

**Caracterización geofísica de zonas de actividad fumarólica en el domo del Volcán Cerro Machín**

**Mia Valentina Angulo Melendez**

Física

Trabajo de Grado para Optar por el Título de  
Magíster en Geofísica

**Director**

PhD. Manuel Alberto Flórez Torres

**Codirector**

PhD. José David Sanabria Gómez

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Bucaramanga

2026

## Dedicatoria

*A Dios. A mi mamá y a mi papá, porque su amor me sostiene cada día.*

*A mi hermano, por inspirarme a ser mejor y llenar mi vida de felicidad.*

*A Santiago, porque la vida es más bonita cuando estás a mi lado.*

*A mi nona Rosalba y a mi abuelita, sus deseos y sueños los heredé en mi corazón.*

*A mis profesores, Manuel y José David, por siempre creer en mí.*

The Beatles – *Hey Jude*

*And don't you know that it's just you, hey Jude, you'll do  
The movement you need is on your shoulder*

## Índice

<b>Introducción</b>	<b>8</b>
<b>1. Área de estudio</b>	<b>9</b>
<b>2. Métodos</b>	<b>12</b>
2.1. Tomografía de resistividad eléctrica (ERT) . . . . .	12
2.2. Polarización inducida en el dominio del tiempo . . . . .	14
2.3. Método electromagnético transitorio (TEM) . . . . .	16
<b>3. Resultados</b>	<b>17</b>
3.1. Tomografías de resistividad y cargabilidad . . . . .	17
3.2. Método electromagnético transitorio . . . . .	21
<b>4. Discusión</b>	<b>23</b>
<b>5. Conclusiones</b>	<b>28</b>
<b>Referencias bibliográficas</b>	<b>33</b>

## Índice de figuras

1.	(A) Mapa de ubicación del Volcán Cerro Machín en Colombia. (B) Vista del Volcán Cerro Machín, con un rectángulo que marca el área de estudio. (C) Vista panorámica del VCM (imagen cortesía del Servicio Geológico Colombiano, SGC), con el recuadro que indica el campo fumarólico como área de estudio. (D) Fumarola principal observada dentro del campo fumarólico. Nota: los mapas fueron generados utilizando el sistema de coordenadas WGS84. . . . .	10
2.	(A) Mapa geológico del volcán Cerro Machín, adaptado de (Mosquera et al., 1982). (B) Imagen satelital del área de estudio que muestra la distribución espacial de las líneas ERT+IP, los puntos de medición TEM, muestras recogidas en campo y la ubicación de las fumarolas principales. (C) Muestras de rocas de la zona de estudio, (1) muestra fresca posiblemente de composición dacítica, recuperada fuera del borde del campo fumarólico; (2) muestra alterada, obtenida dentro del área del campo fumarólico. . . .	11
3.	Esquema del decaimiento de sobretensión en el dominio de tiempo. (Izquierda) Representación del voltaje observado $V_o$ y del voltaje de polarización $V_p$ en intervalos discretos de tiempo. (Derecha) Definición del área $A$ bajo la curva $V_p(t)$ entre $t_1$ y $t_2$ , utilizada para calcular la cargabilidad aparente $M_a$ (Reynolds, 2011). . . . .	15
4.	(A–C) Secciones de resistividad obtenidas a lo largo de las líneas ERT+IP 01–ERT+IP 03, empleando el arreglo Schlumberger. Se indican las posiciones de los sondeos TEM (01 y 02) y las fumarolas registradas en superficie. . . .	18
5.	(A–C) Secciones de cargabilidad obtenidas a lo largo de las líneas ERT+IP 01–ERT+IP 03, empleando el arreglo Schlumberger. Se indican las posiciones de los sondeos TEM (01 y 02) y las fumarolas registradas en superficie. . . . .	20
6.	Perfiles 1D de resistividad obtenidos a partir de los sondeos TEM. a) TEM 01, ubicado en el borde del campo fumarólico. b) TEM 02, adquirido en la parte central de la línea ERT-02. LM: Low Moment (baja corriente de transmisión, sensible a capas someras); HM: High Moment (alta corriente de transmisión, sensible a capas más profundas). La línea verde mostrada en los perfiles 1D indica la profundidad de investigación (DOI, por sus siglas en inglés), la cual es calculada automáticamente por el software de inversión y representa la profundidad máxima hasta la cual el modelo de resistividad se considera confiable. . . . .	22

7. Secciones de resistividad (paneles izquierdos) y cargabilidad (paneles derechos) correspondientes a las líneas ERT+IP 01 (A) y ERT+IP 02 (B). Las tomografías de resistividad incluyen los perfiles 1D de TEM superpuestos como rectángulos verticales. Adicionalmente, se muestran las zonas i-vi, delineadas sobre las tomografías para facilitar su interpretación. . . . . 24
8. Esquema conceptual del sistema fumarólico del domo del Volcán Cerro Machín, basado en los resultados integrados de ERT, IP y TEM. Se interpreta la presencia de una zona dominada por gas en profundidad, conectado con la superficie mediante conductos fumarólicos que atraviesan una franja de transición caracterizada por resistividades altas y cargabilidades intermedias. En la proximidad de las fumarolas se desarrollan arcillas producto de la alteración, mientras que las zonas laterales corresponden a áreas fracturadas con circulación de fluidos líquidos. En el flanco derecho, en la zona sin presencia de fumarolas, se distingue una franja superficial de alta resistividad y baja cargabilidad, interpretada como posible roca de composición dacítica fresca. . . . . 27

**Título:** Caracterización geoelectrica de zonas de actividad fumarólica en el Volcán Cerro Machín <sup>1</sup>

**Autor:** Mia Valentina Angulo Melendez <sup>2</sup>

**Director:** PhD. Manuel Alberto Flórez Torres

**Codirector:** PhD. José David Sanabria Gómez

### **Descripción:**

El Volcán Cerro Machín (Tolima, Colombia) es considerado uno de los sistemas volcánicos más peligrosos del país debido a su potencial eruptivo y a la presencia de un campo fumarólico activo en el domo central. La caracterización de estas manifestaciones superficiales es esencial para comprender la dinámica hidrotermal y los posibles mecanismos de presurización asociados a la actividad volcánica.

En este trabajo se realizó una caracterización geoelectrica del campo fumarólico mediante la aplicación integrada de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT), Polarización Inducida en dominio del tiempo (IP) y sondeos Electromagnéticos Transitorios (TEM). La adquisición comprendió tres líneas ERT+IP con configuración Schlumberger y espaciamiento de 5 m (longitudes de 255 m, 315 m y 310 m), junto con dos sondeos TEM realizados sobre dos de las líneas.

Las secciones de ERT permitieron definir la distribución de resistividades eléctricas, destacándose un cuerpo altamente resistivo en profundidad, una zona lateral de baja resistividad y cargabilidad que rodea este cuerpo, y anomalías de alta cargabilidad localizadas en las proximidades de las fumarolas. Los resultados de TEM mostraron consistencia con las secciones de ERT, validando la presencia del cuerpo resistivo profundo e incrementando la confianza en la estructura general inferida. Por su parte, la IP complementó el análisis al permitir identificar contrastes electroquímicos asociados a materiales alterados y minerales cargables.

Los resultados integrados de ERT, IP y TEM permiten proponer un modelo geoelectrico coherente con la dinámica fumarólica del domo del Cerro Machín. Este estudio constituye la primera aproximación geoelectrica del sistema fumarólico del Cerro Machín y proporciona una línea base para el monitoreo y futuros estudios de su evolución.

---

<sup>1</sup>Tesis de grado

<sup>2</sup>Escuela de Física, Facultad de Ciencias, Maestría en Geofísica

**Title:** Geoelectrical characterization of fumarolic activity zones at Cerro Machín Volcano<sup>1</sup>

**Author:** Mia Valentina Angulo Melendez<sup>2</sup>

**Advisor:** PhD. Manuel Alberto Flórez Torres

**Co-Advisor:** PhD. José David Sanabria Gómez

### **Description:**

Cerro Machín Volcano (Tolima, Colombia) is considered one of the most hazardous volcanic systems in the country due to its eruptive potential and the presence of an active fumarolic field within the central dome. The characterization of these surface manifestations is essential for understanding the hydrothermal dynamics and possible pressurization mechanisms associated with volcanic activity.

In this study, a geoelectrical characterization of the fumarolic field was conducted through the integrated application of Electrical Resistivity Tomography (ERT), Time-Domain Induced Polarization (IP), and Transient Electromagnetic (TEM) soundings. Data acquisition included three ERT+IP profiles using a Schlumberger configuration with 5 m electrode spacing (profile lengths of 255 m, 315 m, and 310 m), together with two TEM soundings carried out along two of the profiles.

The ERT sections allowed the definition of the electrical resistivity distribution, highlighting a highly resistive body at depth, a lateral low-resistivity and low-chargeability zone surrounding this body, and high-chargeability anomalies located near the fumaroles. The TEM results were consistent with the ERT sections, validating the presence of the deep resistive body and increasing confidence in the inferred structural framework. IP further complemented the analysis by identifying electrochemical contrasts associated with altered materials and chargeable minerals.

The integrated results from ERT, IP, and TEM enable the proposal of a geoelectrical model consistent with the fumarolic dynamics of the Cerro Machín dome. This study represents the first geoelectrical approach to the fumarolic system of Cerro Machín and provides a baseline for monitoring and future investigations of its evolution.

---

<sup>1</sup>Master's thesis

<sup>2</sup>Universidad Industrial de Santander, Escuela de Física, Facultad de Ciencias, Maestría en Geofísica

## Introducción

Las fumarolas representan una de las expresiones superficiales más comunes de la actividad volcánica e hidrotermal, asociadas con la liberación de cantidades de gases hacia la atmósfera (Fischer & Chiodini, 2015; Miller et al., 2020). Tradicionalmente, el análisis geoquímico y de temperaturas en las fumarolas ha sido una herramienta fundamental de monitoreo volcánico, ya que permite detectar variaciones asociadas con la agitación del sistema y anticipar posibles erupciones (Chiodini et al., 2016; Diliberto, 2017).

No obstante, su caracterización representa un desafío ya que los gases emitidos, al ascender desde reservorios magmáticos, interactúan con rocas y aguas subterráneas someras modificando su composición y reflejando procesos internos complejos (Gresse et al., 2018). En ciertos casos, estas interacciones pueden inducir presurización y dar lugar a erupciones freáticas (de Moor et al., 2016; Fischer et al., 1997). Es por ello que comprender su geometría interna, la existencia de reservorios de gas y la presencia de conductos fumarólicos resulta esencial para avanzar en el entendimiento de la dinámica volcánica (Tamburello et al., 2019).

