 110). El valor de lluvia acumulada entre el 13 de noviembre y finalizado diciembre es de 272 mm (Figura 110).

En diciembre de 2023, los registros se mantienen en el salto. Por lo tanto, los periodos cuando se tienen datos que pueden ser considerados como confiables con entre el 18 y el 24 de diciembre y entre el 26 y 31 de diciembre, donde el valor promedio del CEH fue de alrededor de los 188 mV. Sin embargo, para este periodo las variaciones día noche muestran mucha interferencia, seguramente porque las condiciones de acople de los sensores con el suelo no son los mejores debidos al exceso de humedad que hace que este contacto con el suelo se vaya perdiendo por la gran cantidad de agua en el lugar del sensor (Figura 2). La cantidad de lluvia generada durante el mes de diciembre de 2023 fue de 151 mm (Figura 2).



**Figura 111.** Variaciones del campo eléctrico horizontal (CEH), en la estación de LOB (naranja), junto con el registro de lluvia de la estación Roca (azul), ubicada en la parte alta del volcán Azufraal, durante diciembre de 2023

Por el momento, el análisis que se realice sobre la información aquí registrada no sería tan útil hasta no aclarar el incremento y poder definir el comportamiento que tendrá este parámetro durante el mes siguiente.

#### 4.2.5. Geoquímica

##### 4.2.5.1. Muestreo de aguas en fuentes termales

Para el mes de diciembre no se llevó a cabo ninguna actividad al respecto.

##### 4.2.5.2. Muestreo de gases de origen volcánico

Para el mes de diciembre no se llevó a cabo ninguna actividad al respecto.

##### 4.2.5.3. Estación térmica domo Mallama

La información relacionada con la temperatura del Domo Mallama, se recibe de manera telemétrica en el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto. En la Figura 112 y Tabla 31 se observa que los valores oscilan entre máximos de 85.2 y mínimos de 82.7 °C, estos se presentan en horas de la tarde y madrugada. Sin embargo, de manera general, es posible observar que no hay algún tipo de tendencia, de tal manera que sus valores son estables, en concordancia con los bajos niveles de actividad sísmica y deformación que se registra para este volcán.

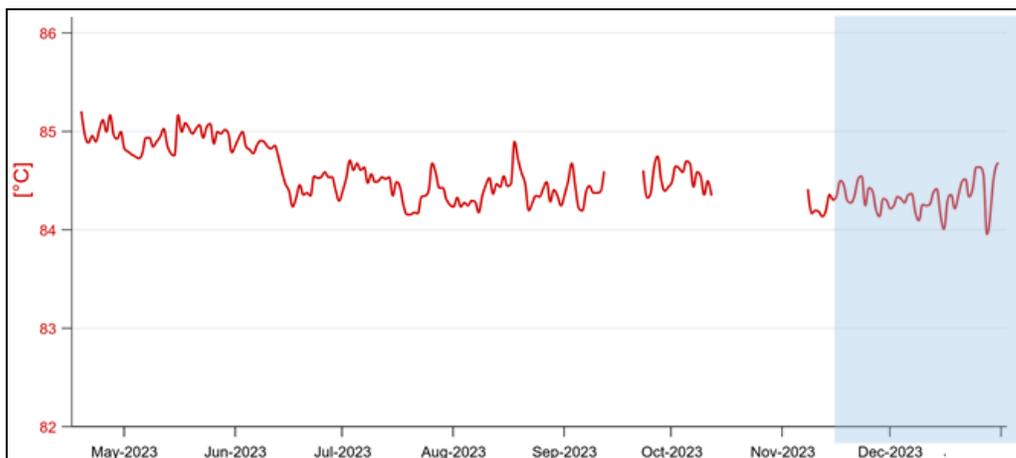


Figura 112. Temperatura en Domo Mallama, agosto – diciembre de 2023, periodo evaluado: diciembre

