

INFORME TÉCNICO

ANOMALÍA DE TEMPERATURA Y SALIDA DE GASES EN EL FLANCO SURORIENTAL DEL COMPLEJO VOLCÁNICO CERRO BRAVO





Dirección de
Geoamenazas

Servicio Geológico Colombiano

Julio Fierro Morales

Director general

John Makario Londoño

Director técnico de Geoamenazas

Roberto Armando Torres Corredor

Coordinador Grupo de trabajo Evaluación, Monitoreo y Diagnóstico de dinámicas geológicas

Lina Marcela Castaño López

Líder SGC - Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales

Autores

Zoraida Chacón Ortiz

María Luisa Monsalve

Lina Marcela Castaño

Yeimy Rodríguez

Otros participantes

Julián Ramírez, Claudia Álvarez, Luis Miguel Cardona, Juan David Álvarez, Ricardo Méndez, Julián Ceballos, Lilly Maritza Martínez y Víctor Camilo Rivera.

Grupo de trabajo: Grupo de trabajo de evaluación, monitoreo y diagnóstico de dinámicas geológicas y Grupo de trabajo Evaluación de amenaza y riesgo geológico (SGC-Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales). Grupo de trabajo de Investigación Geotérmica.

Este documento se ha elaborado dada la situación generada por el reporte de anomalía de temperatura y la salida de gases en el flanco suroriental del Complejo Volcánico Cerro Bravo, enmarcado en la generación de conocimiento geocientífico relacionado con la actividad volcánica y su propósito es aportar al esclarecimiento del fenómeno no volcánico que se presenta en la zona desde el 11 de mayo del 2023, basado en el análisis de datos geofísicos, geológicos y geoquímicos.

Ministerio de Minas y Energía

Servicio Geológico Colombiano

Dirección de Geoamenazas

Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales

Junio 2023

© Servicio Geológico Colombiano

Contenido

| | |
|---|----|
| Resumen | 4 |
| Introducción | 5 |
| Alcances y limitaciones | 7 |
| 1. Marco geológico Complejo volcánico Cerro Bravo | 8 |
| 2. Generalidades gases volcánicos e hidrotermales | 10 |
| 2.1. Vapor de agua | 10 |
| 2.2. Compuestos de azufre | 10 |
| 2.3. Compuestos de carbono, halógenos y gases inertes | 10 |
| 2.4. Gases difusos en suelo | 11 |
| 3. Generalidades gases volcánicos e hidrotermales | 11 |
| 4. Actividades adelantadas por el Servicio Geológico Colombiano ante el fenómeno presentado en la ladera suroriental del volcán Cerro Bravo | 17 |
| 4.1. Reconocimiento del área de la anomalía reportada (13 de mayo) | 18 |
| 4.2. Reconocimiento del área de la anomalía reportada (13 de mayo) | 20 |
| 4.3. Aspectos fisicoquímicos del área de anomalía: monitoreo de gases y temperatura | 28 |
| 5. Discusión | 49 |
| Conclusiones y recomendaciones | 56 |
| BIBLIOGRAFÍA | 57 |
| ANEXOS | 62 |

Resumen

Este informe presenta el seguimiento, por parte del Servicio Geológico Colombiano (SGC), del fenómeno de salida de gases y anomalía térmica detectada en el flanco suroriental del Complejo volcánico activo Cerro Bravo, al borde de la carretera (ruta 50 que une a Manizales con Bogotá), en el sector conocido como “La virgen” y por donde pasa muy cerca el gasoducto. Las características del sitio, los análisis y resultados obtenidos en el estudio de la zona de anomalía descartan la presencia de gases asociados a actividad volcánica, lo cual aunado a los datos del monitoreo permanente de la actividad volcánica adquiridos a través del SGC-Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales (OVSMA), permitieron establecer que el fenómeno que se está presentado en el lugar mencionado no corresponde a la reactivación de este complejo volcánico. El tramo de carretera donde se encuentra la anomalía, se encuentra construida en un remanente de domo del complejo volcánico y, en el reconocimiento geológico en el sitio de la anomalía, se identificó un deslizamiento de rocas a través del cual se presentó la salida gases en los diferentes puntos y la combustión en uno de los bloques. Sobre el origen de estos gases, el SGC planteó la posibilidad de que se trataba entonces de un incendio subterráneo, el cual debía ser evaluado por las entidades competentes. No obstante, luego que se conociera el informe de la composición química de los gases en la anomalía, suministrado por ICP Ecopetrol, donde se indica que el fenómeno puede estar relacionado con el gas natural, el SGC presenta los resultados de los análisis y estudios realizados durante 3 semanas de monitoreo, esto con el fin de dar a conocer a todas las entidades que están involucradas el trabajo realizado e hipótesis planteadas.

Introducción

En Colombia, el SGC monitorea 25 estructuras volcánicas las cuales tienen la potencialidad de hacer erupción en un futuro. La reactivación de un volcán activo en estado de reposo, se manifiesta de varias maneras, la principal está relacionada con el aumento en la actividad sísmica al interior del edificio volcánico, generalmente acompañada por otras manifestaciones como mayor actividad fumarólica, alteraciones en el sistema hidrotermal, deformación de la superficie volcánica, anomalías térmicas, entre otros.

El monitoreo permanente y la evaluación integral a estas manifestaciones o cambios observados en un volcán permite al Servicio Geológico Colombiano (SGC) determinar que el nivel de actividad de un volcán activo en reposo, con comportamiento estable (nivel de actividad Verde), cambie a un nivel de actividad Amarillo, el cual indica un comportamiento inestable y el inicio de un posible proceso eruptivo.

El Complejo volcánico Cerro Bravo (5° 05' 24"N, 75° 17' 24"W), una de las 25 estructuras volcánicas activas del país, se encuentra en nivel de actividad Verde. Este complejo está localizado en la Cordillera Central de Colombia en inmediaciones del municipio de Herveo, departamento del Tolima, y su edificio es atravesado por la vía (ruta 50) que une a la ciudad de Manizales con la ciudad de Bogotá (figura 1).

En la segunda semana de mayo, el SGC recibió el reporte de un fenómeno de salida de gases e incremento de la temperatura en la ladera suroriental del Complejo volcánico Cerro Bravo, al borde de la carretera, en el sector conocido como "La Virgen". De acuerdo con la misionalidad del Servicio Geológico Colombiano-SGC, a partir de ese momento, se realizaron una serie de inspecciones y visitas al sitio de la anomalía y otros sectores del volcán, que incluyeron mediciones y análisis geoquímicos y geológicos. Paralelamente, se comenzó a realizar con mayor detalle el análisis y la evaluación integral de la actividad volcánica. Lo anterior, con el fin de inferir si el fenómeno estaba o no relacionado con la reactivación de esta estructura volcánica.

El fenómeno anómalo identificado, el 11 de mayo, por la filial Transportadora de Gas Internacional S.A. EPS (TGI), se mantiene a la fecha de publicación de este informe. Una particularidad de este, es que está ubicado a menos de 2 metros de la línea de un gasoducto operado por TGI, razón por la cual diferentes entidades se han involucrado, con el fin de tomar todas las acciones de mitigación y prevención del posible riesgo que este fenómeno puede conllevar y, por otro lado, de establecer la causa que dio origen a este. Para ello, el SGC realizó varias comisiones técnicas entre el 13 mayo y el 08 de junio de 2023 con el fin de brindar el apoyo técnico a las entidades de orden municipal, departamental y nacional y contribuir al esclarecimiento de la situación.

Como resultado de ello, el SGC presenta el informe "*Informe técnico anomalía de temperatura y salida de gases en el flanco suroriental del Complejo volcánico Cerro Bravo*" el cual contiene información sobre aspectos geológicos, geofísicos y geoquímicos en y relacionados con el sitio donde se presenta el fenómeno.

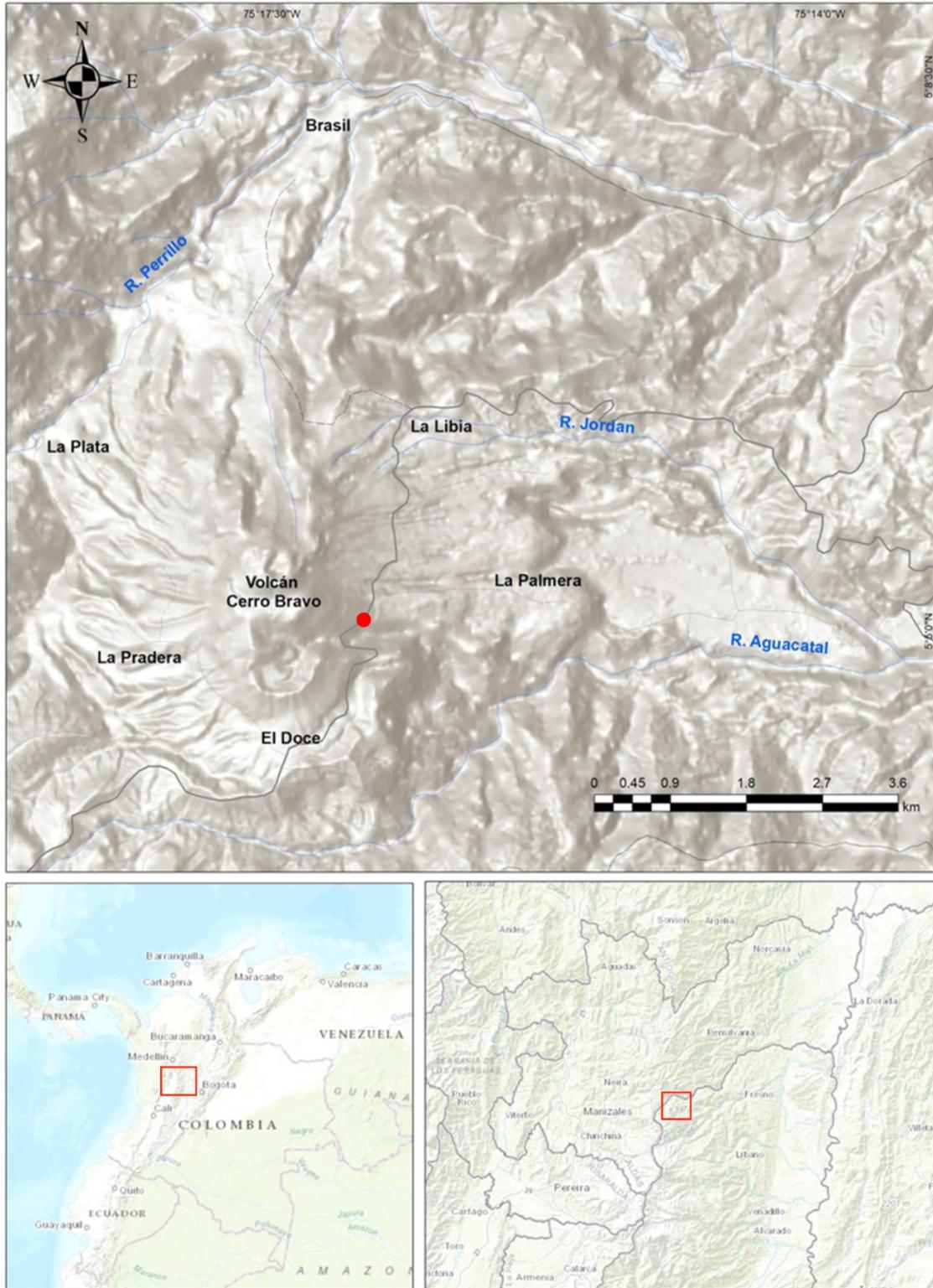


Figura 1. Localización del Complejo volcánico Cerro Bravo. Mapa de sombras y base cartográfica tomada de Esri. El punto rojo señala el sitio donde se encuentra la anomalía de salida de gases y de temperatura

Alcances y limitaciones

El SGC elaboró el presente informe, el cual se basa en las inspecciones visuales realizadas en campo, medidas con equipos especializados, datos de monitoreo volcánico e información secundaria, con el propósito de contribuir en la búsqueda del origen del fenómeno que se presenta en la ladera del CVCB.

La evaluación del SGC se limitó a establecer el origen no volcánico. Las hipótesis establecidas en este documento pueden usarse como un insumo para las entidades a las cuales corresponde su evaluación.

1. Marco geológico Complejo volcánico Cerro Bravo

El Complejo volcánico activo Cerro Bravo (CVCB) se localiza en el Segmento Volcánico Norte (SVNC) (Hall and Wood, 1985; Monsalve-Bustamante, 2020) de la Cordillera Central colombiana (figura 1), a 142 km al noroccidente de la ciudad de Bogotá, a 25 km al oriente-nororiente de la ciudad de Manizales y a 22 km al nor-nororiente del volcán Nevado del Ruiz.

El CVCB, con una altitud de 4050 m.s.n.m., está construido en la intersección de fallas del Sistema Palestina (NE-SW) con otro sistema transversal de tendencia NW-SE (Lescinsky, 1990; Monsalve, 1991; Martínez *et al.*, en preparación). Está conformado por dos edificios y remanentes de domos: el edificio norte el cual aloja domos recientes y el edificio sur que corresponde a un cono piroclástico (figura 2). El CVCB presenta una forma alargada en sentido sur-norte y se encuentra desplazado alrededor de 6 km del eje de la cordillera (Valencia *et al.*, 2022).

Según Thouret *et al.* (1985), El volcán Cerro Bravo se encuentra conformado por tres edificios construidos sobre una estructura antigua llamada Caldera de Quebrada Seca, mientras que para Lescinsky (1990) tiene una forma ligeramente elíptica y define dos edificios volcánicos: Cerro Bravo Viejo y Cerro Bravo Moderno. Según Thouret *et al.* (1988) la Caldera de Quebrada Seca (figura 2) presenta un diámetro aproximado de 3 km, y está ubicada dentro de la depresión volcano-tectónica de Letras, la cual tiene sus paredes cubiertas por espesos depósitos piroclásticos; según este autor, esta caldera posiblemente se formó en el cuaternario antes del tardiglacial (>14.000 A.A.P).

La actividad eruptiva del CVCB, en los últimos 14.000 años, ha sido explosiva de tipo pliniano acompañada por ascenso y destrucción de domos (Lescinsky, 1990; Monsalve, 1991; Valencia *et al.*, 2022). El registro geológico muestra depósitos de corrientes de densidad piroclástica tanto concentradas (flujos de bloques y flujos de pómez) como diluidas, caídas piroclásticas y lahares (Martínez *et al.*, en preparación). Tanto Herd (1974, en Ingeominas 1982), como Lescinsky (1990) designan las unidades estratigráficas del CVCB, con el denominador de CB, el cual está relacionado a la descripción original de Herd (1974), asociado principalmente con las unidades de piroclastos de caída. La última actividad eruptiva del complejo volcánico ocurrió hace aproximadamente 200 años AP.

Los productos efusivos presentan poca extensión desde el centro de emisión. Solo se ha reconocido un pequeño flujo de lava que descendió por el oriente, sobre la cuenca de la quebrada el Jordán, hasta una distancia de 5,4 km. Otros productos efusivos se caracterizan por presentar formas dómicas con estructuras en espina rellenando el cráter actual. El complejo actual de domos presenta un área aproximada de 0,86 km² con una altura, desde su base, que oscila alrededor de los 100 m. Otros domos se encuentran como remanentes distribuidos alrededor de los centros de emisión (figura 2).



Figura 2. Geomorfología del volcán Cerro Bravo, donde se observan las características descritas por Thouret (1985) y Lescinsky (1990). Imagen en perspectiva tomada de Google Earth

La actividad explosiva del volcán Cerro Bravo ha afectado un área aproximada de 2000 km² donde, actualmente, se encuentran importantes poblaciones, como la ciudad de Manizales, con un registro geológico que muestra más de 3 m de espesor acumulado de caídas piroclásticas pumíticas, generadas por varios eventos eruptivos. Así mismo, se encuentran depósitos considerables de la actividad explosiva en los municipios de Herveo (Tolima) y Neira, Chinchiná, Villamaría, Palestina, Aránzazu, Salamina, Marulanda y Filadelfia (Caldas), representando una población cercana a los 600.000 habitantes (según datos del censo del DANE del 2018, www.dane.gov.co), que podría ser afectada principalmente por caídas piroclásticas y localmente por Corrientes de Densidad Piroclástica (CDP). Mientras que las cabeceras municipales de San Sebastián de Mariquita, Honda y La Dorada, se verían afectadas por lahares que podrían descender por las cuencas de los ríos Gualí, Guarínó y Magdalena, impactando alrededor 130.000 habitantes (www.dane.gov.co) (Valencia *et al.*, 2022).

2. Generalidades gases volcánicos e hidrotermales

Los fluidos liberados por una fuente magmática de un volcán se denominan gases volcánicos y los que son liberados del envoltorio de agua caliente que rodea el ambiente magmático, es el denominado gas hidrotermal, importante en los sistemas geotermales. En este tipo de ambientes se pueden presentar en forma de géiseres y manantiales burbujeantes, mientras que en los sistemas volcánicos se presentan — mayoritariamente— en las descargas a través de fumarolas y columnas generadas durante procesos de desgasificación pasiva, eventos eruptivos o de manera difusa, a través de la corteza o de ventanas de ventilación o desfogue, provenientes de fracturas o fallas del terreno en emisiones difusas en el suelo.

En las zonas volcánicas, los fluidos gaseosos están compuestos predominantemente por vapor de agua y especies químicas como: H_2O , CO_2 , SO_2 , H_2S , en menor proporción se encuentran otras especies: HF , H_2 , He , O_2 , N_2 , Ar , CO , CH_4 . La exsolución de los componentes volátiles está controlada por las solubilidades de las distintas especies que se comportan de acuerdo con el siguiente orden: $\text{CO}_2 < \text{S} < \text{Cl} < \text{H}_2\text{O} < \text{F}$ (Giggenbach, 1996). No obstante, al observar las concentraciones de H_2O , este resulta ser la especie más dominante y representa más del 60% del contenido total de gas molar en fumarolas, lo cual se atribuye a la presencia de agua subterránea en el sistema volcánico.

2.1. Vapor de agua

El H_2O es el compuesto de mayor abundancia en las fumarolas volcánicas, incluso puede alcanzar hasta un 99% en volumen. En los sistemas volcánicos es muy importante conocer su variabilidad dado que éste controla la presión de la fase gaseosa en los magmas y por lo tanto es responsable del llamado volcanismo explosivo. La solubilidad del H_2O en el magma se incrementa a medida que aumenta la presión y el contenido de SiO_2 .

2.2. Compuestos de azufre

Las especies de azufre involucradas en los procesos de desgasificación son: SO_2 , H_2S , COS . Se ha establecido que el SO_2 proviene, directamente, de la exsolución del gas desde el magma (Gerlach y Nordie, 1975, Symonds, *et al.*, 1994), por esto, esta especie es indicador magmático de importancia; es soluble en agua y en sistemas hidrotermales, favorece la generación de H_2S y SO_4 . El H_2S se genera por reacciones entre los fluidos magmáticos y las rocas bajo condiciones reductoras (Giggenbach, 1987, 1993). Las altas concentraciones de H_2S están relacionadas con sistemas hidrotermales, donde priman las condiciones redox a temperaturas bajas.

2.3. Compuestos de carbono, halógenos y gases inertes

El CO_2 es producto de la exsolución del magma y es considerada como especie conservativa (es el menos soluble de los gases, de allí que sea generado en los primeros estados de desgasificación, Giggenbach, 1996); no obstante, también se le ha atribuido un origen, debido a alteraciones de depósitos carbonatados. Las otras dos especies de carbono: CO y CH_4 se presentan en muy bajas concentraciones, principalmente en ambientes hidrotermales; el CO es estable a altas temperaturas, mientras que el CH_4 lo es a bajas temperaturas (Chiodini y Marini, 1998).

El Cl , F y Br son los principales halógenos relacionados con los sistemas volcánicos, se presentan como HCl , HF , HBr y BrO y se caracterizan por su alta reactividad química, y elevada solubilidad (Ellis, 1979). En

lo que se refiere a los gases inertes, en las emisiones gaseosas, podemos encontrar N₂, He, Ar y Ne; otros gases nobles como el Kr y Xe se encuentran en concentraciones muy bajas, lo cual hace que sea difícil su detección. El Ne y Ar tiene un origen atmosférico (Mazor, 1977; Pyle, 1993). En el caso del N₂ y He se ha establecido que pueden tener diferentes orígenes: meteórico, cortical y magmático (Hooker et al., 1985; Giggenbach, 1991; Tedesco *et al.*, 1995).

2.4. Gases difusos en suelo

Las manifestaciones visibles en los sistemas volcánicos e hidrotermales son las columnas de gases y vapor, las fumarolas y fuentes termales, sin embargo, existen otros volátiles que se liberan constantemente por el suelo, y que no son perceptibles con facilidad, es el caso del gas radón, metano y el dióxido de carbono. El gas radón es un elemento radiactivo, con su isótopo ²²²Rn, no reacciona con otros elementos y compuestos, es liberado generalmente por las fallas, se le conoce como un excelente trazador en profundidad de recargas de acuíferos, se genera de manera continua en el interior de la corteza terrestre. El CO₂ también es liberado en suelos volcánicos e hidrotermales, su procedencia se relaciona con procesos de disolución de CO₂ magmático o depósitos carbonatados profundos. La descarga de CO₂ de origen volcánico se hace a través de fumarolas, manantiales termales y emanaciones del suelo en sistemas volcánicos y su evolución temporal puede estar relacionada con el nivel de actividad volcánica. En las mediciones se debe tener en cuenta que el CO₂ tiene también origen biogénico, producto de la descomposición de materia orgánica (Kuzyakov, 2006).

3. Generalidades gases volcánicos e hidrotermales

El CVCB es una de las 25 estructuras volcánicas activas de Colombia monitoreadas por el SGC, y una de las 11 estructuras que conforman el Segmento Volcánico Norte de Colombia (SVNC), cuyo monitoreo está a cargo del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales del SGC. El monitoreo volcánico consiste en el seguimiento permanente de varios parámetros físicos y químicos que son obtenidos a partir del registro y análisis desde diferentes disciplinas (geofísica, geodesia, geoquímica, sensores remotos, entre otras). Según el nivel de actividad de cada volcán se utilizan sensores que miden la sismicidad, la deformación de la superficie volcánica, las concentraciones y flujos de gases, características de las aguas termales, los sonidos, los cambios superficiales entre otros. El número de sensores y el tipo de estos dependerá igualmente del estado o nivel de actividad del volcán.

Desde 1995 comenzó el monitoreo en el CVCB y dado que es activo en estado de reposo (nivel de actividad Verde), la red de monitoreo telemétrica es básica. Actualmente, esta red consta de seis estaciones sismológicas, dos estaciones GNSS, un inclinómetro y dos repetidores (figura 3). Adicionalmente, cada cierto tiempo se realizan campañas de mediciones de CO₂ con equipo flujómetro y de parámetros fisicoquímicos en las fuentes termales identificadas y otros sectores del volcán.