Las técnicas geofísicas como la Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT, por sus siglas en inglés) han demostrado ser especialmente útiles para diferenciar zonas dominadas por gases, líquido o condiciones bifásicas, gracias a los contrastes de resistividad asociados a la saturación de los poros (Gresse et al., 2017; Zohdy et al., 1973).

Diversos estudios han demostrado el potencial de estos métodos. Por ejemplo, Gresse et al. (2017) aplicaron ERT tridimensional en el cráter de la Solfatara (Italia), logrando diferenciar regiones dominadas por gas y por líquido, y vinculando estas estructuras con la actividad fumarólica persistente. Posteriormente, Gresse et al. (2018) integraron ERT de alta resolución, localización de ruido sísmico y modelado termodinámico en el mismo campo fumarólico, revelando por primera vez la estructura interna detallada de un sistema de conductos fumarólicos. Su trabajo identificó un reservorio somero de gas que alimenta a las fumarolas principales a través de canales permeables.

De manera complementaria, Miller et al. (2020) aplicaron un enfoque de resistividad eléctrica en White Island (Nueva Zelanda), donde cartografiaron zonas dominadas por gas y líquido bajo un campo fumarólico activo. Su estudio permitió representar el estado interno del sistema, mostrando la utilidad de la resistividad para evidenciar condiciones bifásicas asociadas con la actividad fumarólica.

Finalmente, Mannen et al. (2025) estudiaron el campo fumarólico de Owakudani en el volcán Hakone (Japón) mediante el audiomagnetotelúrico de fuente controlada. Este permitió identificar zonas de muy baja resistividad asociadas a alteración hidrotermal, así como estructuras de alta resistividad interpretadas como bolsas de gas someras, directamente vinculadas a la dinámica fumarólica.

En años recientes, la Polarización Inducida (IP) ha cobrado relevancia en estudios volcánicos e hidrotermales por su sensibilidad a la presencia de arcillas, minerales metálicos

y zonas de alteración hidrotermal, parámetros que la convierten en una herramienta poderosa para caracterizar ambientes fumarólicos y sistemas de alteración (Ghorbani et al., 2018; Revil et al., 2022; Troiano et al., 2021). La IP mide la respuesta eléctrica retardada del subsuelo, asociada a la capacidad de los materiales para polarizarse y relajarse eléctricamente, siendo particularmente sensible a arcillas ricas en esmectita y a minerales sulfurados como la piritita o calcopiritita, comúnmente vinculados a procesos hidrotermales (Ghorbani et al., 2018; Gross et al., 2021). Cuando se combina con ERT, la IP permite discriminar entre zonas conductivas dominadas por fluidos y aquellas donde la conductividad se debe a minerales de alteración, reduciendo la ambigüedad interpretativa en medios volcánicos complejos (Revil et al., 2022; Troiano et al., 2021).

En Colombia, a pesar de la presencia de una extensa cadena volcánica, este tipo de estudios aún no se ha desarrollado. El Volcán Cerro Machín (VCM), localizado en el municipio de Cajamarca (Tolima), constituye uno de los volcanes de mayor relevancia por el nivel de amenaza que representa para poblaciones cercanas como Cajamarca, Ibagué y Toche, y por su actividad sísmica recurrente registrada en las últimas décadas (Servicio Geológico Colombiano, 2024).

En este trabajo se aplicaron las técnicas de ERT, IP y TEM para caracterizar la estructura eléctrica del campo fumarólico del domo del volcán Cerro Machín, constituyendo una de las primeras aplicaciones combinadas de este tipo en el contexto volcánico colombiano. En particular, la adquisición simultánea de ERT e IP en el dominio del tiempo permitió obtener una visión complementaria de las zonas arcillosas y de alteración hidrotermal, mientras que el TEM validó las respuestas de resistividad y extendió la investigación a mayores profundidades. Este enfoque integrado busca aportar a la caracterización geoelectrica del sistema fumarólico del domo, proporcionando nueva información sobre su estructura interna y su dinámica hidrotermal.

## 1. Área de estudio

El Volcán Cerro Machín (VCM) se localiza en la Cordillera Central de los Andes de Colombia (Figura 1A), dentro del Segmento Volcánico Sur del Cinturón Volcánico de los Andes del Norte (NVZ). Este segmento está condicionado por la subducción oblicua de la placa Nazca bajo la placa Suramericana, proceso fuertemente influenciado por la entrada de la Dorsal de Carnegie, que genera variaciones laterales en la velocidad de convergencia y en el aporte de volátiles hacia el manto superior (Bourdon et al., 2003; Hall & Wood, 1985).

Dentro de este marco geodinámico, el VCM forma parte del Complejo Volcánico Cerro Bravo–Cerro Machín, una alineación de centros volcánicos de composición intermedia a félsica asociados a zonas de debilidad cortical heredadas, que han facilitado la migración de magmas a través de la litosfera andina (Londoño, 2016). La posición del Machín al borde occidental del complejo refleja la influencia combinada de la tectónica transpresiva andina y de estructuras profundas, lo que ha favorecido la formación de un sistema

magmático somero altamente explosivo.

En cuanto a su evolución eruptiva, el VCM es un volcán poligenético de edad Holocénica. Su actividad más reciente ha estado dominada por erupciones explosivas de tipo pliniano y vulcaniano. Durante los últimos 5000 años se han documentado al menos seis erupciones significativas, incluyendo corrientes de densidad piroclástica (CDP) y depósitos de caída de composición predominantemente dacítica (Errázuriz-Henao et al., 2019; Laeger et al., 2013; Piedrahita et al., 2018; Rueda et al., 2005).

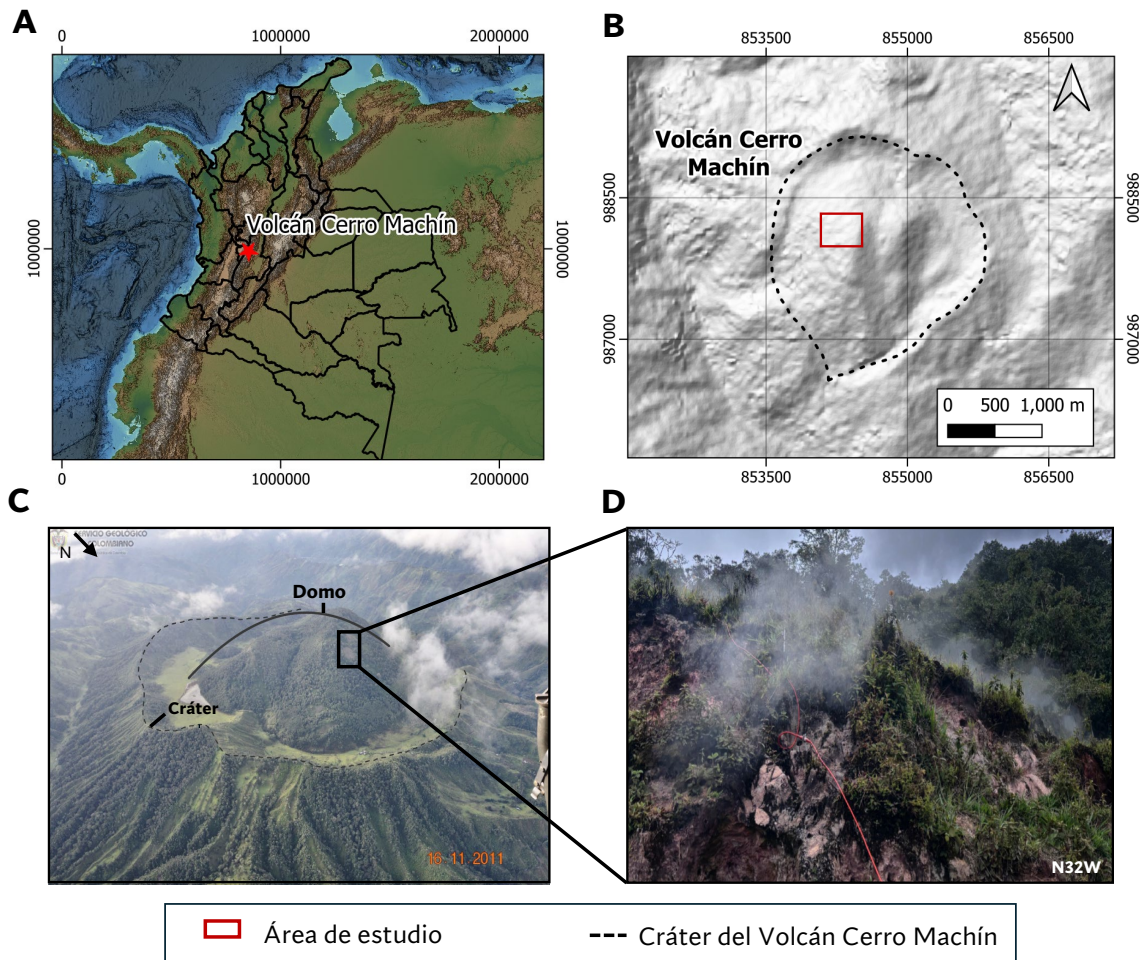


Figura 1: (A) Mapa de ubicación del Volcán Cerro Machín en Colombia. (B) Vista del Volcán Cerro Machín, con un rectángulo que marca el área de estudio. (C) Vista panorámica del VCM (imagen cortesía del Servicio Geológico Colombiano, SGC), con el recuadro que indica el campo fumarólico como área de estudio. (D) Fumarola principal observada dentro del campo fumarólico. Nota: los mapas fueron generados utilizando el sistema de coordenadas WGS84.

## CARACTERIZACIÓN FUMARÓLICA VOLCÁN CERRO MACHÍN

Su última erupción, ocurrida hace aproximadamente 900 años, estuvo marcada por la emisión de corrientes de densidad piroclástica (CDP) asociadas a un evento de tipo vulcaniano, lo que dio lugar a la formación de un domo dacítico intra-cráter (Laeger et al., 2013; Murcia et al., 2010; Rueda et al., 2005; Thouret et al., 1995). En este domo se encuentra el principal foco de actividad fumarólica del volcán como se muestra en la figura 1 D.