**Tabla 31.** Valores de temperatura en ° C - Domo Mallama - Volcán Azufral noviembre y diciembre de 2023

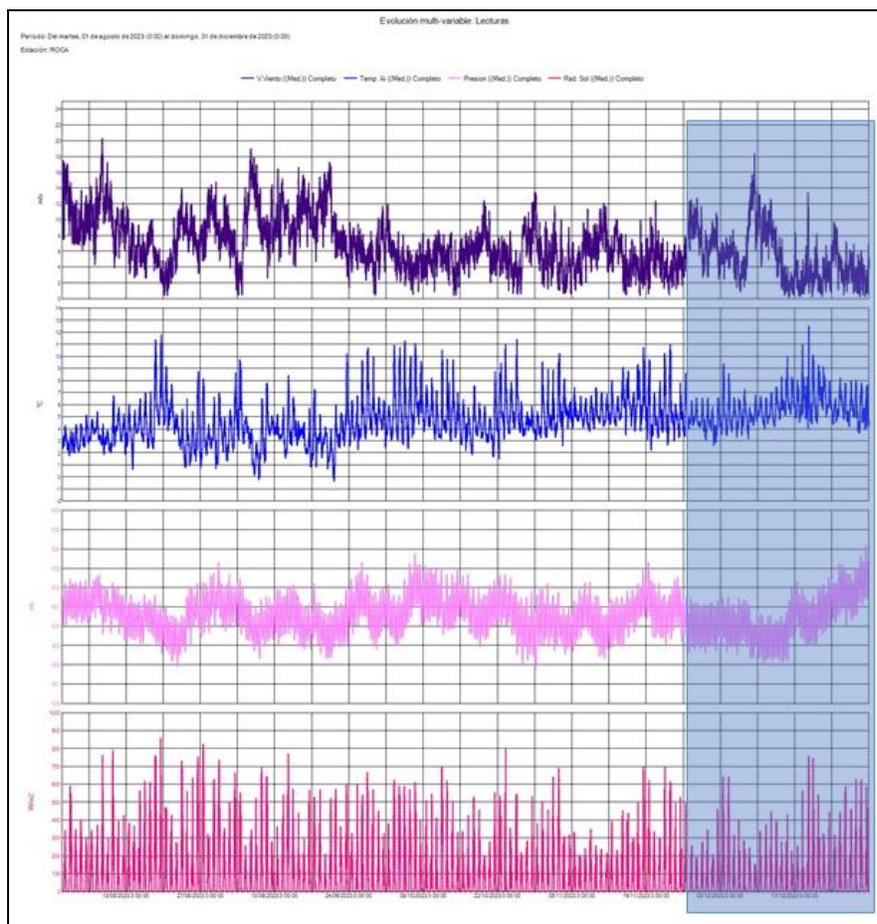
| Valor    | Noviembre | Diciembre |
|----------|-----------|-----------|
| Mínimo   | 80.3      | 82.7      |
| Promedio | 82.6      | 84.2      |
| Máximo   | 83.7      | 85.2      |

#### 4.2.5.4. Estación Climatológica La Roca

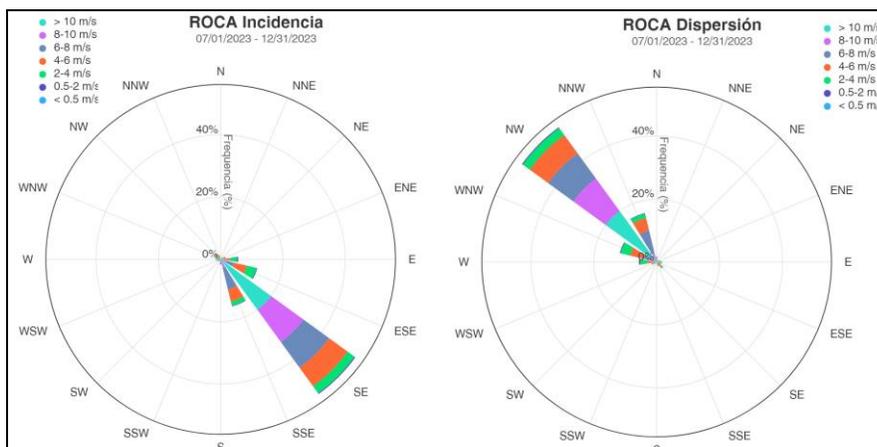
De la estación climatológica La Roca ubicada en el Volcán Azufral se obtienen datos de las siguientes variables: velocidad del viento, dirección del viento, temperatura ambiente, presión atmosférica, radiación solar y lluvia acumulada, parámetros que pueden influenciar en los valores medidos de las variables estudiadas en algunas de las áreas de vigilancia volcánica.