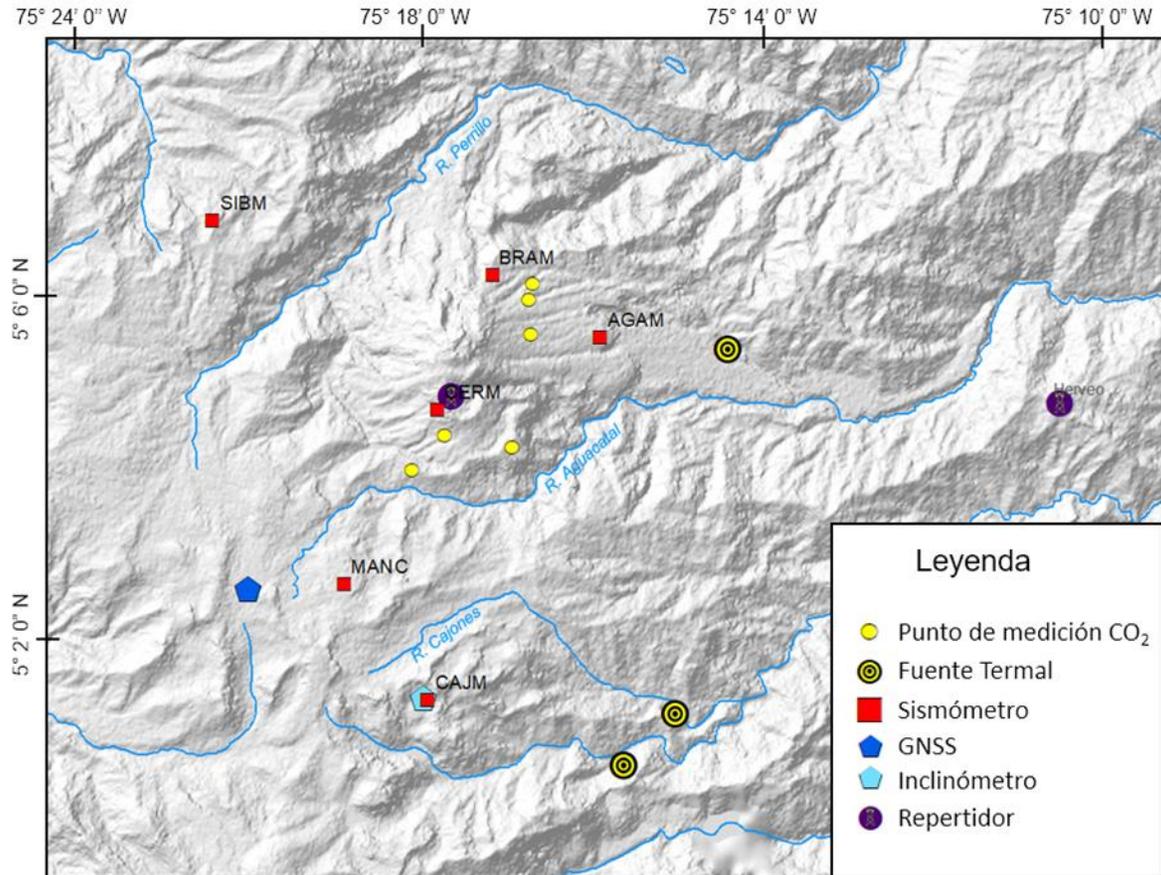


Figura 3. Red de vigilancia del Complejo Volcánico Cerro Bravo. Mapa de sombras a partir de imagen AlosPalsar (12m)

Los datos del monitoreo sismológico obtenidos desde 2010 reflejan estabilidad en el comportamiento del volcán. Los niveles de actividad sísmica han sido bajos y los sismos registrados han estado principalmente asociados a actividad superficial (p.e. movimientos en masa, avalanchas -flujos de lodo o avenidas torrenciales-, entre otros; figura 4). La sismicidad asociada a fracturamiento de roca es de baja energía y presenta tasas diarias máximas de hasta 6 eventos (figura 4b y figura 4c); los sismos se han localizado, de manera dispersa, en los diferentes flancos de la estructura volcánica y en los sectores distales al sur, norte y occidente del volcán, a distancias máximas de 14 km del centro volcánico. Las magnitudes de los sismos han sido generalmente pequeñas con un máximo de 1,6 (figura 5).

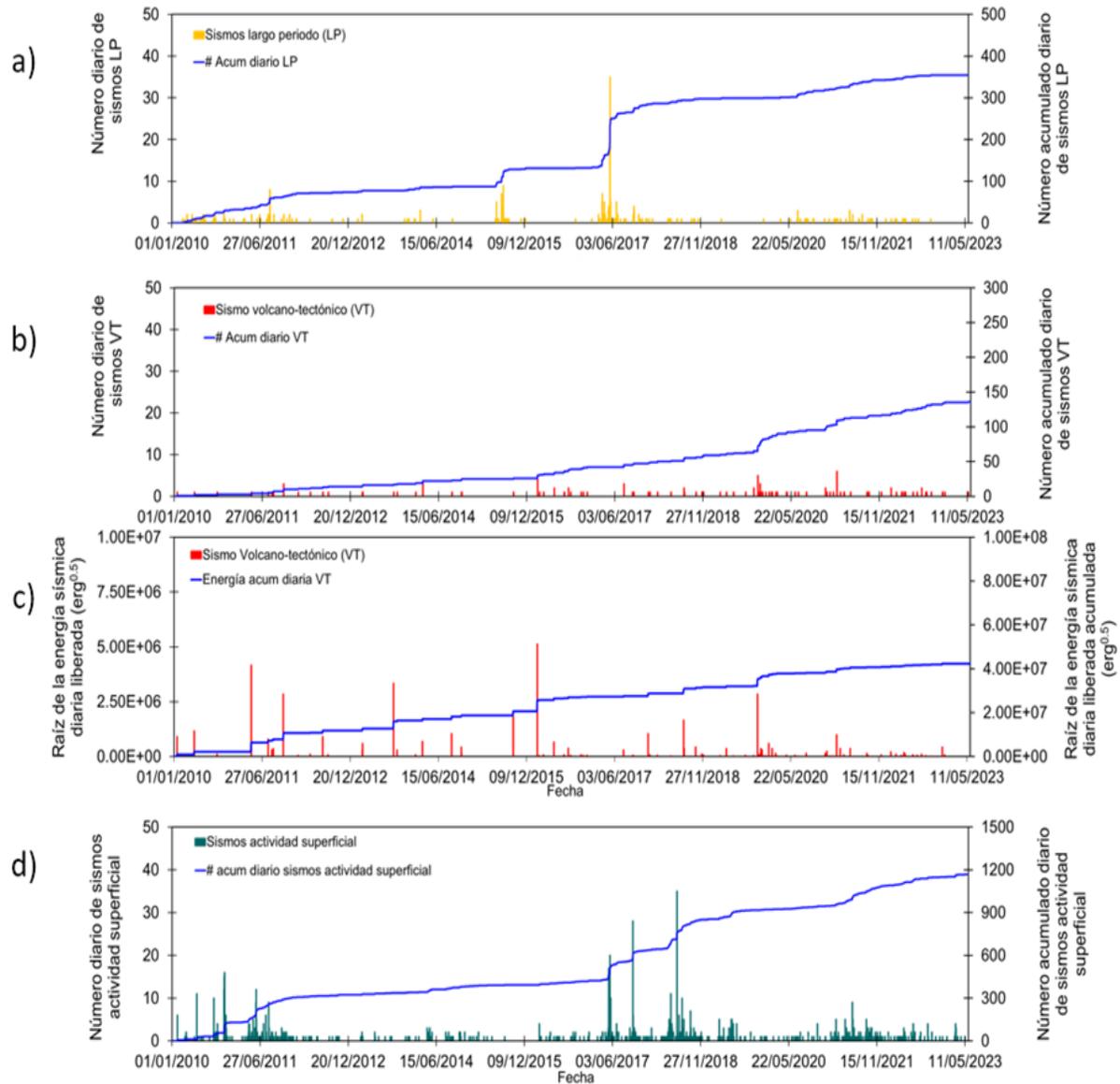


Figura 4. Tasas diarias de sismicidad registradas en el CVCB desde 2010. a) Número diario de sismos asociados al movimiento de fluidos al interior de los conductos volcánicos. b y c) Número y energía sísmica diarios de los sismos asociados a fracturamiento de roca y d) Sismos relacionados a procesos en la superficie del volcán (p.e. movimientos en masa, avalanchas -flujos de lodo o avenidas torrenciales-, entre otros)

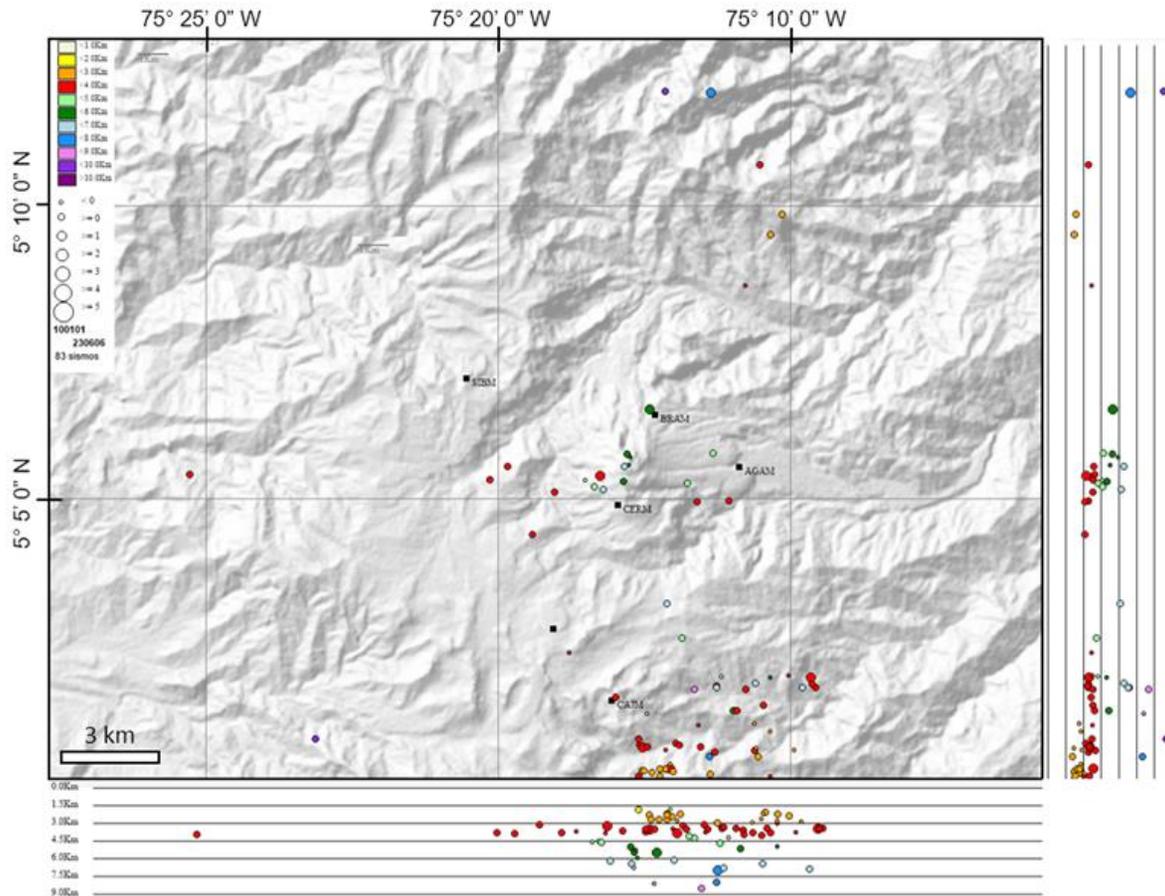


Figura 5. Mapa de localización de los sismos asociados a fracturamiento de roca (círculos de colores) registrados en el CVCB desde 2010. Los cuadros de color negro representan las estaciones sismológicas. La escala de colores de los círculos representa la profundidad de los sismos y el tamaño de los círculos, la magnitud de los sismos

En cuanto a la deformación de la superficie volcánica, los datos obtenidos a partir de las estaciones GNSS permanentes de Cerro Bravo (CBRA) y Páramo de Letras (PLTR) en el área volcánica muestran estabilidad, es decir, no ha habido deformación en últimos años (figura 6a) y días (figura 6b).

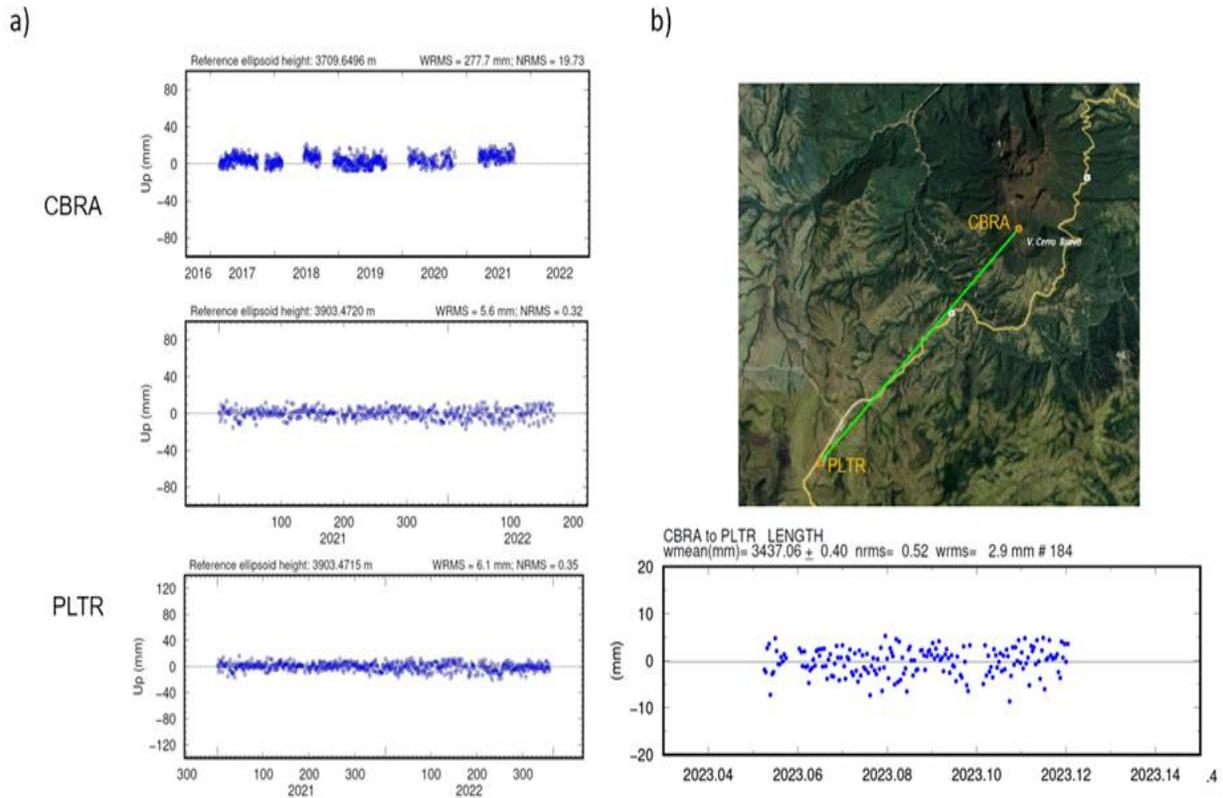


Figura 6. Serie temporal de la componente vertical de las estaciones GNSS permanentes CBRA y PLTR entre 2016 y 2022 (a) y resultado de la línea base entre ambas estaciones en mayo 2023 (b)

En el seguimiento de posibles anomalías térmicas en el área volcánica del CVCB, a partir de la plataforma de monitoreo satelital REALVOLC (figura 7), se observa que en los últimos siete años no ha habido ningún reporte/disparo importante en el área asociado a este fenómeno (datos por encima de la línea de color verde), el cual indique la presencia de un cuerpo de magma cercano a la superficie o un campo fumarólico activo debido a la actividad interna del volcán. Desafortunadamente, este portal dejó de funcionar en febrero de 2023 y, por lo tanto, no se tienen datos para los últimos meses. Sin embargo, se realizó el monitoreo desde otras plataformas como NASAFIRMS, mediante la cual tampoco se tuvo reporte de alguna anomalía térmica en el área volcánica. También se realizó revisión a través de la plataforma satelital Sentinel-2 sin ninguna novedad. En la figura 8 se muestra la imagen de satélite del 18 de mayo en espectro visible y equivalente térmico donde no se aprecia ninguna anomalía térmica en el sitio de anomalía de salida de gases y de temperatura en estudio, ni en otros sectores del complejo volcánico.

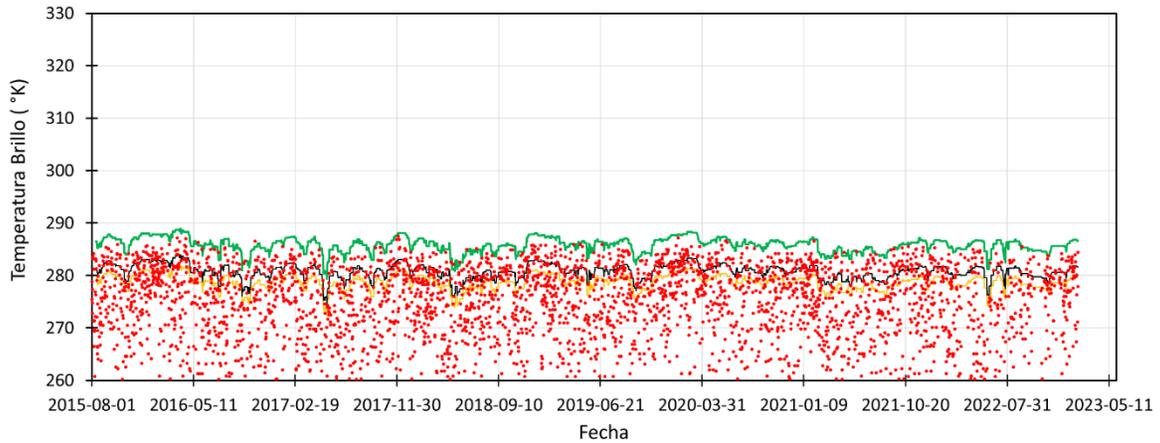


Figura 7. Serie temporal de datos de temperatura de brillo $^{\circ}\text{K}$ a partir de la plataforma de monitoreo satelital REALVOLC. Línea de colores representan las variaciones normales de temperatura en el área volcánica, negro: Línea base, amarillo: línea mínima y verde: línea máxima de variación normal, cualquier punto por encima de esta línea (verde) representa una anomalía térmica

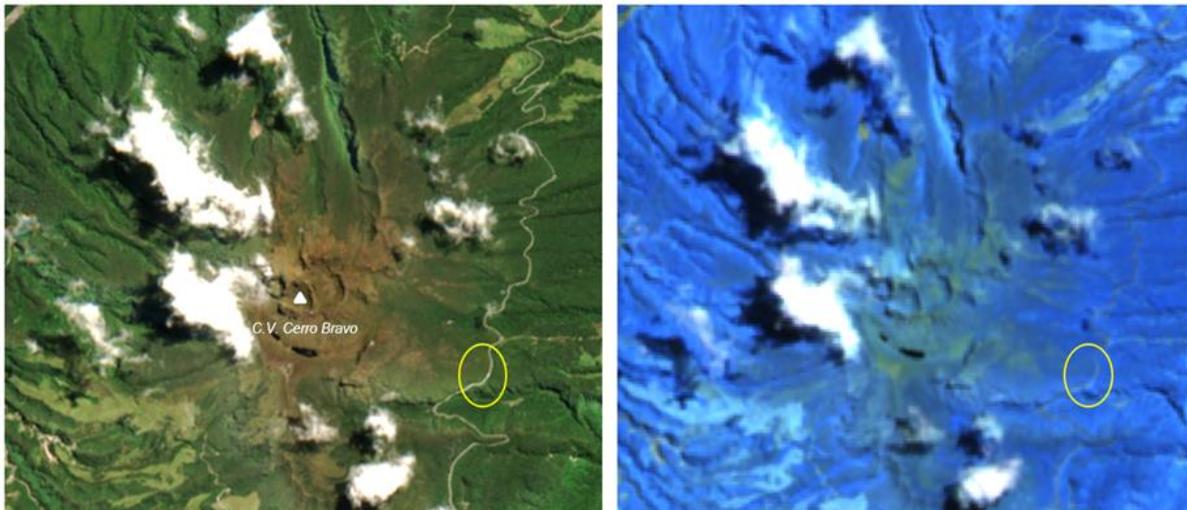


Figura 8. Imagen de satélite Sentinel-2 del 18 de mayo de 2023. Espectro visible (RGB, izquierda) y equivalente térmico (SWIR 12-11-8A, derecha). Note en la zona de la anomalía (círculo amarillo) no se aprecia ningún cambio térmico

4. Actividades adelantadas por el Servicio Geológico Colombiano ante el fenómeno presentado en la ladera suroriental del volcán Cerro Bravo

El 12 de mayo, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) a través de su Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales tuvo conocimiento de la emisión de gases y vapor y de la anomalía de temperatura, las cuales fueron identificadas (11 de mayo) y reportadas vía telefónica (12 de mayo en horas del mediodía) por la empresa TGI. Desde ese mismo día, el SGC realizó diferentes actividades de apoyo que permitieran dilucidar la situación anómala en el punto conocido como “La Virgen” en la vía Manizales – Bogotá (figura 9), localizada en el flanco suroriental del CVCB, jurisdicción del municipio de Herveo del departamento de Tolima.



Figura 9. Zona del fenómeno de emisión de gases y anomalía de temperatura identificado en el punto conocido como “La Virgen” en la vía Manizales – Bogotá, ladera suroriental del CVCB

Hasta el momento de publicación de este informe se han realizado 16 visitas a la zona de la anomalía y otros sectores del volcán con el propósito de analizar y evaluar la situación anómala para descartar o confirmar su posible origen volcánico y realizar un seguimiento en detalle para establecer si los focos de desgasificación aumentaban o por el contrario continuaban concentrados en el mismo sitio.

En la tabla 1 se muestra el listado de visitas realizadas por el SGC con las actividades realizadas de manera general.

Tabla 1. Visitas por el SGC a la zona de la anomalía y a otros sectores del volcán

| Fecha | actividad |
|---------------------|---|
| Mayo 11 | Identificación anomalía temperatura y salida de gases por parte de TGI |
| Mayo 12 | Reporte recibido desde TGI sobre anomalía temperatura y salida de gases |
| Mayo 13 | 1ª visita SGC: Reconocimiento del área de la anomalía |
| Mayo 15 | 2ª visita SGC: Mediciones temperatura y gases en área de la anomalía |
| Mayo 17 | 3ª visita SGC: Mediciones temperatura y gases en el área de la anomalía y otras áreas del volcán |
| Mayo 18 y 19 | 4ª visita SGC: Termales El Jordán |
| Mayo 20 | 5ª visita SGC: Reconocimiento del punto incandescente reportado con temperaturas mayores a 600 °C |
| Mayo 21 | 5ª visita SGC: Geología, mediciones temperatura y gases en área de la anomalía, revisión y medidas en punto incandescente |
| Mayo 22 | 6ª visita SGC: mediciones gases y temperatura en suelo desde el Doce hasta cima del volcán Cerro Bravo |
| Mayo 23 | 7ª visita SGC: mediciones gases y temperatura en el área de la anomalía |
| Mayo 24 | 8ª visita zona anomalía y otros sectores del volcán |
| Mayo 25 | Asistencia PMU en el Ocho y 9ª visita al área de la anomalía |
| Mayo 27 | 10ª visita zona anomalía y otros sectores del volcán |
| Mayo 28 | 11ª visita zona anomalía y otros sectores del volcán |
| Mayo 30 | 12ª Visita zona anomalía encuentro con Panel de Expertos contratados por TGI |
| Junio 05 | 13ª visita zona anomalía –geología y medición de temperatura. |
| Junio 08 | 14ª visita zona anomalía –geología y medición de temperatura. |

4.1. Reconocimiento del área de la anomalía reportada (13 de mayo)

El 13 mayo, el SGC realizó la primera visita a la zona de la anomalía. En primera instancia, se observó que el paso en la vía Manizales – Bogotá, sector “La Virgen”, estaba restringido a un solo carril, la zona de salida de gases estaba tapada con una lona y había presencia de funcionarios de la empresa INTRICON (contratista de la empresa TGI). En comunicación oral con el señor Jaime Redondo Fuentes (funcionario de INTRICON), el SGC pudo conocer que el 11 de mayo a las 5:00 p.m., mientras personal INTRICON pasaban en automóvil por la vía, observaron la salida de gas en el sector, por lo que realizaron inspección de si esta correspondía a una fuga de gas. En una nueva visita al día siguiente (12 de mayo), personal de INTRICON identificó un punto más de emisión de gases y, dada las características de temperatura y olor de los gases, las cuales no se relacionaban con gas natural realizaron el reporte al SGC. El 13 de mayo, personal de INTRICON había identificado dos puntos más de salida de gases.

