

1 Titulo

2 **Análisis morfo-estructural del Campo Volcánico Monogenético Guamuéz-**  
3 **Sibundoy (sur de Colombia)**

4

5 Autores

6 Lisbeth Tatiana Murillo-Orobio<sup>1</sup>; Darcy Lisbeth Chapuel-Cuasapud<sup>1</sup>; Luis Alvaro  
7 Botero-Gómez<sup>2,3</sup>; Hugo Murcia<sup>3,4\*</sup>

8 <sup>1</sup>Programa de Geología, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

9 <sup>2</sup>Doctorado en Ciencias - Geología, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

10 <sup>3</sup>Instituto de Investigaciones en Estratigrafía, Universidad de Caldas, Manizales,  
11 Colombia

12 <sup>4</sup>Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad de Caldas, Manizales,  
13 Colombia

14 **\*Correspondence:**

15 Corresponding Author

16 [hugo.murcia@ucaldas.edu.co](mailto:hugo.murcia@ucaldas.edu.co)

17 Darcy Lisbeth Chapuel Cuasapud; [darcychapuel@gmail.com](mailto:darcychapuel@gmail.com);

18 <https://orcid.org/0009-0009-7456-6123>

19 Lisbeth Tatiana Murillo Orobio; [murillot410@gmail.com](mailto:murillot410@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0009-4647-6921>

21 Luis Alvaro Botero-Gómez; [luis.botero@ucaldas.edu.co](mailto:luis.botero@ucaldas.edu.co); <https://orcid.org/0000-0002-0783-4097>

23 Hugo Murcia; [hugo.murcia@ucaldas.edu.co](mailto:hugo.murcia@ucaldas.edu.co); <https://orcid.org/0000-0002-3570-1988>

25 Manuscrito revisado para el número especial titulado "Vulcanismo monogenético, medio ambiente y  
26 sociedad" de la revista Geofísica Internacional.

27 Mayo de 2024

28 **Resumen**

29 El Campo Volcánico Monogenético Guamuéz-Sibundoy (CVMGS) está localizado  
30 en los Andes del Norte, sur de Colombia, en una depresión geomorfológica que se  
31 conoce como Valle de Sibundoy. Esta zona se encuentra influenciada por un  
32 conjunto de fallas relacionadas con el Sistema de Fallas de Algeciras. Con el  
33 objetivo de comprender la actividad tectónica registrada en los rasgos morfo-  
34 estructurales y la interacción con el CVMGS, se presenta una caracterización morfo-  
35 estructural a través del procesamiento de modelos digitales usando sistemas de  
36 información geográfica (SIG). Para esto, utilizando un modelo de elevación digital,  
37 se analizaron las pendientes, los drenajes, un mapa de aspectos y los lineamientos  
38 sobre un relieve sombreado, y se identificaron deflexiones en ríos y segmentos  
39 rectilíneos. El análisis evidencia que la concentración de lineamientos presentes en  
40 la zona de estudio puede relacionarse con zonas de daño de las fallas principales,  
41 con patrones de dirección WNW-ESE, NW-SE, NNE-SSW y NE-SW. Los  
42 lineamientos en sentido WNW-ESE y NW-SE se relacionan con la falla Sibundoy y  
43 el Sistema de Fallas de Algeciras, mientras que los lineamientos en sentido NNE-  
44 SSW y NE-SW con la falla San Francisco-Yunguillo. Los resultados permiten  
45 evidenciar fallas regionales que no han sido registradas en la literatura, así como  
46 proponer un modelo estructural basado en estos sistemas y la interacción con fallas  
47 transversales.

48 **Palabras clave:** vulcanismo monogenético, geología estructural, Andes  
49 Colombianos, Campo Volcánico Monogenético Guamuéz-Sibundoy, Sistema de  
50 Fallas Algeciras.

51 **Abstract**

52 Guamuéz-Sibundoy Monogenetic Volcanic Field (GSMVF) is located in the Northern  
53 Andes, southern Colombia, 4 km SW of Santiago, in a geomorphological depression  
54 known as the Sibundoy Valley. This area is influenced by a set of faults related to  
55 the Algeciras Fault System. To understand the tectonic activity recorded in the  
56 morpho-structural features and the interaction with the GSMVF, a morphostructural  
57 characterization via geographic information systems (GIS) was carried out. Using a  
58 digital elevation model, slopes, drainage, aspects, and lineaments on shaded relief  
59 were analyzed. Deflections in rivers and rectilinear segments were identified. The  
60 analysis shows that the lineaments concentration present in the area can be related  
61 to the damage zone of regional faults. These faults can be related to predominant  
62 continuous lineaments in the WNW-ESE, NW-SE, NNE-SSW y NE-SW directions.  
63 The lineaments in the WNW-ESE y NW-SE direction are related to the Sibundoy  
64 fault and Algeciras Fault System, while the lineaments in the NNE-SSW and NE-SW  
65 directions are associated with the San Francisco-Yunguillo fault. In conclusion, this  
66 work reveals regional faults that have not been previously identified, and uses these  
67 faults to propose a structural model of interaction with transverse faults.

68 **Keywords:** monogenetic volcanism, structural geology, Colombian Andes,  
69 Guamuéz-Sibundoy Monogenetic Volcanic Field, Algeciras Fault System.

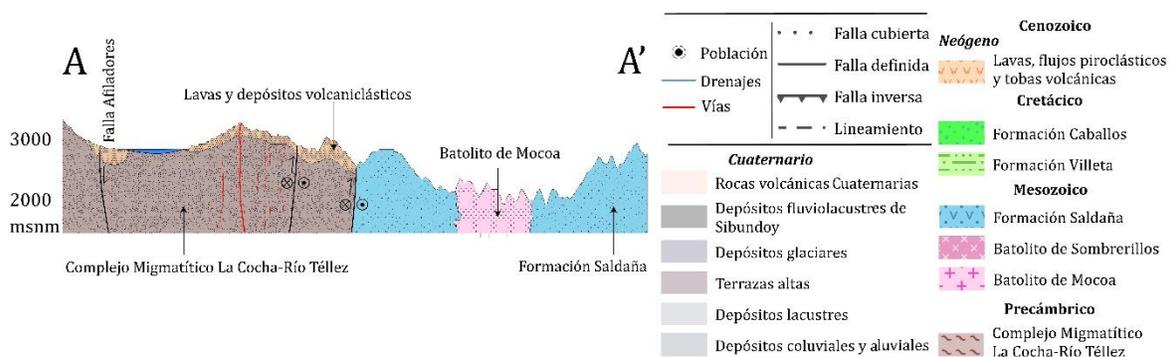
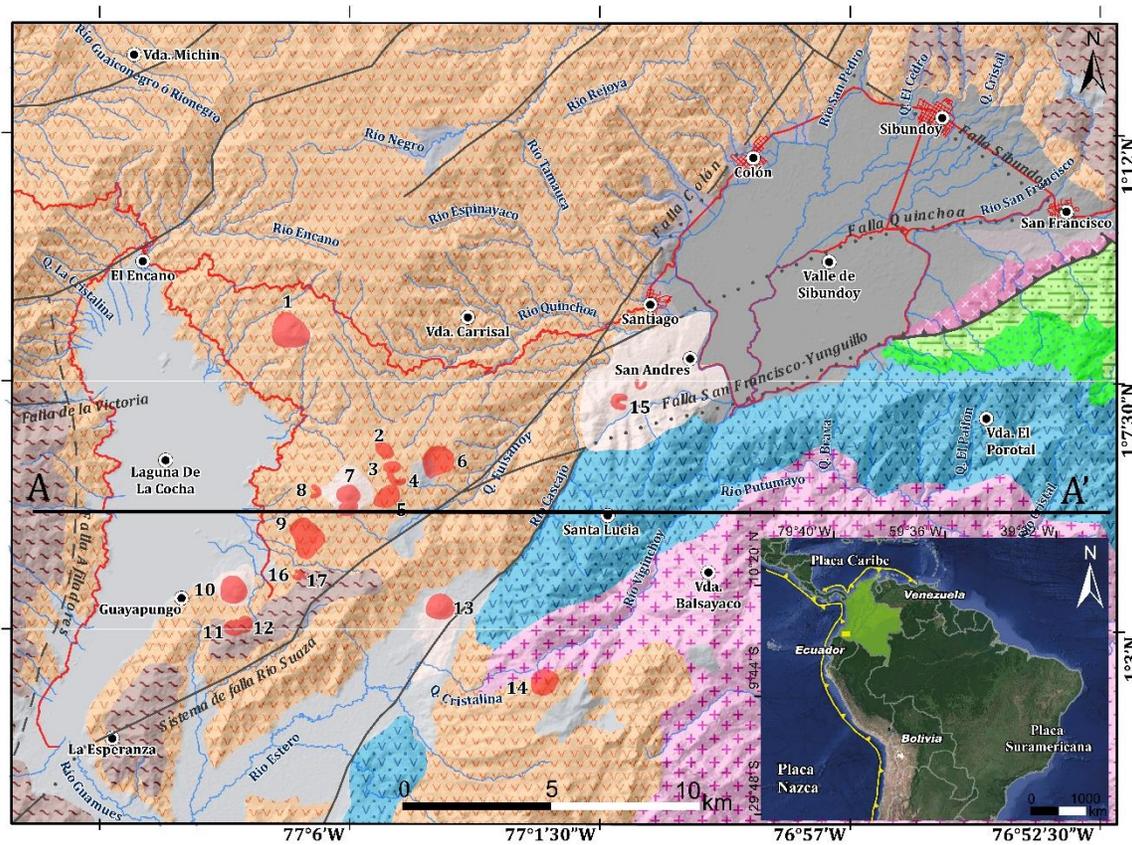
## 70 1. Introducción

71 Los volcanes monogenéticos corresponden a edificios volcánicos pequeños  
72 resultantes de un solo evento eruptivo (Kereszturi and Németh, 2012). La  
73 agrupación de estos volcanes se conoce como campos monogenéticos,  
74 consistentes en un conjunto de volcanes, cada uno de los cuales ha hecho una  
75 única erupción (Murcia and Németh, 2020). El desarrollo de los campos volcánicos  
76 monogenéticos está controlado principalmente por el entorno tectónico regional,  
77 estando la mayoría relacionados con regímenes extensionales (Acocella, 2021). En  
78 Colombia, sin embargo, los campos volcánicos monogenéticos se encuentran en  
79 ambientes locales de transtensión y transpresión asociados con la subducción  
80 oblicua (e.g. Botero-Gómez et al., 2018; Sánchez Torres et al., 2022; Vargas-Arcila  
81 et al., 2023). Considerando que el entorno tectónico regional controla la aparición y  
82 la distribución de los volcanes (Avellán et al., 2020), es imperante realizar una  
83 caracterización morfo-estructural de los campos volcánicos como base para definir  
84 el o los modelo vulcano-tectónicos que los enmarcan (e.g. Avellán et al., 2019;  
85 Gómez-Vasconcelos et al., 2021; Liotta et al., 2023).

86 El Campo Volcánico Monogenético Guamuéz-Sibundoy (CVMGS) (Flórez, 2003;  
87 Monsalve-Bustamante et al., 2020), está localizado en el flanco oriental de la  
88 Cordillera Central, en los departamentos de Nariño y Putumayo (Figura 1), 4 km al  
89 SW de la población de Santiago. En esta zona se destaca una depresión amplia de  
90 aproximadamente 98,32 km<sup>2</sup> de extensión, con predominio de depósitos  
91 Cuaternarios, que se conoce como Valle de Sibundoy (Velandia et al., 2001). Este  
92 campo se ve influenciado por los sistemas de fallas NE-SW Algeciras, del Río Suaza

93 y el Río Cauca, en los cuales se destaca la falla San Francisco-Yunguillo (Murcia &  
94 Cepeda, 1991). Esta falla corresponde en este sector con el trazo principal del  
95 Sistema de Fallas de Algeciras (SFA) que controla el flanco sur de la cuenca  
96 (Velandia et al., 2001). De acuerdo con el Servicio Geológico Colombiano  
97 (anteriormente INGEOMINAS), en el año 1834 y 1935 se registraron sismos con  
98 epicentro en el Valle de Sibundoy, los cuales podrían ser un indicio de la actividad  
99 neotectónica de la zona que se relacionan con los segmentos de falla del sistema  
100 al borde sur de la cuenca (Núñez, 2003).

101 En este trabajo se presenta un análisis de la geología estructural y actividad  
102 tectónica del CVMGS, con base en fotointerpretación sobre un modelo de elevación  
103 digital, identificación de lineamientos y datos corroborados en campo. En relación  
104 con la información obtenida, se realiza una caracterización geomorfológica, un  
105 análisis de drenajes y una identificación de lineamientos como insumo para plantear  
106 un modelo vulcano-estructural que permita definir la posible interacción entre  
107 estructuras presentes en la zona como fallas y fracturas en el basamento con el  
108 ascenso de magma.



109

110 **Figura 1.** Mapa geológico de la zona objeto de estudio con unidades cronoestratigrafías (Modificado  
 111 y adaptado de Núñez, 2003; Restrepo et al., 2021); nótese las estructuras volcánicas del Campo  
 112 Volcánico Monogenético Guamuéz-Sibundoy delimitados por polígonos rojos y las principales fallas  
 113 de la zona reportadas por el Servicio Geológico Colombiano (2020) y Restrepo et al. (2021). 1:  
 114 Campanero, 2: Victoria, 3: Manoy, 4: Mijoy, 5: Bijinchoy, 6: Maar Fuisanoy, 7: Mujundinoy, 8:  
 115 Corota, 9: Maar Yaku, 10: Guayapungo, 11: Encano, 12: Guamez, 13: Estero, 14: Patascoy, 15: Muchivioy,  
 116 16: Laurel, 17: Santa Teresita. Elaborado en ArcGIS a partir del DEM 12,5 m.

## 117        **2. Marco geológico-estructural**

118    La configuración tectónica de Colombia está caracterizada por un margen  
119    continental deformado en el límite de tres placas tectónicas: Suramericana, Nazca  
120    y Caribe (Taboada et al., 1998, Figura 1). La subduccion de estas placas da origen  
121    a la cadena montañosa denominada los Andes del Norte; esta cadena orogénica  
122    resulta de procesos de subducción-obducción y colisiones que ocurrieron en el  
123    margen occidental de Colombia abarcando desde el Precámbrico hasta la  
124    actualidad (McCour et al., 1984; Taboada et al., 1998; Acosta et al., 2007). El  
125    vulcanismo en la Cordillera Central (Figura 1) esta dado por la subduccion de la  
126    placa Nazca debajo de la placa Suramericana, lo que ha generado actividad  
127    tectónica y volcánica reciente (Taboada et al., 1998). Los Andes Colombianos  
128    abarcan a tres secuencias montañosas: cordilleras Oriental, Central y Occidental,  
129    separadas por los valles interandinos como el valle del río Magdalena, el valle del  
130    río Cauca, los valles del río Atrato y el río San Juan, y la serrania de Baudó  
131    (Toussaint & Restrepo, 1994).

132    El basamento de la zona de estudio esta conformado por rocas metamórficas del  
133    Complejo Migmatítico La Cocha-Río Téllez de edad Precámbrica (Nuñez, 2003;  
134    Zapata-García et al., 2017). Estas rocas se encuentran en contacto fallado con el  
135    Batolito de Sombrerillos de edad Jurásico Inferior (Garcia, 2018; Restrepo et al.,  
136    2021), y rocas sedimentarias de las Formaciones Caballos y Villeta de edad  
137    Cretácico (Restrepo et al., 2021). El Batolito de Mocoa (Nuñez, 2003; Arango et al.,  
138    2015) de edad Jurásico Inferior (Nuñez, 2003; Arango et al., 2015) y rocas  
139    volcánicas de la Formación Saldaña de edad Jurásica (Nuñez, 2003). Hacia el

140 sector NW de la zona de estudio afloran lavas y depósitos volcanoclásticos de edad  
141 entre finales del Mioceno e inicios del Plioceno y finales del Plioceno e inicio del  
142 Pleistoceno (Murcia & Pichler, 1986; Núñez, 2003; Restrepo et al., 2021). El  
143 Cuaternario está representado por depósitos de caída piroclástica, lahares y lavas,  
144 glaciares, coluviales y aluviales.