En las Figuras 113, 114 y 115, se muestra la gráfica temporal de los datos registrados en la estación climatológica y en la Tabla 32, algunos valores de estadística básica para el mes evaluado.

La velocidad del viento varía entre 0.6 y 12.1 m/s, con una dirección predominante de incidencia de SE y de NW de dispersión (Figura 114). La temperatura oscila entre valores de 2.6 y 10.2 °C, las cuales responden a variaciones día- noche. En la presión atmosférica se tiene bajas oscilaciones entre 628.4 y 632.4 mb (milibares). En la radiación solar, de manera coherente, se tiene los valores más altos en horas del mediodía y tarde, mientras que, en la noche, los valores son 0 y cercanos a cero.



**Figura 113.** Valores de velocidad del viento, temperatura del aire, presión y radiación solar registrados en la estación climatológica La Roca, Volcán AzufraI agosto - diciembre de 2023 (región sombreada: diciembre)



**Figura 114.** Rosa de los vientos con la dirección del viento de la estación Roca, en el periodo de julio a diciembre

Finalmente, en la lluvia, para el periodo de evaluación se observa que continúa el incremento en sus valores, desde noviembre del presente año, en comparación con meses anteriores.

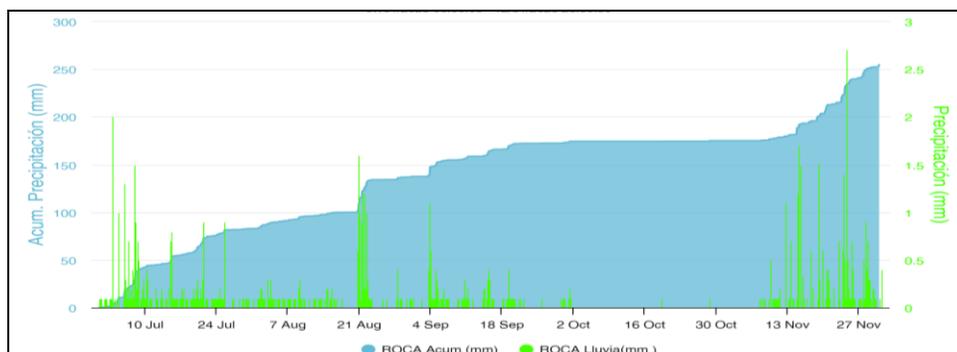


Figura 115. Registro de la lluvia desde la estación Roca, en el periodo de julio a diciembre de 2023

Tabla 32. Datos parámetros estación climatológica La Roca – diciembre de 2023

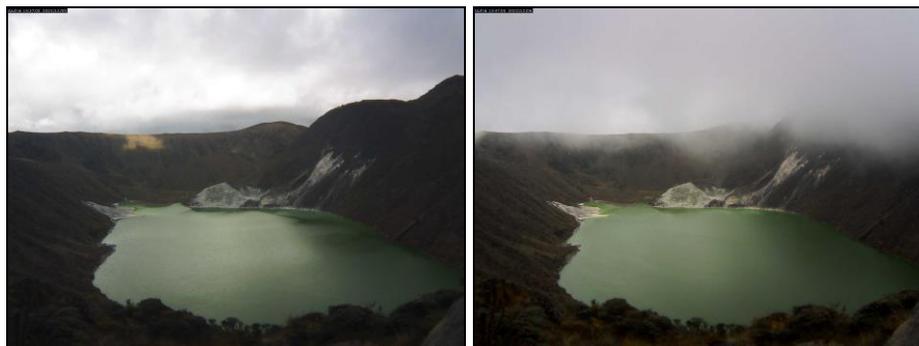
|      | V. Viento | D. Viento | Temp. Ai | Presión | Rad. Sol | Lluvia |
|------|-----------|-----------|----------|---------|----------|--------|
|      | (m/s)     | (°)       | (°C)     | (mb)    | (W/m2)   | (mm/h) |
| Med. | 5,7       | 184.4     | 5,3      | 630,1   | 60,5     | 0.02   |
| Máx. | 12,1      | 334.2     | 10,2     | 632,3   | 689,5    | 2.7    |
| Mín. | 0,6       | 20.5      | 2,6      | 628,4   | 0,0      | 0.0    |