De acuerdo con las observaciones realizadas en la primera visita del SGC, se identificó una zona de anomalía de dimensiones aproximadas de 23 m de longitud por 2 m de ancho, localizada en el costado interno de la vía. A lo largo de esta zona se observaron 5 focos de salida de gases y, posiblemente un punto nuevo donde podría generarse la emisión de gases. (Figura 10).

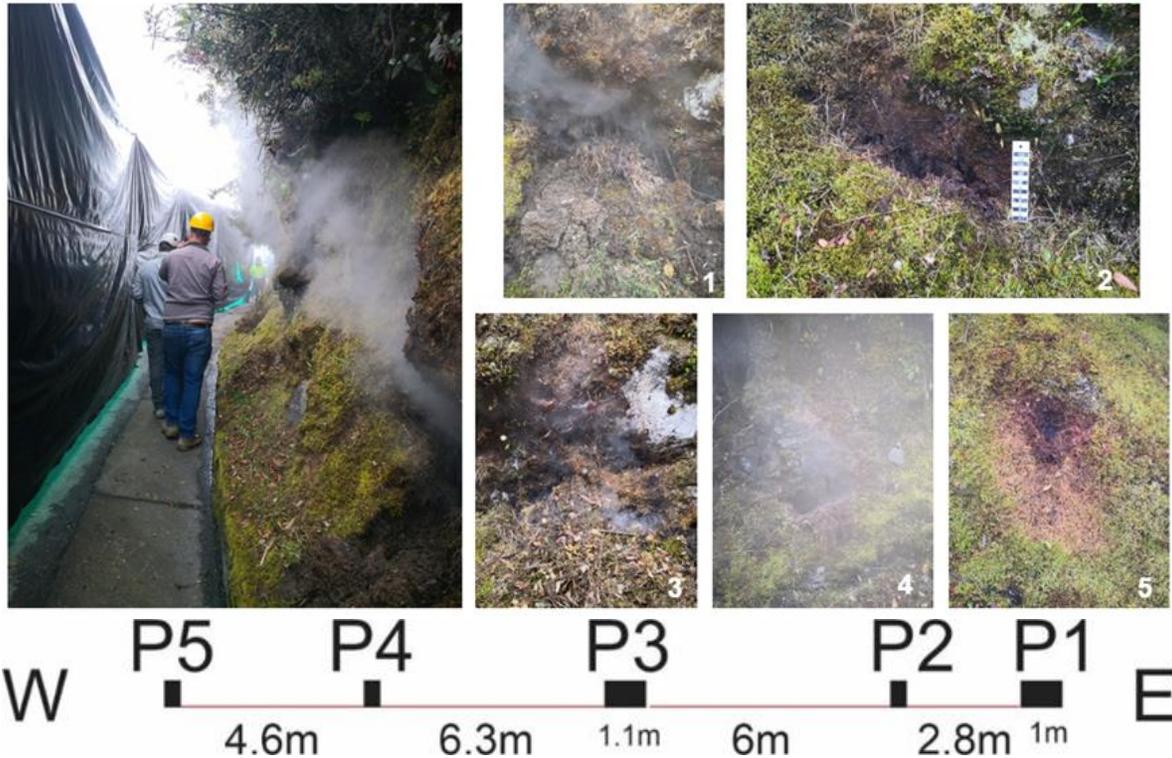


Figura 10. Zona anomalía de emisión de gases y de temperatura. Fotografías de los diferentes puntos de salida de gases identificados (superior). Corte esquemático occidente a oriente de la ubicación de los 5 puntos de salida de gases y distancia entre ellos (inferior)). Los puntos de emisión P2 y P3 muestran una zona de afectación mayor que los demás puntos (1,0 y 1,1 m de ancho respectivamente)

A partir de la inspección inicial de cada uno de los puntos de emisión, se evidenció la salida de gases y vapor caliente, olor extraño y desagradable, vegetación seca en el punto y alrededores próximos y baja presión de salida de gases. Las mediciones de temperatura en suelo, oscilaron entre 23 °C y 66 °C (P1, figura 11) en el área de la anomalía y menores a 24 °C, por fuera de esta zona. De manera preliminar se detectó dióxido de carbono (CO₂) en cantidades por encima de los valores ambientales y ausencia de dióxido de azufre (SO₂).



Figura 11. Máxima temperatura registrada en la zona de la anomalía (66 °C) correspondiente al punto P1

Para el seguimiento de la temperatura en la zona de anomalía y otros sectores del volcán, funcionarios del SGC utilizaron una termocupla tipo K (rango hasta 1300 °C) y una cámara termográfica portátil. Para el monitoreo de los gases, debido a que la salida de gases se presentaba de manera intermitente y con baja presión, se estableció como estrategia la medición de gases difusos en suelo con equipos especializados: flujómetro West System para establecer la concentración y flujo de CO₂, y el mobileDOAS, para el flujo de SO₂.

4.2. Reconocimiento del área de la anomalía reportada (13 de mayo)

La salida de gases y la anomalía térmica se localiza en la margen izquierda del nacimiento de la quebrada Cerro Bravo a lo largo de la cual aflora, con paredes subverticales, uno de los remanentes de domo que forma parte del CVCB y el cual tiene una altura aproximada de 400 m desde el fondo de la quebrada (figura 12). Lesinsky (1990) marca un lineamiento de dirección E-W a lo largo de esta quebrada.

El remanente del domo lo constituye una roca porfirítica media, de color gris, compuesta por fenocristales de plagioclasa, anfíboles, clinopiroxeno, biotita y cuarzo en una matriz vítrea cristalina que corresponde a una composición dacítica. Al costado occidental de la anomalía este se observa fracturado en forma de grandes bloques verticales (figura 12a), afectados por diaclasas menores que dan lugar a la formación de cuñas en el macizo (figura 12b). A lo largo del afloramiento se reconocen, cada 1 a 3 m, fracturas continuas con inclinaciones verticales a subverticales agrupadas en dos familias principales con direcciones predominantes al NNE–SSW y WNW–ESE (figura 12b). Aunque la distancia entre diaclasas alcanza los 3 m, en algunas zonas del afloramiento (tramos <2 m) el fracturamiento es mayor y se observan hasta ocho diaclasas por metro. En general, los espacios entre las diaclasas son reducidos ($\leq 0,5$ mm), están libres de material particulado o roca triturada, no se observan evidencias de cizalla o desplazamiento y además, están secas o ligeramente húmedas. Las superficies de la roca en las fracturas son ligeramente rugosas y no presentan ningún tipo de recubrimiento o relleno. A su vez, se

observan una serie de fracturas de menor buzamiento y continuidad, con diferentes orientaciones (figura 12b).

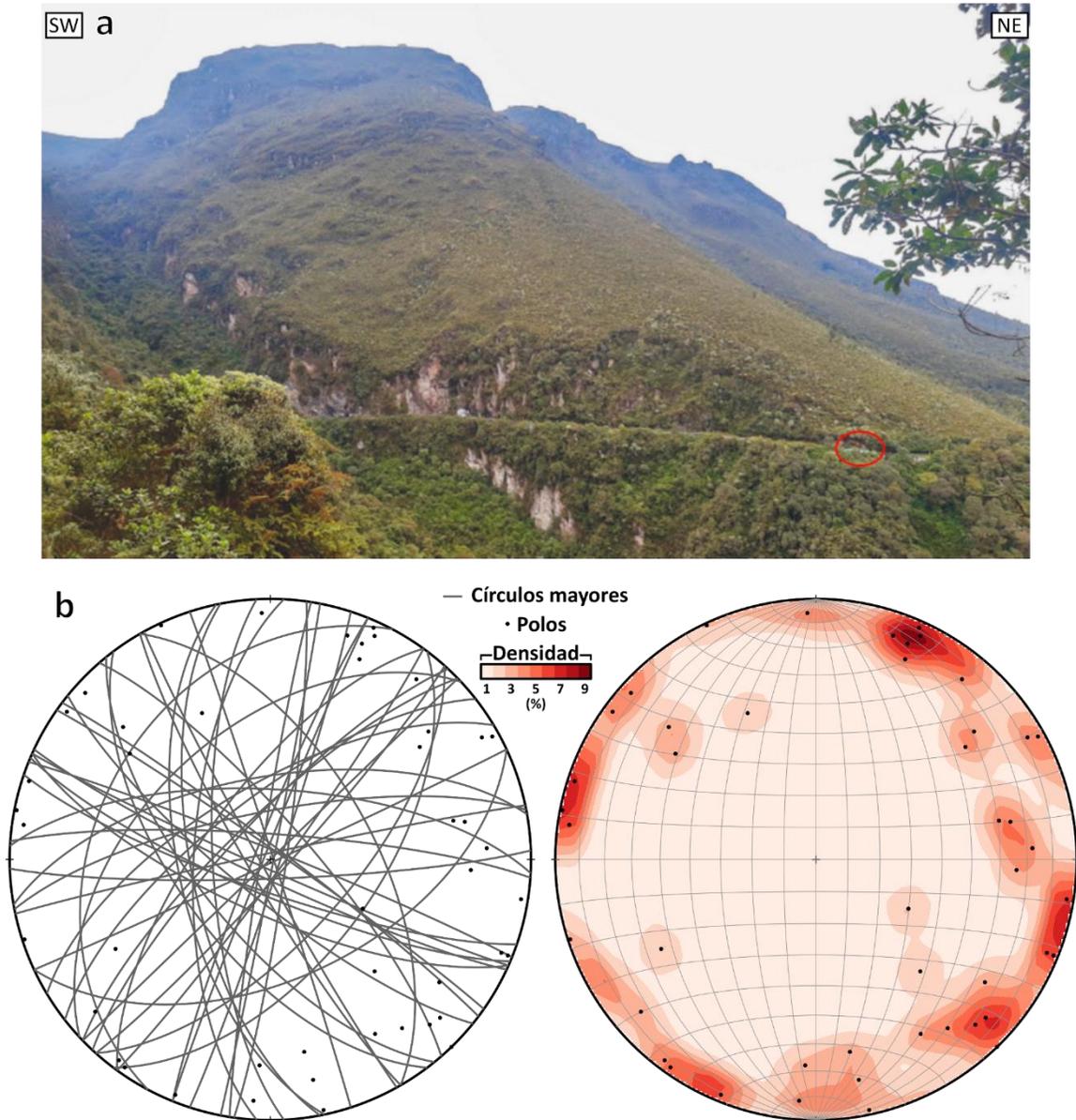


Figura 12. a) Flanco sur del remanente del domo del CVCB, donde se presenta la anomalía térmica asociada a salida de gases enmarcada por el círculo rojo. Nótese el remanente del domo y las paredes subverticales del mismo en el sector de la carretera. b) Falsilla de Schmidt con los planos de fractura medidos en campo (izquierda) y contornos de densidad de polos (derecha)

En el sitio donde se observa la anomalía, afloran aproximadamente 3 m de un depósito compuesto por fragmentos angulares con tamaños entre guijo a bloque (5–110 cm), a través de los cuales, se observa la salida de gases calientes. En general, entre los fragmentos tamaño bloque se observan fragmentos tamaño guijo de la misma composición (figura 13). Los fragmentos son de color gris, tienen textura porfirítica, están compuestos por cristales de plagioclasa, anfíbol, biotita y cuarzo, en una matriz afanítica. Como se observa en la figura 13, hacia la parte superior del afloramiento el tamaño de los fragmentos

disminuye principalmente a tamaño guijo, están ligeramente alterados y entre ellos, se observa material fino de color marrón.

El depósito corresponde a un deslizamiento de rocas originado en el domo volcánico, causado probablemente por la inestabilidad de la zona y la intervención al construir la carretera. Es a través de estos fragmentos donde se observó la salida de gases calientes debida al calentamiento de fragmentos de roca.



Figura 13. Aspecto de parte de la zona de la salida de gases, correspondiente a un deslizamiento de rocas. Nótese el aspecto “calcinado” de los bloques en el sitio donde se registraron las mayores temperaturas

Cubriendo el depósito anterior, hay una capa con espesor irregular (≈ 20 cm), masiva, clastosoportada y mal seleccionada, compuesta principalmente por fragmentos angulares de pómez y líticos volcánicos tamaño lapilli, que corresponde a material retrabajo de material piroclástico que afloran en el área y sobre el cual se desarrolló el suelo actual (figura 13). Sobre la vía hay evidencias de antiguos procesos de remoción en masa como la cicatriz que se observa hacia la parte alta del sitio de la anomalía (figura 14) y en la fotografía aérea del IGAC, donde además se aprecia el estado de la vía en este tramo de la ruta en 1959 (figura 15).



Figura 14. Vista general de la zona, donde se observa una antigua cicatriz de deslizamiento



Figura 15. Copia de la fotografía aérea del IGAC, 1959, mostrando el aspecto de la vía a la fecha en el sector donde se presenta actualmente la salida de gases y anomalía térmica. El círculo rojo enmarca el sitio de la anomalía

Localmente, sobre el domo, aflora un depósito piroclástico de color habano, oxidado hacia la parte superior debido a percolación de agua desde el suelo suprayacente. Tiene un espesor promedio de 2 m, es masivo, con selección media y cierta gradación asimétrica (figura 16). Está compuesto por fragmentos angulares a subangulares de pómez (75%) y líticos (25%), con tamaño que varía de ceniza gruesa a bloque

medio. Las pómez son de color habano, con textura porfirítica fina a media, compuestas por plagioclasa, anfíbol, cuarzo y biotita en menor proporción en una matriz vítrea vesiculada algo fibrosa. Es común observar bandas blancas y grises indicando posible mezcla mecánica de magmas (*mingling*). Los líticos corresponden a fragmentos de bombas y bloques, son rocas de color gris porfiríticas medias con fenocristales de plagioclasa, anfíbol, piroxeno, cuarzo y biotita en matriz afanítica gris.



Figura 16. Aspecto del depósito de caída piroclástica (CB4) que suprayace el remanente del domo en el sector

Localmente, hacia la base, el depósito presenta, en contacto transicional, intercalaciones de láminas y capas. continuas y discontinuas de lapilli fino, ceniza gruesa y fina compuestas por pómez y líticos o presenta una capa de 5 cm, algo endurecida, de color rosado con pómez y líticos en una matriz de ceniza fina a muy fina. Este depósito se correlaciona, por estudios anteriores, con la caída piroclástica de la unidad eruptiva CB4, que tiene una edad de aproximadamente 1000 años AP (Martinez *et al.*, en preparación), la cual presenta una amplia distribución en el área (figura 17a). En este sector, el depósito, se encuentra suprayacido por el suelo actual y no se identificaron paleosuelos ni depósitos de caída piroclástica más recientes sobre él. Sin embargo, en cercanías al lugar (sector La Palmera), donde la topografía es un poco más suave, se observa una la secuencia más completa de depósitos piroclásticos que incluye unidades eruptivas más recientes que suprayacen a CB4 (figura 17b).

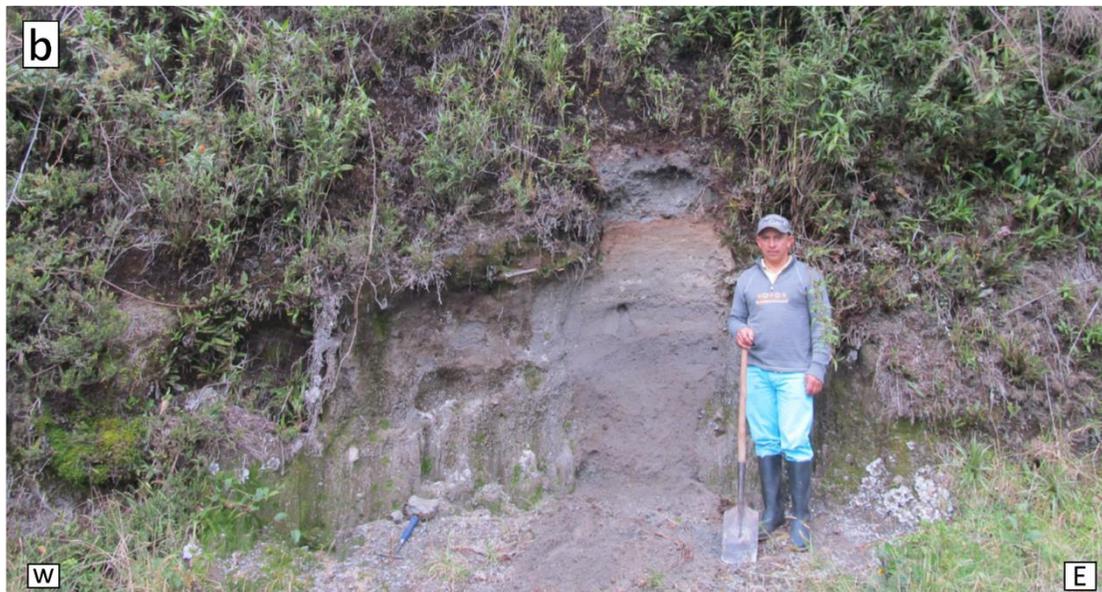
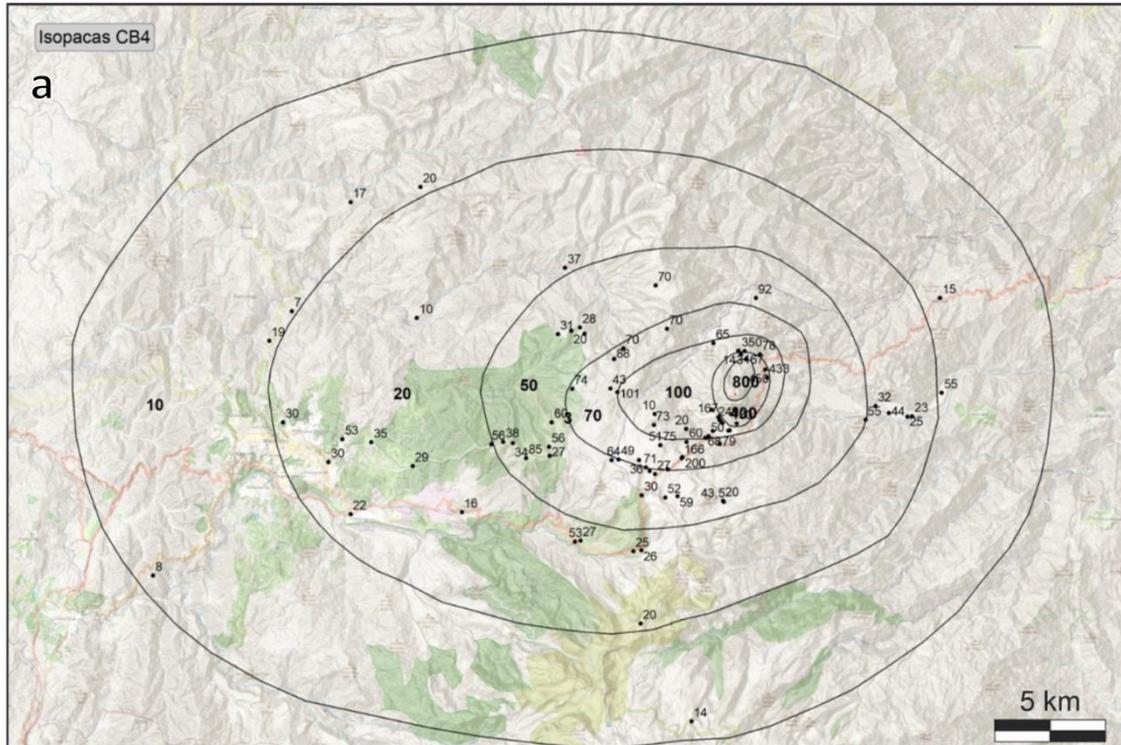


Figura 17. a) Isopacas del depósito de caída piroclástica pumítica, correspondiente a la unidad eruptiva CB4 (Tomado de Martínez *et al.*, en preparación). b) Depósitos de corrientes de densidad piroclástica y caída piroclástica localizados en la vía a La Palmera, estos depósitos suprayacen la unidad eruptiva CB4, identificada en las inmediaciones del sitio de la salida de gases y anomalía térmica

Por otro lado, a lo largo de la carretera se hicieron varias excavaciones en los puntos donde pasa el gasoducto. Frente al punto de la anomalía, sobre la carretera, la empresa TGI realizó una excavación con una profundidad aproximada de 4 m, donde se observó, debajo del gasoducto, fragmentos angulares de roca con tamaños entre 15–60 cm (guijo a bloque), allí también se pudo apreciar salida de gases calientes

(figura 18). Los fragmentos son de color gris, tienen textura porfírica, están compuestos por cristales de plagioclasa, anfíbol, biotita y cuarzo, en una matriz afanítica. Estos fragmentos hacen parte del depósito del deslizamiento observado en el afloramiento de la anomalía (figura 19a). Hacia la parte superior, sobre los bloques, se encuentra una capa de color marrón, con espesor irregular (<50 cm), de geometría lenticular, correspondiente a la base granular de la carpeta asfáltica, compuesta por fragmentos de pómez y líticos volcánicos, angulares a muy angulares con tamaños guijo grueso a arena y material asfáltico reciclado (ingeniero de INVIAS, comunicación oral; figura 19b). En la parte superior, se observa la carpeta asfáltica (figura 19b). Localmente, bajo la carpeta granular, se encuentra una losa de concreto que protege el gasoducto.



Figura 18. Excavación realizada en el sitio de la anomalía. Nótese las rocas sueltas en el fondo del apique. La flecha roja indica un punto donde se observó salida de gases, con una temperatura de 54.1 °C medida el 27 de mayo

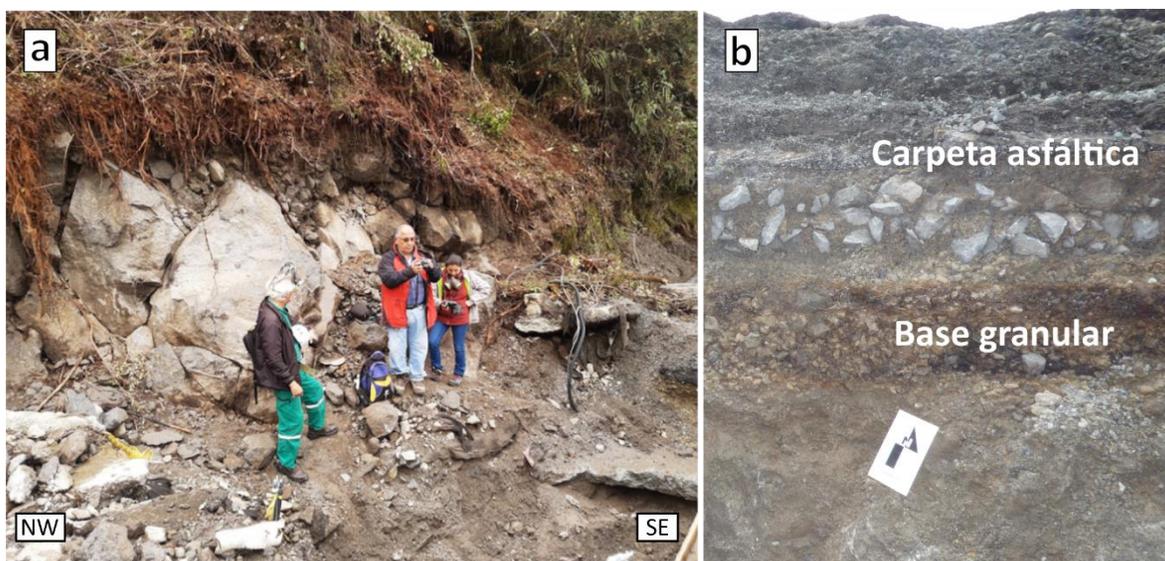


Figura 19. a) Afloramiento del deslizamiento en el sitio de la anomalía principal. b) Aspecto del relleno de la carretera en el apique ubicado en la zona de la anomalía

4.3. Aspectos fisicoquímicos del área de anomalía: monitoreo de gases y temperatura

El 13 y 15 de mayo, el personal del SGC, en su primera y segunda visita de inspección a la zona de la anomalía, evidenció que la salida de gases y vapor se concentraba en una misma área (aproximadamente 23 m x 2 m) y registraba temperaturas entre 23 a 67 °C (figura 20). Las mediciones de los gases mostraron concentraciones importantes de dióxido de carbono (CO₂) y ausencia de dióxido de azufre (SO₂) (figura 21 y tabla 2).