145 Teniendo en cuenta la configuración tectónica, el sistema de fallas activas en  
146 Colombia se da como resultado de la convergencia de las placas tectónicas  
147 mencionadas y se extienden paralelamente a los piedemontes de las cordilleras  
148 colombianas (Taboada et al., 1998). Hacia el este de Colombia se destacan fallas  
149 con azimut NE-SW y fallas con dirección cercana N-S, que dan origen a la geometría  
150 de la Cordillera Oriental colombiana; estas fallas que tenían componentes normales  
151 se reactivaron a fallas inversas y de rumbo durante el Cenozoico por el cambio de  
152 eventos extensivos a compresivos (Helmes et al., 1995). Hacia el sur la Cordillera  
153 Oriental limita con dos grandes sistemas de falla: el Sistema del Piedemonte Llanero  
154 y el Sistema del Valle del Magdalena. Para la zona de estudio, se destacan dos  
155 zonas que hacen parte del Piedemonte Llanero: en el sector sur se destacan las  
156 fallas de Mocoa y Florencia, las cuales se caracterizan por su componente inverso  
157 en dirección NNE. Además, son de importancia las fallas de alto ángulo de Altamira-  
158 Algeciras y Sibundoy con componente de rumbo lateral derecho. Hacia el norte se  
159 da un cambio de azimut con respecto al sector sur a N-S y se destaca la falla Santa  
160 Marta Bucaramanga en el Macizo de Santander (Taboada et al., 1998). Del mismo  
161 modo, el valle Alto del Magdalena tiene segmentos de las fallas Algeciras- Altamira  
162 y De Suaza con una componente de rumbo lateral derecha. Como segmentos al

163 suroccidente se encuentran las fallas de Afiladores y Sibundoy, las cuales  
164 representan un fallamiento activo que sigue la cinemática principal (Taboada et al.,  
165 1998)

166

## 167 **2.1. Sistema de Fallas Algeciras**

168 El Sistema de Fallas Algeciras (SFA) es un conjunto de fallas que tienen continuidad  
169 desde la frontera con el Ecuador hasta unirse con el Sistema de Fallas de  
170 Guaicaramo; estos sistemas de fallas pueden estar relacionadas genéticamente con  
171 fases progresivas de la orogenia andina (Velandia et al., 2001; Chicangana-Montón  
172 et al., 2022; Gómez-Hurtado et al., 2022). Particularmente, para la zona SW de  
173 Colombia, el SFA ha tenido varias denominaciones, como Suaza, Garzón, Pitalito y  
174 Altamira (Murcia, 1991). Sin embargo, Velandia (2005) denomina SFA a la  
175 integración de un conjunto de fallas locales mapeadas con tendencia NE-SW, las  
176 cuales están distribuidas en seis sectores: Algeciras-Balsillas, Zuluaga-Garzón,  
177 Altamira-Pitalito, San Juan de Villalobos-Yunguillo, Sibundoy-La Cocha y  
178 Monopamba-Ecuador. Las características del relieve estructural catalogan a la falla  
179 como de rumbo deslizante lateral derecha (Vergara, 1996; Paris & Romero, 1994;  
180 Velandia, 2005; Anderson et al., 2016; Cediel & Shaw, 2019) cuyas evidencias  
181 estructurales a lo largo de la falla son observadas en el desplazamiento moderado  
182 de abanicos Cuaternarios, lomos de presión, drenajes decapitados, ganchos de  
183 flexión, facetas triangulares, cuencas de tracción y alineamientos de rasgos  
184 morfotectónicos (Diederix, 2020; Gómez-Hurtado et al., 2022). Para la zona de  
185 estudio, en el sector Sibundoy- La Cocha, el SFA está relacionado con fallas que

186 siguen la tendencia regional en dirección NE-SW y fallas transversales en dirección  
187 NW-SE; formando levantamiento y depresiones que pueden hacer parte de un  
188 sistema de “*wrench fault*” como el Valle de Sibundoy y la laguna de La Cocha  
189 (Figura 2) (Velandia et al., 2001, 2005).

## 190 **2.2. Falla Sibundoy**

191 Las fallas en dirección NW observadas en esta zona incluyen la falla Sibundoy  
192 (Velandia et al., 2001). Su dirección en rumbo varía entre N50-60° W, con  
193 desplazamiento dextral que corta y desplaza la mayoría de estructuras y unidades  
194 litoestratigráficas expuestas en el área. Esta falla, al norte de las poblaciones de  
195 San Francisco y Sibundoy, presenta una zona amplia de cizalla (Núñez, 2003;  
196 Restrepo et al., 2021). Es uno de los rasgos tectónicos más destacados del área  
197 por su gran extensión, desde el piedemonte Amazónico hasta el flanco occidental  
198 de la Cordillera Central.

## 199 **2.3. Falla Quinchoa**

200 Esta falla tiene una dirección ENE-WSW, la cual se encuentra cubierta en su trazo  
201 por el Valle de Sibundoy. Se caracteriza por ser una estructura en echelón; su  
202 mecanismo de formación está asociado con los rasgos neotectónicos de la falla San  
203 Francisco-Yunguillo con componente en rumbo dextral y dirección NE-SW; algunos  
204 de los ríos que atraviesan el Valle de Sibundoy como el Putumayo y Quinchoa  
205 presentan trazos orientados que se sugiere están asociados con el control  
206 estructural de la falla (Nuñez, 2003).

207        **2.4. Falla Colón**

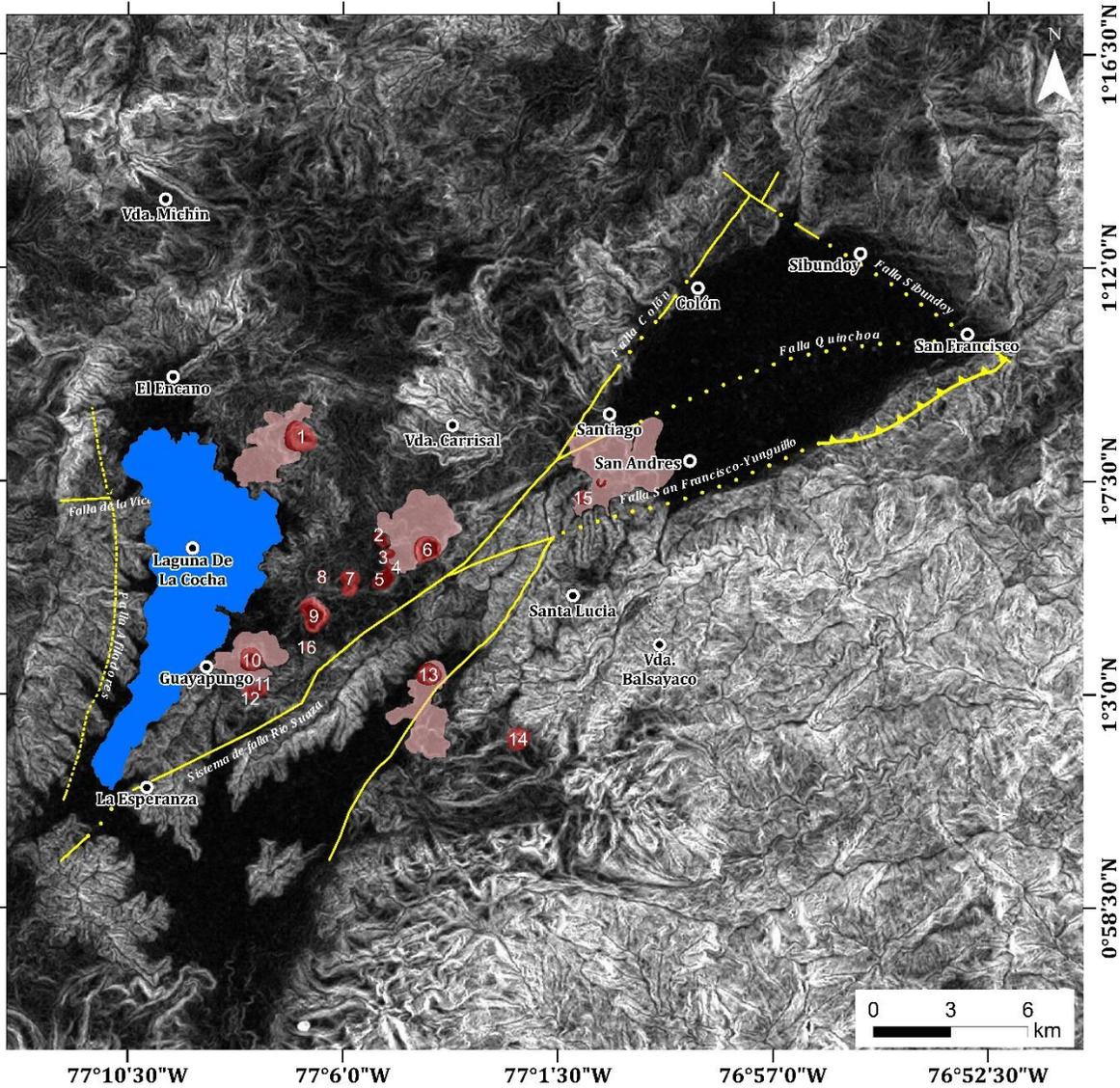
208        El trazo de la falla Colón con tendencia N35E (Nuñez, 2003) y cinemática dextral,  
209        atraviesa el tramo oriental del Valle de Sibundoy y el Complejo Migmatítico La  
210        Cocha Río-Téllez, hasta interceptarse con la falla San Francisco-Yunguillo con  
211        componente en rumbo dextral y dirección NE-SW.

212        **2.5. Falla San Francisco-Yunguillo**

213        La falla inversa San Francisco-Yunguillo con dirección NE-SW, tiene un componente  
214        de desplazamiento dextral y pone en contacto al Batolito de Sombrerillos con las  
215        formaciones Saldaña, Caballos y Villeta (Núñez, 2003). Es una de las estructuras  
216        geológicas más relevantes del área de estudio; tiene rasgos de actividad reciente,  
217        como la formación del Valle de Sibundoy cruzado en el oriente por la falla Colón; el  
218        valle se considera como una cuenca *pull apart* (Velandia et al., 2001) con forma  
219        romboidal (Núñez, 2003). La falla controla el flanco sur del Valle, con una diagonal  
220        mayor que tiene una longitud cercana a los 18 km orientada N60°E. (Velandia et al.,  
221        2001).

222        **2.6. Falla de La Victoria**

223        Esta falla tiene una dirección NE-SW con cinemática dextral, atribuida por estar  
224        asociada como una falla paralela al Sistema de Fallas de Río Suaza con dirección  
225        NE-SW y desplazamiento en rumbo dextral; la falla atraviesa la laguna de La Cocha  
226        (Figura 2) y continua su trazo hacia el NE de la zona de estudio.



227

228 **Figura 2.** Mapa de disección vertical de la zona de estudio; nótese las estructuras volcánicas del  
 229 Campo Volcánico Monogenético Guamuéz-Sibundoy delimitados por polígonos rojos y las  
 230 principales fallas de la zona reportadas por el Servicio Geológico Colombiano (2020) y Restrepo et  
 231 al. (2021). 1: Campanero, 2: Victoria, 3: Manoy, 4: Mijoy, 5: Bijinchoy, 6: Maar Fuisanoy, 7:  
 232 Mujundinoy, 8: Corota, 9: Maar Yaku, 10: Guayapungo, 11: Encano, 12: Guamez, 13: Estero, 14:  
 233 Patascoy, 15: Muchivioy, 16: Laurel, 17: Santa Teresita.

234

235       **3. Campo Volcánico Monogenético Guamuéz-Sibundoy (CVMGS)**  
236       El Campo Volcánico Monogenético Guamuéz-Sibundoy (CVMGS) corresponde a  
237       volcanes emplazados en el macizo colombiano (cordilleras Central y Oriental) al sur  
238       occidente del país, en los departamentos de Nariño y Putumayo (Núñez, 2003)  
239       (Figura 2). Su formación se da como respuesta al magmatismo generado por los  
240       procesos de subducción oblicua de la placa Nazca bajo la placa suramericana  
241       (Montes et al., 2019; Restrepo et al., 2021). Este evento magmático fue emplazado  
242       en un régimen tectónico transtensional, con el esfuerzo compresivo horizontal  
243       máximo ( $\sigma_1$ ) en dirección NE-SW (Grajales et al., 2020) y se considera como  
244       vulcanismo de retro-arco (Diederix et al., 2020). Actualmente, se conocen 19  
245       volcanes en la zona, los cuales se caracterizan por presentar morfologías cónicas y  
246       en depresión. La secuencia morfo-cronológica del más reciente al más antiguo de  
247       estas estructuras, según Rivera (2021), es: Campanero, Encano-Guamuéz,  
248       Guayapungo, Patascoy, Estero, Mujundinoy N-Mujundinoy S, Corota, Mijoy, Manoy,  
249       Taita Muchivioy-Mamá Muchovioy, Victoria, Bijinchoy, Fuisanoy, Yaku (Tabla 1).  
250

251 **Tabla 1.** Coordenadas con origen WGS1984 de los volcanes constituyentes del Campo Volcánico  
 252 Monogenético Guamuéz-Sibundoy (CVMGS). Tomado y modificado de Rivera- Lara (2021).

Núm.	Volcán	Coordenadas	Altitud
1	Campanero.	1°8'13" N; 77°6'42" W	3020
2	Victoria.	1°6'05" N; 77°4'59" W	3072
3	Manoy.	1°5'47" N; 77°4'52" W	3114
4	Mijoy	1°5'36" N; 77°4'46" W	3128
5	Bijinchoy.	1°5'15" N; 77°4'59" W	3057
6	Maar Fuisanoy.	1°5'56" N; 77°4'05" W	3048
7	Mujundinoy Norte. Mujundinoy Sur.	1°5'21" N, 77°5'38" W; 1°5'04" N, 77°5'39" W	3180
8	Corota.	1°5'20" N; 77°6'16" W	3072
9	Maar Yaku.	1°4'31" N; 77°6'20" W	3048
10	Guayapungo.	1°3'33" N; 77°7'41" W	2839
11-12	Encano-Guamuéz.	1°2'56" N, 77°7'31" W; 1°2'52" N, 77°7'41" W	2968
13	Estero	1°3'14" N; 77° 3' 59" W	2840
14	Patascoy.	1°1'54" N; 77°2'17" W	3340
15	Muchivioy Sibundoy) M Muchivioy T	(volcán 1°7'16" N, 77°0'25" W; 1°6'59" N, 77°0'46" W	2306 2385
16	Laurel	1°3'48" N, 77°6'33" W; 1°3'49" N, 77°6'24" W	2923 2952
17	Santa Teresita.		

253

254 Algunos estudios previos (e.g. Nuñez, 2003; Rodríguez & González, 2004, Diederix  
 255 et al., 2020) definen la composición del vulcanismo de Guamuéz-Sibundoy como  
 256 basaltos ultramáficos y nefelínicos. Sin embargo, Robertson et al. (2002) describen  
 257 a este conjunto de volcanes como andesíticos. La relación del Sistema de Fallas de  
 258 Algeciras con la formación de cuencas *pull apart* y el vulcanismo monogenético  
 259 dentro del área de estudio se da debido a regímenes de esfuerzos transtensionales  
 260 (Diederix et al., 2020). A su vez, el sistema de fallas estaría facilitando el ascenso  
 261 del magma (Rivera-Lara, 2021).

262

## 263 4. Metodología

### 264 4.1. Análisis morfométrico y de drenajes

265 A partir del análisis digital en el *software* ArcGIS, se procesó un mapa de sombras  
266 mediante la herramienta *hillshade* con base en un modelo de elevación digital (DEM)  
267 con resolución 12,5 m obtenido del satélite Alos Palsar. Posteriormente, se realizó  
268 un mapa de aspectos siguiendo la clasificación de orientación de las laderas  
269 propuesta por Bonachea-Pico (2006) y Sevilla- Caicedo (2013) a partir de la cual se  
270 definen nueve rangos: PLANO (dada por el valor de -1), N, NE, E, SE, S, SW, W,  
271 NW. Subsiguientemente, se realizó un mapa de pendientes mediante la herramienta  
272 *Slope*, siguiendo la propuesta de la estandarización de la cartografía  
273 geomorfológica en Colombia según Carvajal (2012). Finalmente, se realizó un mapa  
274 de drenajes mediante el uso de los programas SAGA (Sistema para Análisis  
275 Geocientíficos Automatizados), QGIS y ArcGIS. Estos drenajes fueron corregidos  
276 manualmente a través de imágenes satelitales de SAS Planet con resolución de 20  
277 m. Estos insumos permitieron resaltar sobre el modelo de elevación digital los  
278 lineamientos existentes.