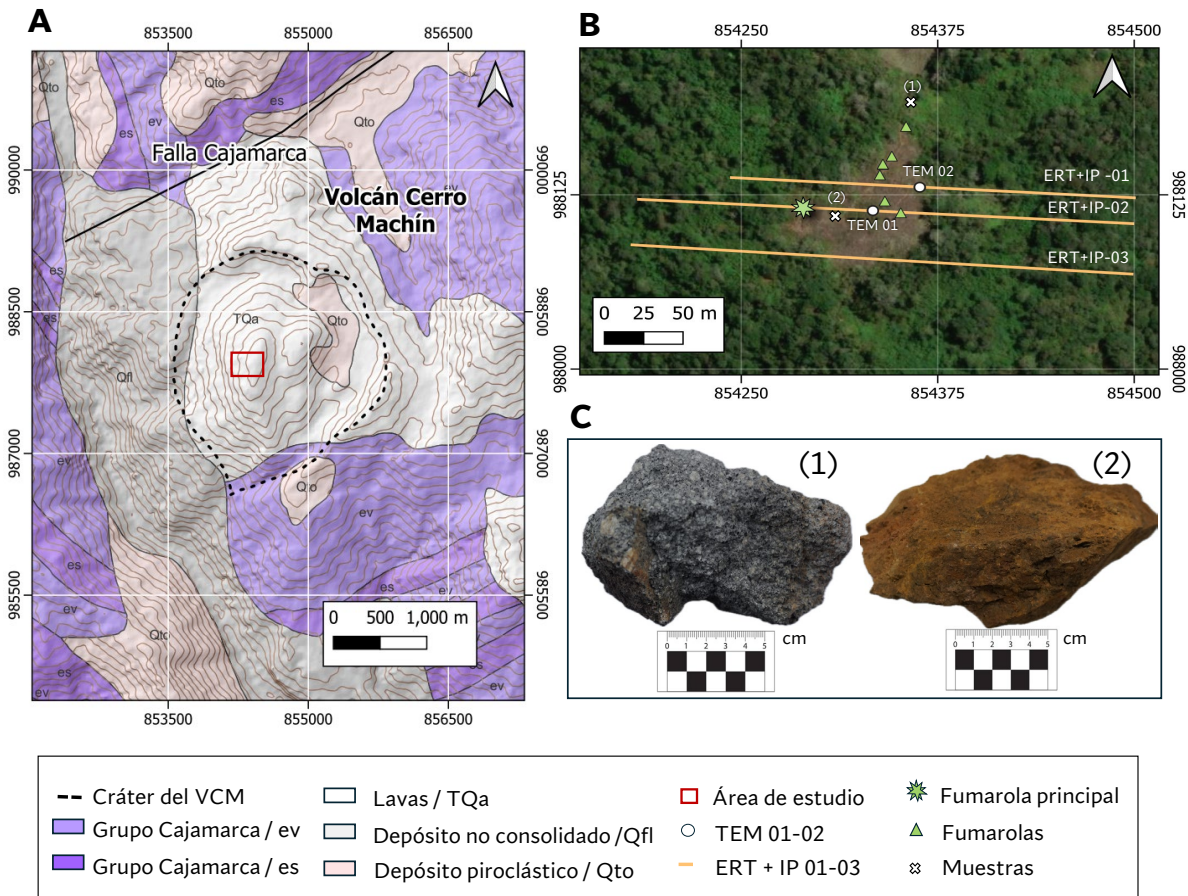


Figura 2: (A) Mapa geológico del volcán Cerro Machín, adaptado de (Mosquera et al., 1982). (B) Imagen satelital del área de estudio que muestra la distribución espacial de las líneas ERT+IP, los puntos de medición TEM, muestras recogidas en campo y la ubicación de las fumarolas principales. (C) Muestras de rocas de la zona de estudio, (1) muestra fresca posiblemente de composición dacítica, recuperada fuera del borde del campo fumarólico; (2) muestra alterada, obtenida dentro del área del campo fumarólico.

El basamento del edificio volcánico del Cerro Machín está constituido principalmente por rocas metamórficas del Triásico pertenecientes al Grupo Cajamarca, como esquistos y gneises, junto con intrusiones ígneas de distintas dimensiones, entre las que predominan

andesitas y dacitas (Díaz & Arias, 2020; Mosquera et al., 1982; Villagómez et al., 2011). Dentro de este grupo se reconocen esquistos verdes con albita, clorita, epidota y actinolita (ev), así como esquistos y filitas cuarzosos-sericíticos-grafitosos (es), tal como se observa en la Figura 2 A. Además, el VCM se encuentra influenciado por varios sistemas de fallas de carácter regional. La más cercana a la zona de estudio es la falla de Cajamarca, también referida en la literatura como falla La Honda, cuyo traza es observada próxima al flanco noroccidental del volcán (Figura 2 A) (Mosquera et al., 1982; Ortiz et al., 2023).

Debido a su historia eruptiva reciente, su carácter altamente explosivo, su sistema fumarólico activo y su ubicación cercana a zonas densamente pobladas, el VCM es considerado uno de los volcanes más peligrosos de Colombia. Actualmente se encuentra en nivel de alerta amarilla, lo que indica una actividad sísmica y geoquímica que requiere un monitoreo continuo (Londono, 2016; Servicio Geológico Colombiano, 2024).

## 2. Métodos

La tomografía de resistividad eléctrica (ERT) y el método electromagnético transitorio en el dominio del tiempo (TEM) son técnicas geofísicas que proporcionan información sobre la resistividad eléctrica del subsuelo. Estas metodologías han sido ampliamente aplicadas en ambientes volcánicos para caracterizar estructuras hidrotermales y zonas de alteración (Byrdina et al., 2014; Gresse et al., 2017). Adicionalmente, se adquirieron mediciones de Polarización Inducida (IP) en el dominio del tiempo. La integración de resistividad y cargabilidad ha demostrado ser una herramienta eficaz para evaluar el grado de alteración hidrotermal en sistemas volcánicos, como en White Island (Nueva Zelanda), donde las secciones IP-ERT permitieron distinguir las zonas altamente alteradas (Ghorbani et al., 2018; Miller et al., 2020; Revil & Gresse, 2021; Troiano et al., 2021). En este trabajo, se realizaron mediciones de ERT con IP y dos sondeos TEM, obteniendo en total tres secciones ERT-IP y dos sondeos TEM para evaluar la consistencia de los resultados en el área de estudio.

### 2.1. Tomografía de resistividad eléctrica (ERT)

La tomografía de resistividad eléctrica es un método geoelectrico utilizado para obtener imágenes bidimensionales de la distribución de resistividad eléctrica del subsuelo a partir de mediciones en superficie. El principio físico se basa en la inyección de corriente entre dos electrodos lo que genera un campo eléctrico en el subsuelo. La diferencia de potencial resultante es medida entre otros dos electrodos, y se calcula la resistencia de transferencia mediante la ley de Ohm:

$$R = \frac{\Delta V}{I}, [\Omega] \quad (1)$$

donde  $\Delta V$  es la diferencia de potencial entre los electrodos M y N, e  $I$  es la corriente inyectada. La distribución espacial de resistividad  $\rho(x, z)$  está descrita por la siguiente ecuación diferencial parcial:

$$\nabla \cdot \left( \frac{1}{\rho} \nabla V \right) = -I \delta(r - r_0) \quad (2)$$

donde  $\rho$  es la resistividad eléctrica del medio,  $V$  es el potencial eléctrico,  $I$  es la corriente inyectada y  $\delta$  es la delta de Dirac que representa la fuente puntual. Esta ecuación combina la ley de Ohm generalizada y la ecuación de Poisson, estableciendo la relación fundamental entre la resistividad espacial  $\rho(x, z)$  y el potencial generado por la inyección de corriente.

El proceso de inversión en Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) constituye un problema inverso de solución no única, dado que diferentes distribuciones de resistividad en el subsuelo pueden reproducir el mismo conjunto de datos medidos. Para restringir este rango de posibles soluciones, se imponen condiciones adicionales o restricciones que guían la inversión hacia modelos más estables y geológicamente plausibles (Constable et al., 1987; Loke, 1999).

En este trabajo se utilizó el algoritmo implementado en RES2DINV (Loke, 1999), el cual aplica una inversión de mínimos cuadrados regularizada mediante restricciones de suavidad. Esta formulación constituye una variación de la ecuación de Gauss–Newton clásica para problemas de mínimos cuadrados, a la cual se le incorpora un término adicional de regularización, y se expresa como:

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{F}^T \mathbf{F}) \Delta \mathbf{q} = \mathbf{J}^T \mathbf{g} - \lambda \mathbf{F} \mathbf{q} \quad (3)$$

donde  $J$  es la matriz Jacobiana, que contiene las derivadas parciales de la respuesta sintética con respecto a cada parámetro del modelo; estos parámetros corresponden a los valores de resistividad eléctrica asignados a cada celda de la malla de inversión. El vector  $\mathbf{g} = \mathbf{y} - \mathbf{f}$  representa la discrepancia entre los datos observados y los calculados, donde ambos son vectores columna del tipo  $\mathbf{y} = \text{col}(y_1, y_2, \dots, y_m)$  y  $\mathbf{f} = \text{col}(f_1, f_2, \dots, f_m)$ , siendo  $m$  el número de mediciones. Por otra parte,  $\Delta \mathbf{q}$  es el vector de actualización que indica los cambios en los valores de resistividad del modelo en cada iteración. El término  $\lambda$  es el factor de amortiguamiento que regula el peso relativo entre el ajuste a los datos y la restricción de suavidad. Finalmente,  $\mathbf{F}$  es la matriz de suavizado, construida a partir de operadores de primeras diferencias, que penaliza las variaciones bruscas de resistividad entre celdas adyacentes en las direcciones horizontal y vertical.

De esta manera, el primer término  $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$  garantiza que el modelo se ajuste a los datos minimizando el error cuadrático, mientras que el segundo término  $\lambda \mathbf{F}^T \mathbf{F}$  actúa como regularización, imponiendo que los cambios en resistividad ocurran de manera más suave y gradual. El balance entre ambos términos asegura que el modelo resultante no solo reproduzca adecuadamente los datos de campo, sino que también presente una distribución

de resistividades más suave y razonable desde el punto de vista geológico.

En este trabajo se incluyó además la opción de restricción robusta sobre los datos, lo cual equivale a utilizar una norma  $L_1$  en el ajuste de datos en lugar de la norma  $L_2$  clásica. En la formulación de mínimos cuadrados convencional ( $L_2$ ), todos los datos pesan igual y  $\mathbf{R}_d = \mathbf{I}$ , de modo que cada residual contribuye con la misma importancia al error total. En cambio, con la restricción robusta se introduce una matriz diagonal  $\mathbf{R}_d$  cuyos elementos  $w_i$  dependen del tamaño de cada residual  $g_i$ ; de esta manera, los datos con errores grandes reciben un peso reducido y tienen menor influencia en el resultado final. Así, la ecuación de inversión se modifica a

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{R}_d \mathbf{J} + \lambda \mathbf{F}^T \mathbf{F}) \Delta \mathbf{q} = \mathbf{J}^T \mathbf{R}_d \mathbf{g} - \lambda \mathbf{F} \mathbf{q} \quad (4)$$

lo cual mejora la estabilidad frente a valores atípicos en los datos de campo. En cuanto al mallado, se empleó un esquema de elementos finitos trapezoidales que incorpora la topografía, con un refinamiento de cuatro nodos entre electrodos y un incremento progresivo de los espesores con la profundidad. El factor de amortiguamiento  $\lambda$  (ecuación 4) se optimizó automáticamente durante la inversión, con un valor inicial de 0.15 y mínimo de 0.03, aumentando con la profundidad. En la regularización, la matriz de suavizado  $F$  se construyó a partir de operadores de primeras diferencias en las direcciones horizontal y vertical, con una relación vertical/horizontal de 0.5, lo que impone mayor continuidad lateral y permite variaciones más marcadas en profundidad, coherente con la naturaleza de los perfiles de resistividad eléctrica (Loke, 1999).