Figura 20. Mediciones de temperatura en suelo en algunos de los puntos de salida de gases de la anomalía y evidencia de vegetación seca en los puntos y alrededores próximos

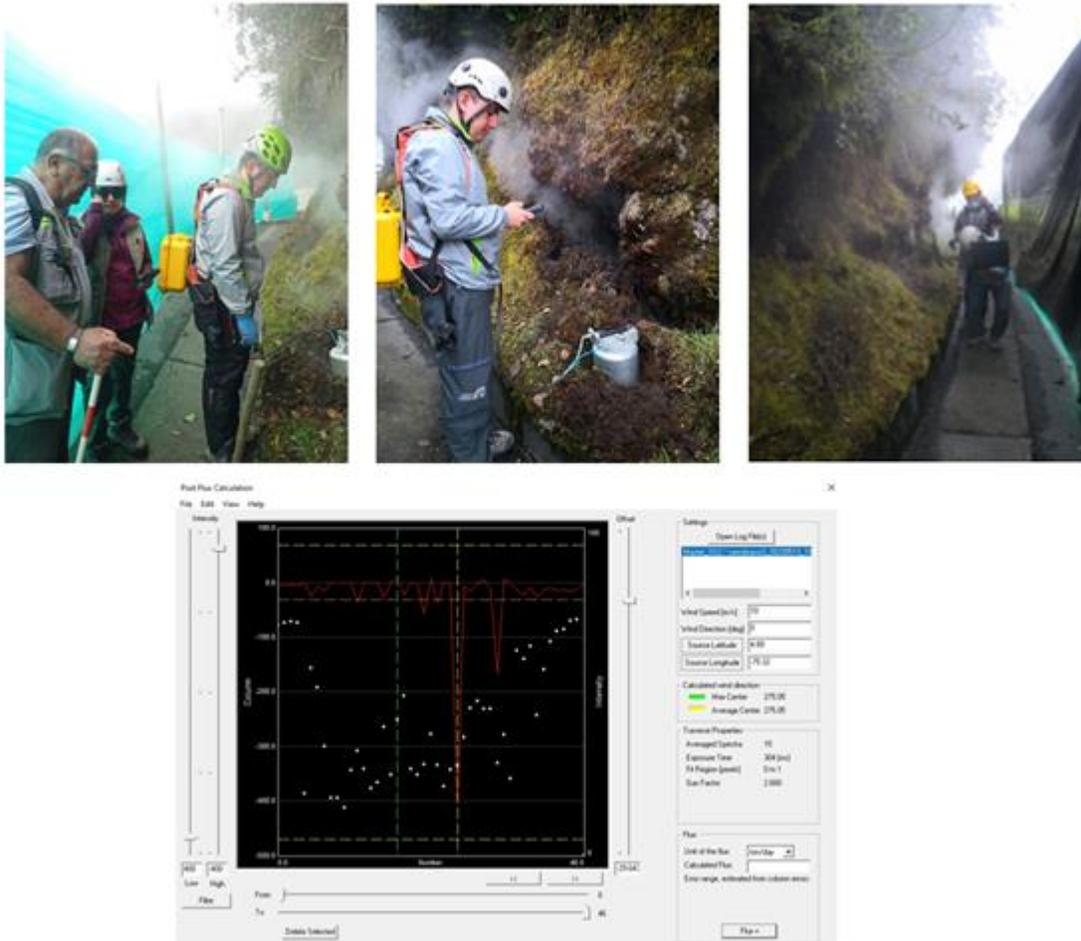


Figura 21. Personal del Servicio Geológico Colombiano realizando inspección en la zona de la anomalía y mediciones de flujo de CO₂ y de SO₂ en suelo. Gráfica inferior muestra la “curva” de mediciones de SO₂ obtenida con el equipo MobileDOAS

Tabla 2. Valores de CO₂ y SO₂ en zona de anomalía y otros sectores del volcán Cerro Bravo

| ZONA DE LA ANOMALÍA | | OTROS SECTORES COMPLEJO VOLCÁNICO CERRO BRAVO | |
|--------------------------------------|---|---|---|
| Dióxido de azufre (SO ₂) | Dióxido de Carbono (CO ₂) en suelo | Dióxido de azufre (SO ₂) | Dióxido de Carbono (CO ₂) en suelo |
| No se encontró | Concentraciones entre 480 - <u>20000 ppm*</u> Flujos entre 14 - 192 mol/m ² d | No se encontró | En campañas realizadas en 2012 y 2015: Concentraciones < 1700 ppm Flujos < 18 mol/m ² d |

*Se aprecia una clara anomalía del CO₂ difuso en suelo

De acuerdo con los flujos estimados de dióxido de carbono en estas inspecciones, se pudo apreciar que existe una clara anomalía de este gas en una zona muy específica y limitada de la ladera del volcán, que no son observados ni antes y después el sitio de la anomalía, donde las concentraciones descendían a 480 ppm (flujos de 14 mol/m²/día) y, tampoco en mediciones previas realizadas en el volcán, donde las concentraciones no han superado concentraciones de 1500 ppm (flujos menores a 18 mol/m²/día) (figura 22).

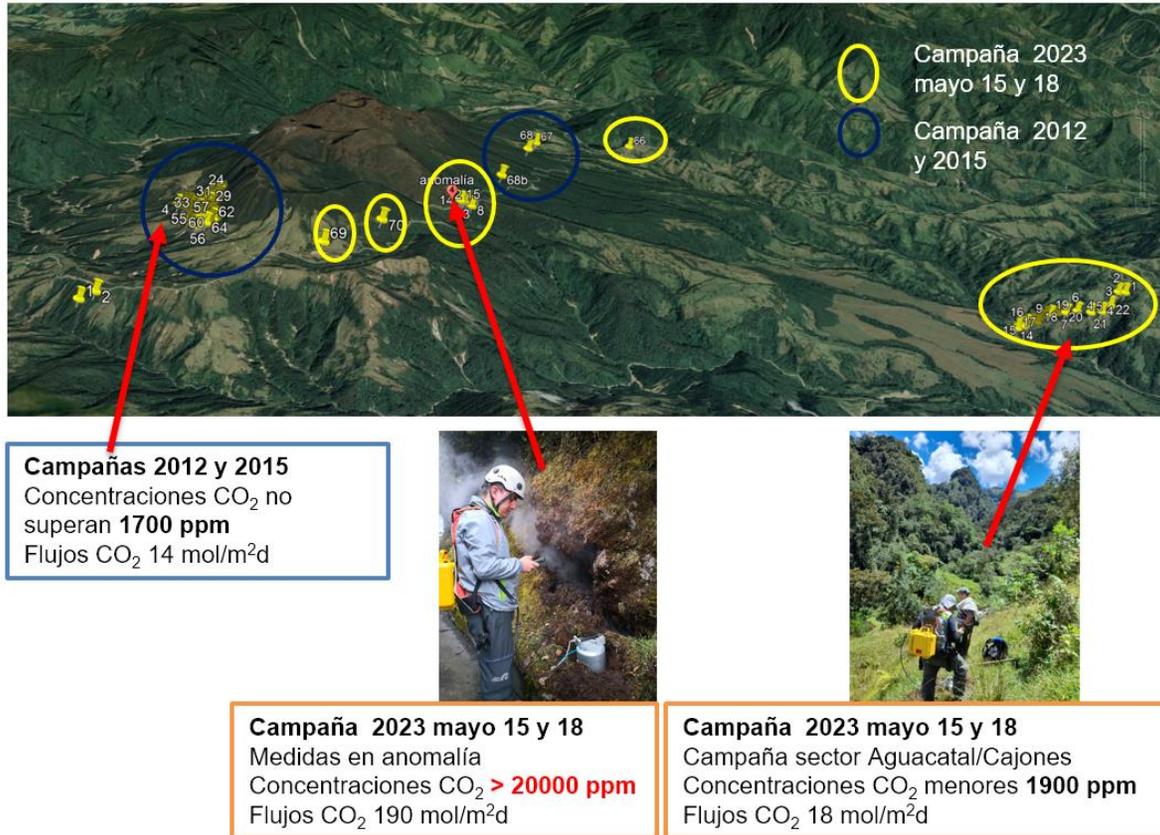


Figura 22. Mediciones de CO₂ en la zona de anomalía (mayo 15 y 18 de 2023) y en otros sectores del volcán realizadas en el 2012 y 2015

Durante el monitoreo realizado el 17 de mayo, el personal de SGC encontró que en algunos de los puntos de salida de gases se generaron procesos de combustión o de ignición espontánea, los cuales fueron evidenciados por las altas temperaturas registradas (≈300 °C), el humo o gas de color azuloso/gris y aspecto calcinado en algunas partes de los focos de emisión. (Figura 23).



Figura 23. Incremento de temperatura en la zona de anomalía registrado el 17 de mayo y cambios registrados en los puntos de emisión que reflejan procesos de combustión

Ante este fenómeno, el SGC procede a informar a la empresa TGI, ya que este proceso implicaba un aumento de la temperatura en el sitio y, por lo tanto, podría ser una amenaza para la tubería del gasoducto que pasa muy cerca de la zona de la anomalía. Adicionalmente, también se le indica a la empresa TGI la importancia de medir otras especies gaseosas (metano, etano, monóxido de carbono) diferentes al dióxido de carbono CO_2 , cuyas mediciones en la zona se habían estado realizando con el equipo flujómetro del SGC.

Es así como con la colaboración de la empresa TGI y mediante sus equipos de medición de gases, se logró detectar metano (CH_4) en altas cantidades y monóxido de carbono (CO) en la zona de la anomalía, evidenciándose con la presencia de CO un proceso de combustión incompleta en el sitio. Los altos contenidos de metano (por encima del 30%) registrados en las mediciones llamaron la atención del personal del SGC, dado que estos valores no son característicos de los ambientes volcánicos, contrariamente, las emisiones de metano en los volcanes son muy bajas, incluso despreciables (Etiope et al, 2007; Wogan et al. 2020).

Lo anterior motivó al SGC a realizar de manera más exhaustiva el monitoreo continuo de la anomalía. Para lo cual se propone a la empresa TGI realizar también mediciones de estas especies gaseosas (metano y monóxido de carbono) en un ambiente hidrotermal (fuente termal Hotel) de uno de los volcanes más activos de Colombia, como es el volcán Nevado del Ruiz, esto para observar el comportamiento de estos gases.

Los resultados obtenidos a partir de las mediciones realizadas con los equipos de la empresa TGI en la zona de anomalía y en una de las fuentes termales del volcán y, su comparación con mediciones en otros volcanes activos de Colombia (Alfaro *et al.*, 2008, Fischer, *et al.*, 1998), se muestran a continuación:

Tabla 3. Valores de las concentraciones de metano y monóxido de carbono en la zona de la anomalía y en volcanes activos de Colombia

| Especie | Zona Anomalía Ladera C.V. Cerro Bravo (mayo 17 de 2023) TGI - SGC | V. Nevado del Ruiz Fuente Termal Hotel (mayo 17 2023) TGI - SGC | Sistema hidrotermal V. Azufral (2008) | V. Galeras (1998) |
|---------|--|--|---|----------------------|
| CH4 | >30% ** | 0,002% ** | 0,015% | 0,004% |
| CO | >200 PPM ** | 0 ** | 0,0004% | nd |

** Dato tomado con equipo de la empresa TGI, nd: no hay dato

Otras de las verificaciones que consideró importante realizar el SGC ante este fenómeno fue visitar una de las fuentes termales asociadas a la actividad del volcán Cerro Bravo y la quebrada adyacente al nacimiento termal, con el propósito de establecer la posible existencia de alguna perturbación en el sistema hidrotermal, asumiendo que la zona de la anomalía en estudio fuese una manifestación, en superficie, debido a la reactivación del volcán. La visita se realizó el 18 de mayo, a la fuente termal el Jordán y la quebrada Aguacatal. Los parámetros fisicoquímicos medidos fueron la temperatura, el pH y la conductividad eléctrica (CE) (figura 24), los cuales no mostraron cambios respecto a la línea base o mediciones que se tienen del monitoreo realizado en años anteriores por personal de las direcciones de Geoamenazas y Geociencias Básicas. En la tabla 4 se presentan los valores registrados in situ.



Figura 24. Mediciones de temperatura y pH en la fuente termal el Jordán (arriba) y en la quebrada Aguacatal adyacente a la fuente realizadas por personal del SGC en mayo 18 de 2023

Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos fuente termal (FT) el Jordán y quebrada adyacente

| Parámetro | FT El Jordán 2023-05-18 | FT El Jordán 2018-11-28 | Quebrada Aguacatal 2023-05-18 |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| pH | 6,15 | 6,30 | 6,03 |
| Conductividad Eléctrica (micro S/cm) | 1241 | 1531 | 250,1 |
| Temperatura (°C) | 28,3 | 37,4 | 16,5 |

Ante la ocurrencia de altos contenidos de metano en la zona de la anomalía en contraste con los valores tan bajos detectados en la fuente termal Hotel del volcán Nevado del Ruiz, el SGC consideró relevante establecer una nueva estrategia de seguimiento del fenómeno que permitiera descartar o confirmar su origen volcánico, es por ello, que el SGC a través de la Dirección de Geociencias Básicas establece la

realización de campañas de campo para la toma de datos en la zona de la anomalía y otros sectores del volcán, usando un equipo especializado para la medición de flujo de gases difusos en suelo: metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S).

De otro lado, el viernes 19 de mayo finalizando la tarde, a través del grupo de *whatsapp* "Cerro Bravo" creado por la Unidad Departamental para la Gestión de Riesgos de Desastres de Caldas, el señor Julio Guevara de Invias comparte una imagen y video (remitida a él por su personal en la zona) en la que se aprecia entre las rocas un punto incandescente de color rojizo debido al incremento en la temperatura en el sitio.

El día 20 de mayo en horas de la tarde personal del SGC realizó verificación cualitativa del aumento considerable en la temperatura, el cual indicó que era difícil acercarse al punto incandescente, llamado por algunos como "rocas al rojo vivo". Las observaciones realizadas evidenciaron que en el punto incandescente no era visible la salida de gases, no obstante, en las partes contiguas podía apreciarse aún procesos de combustión evidenciados desde el 17 de mayo en el sitio. (Figura 25). El personal de la empresa TGI en el área reportó para este mismo día temperaturas de más de $600\text{ }^\circ\text{C}$.

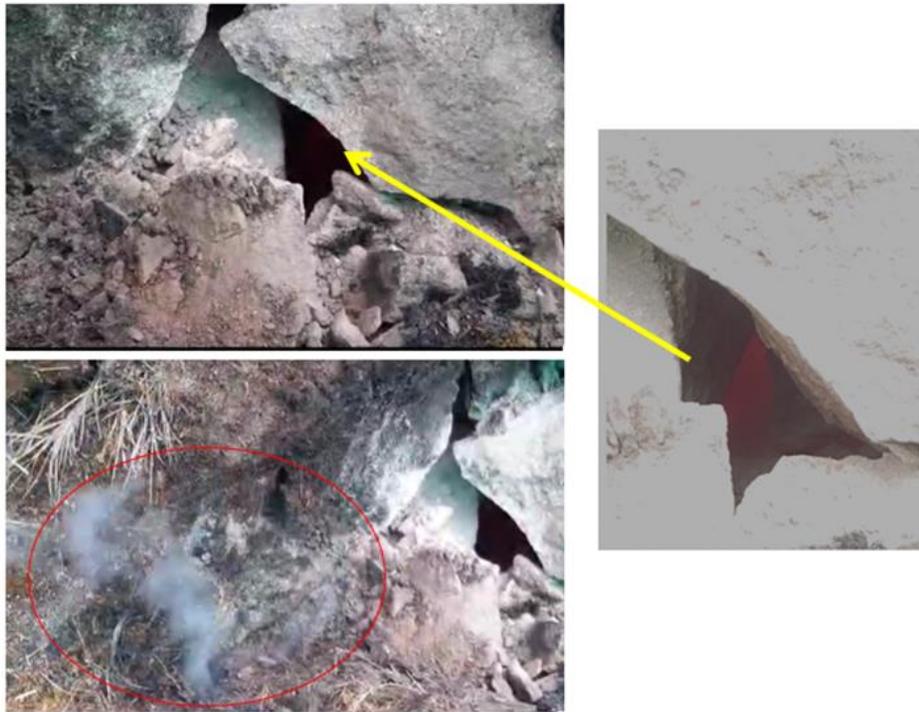


Figura 25. Punto incandescente de alta temperatura observado a través de las fracturas en la roca y presencia de focos pequeños de combustión contiguos a éste (círculo rojo). Fotografías tomadas por personal del SGC, mayo 20 de 2023, 01:45 p.m.

Entre el 21 al 28 de mayo se inician actividades de medición de temperatura y de flujo de gases en suelo de CO_2 , CH_4 , H_2S tanto en zona de anomalía como en áreas aledañas, cercanas y lejanas, esto con el fin de establecer la ocurrencia o manifestación de otros focos de emisión difusa en suelo presentes en el área volcánica. Así mismo, para continuar con el monitoreo de flujo de SO_2 , se inician campañas de medición con travesías desde el sector del Doce hasta el sitio conocido como Puerto Brasil.

En lo que respecta a la temperatura, el SGC continuó realizando seguimiento y monitoreo en el lugar, se aprecia durante los días 21 al 23 de mayo el registro de altos valores de temperatura entre a 590 °C y 679 °C en diferentes zonas del punto incandescente (figura 26 y figura 27).

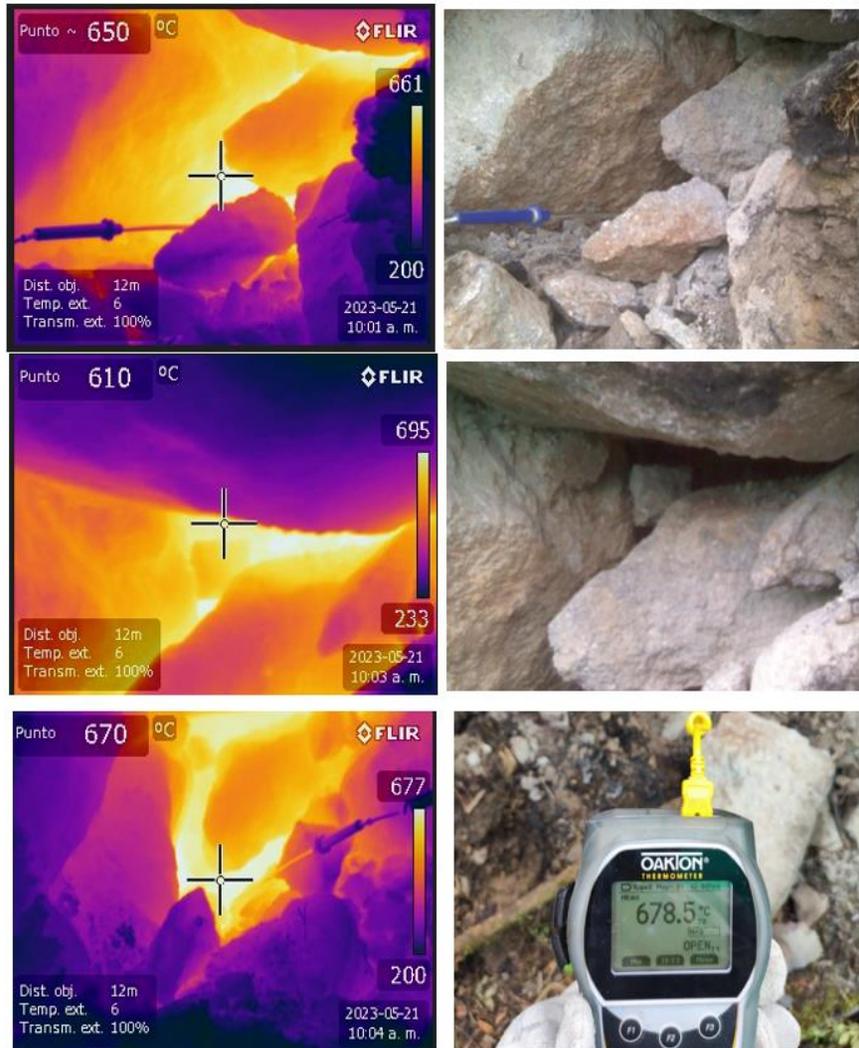


Figura 26. Medidas de temperatura en la zona de anomalía, usando cámara termográfica FLIR y Termocupla Tipo K (mayo 21 de 2023)

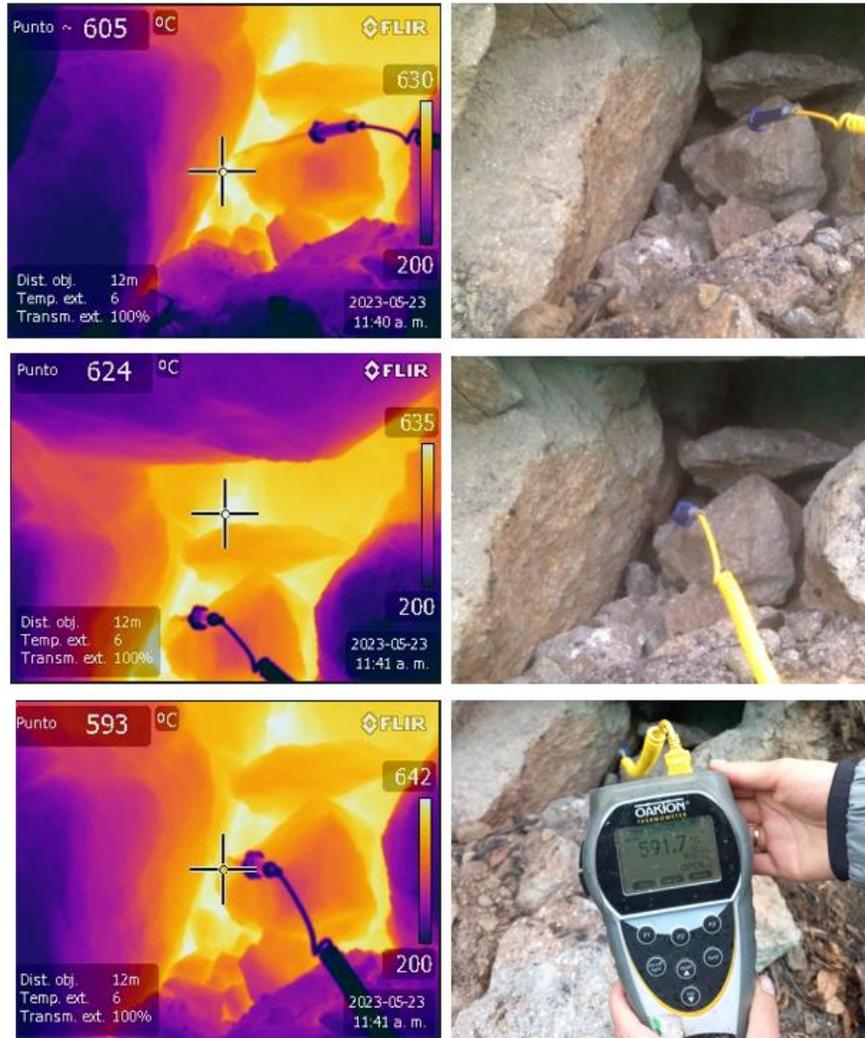


Figura 27. Medidas de temperatura en la zona de anomalía, usando cámara termográfica FLIR y Termocupla Tipo K (mayo 23 de 2023)

El 24 de mayo la empresa TGI inició un proceso de excavación en la zona de la anomalía, se removió parte de la capa asfáltica y se dejó parte del depósito asociado al deslizamiento, la remoción de material se hizo hasta llegar a la tubería de gas (figura 28), durante este proceso se tomaron algunas fotografías para establecer si en la zona persistía la anomalía térmica y la salida de gases (figura 29).