#### 4.2.6. Actividad Superficial

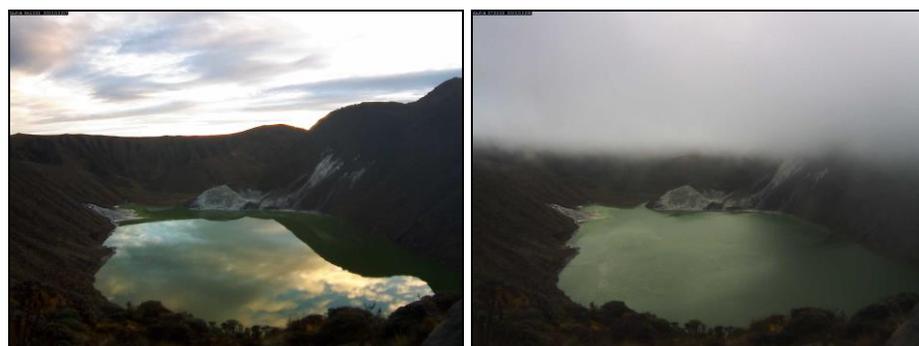
Las condiciones climáticas favorables permitieron, a través de imágenes capturadas por la cámara instalada en el costado suroccidental de la laguna cratérica, observar emisiones de gases de color blanco de baja altura provenientes del domo Mallama ubicado en el nororiente de la Laguna Verde para los días 5, 6, 7, 8, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 25 y 26 de diciembre 2023.

Se sugiere a CORPONARIÑO, autoridad ambiental, que tome las medidas preventivas pertinentes, dada la alta afluencia de turistas y visitantes que suele tener el cráter del Volcán Azufraal.

En las Figuras 116 a 122 se ilustra imágenes relacionadas con procesos de emisión de gases en el volcán Azufraal.



**Figura 116.** Imágenes de emisión de gases del domo Mallama - volcán Azufral registrada el 5 de diciembre 2023 a las 4: 37 p.m., (izquierda) y el 6 de diciembre de 2023 a las 3: 47 p.m., (derecha)., capturada desde la cámara WEB ubicada al suroccidente del volcán



**Figura 117.** Imágenes de emisión de gases del domo Mallama - volcán Azufral registrada el 7 de diciembre 2023 a las 6: 12 a.m., (izquierda) y el 8 de diciembre de 2023 a las 7: 22 a.m., (derecha)., capturada desde la cámara WEB ubicada al suroccidente del volcán



**Figura 118.** Imágenes de emisión de gases del domo Mallama - volcán Azufral registrada el 14 de diciembre 2023 a las 5: 02 p.m., (izquierda) y el 15 de diciembre de 2023 a las 6: 12 a.m., (derecha)., capturada desde la cámara WEB ubicada al suroccidente del volcán



**Figura 119.** Imágenes de emisión de gases del domo Mallama - volcán AzufraI registrada el 16 de diciembre 2023 a las 6: 12 p.m., (izquierda) y el 17 de diciembre de 2023 a las 6: 27 a.m., (derecha)., capturada desde la cámara WEB ubicada al suroccidente del volcán



**Figura 120.** Imágenes de emisión de gases del domo Mallama - volcán AzufraI registrada el 18 de diciembre 2023 a las 6: 42 a.m., (izquierda) y el 19 de diciembre de 2023 a las 4: 32 p.m., (derecha)., capturada desde la cámara WEB ubicada al suroccidente del volcán



**Figura 121.** Imágenes de emisión de gases del domo Mallama - volcán AzufraI registrada el 20 de diciembre 2023 a las 10: 57 a.m., (izquierda) y el 21 de diciembre de 2023 a la 1: 57 p.m., (derecha)., capturada desde la cámara WEB ubicada al suroccidente del volcán



**Figura 122.** Imágenes de emisión de gases del domo Mallama - volcán AzufraI registrada el 25 de diciembre 2023 a las 7: 21 a.m., (izquierda) y el 26 de diciembre de 2023 a la 6: 47 a.m., (derecha), capturada desde la cámara WEB ubicada al suroccidente del volcán