## 2.2. Polarización inducida en el dominio del tiempo

En geofísica, la polarización inducida es un fenómeno electroquímico observado cuando un medio geológico sometido a una corriente eléctrica redistribuye sus cargas internas, generando una polarización temporal que se manifiesta como un voltaje retardado tras interrumpir la corriente aplicada. Según Reynolds, 2011, este comportamiento ocurre porque el subsuelo actúa en cierta medida como un condensador: al interrumpir la corriente, el voltaje no cae instantáneamente a cero, sino que persiste un remanente que decae en el tiempo. El efecto se explica principalmente por dos mecanismos: la polarización de grano (o de electrodo) y la polarización de membrana, ambos vinculados a interacciones iónicas en el agua de poros y superficies minerales.

En la polarización de grano, típicamente asociada a sulfuros metálicos u óxidos conductores, los granos actúan como microelectrodos que acumulan carga en su superficie cuando bloquean un canal de flujo iónico. Al interrumpirse la corriente, la redistribución lenta de iones genera el característico decaimiento de sobretensión (Reynolds, 2011).

Por otro lado, la polarización de membrana se manifiesta en materiales que no contienen sulfuros, como areniscas arcillosas o sedimentos con partículas finas. Aquí, la superficie mineral posee carga negativa, atrayendo cationes y repeliendo aniones. En estrechamien-

tos de poros o en presencia de nubes de cationes asociadas a arcillas, los aniones quedan bloqueados, generándose una diferencia de concentración iónica que se traduce en un potencial eléctrico medible (Reynolds, 2011).

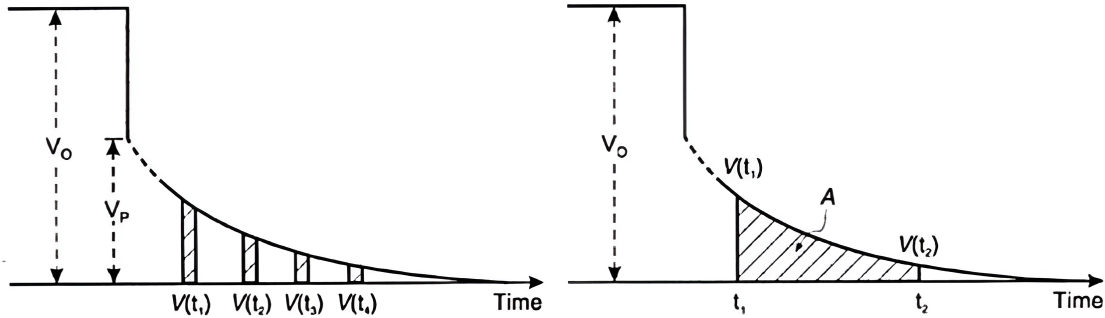


Figura 3: Esquema del decaimiento de sobretensión en el dominio de tiempo. (Izquierda) Representación del voltaje observado  $V_o$  y del voltaje de polarización  $V_p$  en intervalos discretos de tiempo. (Derecha) Definición del área  $A$  bajo la curva  $V_p(t)$  entre  $t_1$  y  $t_2$ , utilizada para calcular la cargabilidad aparente  $M_a$  (Reynolds, 2011).

Las mediciones en el dominio de tiempo se realizan aplicando corriente continua durante un periodo de carga y registrando el voltaje remanente al interrumpirla. El voltaje total observado ( $V_o$ ) corresponde a la suma del voltaje puramente óhmico ( $V$ ) y el voltaje de polarización ( $V_p$ ). Al apagar la corriente,  $V$  desaparece de forma instantánea, quedando únicamente  $V_p$ , que decae progresivamente (Figura 3). Este proceso se cuantifica mediante la cargabilidad ( $M$ ), definida como:

$$M = \frac{V_p}{V_o} \quad (\text{mV/V o ms}) \quad (5)$$

Instrumentalmente, la medición directa de  $V_p$  en el instante del apagado es difícil, por lo que se mide su decaimiento en intervalos discretos. Para integrar esta respuesta se define la cargabilidad aparente ( $M_a$ ), que se expresa como:

$$M_a = \frac{1}{V_o} \int_{t_1}^{t_2} V_p(t) dt = \frac{A}{V_o} \quad (6)$$

donde  $A$  es el área bajo la curva de decaimiento (Reynolds, 2011). Esta definición permite normalizar el efecto de polarización y reducir el impacto de ruidos eléctricos de fondo.

Por tanto, el método de polarización inducida en el dominio de tiempo constituye una técnica activa que complementa a la resistividad convencional al ser sensible a propiedades electroquímicas de los materiales. Su principal fortaleza radica en la detección de

sulfuros diseminados y en la identificación de arcillas y materia orgánica en ambientes hidrotermales o volcánicos (Martin et al., 2021; Reynolds, 2011).

### 2.3. Método electromagnético transitorio (TEM)

El método electromagnético transitorio (TEM, por sus siglas en inglés) es una técnica geoelectrica que permite obtener sondeos unidimensionales de resistividad mediante la inducción de un campo electromagnético transitorio en el subsuelo. El principio físico se basa en la Ley de Faraday: cuando se interrumpe abruptamente la corriente que circula por un lazo transmisor en superficie, el campo magnético primario decae rápidamente y genera corrientes de Foucault en el subsuelo.

Inicialmente, estas corrientes se distribuyen en las capas más someras (etapa de tiempo temprano), pero con el transcurso del tiempo se difunden hacia mayores profundidades (etapas de tiempo intermedio y tardío), dependiendo de la resistividad del terreno. Esta difusión de corriente genera un campo magnético secundario, cuya variación temporal es registrada en superficie mediante una bobina receptora, que mide la tasa de cambio del campo magnético inducido ( $dB/dt$ ) (Reynolds, 2011).

Partiendo de las ecuaciones de Maxwell en el dominio del tiempo, e introduciendo las relaciones constitutivas, se obtiene la ecuación de difusión electromagnética para el campo eléctrico en un medio conductor homogéneo:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \frac{1}{\rho} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial t}, \quad (7)$$

donde  $\mathbf{E}$  es el campo eléctrico inducido,  $\rho$  la resistividad eléctrica,  $\mu_0$  la permeabilidad magnética del vacío y  $\mathbf{f}$  la fuente asociada al lazo transmisor. En la práctica geofísica, y bajo la aproximación cuasi-estática. Ahora bien, la respuesta registrada corresponde a la derivada temporal del campo magnético en la bobina receptora:

$$V(t) \propto -\frac{dB(t)}{dt}, \quad (8)$$

siendo  $V(t)$  la fem inducida. Para un semiespacio homogéneo, la solución analítica de la respuesta tardía está dada por

$$\frac{dB}{dt} \propto \frac{\rho^{3/2}}{t^{5/2}}, \quad (9)$$

donde  $t$  corresponde al tiempo transcurrido tras el apagado de la corriente en el lazo transmisor. A partir de esta relación se define la resistividad aparente en función del tiempo:

$$\rho_a(t) = C \left( \frac{1}{dB/dt} \right)^{2/3}, \quad (10)$$

donde  $C$  es una constante que depende de la geometría transmisor–receptor (Bortolozzo et al., 2024; Christiansen et al., 2006). Esta resistividad aparente resume la difusión de las corrientes en el subsuelo y constituye el punto de partida para la inversión de los datos.

De acuerdo con lo anterior, en los sondeos TEM, el equipo registra el decaimiento temporal del campo magnético secundario inducido en el subsuelo, expresado como la derivada temporal  $dB/dt$ . Estos datos crudos se transforman a resistividad aparente mediante la relación de la ecuación 10 y pueden observarse en los paneles izquierdos de la Figura 6 A-B.

A partir de estos datos, el proceso de inversión aplicado en TEM es análogo al de la ERT y consiste en buscar un perfil unidimensional de resistividad que, bajo un esquema de regularización, reproduzca la curva de resistividad aparente observada, minimizando la discrepancia entre los datos medidos y calculados.

### 3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados de las líneas ERT+IP 01 – ERT+IP 03, que incluyen mediciones simultáneas de resistividad eléctrica y cargabilidad, así como dos sondeos TEM realizados sobre estas mismas líneas en el campo fumarólico del domo central del VCM.

#### 3.1. Tomografías de resistividad y cargabilidad

Se adquirieron tres líneas de tomografía de resistividad eléctrica (ERT), denominadas ERT+IP 01- ERT+IP 03 (Figura 2 B), utilizando el sistema multicanal *FlashRES UNIVERSAL64*. Este equipo permite la adquisición simultánea de resistividad (RES) y polarización inducida en dominio de tiempo (IP), mediante la configuración *IP+RES*, que registra tanto la diferencia de potencial asociada a la resistividad aparente como el voltaje residual de polarización para cada ciclo de corriente inyectado.

Las longitudes de las líneas variaron debido a las condiciones topográficas y de acceso en la zona de estudio, lo que impidió mantener una extensión uniforme en todos los perfiles. Las líneas ERT+IP 01, ERT+IP 02 y ERT+IP 03 tuvieron longitudes de 255 m, 315 m y 310 m, respectivamente, y se dispusieron aproximadamente en dirección oeste–este. En todas las líneas se empleó el arreglo de Schlumberger, seleccionado por su adecuada relación señal-ruido. Además, se usó un espaciamiento uniforme de 5 m entre electrodos, definido por consideraciones logísticas de despliegue en campo.

Las Figuras 4 A-C y 5 A-C muestran las secciones de resistividad eléctrica y de cargabilidad, respectivamente. En general, los errores RMS de las tomografías de resistividad y cargabilidad variaron entre 5.0% y 11.5%, y las profundidades máximas alcanzadas estuvieron entre los 49 m y 68 m, correspondiendo esta última a la línea ERT+IP 02. Para el análisis es importante tener en cuenta un desfase lateral de 55 m de la línea ERT+IP 01 con las líneas ERT+IP 02-03 (Figura 2 B).

