



# Modelo de la estructura interna del volcán Puracé y la Cadena Volcánica de Los Coconucos (Colombia), a partir de datos gravimétricos y magnéticos

Patricia Ponce<sup>1\*</sup> ; Adriana Ortega<sup>1</sup> ; John Makario Londoño<sup>1</sup> ;  
María Luisa Monsalve<sup>1</sup> ; Carlos Ospina<sup>1</sup> ; Beatriz Galvis<sup>1</sup> ;  
Jorge Alpala<sup>1</sup> ; Lourdes Narváez<sup>1</sup> ; Rosa Alpala<sup>1</sup> ; Darío Arcos<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia. (\*) pponce@sgc.gov.co; aortega@sgc.gov.co; jmakario@sgc.gov.co; mmonsalve@sgc.gov.co; cospina@sgc.gov.co; bgalvis@sgc.gov.co; jalpala@sgc.gov.co; lnarvaez@sgc.gov.co; ralpala@sgc.gov.co; darcos@sgc.gov.co

## Resumen

Se llevó a cabo un estudio de gravimetría y magnetometría en la zona de influencia del volcán Puracé y la cadena volcánica de Los Coconucos (Colombia), con el fin de obtener dos modelos geofísicos 2D de las principales estructuras geológicas presentes en el área estudiada. En 2017 se midieron 272 puntos con datos de gravimetría, magnetometría y coordenadas con el Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS por sus siglas en inglés) en la zona mencionada, condicionada por su topografía montañosa, vegetación densa de bosque alto andino y vías de difícil acceso. A partir de las anomalías gravimétricas y magnéticas obtenidas y con la información geológica disponible, se formularon dos modelos 2D con base en dos perfiles, uno paralelo al trazo del Lineamiento Coconucos y el otro perpendicular al primero, ambos pasando por el cono activo del volcán Puracé. La interpretación de estos modelos, en conjunto con la geología de la zona, permitieron modelar cuerpos que se proponen como las estructuras internas de la caldera de Chagartón, de los volcanes Pre-Puracé y el Puracé Actual y parte de las cámaras magmáticas de los otros centros eruptivos de la cadena volcánica de Los Coconucos. Estas estructuras volcánicas al parecer están separadas por límites o zonas de debilidad que sugieren fallas en profundidad por donde se emplazaron dichos cuerpos de magma. La configuración interna del volcán Puracé y los centros eruptivos cercanos, propuesta en este trabajo, también proporciona información importante para la interpretación de la evolución de la Cadena Volcánica de Los Coconucos.

**Palabras clave:** Estructura volcánica; Anomalía gravimétrica; Anomalía magnética; Modelamiento geofísico 2D.

## Model of the inner structure of Puracé volcano and Los Coconucos Volcanic Chain, based on gravimetric and magnetic data

### Abstract

A gravimetry and magnetometry study was performed in the Puracé volcano and Los Coconucos volcanic chain (Colombia) influence zone, in order to obtain two 2D geophysical models of the main geological structures beneath of the studied area. During 2017, 272 points were measured, with data of gravimetry, magnetometry and coordinates with the Global Navigation Satellite System (GNSS), the field work was conditioned by the mountainous topography, dense high Andean forest vegetation and difficult access roads. Founded on the gravity and magnetic anomalies and with the available geological information, two 2D models were formulated with two profiles, one parallel to Coconucos

Forma de citar: Ponce, P.; Ortega A.; Londoño, J.M.; Monsalve, M.L.; Ospina, C.; Galvis, B.; Alpala, J.; Narváez, L.; Alpala, R.; Arcos, D. (2024). Modelo de la estructura interna del volcán Puracé y la Cadena Volcánica de Los Coconucos (Colombia), a partir de datos gravimétricos y magnéticos. *Boletín de Geología*, 46(1), 13-31. <https://doi.org/10.18273/revbol.v46n1-2024001>

Lineament and the other perpendicular to the first, both passing through the active cone of the Puracé volcano. The interpretation of these models, together with the geology of the area, allowed the modeling of bodies that are proposed as the internal structures of the Chagartón caldera, the Pre-Puracé and Actual Puracé volcanoes, and part of the magmatic chambers of the other eruptive centers of the Los Coconucos volcanic chain. These volcanic structures are apparently separated by limits or zones of weakness that suggest faults in depth and where these magma bodies were emplaced. The internal configuration of the Puracé volcano and the nearby eruptive centers, proposed in this work, also provides important information for the interpretation of the evolution of the Los Coconucos Volcanic Chain.

**Keywords:** Volcanic structure; Gravity anomaly; Magnetic anomaly; 2D geophysical modeling.

## Introducción

En volcanes activos es importante determinar su estructura interna para ampliar el conocimiento de su estilo e historia eruptiva, especialmente si estos volcanes han estado activos en tiempos históricos, como es el caso del volcán Puracé, el centro eruptivo más activo de la Cadena Volcánica de Los Coconucos, en adelante CVLC.

La aplicación de los métodos gravimétrico y magnético permite obtener modelos geofísicos del sistema interno de un volcán y las potenciales estructuras situadas bajo el edificio volcánico o en el subsuelo de su región de influencia, que posibiliten la demarcación de rutas de ascenso, cámaras de almacenamiento de magma y extensión del sistema hidrotermal. Los modelos geofísicos también permiten conocer la distribución interna de las propiedades físicas tales como la densidad y la susceptibilidad magnética, que pueden ser usadas para ayudar en la interpretación de los procesos que ocurren durante periodos eruptivos o periodos de reposo.

Estudios geofísicos basados en gravimetría y magnetometría, tendientes a determinar la estructura interna se han desarrollado en otras zonas volcánicas, entre otros se pueden mencionar los desarrollados en el Complejo Volcánico Central de Tenerife, España (Gottsmann *et al.*, 2008); en el Monte Tongariro, Nueva Zelanda (Miller y Williams-Jones, 2016); en el volcán Puy de Dôme, Francia (Portal *et al.*, 2016); en la Cadena Volcánica de Palinuro, Italia (Cocchi *et al.*, 2017); en el Lago Rotomahana, Centro Volcánico Okataina, Nueva Zelanda (Caratori-Tontini *et al.*, 2016); en la Provincia Volcánica Payenia, Argentina (Astort *et al.*, 2019); en la Caldera La Primavera, México (Almaguer *et al.*, 2020); en el Campo Volcánico San Francisco, Arizona, USA (Mickus y Durrani, 1996); en el Campo Volcánico Rahat, Arabia Saudita (Aboud *et al.*, 2015); en los Volcanes Rychnov, República Checa (Skácelová *et al.*, 2010); en

la Isla Volcánica Ischia, Italia (Paoletti *et al.*, 2017); en la Caldera de Kilauea, Hawai'i, USA (Zurek y Williams-Jones, 2013); en el área del volcán El Chichón, México (López-Loera, *et al.*, 2020); en el Maar de Joya Honda, México (López-Loera *et al.*, 2008); en la región volcánica Iztaccíhuatl-Popocatepetl, México (Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 2002); en el Volcán de Colima, México (López-Loera, 2012), y en este trabajo, se aplican al sector noroccidental de la CVLC.

La Cadena Volcánica de Los Coconucos, se encuentra situada en el límite de los departamentos de Cauca y Huila, en la Cordillera Central de Colombia, con coordenadas centrales 2°17'32" de Latitud N y 76°22'41" de Longitud W, los volcanes de La CVLC se consideran activos, el punto central de la cadena se encuentra a 32 km al ESE de la ciudad de Popayán (Cauca), 140 km al SW de la ciudad de Neiva (Huila) y 365 km al SW de la ciudad de Bogotá D.C. (SGC, 2022a).

La CVLC está conformada por 15 centros eruptivos, la mayoría de ellos alineados en dirección NW – SE: el volcán Puracé, en el extremo NW, Piocollo, Curiquina, Calambas – Paletará, Quintín, Shaka (3 centros), Killa, Machángara, los volcanes Pan de Azúcar y Pukará en el extremo SE, y en el flanco NE los centros eruptivos Piki y Amankay (Figura 1, Figura 2). Esta cadena tiene 6,5 km de longitud, medidos desde el cráter del volcán Puracé hasta el cráter del volcán Pan de Azúcar (Monsalve y Pulgarín, 1999).

En el extremo noroccidental de la CVLC, se encuentra el volcán Puracé (2°19'01" N, 76°23'53" W y 4640 msnm), considerado uno de los volcanes más activos de Colombia y el más activo de la cadena. En la zona de influencia de la CVLC se encuentran la cabecera municipal Coconuco y los corregimientos de Puracé, Paletará y Santa Leticia del Municipio de Puracé, sumando alrededor de 15.000 habitantes en sus cercanías (Monsalve *et al.*, 2014). La CVLC hace parte

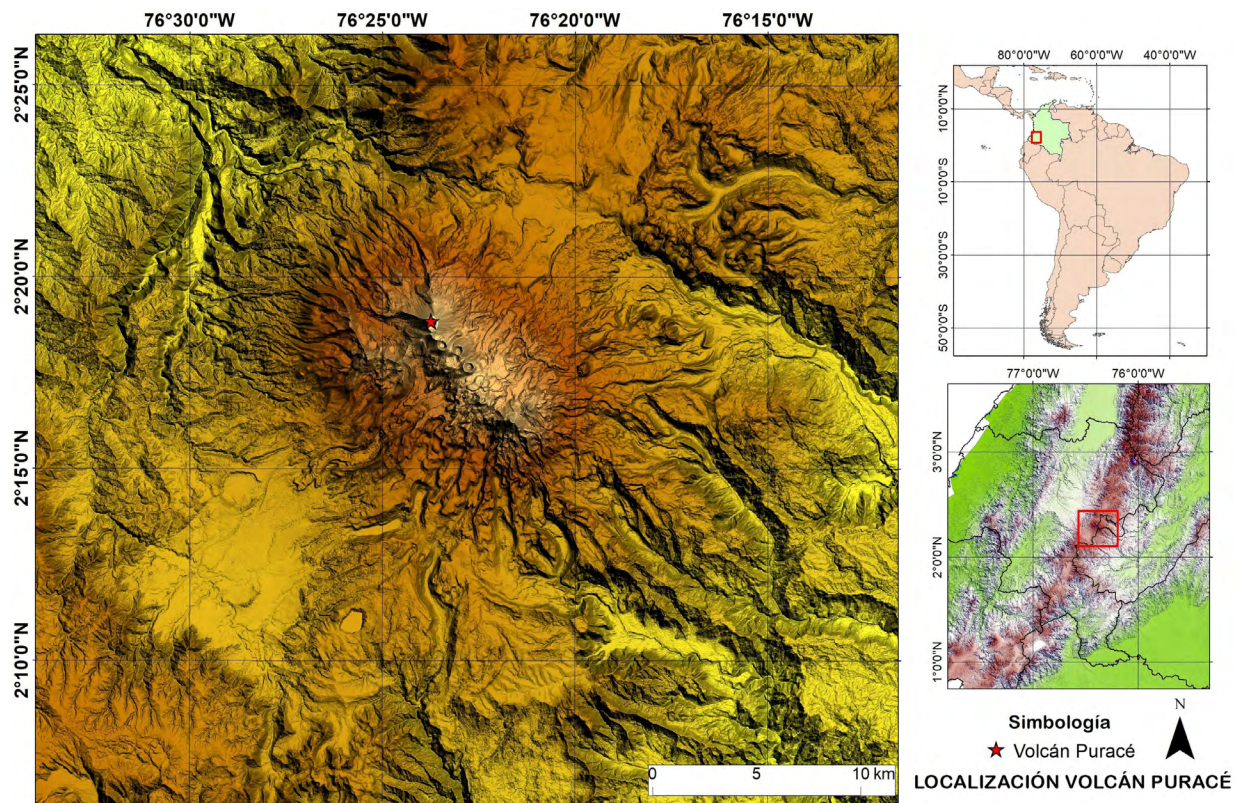
del Parque Natural Puracé, que alberga ecosistemas de bosque andino, alto andino y páramo (Parques Nacionales, 2021), en el límite entre los departamentos de Cauca y Huila (Monsalve *et al.*, 2014).