Figura 28. Trabajos de excavación por parte de la empresa TGI. Se aprecia la persistencia de salida de gases

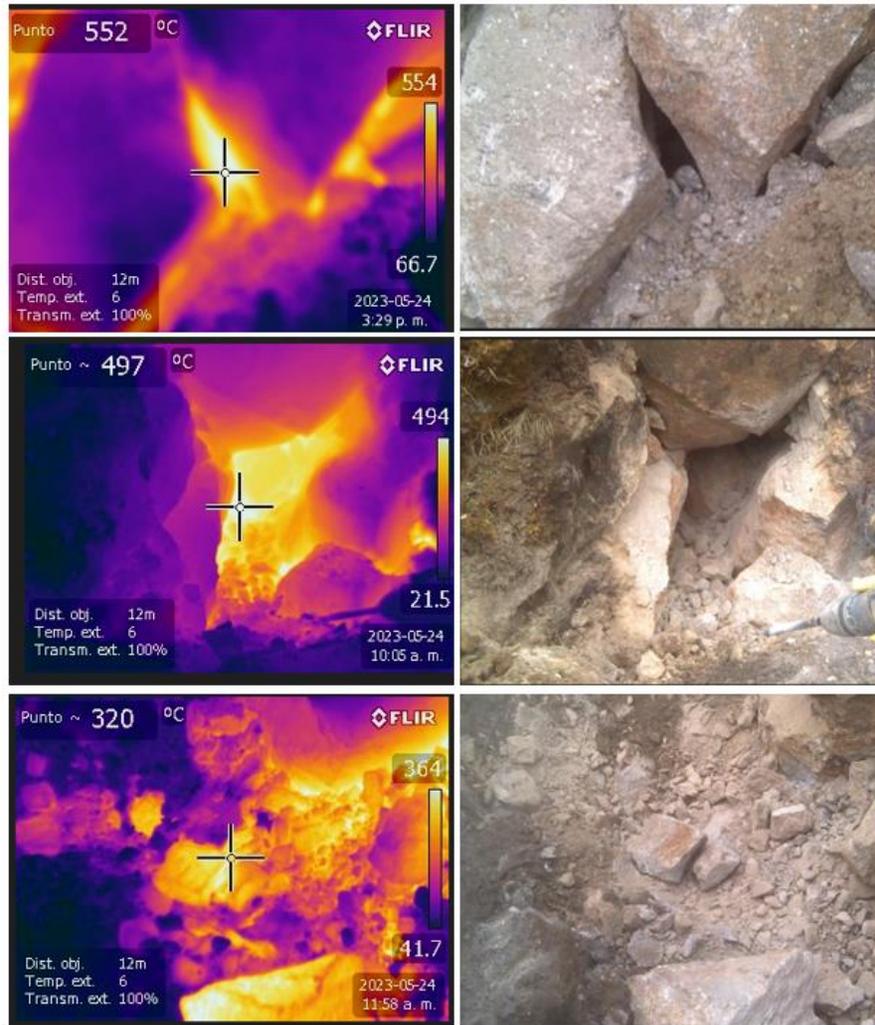


Figura 29. Monitoreo de temperatura en el depósito del deslizamiento expuesto luego de la excavación realizada por la empresa TGI. Nótese la persistencia de altas temperaturas

Finalizando la tarde del 24 de mayo, la unidad de Bomberos inicia el proceso de enfriamiento del punto incandescente mediante el uso de agua. Esto disminuyó la temperatura en el sitio hasta menos de 250 °C de acuerdo con las mediciones realizadas los días 27 y 28 de mayo (figura 30).

Como se mencionó anteriormente, luego de que se detectaron altas concentraciones de metano y dióxido de carbono (CO_2), se iniciaron mediciones con equipo flujómetro para determinar flujos de CO_2 , CH_4 y H_2S en la zona de anomalía y sitios aledaños. Para rodear varios flancos del volcán, las mediciones se realizaron cubriendo aproximadamente 13 km: bordeando la carretera desde el lugar conocido como Puerto Brasil hasta el sector del Doce; camino hacia los domos y lagunas en el cráter; rodeando el sector occidental del CVCB, camino abierto por la empresa TGI para la instalación del Bypass, parte alta de la anomalía y por el sector la Finca La Palmera, esto con el fin de tener una línea base de medición en el área volcánica (figura 31).



Figura 30. Seguimiento de la temperatura en el sector de la anomalía, 27 y 28 de mayo, donde se aprecia la disminución en este parámetro después del uso de agua por parte de la unidad de Bomberos



Figura 31. Personal del SGC realizando mediciones con equipo flujómetro para determinar presencia de CO₂, CH₄ y H₂S en suelo en diferentes flancos del CVCB

Durante las medidas realizadas en los diferentes flancos del volcán no se observaron valores de CO₂ anómalos, los valores oscilaron entre 400 y 1600 ppm y los flujos no superaron 180 g/m²d. En lo que respecta a la presencia de CH₄ y H₂S ésta no se evidenció durante las mediciones realizadas.

Para el monitoreo de gases en la zona de anomalía, se iniciaron las medidas a una distancia de 200 metros, esto con el fin de delimitar el área y hacer evaluación espacial y temporal (figura 32).



Figura 32. Personal del SGC realizando mediciones en zona de anomalía con equipo flujómetro para estimar los flujos de CO₂, CH₄ y H₂S

En el lugar se detectó la presencia de altas concentraciones de CO₂ y CH₄, especialmente en zona aledaña al sitio donde inicialmente inició el fenómeno el 11 de mayo y, que luego presentó el máximo de temperatura (>600 °C). Los valores de concentración de CH₄ en la zona estuvieron en el rango de los 200 a 35000 ppm, en la figura 33 se aprecian algunas de las medidas más relevantes encontradas en el área de la anomalía.



Figura 33. Detección de altas concentraciones y flujos de gas metano en zona de anomalía, CVCB. Datos tomados por personal del SGC durante el seguimiento y monitoreo de gases en el sitio

Para un mejor análisis de la información que se ha presentado en las páginas anteriores relacionadas con el monitoreo de temperatura en suelo, flujos de CO_2 y de CH_4 , en la figura 34, figura 35, figura 36 y figura 37, se muestran los mapas con las variaciones espaciales de los datos de temperatura en suelo y flujo de gases obtenidos entre el 13 y 28 de mayo de 2023 y, en la sección de anexos se muestran los datos correspondientes.

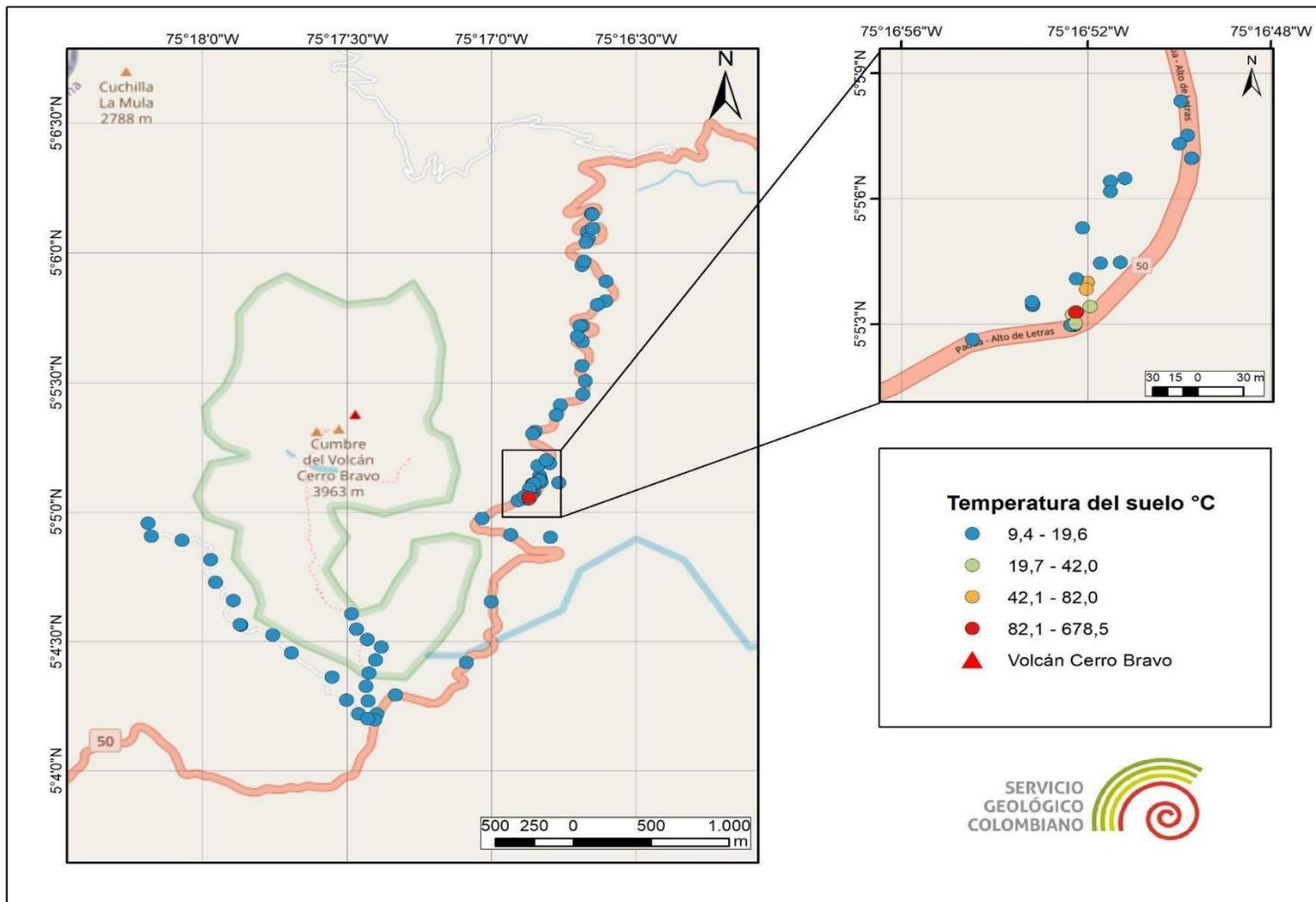


Figura 34. Mapa de temperatura del suelo (°C). El recuadro negro indica la zona de anomalía

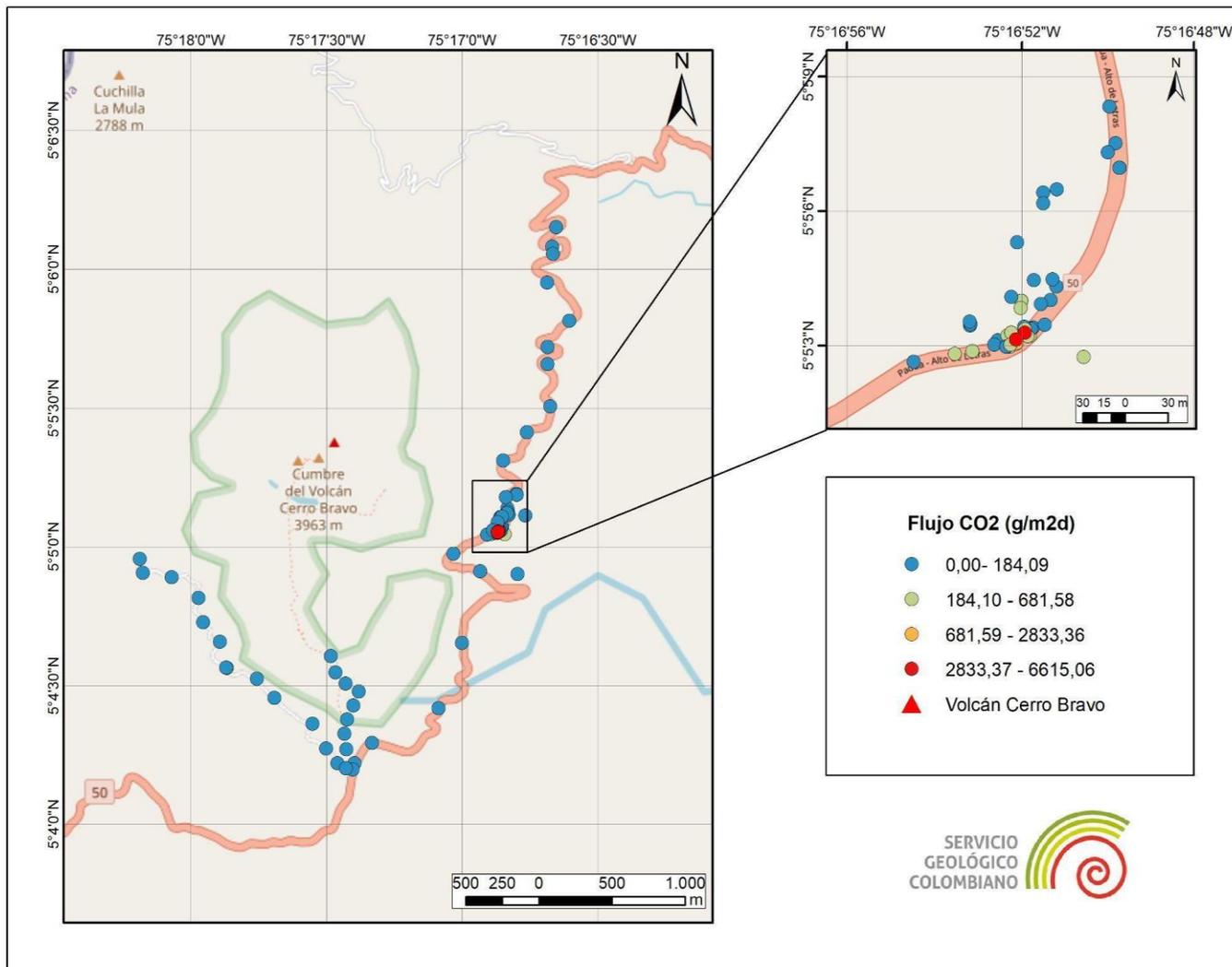


Figura 35. Mapa de flujo de dióxido de carbono (CO₂) del suelo. El recuadro negro indica la zona de anomalía

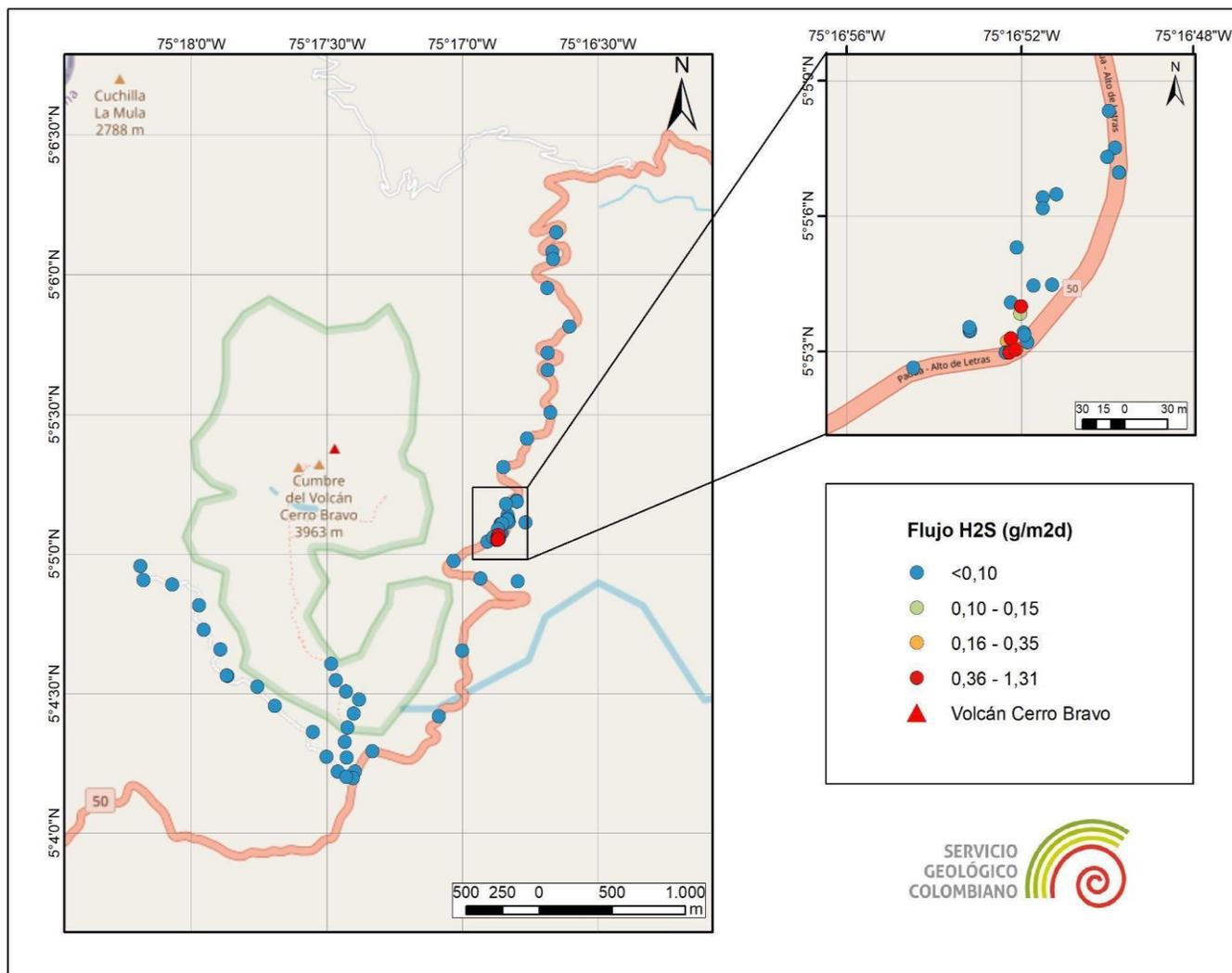


Figura 36. Mapa de flujo de sulfuro de hidrógeno (H₂S) del suelo. El recuadro negro indica la zona de anomalía

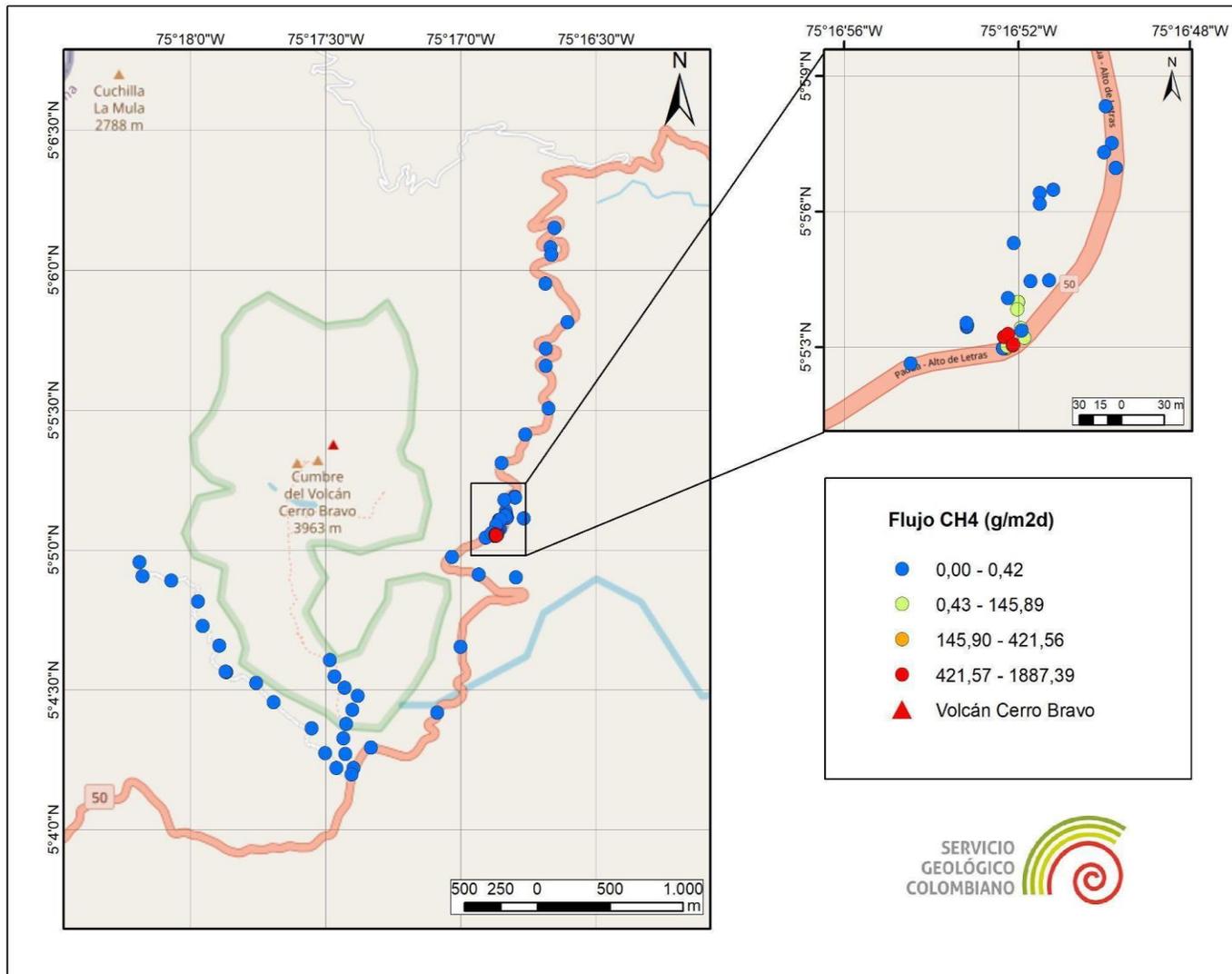


Figura 37. Mapa de flujo de metano (CH₄) del suelo. El recuadro negro indica la zona de anomalía

Con respecto a las medidas de flujo de SO_2 , como también se mencionó en la parte inicial de este informe (sección 4.3, figura 21) no se detectó su presencia, en la figura 38 se muestran las rutas que se realizaron y los espectros obtenidos. Todas las medidas registraron valores cero o negativos para detección de SO_2 .