### 279 4.2. Análisis de lineamientos

280 Para la definición de lineamientos estructurales fueron considerados los rasgos  
281 lineales, rectilíneos y curvilíneos que resaltan en el DEM, con la ayuda de mapas  
282 de sombras y un mapa de aspectos. Para los mapas de sombras se consideraron  
283 intervalos de azimut establecidos cada 30°, con una dirección de altitud del sol de  
284 45°. La definición del trazo de cada lineamiento se hizo de forma manual, teniendo  
285 en cuenta detalladamente el comportamiento de los drenajes, los rasgos lineales

286 que se observan en el relieve sombreado y la inclinación de la pendiente a través  
287 del mapa de aspectos. Los datos de azimut obtenidos de cada lineamiento fueron  
288 procesados en el programa Estereonet para crear diagramas de rosas divididos en  
289 cuatro cuadrantes del área de interés.

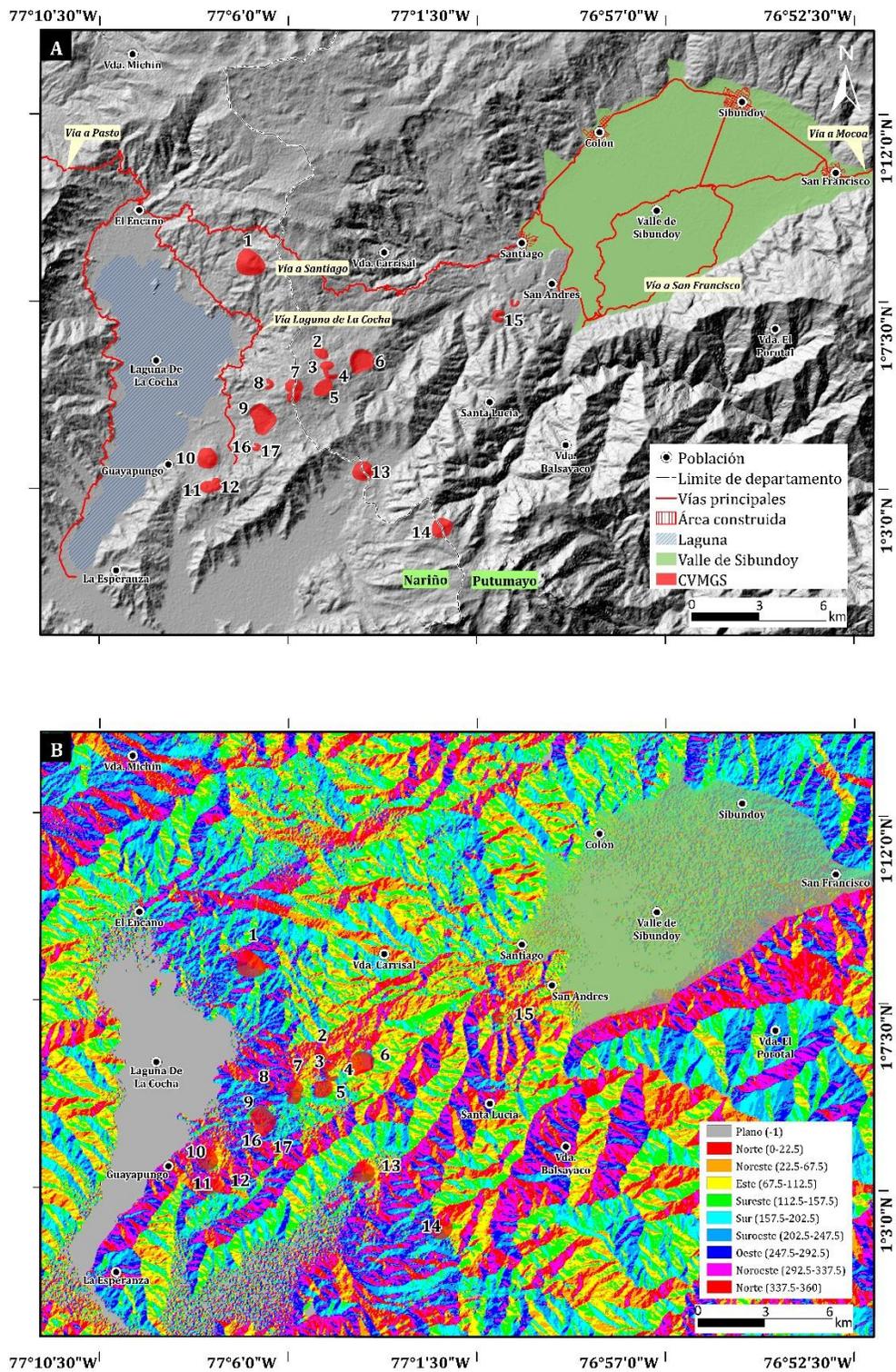
### 290 **4.3. Trabajo de campo**

291 Con el objetivo de corroborar el análisis generado en los sistemas de información  
292 geográfica, así como las tendencias estructurales definidas sobre los modelos de  
293 elevación digital, se tomaron datos estructurales directamente en campo, tanto del  
294 basamento como de los productos volcánicos. Se analizaron estos datos,  
295 comparándolos con la información generada, correspondiendo a diaclasas  
296 principalmente. En el mismo sentido, se corroboraron litologías en la zona y se  
297 complementó el análisis geomorfológico como parte del análisis morfoestructural.

## 298 **5. Resultados**

### 299 **5.1. Análisis morfométrico**

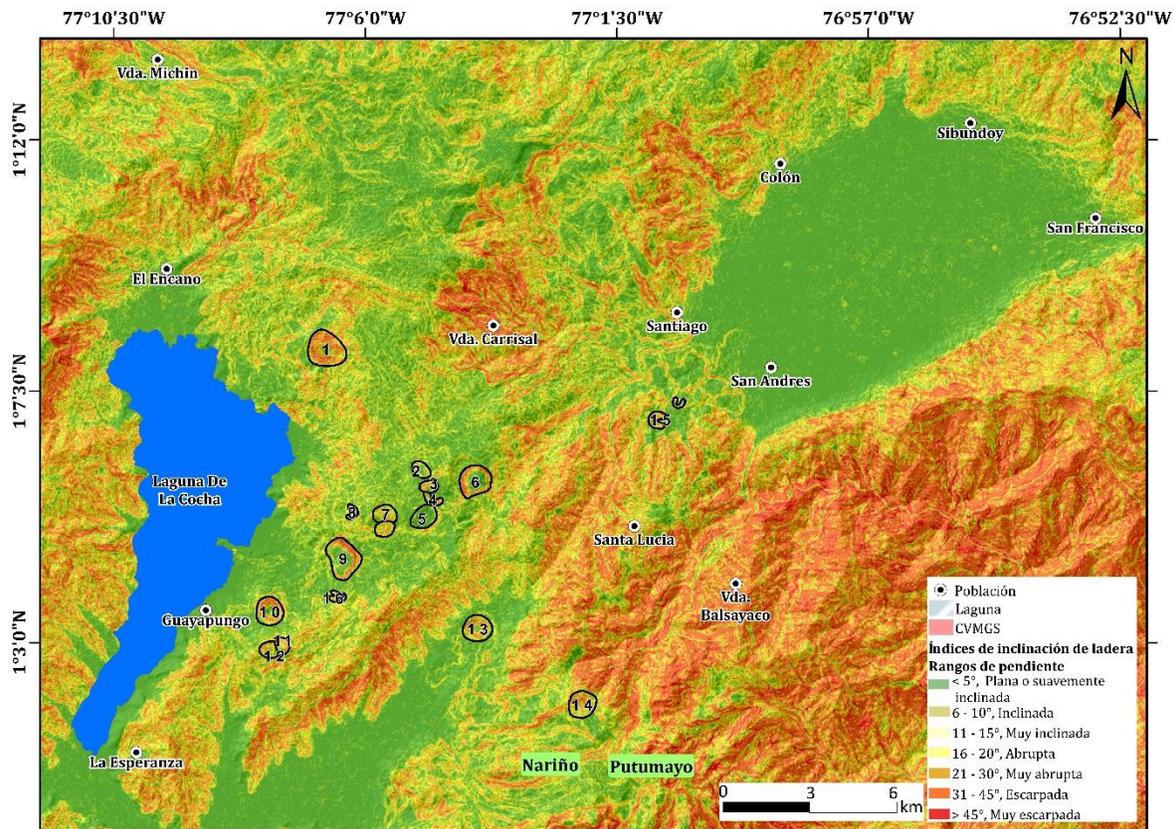
300 Las formas del terreno y el análisis de la información topográfica tuvieron como base  
301 la realización de un mapa de sombras (Figura 3A). Posteriormente, la orientación  
302 de las laderas se analizó a través de un mapa de aspectos (Figura 3B), en donde  
303 se obtuvo la posición de las laderas con respecto a los puntos cardinales y a su vez  
304 se delimitaron geoformas, lineamientos y procesos erosivos.



305

306 **Figura 3.** Análisis morfométrico del Campo Volcánico Monogenético Guamuéz-Sibundoy (CVMGS),  
 307 con la ubicación de las estructuras volcánicas delimitadas por polígonos rojos. A) Mapa de sombras.  
 308 B) Mapa de aspectos.

309 Teniendo como base el mapa de pendientes (Figura 4), se resaltaron a través de  
310 rangos de inclinación los valores de pendientes en la zona de estudio: valores bajos  
311 corresponden a zonas planas y valores elevados corresponden a las zonas más  
312 escarpadas. Las tendencias del relieve corresponden a: 1) Topografía plana o  
313 suavemente inclinada ( $<5^\circ$ ) con un área de 21113,9 Ha (21,3% del área total); esta  
314 se concentra en el Valle de Sibundoy y los depósitos lacustres de la laguna de La  
315 Cocha. 2) Pendientes inclinadas ( $6-10^\circ$ ) con un área de 13496,7 Ha (13,6% del área  
316 total); esta se encuentra en el sector NW de la zona. 3) Pendientes muy inclinadas  
317 ( $11-15^\circ$ ) con un área de 13151,4 Ha (13,2% del área total); estas se encuentran  
318 principalmente en el sector NW y SW del Valle de Sibundoy. 4) Pendientes abruptas  
319 ( $16-20^\circ$ ) con un área de 12149,3 Ha (12,2% del área total); estas se encuentran  
320 principalmente en el sector NW y SW del Valle de Sibundoy. 5) Pendientes muy  
321 abruptas ( $21-30^\circ$ ) con un área de 21721,7 Ha (21,9% del área total); estas, aunque  
322 están distribuidas en la mayor parte de la zona de estudio, se concentran  
323 principalmente hacia el NW y SE de la laguna de La Cocha y alrededor del Valle de  
324 Sibundoy. Y 6) El rango de inclinación para pendientes escarpadas ( $31-45^\circ$ ) con un  
325 área de 16172,5 Ha (16,3% del área total), y muy escarpadas ( $>45^\circ$ ) con un área  
326 de 1315,7 Ha (1,3% del área total) tienen mayor densidad hacia los sectores S y  
327 NW del Valle de Sibundoy y el N de La laguna de La Cocha.



328

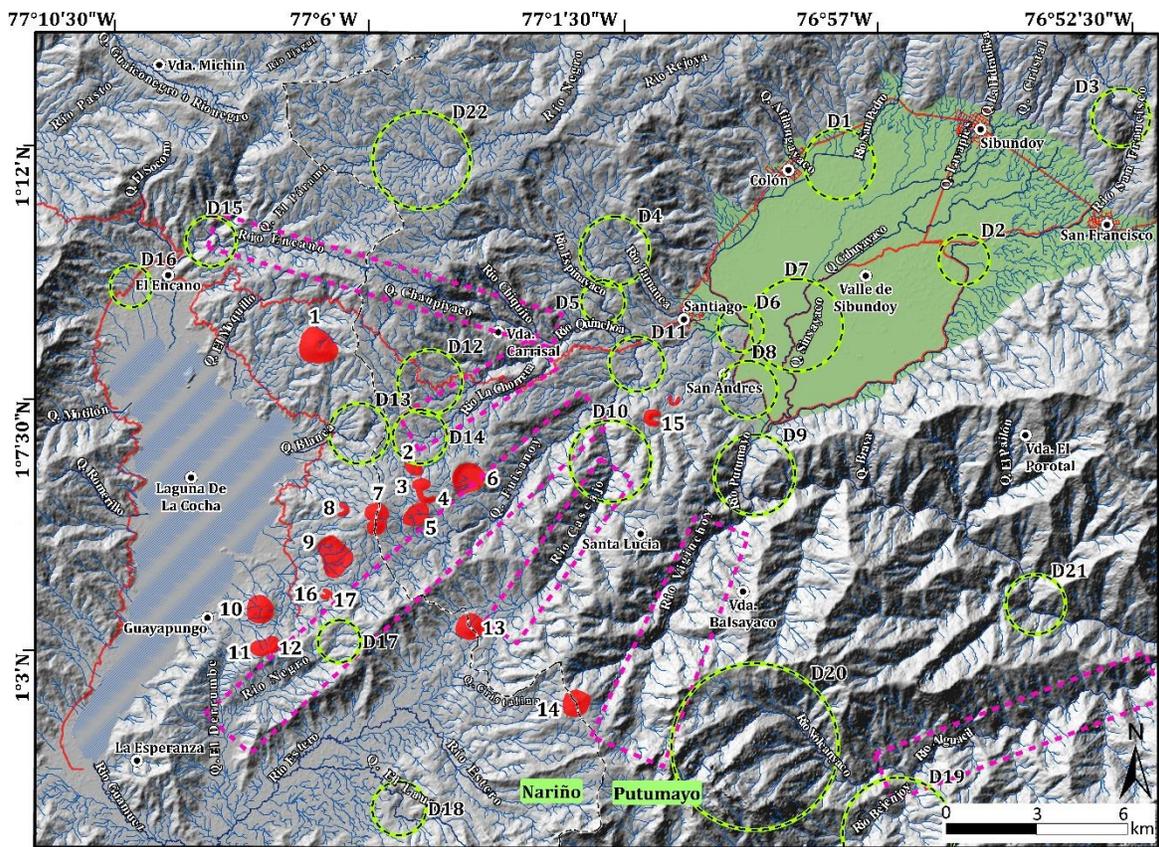
329 **Figura 4.** Mapa de pendientes para el Campo Volcánico Monogenético Guamuéz-Sibundoy  
 330 (CVMGS) de acuerdo con los índices de inclinación de ladera propuestos por Carvajal (2012).  
 331 Elaborado en ArcGIS a partir del DEM 12,5 m.

332

333 De acuerdo con lo anterior, la zona de interés presenta cuatro ambientes que han  
 334 modificado el relieve actual: denudacional, estructural, volcánico y fluvial. 1) El  
 335 ambiente denudacional tiene mayor influencia geomorfológica, dado por la  
 336 combinación de procesos erosivos y meteorización, asociado tanto a la influencia  
 337 del clima como a la tectónica (Burbank & Pinter, 1999). Así, el levantamiento  
 338 tectónico provoca que la intensidad de erosión sea mayor en relieve escarpado  
 339 (Nichols, 2009). 2) Las subunidades producidas en un ambiente estructural están  
 340 controladas por las estructuras geológicas (características litológicas y

341 estructurales) y por la erosión diferencial (Gutiérrez & Gutiérrez, 2016); en este  
342 sentido, el área de estudio está influenciada por la presencia de un conjunto de  
343 fallas regionales y locales asociadas con el Sistema de Fallas Algeciras, que afectan  
344 diferentes unidades como la Formación Saldaña, Complejo Migmatítico La Cocha-  
345 Río Téllez, Formación Villeta, Formación Caballos, depósitos Cuaternarios como  
346 fluviales y volcánicos. 3) Por otro lado, la presencia del CVMGS está relacionada  
347 con geoformas de origen volcánico principalmente por la acumulación de productos  
348 volcánicos (Figura 2). 4) El ambiente fluvial está representado por geoformas que  
349 son generadas por las corrientes de agua (Figura 5), principalmente de los ríos en  
350 los que se incluyen: hacia el NW, el río Putumayo, quebrada Sinsayaco, río San  
351 Pedro y río Quinchoa, que atraviesan el Valle de Sibundoy; en el sector central el  
352 río La Chorrera, quebrada Fuisanoy, quebrada Cascajo y la quebrada Samanoy; y  
353 en la zona sur de la laguna de la Cocha los ríos: Estero, Guamuéz y Negro, estos  
354 relacionados con el trazo de fallas y lineamientos que provocan deflexiones y  
355 pueden influenciar en la densidad y el tipo de drenaje (e.g. Gutiérrez & Gutiérrez,  
356 2016).