Puracé es un estrato volcán activo, cuya actividad reciente es principalmente de tipo explosivo, que ha generado corrientes de densidad piroclástica y caídas de piroclastos, acompañados por ondas de choque y lahares; su historia eruptiva también incluye extrusión de domos y flujos de lava. El volcán ha presentado una importante actividad en épocas prehispánicas e históricas, registrada en la tradición oral de los habitantes y en diferentes medios de comunicación, con al menos 51 eventos eruptivos reportados entre 1400 y 1977 (Monsalve *et al.*, 2014).

A partir de 1993 se inicia, por parte del Servicio Geológico Colombiano – SGC, el monitoreo permanente de la CVLC, desde el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán, con la

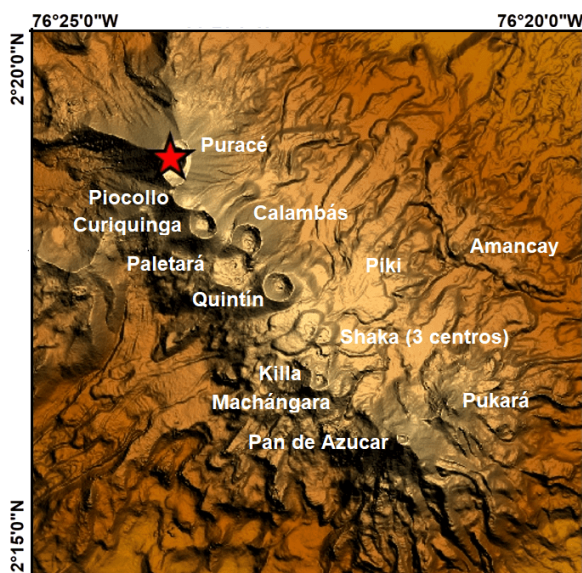
instalación de una estación sísmica en el volcán Puracé. Actualmente se cuenta con una red de instrumentos que registran actividad sísmica, deformación cortical, actividad superficial, geoquímica y otros parámetros geofísicos, la cual está compuesta por 108 estaciones, 57 con registro telemétrico en tiempo real y 51 con muestreo *in situ*.

La red de monitoreo del volcán Puracé – CVLC cuenta con 14 estaciones sísmicas, 5 inclinómetros electrónicos, 14 estaciones GNSS, 2 bases y 11 reflectores EDM, 2 magnetómetros, 2 sensores de potencial espontáneo, 4 cámaras web, 9 estaciones para monitoreo de emisiones de Radón y CO<sub>2</sub> en suelos, 13 estaciones no telemétricas de CO<sub>2</sub>, 2 estaciones de monitoreo espectrométrico de SO<sub>2</sub>, 3 estaciones meteorológicas, 1 estación termométrica con un acople de 3 sensores de temperatura en fumarola, adicionalmente se incluyen 12 puntos de muestreo *in situ* de aguas termales y algunos puntos de muestreo de gases *in situ* en fumarola.



**Figura 1.** Mapa de localización de la zona de estudio, la estrella indica la ubicación del volcán Puracé y hacia el suroccidente del mismo se encuentran los otros centros eruptivos de la Cadena Volcánica de Los Coconucos.





**Figura 2.** Detalle de la cima de la zona de estudio, la estrella indica la ubicación del volcán Puracé y hacia el suroccidente del mismo se encuentran los otros 14 centros eruptivos de la Cadena Volcánica de Los Coconucos.

La actividad actual comprende fumarolas activas con emisión continua de gases en el volcán Puracé, presencia de aguas termales, sismicidad originada por movimiento de los fluidos internos y sismos de fractura, algunos de los cuales son sentidos por los pobladores de su zona de influencia (SGC, 2022b). Cambios paulatinos en la actividad en la CVLC, registrados por la red de monitoreo, precedieron una pequeña explosión ocurrida el día 29 de marzo de 2022 y la formación de una grieta al interior del cráter del volcán Curiquina, a través de la cual fueron emitidos piroclastos de caída, tanto ceniza como bloques. A la fecha, el volcán Puracé era el único volcán de la CVLC con reportes de erupciones históricas (SGC, 2022a).

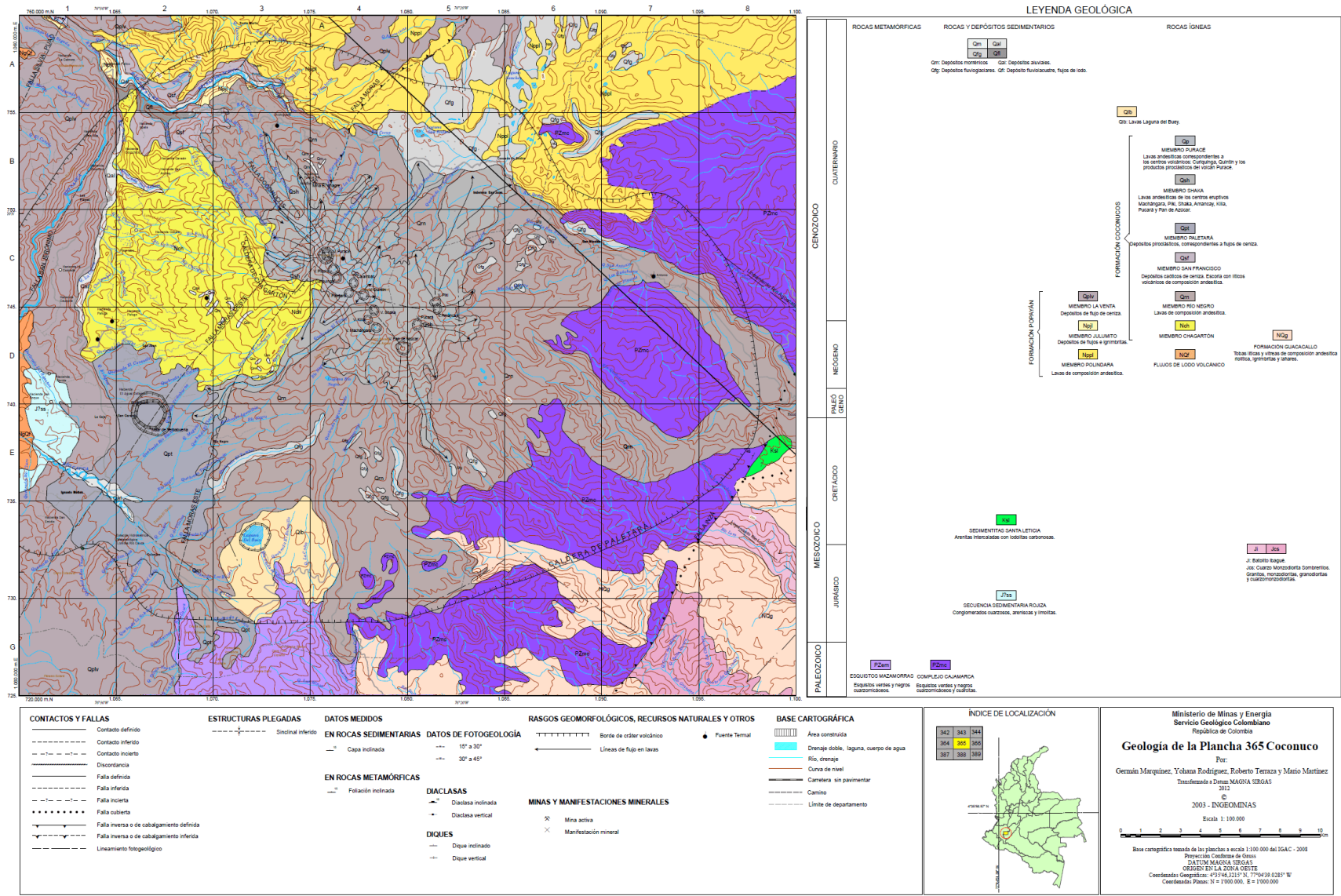
Para contribuir con la reconstrucción de su historia evolutiva, en este estudio se proponen dos modelos geofísicos 2D de la CVLC, combinando datos gravimétricos, magnéticos, sísmicos y geológicos. Con estos modelos se busca inferir posibles estructuras internas, asociadas con la actividad volcánica de la CVLC, en particular del volcán Puracé y su entorno.

### Contexto geológico y estructural

La zona de estudio se encuentra dentro de la caldera de Paletará, estructura con un diámetro aproximado de 35 km, localizada en el sector comprendido por el valle de Paletará y la laguna de San Rafael. En su interior y bordes, se encuentra la CVLC y otros edificios volcánicos asociados al patrón estructural y vulcanismo resurgente, como son la caldera de Chagartón, el

Complejo Volcánico de Sotará, los volcanes Carga Chiquito y el Cerro Pusná, la zona está cubierta por los productos eruptivos de la CVLC (Torres *et al.*, 1999).