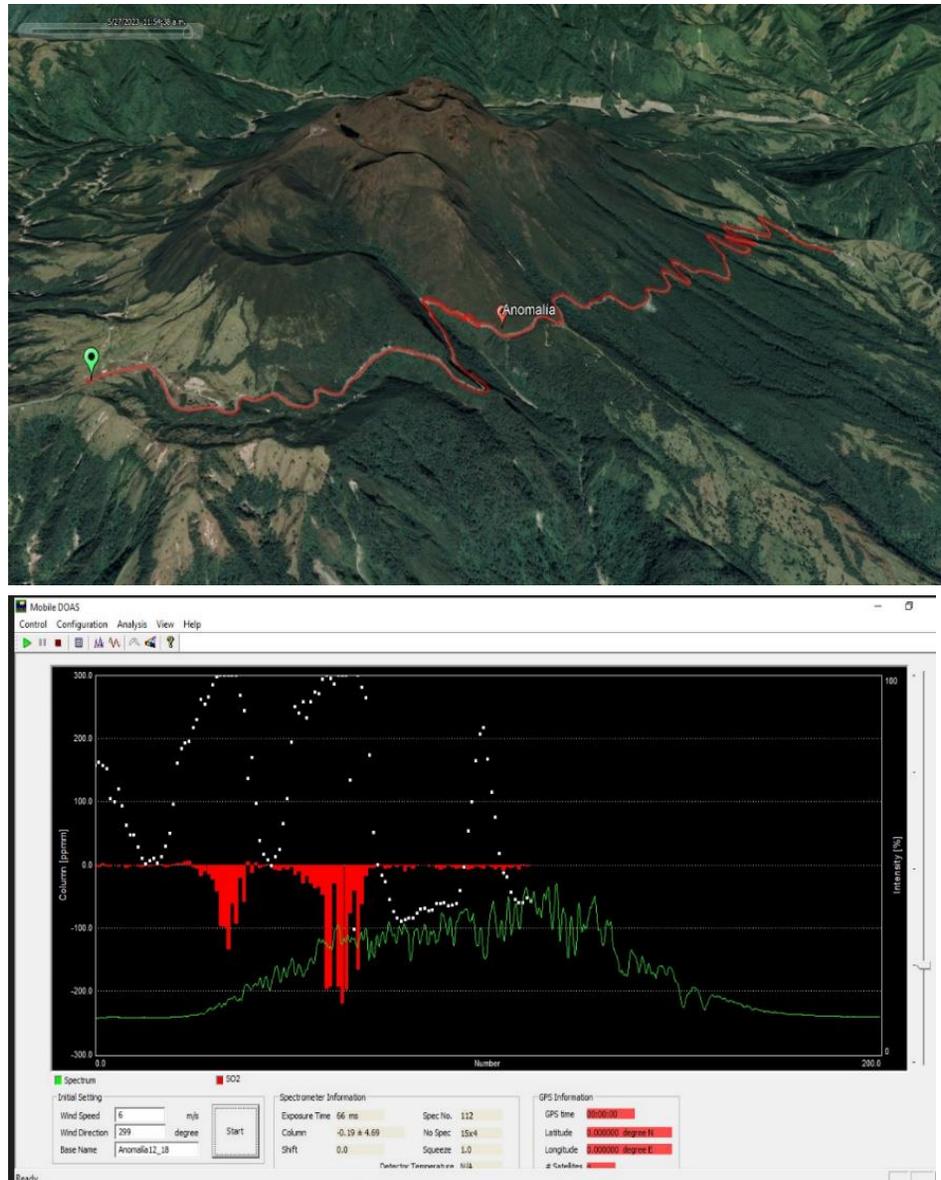


Figura 38. Travesías realizadas para detección de flujos de SO_2 en VCB. Nótese los valores sobre la línea de cero (0) o negativos

Las últimas mediciones de temperatura realizadas por personal del SGC en el sector de la anomalía fueron realizadas los días 5 y 8 de junio, los registros muestran que ésta ha descendido considerablemente, los valores medidos se encuentran entre 24 y 35 °C (figura 39, figura 40 y figura 41). No obstante, en la zona aledaña a la roca expuesta (punto principal de anomalía) se sigue apreciando la salida de gases. También se pudo verificar que continúan la presencia de metano y etano en altas concentraciones.

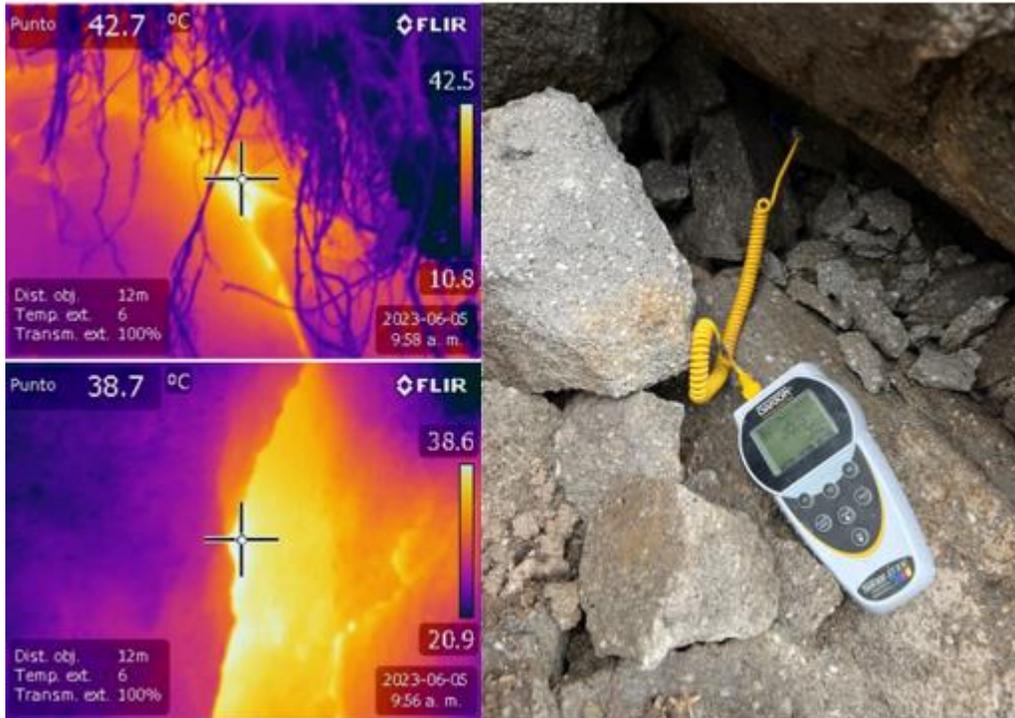


Figura 39. Seguimiento de la temperatura en el sector de la anomalía, junio 5 y 8, donde se aprecia la disminución considerable de este parámetro



Figura 40. Medición de temperatura en el punto ubicado al costado (círculo rojo) del punto principal de anomalía (flecha amarilla), se aprecian valores máximos entre 31 y 35 °C



Figura 41. Medición de temperatura en el punto principal de anomalía, se aprecian valores máximos 30 °C

5. Discusión

A partir de las mediciones de gases dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), sulfuro de hidrógeno (H_2S) y dióxido de azufre (SO_2) realizadas en el CVCB entre mayo y junio de 2023, se pudo determinar que, en el área volcánica, por fuera de la zona de anomalía (salida de gases y de temperatura), hay ausencia de flujos de CH_4 , H_2S y SO_2 y promedios de CO_2 de ≈ 800 ppm en los sectores visitados.

Es, por tanto, evidente que únicamente en la zona de anomalía, se presentan valores de concentraciones y flujos de estos gases atípicos a los observados en ambientes volcánicos, concentraciones de CH_4 entre 200 y 35000 ppm y flujos entre 140 y 1900 $\text{g}/\text{m}^2\text{d}$, teniendo en cuenta que la emisión de CH_4 en sistemas volcánicos e hidrotermales es muy baja, con valores de concentraciones que no superan 4 ppm (tabla 5, *The Encyclopedia of Volcanoes*, 2015).

De igual manera, la concentración y flujo de CO_2 en suelo en la zona de la anomalía son muy superiores a los que se tienen registrados en el CVCB, concentraciones entre 480 y 20000 ppm y flujos entre 180 y 6600 $\text{g}/\text{m}^2\text{d}$, mientras en el área volcánica (por fuera de la anomalía), los datos varían entre 400 y 1600 ppm y los flujos no superan 180 $\text{g}/\text{m}^2\text{d}$. De acuerdo con estas mediciones, las altas concentraciones y flujos de este gas están restringidas al punto de la anomalía y, los valores medidos por fuera de esta, se encuentran dentro del rango de la línea base de mediciones de este gas realizadas en el CVCB en campañas del 2012 y 2015.

Por otra parte, los valores de temperatura en suelo mayores a 25°C únicamente fueron registradas en la zona de anomalía y, en el seguimiento continuo, desde las plataformas de monitoreo satelital, no se corroboró ningún cambio asociado en el tiempo respecto a este parámetro. Adicionalmente, es notable que las temperaturas mayores se dieron en la superficie de los fragmentos de roca en la zona de anomalía y desde el interior de esta.

Además de lo expuesto anteriormente, los datos del monitoreo volcánico (geofísicos, geoquímicos, geodésicos y sensores remotos) no muestran cambios importantes y las variaciones que pueden observarse en algunos parámetros, son pequeñas y características de un volcán en reposo o en nivel de actividad Verde.

Todo ello, conlleva a determinar que el fenómeno anómalo en el sector conocido como “La Virgen” (vía Manizales - Bogotá) es muy localizado, superficial y sin indicios de que cubra un área mayor. Conforme a los datos analizados y mediciones obtenidas, la anomalía en estudio definitivamente no es de naturaleza volcánica y por ende no está relacionada con la reactivación del CVCB. Gases característicos volcánicos como SO₂ y H₂S están ausentes y las concentraciones de CO₂ permanecen estables, reflejando conjuntamente con los demás parámetros de monitoreo que el estado o comportamiento del volcán está muy lejos de ser inestable y de que este fenómeno sea una manifestación de su posible reactivación.

Tabla 5. Ejemplos de % (mol) Gases en sistemas magmáticos. Tomado de *The Encyclopedia of Volcanoes* 2015

| Hydrothermal Gases | | | | | | | | |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|---------|--------------|------------|----------------|------------|
| Volcano | Guagua | | | Volcano | White Island | Papandayan | Kilauea S-Bank | El Chichón |
| | Aogashima | Pichincha | Pacaya | | | | | |
| Location | Japan | Ecuador | Guatemala | Italy | New Zealand | Indonesia | Hawaii, USA | Mexico |
| Temperature | 99 | 86 | 92.1 | 97 | 112 | 100 | 97 | 97 |
| H ₂ O | 99.2 | 95.9 | 92.1 | 90.2 | 98.8 | 96.2 | 96.5 | 97.2 |
| CO ₂ | 0.772 | 3.805 | 7.853 | 9.437 | 0.950 | 2.978 | 3.323 | 2.753 |
| S _{total} | 0.0050 | 0.2015 | 0.0049 | 0.2665 | 0.2196 | 0.6956 | 0.1201 | 0.0833 |
| SO ₂ | n.r. | 0.104 | n.r. | n.r. | 0.007 | 0.1387 | 0.1065 | 0.0009 |
| H ₂ S | 0.0050 | 0.0975 | 0.0049 | 0.2666 | 0.212 | 0.5570 | 0.0136 | 0.0825 |
| HCl | 0.0007 | 0.0045 | n.r. | 0.0019 | 0.0042 | 0.0283 | 0.0023 | n.r. |
| HF | 0.0002 | 0.0001 | n.r. | 0.0003 | 0.0009 | <0.0003 | <0.00003 | n.r. |
| H ₂ | 0.0027 | 0.0015 | 0.001778 | 0.07017 | 0.00024 | 0.0017 | 0.0001 | 0.0016 |
| CH ₄ | 0.0006 | 0.00005 | 0.001359 | 0.01078 | 0.01332 | 0.000040 | <0.00002 | 0.000022 |
| CO | <0.000001 | 0.000001 | n.r. | n.r. | 0.000001 | <0.0000001 | <0.00002 | <0.000006 |

| Magmatic Gases | | | | | | | | |
|----------------------|-----------|---------|-----------|-----------|--------------|---------|-------------|----------------|
| Volcano | Satsuma | | | Merapi | White Island | Volcano | Halemaumau | Erta Ale |
| | Momotombo | Iwojima | Kudryavy | | | | | |
| Location | Nicaragua | Japan | Russia | Indonesia | New Zealand | Italy | Hawaii, USA | Afar, Ethiopia |
| Temperature (°C) | 747 | 880 | 920 | 803 | 495 | 620 | 307 | 1130 |
| H ₂ O (%) | 96.25 | 97.3 | 95.3 | 88.7 | 92.0 | 86.1 | 92.1 | 79.4 |
| CO ₂ | 2.5323 | 0.51 | 1.15 | 5.56 | 6.0100 | 11.9000 | 6.25 | 10.4 |
| S _{total} | 0.2335 | 0.9820 | 2.4400 | 1.1140 | 1.6000 | 1.1600 | 1.5700 | 6.5000 |
| SO ₂ | 0.2335 | 0.818 | 2.05 | 0.98 | 1.0000 | 0.6800 | 1.57 | 6.5 |
| H ₂ S | | 0.164 | 0.39 | 0.134 | 0.6000 | 0.4800 | n.r. | n.r. |
| HCl | 0.5276 | 0.5306 | 0.74 | 0.608 | 0.2400 | 0.4530 | 0.8 | 0.42 |
| HF | 0.0384 | 0.0277 | 0.096 | n.r. | 0.0028 | 0.1010 | 0.00269 | n.r. |
| H ₂ | 0.3517 | 0.6070 | 0.775 | 0.501 | 0.0400 | 0.1510 | 0.00439 | 1.49 |
| CH ₄ | <0.00002 | 0.0004 | <0.000005 | n.r. | 0.0014 | 0.00001 | <0.00003 | n.r. |
| CO | 0.01122 | 0.00172 | 0.00084 | 0.02350 | n.r. | 0.0110 | <0.00004 | 0.46 |

Los resultados obtenidos de las mediciones de temperatura y gases en el sitio de anomalía y las observaciones geológicas en el área indican que el fenómeno no se presenta directamente al interior del remanente del domo volcánico del CVCB. Este se presenta en un depósito de deslizamiento de rocas y es a través de los espacios entre los fragmentos donde ocurre la emisión de los gases y, la incandescencia observada en uno de los puntos, es debida al calentamiento de fragmentos de roca, tal como se esquematiza en el perfil de la figura 42. Sin embargo, se desconoce si el material que dio lugar a la combustión y liberación de gases, como el CH₄, tiene un origen biogénico o termogénico, el cual podría alojarse debajo del depósito del deslizamiento junto con el material o relleno propio de la vía, lo que también explicaría el carácter puntual de la anomalía.

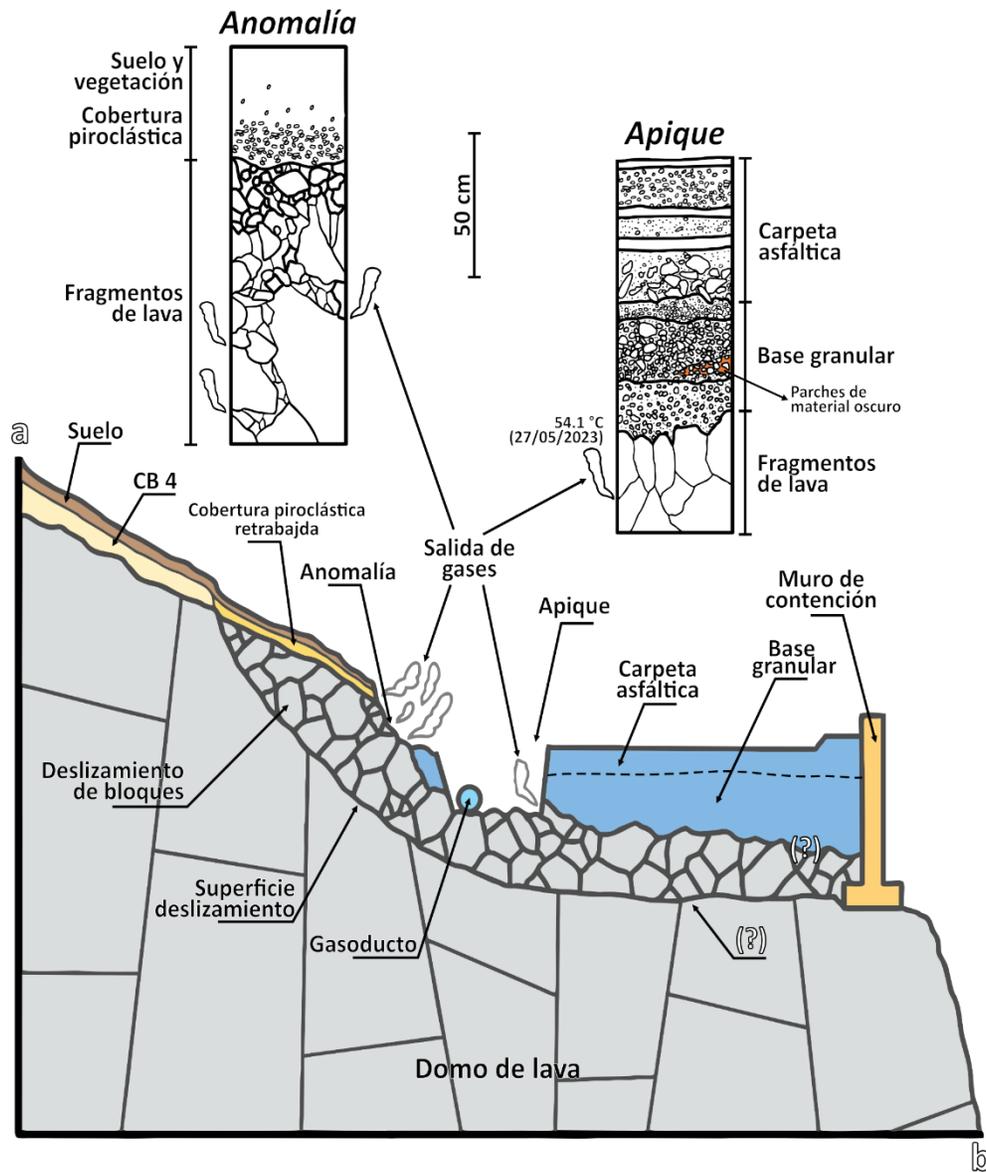


Figura 42. Perfil esquemático norte – sur (sin escala) del sitio donde se presentó la emisión de gases y la anomalía térmica

La empresa TGI desde el inicio descartó que el fenómeno estuviera relacionado con una fuga de la tubería que transporta gas natural. El SGC luego de analizar toda la información recopilada durante el seguimiento del fenómeno también descartó que la anomalía de salida de gases y temperatura estuviera asociada a la reactivación del volcán Cerro Bravo y, teniendo en cuenta la composición de los gases en el lugar, el grupo de geoquímica del OVSM del SGC planteó inicialmente la hipótesis de que se podía tratar de un incendio subterráneo debido a la combustión de materia orgánica. Dado que, el sitio donde se encuentra la anomalía corresponde a un deslizamiento de rocas generado en un domo, se descartó la posibilidad que estuviera relacionado a procesos de combustión de turberas en profundidad, las cuales podrían desarrollarse en las intercalaciones de los suelos del material piroclástico asociado a la actividad eruptiva del volcán tal como se ha identificado en otros sectores del CVCB (tabla 6 y figura 43), donde, las condiciones topográficas son adecuadas para su formación. Cabe anotar que, en el área cercana a la

anomalía, sólo se observó en un sitio un contacto erosivo entre el domo y el depósito de caída piroclástica, CB4, identificada.

Tabla 6. Sitios donde se relacionan algunos lugares con características de turberas en el sector de Cerro Bravo. Estas se encuentran hacia el sector sur occidental del complejo, por lo general en donde la topografía es más plana

| UNIDAD | LOCALIZACIÓN | TIPO DE DEPÓSITO | EDAD B.P. | Observaciones |
|----------------|---|--------------------|-----------|---|
| LMCBA-036-A-3 | Cantera El Doce | Caída piroclástica | 323±23 | Contiene fragmentos de madera |
| LMCBA-081-EF-3 | Cauce de afluente quebrada San fernando, cerca de la vía El Doce - La Pradera | Lahar? | 1608±24 | Fragmentos de madera en paleosuelo |
| LMCBA-088-I-3 | Cauce de afluente quebrada San fernando, cerca de la vía El Doce - La Pradera | Flujo piroclástico | | Fragmento incorporado de madera edafizada |
| MLCBA-062-3b | Carretera a La Pradera | Caída piroclástica | 900 -917 | Fragmentos de madera |
| MLCBA-090-4 | Cantera baja del Doce | Caída piroclástica | 323±23 | Fragmentos de madera |
| MLCBA-091-Ba-3 | Camino del Once a Hacienda Portugal | Caída piroclástica | | Madera en paleosuelo removido |
| GVNR | Cuenca de la quebrada San Luis, a 5 km al norte de la vereda Rincón Santo y a 6 km al sureste de Letras | Caída piroclástica | | Posibles turberas y fragmentos de carbón |



Figura 43. Localización de sitios donde se han identificado algunos lugares con características de turberas en el sector de Cerro Bravo

Otros sitios con presencia de turberas han sido reportados por personal del OVSMA, estos fueron encontrados en 2012 en la cuenca de la quebrada San Luis, a 5 km al norte de la vereda Rincón Santo y a 6 km al suroriente de Letras (figura 44).

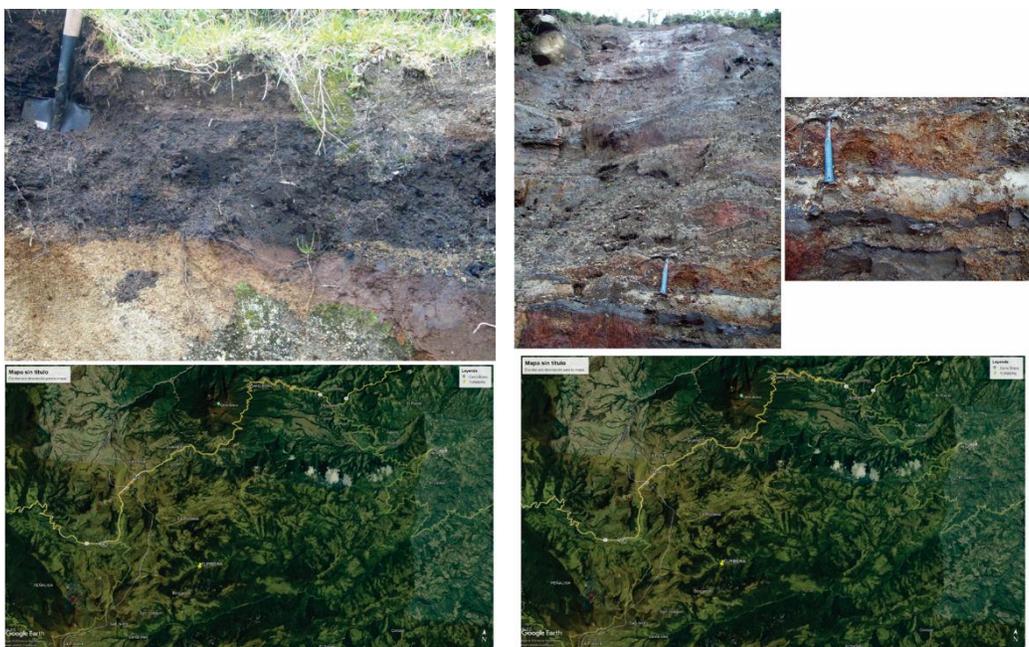


Figura 44. Posibles turberas y material rico en fragmentos de carbón, intercalado con depósitos de caídas piroclásticas asociadas con la actividad del CVCB

Teniendo en cuenta de que el estudio de este tipo de fenómeno (turberas) no se encuentra dentro de las competencias del SGC, se solicitó la intervención de otras entidades para realizar estudios que confirmen o descarten esta hipótesis de un incendio subterráneo y a la vez realizar el seguimiento del mismo. Sin embargo, el SGC, mediante los trabajos de campo y lo encontrado tanto en el talud de donde se encuentra la anomalía como en el relleno de la misma y en entrevistas con funcionario de INVIAS y habitantes de la región, planteó otras posibilidades de presencia de materia orgánica que se encuentran en evaluación por otras entidades.