357



358  
 359 **Figura 5.** Mapa de anomalías de drenajes de la zona objeto de estudio donde se delimita con círculos  
 360 de color verde las deflexiones y con polígonos de color morado la rectilineidad, además se ubica las  
 361 estructuras volcánicas del Campo Volcánico Monogenético Guamuéz- Sibundoy (CVMGS)  
 362 delimitados con polígonos rojos. Elaborado mediante el uso de los programas SAGA (Sistema para  
 363 Análisis Geocientíficos Automatizados), QGIS y ArcGIS.

364

## 365 5.2. Análisis de drenajes

366 Los patrones de drenaje en el área de estudio consisten principalmente en tipo  
 367 dendrítico, sub-dendrítico, sub-paralelo, radial, angular y asimétrico (Figura 5). El  
 368 sector NE de la zona de estudio se caracteriza por el desarrollo de patrones sub-  
 369 paralelos cuyos segmentos se unen a lo largo de los ríos principales que atraviesan  
 370 el Valle de Sibundoy: al E se encuentran los ríos Putumayo y San Francisco cuyos  
 371 segmentos de drenaje largos están en dirección NW-SE. El río Putumayo es de  
 372 orden 5 de acuerdo con el método de Strahler y presenta una extensión de hasta

373 40,1 km dentro del área de interés y el río San Francisco, orden 4 y 8,4 km de  
374 longitud dentro del área de interés.

375 En el N de la zona, están representados por las quebradas La Hidra y Cristal cuyos  
376 segmentos están en dirección NNE-SSW, y al W por el río San Pedro, cuyos  
377 segmentos se muestran paralelos en dirección NW-SE. Estos patrones se  
378 desarrollan en rocas metamórficas del Complejo Migmatítico La Cocha Río-Téllez,  
379 rocas volcánicas del Neógeno y las formaciones Villeta, Caballos, Batolito de  
380 Sombrerillos y Saldaña. La quebrada Cristal de orden 2 y una longitud de 3,8 km  
381 desemboca en la quebrada La Hidra, de orden 3, la cual presenta una longitud de  
382 8,3 km dentro del área de interés.

383 Los segmentos que drenan al Valle de Sibundoy están desarrollados en depósitos  
384 fluviolacustres y pasan de sub-paralelos a sub-dendríticos en flujos de lava y  
385 depósitos volcaniclásticos que cubren la mayor parte del área. Al NW de la zona de  
386 estudio se desarrollan principalmente patrones dendríticos, sub-dendríticos,  
387 angulares y radiales. En particular, los patrones radiales corresponden con los  
388 volcanes Mujundinoy y Guayapungo. De la misma manera, se observan redes de  
389 drenaje con patrones asimétricos. Estos se desarrollan sobre depósitos volcánicos  
390 y en algunos sectores del Complejo Migmatítico La Cocha Río-Téllez al SW de la  
391 zona y al SE abarcando parte de la Formación Saldaña.

392 En la Tabla 2 se presentan las ubicaciones geográficas de corrientes individuales  
393 de algunos ríos y quebradas que desarrollan rectilineidad y deflexiones asociadas  
394 a un sentido de rumbo, considerando que éstas reflejan características estructurales

395 que se observan como desviaciones locales en patrones de drenajes y corrientes  
396 individuales.

397

398 **Tabla 2.** Nombres de los ríos o segmentos deflectados y su sentido de rumbo en el área de estudio.  
399 Orden Strahler y longitud dentro del área de estudio.

Deflexión	Área	Río/Quebrada	Sentido de Rumbo	Orden Strahler	Longitud (km)
D1	Colón	San Pedro	E-W y NNE-SSW	4	11,3
D2	San Francisco	San Francisco	ENE-WSW, NW-SE y NNE-SSW	4	8,4
D3	San Francisco	San Francisco	NW-SE y NNE-SSW		
D4	Santiago	Tamauca	NW-SE, ENE-WSW y NW-SE	5	10,9
D5	Santiago	Espinayaco	NW-SE, NNE-SSW Y NW-SE	5	10,1
D6	Santiago	San Pedro	NW-SE y NNE-SSW	3	11,1
D7	San Andrés	Sinsayaco	Múltiples deflexiones: NW-SE, NE-SW, NNW-SSE y NNE-SSE	3	19,3
D8	San Andrés	Quinchoa	E-W y NNW-SSE	5	13,2
D9	Santa Lucia	Putumayo	NNE-SSW y WNW-ESE	5	20,1
D10	Santa Lucia	Cascajo	NNW-SSE y NE-SW	4	10,3
D11	Santiago	Cascajo	E-W, NNW-SSE y E-W		
D12	Carrisal	Negro	NW-SE y ENE-WSW	3	4,8
D13	Carrisal	Blanca	NE-SW y WNW-ESE	2	4,6
D14	Carrisal	La Chorrera	NNW-SSE y NE-SW	5	6,0
D15	El Encano	Encano	NNW-SSE y WNW-ESE	3	12,1
D16	El Encano	La Cristalina	WNW-ESE y NNW-SSE	2	3,4
D17	Guayapungo	Negro	Múltiples deflexiones: NE-SW, NNW-SSE y NE-SW	3	6,1
D18	Valle Estero	El Laurel	NW-SE y NNE-SSW	2	8,6
D19	Balsayaco	Río Bejenjoy	ENE-WSW y NNE-SSW	2	3,1
D20	Balsayaco	Volcanyaco	NNE-SSW y NW-SE	4	11,6
D21	Balsayaco	Putumayo	NNW-SSE y WNW-ESE	5	19,6
D22	N de la V. Carrisal	Negro	NE-NNW y SW	5	14,5

400

401

402 Así, la ocurrencia de la alineación entre los segmentos rectilíneos del río Encano y  
403 la quebrada Chaupiyaco en sentido WNW-ESE generan un trazo de rectilineidad  
404 considerado como anomalía (Figura 5). El río Encano de orden 3 y una longitud de  
405 12,1 km desemboca en la laguna de La Cocha, mientras que la quebrada  
406 Chaupiyaco, en sentido contrario, es de orden 4, longitud de 7,5 km y desemboca  
407 en el río Quinchoa de orden 5.

408 Del mismo modo, el río Negro y la quebrada Fuisanoy drenan en sentidos contrarios,  
409 pero siguen la misma dirección NE-SW lo que generan la rectilineidad de las  
410 mismas. El río La Chorrera y el río Negro en el sector de la vereda Carrisal siguen  
411 su curso de forma paralela y alineadas en sentido NE-SW; el río Cascajo en el sector  
412 de Santa Lucia en dirección NNE-SSW; el río Vijinchoy en el sector de Balsayaco  
413 en dirección NNE-SSW; y el río Alguacil con rumbo ENE-WSW, cuyas corrientes  
414 individuales también desarrollan trazos largos y rectilíneos en la zona.

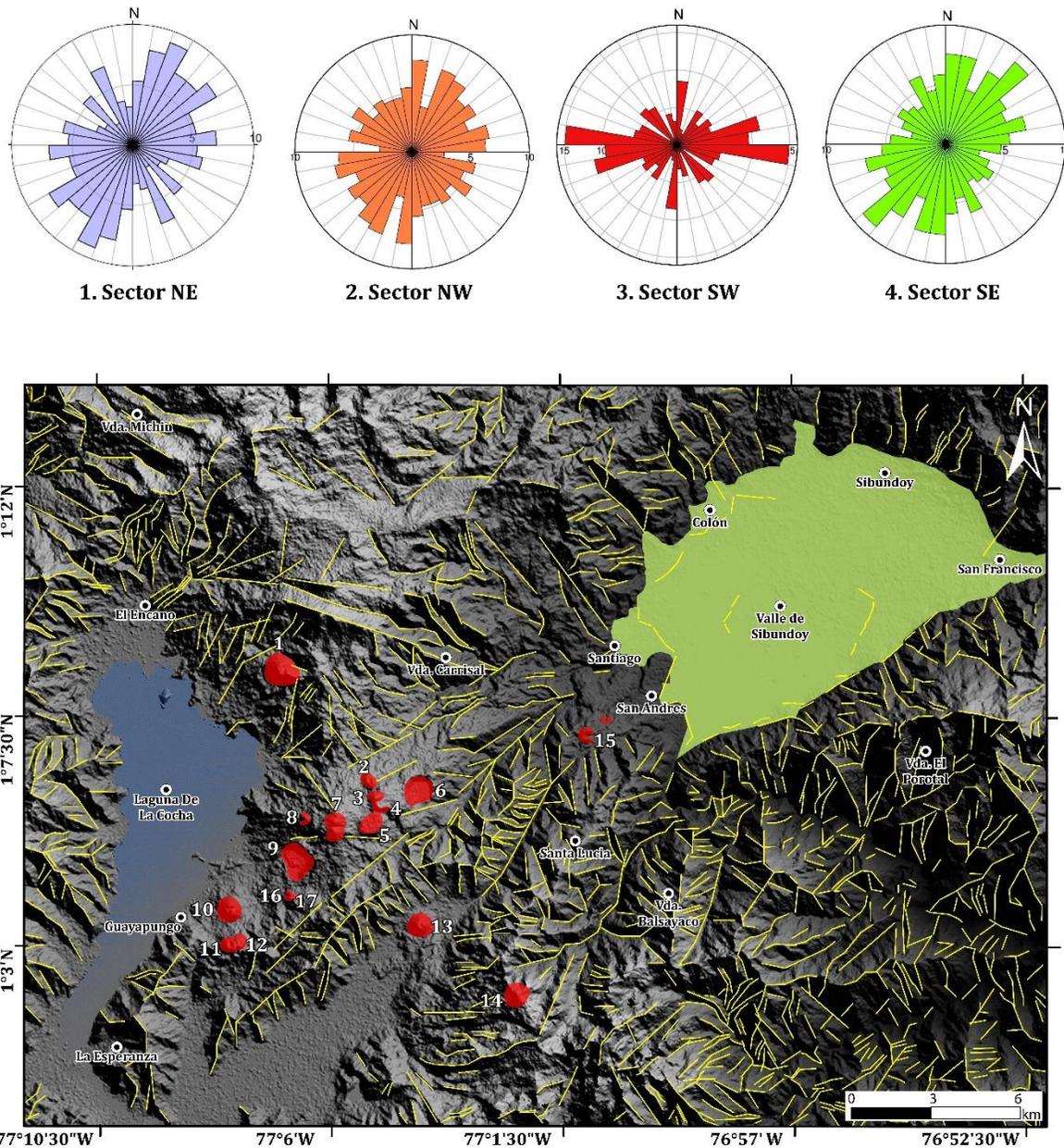
415 En la zona NW-SE del área se observan varias deflexiones en las corrientes de los  
416 ríos y quebradas, principalmente en los que cruzan por la planicie del Valle de  
417 Sibundoy. Hacia el tramo norte, el río San Pedro tiene cambios abruptos en la  
418 dirección de flujo, presentando una deflexión hacia el E-W y formando un ángulo  
419 recto con el siguiente tramo lineal que sigue su curso hacia el NNE-SSW (D1). El  
420 siguiente cambio abrupto se da en la conexión con el río Quinchoa, al NW-SE y  
421 luego hacia el NNE-SSW en un tramo relativamente recto (D6). La siguiente  
422 deflexión se da en la en el tramo del río Quinchoa en dirección E-W y NNW-SSE  
423 formando un ángulo relativamente recto cuyo segmento continúa siendo lineal hasta  
424 desembocar en el río Putumayo (D3). Al extremo este del Valle de Sibundoy, el río

425 San Francisco presenta un cambio en sentido NW-SE y NNE-SSW (D3) hasta  
426 conectarse con el río Putumayo, el cual sigue su curso al ENE-WSW hasta  
427 deflectarse en dirección NW-SE y NNE-SSW (D2) que continua su curso al borde  
428 de la Formación Saldaña y el Monzoganito de Mocoa. Por otro lado, al SE de la  
429 zona el río Volcanyaco tiene una fuerte deflexión en ángulo recto y junto con el río  
430 Bejenjoy siguen la forma de un gancho de flexión. Todas estas características se  
431 pueden ver en la Figura 5.

432

### 433 **5.3. Análisis de lineamientos**

434 Un total de 1026 lineamientos fueron definidos en el área de estudio (Figura 6,  
435 Material suplementario 1). Para el cuadrante NE con 188 datos, los lineamientos  
436 tienen una tendencia NNE-SSW, NE-SW, ENE-WSW y NNW-SSE (Figura 6-1).  
437 Para el cuadrante NW con 254 datos, los lineamientos muestran una tendencia  
438 predominante hacia el NNE-SSW y NE-SW, aunque también otra en dirección NW-  
439 SE (Figura 6-2). Para el cuadrante SW con 188 datos, los lineamientos muestran  
440 tres tendencias principales: WNW-ESE, ENE-WSW y NNE-SSW (Figura 6-3). Y  
441 para el cuadrante SE con 410 datos, los lineamientos muestran una tendencia  
442 principal con orientación NE-SW, y otras con orientaciones NNW-SSE y NNE-SSW  
443 (Figura 6-4).



444

445 **Figura 6.** Mapa de lineamientos con la ubicación de las estructuras volcánicas del Campo Volcánico  
 446 Monogenético Guamuéz-Sibundoy (CVMGS) delimitados por polígonos rojos, elaborado en ArcGIS  
 447 a partir del DEM 12,5 m. Diagramas de rosas con la orientación de los lineamientos generados para  
 448 los sectores NE, NW, SW y SE de la zona de estudio, elaborados en el programa Estereonet.  
 449 Información de lineamientos reportada en material suplementario anexo 1.

450

451 Con base en el análisis realizado, las tendencias encontradas se pueden relacionar  
452 con las fallas existentes en la zona. La tendencia general de lineamientos NE-SW  
453 estarían relacionados con la falla San Francisco-Yunguillo; sin embargo, para el  
454 sector NE Sibundoy, los lineamientos NW-SE estarían relacionados con la falla  
455 Sibundoy. La concentración de lineamientos transversales a lo largo del rumbo de  
456 las fallas locales se relacionaría con la falla Sibundoy y otras no registradas en la  
457 literatura. Estas zonas de falla pueden visualizarse mediante la correlación de  
458 lineamientos continuos.

459 En general, la presencia de diaclasas se extiende a lo largo del flanco SE del Valle  
460 de Sibundoy y se desarrollan en rocas clasificadas como andesitas y sienitas  
461 principalmente. En estaciones geográficas (Material suplementario 2) como la  
462 Garganta de Balsayaco se reconocen tres familias de diaclasas que siguen las  
463 siguientes direcciones: S29W/10SE, S56E/87NE, N68E/67NW; sin embargo, no se  
464 observan criterios cinemáticos asociados. Las rocas en afloramiento presentan  
465 textura porfirítica, con masa fundamental vítrea y cristales de plagioclasa (30 vol.%),  
466 cuarzo (3 vol.%) y anfíbol (2 vol.%).

467 Hacia el sector SE, existe un alto grado de diaclasamiento que se observa en  
468 afloramientos de rocas intermedias en el río Viginchoy, las cuales tienen una familia  
469 primaria en dirección S37E/41NE y otras familias en dirección S35W/61SE y  
470 N76W/64SW. De igual forma, en esta zona puede reconocerse un pliegue por  
471 propagación de falla (Figura 7) con dirección S85E/21NE que pone en contacto  
472 rocas intermedias con variación en su textura y fracturamiento. La parte superior se  
473 compone de rocas porfiríticas con cristales de plagioclasa y tonalidad gris, y la parte

474 inferior de rocas afaníticas fuertemente diaclasadas con orientaciones  
 475 preferenciales en dirección S77W/86SE y S8E/6NE.



476

477 **Figura 7.** Afloramiento representativo en campo. A) Pliegue por flexión de falla ubicado en el río  
 478 Viginchoy; las rocas de la parte inferior no están afectadas por el plegamiento, pero se encuentran  
 479 diaclasadas. (1° 05'19"N, 76° 59'02"W) B) Dibujo esquemático del afloramiento. C) Variación textural  
 480 de las rocas que componen el afloramiento. Información de estaciones de campo reportada en  
 481 material suplementario anexo 1.

482

483 En el sector NW-SW del área de estudio se tuvo una aproximación con algunos de  
 484 los edificios volcánicos del CVMGS ubicados en el departamento de Nariño. Al norte

485 del volcán Campanero afloran rocas muy alteradas con textura porfirítica en la que  
486 las diaclasas tienen las siguientes direcciones: N26W/45NE, N26W/47NE y  
487 N53W/30NE, que coinciden con lineamientos en dirección NW-SE.