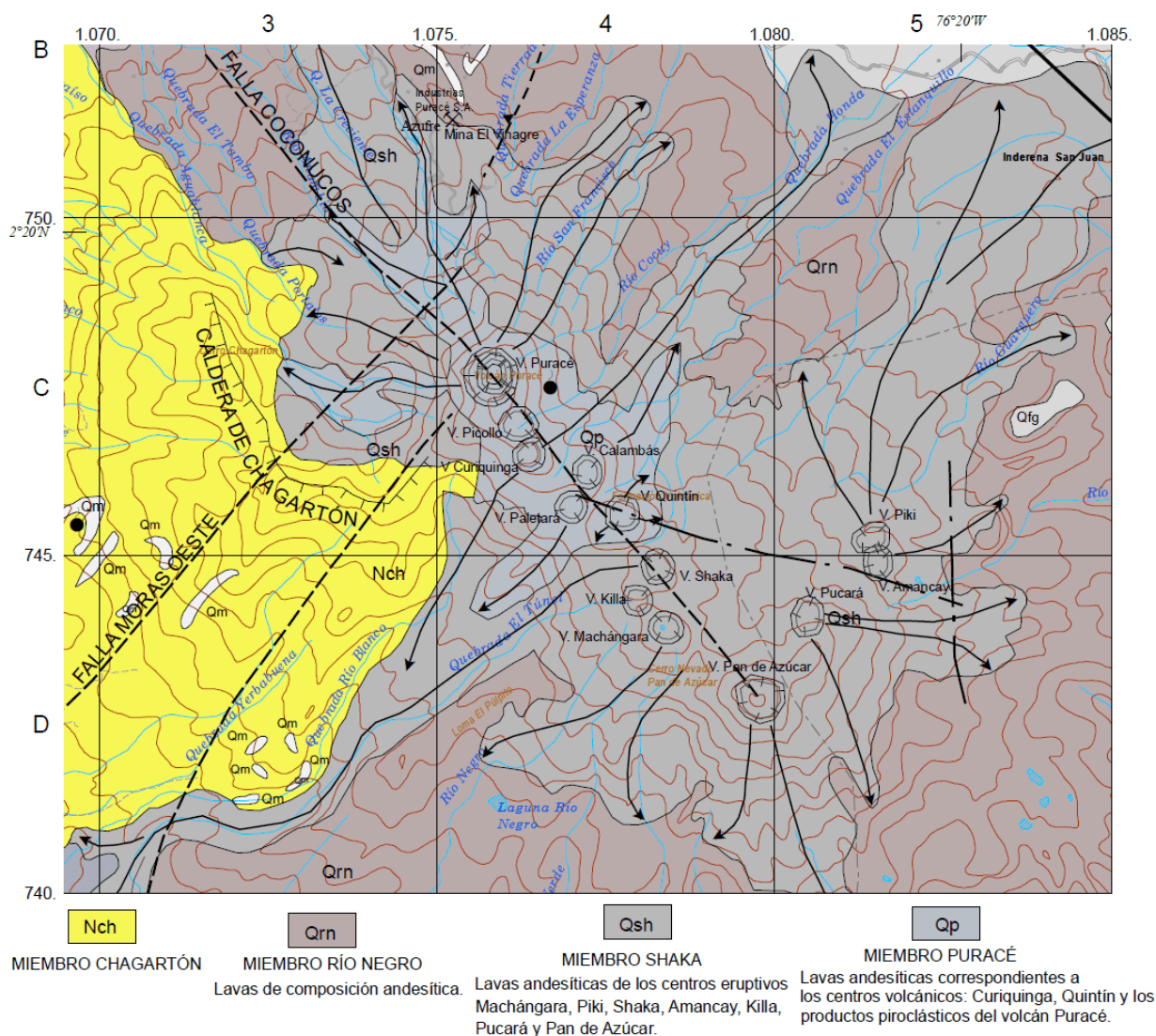
El basamento de la zona de estudio está conformado por las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca y los esquistos de la Formación Mazamoras, con edad Paleozoica; suprayaciendo se encuentran la Formación Popayán y la Formación Coconucos (Marquínez *et al.*, 2003; INGEOMINAS, 2003) de edad neógeno y cuaternario (Figura 3). La Formación Popayán comprende 3 miembros, el Miembro Polindara que son lavas de composición andesítica, el Miembro Julumito con depósitos de flujos piroclásticos e ignimbritas y el Miembro la Venta que son depósitos de flujos de ceniza (Torres, 1997). La Formación Coconucos nombrada por la cadena volcánica homónima (Figura 3 y Figura 4) comprende 6 miembros, el Miembro Chagartón constituido por depósitos de flujos de lava masivos a columnares, flujos de pómez y cenizas, el Miembro Rio Negro que son lavas de composición andesítica, el Miembro San Francisco conformado por depósitos caóticos de ceniza y escoria con líticos volcánicos de composición andesítica, el Miembro Paletará conformado por depósitos piroclásticos de flujos de ceniza, el Miembro Shaka conformado por lavas andesíticas de los centros eruptivos Machángara, Puki, Shaka, Amancay, Killa, Pukará y Pan de Azúcar y el Miembro Puracé, el más joven, conformado por lavas andesíticas de los centros volcánicos Curiquina, Quintín y por los productos piroclásticos del volcán Puracé (Monsalve, 2000) (Figura 3 y Figura 4).



Patricia Ponce, Adriana Oreguá, John Mikario Londono, María Luisa Monsaque, Carlos Ospina, Beatriz Galvis,  
 Jorge Alpala, Lourdes Narváez, Rosa Alpala, Darío Arcos

Figura 3. Geología generalizada de la zona estudiada (modificado de INGEOMINAS, 2003). Nótese que la zona estudiada está cubierta por depósitos del volcanismo de la caldera de Paletará y de los centros eruptivos de la cadena volcánica de Los Coconucos, teniendo como basamento el complejo Cajamarca.





**Figura 4.** Geología generalizada de la zona estudiada, detalle de la cima (modificado de INGEOMINAS, 2003). Se muestra los centros eruptivos de la cadena volcánica de Los Coconucos, el volcán Puracé y los otros volcanes hacia el suroccidente.

Los centros eruptivos de la CVLC del sector NW muestran características de volcanes explosivos y los del sector SE muestran características de volcanes efusivos; en el grupo de los explosivos se encuentran Puracé, PicoCollo, Curinguina, Calambás, Paletará y Quintín; en el grupo de volcanes efusivos se encuentran Shaka con sus tres centros eruptivos, Machángara, Killa, Pan de Azúcar, Pucará, Amancay y Piki (Monsalve y Pulgarín, 1999) (Figura 3 y Figura 4). Cerca del piedemonte de la cadena se identificaron otras estructuras volcánicas, como: El Canelo, Campamento, el Maar de Yerbabuena y Laguna del Buey. Adicionalmente, también se encuentran otros remanentes de estructuras volcánicas adyacentes al

volcán Puracé, denominadas Pre-Puracé y Chagartón (Monsalve y Pulgarín, 1992).

Según Marquínez *et al.* (2003), el eje de la cordillera está enmarcado al oeste por la Falla San Jerónimo y al este por la Falla Inzá y agrupa rocas pertenecientes al Complejo Cajamarca, que son consideradas como las formadoras de la protocordillera Central durante el Paleozoico. La Falla San Jerónimo es descrita como una estructura regional que limita el Complejo Cajamarca de edad paleozoica y afinidad continental con el Complejo Quebrada Grande de edad mesozoica y afinidad oceánica. Esta estructura se considera inversa y está localizada en el extremo noreste de la

zona de estudio, con una dirección aproximada de N37°E y buzamiento hacia el este; afecta los miembros Polindara y Julumito de la Formación Popayán y el Miembro Chagartón de la Formación Coconucos. La Falla Moras Oeste es inversa y se caracteriza por afectar rocas paleozoicas del Complejo Cajamarca y depósitos neógenos de la Formación Popayán. La Falla Moras Este también tiene carácter inverso. La Falla Moras se presenta afectando los miembros Puracé, Shaka, Paletará y Río Negro de la Formación Coconucos. La Falla Inzá se considera de tipo inverso y con inclinación del plano al oeste. Por estar afectando el Complejo Cajamarca, se considera como una falla antigua que ha contribuido al levantamiento de la Cordillera Central, en el flanco este. El Lineamiento Coconucos, con dirección NW-SE, alinea los centros eruptivos de la cadena volcánica de Los Coconucos en la misma dirección; afecta los depósitos volcánicos de los miembros Puracé y Shaka de la Formación Coconucos (Figura 3 y Figura 4) (INGEOMINAS, 2003; Marquínez *et al.*, 2003).

El volcán Puracé actual se construyó sobre los remanentes de un volcán anterior denominado Pre-Puracé. Estudios geológicos y dataciones han permitido estimar el inicio de su actividad hace aproximadamente 10.000 años AP, está construido por lavas y productos piroclásticos, dentro de los cuales se destacan flujos de ceniza y bloques, flujos de ceniza y escoria y caídas de cenizas. Las lavas corresponden a andesitas masivas de dos piroxenos con anfíbol subordinado (Monsalve *et al.*, 2012).

### Métodos, datos y procesamiento

El estudio gravimétrico y magnético cubrió un área aproximada de 385 km<sup>2</sup>, con un rango de alturas entre 2.276 y 4.605 msnm, dentro de los límites de la caldera de Paletará y en la CVLC hasta el centro eruptivo Shaka. Debido a las condiciones agrestes del terreno, los bosques de alta montaña y los humedales propios del Parque Nacional Natural Puracé (UAESPNN, 2004), no es posible medir utilizando una cuadrícula regularmente espaciada, por lo cual el levantamiento se realizó a pie y en vehículo, mediante perfiles superpuestos a las carreteras, caminos veredales y a campo traviesa donde las condiciones del terreno lo permitieron. Por la extensión del área de interés, asuntos de logística, acceso y permisos, la separación

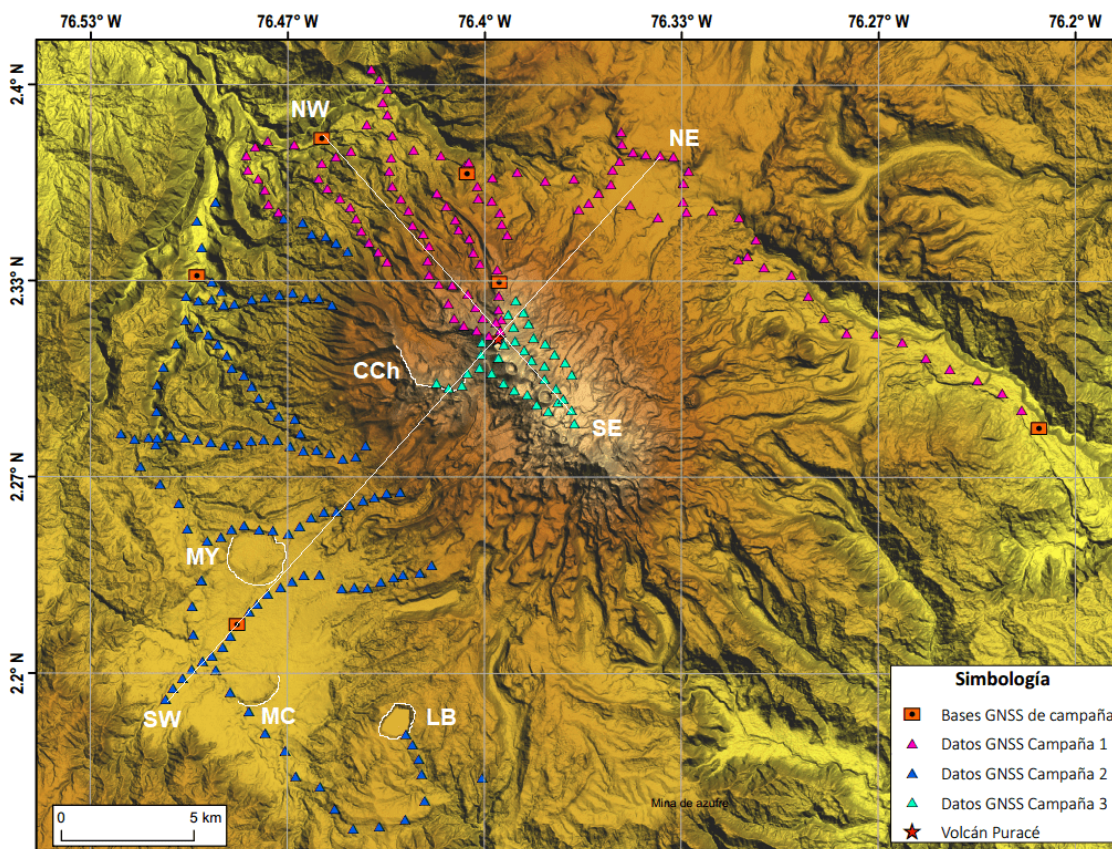
de las estaciones de medida se fijó en 500 m para los perfiles radiales y en 1.000 m para la carretera circunvalar.