Las posibilidades contempladas por parte del SGC incluyen restos de vegetación y suelo removido por el deslizamiento, así como material asfáltico y orgánico dejado en las actividades de construcción y pavimentación de la vía hace aproximadamente 30 años y residuos dejados en la construcción del gasoducto.

Igualmente, la señora Nelly Tama, habitante de la región desde hace más de 30 años, sostuvo una entrevista con personal del SGC e ICP-Ecopetrol (figura 45), ella reportó una importante actividad de quema de madera, en el área donde se encuentra la anomalía térmica, para obtención y comercialización de carbón vegetal, principalmente obtenida de árboles denominados “siete cueros” actividades que fueron desarrolladas alrededor de los años 90, para abastecimiento de este insumo tanto en el departamento del Tolima como para los departamentos del eje cafetero, de cuya actividad podrían haber quedado residuos de pilas de madera carbonizada en el sector. El ICP - Ecopetrol hace seguimiento a esta información, confirmando la versión inicial dada por la señora Nelly: “Se evidenciaron fragmentos de poblaciones dominantes de la especie *Andesanthus lepidotus* (siete cueros) la cual fue utilizada históricamente en el territorio para la comercialización de carbón”, de acuerdo a lo reportado por funcionarios del ICP.



Figura 45. Entrevista de personal de SGC e ICP-Ecopetrol con la señora Nelly Tama (restaurante Tierra Alta en El Ocho)

Finalizando la elaboración de este documento, el SGC conoció el informe de análisis de gases por cromatografía gaseosa de muestras tomadas, el 27 de mayo, por el Centro de Innovación y tecnología - ICP-Ecopetrol S.A. en el sitio de la anomalía. En este informe se encuentran las siguientes conclusiones y recomendaciones:

“-Los resultados obtenidos nos permiten evidenciar la presencia de hidrocarburos característicos de un gas natural en las muestras de gas tomadas en la zona de emanación de vapores en Cerro Bravo.

- Al realizar correlaciones con diferentes tipos de gases naturales conocidos, se encuentra que correlaciona mejor con los gases naturales de Cusiana y Cupiagua.

- En los suelos no se encontraron hidrocarburos como Metano, Etano y Propano, pero si se aprecia condensación de ciertos compuestos pesados como butanos, pentanos y hexanos en cantidades muy pequeñas.

- Se recomienda realizar seguimiento a la presencia de hidrocarburos en la zona, para definir si la emanación se presentó como un evento puntual y si ya se disiparon los gases que se encontraban presentes el día del muestreo, o si por el contrario aún persiste la emanación y deba continuarse buscando por si existe una posible fuga.”

Finalmente, dado que en un principio TGI descartó una posible fuga de gas natural y teniendo en cuenta los resultados presentando por ICP-Ecopetrol S.A., es importante continuar realizando estudios encaminados a conocer la naturaleza de los gases mediante análisis cromatográficos, recomendados en

las primeras mesas de trabajo por parte del SGC, para caracterizar los gases en la anomalía y del gas natural que viaja por la tubería y, de esta manera evaluar el origen del fenómeno.

Conclusiones y recomendaciones

Con base en el análisis y evaluación integral de los parámetros monitoreados en el CVCB, se determina que el comportamiento del volcán es estable y permanece en nivel de actividad Verde. Adicionalmente, luego del análisis espacial y temporal de los datos obtenidos durante las visitas al área volcánica, considerando que sólo en la zona de anomalía se encontraron altas temperaturas y presencia de altas concentraciones de gases como CH₄ y CO₂, se determina que la salida de gases y la anomalía de temperatura observada en el flanco suroriental del CVCB no obedecen a actividad del volcán, por lo tanto, se descarta que el fenómeno esté asociado a la reactivación del sistema volcánico.

La anomalía de salida de gases y temperatura no se encuentra dentro del domo volcánico, se encuentra hacia la parte externa del mismo, y la salida de gases se produce entre los espacios de fragmentos de un depósito de deslizamiento de rocas.

El fenómeno existente en la ladera del CVCB es de carácter puntual, según las observaciones, seguimiento y resultados obtenidos, se recomienda: Continuar los trabajos relacionados con la caracterización y monitoreo de los gases que siguen emanando a través del suelo y los fragmentos de roca, así como del relleno de la carretera, materia orgánica u otras fuentes antrópicas. Igualmente continuar con el monitoreo de la temperatura de manera directa e indirecta (p.e. sobrevuelo con dron).

Bibliografía

Alfaro *et al.* (2008). Geoquímica de gases del Sistema Geotérmico del Volcán Azufral. *Geología Colombiana* No. 33, Diciembre 2008.

Chiodini, G., Marini, L. (1998). Hydrothermal gas equilibria: the H₂O-H₂-CO₂-CO-CH₄ system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol 62, 2673-2687.

Ellis, A. J. and W. A. J. Mahon (1979). "Natural hydrothermal systems and experimental hot-water/rock interactions." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 28(8): 1323-1357

Etiopio, G., Fridriksson, T., Italiano, F., Winiwarter, W., & Theloke, J. (2007). Natural emissions of methane from geothermal and volcanic sources in Europe. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 165(1-2), 76–86. doi:10.1016/j.jvolgeores.2007.04.014

Fischer, T., Sturchio, N., Stix, John., Williams, S., et al. (1997) The chemical and isotopic composition of fumarolic gases and spring discharges from Galeras Volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 77, Issues 1–4, 229-253.

Giggenbach, W., Goguel, R. (1989). Collection and analysis of geothermal and volcanic water and gas discharges, *Chemistry Division, Department of Scientific and Industrial Research, New Zealand*.

Giggenbach, W. (1991). Chemical Techniques in Geothermal exploration. *Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development*, UNITAR, New York.

Giggenbach, W. (1993). Redox control of gas compositions in Philippine volcanic-hydrothermal system. *Geothermics*, Vol 22, 575-587.

Giggenbach, W. (1996). Chemical composition of volcanic gases. *Monitoring and mitigation of Volcano Hazards*, Springer- Verlag, 222-256.

Hall, M.L. & Wood, C.A. (1985). Volcano–tectonic segmentation of the northern Andes. *Geology*, 13(3): 203–207. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1985\)13<203:VSOTNA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1985)13<203:VSOTNA>2.0.CO;2)

Herd, D.G. (1974). En: Glacial and volcanic geology of the Ruiz – Tolima volcanic complex, Cordillera Central, Colombia. INGEOMINAS Bogotá. *Publicación Geológica Especial*. 8. INGEOMINAS 1982.

Hooker, P., Bertrami, R., Lombardi, S., O’Nions, R., Oxburgh, E. (1985). Helium-3 anomalies and crust-mantle interaction in Italy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol 49, 2505-2513.

Kuzyakov (2006). Sources of CO₂ Efflux from Soil and Review of Partitioning Methods *Soil Biology and Biochemistry* 38(3):425-448

Lescinsky, D. (1990). Geology, volcanology and petrology of Cerro Bravo, a Young dacitic stratovolcano in west- Central Colombia. Thesis of Master of Science. Louisiana State University. 242 p.

Martínez, L. M., Valencia, G., Monsalve, M. L., Galarza, J.J., en preparación. Geología del Complejo volcánico Cerro Bravo (Colombia). Servicio Geológico Colombiano – Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales.

Mazor, E (1977). Geothermal tracing with atmospheric and radiogenic noble gases. *Geothermics*, Vol 5, 21-36.

Monsalve, M.L. (1991). Mapa preliminar de amenaza volcánica del volcán Cerro Bravo. INGEOMINAS regional Alto Magdalena. Ibagué. 142 p.

Monsalve–Bustamante, M.L. 2020. The volcanic front in Colombia: Segmentation and recent and historical activity. In: Gómez, J. & Pinilla–Pachon, A.O. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 4 Quaternary*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 38, p. 97–159. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.03>

Pyle, D (1993). Graphical análisis of rare gas mixing systematics in geothermal systems. *Geochemical Journal*, Vol. 27, 125-129.

Symonds, R. B., W. I. Rose, G. J. S. Bluth, and T. M. Gerlach (1994). Volcanic-gas studies: Methods, results, and applications, in *Volatiles in Magmas*, Rev. Mineral., vol. 30, edited by M. R. Carroll and J. R. Holloway, pp. 1–66, Mineral. Soc. of Am., Washington, D. C.

Tedesco, D., Miele, G., Sano, Y., Toutain, J. (1995). Helium isotopic ratio in Vulcano Island fumaroles: Temporal variations in shallow level mixing and Deep magmatic supply. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol 64, 117-128.

Thouret, J.C., Murcia, A., Salinas, R., & Vatin-Perignon, N., 1985. Aspectos estructurales y dinamismo eruptivo de los volcanes Cerro Bravo y Nevado del Tolima, cordillera Central de Colombia. INGEOMINAS, Medellín. 20 p.

Thouret (1988). *La Cordillere Central des Andes de Colombie et ses bordures: morphogenese plio- quaternaire et dynamique actuelle et recente une cordillere volcanique englacée*. Ph.D. dissertation, Univ. Grenoble. Grenoble, France.

Valencia G., Martínez L. M., Monsalve M. L., Galarza J. J. (2022). Mapa de amenaza volcánica del complejo volcánico Cerro Bravo segunda versión. memoria. Manizales. 40 p.

www.dane.gov.co

The Encyclopedia of Volcanoes (2015). Edition: 2nd Chapter: Chapter 45. Volcanic, Magmatic and Hydrothermal Gases- Publisher: Elsevier. Editors: Sigurdsson & Houghton & McNutt & Rymer & Stix (pp.779-797)

Wogan, N., Krissansen-Totton, T. and Catling, D.C. (2020). Abundant Atmospheric Methane from Volcanism on Terrestrial Planets Is Unlikely and Strengthens the Case for Methane as a biosignature. *Planet. Sci. J.* 1 58

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Localización del Complejo volcánico Cerro Bravo. Mapa de sombras y base cartográfica tomada de Esri. El punto rojo señala el sitio donde se encuentra la anomalía de salida de gases y de temperatura | 6 |
| Figura 2. Geomorfología del volcán Cerro Bravo, donde se observan las características descritas por Thouret (1985) y Lescinsky (1990). Imagen en perspectiva tomada de Google Earth | 9 |
| Figura 3. Red de vigilancia del Complejo Volcánico Cerro Bravo. Mapa de sombras a partir de imagen AlosPalsar (12m) | 12 |
| Figura 4. Tasas diarias de sismicidad registradas en el CVCB desde 2010. a) Número diario de sismos asociados al movimiento de fluidos al interior de los conductos volcánicos. b y c) Número y energía sísmica diarios de los sismos asociados a fracturamiento de roca y d) Sismos relacionados a procesos en la superficie del volcán (p.e. movimientos en masa, avalanchas -flujos de lodo o avenidas torrenciales-, entre otros) | 13 |
| Figura 5. Mapa de localización de los sismos asociados a fracturamiento de roca (círculos de colores) registrados en el CVCB desde 2010. Los cuadros de color negro representan las estaciones sismológicas. La escala de colores de los círculos representa la profundidad de los sismos y el tamaño de los círculos, la magnitud de los sismos | 14 |
| Figura 6. Serie temporal de la componente vertical de las estaciones GNSS permanentes CBRA y PLTR entre 2016 y 2022 (a) y resultado de la línea base entre ambas estaciones en mayo 2023 (b) | 15 |
| Figura 7. Serie temporal de datos de temperatura de brillo °K a partir de la plataforma de monitoreo satelital REALVOLC. Línea de colores representan las variaciones normales de temperatura en el área volcánica, negro: Línea base, amarillo: línea mínima y verde: línea máxima de variación normal, cualquier punto por encima de esta línea (verde) representa una anomalía térmica | 16 |
| Figura 8. Imagen de satélite Sentinel-2 del 18 de mayo de 2023. Espectro visible (RGB, izquierda) y equivalente térmico (SWIR 12-11-8A, derecha). Note en la zona de la anomalía (círculo amarillo) no se aprecia ningún cambio térmico | 16 |
| Figura 9. Zona del fenómeno de emisión de gases y anomalía de temperatura identificado en el punto conocido como “La Virgen” en la vía Manizales – Bogotá, ladera suroriental del CVCB | 17 |
| Figura 10. Zona anomalía de emisión de gases y de temperatura. Fotografías de los diferentes puntos de salida de gases identificados (superior). Corte esquemático occidente a oriente de la ubicación de los 5 puntos de salida de gases y distancia entre ellos (inferior)). Los puntos de emisión P2 y P3 muestran una zona de afectación mayor que los demás puntos (1,0 y 1,1 m de ancho respectivamente) | 19 |
| Figura 11. Máxima temperatura registrada en la zona de la anomalía (66 °C) correspondiente al punto P1 | 20 |
| Figura 12. a) Flanco sur del remanente del domo del CVCB, donde se presenta la anomalía térmica asociada a salida de gases enmarcada por el círculo rojo. Nótese el remanente del domo y las paredes subverticales del mismo en el sector de la carretera. b) Falsilla de Schmidt con los planos de fractura medidos en campo (izquierda) y contornos de densidad de polos (derecha) | 21 |
| Figura 13. Aspecto de parte de la zona de la salida de gases, correspondiente a un deslizamiento de rocas. Nótese el aspecto “calcinado” de los bloques en el sitio donde se registraron las mayores temperaturas | 22 |
| Figura 14. Vista general de la zona, donde se observa una antigua cicatriz de deslizamiento | 23 |
| Figura 15. Copia de la fotografía aérea del IGAC, 1959, mostrando el aspecto de la vía a la fecha en el sector donde se presenta actualmente la salida de gases y anomalía térmica. El círculo rojo enmarca el sitio de la anomalía | 24 |
| Figura 16. Aspecto del depósito de caída piroclástica (CB4) que suprayace el remanente del domo en el sector | 25 |
| Figura 17. a) Isopacas del depósito de caída piroclástica pumítica, correspondiente a la unidad eruptiva CB4 (Tomado de Martínez <i>et al.</i> , en preparación). b) Depósitos de corrientes de densidad piroclástica y caída piroclástica localizados en la vía a La Palmera, estos depósitos suprayacen la unidad eruptiva CB4, identificada en las inmediaciones del sitio de la salida de gases y anomalía térmica | 26 |
| Figura 18. Excavación realizada en el sitio de la anomalía. Nótese las rocas sueltas en el fondo del apique. La flecha roja indica un punto donde se observó salida de gases, con una temperatura de 54.1 °C medida el 27 de mayo | 27 |
| Figura 19. a) Afloramiento del deslizamiento en el sitio de la anomalía principal. b) Aspecto del relleno de la | |

| | |
|--|----|
| carretera en el apique ubicado en la zona de la anomalía | 28 |
| Figura 20. Mediciones de temperatura en suelo en algunos de los puntos de salida de gases de la anomalía y evidencia de vegetación seca en los puntos y alrededores próximos | 28 |
| Figura 21. Personal del Servicio Geológico Colombiano realizando inspección en la zona de la anomalía y mediciones de flujo de CO ₂ y de SO ₂ en suelo. Gráfica inferior muestra la “curva” de mediciones de SO ₂ obtenida con el equipo MobileDOAS | 29 |
| Figura 22. Mediciones de CO ₂ en la zona de anomalía (mayo 15 y 18 de 2023) y en otros sectores del volcán realizadas en el 2012 y 2015 | 30 |
| Figura 23. Incremento de temperatura en la zona de anomalía registrado el 17 de mayo y cambios registrados en los puntos de emisión que reflejan procesos de combustión | 31 |
| Figura 24. Mediciones de temperatura y pH en la fuente termal el Jordán (arriba) y en la quebrada Aguacatal adyacente a la fuente realizadas por personal del SGC en mayo 18 de 2023 | 33 |
| Figura 25. Punto incandescente de alta temperatura observado a través de las fracturas en la roca y presencia de focos pequeños de combustión contiguos a éste (círculo rojo). Fotografías tomadas por personal del SGC, mayo 20 de 2023, 01:45 p.m. | 34 |
| Figura 26. Medidas de temperatura en la zona de anomalía, usando cámara termográfica FLIR y Termocupla Tipo K (mayo 21 de 2023) | 35 |
| Figura 27. Medidas de temperatura en la zona de anomalía, usando cámara termográfica FLIR y Termocupla Tipo K (mayo 23 de 2023) | 36 |
| Figura 28. Trabajos de excavación por parte de la empresa TGI. Se aprecia la persistencia de salida de gases | 37 |
| Figura 29. Monitoreo de temperatura en el depósito del deslizamiento expuesto luego de la excavación realizada por la empresa TGI. Nótese la persistencia de altas temperaturas | 38 |
| Figura 30. Seguimiento de la temperatura en el sector de la anomalía, 27 y 28 de mayo, donde se aprecia la disminución en este parámetro después del uso de agua por parte de la unidad de Bomberos | 39 |
| Figura 31. Personal del SGC realizando mediciones con equipo flujómetro para determinar presencia de CO ₂ , CH ₄ y H ₂ S en suelo en diferentes flancos del CVCB | 40 |
| Figura 32. Personal del SGC realizando mediciones en zona de anomalía con equipo flujómetro para estimar los flujos de CO ₂ , CH ₄ y H ₂ S | 41 |
| Figura 33. Detección de altas concentraciones y flujos de gas metano en zona de anomalía, CVCB. Datos tomados por personal del SGC durante el seguimiento y monitoreo de gases en el sitio | 42 |
| Figura 34. Mapa de temperatura del suelo (°C). El recuadro negro indica la zona de anomalía | 43 |
| Figura 35. Mapa de flujo de dióxido de carbono (CO ₂) del suelo. El recuadro negro indica la zona de anomalía | 44 |
| Figura 36. Mapa de flujo de sulfuro de hidrógeno (H ₂ S) del suelo. El recuadro negro indica la zona de anomalía | 45 |
| Figura 37. Mapa de flujo de metano (CH ₄) del suelo. El recuadro negro indica la zona de anomalía | 46 |
| Figura 38. Travesías realizadas para detección de flujos de SO ₂ en VCB. Nótese los valores sobre la línea de cero (0) o negativos | 47 |
| Figura 39. Seguimiento de la temperatura en el sector de la anomalía, junio 5 y 8, donde se aprecia la disminución considerable de este parámetro | 48 |
| Figura 40. Medición de temperatura en el punto ubicado al costado (círculo rojo) del punto principal de anomalía (flecha amarilla), se aprecian valores máximos entre 31 y 35 °C | 48 |
| Figura 41. Medición de temperatura en el punto principal de anomalía, se aprecian valores máximos 30 °C | 49 |
| Figura 42. Perfil esquemático norte – sur (sin escala) del sitio donde se presentó la emisión de gases y la anomalía térmica | 52 |
| Figura 43. Localización de sitios donde se han identificado algunos lugares con características de turberas en el sector de Cerro Bravo | 53 |
| Figura 44. Posibles turberas y material rico en fragmentos de carbón, intercalado con depósitos de caídas piroclásticas asociadas con la actividad del CVCB | 54 |
| Figura 45. Entrevista de personal de SGC e ICP-Ecopetrol con la señora Nelly Tama (restaurante Tierra Alta en El Ocho) | 55 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Visitas por el SGC a la zona de la anomalía y a otros sectores del volcán | 18 |
| Tabla 2. Valores de CO ₂ y SO ₂ en zona de anomalía y otros sectores del volcán Cerro Bravo | 29 |
| Tabla 3. Valores de las concentraciones de metano y monóxido de carbono en la zona de la anomalía y en volcanes activos de Colombia | 32 |
| Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos fuente termal (FT) el Jordán y quebrada adyacente | 33 |
| Tabla 5. Ejemplos de % (mol) Gases en sistemas magmáticos. Tomado de <i>The Encyclopedia of Volcanoes 2015</i> | 51 |
| Tabla 6. Sitios donde se relacionan algunos lugares con características de turberas en el sector de Cerro Bravo. Estas se encuentran hacia el sector sur occidental del complejo, por lo general en donde la topografía es más plana | 53 |

ANEXOS

A continuación, se anexan los datos de las mediciones de gases y de temperatura realizadas en el área volcánica y la zona de la anomalía entre el 13 y 28 de mayo.