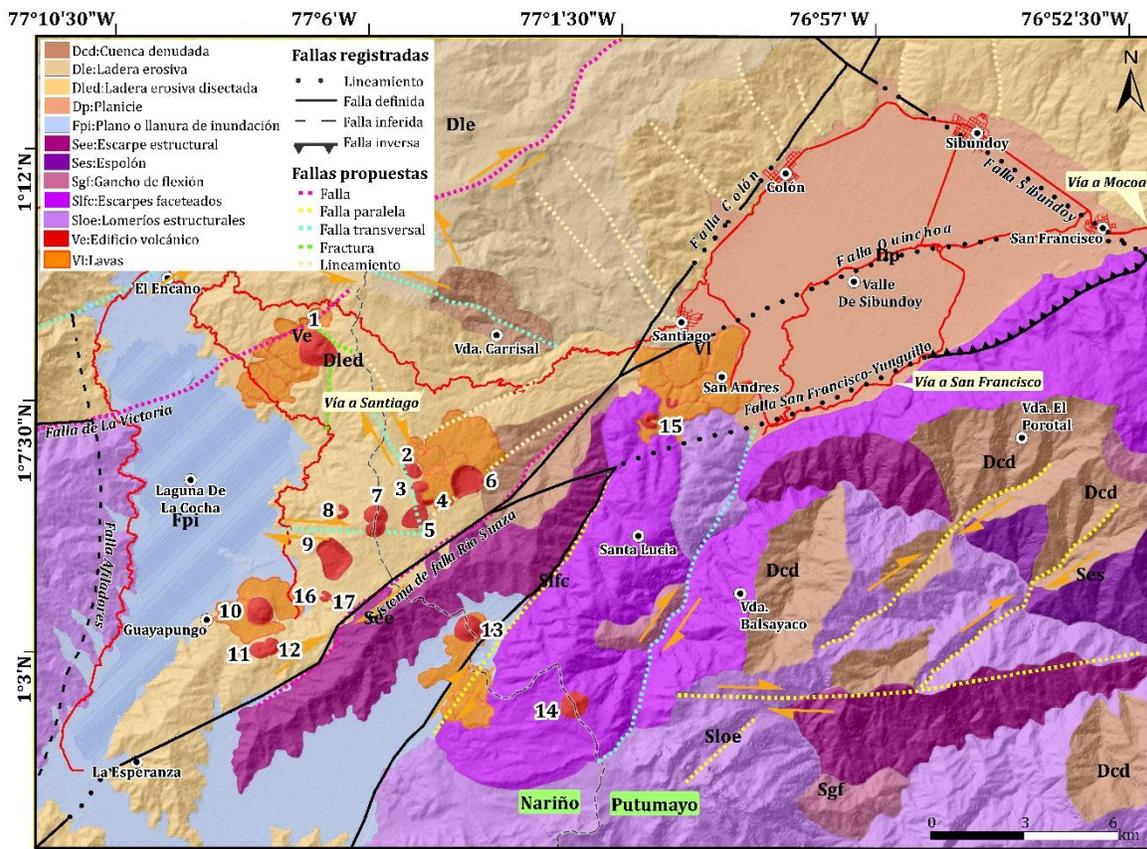
## 488 **6. Discusión**

### 489 **6.1. Rasgos morfo-estructurales**

490 A grandes rasgos, se evidencia que parte de la geomorfología de la zona de estudio  
491 está controlada por los sistemas de fallas y fracturas bajo un régimen transtensional.  
492 Las múltiples trazas de rumbo asociadas al SFA que se extienden en dirección NE-  
493 SW y fallas transversales en dirección NW-SE actúan como límites estructurales de  
494 las unidades y subunidades geomorfológicas descritas.

495

496 **Sector NW:** En este sector el relieve hace parte de morfologías menos escarpadas  
497 como son las laderas erosivas y laderas erosivas disectadas (Figura 4), sin  
498 embargo, a partir del análisis de los resultados obtenidos se reconocen rasgos  
499 lineales que están asociados a fracturas, fallas y lineamientos (Figura 6). En este  
500 orden de ideas, es posible reconocer el trazo de la falla La Victoria en sentido NE-  
501 SW con cinemática dextral que es cortada y desplazada por dos fallas de  
502 desplazamiento sinistral transversales en sentido WNW-ESE y NNW-SSE.  
503 Finalmente, se reconoce otra falla al norte del poblado del Encano, la cual corta con  
504 desplazamiento sinistral a una falla transversal al Sistema de Fallas de Río Suaza  
505 en sentido NE-SW (Figura 8).



506

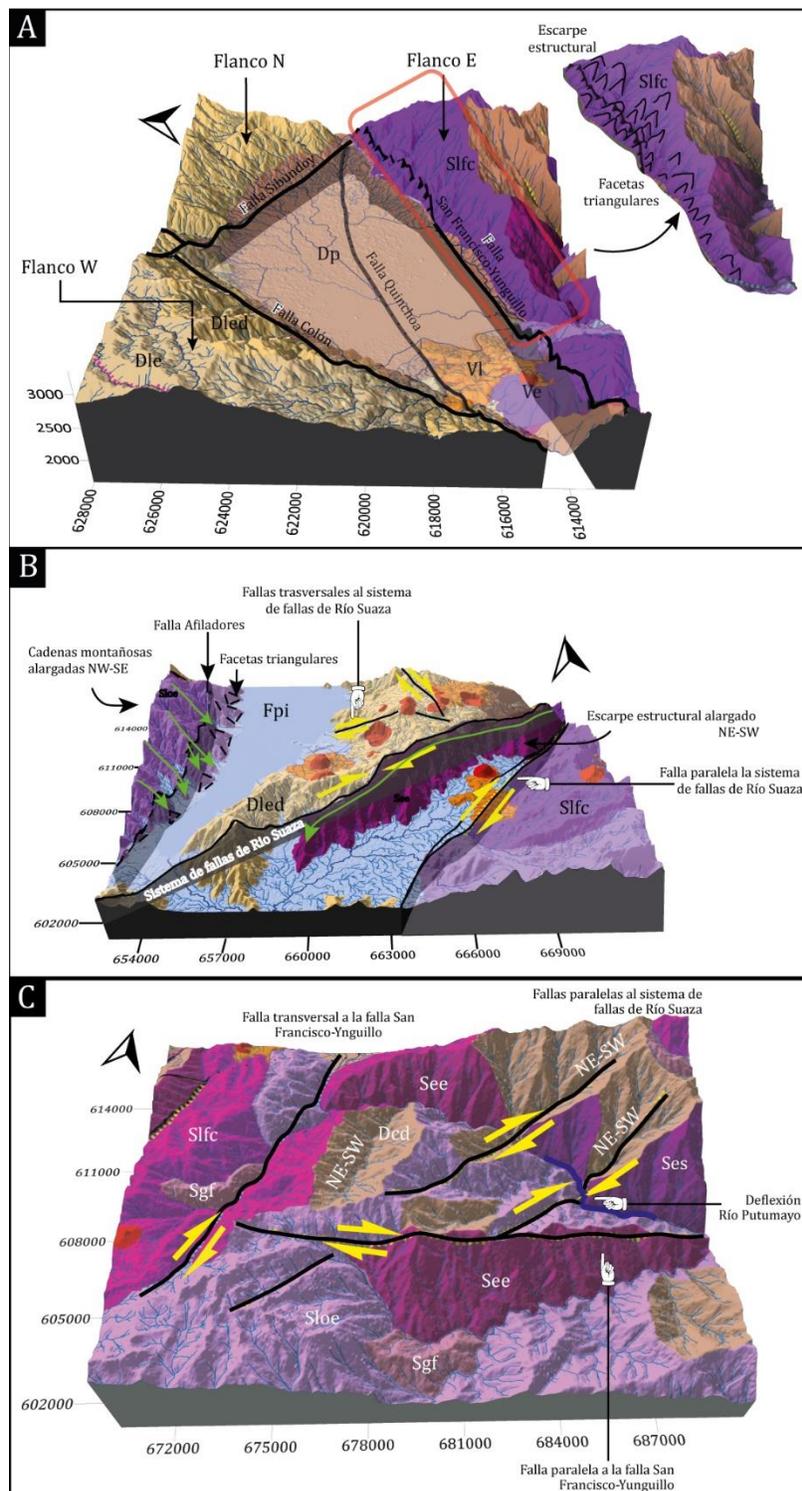
507 **Figura 8.** Mapa geomorfológico donde se presenta la relación de las unidades geomorfológicas con  
 508 lineamientos propuestos en la zona objeto de estudio. Se incluye principales fallas de la zona de  
 509 estudio reportadas por el Servicio Geológico Colombiano (2020) y Restrepo et al. (2021), las cuales  
 510 fueron modificadas para este estudio de acuerdo con el DEM 12,5 m.

511

512 **Sector NE:** A escala local, los límites estructurales del Valle de Sibundoy están  
 513 marcados por una zona de fallas de rumbo con tendencia NE-SW y fallas  
 514 transversales NW-SE (Figura 8). En el flanco E, el relieve montañoso exhibe la  
 515 mayor evidencia morfológica relacionada con un componente estructural, puesto  
 516 que la falla San Francisco-Yunguillo que se extiende a lo largo de este flanco es  
 517 responsable del desarrollo de escarpes faceteados, orientados al NW, con  
 518 pendientes que alcanzan valores superiores a los 20°. Las facetas inciden en el

519 patrón de drenaje subparalelo donde el flujo de agua drena en dirección de la forma  
520 de las mismas (Figura 9A). En los flancos W y N del valle limitados por la falla Colón  
521 y Sibundoy, respectivamente, a pesar de que actualmente se clasifican como  
522 laderas erosivas disectadas, aún se reconocen lineamientos en dirección NW-SE y  
523 NE-SW transversales a los sistemas de fallas mencionados (Figura 8). Finalmente,  
524 el Valle de Sibundoy que representa la morfología plana del sector NE de la zona  
525 de estudio, tiene influencia de las fallas que limitan sus flancos como se planteó  
526 anteriormente; aquí se incluye además la falla Quinchoa. Estas fallas  
527 probablemente son las responsables de las fuertes deflexiones de los canales de  
528 drenaje principalmente en los ríos San Francisco, San Pedro y Sinsayaco (Figura  
529 5).

530



531

532 **Figura 9.** Representación geomorfológica 3D del ambiente morfo-estructural. A) Rasgos morfo-  
 533 estructural del sector NE. B) Rasgos morfo-estructural del sector SW. C) Rasgos morfo-  
 534 estructural del sector SE. Diagramas en sistema de coordenadas proyectadas origen Bogota.

535

536 Por otro lado, en el sector conocido como Balsayaco se observa una serie de  
537 deslizamientos de roca altamente fracturada y meteorizada que se localizan a 1,65  
538 km del trazo principal de la falla San Francisco-Yunguillo (Figura 8). Estos  
539 fenómenos geológicos que están colapsando la superficie del terreno se asocian  
540 con la cercanía que tienen con la zona de daño de la falla que incide en la  
541 inestabilidad de la zona. Lo anterior combinado con otros procesos erosivos  
542 generados por el agua en temporada de lluvia y las altas pendientes dan lugar al  
543 desprendimiento de grandes volúmenes de roca.

544

545 **Sector SW:** En esta zona, el control estructural obedece al trazo en dirección NE-  
546 SW del Sistema de Fallas de Río Suaza con cinemática dextral y una falla paralela  
547 al mismo (Figura 8) que controla el curso del río Cascajo, puesto que fluye rectilíneo  
548 al trazo de falla en dirección NE-SW. De igual forma, se sugiere cinemática dextral  
549 dado la deflexión de la quebrada El Laurel. Como respuesta a los procesos  
550 estructurales generados por estas fallas, se da la formación de un relieve  
551 montañoso alargado que conserva la misma dirección NE-SW de las fallas que  
552 limitan sus flancos. El escarpe estructural del flanco W con orientación preferencial  
553 al NE está limitado por el Sistema de Fallas de Río Suaza, mientras que el escarpe  
554 estructural del flanco E orientado al SE está limitado por una falla paralela al Sistema  
555 de Fallas de Río Suaza (Figura 9B). A esta última también se le puede atribuir otros  
556 rasgos morfológicos presentes en la vertiente oriental del río Cascajo, como la  
557 formación de escarpes faceteados y lomeríos estructurales. De la misma manera,

558 el trazo de la Falla Afiladores al E de la Laguna de la Cocha desarrolla facetas  
559 triangulares y lineamientos rectilíneos que van en la disposición de cadenas  
560 montañosas alargadas siguiendo una alineación paralela en sentido NW-SE (Figura  
561 9B).

562 Por otro lado, debido a que las zonas de falla forman fracturas que facilitan el  
563 ascenso de intrusiones magmáticas a superficie (Faulds et al., 2015; Piquer et al.,  
564 2019; Botero-Gómez et al., 2023), es importante resaltar la interacción entre la  
565 existencia de estructuras volcánicas y el control estructural asociado a su  
566 distribución espacial; así, se resalta la existencia de lineamientos volcánicos que  
567 pueden reflejar un control sobre la propagación del magma y el control de fallas  
568 preexistentes sobre su distribución (Le Corvec et al., 2013, Gómez-Vasconcelos et  
569 al., 2020, Grosse et al., 2020). Además, se tienen en cuenta los procesos  
570 distensivos que ejerce el SFA en la zona de estudio (Velandia et al., 2005). En este  
571 sentido, para el sector SE se evidencian dos alineaciones prominentes: 1)  
572 Alineación de los volcanes Victoria, Manoy, Mijoy y Bijinchoy que coinciden con el  
573 trazo de una falla dextral con orientación NNW-SSE transversal al Sistema de Fallas  
574 de Río Suaza. Y 2) Alineación de los volcanes Mujundinoy Norte y Sur, Corota y  
575 Bijinchoy que coinciden con el trazo de una falla dextral con orientación E-W  
576 transversal al Sistema de Fallas de Río Suaza. Este control en la alineación de los  
577 volcanes y la distribución espacial en general agrupada de los volcanes  
578 Guayapungo, Encano y Guamuez, Laurel, Santa Teresita, Fuisanoy y Yaku  
579 representan el entorno adecuado para que el magma ascienda a la superficie a

580 través de fallas y fracturas preexistentes que actualmente están cubiertas por  
581 depósitos Cuaternarios pero que es posible identificar en la topografía de la zona.

582 **Sector SE:** Esta zona representa la parte más elevada con pendientes mayores a  
583 31° y geomorfologías muy escarpadas (Figura 4). En este sector predominan un  
584 conjunto de relieves formados por un control estructural que corresponden a  
585 escarpes, lomeríos estructurales y espolones estructurales, debido a la presencia  
586 de fallas con movimiento de rumbo con tendencia NE-SW paralelas al Sistema de  
587 Fallas de Río Suaza (Figura 8). Estas fallas a su vez son las responsables de las  
588 deflexiones que presenta el río Putumayo (Figura 5), cuyo análisis permitió definir  
589 la cinemática dextral de las mismas. Además, en el área de estudio, el  
590 diaclasamiento con tendencia principal NE-SW sugiere la influencia tectónica de  
591 estas fallas (Figura 9C). De la misma manera, al SE el trazo del Sistema de Fallas  
592 del Río Suaza genera una alta concentración de lineamientos rectilíneos (Figura 6)  
593 que influyen en la disposición de las cuencas siguiendo una alineación paralela en  
594 sentido NE-SW.

595 Otros rasgos geomorfológicos que reflejan la influencia estructural en el sector SE  
596 es la presencia de ganchos de flexión que afectan depósitos que han sido  
597 cartografiados como Formación Saldaña y Batolito de Mocoa por Nuñez (2003), por  
598 lo que indicaría actividad tectónica posterior al Jurásico. Se sugiere que el  
599 lineamiento en dirección NNE-SSW transversal a la falla San Francisco-Yunguillo  
600 se puede interpretar como una falla con cinemática dextral que además controla el  
601 curso del río Viginchoy. En este río, en el cual se evidencian pliegues por flexión de  
602 falla y un alto grado de diaclasamiento, se resalta la tendencia en sentido NE-SW

603 dado que ésta coincide con la orientación de la falla propuesta. Sin embargo, la  
604 tendencia principal va orientada al NW-SE, lo que indicaría que en la zona deben  
605 existir lineamientos que estén ejerciendo influencia en este sector con orientación  
606 NW-SE y que no se pueden reconocer en la interpretación.

607 Adicional a esto, el análisis morfo-estructural permite proponer una falla paralela a  
608 la falla San Francisco-Yunguillo que define su trazo por el notable lineamiento del  
609 río Alguacil en dirección ENE-WSW. Además, se asocia un gancho de flexión y  
610 escarpes estructurales a la zona de influencia ejercida por la misma y se le atribuye  
611 cinemática dextral pues desplaza a otras fallas longitudinales (Figura 9C). De esta  
612 manera, se propone un modelo que integra geomorfología y geología estructural de  
613 la zona (Figura 8).