En los perfiles radiales el desplazamiento de los profesionales y el transporte de los equipos se realizó a pie y en la carretera circunvalar se realizó en vehículo. Los datos fueron medidos en 2017 con un total de 6 bases de gravimetría y 272 estaciones móviles (Figura 5) con datos de magnetometría, gravimetría y coordenadas con el Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS por sus siglas en inglés) (Ortega *et al.*, 2020).

En el flanco noroccidental y la cima de la CVLC se midieron 116 estaciones en un área aproximada de 45 km<sup>2</sup>, para una densidad de 2,5 estaciones/km<sup>2</sup>. En la parte occidental y suroccidental de la zona de estudio se midieron 121 estaciones en un área aproximada de 296 km<sup>2</sup>, para una densidad de 0,4 estaciones/km<sup>2</sup>. En la zona nororiental solamente fue posible medir un perfil con 41 estaciones en un área aproximada de 44 km<sup>2</sup>, para una densidad de 0,9 estaciones/km<sup>2</sup>. Las zonas que debido a la cobertura de bosques o la topografía escarpada no se midieron, corresponden a las márgenes oriental, occidental y sur de la CVLC y todo el cuadrante suroriental de la zona de influencia volcánica; estas zonas están geológicamente conformadas, por los miembros Shaka y Río Negro de la Formación Coconucos (Monsalve, 2000; INGEOMINAS, 2003), constituidos por lavas de composición andesítica.

Los datos de gravimetría se midieron con un gravímetro relativo Scintrex Autograv CG-5, con corrección automática de mareas terrestres, deriva instrumental y resolución de 0,001 mGal (SCINTREX, 2006), configurado para tomar una medida cada 20 segundos. Los valores absolutos de la gravedad se calcularon usando la estación de referencia NP 111 SW5, de la red gravimétrica de tercer orden, del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 1998), cuya marca se ubica en el piso al lado izquierdo de la entrada principal de la Iglesia de San Miguel Arcángel, de la población de Puracé ( $g = 977.346,77$  mGal; 2,38161°N; 76,45516°W, elevación 2.619,8 m). Se materializaron cinco bases secundarias, distribuidas de acuerdo con las zonas de medición, accesos y distancias adecuadas desde las estaciones a las bases (Figura 5) (Ortega *et al.*, 2020).





**Figura 5.** Mapa de ubicación de 6 bases y 272 estaciones con datos de gravimetría y magnetometría medidos en 2017 en la zona estudiada (Alpala *et al.*, 2018). La separación entre estaciones fue de 500 m en los perfiles radiales y de 1000 m en la carretera circunvalar, con coordenadas Magna Sirgas. Se indican en color blanco los perfiles SW-NE y NW-SE utilizados para los modelos 2D, también los contornos de la Caldera de Chagartón CCh, el Maar de Yerbabuena MY, el Maar El Canelo MC y la Laguna del Buey LB.

Las coordenadas de las estaciones móviles y de las bases se determinaron con un GNSS Trimble NetR9 de doble frecuencia, con antena Trimble Zephyr Geodetic II, con un tiempo promedio de ocupación de 20 minutos en cada estación a una tasa de muestreo de 1 Hz. El post procesamiento fue realizado con el programa Trimble Business Center. Las 12 estaciones permanentes GNSS de la red de deformación del volcán Puracé fueron utilizadas como bases para mejorar los resultados del procesamiento de la información (Alpala *et al.*, 2018), obteniendo una precisión planimétrica menor de 0,015 m y una precisión altimétrica menor de 0,05 m. El gravímetro Scintrex Autograv CG-5 hace corrección automática por deriva instrumental y mareas, lo cual fue verificado para los datos medidos en campo. La gravedad teórica se calculó utilizando la fórmula de Chebychev, del Sistema Geodésico de Referencia Internacional de 1980 (IGAC, 1998), que usa el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Ortega *et al.*, 2020). Utilizando una densidad de referencia de 2,67 gr/cm<sup>3</sup>, a los datos gravimétricos se les aplicó las correcciones

estándar de Aire Libre, Placa de Bouguer, corrección de Terreno (Telford *et al.*, 1976) y finalmente se determinó la Anomalía completa de Bouguer (Ortega *et al.*, 2020).

Para la medición de campo magnético total en las estaciones móviles, se utilizó un magnetómetro Geometrics G-856AX (Geometrics Inc., 2007) de precesión de protones, con el sensor ubicado a una altura de 2,5 m sobre el terreno, configurado para medir un dato cada 20 segundos. Este equipo cuenta con una precisión de 1 nT (1 gamma), resolución de 0,1 nT (0,1 gamma) y con medida completa del campo en 3 segundos. Se utilizó como base la estación magnética permanente Laguna (LGNMG), de monitoreo de la actividad volcánica, ubicada cerca de la cima del volcán Puracé, en las coordenadas WGS84 2,328267°N, -76,396349°W y altitud 4.177 m, cuyo sensor es un magnetómetro triaxial Stefan Mayer Instruments FL3-100 (Stefan Mayer Instruments, 2003), tipo fluxgate, con resolución de 0,1 nT (0,1 gamma) configurado para registrar un dato cada 20 segundos (Ponce y Ospina, 2019). Las



coordenadas de las estaciones móviles son las mismas que se procesaron para la gravimetría (Alpala *et al.*, 2018), se aplicó la corrección diurna (Udías y Mezcua, 1997) y el valor teórico del campo geomagnético se calculó con el modelo IGRF12 (Thébault *et al.*, 2015) para encontrar la anomalía magnética (Ponce y Ospina, 2019).

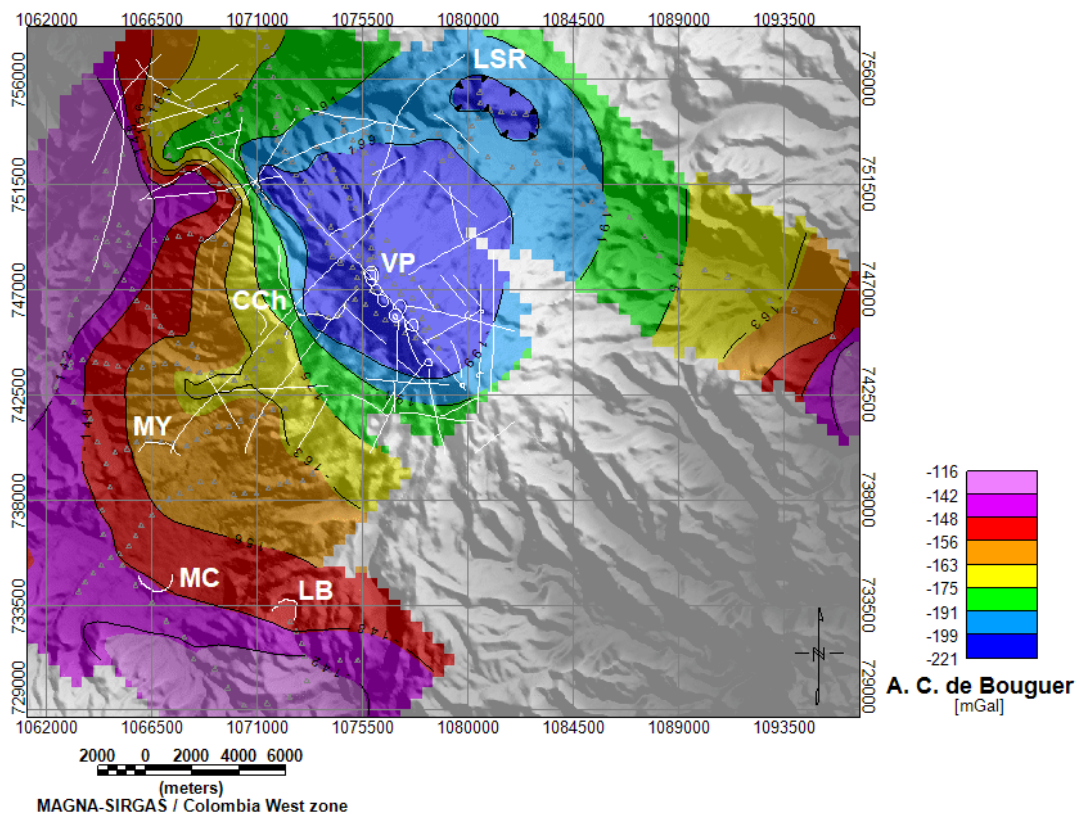
## Resultados

Se presenta los mapas de anomalías gravimétrica y magnética obtenidos con el software Oasis Montaj (SEEQUENT, 2023), que muestran el efecto combinado de los cuerpos bajo la zona de estudio y su relación con la geología y morfología,

El mapa de Anomalía Completa de Bouguer ACB muestra anomalías negativas en toda la zona, con un rango de variación de 105 mGal; en este mapa se destaca la anomalía negativa del sector de la cima de la cadena volcánica de Los Coconucos que incluye al Volcán Puracé VP y los otros centros eruptivos; y también se presenta en el sector de la Laguna de San

Rafael LSR con amplitud entre -119 y -221 mGal (Figura 6).

Mediante el filtro de superficie polinómica (Telford *et al.*, 1976; Lowrie, 2007) se removió la tendencia regional y se encontró la componente residual de la ACB (Figura 7), con valores entre -27 y 25 mGal, con un rango de variación de 52 mGal. Las zonas de anomalía gravimétrica se nombran con números romanos de color gris en el mapa, destacándose dos anomalías paralelas, una negativa I y otra positiva II, en dirección SE – NW. La anomalía negativa I se ubica en la cadena volcánica de Los Coconucos, incluyendo la zona de la Caldera de Chagartón CCh, se extiende con dirección noroccidente por una longitud aproximada de 16 km, con una amplitud entre -4 y -27 mGal, asociada con depósitos volcánicos de los miembros Puracé, Shaka y Río Negro de la Formación Coconucos de edad cuaternaria (Figura 7); las probables causas de esta anomalía son cuerpos de menor densidad básicamente por actividad volcánica.