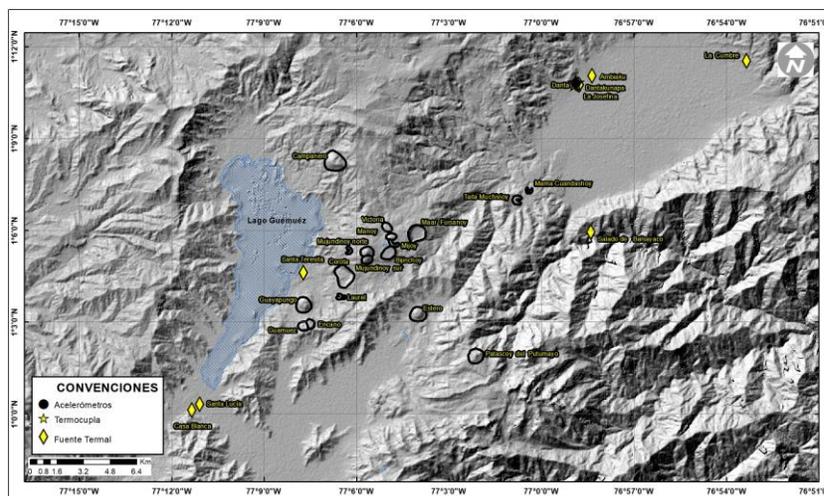
#### 4.2.7. Conclusiones

- En diciembre la actividad del volcán AzufraI mantuvo niveles bajos indicando incremento en la ocurrencia y en la energía sísmica, en su totalidad asociada con fractura de material cortical (VT), con ML máxima de 1.2.
- Los valores de temperatura de la estación del Domo Mallama muestra valores estables en el periodo de evaluación.
- Los valores meteorológicos medidos en área de influencia del Volcán AzufraI se encuentran dentro de las líneas base de comportamiento.
- La evaluación de la actividad del volcán AzufraI en diciembre 2023 permitió mantener el estado de **ALERTA VERDE** ●: “Volcán activo en reposo”.

## 5. Campo volcánico monogenético Guamuez – Sibundoy (Putumayo) – diciembre de 2023

### 5.1. Red de Vigilancia

En la Figura 123 se muestra la disposición de las estaciones instaladas para el monitoreo de la actividad sísmica y de deformación cortical de los volcanes monogenéticos ubicados en el Departamento del Putumayo, estos son: un acelerómetro (Danta) y una termocupa con el mismo nombre. Además, se realiza muestreo geoquímico de aguas en ocho manantiales termales (Figura 123) y una estación de GNSS Permanente instalada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). En la Tabla 33 se consignan algunas de sus características.

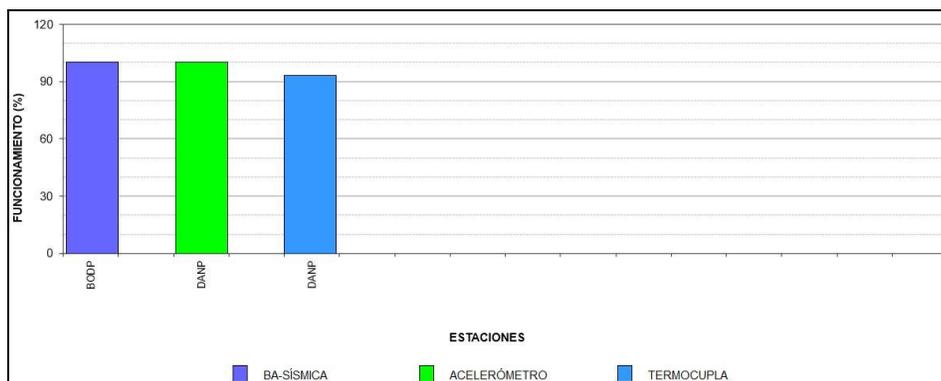


**Figura 123.** Mapa de localización de las estaciones que conformaron la red de monitoreo en sismología, geofísica y fuentes termales en el campo volcánico monogenético Guamuez para el mes de diciembre de 2023

**Tabla 33.** Estaciones que conformaron la red de vigilancia del campo volcánico monogenético Guamuez ubicados en el Departamento del Putumayo para el mes de diciembre de 2023

| Estación | Transmisión de Datos | Tipo de Sensor | Componente     | Dist. a la Corota (Km) | Ubicación respecto a la Corota | Altitud |
|----------|----------------------|----------------|----------------|------------------------|--------------------------------|---------|
| Danta    | Digital              | Acelerómetro   | Triaxial       | 19.7                   | NNE                            | 2101    |
| Danta    | Digital              | Termocupla     | Unidireccional | 19.7                   | NNE                            | 2101    |

En general, la red de monitoreo telemétrico en el campo volcánico monogenético Guamuez en el Departamento del Putumayo, alcanzó un porcentaje promedio de operación del 97% para este mes (Figura 124).