614

## 615 **6.2. Fallamiento**

616 La evolución de los diferentes sistemas de drenaje está relacionada con factores  
617 como: 1) la resistencia de las rocas a los procesos erosivos, y 2) un control  
618 estructural que influye en el comportamiento de los drenajes haciendo que estos  
619 sigan la tendencia de fallas o sean desviados por las mismas (Mount, 1954).  
620 Teniendo en cuenta esto, en el sector NE (Figura 5) se resaltan las tendencias de  
621 los ríos que drenan hacia la planicie del Valle de Sibundoy en donde se encuentran  
622 las mayores concentraciones de anomalías en los drenajes de la zona. El cauce del  
623 río San Francisco al norte está alineado con el trazo de la falla Quinchoa, sin  
624 embargo, es desviado probablemente por el macizo rocoso o por una falla hasta  
625 alinearse con el trazo de la falla San-Francisco Yunguillo. De la misma manera, el

626 río San Pedro está controlado por el trazo de la falla Colón en el cual se observan  
627 varias anomalías angulares.

628 En el sector SE del Valle de Sibundoy (Figura 5), la relación de la deflexión abrupta  
629 del río Alguacil-Bejenjoy sugiere que la desviación en su trayectoria se debe a la  
630 influencia de un gancho de flexión. Del mismo modo, se asocia el trazo del río  
631 Putumayo a un control estructural de la zona asociado con la falla San Francisco-  
632 Yunguillo que pasa al borde de un escarpe en el que se reconoce el desarrollo de  
633 facetas triangulares (Figura 9C). Los segmentos largos lineales de los ríos Cascajo  
634 y Vijinchoy fluyen en dirección NNE-SSW, el río Cascajo fluye por el trazo de una  
635 falla existente con cinemática dextral y el río Vijinchoy está asociado con un trazo  
636 de lineamiento; tanto la falla como el lineamiento están paralelos al Sistema de  
637 Fallas de Río Suaza. Al SE de la zona se propone el trazo de tres fallas: una falla  
638 transversal a la falla San Francisco-Yunguillo en dirección ENE-WSW, la cual indica  
639 una cinemática dextral debido al desplazamiento de las fallas trasversales a la  
640 misma en dirección NE-SW, y dos fallas en sentido de rumbo NE-SW paralelas al  
641 Sistema de Fallas de Suaza cuya cinemática dextral se deduce de la deflexión del  
642 río Putumayo en sentido NNW-SSE-WNW-ESE (Figura 8).

643 De acuerdo con los lineamientos asociados a la deflexión de los drenajes (Figura  
644 5), se propone también la cinemática de ciertas fallas (Figura 8). De este modo, la  
645 rectilineidad de los ríos Encano y Chaupiyaco sugiere la influencia de una zona de  
646 falla por la cual el drenaje sigue las fisuras ocasionadas por el evento deformativo;  
647 su trazo se propone como una falla con sentido de rumbo WNW-ESE y cinemática  
648 sinistral, siendo la responsable del desplazamiento de la falla de La Victoria. Del

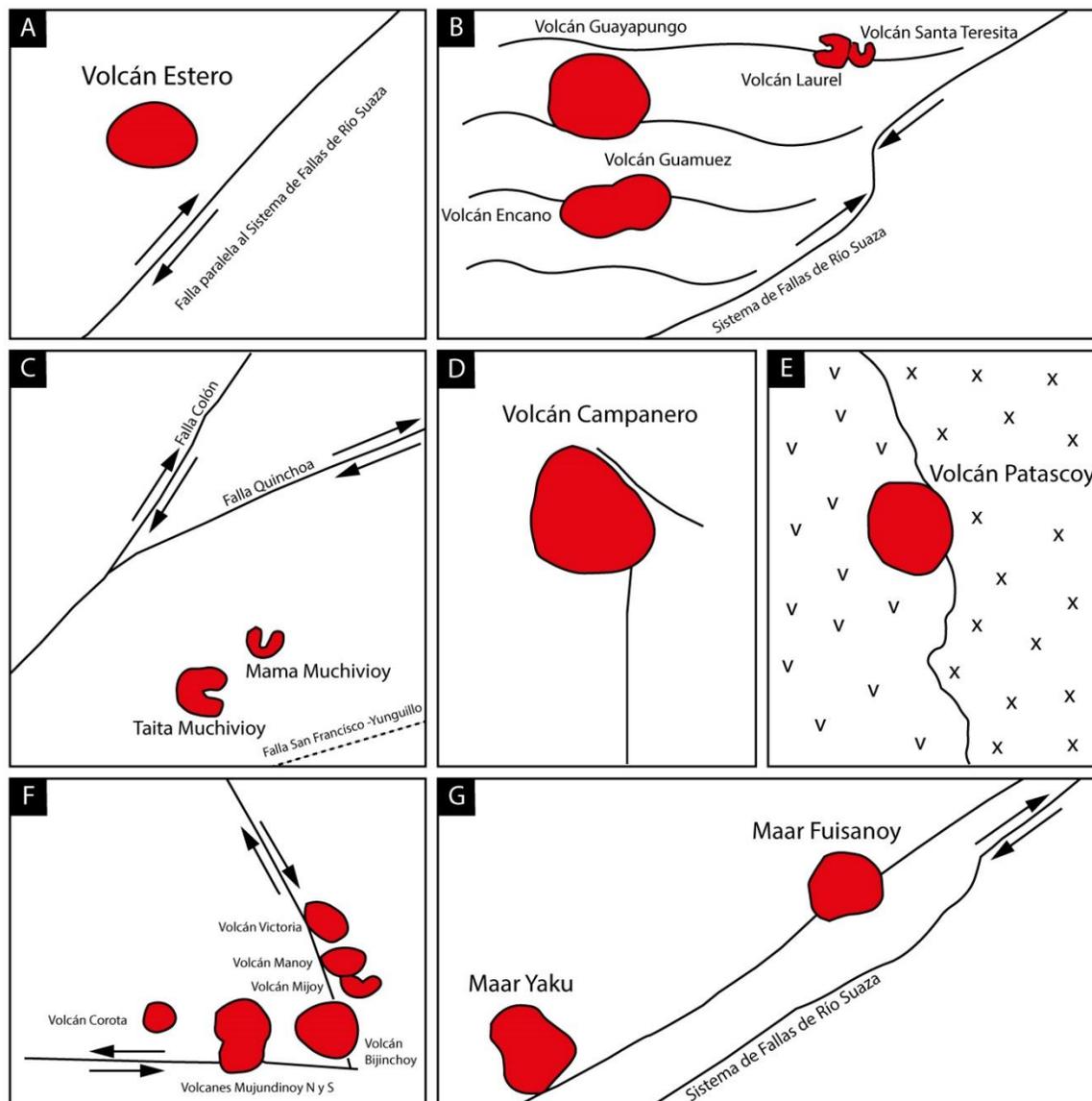
649 mismo modo, el trazo lineal del río Negro y la quebrada Faisanas en dirección NE-  
650 SW está asociada con un lineamiento acorde al Sistema de Fallas de Río Suaza.  
651 Aquí, la deflexión del río Negro en dirección NE-SW, NNW-SSE y NE-SW sugiere  
652 la cinemática dextral de las fallas en la zona que influyen tanto en el drenaje como  
653 en las geoformas entre las que se destacan lomeríos estructurales.

654

### 655 **6.3. Modelo estructural del campo volcánico**

656 Las fallas regionales y su efecto en la deformación frágil, así como en la dirección  
657 de lineamientos y zonas de fractura que se destacan en el área de estudio (Figura  
658 6), se comportan como los conductos por los cuales se dio la circulación de magma  
659 que contribuyó en la formación del CVMGS. El área donde se da la mayor  
660 concentración de volcanes pertenecientes al CVMGS está alineada en paralelo con  
661 el trazo del Sistema de Fallas de Río Suaza y la Falla San Francisco-Yunguillo  
662 asociadas (Figura 2) regionalmente al Sistema de Fallas Algeciras. Estas fallas  
663 longitudinales con desplazamiento de rumbo vertical en dirección NE-SW forman  
664 zonas de distensión con expresión neotectónica de los trazos que componen este  
665 sistema que influye hacia el sur del país (Velandia et al., 2001) (Figura 10).





675

676 **Figura 11.** Mecanismos de ascenso de magma asociados con lineamientos y fallas propuestos. A)  
 677 El trazo de una falla paralela a otra. B) Curvatura de las fallas C) Interacción de por lo menos dos  
 678 sistemas de fallas. D) La interconexión de por lo menos dos sistemas de fracturas. E) Contrastes  
 679 litológicos. F) Sintaxis tectónica dilatacional. G) El trazo de un lineamiento paralelo a una falla.

680

681 En este mismo sentido, los escenarios favorables como mecanismos para su  
 682 ascenso se asumen con disponibilidad de magma superficial y fracturamiento

683 profundo. De acuerdo con los registros sísmicos actuales, se tienen sismos con  
684 profundidades de hasta 42 km asociados con la subducción. La concentración de  
685 estos se da principalmente en el Valle de Sibundoy y se asocia con el trazo de la  
686 falla San Francisco Yunguillo y la falla Quinchoa que es uno de los ramales del  
687 Sistema de Falla de Río Suaza. Si existiese disponibilidad de magma y una fractura  
688 lo suficientemente profunda, el magma podría ascender por medio de alguno de los  
689 siguientes mecanismos:

#### 690 **6.3.1. El trazo de una falla paralela a otra**

691 En este escenario (Figura 11A) se incluye al volcán Estero, ya que no se tiene un  
692 mecanismo estructural consistente para determinar el origen de esta estructura. Sin  
693 embargo, este se encuentra espacialmente relacionado con el trazo de una falla  
694 paralela al Sistema de Fallas de Río Suaza con dirección NE-SW, por lo que se  
695 propone el ascenso de magma a través de fallas preexistentes que actualmente  
696 están cubiertas por depósitos Cuaternarios; estas a su vez generan fracturas en  
697 profundidad acorde con el campo de esfuerzos al momento de su emplazamiento,  
698 las cuales funcionan como alimentadores para la intrusión del material (e.g. Fitz-  
699 Alvira, 2022).

#### 700 **6.3.2. Curvatura en las fallas**

701 En este escenario (Figura 11B) se incluyen a los volcanes del CVMGS que están  
702 relacionados con el trazo del Sistema de Fallas de Río Suaza (Encano, Guamuéz,  
703 Guayapungo, Laurel y Santa Teresita). Esta falla de rumbo con cinemática dextral  
704 en dirección NE-SW, presenta curvaturas en su trazo. Así, la liberación de presión

705 permite que se den zonas de acomodación y distensión por donde el magma pudo  
706 ascender y generar el emplazamiento de los volcanes.

### 707 **6.3.3. Interacción de por lo menos dos sistemas de fallas**

708 En este escenario (Figura 11C) se incluyen los volcanes Taita y Mama Muchivioy.  
709 Teniendo en cuenta que el Valle de Sibundoy es atravesado por dos fallas  
710 regionales reconocidas como la falla Colón y San Francisco-Yunguillo, se atribuye  
711 la asociación espacial de estos volcanes con la interacción de las mismas,  
712 generando concentración de tensiones que fracturan la corteza y permiten el  
713 ascenso de magma.

### 714 **6.3.4. La interconexión de por lo menos dos sistemas de fracturas**

715 En este escenario (Figura 11D) se incluye el volcán Campanero, ya que el sector  
716 NW en donde este se encuentra está influenciado por el trazo de fallas  
717 longitudinales como el Sistema de Fallas de Río Suaza, un trazo continuo a la falla  
718 la Victoria y de lineamientos uno en sentido N-S y el otro en sentido NW-SE. Así, se  
719 proponen redes de fracturas suficientes para interactuar y conformar un conducto  
720 eficaz para el ascenso de material a través de la liberación de tensión generada en  
721 la zona donde se dio el fracturamiento de la corteza.

### 722 **6.3.5. Contrastes litológicos**

723 En este escenario (Figura 11E) se incluye el volcán Patascoy. Su ubicación es el  
724 resultado de un claro contraste entre las lavas y depósitos volcanoclásticos, y el  
725 Batolito de Mocoa. El contacto entre estas dos unidades pudo generar zonas de  
726 debilidad debido a la diferencia de densidades entre rocas plutónicas y volcánicas

727 que a su vez generaron espacios de acomodación por los cuales el magma alcanzó  
728 la superficie.

#### 729 **6.3.6. Sintaxis tectónica dilatacional**

730 En este escenario (Figura 11F) se incluyen los volcanes Victoria, Manoy, Mijoy,  
731 Bijinchoy, Mujundinoy Norte y Sur, y La Corota. La sintaxis tectónica dilatacional  
732 consiste en la interacción de fallas con comportamiento transcurrente que se  
733 desplazan en sentidos contrarios. De esta manera, en la zona de intersección se  
734 puede dar contracción o dilatación dependiendo del movimiento de las fallas. En la  
735 zona de estudio se propone que el ascenso del magma se dio a través del proceso  
736 de sintaxis tectónica dilatacional teniendo en cuenta los lineamientos propuestos  
737 que se asocian espacialmente con la alineación NNW-SSE de los volcanes: Victoria,  
738 Manoy, Mijoy y Bijinchoy y alineación E-W de los volcanes: Bijinchoy, Mujundoy  
739 Norte y Sur, y La Corota

#### 740 **6.3.7. El trazo de un lineamiento paralelo a una falla**

741 En este escenario (Figura 11G) se incluyen los volcanes Fuisanoy y Yaku. A pesar  
742 de ser un área cubierta por lavas de edad Neógena, se pudo evidenciar un  
743 lineamiento paralelo al Sistema de Fallas de Río Suaza que se acentúa hacia el NE  
744 del maar Fuisanoy; este probablemente sería el alimentador que permitió la  
745 formación de los volcanes Yaku y Fuisanoy. El ambiente húmedo o con saturación  
746 de agua en la zona y el contacto de esta misma con zonas de altas temperaturas  
747 generadas en profundidad y transmitidas a través del trazo de esta falla dieron paso  
748 a erupciones explosivas que modelaron su estructura.

749

## 750 **7. Conclusiones**

751 La distribución de los drenajes en la zona de estudio, patrones de drenajes y  
752 anomalías están directamente relacionados con el comportamiento reológico y la  
753 influencia tectónica del Sistema de Fallas de Algeciras. Así, las fallas Colón,  
754 Quinchoa, Sibundoy y San Francisco-Yunguillo se relacionan con la deflexión de los  
755 drenajes en el Valle de Sibundoy, mientras que los ganchos de flexión desarrollados  
756 en rocas competentes del Batolito de Mocoa modelan el curso de los ríos Bijinchoy  
757 y Volcanyaco.

758 Los procesos de intensa deformación y exhumación en la Cordillera Oriental  
759 asociados con el trazo del Sistema de Fallas de Algeciras se manifiestan en las  
760 geoformas estructurales desarrolladas a lo largo del piedemonte llanero. En la zona  
761 de estudio, estas evidencias fisiográficas corresponden preferencialmente a  
762 ganchos de flexión, lomeríos estructurales, espolones y escarpes faceteados que  
763 se asocian espacialmente con los trazos de fallas regionales y fallas propuestas en  
764 este trabajo.

765 La zona de estudio presenta lineamientos con tendencias de rumbo NNE-SSW, NE-  
766 SW, ENE-WSW, NW-SE, WNW-ESE; estos lineamientos están asociados con las  
767 fallas San Francisco-Yunguillo, Sibundoy y el Sistema de Fallas de Río Suaza. La  
768 concentración de lineamientos transversales a lo largo del trazo de las fallas locales  
769 presentes en el área puede deberse a la existencia de zonas de falla como la falla

770 Sibundoy y otras no registradas en la literatura; estas zonas de falla pueden  
771 visualizarse mediante la correlación de lineamientos continuos.

772 Con los insumos analizados en este trabajo, se destacan fallas regionales que no  
773 han sido registradas en la literatura. Su relación con los componentes morfométricos  
774 y geomorfológicos en el sector permite nombrarlas y sugerir una cinemática  
775 teniendo en cuenta las fallas ya reconocidas. De acuerdo con esto, en el sector se  
776 proponen: 1) Fallas longitudinales en dirección NE-SW paralelas al Sistema de  
777 Fallas de Río Suaza con componente en rumbo dextral, y 2) Fallas transversales en  
778 dirección ENE-WSW paralelas a la falla San Francisco-Yunguillo con componente  
779 en rumbo sinistral.