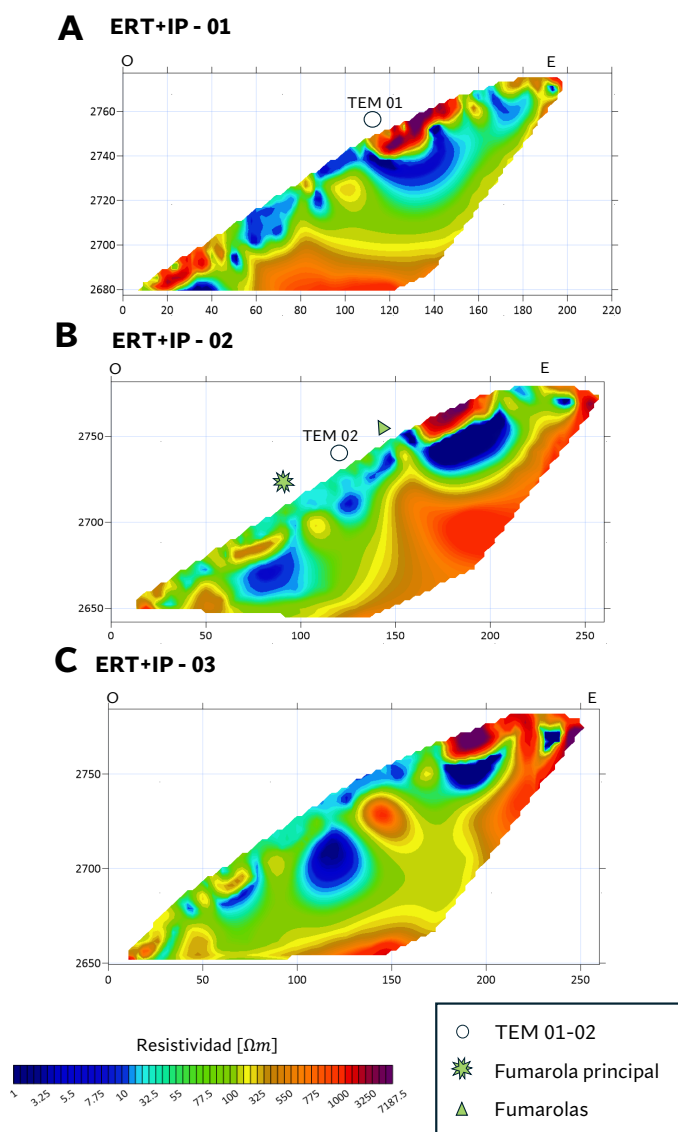


Figura 4: (A–C) Secciones de resistividad obtenidas a lo largo de las líneas ERT+IP 01–ERT+IP 03, empleando el arreglo Schlumberger. Se indican las posiciones de los sondeos TEM (01 y 02) y las fumarolas registradas en superficie.

La tomografía ERT+IP 02, que atraviesa la fumarola principal, muestra en profundidad

una zona de alta resistividad con valores entre  $400 \Omega \cdot m$  y  $1200 \Omega \cdot m$ , rodeada por zonas de menor resistividad (tonos azules). Una distribución similar se observa en la tomografía ERT+IP 01. En ambas tomografías, dentro de las zonas de menor resistividad, los valores de cargabilidad son igualmente bajos, entre 0 y 3 ms (Figura 5 A-B).

Hacia la parte superior de las líneas ERT+IP 01 y ERT+IP 02, se distingue una franja de alta resistividad entre los 120–160 m del perfil 01 y los 170–210 m del perfil 02 (Figura 4 A-B). En dichas zonas, que presentan las resistividades más elevadas de las tres secciones (entre  $800$  y  $7177 \Omega \cdot m$ ) con una cargabilidad de 0 a 4 ms (Figura 5 A-B).

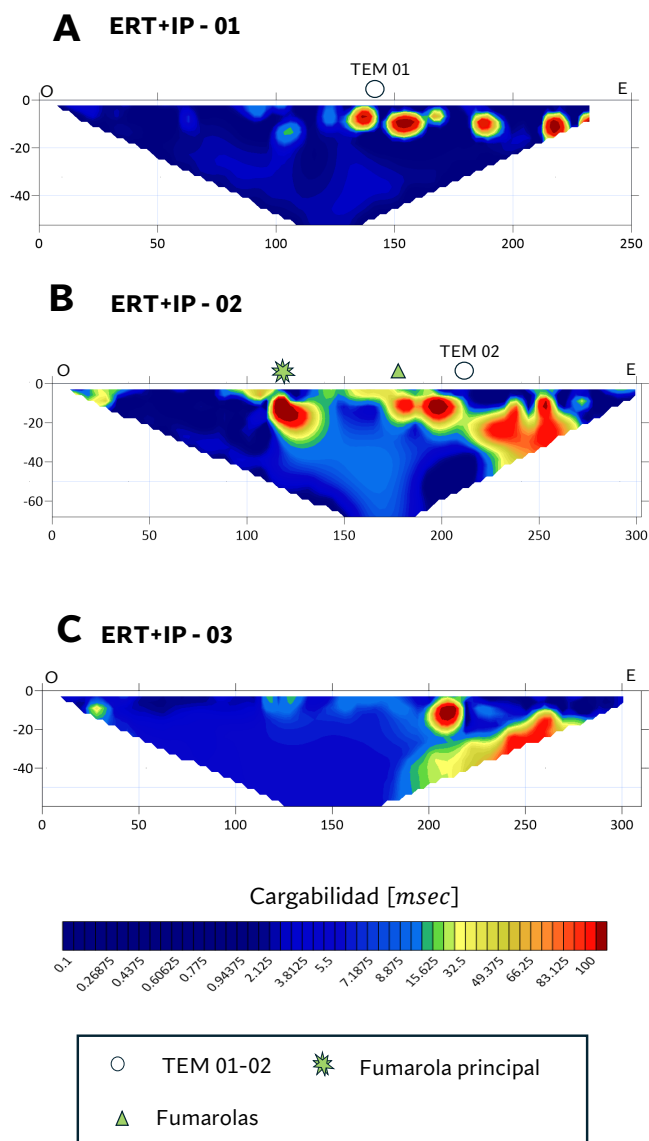


Figura 5: (A–C) Secciones de cargabilidad obtenidas a lo largo de las líneas ERT+IP 01–ERT+IP 03, empleando el arreglo Schlumberger. Se indican las posiciones de los sondeos TEM (01 y 02) y las fumarolas registradas en superficie.

La línea ERT+IP 03, situada a mayor distancia de la zona de fumarolas no muestra estas mismas características de forma tan notorias. No obstante, también se reconocen en su parte somera sectores con valores elevados de resistividad y cargabilidad baja, similares a los observados en las otras dos líneas (Figuras 4 C y 5 C). Adicionalmente, en la tomografía de cargabilidad ERT+IP 02 (Figura 5 B), se identifica una anomalía puntual de alta cargabilidad en los primeros 15 m de profundidad justo debajo de la fumarola principal,

con valores entre 15 y 250 ms.

### **3.2. Método electromagnético transitorio**

Se realizaron dos sondeos TEM en la zona fumarólica del domo del VCM, denominados TEM 01 y TEM 02 (Figura 2 B). El primero se ubicó sobre la línea ERT+IP 01, justo en el borde del campo fumarólico, y el segundo en la parte central del perfil ERT+IP 02. Ambos sondeos se adquirieron con el equipo ABEM WalkTEM 2, utilizando el script Dual Moment de 10 ms con 39 ventanas de tiempo. Este modo de adquisición alterna mediciones en High Moment (alta corriente) y Low Moment (baja corriente), lo que permite registrar de manera secuencial la respuesta de las capas someras y de las más profundas. En cada sondeo se emplearon 20 ciclos de medición. Los elementos utilizados durante la adquisición incluyeron una antena transmisora cuadrada de 40×40m y una antena receptora RC-5 de 0.5×0.5m.

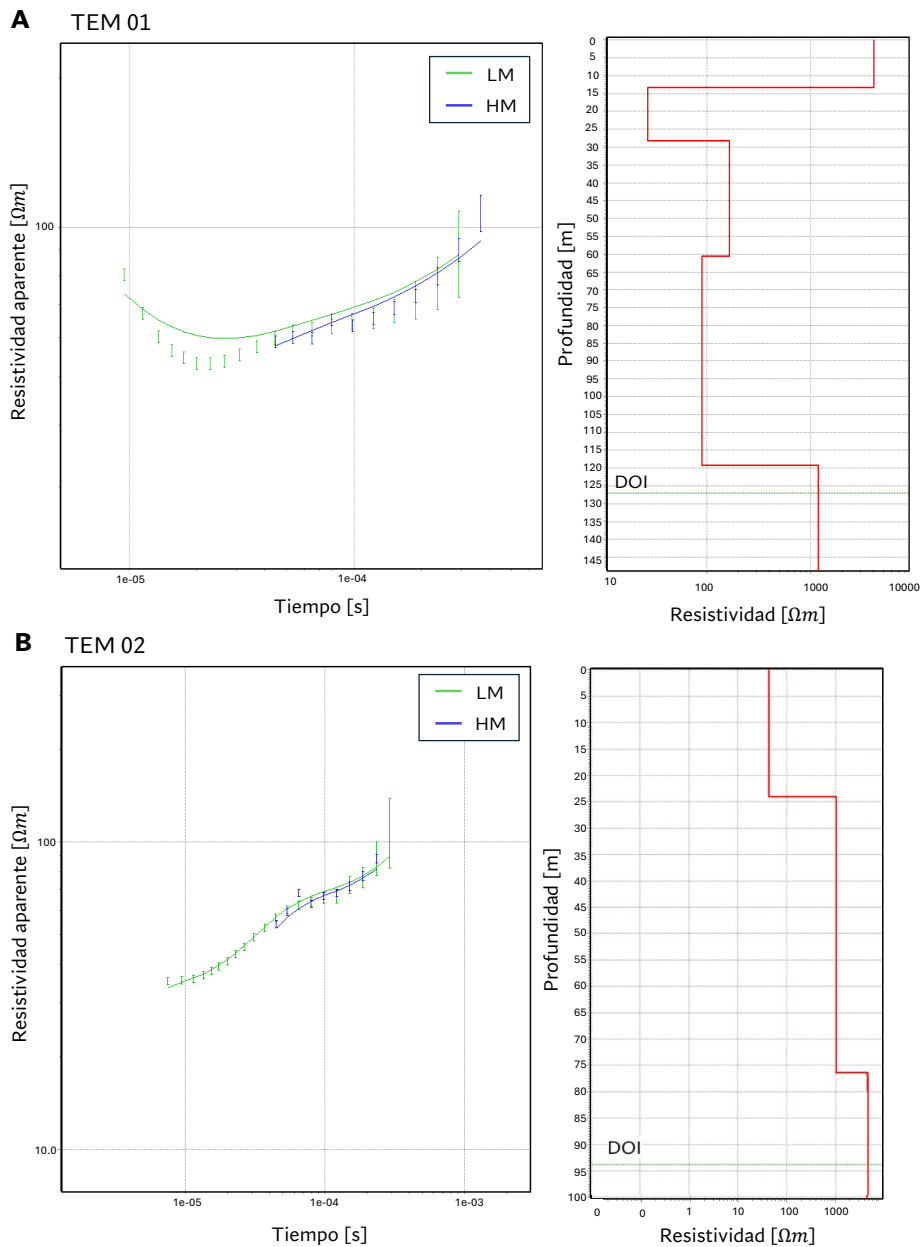


Figura 6: Perfiles 1D de resistividad obtenidos a partir de los sondeos TEM. a) TEM 01, ubicado en el borde del campo fumarólico. b) TEM 02, adquirido en la parte central de la línea ERT-02. LM: Low Moment (baja corriente de transmisión, sensible a capas someras); HM: High Moment (alta corriente de transmisión, sensible a capas más profundas). La línea verde mostrada en los perfiles 1D indica la profundidad de investigación (DOI, por sus siglas en inglés), la cual es calculada automáticamente por el software de inversión y representa la profundidad máxima hasta la cual el modelo de resistividad se considera confiable.