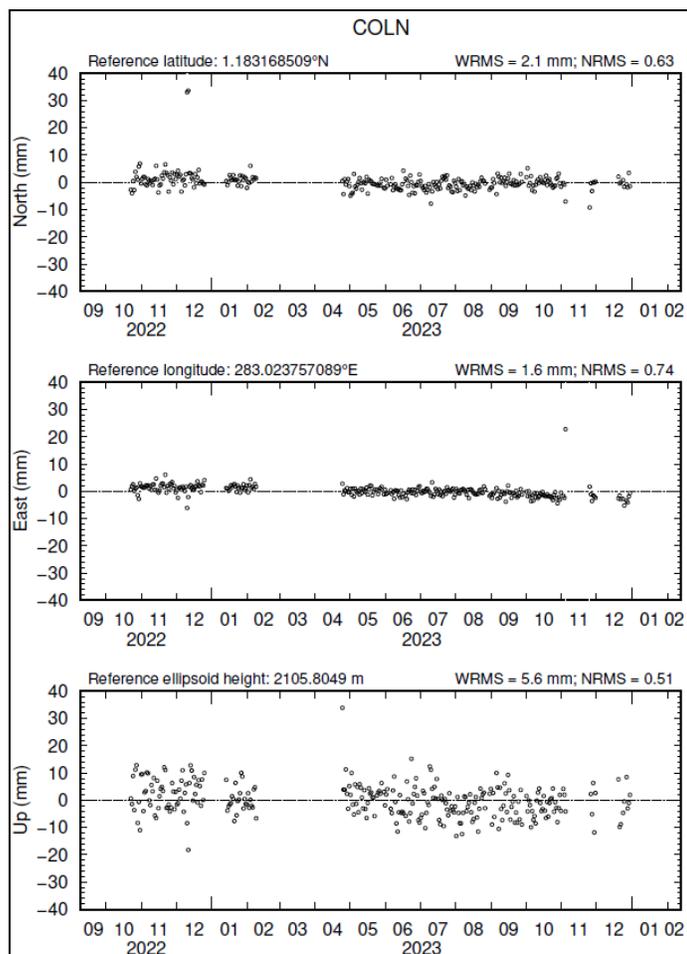
**Figura 124.** Histograma del porcentaje de funcionamiento de las estaciones telemétricas que conformaron la red de monitoreo del campo volcánico monogenético Guamuez durante el mes de diciembre de 2023

## 5.2. Deformación

### 5.2.1. Estaciones GNSS Permanentes

En proximidades de la estación Danta y en esta zona volcánica por parte del IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) se tiene instalada una estación GNSS Permanente en el Municipio de Colón, Departamento del Putumayo, estación materializada el 27 de abril de 2022.

Los datos de esta estación son de libre acceso, para el análisis se contempló el procesamiento Baseline, mediante el software GAMIT/GLOBK 10.71. Utilizando efemérides finales, parámetros numéricos que describen las posiciones precisas de los satélites, observando estabilidad en las direcciones Norte, Este y Altura (Figura 125).