| Información del punto | | | | | Condiciones atmosféricas | | | Temperatura del suelo (°C) | Resultados mediciones de flujo | | | | | | | | Observaciones | | | | |
|-----------------------|------------|--------------------|-------------------|----------------|----------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|---------------|----------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| ID | Fecha | Longitud (GG°MM'W) | Latitud (GG°MM'N) | Altura m.s.n.m | Presión barométrica (mBar) | Temperatura del aire (°C) | Humedad del aire (%HR) | | Dióxido de carbono (CO2) | | | | Sulfuro de hidrógeno (H2S) | | Metano (CH4) | | | | | | |
| | | | | | | | | | ppm/s | mol/m ³ /d | CO2 g/m ³ /d | ErrQ (r ²) | ppm/s | mol/m ³ /d | H2S g/m ³ /d | ErrQ (r ²) | | ppm/s | mol/m ³ /d | CH4 g/m ³ /d | ErrQ (r ²) |
| cb1 | 13/05/2023 | -75.281041 | 5.084278 | 3351.9 | 686.5 | 25.3 | | 4.677 | 2.182 | 96.02982 | 0.992 | | | | | | | | | Anomalia | |
| cb2 | 13/05/2023 | -75.281062 | 5.084226 | 3357.25 | 686.6 | 26.1 | | 18.691 | 8.696 | 382.71096 | 0.994 | | | | | | | | | Anomalia | |
| cb3 | 13/05/2023 | -75.280721 | 5.084036 | 3423.54 | 685.9 | 18.5 | | 15.032 | 7.169 | 315.50789 | 0.971 | | | | | | | | | Anomalia | |
| cb1 | 13/05/2023 | -75.280894 | 5.084532 | 3350.99 | 688.7 | 14 | | 0.915 | 0.445 | 19.58445 | 0.912 | | | | | | | | | Anomalia | |
| cb2 | 13/05/2023 | -75.280931 | 5.084447 | 3349.74 | 688.7 | 16 | | 1.153 | 0.557 | 24.51357 | 0.954 | | | | | | | | | Anomalia | |
| cb3 | 13/05/2023 | -75.280991 | 5.084424 | 3349.84 | 688.7 | 16 | | 2.061 | 0.996 | 43.83396 | 0.994 | | | | | | | | | Anomalia | |
| cb4 | 13/05/2023 | -75.280968 | 5.084295 | 3359.09 | 688.7 | 16 | | 5.545 | 2.678 | 117.85878 | 0.996 | | | | | | | | | Anomalia | |
| cb5 | 13/05/2023 | -75.281054 | 5.084217 | 3354.39 | 688.6 | 16 | | 2.529 | 1.221 | 53.73621 | 0.991 | | | | | | | | | Anomalia | |
| cb6 | 13/05/2023 | -75.281092 | 5.084245 | 3354.61 | 688.5 | 16 | | 311.295 | 150.308 | 6615.05508 | 0.983 | | | | | | | | | Saturación del detector | |
| cb7 | 13/05/2023 | -75.281101 | 5.084233 | 3355.1 | 688.5 | 20.9 | | 67.79 | 32.186 | 1416.50586 | 0.99 | | | | | | | | | Anomalia | |
| cb8 | 13/05/2023 | -75.28115 | 5.084204 | 3354.26 | 688.5 | 21 | | 135.64 | 64.38 | 2833.3638 | 0.963 | | | | | | | | | Anomalia | |
| cb9 | 13/05/2023 | -75.281168 | 5.084218 | 3356.36 | 688.4 | 20.7 | | 58.485 | 27.784 | 1222.77384 | 0.927 | | | | | | | | | Anomalia | |
| cb10 | 13/05/2023 | -75.281241 | 5.084194 | 3353.15 | 688.3 | 20.3 | | 5.498 | 2.615 | 115.08615 | 0.757 | | | | | | | | | Anomalia | |
| cb11 | 13/05/2023 | -75.281266 | 5.084199 | 3356.83 | 688.2 | 20 | | 3.628 | 1.727 | 76.00527 | 0.986 | | | | | | | | | Anomalia | |
| cb13 | 13/05/2023 | -75.281287 | 5.084171 | 3352.47 | 688.2 | 18.9 | | 1.351 | 0.646 | 28.43046 | 0.969 | | | | | | | | | Anomalia | |
| cb14 | 13/05/2023 | -75.281426 | 5.084133 | 3355.6 | 688 | 19 | | 15.609 | 7.454 | 328.05054 | 0.986 | | | | | | | | | Anomalia | |
| cb15 | 13/05/2023 | -75.281536 | 5.084116 | 3353.8 | 687.8 | 19.1 | | 23.867 | 11.39 | 501.2739 | 0.996 | | | | | | | | | Anomalia | |
| CB1 | 21/05/2023 | -75.280558 | 5.085646 | 3221.63599 | 688.4 | 14.9 | 81.8 | 12.2 | 0.511 | 0.255 | 11.22255 | 0.978 | 5.24E-03 | 1.62E-03 | 0.08922668 | 0.971 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0 | 0 | |
| CB2 | 21/05/2023 | -75.280531 | 5.085557 | 3221.23402 | 688 | 14.3 | 83.1 | 13.7 | 0.103 | 5.14E-02 | 2.2607937 | 0.255 | 7.13E-03 | 3.57E-03 | 0.12153641 | 0.963 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0 | 0 | No hubo flujo de CO2 |
| CB3 | 21/05/2023 | -75.280518 | 5.08542 | 3221.57056 | 687.8 | 14.3 | 85.2 | 14 | 0.206 | 0.103 | 4.53303 | 0.912 | 4.55E-03 | 2.28E-03 | 0.07757063 | 0.916 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0 | 0 | |
| CB4 | 21/05/2023 | -75.280493 | 5.085266 | 3356 | 687.7 | 14.2 | 85.2 | 14.3 | 0.442 | 0.221 | 9.72621 | 0.236 | 1.09E-02 | 5.46E-03 | 0.18601956 | 0.902 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0 | 0 | |
| CB5 | 21/05/2023 | -75.280493 | 5.085266 | 3358 | 687.9 | 14.9 | 88.9 | 14 | 0.851 | 0.425 | 18.70425 | 0.981 | 2.45E-03 | 1.22E-03 | 0.04171637 | 0.974 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0 | 0 | |
| CB6 | 21/05/2023 | -75.280493 | 5.085266 | 3356 | 687.8 | 15.1 | 89 | 14 | 0.239 | 0.12 | 5.2812 | 0.933 | 5.91E-03 | 1.96E-03 | 0.10071231 | 0.939 | 9.35E-04 | 4.68E-04 | 0.00750191 | 0.017 | |
| CB7 | 21/05/2023 | -75.280918 | 5.084577 | 3254.40967 | 687.9 | 15 | 89.3 | 13.1 | 1.213 | 0.607 | 26.71407 | 0.996 | 3.72E-03 | 1.86E-03 | 0.0634266 | 0.954 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0 | 0 | |
| CB8 | 21/05/2023 | -75.281035 | 5.084571 | 3358 | 687.9 | 15 | 89.3 | 12.9 | 3.496 | 1.748 | 76.92948 | 0.995 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0 | 0 | 0.00E+00 | 0 | 0 | 0 | No hubo flujo de H2S |
| CB9 | 21/05/2023 | -75.281115 | 5.084444 | 3357 | 687.9 | 15 | 89.3 | 15.6 | 4.548 | 2.274 | 100.07874 | 0.994 | 2.01E-03 | 1.01E-03 | 0.03432057 | 0.935 | 2.41E-02 | 1.20E-02 | 0.1931216 | 0.983 | Anomalia |
| CB10 | 21/05/2023 | -75.281115 | 5.084444 | 3366 | 687.9 | 15 | 89.3 | 59.8 | 23.181 | 11.59 | 510.0759 | 0.998 | 7.89E-03 | 3.95E-03 | 0.13448757 | 0.996 | 2.43E-01 | 0.122 | 1.95688 | 0.999 | Anomalia |
| CB11 | 21/05/2023 | -75.281115 | 5.084444 | 3370 | 687.9 | 15 | 89.3 | 82 | 10.854 | 5.427 | 238.84217 | 0.997 | 2.04E-02 | 1.02E-02 | 0.34695476 | 0.978 | 1.11E+00 | 0.553 | 8.87012 | 0.991 | Anomalia |
| CB12 | 21/05/2023 | -75.28112 | 5.084399 | 3363 | 685.5 | 22.6 | 93.3 | 56 | 19.46 | 9.523 | 419.30713 | 0.998 | 7.70E-03 | 3.85E-03 | 0.1312157 | 0.998 | 5.977 | 2.988 | 47.92752 | 0.999 | Anomalia |
| CB13 | 21/05/2023 | -75.281203 | 5.084228 | 3361 | 685.4 | 22.7 | 92.9 | 42 | 23.231 | 11.616 | 511.22016 | 0.997 | 1.69E-02 | 8.43E-03 | 0.28737942 | 0.997 | 38.234 | 19.117 | 306.63668 | 0.999 | Anomalia |
| CB14 | 21/05/2023 | -75.28118 | 5.084247 | 3365 | 685.2 | 25.4 | 97 | 49 | 30.973 | 15.487 | 681.58287 | 0.996 | 7.11E-02 | 3.56E-02 | 1.21195592 | 0.971 | 235.376 | 117.668 | 1887.39472 | 0.999 | Anomalia |
| CB15 | 21/05/2023 | -75.28118 | 5.084247 | 3363 | 685.2 | 22.8 | 89.1 | 32 | 10.909 | 5.455 | 240.07435 | 0.996 | 6.06E-03 | 3.03E-03 | 0.1032003 | 0.984 | 3.644 | 1.822 | 29.22488 | 0.994 | Anomalia |
| CB16 | 21/05/2023 | -75.281189 | 5.084159 | 3369 | 684.9 | 22.1 | 90.2 | 34 | 9.307 | 4.653 | 204.77853 | 0.995 | 6.56E-03 | 3.28E-03 | 0.11175488 | 0.981 | 3.195 | 1.648 | 26.43392 | 0.992 | Anomalia |
| CB17 | 21/05/2023 | -75.281189 | 5.084159 | 3361 | 685.2 | 20 | 77.1 | 19.6 | 10.378 | 5.189 | 228.36789 | 0.998 | 2.03E-02 | 1.01E-02 | 0.34490984 | 0.947 | 21.44 | 10.72 | 171.9488 | 0.994 | Anomalia |
| CB18 | 21/05/2023 | -75.281211 | 5.084159 | 3365 | 684.9 | 18.5 | 76 | 16.9 | 10.91 | 5.455 | 240.07435 | 0.99 | 1.19E-02 | 5.95E-03 | 0.10285606 | 0.981 | 4.456 | 2.228 | 35.73712 | 0.996 | Anomalia |
| CB19 | 21/05/2023 | -75.281211 | 5.084159 | 3356 | 684.9 | 17.4 | 81.1 | 17 | 7.783 | 3.892 | 171.28692 | 0.997 | 2.95E-03 | 1.47E-03 | 0.05023687 | 0.984 | 1.546 | 0.773 | 12.39892 | 0.993 | Anomalia |
| CB20 | 21/05/2023 | -75.281211 | 5.084159 | 3373 | 684.6 | 16.6 | 81.5 | 13.4 | 14.578 | 7.289 | 320.78889 | 0.998 | 1.57E-03 | 7.83E-04 | 0.02669302 | 0.99 | 6.022 | 3.011 | 48.29644 | 1 | Anomalia |
| CB21 | 21/05/2023 | -75.281211 | 5.084159 | 3365 | 684.5 | 16 | 82.2 | 13.5 | 9.685 | 4.843 | 213.14043 | 0.999 | 2.05E-03 | 1.02E-03 | 0.03486589 | 0.991 | 3.586 | 1.793 | 28.75972 | 0.999 | Anomalia |

| Información del punto | | | | | Condiciones atmosféricas | | | Temperatura del suelo (°C) | Resultados mediciones de flujo | | | | | | | | | | | | Observaciones |
|-----------------------|------------|--------------------|-------------------|----------------|----------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|--------------|-----------------------|-------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| ID | Fecha | Longitud (GG°MM'W) | Latitud (GG°MM'N) | Altura m.s.n.m | Presión barométrica (mBar) | Temperatura del aire (°C) | Humedad del aire (%HR) | | Dióxido de carbono (CO2) | | | | Sulfuro de hidrógeno (H2S) | | | | Metano (CH4) | | | | |
| | | | | | | | | | ppm/s | mol/m ² /d | CO2 g/m ² /d | ErrQ (r ²) | ppm/s | mol/m ² /d | H2S g/m ² /d | ErrQ (r ²) | ppm/s | mol/m ² /d | CH4 g/m ² /d | ErrQ (r ²) | |
| CB12 | 21/05/2023 | -75.281211 | 5.084159 | 3360 | 684.2 | 15.7 | 82.4 | 12 | 0.791 | 0.369 | 16.23969 | 0.99 | 3.26E-03 | 1.63E-03 | 0.05555366 | 0.99 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Apique | 21/05/2023 | -75.280493 | 5.085266 | 3360 | 684.3 | 16.2 | 83.1 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| VCB1 | 22/05/2023 | -75.28995 | 5.070335 | 3408.32446 | 670.5 | 17.5 | 63.8 | 12.6 | 1.124 | 0.562 | 24.73362 | 0.984 | 3.03E-03 | 1.51E-03 | 0.05146382 | 0.984 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| VCB2 | 22/05/2023 | -75.290463 | 5.071174 | 3409.75195 | 670.2 | 17.5 | 63.8 | 12.5 | 6.122 | 3.061 | 134.71461 | 0.996 | 3.38E-03 | 1.69E-03 | 0.05753042 | 0.988 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| VCB3 | 22/05/2023 | -75.290581 | 5.071108 | 3424.90503 | 670.5 | 17.5 | 63.8 | 12.1 | 4.251 | 2.126 | 93.56526 | 0.992 | 4.21E-03 | 2.11E-03 | 0.07177669 | 0.984 | 2.08E-02 | 1.04E-02 | 0.166816 | 0.989 | |
| VCB4 | 22/05/2023 | -75.290395 | 5.071969 | 3442.34424 | 670.5 | 17.5 | 63.8 | 12 | 5.462 | 2.731 | 120.19131 | 0.99 | 4.34E-03 | 2.17E-03 | 0.07388978 | 0.943 | 1.99E-03 | 9.93E-03 | 0.159197 | 0.624 | |
| VCB5 | 22/05/2023 | -75.290012 | 5.073799 | 3465.41895 | 670.5 | 17.5 | 63.8 | 13.1 | 3.565 | 1.783 | 78.46983 | 0.995 | 2.79E-03 | 1.40E-03 | 0.04757847 | 0.948 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| VCB6 | 22/05/2023 | -75.288683 | 5.074629 | 3490.50903 | 670.5 | 17.5 | 63.8 | 12.4 | 1.645 | 0.822 | 36.17622 | 0.996 | 4.10E-03 | 2.05E-03 | 0.06993626 | 0.93 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| VCB7 | 22/05/2023 | -75.290511 | 5.075129 | 3507.95752 | 670.5 | 17.5 | 63.8 | 10.8 | 6.948 | 3.474 | 152.89074 | 0.996 | 1.70E-03 | 8.50E-04 | 0.02895266 | 0.991 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| VCB8 | 22/05/2023 | -75.291127 | 5.075781 | 3545.26172 | 670.5 | 17.5 | 63.8 | 9.4 | 8.366 | 4.183 | 184.09383 | 0.999 | 1.23E-03 | 6.15E-04 | 0.02096043 | 0.965 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| VCB9 | 22/05/2023 | -75.291413 | 5.076764 | 3593.8186 | 670.5 | 17.5 | 63.8 | 10 | 0.939 | 0.47 | 20.6847 | 0.997 | 4.11E-03 | 2.05E-03 | 0.06993626 | 0.932 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Hotel1 | 23/05/2023 | -75.37867 | 4.969158 | 3571 | 669.2 | 16.3 | 87 | 11.3 | 1.935 | 0.967 | 42.55767 | 0.979 | 1.18E-03 | 1.18E-03 | 0.04028491 | 0.963 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Hotel2 | 23/05/2023 | -75.37955 | 4.96905 | 3576 | 669.7 | 15 | 84 | 10.3 | 4.519 | 2.26 | 99.4626 | 0.996 | 1.92E-03 | 9.61E-04 | 0.03274258 | 0.978 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Hotel3 | 23/05/2023 | -75.380439 | 4.968792 | 3559 | 670.4 | 14.1 | 85.6 | 10 | 4.163 | 2.081 | 91.58481 | 0.994 | 9.18E-03 | 4.59E-03 | 0.15636821 | 0.961 | 7.27E-02 | 3.64E-02 | 0.583054 | 0.982 | |
| Hotel4 | 23/05/2023 | -75.38113 | 4.968586 | 3567 | 670.7 | 13.3 | 86 | 10.4 | 2.398 | 1.199 | 52.76799 | 0.986 | 2.53E-03 | 1.27E-03 | 0.04318189 | 0.959 | 2.96E-03 | 1.48E-03 | 0.02370712 | 0.833 | |
| Hotel5 | 23/05/2023 | -75.381688 | 4.968946 | 3547 | 671.6 | 12.5 | 89.7 | 10 | 2.436 | 1.218 | 53.60418 | 0.992 | 3.13E-03 | 1.56E-03 | 0.05327017 | 0.973 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Hotel7 | 23/05/2023 | -75.380331 | 4.969328 | 3536 | 672.3 | 13 | 89.7 | 10.1 | 0.37 | 0.185 | 8.14185 | 0.987 | 3.10E-03 | 1.55E-03 | 0.05286118 | 0.958 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Hotel8 | 23/05/2023 | -75.379802 | 4.969651 | 3525 | 672.7 | 13.2 | 88.6 | 9.8 | 0.906 | 0.453 | 19.93653 | 0.989 | 1.09E-03 | 5.43E-04 | 0.01850653 | 0.952 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Hotel9 | 23/05/2023 | -75.37918 | 4.969947 | 3508 | 673.3 | 13 | 88.2 | 10 | 1.326 | 0.663 | 29.17863 | 0.995 | 3.64E-03 | 1.81E-03 | 0.06196108 | 0.952 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Hotel10 | 23/05/2023 | -75.37872 | 4.970283 | 3520 | 673.8 | 12.5 | 88.5 | 10.9 | 27.927 | 13.964 | 614.55564 | 0.995 | 2.15E-03 | 1.08E-03 | 0.03670631 | 0.992 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| FTHotel1 | 23/05/2023 | -75.377663 | 4.970158 | 3496 | 673.7 | 26.1 | 99.1 | 60.2 | 24.884 | 12.442 | 547.57242 | 0.989 | 0.311 | 0.156 | 5.316792 | 0.999 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| DuplicadoFTHotel1 | 23/05/2023 | -75.377664 | 4.970206 | 3508 | 673.6 | 29.5 | 98.5 | 60.2 | 19.49 | 9.745 | 428.87745 | 0.991 | 0.349 | 0.174 | 5.930268 | 0.999 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| FTHotel2 | 23/05/2023 | -75.377872 | 4.970388 | 3567 | 673 | 18.2 | 97.6 | 18.9 | 0.619 | 0.309 | 13.59909 | 0.992 | 7.28E-04 | 3.64E-04 | 0.01240244 | 0.96 | 0 | 0 | 0 | Flujo de H2S registrado solo en 19 | |
| FTHotel3 | 23/05/2023 | -75.377634 | 4.970255 | 3563 | 673 | 16.5 | 98.6 | 33.1 | 3.065 | 1.532 | 67.42332 | 0.998 | 6.15E-03 | 3.07E-03 | 0.10473399 | 0.99 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| FTHotel4 | 23/05/2023 | -75.37763 | 4.970268 | 3538 | 672.8 | 14.6 | 95.5 | 12.3 | 5.362 | 2.681 | 117.99081 | 0.99 | 1.32E-03 | 1.16E-03 | 0.03960328 | 0.993 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Doce1 | 23/05/2023 | -75.290067 | 5.069961 | 3558 | 668.7 | 12.4 | 90.3 | | 1.55 | 0.775 | 34.10775 | 0.996 | 1.31E-03 | 6.53E-04 | 0.02226918 | 0.978 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Doce2 | 23/05/2023 | -75.291013 | 5.070336 | 3561 | 668.2 | 11.8 | 93.4 | | 5.185 | 2.593 | 114.11793 | 0.99 | 3.22E-03 | 1.61E-03 | 0.05476977 | 0.984 | 1.20E-02 | 6.01E-03 | 0.09646456 | 0.953 | |
| anomalia1 | 23/05/2023 | -75.281076 | 5.084224 | 3363 | 684.8 | 15.5 | 98.7 | | 19.868 | 9.934 | 437.19534 | 0.991 | 4.28E-03 | 2.14E-03 | 0.07286731 | 0.99 | 0.252 | 0.126 | 2.02104 | 0.989 | |
| anomalia2 | 23/05/2023 | -75.281349 | 5.084177 | 3360 | 684.8 | 18.8 | 99.5 | | 45.935 | 21.967 | 1010.77767 | 0.985 | 7.66E-02 | 3.83E-02 | 1.30499978 | 0.984 | 202.868 | 101.434 | 1627.00136 | 0.991 | |
| anomalia3 | 23/05/2023 | -75.281344 | 5.084182 | 3361 | 684.7 | 19 | 99.4 | | 61.724 | 30.862 | 1358.23662 | 0.991 | 1.75E-02 | 8.77E-03 | 0.29893321 | 0.999 | 32.39 | 16.195 | 259.7678 | 0.992 | |
| P1CaminoTGI | 24/05/2023 | -75.280978 | 5.085115 | 3349 | 685 | 12.8 | 96.1 | 10.7 | 9.77E-02 | 4.88E-02 | 2.1494484 | 0.895 | 2.50E-03 | 1.25E-03 | 0.04267066 | 0.991 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| P2CaminoTGI | 24/05/2023 | -75.280978 | 5.085048 | 3372 | 684.8 | 13.1 | 97.5 | 12.6 | 0.141 | 7.04E-02 | 3.1000644 | 0.951 | 4.67E-03 | 2.33E-03 | 0.07951331 | 0.976 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| NorteAnomalia | 24/05/2023 | -75.28118 | 5.084468 | 3375 | 684.7 | 13.5 | 93.4 | 10.9 | 0.144 | 7.19E-02 | 3.1625586 | 0.942 | 1.22E-03 | 6.09E-04 | 0.02075253 | 0.918 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| AltaAnomalia | 24/05/2023 | -75.281441 | 5.08429 | 3376 | 681.6 | 14 | 87.8 | 11.7 | 0.424 | 0.212 | 9.33012 | 0.995 | 9.90E-04 | 4.95E-04 | 0.01687059 | 0.89 | 1.82E-02 | 9.09E-03 | 0.14585172 | 0.998 | |
| AltaAnomalia2 | 24/05/2023 | -75.281469 | 5.084318 | 3376 | 681.4 | 13.6 | 89.1 | 11.3 | 7.20E-02 | 3.60E-02 | 1.58436 | 0.586 | 4.79E-04 | 2.39E-04 | 0.00815582 | 0.913 | 1.68E-02 | 8.41E-03 | 0.13496056 | 0.975 | No hubo flujo de CO2 |
| AltaAnomalia3 | 24/05/2023 | -75.281437 | 5.084301 | 3374 | 681.5 | 13.4 | 89.8 | 11.5 | 0.642 | 0.321 | 14.12712 | 0.998 | 5.78E-04 | 2.89E-04 | 0.00985651 | 0.885 | 1.80E-02 | 9.00E-03 | 0.14439208 | 0.995 | |
| Anomalia1 | 24/05/2023 | -75.281097 | 5.084284 | 3355 | 683.6 | 15 | 98.6 | 27 | 4.292 | 2.146 | 94.44546 | 0.995 | 4.56E-03 | 2.28E-03 | 0.07770696 | 0.969 | 1.093 | 0.547 | 8.77388 | 0.983 | |
| Anomalia2 | 24/05/2023 | -75.281093 | 5.084267 | 3356 | 683.7 | 15.9 | 98.9 | | 11.403 | 5.702 | 250.94502 | 0.997 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | No hubo flujo de H2S y CH4 |
| Anomalia3 | 24/05/2023 | -75.281185 | 5.084171 | 3360 | 683.7 | 16.5 | 99 | 27.9 | 14.951 | 7.475 | 328.97475 | 0.991 | 2.40E-03 | 1.20E-03 | 0.04086432 | 0.987 | 7.871 | 3.935 | 63.1174 | 0.995 | |

| Información del punto | | | | | Condiciones atmosféricas | | | Temperatura del suelo (°C) | Resultados mediciones de flujo | | | | | | | | Observaciones | | | | |
|-----------------------|------------|--------------------|-------------------|----------------|----------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|---------------|--------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| ID | Fecha | Longitud (GG'MM'w) | Latitud (GG'MM'N) | Altura m.s.m.m | Presión barométrica (mBar) | Temperatura del aire (°C) | Humedad del aire (%HR) | | Dióxido de carbono (CO2) | | | | Sulfuro de hidrógeno (H2S) | | | | | Metano (CH4) | | | |
| | | | | | | | | | ppm/s | mol/m ² /d | CO2 g/m ² /d | ErrQ (r ²) | ppm/s | mol/m ² /d | H2S g/m ² /d | ErrQ (r ²) | | ppm/s | mol/m ² /d | CH4 g/m ² /d | ErrQ (r ²) |
| T1 | 24/05/2023 | -75.277519 | 5.102473 | 3083.8201 | | | | 13.4 | | | | | | | | | | | | | |
| T2 | 24/05/2023 | -75.277489 | 5.101552 | 3108.43879 | | | | 13.2 | | | | | | | | | | | | | |
| T3 | 24/05/2023 | -75.277864 | 5.100679 | 3131.55482 | | | | 13.1 | | | | | | | | | | | | | |
| T4 | 24/05/2023 | -75.277983 | 5.099454 | 3163.11991 | | | | 13.7 | | | | | | | | | | | | | |
| T5 | 24/05/2023 | -75.276731 | 5.098157 | 3160.87354 | | | | 13.6 | | | | | | | | | | | | | |
| T6 | 24/05/2023 | -75.277219 | 5.096658 | 3190.67078 | | | | 13.4 | | | | | | | | | | | | | |
| T7 | 24/05/2023 | -75.278238 | 5.095298 | 3212.79317 | | | | 12.8 | | | | | | | | | | | | | |
| T8 | 24/05/2023 | -75.278378 | 5.094621 | 3232.41314 | | | | 12 | | | | | | | | | | | | | |
| T9 | 24/05/2023 | -75.278104 | 5.092741 | 3240.21602 | | | | 13.4 | | | | | | | | | | | | | |
| T10 | 24/05/2023 | -75.27806 | 5.090897 | | | | | 13.5 | | | | | | | | | | | | | |
| T11 | 24/05/2023 | -75.279591 | 5.089556 | 3276.29215 | | | | 12.7 | | | | | | | | | | | | | |
| T12 | 24/05/2023 | -75.280968 | 5.088355 | | | | | 12.8 | | | | | | | | | | | | | |
| T13 | 24/05/2023 | -75.280181 | 5.086676 | 3303.7973 | | | | 12.4 | | | | | | | | | | | | | |

Medición de temperatura del suelo, no se midió flujo de gases