780 El modelo estructural del CVMGS está basado en los trazos de fallas regionales con  
781 componente en rumbo pertenecientes al Sistema de Fallas de Algeciras y su  
782 interacción con trazos de fallas transversales. Estas crean zonas de transtensión y  
783 fracturamiento en la corteza terrestre a través de las cuales se da el ascenso de  
784 magma que permite el emplazamiento del vulcanismo monogenético del CVMGS.  
785 Los principales mecanismos propuestos para el emplazamiento de vulcanismo  
786 monogenético en la zona del Valle de Sibundoy son: el trazo de una falla paralela a  
787 otra, curvaturas en el trazo de una falla, la interacción de dos sistemas de fallas, la  
788 interconexión de dos sistemas de fracturas, contrastes litológicos, sintaxis tectónica  
789 dilatacional y el trazo de lineamientos paralelos a una falla.

790

791 **Agradecimientos**

792 Este trabajo se llevó a cabo en el Instituto de Investigaciones en Estratigrafía (IIES),  
793 Universidad de Caldas, en el marco del proyecto MINCIENCIAS, convocatoria 890:  
794 “Vulcanismo en el centro y suroccidente del país: Implicaciones de origen,  
795 evolución, amenaza, relación con el desarrollo de suelos volcánicos y potencial  
796 geoturístico” otorgado al grupo de investigación “Grupo de Investigación en  
797 Estratigrafía y Vulcanología (GIEV) Cumanday” de la Universidad de Caldas.

798

799 **Referencias**

800 Acocella, V. (2021). *Volcano-tectonic processes*. Switzerland: Springer. 562 pp.

801 Acosta, J., Velandia, F., Osorio, J., Lonergan, L., & Mora, H. (2007). Strike-slip  
802 deformation within the Colombian Andes. *Geological Society, London,*  
803 *Special Publications,* 272(1), 303-319.

804 <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2007.272.01.16>

805 Ahmadi, H., & Pekkan, E. (2021). Fault-based geological lineaments extraction using  
806 remote sensing and GIS a review. *Geosciences*, 11(5), 183 pp.

807 <https://doi.org/10.3390/geosciences11050183>

808 Anderson, V. J., Horton, B. K., Saylor, J. E., Mora, A., Tesón, E., Breecker, D. O., &  
809 Ketcham, R. A. (2016). Andean topographic growth and basement uplift in  
810 southern Colombia: Implications for the evolution of the Magdalena, Orinoco,  
811 and Amazon river systems. *Geosphere*, 12(4), 1235-1256.

812 <https://doi.org/10.1130/GES01294.1>

- 813 Arango, M.I., Rodríguez, G., Zapata, G., Bermúdez, J.G. (2015). Catálogo de  
814 unidades litoestratigráficas de Colombia: monzogranito de Altamira. *Servicio*  
815 *Geológico Colombiano*. 24 pp.
- 816 Argentino, A. S. G. M., & Andino, P. M. (2009). *Atlas de deformaciones cuaternarias*  
817 *de los Andes*. Argentina.322 pp.
- 818 Avellán, D. R., Cisneros- Máximo, G., Macías, J. L., Gómez-Vasconcelos, M. G.,  
819 Layer, P. W., Sosa-Ceballos, G., & Robles-Camacho, J. (2020). Eruptive  
820 chronology of monogenetic volcanoes northwestern of Morelia–Insights into  
821 Volcano-tectonic interactions in the central- eastern Michoacán-Guanajuato  
822 Volcanic Field, México. *Journal of South American Earth Sciences*. 102554.  
823 <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102554>
- 824 Avellán, D. R., Macías, J. L., Layer, P. W., Cisneros, G., Sánchez-Núñez, J. M.,  
825 Gómez-Vasconcelos, M. G., Pola, A., Sosa-Ceballos, G., García-Tenorio, F.,  
826 Reyes Agustín, G., Osorio-Ocampo, S.,García-Sánchez. L., Mendiola, I. F.,  
827 Marti, J., López-Loera, H., & Benowitz, J. (2019). Geology of the late  
828 Pliocene–Pleistocene Acoculco caldera complex, eastern trans-Mexican  
829 volcanic belt (México). *Journal of Maps*, 15(2), 8-18.
- 830 Bierman, P. R., Montgomery, D. R., & Massey, C. A. (2013). *Key Concepts in*  
831 *Geomorphology-NSF supports community-based creation of a new style of*  
832 *textbook*. In AGU Fall Meeting Abstracts. EE.UU. 592 pp.
- 833 Bonachea-Pico, J. (2006). Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y  
834 modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a

835 procesos geomorfológicos. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias, Universidad  
836 de Cantabria, Santander, España. 103 pp. <http://hdl.handle.net/10902/1292>  
837 ISBN: 978-84-690-3575-7

838 Botero-Gómez, L. A. (2022). *Control estructural y relación temporal de los volcanes*  
839 *pertenecientes al campo volcánico monogenético Villamaría-Termale*,  
840 *Caldas, Colombia*. Tesis de maestría, Facultad de Ciencias Exactas y  
841 Naturales, Universidad de Caldas, Manizales, caldas.131 pp.

842 Botero-Gómez, L. A., Murcia, H., & Hincapié, G. (2023). The effect of fault systems  
843 on volcanic activity: Insights from the subduction-related, Quaternary  
844 Villamaría-Termale monogenetic volcanic field in Colombia. *Journal of*  
845 *Volcanology and Geothermal Research*, 107969.  
846 <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107969>

847 Botero-Gómez, L. A., Osorio, P., Murcia, H., Borrero, C., & Grajales, J. A. (2018).  
848 Campo Volcánico Monogenético Villamaría-Termale, Cordillera Central,  
849 Andes colombianos (Parte I): Características morfológicas y relaciones  
850 temporales. *Boletín de Geología*. 85-102 pp.  
851 <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v40n3-2018005>

852 Botero-Gómez, L. A., & López-Palacio, J. (2023). Estado de la geotermia en  
853 Colombia: educación prospectiva y producción. *Energía y geociencias*,  
854 ACGGP. 32-34. <https://www.acgpp.org/revista-acgpp/>

855 Brenning, A., & Azócar, G. F. (2010). Minería y glaciares rocosos: impactos  
856 ambientales, antecedentes políticos y legales, y perspectivas futuras. *Revista*

857 de *Geografía Norte Grande*, (47).143-158. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718->  
858 [34022010000300008](http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022010000300008)

859 Burbank, & Pinter. (1999). Landscape evolution: the interactions of tectonics and  
860 surface processes. *Basin Research*, 11 (1). 1-6.

861 Burbank, DW & Anderson, RS (2013). Geomorfología tectónica. Segunda  
862 edición. *Geociencia ambiental e ingeniería 2013*; 19 (2). 198-200.

863 Bustamante, A., Juliani, C., Hall, C. M., & Essene, E. J. (2011). 40Ar/39Ar ages from  
864 blueschists of the Jambaló region, Central Cordillera of Colombia:  
865 implications on the styles of accretion in the Northern Andes. *Geologica*  
866 *Acta*.Vol. 9, Núm. 3. 351-362.  
867 <https://raco.cat/index.php/GeologicaActa/article/view/247926>.

868 Bustamante, C., Archanjo, C. J., Cardona, A., & Vervoort, J. D. (2016). Late Jurassic  
869 to Early Cretaceous plutonism in the Colombian Andes: A record of long-term  
870 arc maturity. *Bulletin GSA*, 128(11-12), 1762-1779.  
871 <https://doi.org/10.1130/B31307.1>

872 Bustamante, C., Cardona, A., Bayona, G., Mora, A., Valencia, V., Gehrels, G., &  
873 Vervoort, J. (2010). U-Pb LA-ICP-MS geochronology and regional correlation  
874 of Middle Jurassic intrusive rocks from the Garzón Massif, Upper Magdalena  
875 Valley and Central Cordillera, southern Colombia. *Boletín de Geología*, 32(2),  
876 93-109.

877 Caballero, V., Parra, M., & Mora Bohórquez, A.R. (2010). Levantamiento de la  
878 Cordillera Oriental de Colombia durante el Eoceno tardío-Oligoceno

879 temprano: proveniencia sedimentaria en el Sinclinal de Nuevo Mundo,  
880 cuenca Valle Medio del Magdalena. *Boletín de geología*, 32 (1), 45-77.

881 Carvajal, J. H. (2012). Propuesta de estandarización de la cartografía  
882 geomorfológica en Colombia. *Bogotá: INGEOMINAS*, 25, 27.84 pp.

883 Castro, J. S. (2021). *As condições de cristalização dos vulcões Amazonas,*  
884 *Sancancio e Lusitania do Campo Vulcânico Monogenético Villamaría-*  
885 *Termales, em Manizales, Colômbia*. Tesis de pregrado, Instituto de  
886 Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro,  
887 Brasil.68 pp.

888 Cavell, D. E. (2020). *Petrogenesis of Colombian Arc Volcanoes: A Regional Study*.  
889 Tesis de doctorado, Department of Earth Sciences, The University of  
890 Birmingham, England. 416pp. <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/11070/>

891 Cediél, F., & Shaw, R. P. (2019). *Geology and Tectonics of Northwestern South*  
892 *America: The Pacific-Caribbean-Andean Junction*. Springer International  
893 Publishing. Switzerland. 1001. [https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-](https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-76132-9)  
894 [319-76132-9](https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-76132-9)

895 Cengiz, O., Sener, E., & Yagmurlu, F. (2006). A satellite image approach to the study  
896 of lineaments, circular structures and regional geology in the Golcuk Crater  
897 district and its environs (Isparta, SW Turkey). *Journal of Asian Earth*  
898 *Sciences*, 27(2), 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.02.005>

899 Charlton, R. (2007). *Fundamentals of fluvial geomorphology*. Routledge. London.  
900 224.

- 901 Chicangana-Montón, G., Bocanegra-Gómez, A., Pardo-Mayorga, J., Salcedo-  
902 Hurtado, E. D. J., Gómez-Capera, A., & Vargas-Jiménez, C. A. (2022).  
903 Sismicidad y sismotectónica para el sector norte del ámbito del Sistema de  
904 Fallas de Algeciras, Cordillera Oriental, Colombia. *Boletín de*  
905 *Geología*, 44(1), 111-134. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n1-2022005>
- 906 Cline, K. M., Page, W. D., Gilliam, M. L., Cluff, L. S., Arias, L. A., Benalcázar, L. G.,  
907 & López, J. H. (1981). Quaternary activity on the Romeral and Cauca Faults,  
908 northwest Colombia. *Revista CIAF*, 6 (1-3). 115-116.
- 909 Cooper, M. A., Addison, F. T., Álvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, A.B.,  
910 Howe, S., Martínez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A.J & Taborda, A.  
911 (1995). Desarrollo de cuencas e historia tectónica de la cuenca de los Llanos,  
912 Cordillera Oriental y Valle Medio del Magdalena, Colombia. *Boletín*  
913 *AAPG*, 79 (10). 1421-1442.
- 914 Cortés, M., Colletta, B. y Angelier, J. (2006). Estructura y tectónica del segmento  
915 central de la Cordillera Oriental de Colombia. *Revista de Ciencias de la Tierra*  
916 *Sudamericana*, 21 (4).437-465.
- 917 Dar, R. A., Chandra, R., & Romshoo, S. A. (2013). Morphotectonic and  
918 lithostratigraphic analysis of intermontane Karewa basin of Kashmir  
919 Himalayas, India. *Journal of mountain science*, 10. 1-15.  
920 <https://doi.org/10.1007/s11629-013-2494-y>
- 921 Diederix, H., Bohórquez, O. P., Mora-Páez, H., Peláez, J. R., Cardona, L.,  
922 Corchuelo., Ramírez, J & Díaz-Mila, F. (2020). The Algeciras Fault System of

- 923 the Upper Magdalena Valley, Huila Department. *The geology of*  
924 *Colombia*, 4.423-452. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.12>
- 925 Duque-Caro, H. (1990). The Choco Block in the northwestern corner of South  
926 America: Structural, tectonostratigraphic, and paleogeographic implications.  
927 *Journal of South American Earth Sciences*, 3(1).71-84.  
928 [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(90\)90019-W](https://doi.org/10.1016/0895-9811(90)90019-W)
- 929 Duraiswami, R. A., Bondre, N. R., Dole, G., Phadnis, V. M., & Kale, V. S. (2001).  
930 Tumuli and associated features from the western Deccan Volcanic Province,  
931 India. *Bulletin of Volcanology*, 63. 435-442.  
932 <https://doi.org/10.1007/s004450100160>
- 933 Einsele, G. (1992). *Sedimentary Basins; Evolution, Facies and Sediment Budget*.  
934 *Springer-Verlag*. Berlin.632 pp.
- 935 Farangitakis, GP, McCaffrey, KJ, Willingshofer, E., Allen, MB, Kalnins, LM, van  
936 Hunen, J & Sokoutis, D. (2021). La evolución estructural de las cuencas  
937 separables en respuesta a cambios en el movimiento de las  
938 placas. *Investigación de cuencas*, 33 (2).1603-1625.
- 939 Faulds, J., & Hinz, N. (2015). Favorable tectonic and structural settings of  
940 geothermal systems in the Great Basin region, western USA: Proxies for  
941 discovering blind geothermal systems. In *Proceedings World Geothermal*  
942 *Congress, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015 (No. DOE-UNR-06731-02)*.  
943 Nevada Bureau of Mines and Geology, University of Nevada, Reno.  
944 <https://www.osti.gov/biblio/1724082>

- 945 Fitz Alvira, N. (2022). *Geología y análisis vulcano-tectónico del vulcanismo*  
946 *monogenético al sur del graben de Penjamillo, Michoacán (México)*. Tesis de  
947 maestría, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad  
948 Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mexico. 131 pp.
- 949 Flórez, A. (2003). *Colombia: evolución de sus relieves y modelados*. Universidad  
950 Nacional de Colombia. Red de Estudio de Espacio y Territorio, RET. Bogotá.  
951 240 pp.
- 952 Fossen, H. (2016). *Structural geology. Second edition*. Cambridge university press.  
953 England.503 pp.
- 954 García-Chinchilla, D. A., & Vlach, S. R. F. (2019). Geological mapping of intrusive  
955 rocks: a case study in the Garzón region, the Eastern Cordillera of the  
956 Colombian Andes. *Geología USP. Serie Científica*, 19(4), 43-62.  
957 <https://repositorio.usp.br/item/002981548>
- 958 Gómez-Hurtado, E., Aguirre-Hoyos, L. M., Diederix, H., Audemard M., F. A., Mora-  
959 Páez, H., Bohórquez-Orozco, O. P., Muñoz, O. F., González, D. A., López-  
960 Isaza, J. A., Escobar-Rey, L. K., Martínez-Díaz, G. P., Ramírez-Cadena, J.,  
961 Idárraga-García, J., López-Herrera, N. R., Barragán, W., Tique, Y. P.,  
962 Fonseca, H. A., Jiménez, J. A., & Plazas-Ruiz, J. M. (2022). *Neotectónica y*  
963 *paleosismología de la Falla de Algeciras, Huila, Colombia* (Vol. volumen 44).  
964 Libros del Servicio Geológico Colombiano.267 pp.  
965 <https://doi.org/10.32685/9789585399389>

- 966 Gómez-Vasconcelos, M. G., Macías, J. L., Avellán, D. R., Sosa-Ceballos, G.,  
967 Garduño-Monroy, V. H., Cisneros-Máximo, G., Layer, P. W., Benowitz, J.,  
968 López-Loera, H., López, F. M., & Perton, M. (2020). The control of preexisting  
969 faults on the distribution, morphology, and volume of monogenetic volcanism  
970 in the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field. *Bulletin GSA*, 132(11-12).  
971 2455-2474. <https://doi.org/10.1130/B35397.1>
- 972 Gómez-Vasconcelos, M. G., Macías, J. L., Avellán, D. R., Sosa-Ceballos, G., &  
973 Garduño-Monroy, V. H. (2021). *Tectonic control on monogenetic volcanism*  
974 *in the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field, México* (No. EGU21-8497).  
975 Copernicus Meetings.
- 976 Goudie, A. (2004). *Encyclopedia of geomorphology* (Vol. 2). New York. Psychology  
977 Press.101 pp.
- 978 Grajales, J. A., Nieto-Samaniego, Á. F., Barrero-Lozano, D., Osorio, J. A., & Cuellar,  
979 M. A. (2020). Emplazamiento del magmatismo Paleoceno-Eoceno bajo un  
980 régimen transtensional y su evolución a un equilibrio dinámico en el borde  
981 occidental de Colombia. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 37(3),  
982 250-268. <http://dx.doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2020.3.1570>
- 983 Grosse, P., Ramacciotti, M. L. O., Fochi, F. E., Guzmán, S., Orihashi, Y., & Sumino,  
984 H. (2020). Geomorphology, morphometry, spatial distribution and ages of  
985 mafic monogenetic volcanoes of the Peinado and Incahuasi fields,  
986 southernmost Central Volcanic Zone of the Andes. *Journal of Volcanology*  
987 *and Geothermal Research*, 401, 106966.  
988 <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106966>

- 989 Gutiérrez, F., & Gutiérrez, M. (2016). Landforms of the earth: an illustrated guide.  
990 Springer. 270 pp
- 991 Harff, J., Meschede, M., Petersen, S., Thiede, J. (Eds.). (2016). *Encyclopedia of*  
992 *Marine Geosciences*. Springer Dordrecht. 961 pp.
- 993 Gutiérrez, F., & Gutiérrez, M. (2016). *Landforms of the earth: an illustrated guide*.  
994 Springer. 270 pp
- 995 Helmens, K. F., & Van der Hammen, T. (1995). Memoria explicativa para los mapas  
996 del Neogeno-Cuaternario de la Sabana de Bogota-Cuenca alta del Rio  
997 Bogotá (Cordillera Oriental, Colombia). *Análisis Geográficos*, 24, 91-142.
- 998 Hobbs, W. H. (1904). Lineaments of the Atlantic border region. *Bulletin of the*  
999 *Geological Society of America*, 15(1), 483-506.  
1000 <https://doi.org/10.1130/GSAB-15-483>
- 1001 Howard, A. D. (1967). Drainage analysis in geologic interpretation: a summation.  
1002 *AAPG bulletin*, 51(11), 2246-2259. <https://doi.org/10.1306/5D25C26D-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- 1003
- 1004 Huggett, R., & Shuttleworth, E. (2022). *Fundamentals of geomorphology*. Taylor &  
1005 Francis. 533 pp
- 1006 Irving, E. M. (1971). La evolución estructural de los Andes más septentrionales de  
1007 Colombia. *Boletín geológico*, 19 (2), 1-90. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol19.2.1971.395>
- 1008
- 1009 Kearey, P. (2009). *The Encyclopedia of the solid earth sciences*. John Wiley & Sons.  
1010 736 pp.