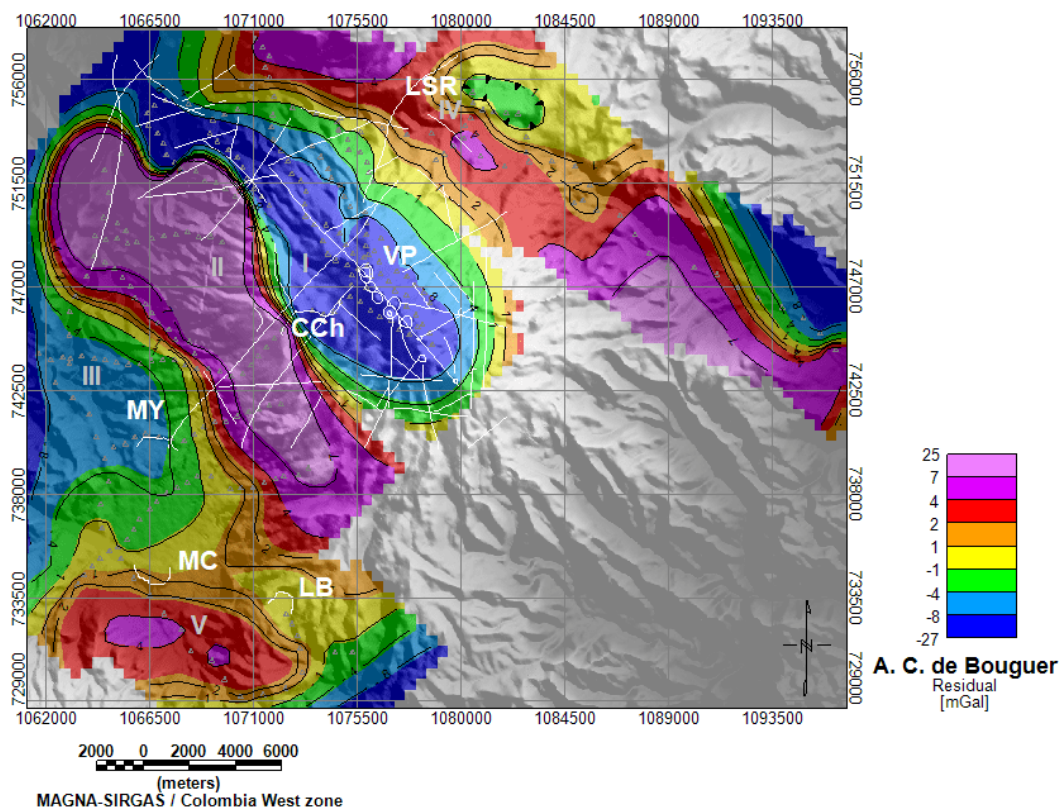


**Figura 6.** Mapa de Anomalía Completa de Bouguer de la zona estudiada. Los triángulos grises corresponden a las estaciones de medida, los segmentos en blanco corresponden a rasgos estructurales como fallas y lineamientos; en la cima los contornos cerrados corresponden al volcán Puracé VP, con los otros centros eruptivos de la CVLC alineados hacia el suroriente; los contornos abiertos corresponden a otros centros eruptivos como la caldera de Chagartón CCh, el Maar de Yerbabuena MY, el Maar El Canelo MC y la Laguna del Buey LB; LSR corresponde a la Laguna de San Rafael, al nororiente de la CVLC. Sistema de coordenadas Magna Colombia Oeste, Datum Magna.

La anomalía positiva II se ubica paralela a la anomalía negativa I, en el piedemonte izquierdo de la CVLC, también se extiende hacia el noroccidente por una longitud aproximada de 16 km, con amplitud entre 4 y 25 mGal, está mayormente asociada con depósitos del miembro Chagartón de la formación Coconucos, de edad neógeno, constituidos por flujos de lavas masivos a columnares, indicando cuerpos más densos. El contraste que muestran estas dos anomalías podría sugerir la manifestación de una zona de falla en dirección SE – NW (Figura 7). Al centro occidente de la zona estudiada, se observa la anomalía negativa III con amplitud entre -1 y -8 mGal (Figura 7), en la zona hay fuentes termales y el remanente del Maar de Yerbabuena MY, esta anomalía se ubica en depósitos del miembro Chagartón de edad neógeno que son lavas masivas a columnares y del miembro Paletará de edad cuaternario, que son depósitos piroclásticos de flujos de ceniza.

La anomalía positiva IV comienza al nororiente de la zona estudiada, en el humedal y la Laguna de San

Rafael LSR, ubicada sobre depósitos fluvio-glaciares de edad cuaternario, con valores entre 1 y 4 mGal, esta anomalía se extiende hacia el suroriente por la carretera y se asocia con depósitos del miembro Río Negro de edad cuaternario que suprayacen al Complejo Cajamarca. Dentro de la anomalía positiva IV, En la zona de la Laguna de San Rafael LSR resaltan una anomalía positiva mayor con valores entre 4 y 7 mGal orientada hacia el noroccidente y otra anomalía negativa con valores entre -1 y -4 mGal, también orientada hacia el noroccidente (Figura 7). En el suroccidente de la zona estudiada se tiene la anomalía V, que incluye el remanente del Maar El Canelo MC y la Laguna del Buey LB, con valores positivos de gravedad, entre 1 y 7 mGal, asociados con depósitos de los miembros Paletará, Río Negro de la Formación Coconucos y con depósitos de la actividad volcánica de La Laguna del Buey, de edad cuaternario, que en general corresponden a lavas andesíticas y depósitos de flujos de ceniza, indicando cuerpos más densos o más consolidados (Figura 7).

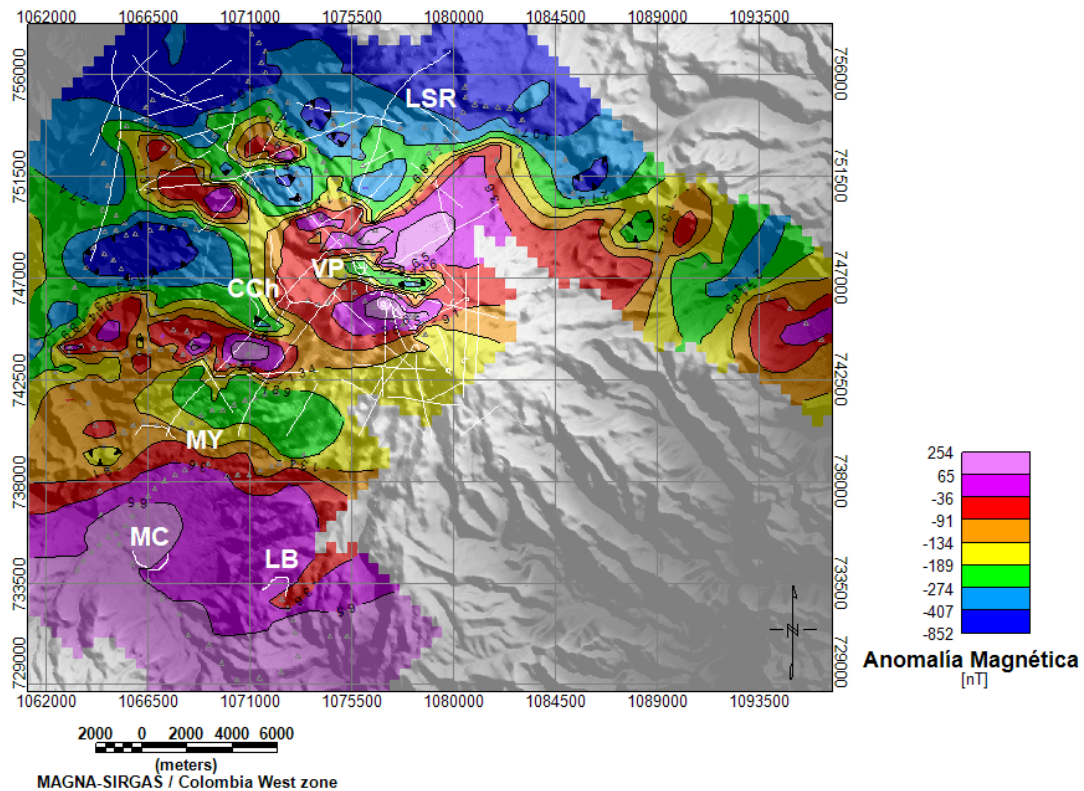


**Figura 7.** Mapa de la componente residual de la Anomalia Completa de Bouguer de la zona estudiada. Los triángulos grises corresponden a las estaciones de medida, los segmentos en blanco corresponden a rasgos estructurales como fallas y lineamientos; en la cima los contornos cerrados corresponden al volcán Puracé VP, con los otros centros eruptivos de la CVLC alineados hacia el suroriente; los contornos abiertos corresponden a otros centros eruptivos como la caldera de Chagartón CCh, el Maar de Yerbabuena MY, el Maar El Canelo MC y la Laguna del Buey LB; LSR corresponde a la Laguna de San Rafael, al nororiente de la CVLC. Se muestran en números romanos de color gris las zonas destacadas de anomalía gravimétrica. Sistema de coordenadas Magna Colombia Oeste, Datum Magna.

Se aplicó la reducción al ecuador a la Anomalia Magnética AM (Figura 8) tomando en cuenta que la reducción al polo presenta inestabilidad cuando se aplica en latitudes menores de 15 grados (Silva, 1986; Kis, 1990); la AM es mayormente negativa, con un mínimo de -852 nT y un máximo de 254 nT, para un rango de variación de 1.106 nT (Figura 8). Se destaca que en la cima se observa una anomalía dipolar, el bajo magnético inicia en el volcán Puracé VP y se extiende hacia el oriente suroriente con valor máximo de -225 nT y el alto magnético se dispone al sur de manera paralela con un valor máximo de 230 nT (Figura 8).

Mediante el filtro de superficie polinómica (Telford *et al.*, 1976; Lowrie, 2007) se removió la tendencia regional y se encontró la componente residual de la AM reducida al Ecuador, que presenta valores entre -492 y 353, dentro de un rango de variación de 845 nT, con varias anomalías magnéticas tanto positivas como negativas, que se marcaron con números romanos de color gris en el mapa (Figura 9). La anomalía I es un bajo magnético que comienza en el sector de la Laguna

de San Rafael LSR y se extiende por la carretera hacia el suroriente, con valores entre -22 y -300 nT, asociada con depósitos fluvio glaciares y depósitos del miembro Rio Negro de edad cuaternario. La anomalía II se ubica al suroccidente de la Laguna de San Rafael LSR, presenta 3 bajos magnéticos con valores entre -22 y -258 nT, está asociada con depósitos de los miembros Shaka y Río Negro de edad cuaternario. La anomalía magnética III se ubica al occidente de la anomalía II, presenta 2 altos magnéticos con valores entre 61 y 353 nT, se asocia con lavas masivas a columnares del miembro Chagartón. La anomalía IV se ubica al norte de la anomalía III, es un bajo magnético con un máximo de -421 nT, está asociado con depósitos de ceniza y escoria del miembro San Francisco y con depósitos fluviolacustres y flujos de lodo de edad cuaternario. La anomalía V es un alto magnético ubicado al norte de la CVLC, bajando por el occidente de la CVLC hasta incluir la Caldera de Chagartón CCh, esta anomalía presenta un máximo de 290 nT, asociado con lavas andesíticas de los miembros Shaka y Puracé (Figura 9).