En la Figura 6 se presentan las curvas de resistividad aparente en función del tiempo (paneles izquierdos), junto con los perfiles unidimensionales de resistividad obtenidos por inversión (paneles derechos). Estas curvas se derivan del decaimiento transitorio del campo magnético secundario, medido directamente como la derivada temporal  $dB/dt$ , y transformadas a resistividad aparente a partir de la ecuación 10.

En este trabajo, la inversión de los datos de los sondeos TEM se realizó utilizando el software Aarhus SPIA, el cual procesa las curvas de resistividad aparente-tiempo para obtener secciones de resistividad en profundidad. El perfil TEM 01 alcanzó una profundidad de investigación (DOI) de 127 metros, con un valor residual de 1.92, mientras que el TEM 02 alcanzó una DOI de 93.7 metros y un residuo de 0.94.

El perfil de resistividades del TEM 01, ubicado en el borde del campo fumarólico y en intersección con el perfil ERT 01, presenta una capa superficial altamente resistiva (valores cercanos a  $4.000 \Omega \cdot m$ ) en los primeros 13 metros (Figura 6 A). Esta capa se relaciona lateralmente con la zona de alta resistividad observada en el flanco izquierdo de las tres secciones de ERT (Figura 4 A-C), lo que indica una franja superficial de alta resistividad ubicada al límite de la influencia de las fumarolas, donde no se observan señales de alteración asociada.

Por otra parte, el modelo del sondeo TEM 02, adquirido dentro del campo fumarólico principal y coincidente con la línea ERT+IP 02, revela una zona resistiva con resistividades del orden de  $1.020 \Omega \cdot m$  entre los 24 y 75 metros de profundidad. Por debajo de esta, se observa una capa de baja resistividad muy delgada ( $<1m$ ); sin embargo, dado su escaso espesor, no se considera significativa para los fines interpretativos.. Luego, a mayor profundidad, se identifica una zona resistiva de  $4.600 \Omega \cdot m$  (Figura 6 B).

## 4. Discusión

La integración de los resultados de ERT, IP y TEM en la zona fumarólica del volcán Cerro Machín permite interpretar geoelectricamente los principales componentes del sistema fumarólico. En la zona (i), ubicada en profundidad, se identifica un cuerpo de alta resistividad que se extiende hasta aproximadamente 67 m, interpretado como una posible zona con presencia de gases. Este cuerpo resistivo se encuentra rodeado por sectores de baja resistividad, correspondientes a las zonas (ii) y (iii) (Figura 7). La zona (ii), situada hacia el flanco izquierdo de la tomografía, presenta resistividades bajas y cargabilidades cercanas a cero, consistentes con la presencia de fluidos en circulación dentro de un medio fracturado con escasa capacidad de polarización. Este comportamiento de resistividades y cargabilidades bajas ha sido también documentado en ambientes saturados por agua donde la alta conductividad del fluido y la ausencia de minerales polarizables reducen la polarización del medio (Akhtar et al., 2021). Por otra parte, la zona (iii), en el flanco derecho, también muestra resistividades bajas, pero con valores de cargabilidad tanto bajos como altos, lo que indica que esta área incluye una sección dominada por fluidos y

otra por arcillas.

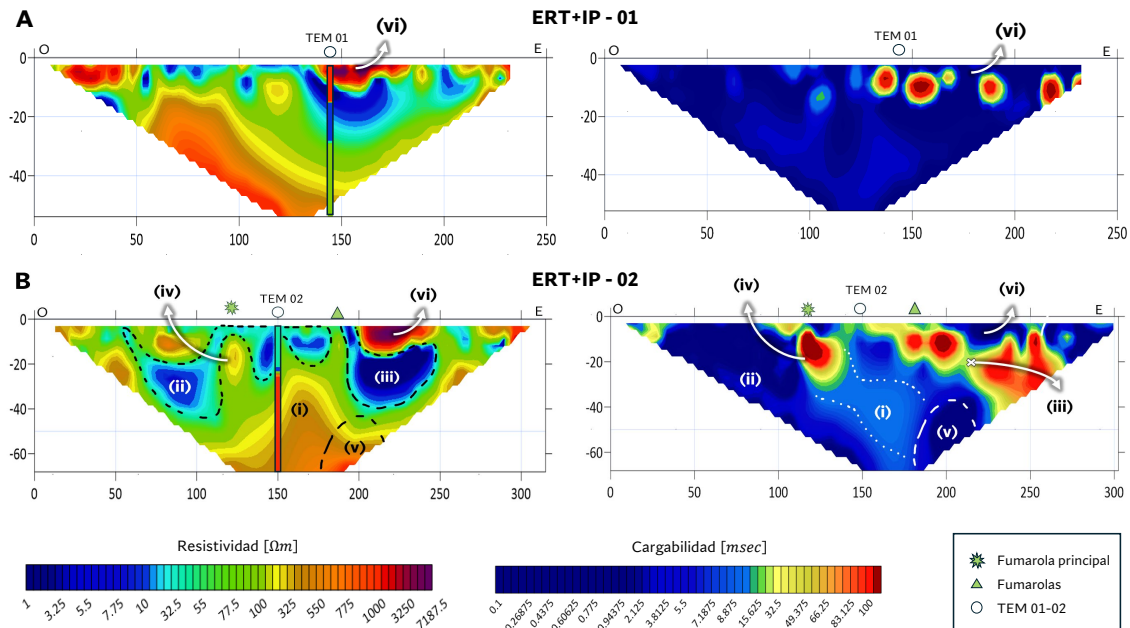


Figura 7: Secciones de resistividad (paneles izquierdos) y cargabilidad (paneles derechos) correspondientes a las líneas ERT+IP 01 (A) y ERT+IP 02 (B). Las tomografías de resistividad incluyen los perfiles 1D de TEM superpuestos como rectángulos verticales. Adicionalmente, se muestran las zonas i-vi, delineadas sobre las tomografías para facilitar su interpretación.

Debajo de fumarola principal, correspondiente a la zona (iv), se observan resistividades intermedias (150–320  $\Omega \cdot m$ ) que podrían corresponder a un conducto fumarólico a través del cual ascienden los gases. En esta misma zona (iv) y en los primeros 20 m de profundidad, justo debajo de la fumarola localizada en la abscisa 180 m (triángulo verde), la sección de cargabilidad muestra anomalías con valores elevados (12–210 ms), posiblemente atribuibles a la presencia de arcillas de alteración argílica con minerales cargables. Este comportamiento indica que el ascenso de gases calientes asociados a las fumarolas favorece la formación de arcillas por alteración del medio rocoso. La presencia superficial de estas arcillas fue corroborada durante el trabajo de campo (Figura 1 D). De manera consistente, la muestra 2 (Figura 2 C), proveniente del área de estudio, evidencia el grado de alteración de las rocas cercanas a las fumarolas, mostrando una transición hacia un carácter más arcilloso.

Por otra parte, en la zona (i) correspondiente a altas resistividades, la inversión de IP muestra una franja con cargabilidades intermedias (9–12 ms), que conecta la zona profunda de cargabilidad casi nula y resistividades aún más elevadas (zona v) con el conducto

fumarólico (zona iv) (Figura 7 B). Esta estructura podría representar el camino preferencial del flujo de gases, responsable de la alteración progresiva del medio rocoso a lo largo de su vía de ascenso, y que conecta un posible reservorio de gas somero (zona v) con el conducto fumarólico observado en la fumarola principal (zona iv) y, posiblemente, con un segundo conducto asociado a la fumarola ubicada en la abscisa 180 m.

La interpretación de la zona de alta resistividad como una zona dominada principalmente por gas conectado con conductos fumarólicos, y de las zonas de baja resistividad como áreas de circulación de fluidos hidrotermales, se sustenta en estudios previos realizados en distintos contextos fumarólicos. Gresse et al. (2018) propusieron, en la Solfatara (Campi Flegrei, Italia), la existencia de una zona de gas somero ( $\approx 60$  m de profundidad) identificado mediante ERT, conectado con las fumarolas a través de conductos resistivos. Esta zona está superpuesta por una zona de baja resistividad, interpretada como una zona dominada por fluidos líquidos. De manera similar, tanto Gresse et al. (2018) como Miller et al. (2020) identificaron conductos fumarólicos a partir de ERT, evidenciando el papel de estas estructuras como vías preferenciales de ascenso de gases en sistemas volcánicos activos. Estudios más recientes en Hakone (Japón) (Mannen et al., 2025) reportaron zonas de gas profundas someras directamente asociadas con la actividad fumarólica. Por su parte, en Haukadalur (Islandia), Lupi et al. (2022) describieron un cuerpo resistivo controlado estructuralmente bajo los géiseres, correspondiente a una zona de gases. Una de las principales ventajas de combinar los resultados de ERT con los de IP radica en que esta última permite distinguir entre zonas dominadas por fluidos líquidos y aquellas con presencia de arcillas alteradas, algo que la resistividad por sí sola no puede resolver con claridad. Como se mencionó anteriormente, las bajas resistividades han sido comúnmente interpretadas como indicativas de circulación de fluidos líquidos. Sin embargo, en este trabajo, la zona (iii), caracterizada por resistividades bajas, mostró tanto valores bajos como altos de cargabilidad, lo que podría indicar que esta área incluye una sección dominada por fluidos y otra por arcillas alteradas. Esta evidencia demuestra la utilidad de la integración ERT-IP para diferenciar materiales con propiedades electroquímicas contrastantes dentro de sistemas fumarólicos complejos.