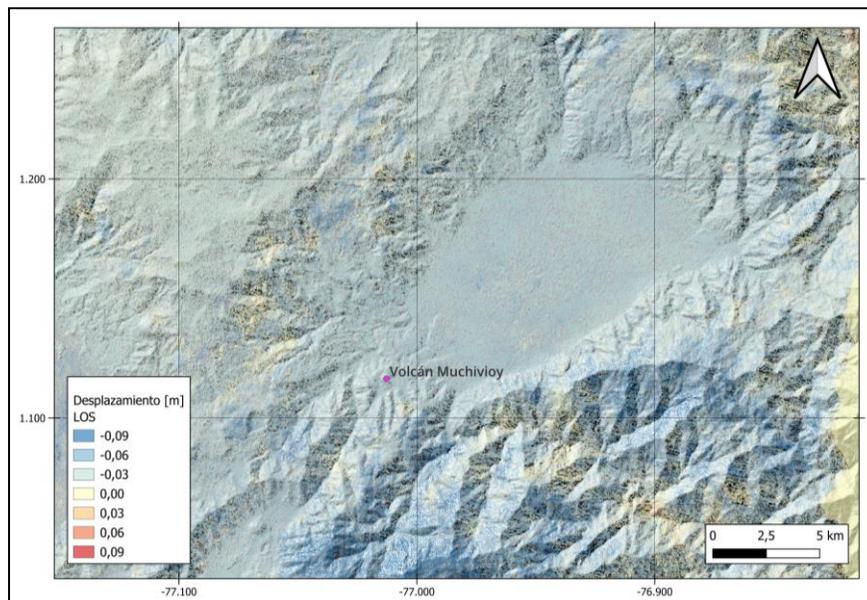


**Figura 125.** Variaciones en las direcciones Norte, Este y Altura de la estación GNSS Permanente Colón, instalada por el IGAC en el Municipio de Colón (Putumayo), para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2022 y el 30 de diciembre de 2023, procesados con el software GAMIT/GLOBK

<https://www.colombiaenmapas.gov.co/?e=-74.19790397936877,4.606824129536961,-74.05594002062873,4.715639657991442,4686&b=igac&u=0&t=25&servicio=8#>

### 5.2.2. D- InSAR

En la Figura 126, se muestra el mapa de desplazamiento para la zona del campo volcánico monogenético Guamuez (Sibundoy – Putumayo) obtenido con procesamiento interferométrico diferencial, utilizando el software ISCE haciendo uso de un par de imágenes de Radar de Apertura Sintética Sentinel -1 de la Agencia Espacial Europea (ESA) de orbita descendente. Para el periodo evaluado con esta técnica de procesamiento no se observa ningún patrón de deformación.



**Figura 126.** Desplazamientos calculados con la técnica D-InSAR para el par interferométrico del 3 y el 15 de diciembre de 2023, imágenes Sentinel-1, órbita descendente. Área de influencia del campo volcánico monogenético Guamez (Sibundoy – Putumayo)

## 6. Referencias

Servicio Geológico Colombiano – SGC (2023). Boletín mensual e informes semanales de actividad del Volcán Galeras y de los Volcanes Doña Juana, Las Ánimas, Azufral, Cumbal, Chiles y Cerro Negro de Mayasquer y Bases de datos internas del SGC-OVSP. Meses de noviembre y diciembre del 2023. Varios autores. Informes inéditos. Pasto.

Dadong, I., Hiromi, Y., & Takao, T. (2004). Quantification of the dependency of radon emanation power on soil temperature. *Applied Radiation and Isotopes*, 971-973.

García, J. (2000). Influencia en la precipitación sobre la concentración del Radón en suelo: simulación en el laboratorio y comparación con datos de campo. *Revista Geológica de América Central*, 23, 77-85.

González, K. (2018). *Correlación de las variables meteorológicas y físicas del suelo, con la concentración de Radón en el mismo, en ocho puntos de la periferia de la ciudad de Cuenca- Ecuador*. Tesis de pregrado, Universidad politécnica Salesiana, Cuenca.

Google Earth Engine. (2018). *Sentinel-5P Datasets in Earth Engine | Earth Engine Data Catalog | Google Developers*. <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel-5p>

Laverde, C. (2020). *Explorador TROPOMI Latinoamérica*. <https://claverde.users.earthengine.app/view/explorador-tropomi-latinoamerica#dataset=SO2;datatype=Near-real-time;center=%7B%22type%22%3A%22Point%22%2C%22coordinates%22%3A%5B->

Informe mensual de actividad de los volcanes Galeras, Cumbal, Chiles – Cerro Negro, Las Ánimas, Doña Juana y Azufral – diciembre 2023

77.87274494410033%2C0.9557638397447217%5D%7D;aoi=%7B%22type%22%3A%22Point%22%2C%22coordinates%22%3A%5B-75.3%2C4.9%5D%7D;cloud=100;leftdate=2023-01-08;rightdate=2023-01-24;min=0;max=0.24;swipe=false;chart=cont;zoom=10;

Información complementaria puede ser consultada en la página web del Servicio Geológico Colombiano en:

<https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Paginas/informes-tecnicos.aspx>