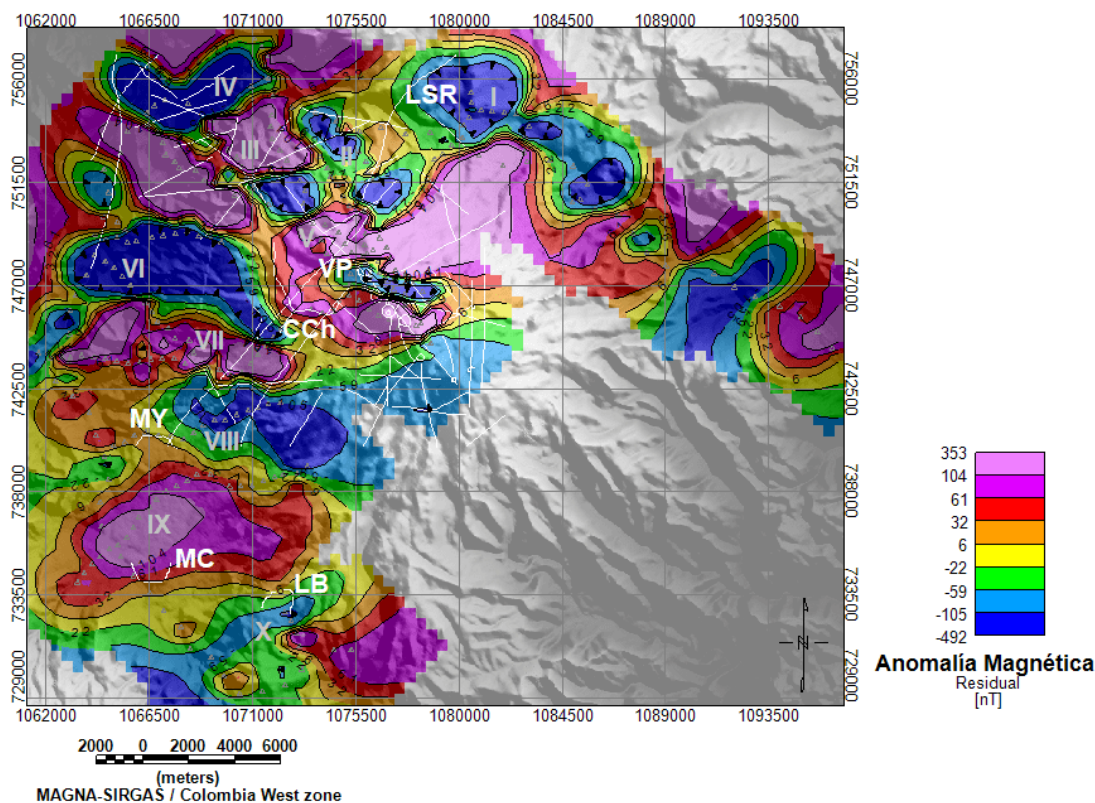
**Figura 8.** Mapa de anomalía magnética de la zona estudiada. Los triángulos grises corresponden a las estaciones de medida, los segmentos en blanco corresponden a rasgos estructurales como fallas y lineamientos; en la cima los contornos cerrados corresponden al volcán Puracé VP, con los otros centros eruptivos de la CVLC alineados hacia el suroriente; los contornos abiertos corresponden a otros centros eruptivos como la caldera de Chagartón CCh, el Maar de Yerbabuena MY, el Maar El Canelo MC y la Laguna del Buey LB; LSR corresponde a la Laguna de San Rafael, al nororiente de la CVLC. Sistema de coordenadas Magna Colombia Oeste, Datum Magna. La zona tiene una inclinación promedio  $I = 24^\circ$  y declinación promedio  $D = -5^\circ$ .



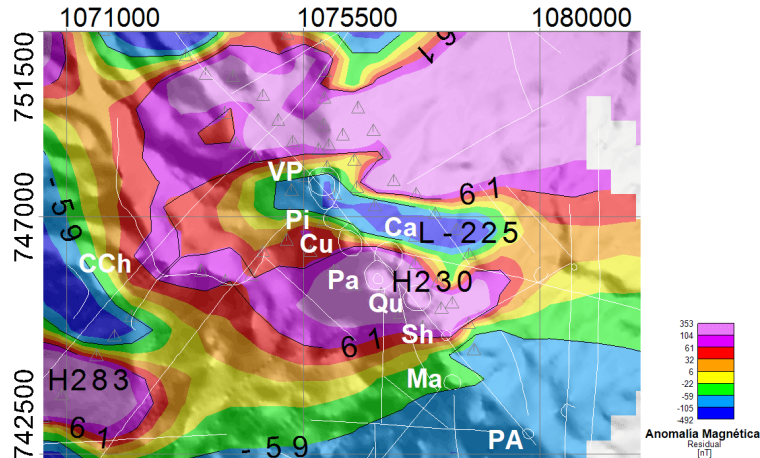
La anomalía VI es un bajo magnético con un máximo de -492 nT, se ubica al sur de la anomalía III y al occidente de la caldera de Chagartón CCh, se asocia con depósitos del miembro Chagartón, en la zona existen fuentes termales, por lo que es probable que este bajo magnético esté asociado con actividad hidrotermal (Figura 9). La anomalía VII se ubica al sur de la anterior, es un alto magnético con un máximo de 238 nT, se asocia con depósitos del miembro Chagartón. La anomalía VIII se ubica al suroriente de la anterior, es un bajo magnético con un máximo de -132 nT, asociado con depósitos del miembro Rio Negro. La anomalía IX se ubica al suroccidente de la anterior, es un alto magnético con un máximo de 171 nT, que incluye el remanente del Maar El Canelo MC, se asocia con flujos de ceniza del miembro Paletará. La anomalía X se ubica al suroriente de la anterior, es una zona de anomalía negativa con valores entre -22 y -109 nT,

incluye la Laguna del Buey LB (Figura 9), se asocia con flujos de ceniza del miembro Paletará, depósitos del miembro Rio Negro y depósitos piroclásticos del volcán Laguna del Buey LB (Figura 9).

En la cima se tiene una anomalía dipolar (Figura 9 y Figura 10), el bajo magnético inicia en el volcán Puracé VP y se extiende hacia el oriente suroriente incluyendo parte del volcán Picoallo Pi, presenta valores entre -22 y -225 nT, corresponde a depósitos piroclásticos del volcán Puracé, probablemente está asociado con la actividad volcánica e hidrotermal del Puracé VP (Figura 10). El alto magnético se ubica al sur del anterior, presenta un área mayor con valores entre 32 y 230 nT, incluye los centros eruptivos de Curiquina Cu, Calambás Ca, Paletará Pa, Quintín Qu y Shaka Sh (Figura 10), está asociado con depósitos piroclásticos de los miembros Puracé y Shaka.



**Figura 9.** Mapa de Anomalía Magnética Residual de la zona estudiada. Los triángulos grises corresponden a las estaciones de medida, los segmentos en blanco corresponden a rasgos estructurales como fallas y lineamientos; en la cima los contornos cerrados corresponden al volcán Puracé VP, con los otros centros eruptivos de la CVLC alineados hacia el suroriente; los contornos abiertos corresponden a otros centros eruptivos como la caldera de Chagartón CCh, el Maar de Yerbabuena MY, el Maar El Canelo MC y la Laguna del Buey LB; LSR corresponde a la Laguna de San Rafael, al nororiente de la CVLC. Se muestran en números romanos de color gris las zonas destacadas de anomalía magnética. Sistema de coordenadas Magna Colombia Oeste, Datum Magna. La zona tiene una Inclinación promedio  $I = 24^\circ$  y Declinación promedio  $D = -5^\circ$ .



**Figura 10.** Mapa de Anomalía Magnética Residual, detalle de la cima de la zona estudiada. Los triángulos grises corresponden a las estaciones de medida, los segmentos en blanco corresponden a rasgos estructurales como fallas y lineamientos; los contornos cerrados corresponden al volcán Puracé VP y otros centros eruptivos de la CVLC, Pico de la Cruz Pi, Curiquinga Cu, Calambás Ca, Paletará Pa, Quintín Qu, Shaka Sh, Machángara Ma y Pan de Azúcar PA; el contorno abierto corresponde a la caldera de Chagartón CCh. Se destaca la anomalía dipolar de la cima con un bajo magnético de -225 nT y un alto magnético de 230 nT. Sistema de coordenadas Magna Colombia Oeste, Datum Magna. La zona tiene una Inclinación promedio  $I = 24^\circ$  y Declinación promedio  $D = -5^\circ$ .

### Modelos 2D

Con el conjunto de datos de anomalía gravimétrica y magnética se proponen dos modelos 2D, el primero en sentido noroccidente – suroriente (NW-SE), siguiendo el eje de la cadena volcánica de Los Coconucos, el segundo, transversal al primero, en sentido suroccidente – nororiente (SW-NE), ambos pasando por el cono activo de Puracé (Figura 5). Estos perfiles, tienen relevancia por las anomalías geofísicas que cortan, pero también están asociados con rasgos geológicos importantes de las estructuras volcánicas que pueden ser modelados a partir de la información observada tanto en gravimetría como en magnetometría.

Los modelos fueron obtenidos con la extensión especial de Oasis Montaj, GM-SYS (SEEQUENT, 2023), partiendo de los perfiles trazados sobre los mapas de anomalía residual gravimétrica y magnética. Para elaborar los modelos también se trabajó con la información geológica consignada en el Mapa de la plancha Geológica 365 Coconuco (INGEOMINAS, 2003; Marquinez et al., 2003), los diferentes informes y artículos de los expertos del SGC sobre la geología y estructuras volcánicas de la zona (Monsalve y Pulgarín, 1992, 1999; Torres, 1997; Torres et al., 1999; Monsalve, 2000; Monsalve et al., 2012, 2014). No se cuenta con análisis de laboratorio para densidad y susceptibilidad de rocas de la zona de estudio, por lo que los valores de entrada para los modelos se obtuvieron de tablas y de los resultados de una tomografía sísmica 3D de la zona del volcán Puracé (Londoño y Santacoloma, 2012).

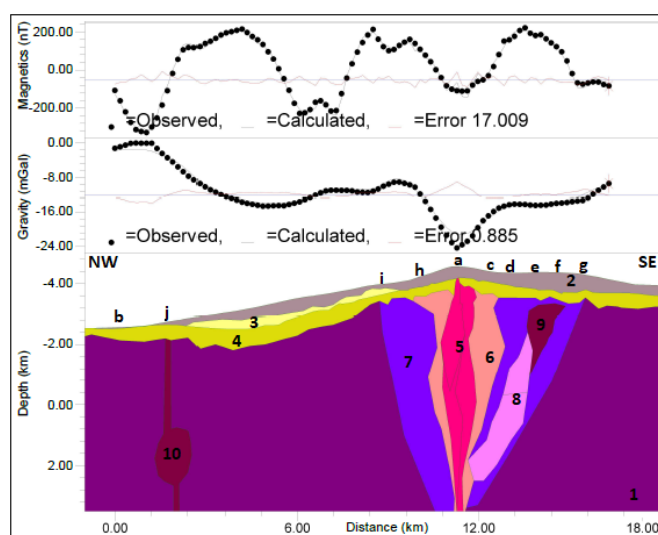
**Modelo NW-SE:** sobre el eje del Lineamiento Coconucos, se modelaron las estructuras que se encuentran subyaciendo la zona de estudio y que respondieron a los perfiles del conjunto de datos gravimétricos y magnéticos, los valores de densidad y susceptibilidad magnética de entrada para los modelos se tomaron de tablas y a partir del estudio de tomografía sísmica de la zona (Londoño y Santacoloma, 2012), luego estos valores se fueron refinando para responder al modelo. Las unidades litológicas y los bloques que conforman las estructuras volcánicas se nombran con números y los sitios en superficie que cruza el perfil se nombran con letras (Figuras 3, 4, 5 y 11).