La franja superficial de alta resistividad y baja cargabilidad (abscisa 200–250 m en la Figura 7), identificada en todas las tomografías (zona vi), sugiere la presencia de un medio poco polarizable y de escasa saturación, consistente con roca dacítica fresca y poco alterada. Esta zona se ubica por fuera del borde del campo fumarólico, en un sector con escasa alteración. La muestra 1 (Figura 2 C), tomada cerca del borde del campo fumarólico, corresponde a una roca fresca, posiblemente dacítica, sin alteración significativa, lo que podría respaldar la interpretación de bajas cargabilidades y alta resistividad en esta franja.

Por otro lado, la incorporación de los sondeos electromagnéticos transitorios (TEM) permitió complementar de manera significativa la información obtenida con ERT, aportando un mayor alcance en profundidad y sirviendo como herramienta de validación de la distribución de resistividades. La Figura 7 en las secciones de resistividad (paneles izquierdos) muestra los sondeos TEM 01 y 02 representados como barras verticales con sus resistivi-

dades correspondientes, superpuestos sobre las tomografías y empleando la misma escala de colores. Para facilitar la visualización, los sondeos se representaron únicamente hasta la máxima profundidad alcanzada por ERT; no obstante, a mayores profundidades ambos perfiles TEM mantienen un comportamiento coherente con las tendencias observadas en los intervalos superiores (Figura 6). De acuerdo con esto, la Figura 7 evidencia que los sondeos TEM 01 y TEM 02 presentan un comportamiento consistente con los resultados de las tomografías correspondientes.

En el sondeo TEM-02, ubicado en la porción central del campo fumarólico (Figuras 2 B y 6 B), se observa una clara correspondencia con la distribución de resistividades obtenida en la línea ERT+IP 02 (Figura 7 B). El perfil 1D muestra una zona de alta resistividad ( $1.020 \Omega \cdot m$ ) que se extiende desde aproximadamente 25 m hasta 75 m de profundidad, coincidiendo con las mayores resistividades registradas en el cuerpo resistivo de la zona v en la tomografía eléctrica. Por debajo de esta, se observa una capa delgada ( $<1$  m) de muy baja resistividad, superpuesta a otra capa de resistividad aún mayor ( $>4.000 \Omega \cdot m$ ). Este patrón podría corresponder a un sector más resistivo en profundidad, registrado por el TEM-02 más allá del límite superior observado en la ERT. Aunque la extensión completa de este sector no puede definirse con certeza únicamente a partir de la ERT, los resultados del TEM sugieren la continuidad de la alta resistividad hacia niveles más profundos, consistente con la presencia de un cuerpo profundo asociado a gases.

En conjunto, los resultados permiten proponer un modelo conceptual del sistema fumarólico del VCM coherente con la interpretación presentada en la Figura 7. Este modelo sugiere la presencia de una zona dominada de gas. Sobre esta zona se desarrollan conductos fumarólicos que canalizan el ascenso de gases hacia la superficie, mientras que en torno a las fumarolas se han identificado arcillas generadas por la alteración del medio rocoso, así como zonas fracturadas con circulación de fluidos (Figura 8).

Por último, la distribución de las fumarolas en el domo del VCM se concentra en un sector topográficamente elevado, lo que sugiere que su ubicación podría estar influenciada por un control morfológico. Según Schöpa et al. (2011), las fumarolas tienden a concentrarse en zonas topográficamente elevadas o en bordes morfológicos, donde la reducción de los esfuerzos horizontales favorece la apertura de microfracturas y, en consecuencia, el ascenso de fluidos.

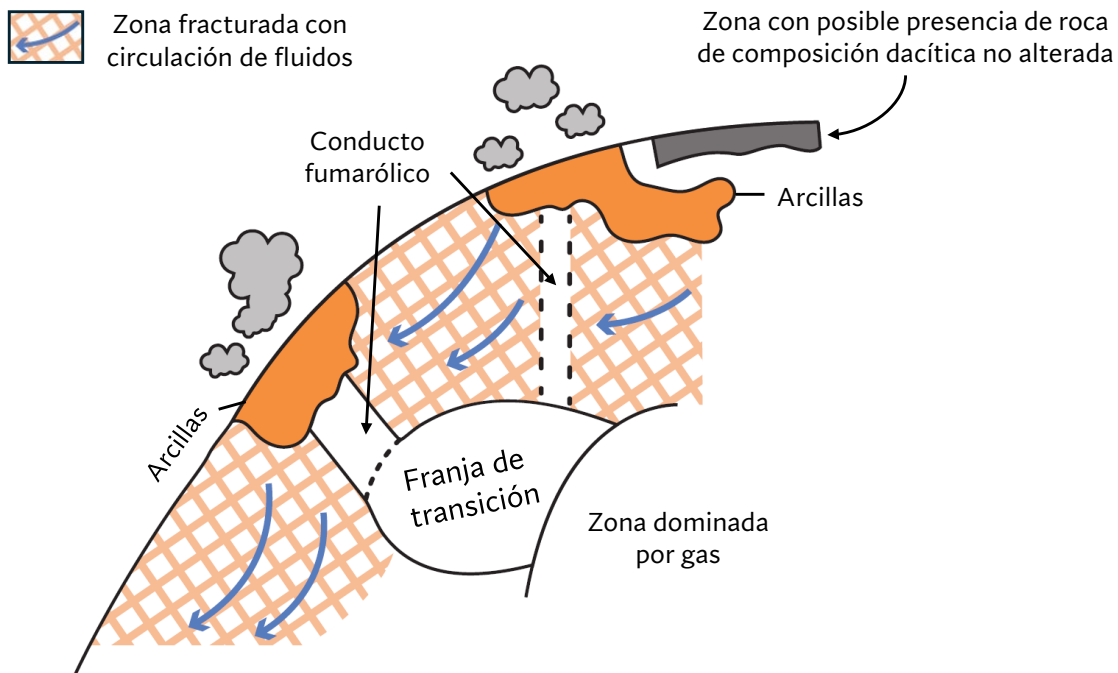


Figura 8: Esquema conceptual del sistema fumarólico del domo del Volcán Cerro Machín, basado en los resultados integrados de ERT, IP y TEM. Se interpreta la presencia de una zona dominada por gas en profundidad, conectado con la superficie mediante conductos fumarólicos que atraviesan una franja de transición caracterizada por resistividades altas y cargabilidades intermedias. En la proximidad de las fumarolas se desarrollan arcillas producto de la alteración, mientras que las zonas laterales corresponden a áreas fracturadas con circulación de fluidos líquidos. En el flanco derecho, en la zona sin presencia de fumarolas, se distingue una franja superficial de alta resistividad y baja cargabilidad, interpretada como posible roca de composición dacítica fresca.

En el caso del Cerro Machín, el campo fumarólico principal se ubica próximo al alto topográfico más pronunciado del domo, lo que indica que la topografía podría estar controlando la distribución de las manifestaciones superficiales. De acuerdo con Schöpa et al. (2011), los factores estructurales desempeñan un papel más localizado, influyendo en la permeabilidad del medio y en la posición puntual de las fumarolas. En el área de estudio no se han identificado fallas que evidencien un control estructural regional; sin embargo, la presencia de fracturas o variaciones litológicas locales podría favorecer la migración de gases y fluidos hacia la superficie. En este contexto, la zona fumarólica del Cerro Machín puede considerarse un entorno altamente fracturado, donde el control topográfico del domo constituye el factor predominante, complementado por controles locales aún no caracterizados.

## 5. Conclusiones

- La aplicación de los métodos de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT), y Método Electromagnético Transitorio (TEM) en el domo del Volcán Cerro Machín permitió obtener una caracterización de la distribución de resistividades en la zona fumarólica.
- Los resultados demuestran que la integración de ERT e IP constituye una herramienta eficaz para reducir la ambigüedad interpretativa en ambientes volcánicos. En particular, la capacidad de la IP para diferenciar zonas dominadas por fluidos líquidos de aquellas con presencia de arcillas alteradas permite refinar la caracterización del sistema fumarólico.
- Asimismo, la incorporación del método TEM extendió la investigación a mayores profundidades y permitió validar la continuidad del cuerpo resistivo profundo, interpretado como un posible zona dominada por gas. Esta zona alimentaría los conductos fumarólicos que canalizan el ascenso de gases hacia la superficie, generando procesos de alteración local reflejados en las zonas de alta cargabilidad.
- Las secciones de resistividad revelaron cuerpos de alta resistividad, interpretados como zonas con presencia de gases, rodeados por sectores de baja resistividad y baja cargabilidad, que sugieren la circulación de fluidos líquidos. Las resistividades altas observadas bajo las fumarolas forman lineamientos interpretados como posibles conductos fumarólicos. La tomografía de cargabilidad permitió delinear una franja de transición entre la zona dominada por gas y los conductos fumarólicos. Además, en las proximidades de las fumarolas, se identificaron zonas de alta cargabilidad asociadas a la presencia de arcillas, que por su alta capacidad de polarización, confirman procesos de alteración en el domo.
- La distribución espacial de las fumarolas parece estar controlada principalmente por la topografía del domo, de manera similar a lo observado en La Fossa (Volcano). Factores litológicos y estructurales tendrían una influencia más localizada, facilitando la migración puntual de fluidos.
- Los resultados obtenidos aportan una primera caracterización geoelectrica de la zona fumarólica del VCM, constituyendo una línea base para futuros estudios. Se recomienda complementar esta interpretación con otros métodos que permitan alcanzar mayores profundidades de investigación e incluir análisis adicionales que fortalezcan la comprensión de la dinámica hidrotermal del domo y su relación con la actividad volcánica.

## **Agradecimientos**

Este trabajo se realizó en el marco del proyecto “Integración de muongrafía con métodos geofísicos estándar para la construcción de un modelo 3D de densidad: aplicación al Volcán Cerro Machín”, financiado con recursos de Minciencias por medio de la convocatoria 890 de 2020 y administrados por el ICETEX mediante contrato No. 2022-0718.