Las unidades litológicas del perfil NW-SE son el basamento conformado por el Complejo Cajamarca 1, que son rocas metamórficas de edad paleozoica, compuesta por esquistos verdes a negros y cuarcitas; suprayaciendo está la Formación Popayán 4, compuesta por intercalaciones de ignimbritas, lavas y flujos de ceniza de edad neógeno y cuaternario; suprayaciendo está una formación posiblemente asociada con el depósito de Azufre 3 que se ha explotado en la mina El Vinagre y aflorando se encuentra la Formación Coconucos 2 que son intercalaciones de lavas, flujos piroclásticos y flujos de ceniza (Figuras 3, 4, 5 y 11); los valores de densidad y susceptibilidad magnética utilizados en el modelo se muestran en la Tabla 1.

Para la Cadena Volcánica de Los Coconucos, el perfil permitió modelar bloques que pueden formar

las siguientes estructuras volcánicas: el bloque 5 correspondería al volcán Puracé actual, el perfil cruza el volcán Puracé en el cráter, marcado con la letra a; el bloque 6 que abraza al 5 probablemente corresponda a remanentes del volcán Pre-Puracé, su proyección a la superficie cruza por un trazo de la Falla Moras Oeste en h y entre los cráteres de los volcanes Picollo c y Curiquina d; el bloque 7 que es la parte más externa en el perfil hacia el NW correspondería a los remanentes del volcán Chagartón asociados con la denominada caldera de Chagartón, predecesora del vulcanismo resurgente de la cadena volcánica de Los Coconucos (Monsalve, 2000), aunque se aprecia también formando una estructura mayor que podría estar asociada con la formación de la CVLC, su proyección en la superficie

cruza en un lineamiento en i, que podría ser un trazo del sistema de Fallas Moras y en el volcán Shaka g; los bloques 8 y 9 podrían estar asociados con la actividad de otros volcanes de la CVLC, su proyección en la superficie cruza por el volcán Paletará e y por el volcán Quintín f (Figuras 3, 4, 5 y 11); la caldera, las estructuras volcánicas Pre-Purace y Puracé actual estarían delimitadas por fallas o zonas de debilidad (Figura 11). Hacia el NW cerca de la población de Puracé b se modela el bloque 10 asociado con un bajo magnético, probablemente producido por actividad volcánica de tiempos pasados que aún conserve calor remanente y que no tiene manifestación en superficie (Figuras 3, 5 y 11).



**Figura 11.** Modelo 2D de anomalías gravimétrica y magnética, trazado sobre el eje del lineamiento Coconucos en dirección NW-SE, entre la población de Puracé b y una zona cercana al volcán Shaka g de la CVLC, pasando por el cráter del Volcán Puracé a. El basamento del modelo es el Complejo Cajamarca 1.

**Tabla 1.** Valores de densidad y susceptibilidad magnética utilizados para el modelo NW-SE. Los números indican las unidades litológicas y los cuerpos modelados.

Nombre	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Susceptibilidad (SI)	Color
Puracé 5	2,00	0,00001257	
F. Azufre 3	2,00	0,00001257	
Bloque 8	2,25	0,00005027	
F. Coconucos 2	2,30	0,00001257	
Bloque 9	2,50	0,00010053	
F. Popayán 4	2,60	0,00040212	
Bloque 10	2,65	0,00008796	
Pre-Puracé 6	2,65	0,00005027	
Aire	2,67	0,00000000	
C. Cajamarca 1	2,70	0,00008796	
Chagartón CVLC 7	2,89	0,00010053	

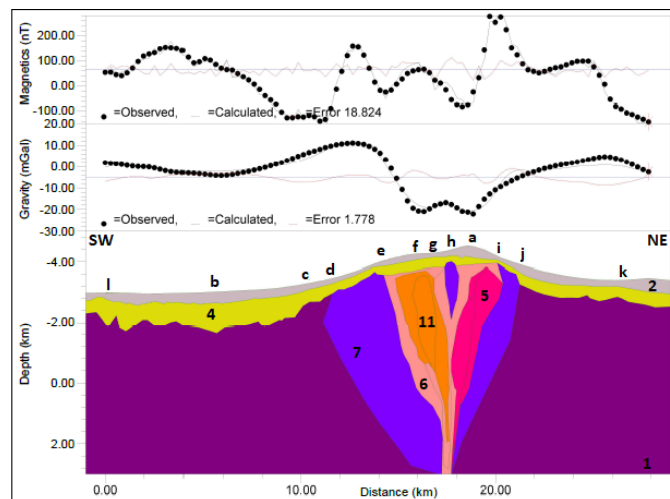


**Modelo SW-NE:** trazado sobre un perfil perpendicular al Lineamiento Coconucos y al perfil NW-SE descrito anteriormente. De la misma manera que con el primer perfil, se modelaron las estructuras que se encuentran subyaciendo la zona de estudio y que respondieron al conjunto de datos gravimétricos y magnéticos, los valores de densidad y susceptibilidad magnética de entrada para los modelos se tomaron de tablas y a partir del estudio de tomografía sísmica de la zona (Londoño y Santacoloma, 2012), luego estos valores se fueron refinando para responder al modelo. Las unidades litológicas y los bloques que conforman las estructuras volcánicas se nombran con números y los sitios en superficie que cruza el perfil se nombran con letras (Figuras 3, 4, 5 y 12).

Las unidades litológicas del perfil SW-NE son: el basamento conformado por esquistos verdes a negros y cuarcitas de edad paleozoida del Complejo Cajamarca 1; suprayaciendo está la Formación Popayán 4, compuesta por intercalaciones de ignimbritas, lavas y flujos de ceniza de edad neógeno y cuaternario; aflorando se encuentra la Formación Coconucos 2 que son intercalaciones de lavas, flujos piroclásticos y flujos de ceniza de edad cuaternario (Figuras 3, 4, 5 y 12); los valores de densidad y susceptibilidad









magnética utilizados en el modelo se muestran en la [Tabla 2](#).

Este perfil permitió modelar bloques que pueden formar las siguientes estructuras volcánicas: el bloque 5 correspondería al volcán Puracé actual, el perfil cruza el volcán Puracé en el cráter, marcado con la letra a; el bloque 6 probablemente corresponda a remanentes del volcán Pre-Puracé, su proyección a la superficie intersecta lineamientos en los puntos e, g e i; el bloque 7 que es la parte más externa en el perfil, correspondería a los remanentes del volcán Chagartón asociados con la denominada caldera de Chagartón, predecesora del vulcanismo resurgente de la cadena volcánica de Los Coconucos (Monsalve, 2000), aunque se aprecia también formando una estructura mayor que podría estar asociada con la formación de la CVLC, su proyección en la superficie intersecta lineamientos en los puntos c, d, h y j; el bloque 11 podría estar asociado con la actividad del volcán Chagartón o con la actividad del Pre-Puracé, su proyección a la superficie corta el borde de la Caldera de Chagartón en el punto f (Figuras 3, 4, 5, 9, 10 y 12). Hacia el SW el perfil pasa por el borde del Maar de Yerbabuena en el punto b y hacia el NE el perfil pasa por el borde de la Laguna de San Rafael en el punto k (Figuras 3, 5 y 12).



**Figura 12.** Modelo 2D de anomalías gravimétrica y magnética, trazado sobre un perfil perpendicular al eje del lineamiento Coconucos, en dirección SW-NE, entre la Hacienda San Emidio l y la Laguna San Rafael k, pasando por el cráter del Volcán Puracé a. El basamento del modelo es el Complejo Cajamarca 1.

**Tabla 2.** Valores de densidad y susceptibilidad magnética utilizados para el modelo SW-NE. Los números indican las unidades litológicas y los bloques modelados.

Nombre	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Susceptibilidad (SI)	Color
Puracé 5	2,00	0,00001257	
Bloque 11	2,10	0,00002513	
F. Coconucos 2	2,30	0,00001257	
F. Popayán 4	2,60	0,00040212	
Pre-Puracé 6	2,65	0,00005027	
Aire	2,67	0,00000000	
C. Cajamarca 1	2,70	0,00008796	
Chagartón CVLC 7	2,89	0,00010053	

## Discusión y conclusiones

Los dos modelos geofísicos 2D que se proponen, se construyeron a partir del conjunto de datos gravimétricos y magnéticos medidos en campo y a partir de la información geológica de los diferentes estadios o periodos que conforman la historia eruptiva de la Cadena Volcánica de Los Coconucos y el volcán Puracé.

Los modelos 2D permitieron inferir cuerpos que se pueden asociar con las principales estructuras geológicas y volcánicas presentes en el área estudiada muchas de las cuales se encuentran cubiertas por los productos piroclásticos de varios centros eruptivos. La Formación Popayán y la Formación Coconucos son las principales unidades litológicas que se observan en la parte más superficial de la zona de estudio, teniendo como basamento el Complejo Cajamarca.

Con base en la evolución geológica, los modelos permitieron diferenciar las posibles estructuras volcánicas que conforman la CVLC y particularmente la zona del volcán Puracé, por lo que se propone que los cuerpos modelados corresponden a la Caldera de Chagartón, la estructura del Pre-Puracé y la estructura volcánica del Puracé actual. Según la evolución geológica el volcán Pre-Puracé se formó en el borde de los remanentes del volcán Chagartón y el Puracé actual en el borde del Pre-Puracé, pero los modelos indican estructuras internas más amplias que probablemente estén relacionadas con los procesos volcánicos que dieron origen al vulcanismo de la CVLC.

En el modelo NW-SE hacia el sureste se modelaron cuerpos que se pueden asociar con la actividad de otros volcanes como Paletará y Quintín, debido a que su proyección en superficie los intersecta. Hacia el

NW se modeló un cuerpo probablemente asociado con actividad volcánica antigua que no tiene manifestación en superficie.

En la cima, en la zona del volcán Puracé se observan bajos magnéticos y bajos gravimétricos, asociados con su actividad, indicando baja densidad y presencia de calor. Se resalta que el centro eruptivo volcán Curiquinga, mostró una manifestación en superficie registrada en marzo del 2022, que incluyó una pequeña explosión y la abertura de una grieta dentro de su cráter.

La geología y los dos modelos geofísicos sugieren que la caldera de Chagartón se construyó sobre ignimbritas intracaldéricas de la caldera de Paletará y el complejo Cajamarca. El volcán Pre-Puracé se construyó sobre los restos de la estructura de la caldera de Chagartón; el volcán Puracé actual se construyó sobre los restos de Pre-Puracé. El resto de los centros eruptivos de la CVLC se construyó sobre depósitos de Chagartón y Pre-Puracé.

Una explicación plausible para las anomalías negativas de la cima, es que en la cámara magmática del Puracé actual existen altas temperaturas y fluidos, confirmando que es un volcán activo, incluyendo otros centros eruptivos como el volcán Curiquinga.

La configuración interna del volcán Puracé y los centros eruptivos de la CVLC propuesta en este trabajo, también proporcionan información importante para la interpretación de la evolución del vulcanismo resurgente de la caldera de Paletará.

## Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Servicio Geológico Colombiano - SGC, Dirección Técnica

de Geoamenazas, Proyecto Monitoreo y Evaluación de la Actividad Volcánica. El SGC es propietario y custodio de los datos de esta investigación. Los autores agradecen la colaboración del Geólogo Bernardo Pulgarín, por su acompañamiento al inicio de los trabajos. Finalmente agradecemos al personal de los resguardos indígenas de Puracé y Paletará y demás personas que colaboraron con el acompañamiento, guía y transporte de equipos durante las campañas de medición en el Volcán Puracé.

## Referencias

- Aboud, E.; El-Masry, N.; Qaddah, A.; Alqahtani, F.; Moufti, M. (2015). Magnetic and gravity data analysis of Rahat Volcanic Field, El-Madinah city, Saudi Arabia. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 4(1), 154-162. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2015.06.006>
- Almaguer, J.; Lopez-Loera, H.; Macias, J.; Saucedo, R.; Yutsis, V.; Guevara, R. (2020). Geophysical modeling of La Primavera caldera and its relation to volcanology activity based on 3D susceptibility inversion and potential data analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 393, 106556. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.02.008>
- Alpala, J.; Alpala, R.; Narváez, L.; Arcos, D. (2018). Levantamiento de información GNSS volcán Puracé Marzo 2018. Informe interno. Popayán: Servicio Geológico Colombiano.
- Astort, A.; Colavitto, B.; Sagripanti, L.; García, H.; Echaurren, A.; Soler, S.; Ruíz, F.; Folguera, A. (2019). Crustal and Mantle Structure Beneath the Southern Payenia Volcanic Province Using Gravity and Magnetic Data. *Tectonics*, 38(1), 144-158. <https://doi.org/10.1029/2017TC004806>
- Caratori-Tontini, F.; de Ronde, C.E.; Scott, B.J.; Soengkono, S.; Stagpoole, V.; Timm, C.; Tivey, M. (2016). Interpretation of gravity and magnetic anomalies at Lake Rotomahana: Geological and hydrothermal implications. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 314, 84-94. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.07.002>
- Cocchi, L.; Passaro, S.; Caratori-Tontini, F.; Ventura, G. (2017). Volcanism in slab tear faults is larger than in island-arcs and back-arcs. *Nature Communications*, 8, 1451. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01626-w>
- Geometrics Inc. (2007). G-856AX Memory-Mag™ Proton Precession Magnetometer P/N 18101-02 Rev. E Operation Manual. San José CA USA: Geometrics Inc.
- Gottsmann, J.; Camacho, A.G.; Martí, J.; Wooller, L.; Fernández, J.; García, A.; Rymer, H. (2008). Shallow structure beneath the Central Volcanic Complex of Tenerife from new gravity data: Implications for its evolution and recent reactivation. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 168(3-4), 212-230. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.06.020>
- IGAC. (1998). Gravimetría 1998. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- INGEOMINAS. (2003). Geología de la Plancha 365 Coconuco. Escala 1:100.000. Bogotá.
- Kis, K. (1990). Transfer properties of the reduction of magnetic anomalies to the pole and to the equator. *Geophysics*, 55(9), 1141-1147. <https://doi.org/10.1190/1.1442930>
- Londoño, J.; Santacoloma, C. (2012). Tomografía sísmica 3D de la zona del volcán Puracé (Colombia). Informe interno. Popayán: Servicio Geológico Colombiano.
- López-Loera, H. (2012). 2 3/4 dimension modeling of the aeromagnetic anomaly of Volcan de Colima, western Mexico. *Geofísica Internacional*, 51(2), 129-142. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2012.51.2.602>
- López-Loera, H.; Aranda-Gómez, J.J.; Arzate, J.A.; Molina-Garza, R.S. (2008). Geophysical surveys of the Joya Honda maar (México) and surroundings; volcanic implications. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170(3-4), 135-152. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.08.021>
- López-Loera, H.; Macías, J.; Espíndola, J.M.; Arce, J.L.; Layer, P.W.; Torres-Gaytan, D.E. (2020). The Santa Fe intrusion and other magmatic bodies under The Chichón Volcano area (México) inferences from aeromagnetic and new petrologic-



- geochronologic data. *Surveys in Geophysics*, 41, 859-895. <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09591-8>
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*. Second edition. Cambridge University Press.
- Marquínez, G.; Rodríguez, Y.; Fuquen, J. (2003). Plancha 365 Coconuco, Escala 1:100.000, Memoria Explicativa. Bogotá: INGEOMINAS. 116p.
- Mickus, K.; Durrani, B. (1996). Gravity and magnetic study of the crustal structure of the San Francisco volcanic field, Arizona, USA. *Tectonophysics*, 267(1-4), 73-90. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00087-X](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00087-X)
- Miller, C.; Williams-Jones, G. (2016). Internal structure and volcanic hazard potential of Mt Tongariro, New Zealand, from 3D gravity and magnetic models. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 319, 12-28. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.03.012>
- Monsalve, M. (2000). Formación Coconucos. Bogotá: INGEOMINAS, Catálogo de las unidades litoestratigráficas de Colombia. 31 p.
- Monsalve, M.; Pulgarín, B. (1992). Estructuras volcánicas en el valle del Paletará. Informe interno. Popayán: INGEOMINAS.
- Monsalve, M.L.; Pulgarín, B. (1999). Cadena Volcánica de Los Coconucos (Colombia): centros eruptivos y productos recientes. *Boletín Geológico*, 37(1-3), 1-51. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol37.1-3.1999.38>
- Monsalve, M.; Galarza, J.; Zuluaga, I.; Laverde, C. (2014). Mapa de amenaza volcánica del volcán Puracé Actual (Cauca - Colombia) segunda versión. Memoria. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano. 49p.
- Monsalve, M.; Pulgarín, B.; Narváez, B.; Aguirre, L.; Laverde, C. (2012). Geología y estratigrafía del Volcán Puracé actual, Colombia. Informe Interno. Popayán: Servicio Geológico Colombiano.
- Ortega, A.; Ponce, P.; Londoño, J.; Ospina, C.; Alpala, J.; Narváez, L.; Galvis, B.; Arcos, D.; Alpala, R. (2020). Investigación Geofísica Volcán Puracé, Julio - Octubre 2017. Informe Interno. Popayán: Servicio Geológico Colombiano.
- Paoletti, V.; Fedi, M.; Florio, G. (2017). Magnetic structure of the Ischia volcanic island, Southern Italy. *Annals of Geophysics*, 60(6). <https://doi.org/10.4401/ag-7550>
- Parques Nacionales. (2021). Sistema de Parques Nacionales Naturales. <https://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/ecoturismo/parques/region-andina/parque-nacional-natural-purace/>
- Ponce, P.; Ospina, C. (2019). Informe de Anomalías Magnéticas, Volcán Puracé 2017. Informe interno. Pasto: Servicio Geológico Colombiano.
- Portal, A.; Gailler, L.S.; Labazuy, P.; Lénat, J.F. (2016). Geophysical imaging of the inner structure of a lava dome and its environment through gravimetry and magnetism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 320, 88-99. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.04.012>
- SCINTREX. (2006). Operation Manual. Obtenido de Scintrex Limited. Canadá: [www.scintrexltd.com](http://www.scintrexltd.com)
- SEEQVENT. (2023). Productos y soluciones. Geosoft Oasis Montaj: <https://www.seequent.com/es/productos-y-soluciones/geosoft-oasis-montaj/>
- SGC. (2022a). Cadena Volcánica de Los Coconucos. Mapa Preliminar de Amenaza Volcánica, Centro Eruptivo Volcán Curiqinga. Popayán, Cauca, Colombia: Servicio Geológico Colombiano.
- SGC. (2022b). Generalidades Volcán Puracé. Servicio Geológico Colombiano. <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanPurace/Paginas/generalidades-volcan-purace.aspx>
- Silva, J. (1986). Reduction to the pole as an inverse problem and its application to low latitude anomalies. *Geophysics*, 51(2), 369-382. <https://doi.org/10.1190/1.1442096>
- Skácelová, Z., Rapprich, V.; Valenta, J.; Hartvich, F.; Šrámek, J.; Radon, M.; Gaždová, R.; Nováková, L.; Kolínský, P.; Pécskay, Z. (2010). Geophysical research on structure of partly eroded maar volcanoes: Miocene Hnojnice and Oligocene Rychnov volcanoes (northern Czech Republic).

- Journal of Geosciences*, 55(4), 333-345. <https://doi.org/10.3190/jgeosci.072>
- Stefan Mayer Instruments. (2003). FL3-100 Triaxial Fluxgate Magnetic Field Sensor User's Manual. Dinslaken, Germany: Stefan Mayer Instruments.
- Telford, W.M.; Geldart, L.P.; Sheriff, R.E.; Keys, D.A. (1976). *Applied geophysics*. Cambridge University Press.
- Thébault, E.; Finlay, C.; Beggan, C.; Alken, P.; Aubert, J.; Barrois, O.; Bertrand, F.; Bondar, T.; Boness, A.; Brocco, L.; Canet, E.; Chambodut, A.; Chulliat, A.; Coïsson, P.; Civet, F.; Du, A.; Fournier, A.; Fratter, I.; Gillet, N.; Hamilton, B.; Hamoudi, M.; Hulot, G.; Jager, T.; Korte, M.; Kuang, W.; Lalanne, X.; Langlais, B.; Léger, J.; Lesur, V.; Lowes, F.; Macmillan, S.; Mandeau, M.; Manoj, C.; Maus, S.; Olsen, N.; Petrov, V.; Ridley, V.; Rother, M.; Sabaka, T.; Saturnino, D.; Schachtschneider, R.; Sirol, O.; Tangborn, A.; Thomson, A.; Tøffner-Clausen, L.; Vigneron, P.; Wardinski, I.; Zvereva, T. (2015). International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation. *Earth, Planets and Space*, 67(79). <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0228-9>
- Torres, P. (1997). Aporte al conocimiento de la geología y la estratigrafía de la Formación Popayán Departamento del Cauca. *Revista Novedades Colombianas*, 7(1), 4-28.
- Torres, M.P.; Monsalve, M.L.; Pulgarín, B.; Cepeda, H. (1999). Caldera de Paletará: aproximación a la fuente de las ignimbritas del Cauca y Huila (Colombia). *Boletín Geológico*, 37(1-3), 1-15. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol37.1-3.1999.35>
- UAESPNN. (2004). Plan de Manejo Parque Nacional Natural Puracé. Popayán: Unidad Administrativa Especial Parques Nacionales Naturales de Colombia - UAESPNN.
- Udías, A.; Mezcua, J. (1997). *Fundamentos de Geofísica*. Alianza Editorial.
- Urrutia-Fucugauchi, J.; Martínez-Pepin, N.; Hernández-Pérez, I.; Arciniega-Ceballos, A.; López-Loera, H.; Flores-Ruiz, J.; Anaya, C. (2002). Aeromagnetic anomalies and structure of the Iztaccihuatl-Popocatepetl volcanic region in Central Mexico. *Geofísica Internacional*, 41(2), 121-131. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2002.41.2.281>
- Zurek, J.; Williams-Jones, G. (2013). The shallow structure of Kīlauea caldera from high-resolution Bouguer gravity and total magnetic anomaly mapping: insights into progressive magma reservoir growth. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(7), 3742-3752. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50243>

---

---

Fecha de recibido: 01 de febrero de 2023

Fecha de aceptado: 25 de enero de 2024

---

---