## Referencias bibliográficas

- Akhtar, D., Mislan, M., Syakir, M., Anees, M. T., & Md Yusuff, M. S. (2021). Characterization of aquifer system using electrical resistivity tomography (ERT) and induced polarisation (IP) techniques. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 880, 012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/880/1/012025>
- Bortolozzo, C. A., Campaña, J. D. R., Santos, F. A. M. D., De Oliveira, G. S., Porsani, J. L., Pryer, T., & Sialounas, G. (2024). Joint Inversion of DC and TEM Methods for Geological Imaging. *Pure and Applied Geophysics*, 181(8), 2541-2560. <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03529-6>
- Bourdon, E., Eissen, J.-P., Gutscher, M.-A., Monzier, M., Hall, M. L., & Cotten, J. (2003). Magmatic response to early aseismic ridge subduction: the Ecuadorian margin case (South America). *Earth and Planetary Science Letters*, 205(3-4), 123-138. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)01024-5](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)01024-5)
- Byrdina, S., Vandemeulebrouck, J., Cardellini, C., Legaz, A., Camerlynck, C., Chiodini, G., Lebourg, T., Gresse, M., Bascou, P., Motos, G., et al. (2014). Relations between electrical resistivity, carbon dioxide flux, and self-potential in the shallow hydrothermal system of Solfatara (Phlegrean Fields, Italy). *Journal of volcanology and geothermal research*, 283, 172-182. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.07.010>
- Chiodini, G., Paonita, A., Aiuppa, A., Costa, A., Caliro, S., De Martino, P., Acocella, V., & Vandemeulebrouck, J. (2016). Magmas near the critical degassing pressure drive volcanic unrest towards a critical state. *Nature communications*, 7(1), 13712. <https://doi.org/10.1038/ncomms13712>
- Christiansen, A. V., Auken, E., & Sørensen, K. (2006). The transient electromagnetic method. En *Groundwater geophysics: A tool for hydrogeology* (pp. 179-225). Springer. [https://doi.org/10.1007/3-540-29387-6\\_6](https://doi.org/10.1007/3-540-29387-6_6)
- Constable, S. C., Parker, R. L., & Constable, C. G. (1987). Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52(3), 289-300. <https://doi.org/10.1190/1.1442303>
- de Moor, J. M., Aiuppa, A., Pacheco, J., Avaró, G., Kern, C., Liuzzo, M., Martínez, M., Giudice, G., & Fischer, T. P. (2016). Short-period volcanic gas precursors to phreatic eruptions: Insights from Poás Volcano, Costa Rica. *Earth and Planetary Science Letters*, 442, 218-227. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.02.056>
- Díaz, E. G., & Arias, O. M. M. (2020). Structural assessment and geochemistry of thermal waters at the Cerro Machin Volcano (Colombia): An approach to understanding the geothermal system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 400, 106910. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106910>
- Diliberto, I. S. (2017). Long-term monitoring on a closed-conduit volcano: A 25 year long time-series of temperatures recorded at La Fossa cone (Vulcano Island, Italy),

- ranging from 250 C to 520 C. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 346, 151-160. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.03.005>
- Errázuriz-Henao, C., Gómez-Tuena, A., Duque-Trujillo, J., & Weber, M. (2019). The role of subducted sediments in the formation of intermediate mantle-derived magmas from the Northern Colombian Andes. *Lithos*, 336, 151-168. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.04.007>
- Fischer, T. P., & Chiodini, G. (2015). Volcanic, magmatic and hydrothermal gases. En *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 779-797). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00045-6>
- Fischer, T. P., Sturchio, N. C., Stix, J., Arehart, G. B., Counce, D., & Williams, S. N. (1997). The chemical and isotopic composition of fumarolic gases and spring discharges from Galeras Volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77(1-4), 229-253. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(96\)00096-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0377-0273(96)00096-0)
- Ghorbani, A., Revil, A., Coperey, A., Ahmed, A. S., Roque, S., Heap, M., Grandis, H., & Viveiros, F. (2018). Complex conductivity of volcanic rocks and the geophysical mapping of alteration in volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 357, 106-127. <https://doi.org/10.1016/J.JVOLGEORES.2018.04.014>
- Gresse, M., Vandemeulebrouck, J., Byrdina, S., Chiodini, G., Revil, A., Johnson, T. C., Ricci, T., Vilaro, G., Mangiacapra, A., Lebourg, T., et al. (2017). Three-dimensional electrical resistivity tomography of the Solfatara crater (Italy): Implication for the multiphase flow structure of the shallow hydrothermal system. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(11), 8749-8768. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2017JB014389>
- Gresse, M., Vandemeulebrouck, J., Byrdina, S., Chiodini, G., Roux, P., Rinaldi, A. P., Wathelot, M., Ricci, T., Letort, J., Petrillo, Z., et al. (2018). Anatomy of a fumarolic system inferred from a multiphysics approach. *Scientific reports*, 8(1), 7580. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25448-y>
- Gross, L., Ahmed, A. S., & Revil, A. (2021). Induced polarization of volcanic rocks. 4. Large-scale induced polarization imaging. *Geophysical Journal International*, 225, 950-967. <https://doi.org/10.1093/GJI/GGAB018>
- Hall, M., & Wood, C. (1985). Volcano-tectonic segmentation of the northern Andes. *Geology*, 13(3), 203-207. [https://doi.org/https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1985\)13<203:VSOTNA>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1130/0091-7613(1985)13<203:VSOTNA>2.0.CO;2)
- Laeger, K., Halama, R., Hansteen, T., Savov, I. P., Murcia, H. F., Cortés, G. P., & Garbe Schönberg, D. (2013). Crystallization conditions and petrogenesis of the lava dome from the 900 years BP eruption of Cerro Machín Volcano, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 48, 193-208. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.09.009>
- Loke, M. H. (1999). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. *A practical guide to*, 2, 70.
- Londono, J. M. (2016). Evidence of recent deep magmatic activity at Cerro Bravo-Cerro Machín volcanic complex, central Colombia. Implications for future volcanic acti-

- vity at Nevado del Ruiz, Cerro Machín and other volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 324, 156-168. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.06.003>
- Lupi, M., Collignon, M., Fischanger, F., Carrier, A., Trippanera, D., & Pioli, L. (2022). Geysers, boiling groundwater and tectonics: The 3D subsurface resistive structure of the Haukadalur hydrothermal field, Iceland. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(11), e2022JB024040. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2022JB024040>
- Mannen, K., Doke, R., Johmori, A., Kikugawa, G., Minami, T., Takahashi, T., Utsugi, M., & Fujimoto, K. (2025). Anatomy of the fumarole field of Hakone Volcano, Japan: Interpretation of its resistivity structure and inferences for the steaming activity and recent hydrothermal eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 108363. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2025.108363>
- Martin, T., Titov, K., Tarasov, A., & Weller, A. (2021). Spectral induced polarization: frequency domain versus time domain laboratory data. *Geophysical Journal International*. <https://doi.org/10.1093/GJI/GGAB071>
- Miller, C. A., Christenson, B. W., Byrdina, S., Vandemeulebrouck, J., Brakenrig, T., Britten, K., Shanks, J., & Epstein, G. (2020). Snapshot of a magmatic/hydrothermal system from electrical resistivity tomography and fumarolic composition, Whakaa-ri/White Island, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 400, 106909. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106909>
- Mosquera, D., Nuñez, A., & Vesga, J. (1982). Geological Map Ibagué (Página 244, 1:100.000).
- Murcia, H., Sheridan, M., Macías, J., & Cortés, G. (2010). TITAN2D simulations of pyroclastic flows at Cerro Machín Volcano, Colombia: Hazard implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(2), 161-170. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.09.005>
- Ortiz, J., García, J. S., Murcia, H., Schonwalder-Ángel, D., & Sánchez-Torres, L. (2023). The relation between monogenetic and polygenetic dacitic volcanism. Case study from Tapias dome (<95 ka) and Cerro Machín volcano (<50 ka), Colombia. *Boletín de Geología*, 45(1), 15-35. <https://doi.org/https://doi.org/10.18273/revbol.v45n1-2023001>
- Piedrahita, D. A., Aguilar-Casallas, C., Arango-Palacio, E., Murcia, H., & Gómez-Arango, J. (2018). Estratigrafía del cráter y morfología del volcán Cerro Machín, Colombia. *Boletín de Geología*, 40, 29-48. <https://doi.org/https://doi.org/10.18273/revbol.v40n3-2018002>
- Revil, A., & Gresse, M. (2021). Induced Polarization as a Tool to Assess Alteration in Geothermal Systems: A Review. *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min11090962>
- Revil, A., Qi, Y., Panwar, N., Gresse, M., Grandis, H., Sharma, R., Géraud, Y., Chibati, N., & Ghorbani, A. (2022). Induced polarization images alteration in stratovolcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 429, 107598. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107598>

- Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/https://doi.org/10.1071/PVv2011n155other>
- Rueda, H., Macias, J., Siebe, C., Cepeda, H., Méndez, R., & Cortés, G. (2005). Holocene eruptions of Machin Volcano: stratigraphy and eruptive dynamics. *AGU Fall Meeting Abstracts, 2005*, V53B-1551. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2005AGUFM.V53B1551R>
- Schöpa, A., Pantaleo, M., & Walter, T. R. (2011). Scale-dependent location of hydrothermal vents: Stress field models and infrared field observations on the Fossa Cone, Vulcano Island, Italy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 203(3-4), 133-145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.03.008>
- Servicio Geológico Colombiano. (2024). Boletín semanal de actividad: Volcán Cerro Machín [Boletín del 19 de marzo al 25 de marzo de 2024]. [https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin\\_semanal\\_de\\_actividad\\_del\\_volcan\\_Cerro\\_Machin\\_del\\_19\\_de\\_marzo\\_al\\_25\\_de\\_marzo\\_de\\_2024.pdf](https://www2.sgc.gov.co/Noticias/boletinesDocumentos/Boletin_semanal_de_actividad_del_volcan_Cerro_Machin_del_19_de_marzo_al_25_de_marzo_de_2024.pdf)
- Tamburello, G., Moune, S., Allard, P., Venugopal, S., Robert, V., Rosas-Carbajal, M., Deroussi, S., Kitou, G.-T., Didier, T., Komorowski, J.-C., et al. (2019). Spatio-temporal relationships between fumarolic activity, hydrothermal fluid circulation and geophysical signals at an arc volcano in degassing unrest: La Soufrière of Guadeloupe (French West Indies). *Geosciences*, 9(11), 480. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/geosciences9110480>
- Thouret, J.-C., Cantagrel, J., Robin, C., Murcia, A., Salinas, R., & Cepeda, H. (1995). Quaternary eruptive history and hazard-zone model at Nevado del Tolima and Cerro Machin volcanoes, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 66(1-4), 397-426. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)00073-P](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)00073-P)
- Troiano, A., Isaia, R., Tramparulo, F. D., & Giuseppe, M. D. D. (2021). The Pisciarelli main fumarole mechanisms reconstructed by electrical resistivity and induced polarization imaging. *Scientific Reports*, 11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97413-1>
- Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A., Winkler, W., & Beltrán, A. (2011). Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central cordilleras of Colombia. *Lithos*, 125(3-4), 875-896. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.05.003>
- Zohdy, A. A., Anderson, L., & Muffler, L. P. (1973). Resistivity, self-potential, and induced polarization surveys of a vapor-dominated geothermal system. *Geophysics*, 38(6), 1130-1144. <https://doi.org/https://doi.org/10.1190/1.1440400>