- 1011 Keller, E. A., & Pinter, N. (1996). *Active tectonics: Earthquakes Uplift and*  
1012 *Landscapes*. Prentice Hall. 362 pp.
- 1013 Kereszturi, G. & Németh, K. (2012). Monogenetic basaltic volcanoes: genetic  
1014 classification, growth, geomorphology and degradation. En: K. Németh,  
1015 Editor, *Updates in Volcanology - New Advances in Understanding Volcanic*  
1016 *Systems*, inTech Open: Rijeka, Croatia. p. 3-88.
- 1017 Latrubesse, E. M. (2015). Large rivers, megafans and other Quaternary avulsive  
1018 fluvial systems: A potential “who's who” in the geological record. *Earth-*  
1019 *Science Reviews*, 146, 1-30. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.03.004>
- 1020 Le Corvec, N., Spörli, K. B., Rowland, J., & Lindsay, J. (2013). Spatial distribution  
1021 and alignments of volcanic centers: clues to the formation of monogenetic  
1022 volcanic fields. *Earth-Science Reviews*, 124, 96-114.  
1023 <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.05.005>
- 1024 Liotta, D., Brogi, A., Wheeler, W. H., Bastensen, E., Garduño-Monroy, V. H., Macias,  
1025 J. L., Sosa-Ceballos, G., Pola, A., Avellán, D. R., Bianco, C., Olvera-García,  
1026 E., Gómez-Alvarez, F., Israde-Alcantara, I., Jiménez-Haro, A., Luigi Piccardi,  
1027 L., & Zucchi, M. (2023). Tectonic-magmatic-hydrothermal interactions in a hot  
1028 dry rock geothermal system: The role of the transfer and normal faults in the  
1029 Acoculco caldera (Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*,  
1030 107963.
- 1031 Martínez Martínez, J. A. (2021). *Marco Jurídico sobre la generación de Energía*  
1032 *Geotérmica en Colombia*. Tesis de pregrado, Facultad de Ciencias Jurídicas,

- 1033 Programa de derecho, Pontifica Universidad Javeriana, Bogotá. 97 pp.  
1034 <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/56109>
- 1035 McCourt, W. J., Aspden, J. A., & Brook, M. (1984). New geological and  
1036 geochronological data from the Colombian Andes: continental growth by  
1037 multiple accretion. *Journal of the Geological Society*, 141(5), 831-845.  
1038 <https://doi.org/10.1144/gsig.141.5.0831>
- 1039 Mon, R. (2005). Control tectónico de la red de drenaje de los Andes del norte  
1040 argentino. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60(3), 461-466.
- 1041 Monsalve-Bustamante, M. L., Tapias, J. G., & Nuñez-Tello, A. (2020). Rear–Arc  
1042 Small– Volume Basaltic Volcanism in Colombia: Monogenetic Volcanic  
1043 Fields. *The Geology of Colombia, Volume 4 Quaternary. Servicio Geológico  
1044 Colombiano*, 4, 353-396.
- 1045 Montes, C., Rodriguez-Corcho, A. F., Bayona, G., Hoyos, N., Zapata, S., & Cardona,  
1046 A. (2019). Continental margin response to multiple arc-continent collisions:  
1047 The northern Andes-Caribbean margin. *Earth-Science Reviews*, 198,  
1048 102903. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102903>
- 1049 Moody, J. D., & Hill, M. J. (1956). Wrench-fault tectonics. *Geological Society of  
1050 America Bulletin*, 67(9), 1207-1246. [https://doi.org/10.1130/0016-  
1051 7606\(1956\)67\[1207:WT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[1207:WT]2.0.CO;2)
- 1052 Mount, J. F. (1954). *California rivers and streams: The conflict between fluvial  
1053 process and land use* ; University of California Press. 378 pp.

- 1054 Murcia, A., & Cepeda, H. (1991). Memoria explicativa: Geología de la plancha 429 -  
1055 Pasto, Escala 1:100.000. *Ingeominas*, Bogotá. 17 pp.
- 1056 Murcia, A., & Pichler, H. (1986). Geoquímica y dataciones radiométricas de las  
1057 ignimbritas cenozoicas del SW de Colombia. In: Memorias del Simposio  
1058 Internacional sobre Neotectónica y Riesgo Volcánicos. *Revista CIAF*, 1,2 (1-  
1059 30), 346-363. [http://pascal-](http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=8236317)  
1060 [francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=8236317](http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=8236317)
- 1061 Murcia, H., Borrero, C., & Németh, K. (2019). Overview and plumbing system  
1062 implications of monogenetic volcanism in the northernmost Andes' volcanic  
1063 province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 383, 77-87.  
1064 <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.06.013>
- 1065 Nichols, G. (2009). *Sedimentology and stratigraphy*. John Wiley & Sons. 432 pp.
- 1066 Niemeyer, H. (1999). *Apuntes de geología estructural*. Antofagasta, Chile, 138 pp.
- 1067 Núñez, A. (2003). Reconocimiento Geológico Regional de las Planchas 411 La  
1068 Cruz, 412 San Juan de Villalobos, 430 Mocoa, 431 Piamonte, 448  
1069 Monopamba, 449 Orito y 465 Churuyaco Departamentos de Caquetá, Cauca,  
1070 Huila, Nariño y Putumayo. Escala 1:100.000. Memoria explicativa.  
1071 *Ingeominas*, Bogotá. 259 pp.
- 1072 Ortiz, W. C. (1970). La Cocha: Un Lago Andino en el Sur de Colombia. *Boletín de la*  
1073 *Sociedad Geográfica de Colombia*, 17(101), 1-13.

- 1074 Papadaki, E. S., Mertikas, S. P., & Sarris, A. (2011). Identification of lineaments with  
1075 possible structural origin using ASTER images and DEM derived products in  
1076 Western Crete, Greece. *EARSeL eProceedings*, 10(1), 10.
- 1077 París, G., & Romero, J. A. (1994). Fallas activas en Colombia. *Boletín*  
1078 *geológico*, 34(2-3), 4-25. [https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol34.2-](https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol34.2-3.1994.347)  
1079 [3.1994.347](https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol34.2-3.1994.347)
- 1080 Pérez-Peña, JV, Azañón, JM, & Delgado, J. (2004). Metodología para el análisis de  
1081 redes de drenaje mediante índices geomorfológicos y su relación con la  
1082 tectónica activa. *Geotemas*, 6, 259-262.
- 1083 Piquer, J., Yáñez, G., Rivera, O., & Cooke, D. R. (2019). Long-lived crustal damage  
1084 zones associated with fault intersections in the high Andes of Central  
1085 Chile. *Andean Geology*, 46(2), 223-239.  
1086 <https://doi.org/10.5027/andgeoV46n2-3106>
- 1087 Pubellier, M., Deffontaines, B., Quebral, R., & Rangin, C. (1994). Drainage network  
1088 analysis and tectonics of Mindanao, southern  
1089 Philippines. *Geomorphology*, 9(4), 325-342. [https://doi.org/10.1016/0169-](https://doi.org/10.1016/0169-555X(94)90053-1)  
1090 [555X\(94\)90053-1](https://doi.org/10.1016/0169-555X(94)90053-1)
- 1091 Restrepo, M., Bustamante, C., Cardona, A., Beltran-Trivino, A., Bustamante, A.,  
1092 Chavarria, L., & Valencia, V. A. (2021). Tectonic implications of the jurassic  
1093 magmatism and the metamorphic record at the southern Colombian Andes.  
1094 *Journal of South American Earth Sciences*, 111, 103439.  
1095 <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103439>

- 1096 Restrepo-Moreno, S. A., Foster, D. A., Bernet, M., Min, K., & Noriega, S. (2019).  
1097 Morphotectonic and orogenic development of the Northern Andes of  
1098 Colombia: A low-temperature thermochronology perspective. In: *Geology and*  
1099 *Tectonics of Northwestern South America: The Pacific-Caribbean-Andean*  
1100 *Junction. Springer International Publishing, 749-832.*  
1101 [https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9_11)
- 1102 Richards, JP (2000). Lineaments revisited. *Society of Economic Geologists*  
1103 *Newslette*, 42 (1), 14-20. <https://doi.org/10.5382/SEGnews.2000-42.fea>
- 1104 Rivera Lara, V. (2021). *Estudio morfométrico y geomorfológico del campo volcánico*  
1105 *mono genético Guamuez – Sibundoy, Colombia*. Tesis de pregrado,  
1106 Programa de geología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,  
1107 Universidad de Caldas, Manizales. 100 pp.  
1108 <https://repositorio.ucaldas.edu.co/handle/ucaldas/16978>
- 1109 Robertson, K., Flórez, A., & Ceballos, J. L. (2002). Geomorfología volcánica,  
1110 actividad reciente y clasificación en Colombia. In: *Cuadernos de Geografía.*  
1111 *Revista Colombiana de Geografía*, 11(1-2), 37-76.
- 1112 Rodríguez Ospina, G., Alfaro Valero, C., & González Idárraga, C. E. (2019).  
1113 *Geotermia en Colombia*. Libros del Servicio Geológico Colombiano. 32 pp.
- 1114 Rodríguez, G., & González, H. (2004). Características geoquímicas y marco  
1115 tectónico de los basaltos alcalinos del sur de Colombia. *Boletín de Ciencias*  
1116 *de la Tierra*, (16), 9-22.

- 1117 Rodriguez-Gonzalez, A., & Fernandez-Turiel, J. L. (2015). Las geoformas  
1118 volcánicas y su modelado morfométrico con Sistemas de Información  
1119 Geográfica (SIG). *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23 (1), 40-48.  
1120 <http://hdl.handle.net/10261/148893>
- 1121 Salazar-Muñoz, N., de la Ossa, C. A. R., Murcia, H., Schonwalder-Ángel, D., Botero-  
1122 Gómez, L. A., Hincapié, G., Dasilva, J. C., & Sánchez-Torres, L. (2021).  
1123 Andesitic (SiO<sub>2</sub>: ~ 60 wt%) monogenetic volcanism in the northern Colombian  
1124 Andes: Crystallisation history of three Quaternary volcanoes. *Journal of*  
1125 *Volcanology and Geothermal Research*, 412, 107194.  
1126 <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107194>
- 1127 Sánchez Torres, L., Murcia, H., & Schonwalder Ángel, D. (2022). The northernmost  
1128 volcanoes in South America (5–6° N): the potentially active Samaná  
1129 Monogenetic Volcanic Field. *Frontiers in Earth Science*, 10, 880003.  
1130 <https://doi.org/10.3389/feart.2022.880003>
- 1131 Sánchez-Torres, L., Toro, A., Murcia, H., Borrero, C., Delgado, R., & Gómez-Arango,  
1132 J. (2019). El Escondido tuff cone (38 ka): a hidden history of monogenetic  
1133 eruptions in the northernmost volcanic chain in the Colombian Andes. *Bulletin*  
1134 *of Volcanology*, 81(12), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s00445-019-1337-2>
- 1135 Sarhan, M. A. (2017). Wrench tectonics of Abu Gharadig Basin, Western Desert,  
1136 Egypt: a structural analysis for hydrocarbon prospects. *Arabian Journal of*  
1137 *Geosciences*, 10, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3176-9>
- 1138 Scheidegger, A. E. (2003). *Morphotectonics*. Springer, Berlin. 197 pp.

- 1139 Sevilla Caicedo, S. P. (2013). *Análisis SIG para el modelamiento de movimientos*  
1140 *de ladera usando software libre en el tramo el Tiro Río Sabanilla de la vía*  
1141 *Loja Zamora*. Tesis de pregrado, Universidad Técnica Particular de Loja,  
1142 Loja, Ecuador. 98 pp
- 1143 Sharma, V. K. (2010). *Introduction to process geomorphology*. CRC Press. Taylor &  
1144 Francis group, Boca Raton. 415 pp.
- 1145 Solano-Acosta, J.D.; Despaigne Diaz, A.I.; Pearse, J. (2020). Morphotectonic  
1146 analysis of the upper guajira, Colombia. a gis and remote sensing approach.  
1147 2020100476. <https://doi.org/10.20944/preprints202010.0476.v1>
- 1148 Soliman, A., & Han, L. (2019). Effects of vertical accuracy of digital elevation model  
1149 (DEM) data on automatic lineaments extraction from shaded DEM. *Advances*  
1150 *in space research*, 64(3), 603-622. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.05.009>
- 1151 Soulas, J.P., Egüez, A., Yepes, H., & Pérez, V.H. (1991). Tectónica activa y riesgo  
1152 sísmico en Los Andes Ecuatorianos y el extremo sur de Colombia. *Boletín de*  
1153 *Geología Ecuatoriano* 2(1), 3-11.
- 1154 Suarez, A. F. (1990). The basement of the Eastern Cordillera, Colombia: An  
1155 allochthonous terrane in northwestern South America. *Journal of South*  
1156 *American Earth Sciences*, 3(2-3), 141-151. [https://doi.org/10.1016/0895-](https://doi.org/10.1016/0895-9811(90)90026-W)  
1157 [9811\(90\)90026-W](https://doi.org/10.1016/0895-9811(90)90026-W)
- 1158 Taboada, A., Dimaté, C. y Fuenzalida, A. (1998). Sismotectónica de Colombia:  
1159 deformación continental activa y subducción. *Física de la Tierra*, 10. 111-147.

- 1160 Terrones Mendoza, D. J. (2023). *Caracterización Geomorfológica del Distrito de*  
1161 *Magdalena, Caserío La Viña y Huaquillas*. Tesis de pregrado. Facultad de  
1162 ingeniería. Universidad Nacional de Cajamarca. Perú.153 pp.  
1163 <http://hdl.handle.net/20.500.14074/5586>
- 1164 Thouret, J. C. (1999). Volcanic geomorphology an overview. *Earth-science reviews*,  
1165 47(1-2), 95-131. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(99\)00014-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(99)00014-8)
- 1166 Toro-Toro, L. M., Vallejo, F., Salazar-Ríos, A., Murcia, H., Osorio-Ocampo, S.,  
1167 García-Arias, M., & Arredondo, C. (2020). Granulitic rocks at the Western  
1168 Cordillera of Colombia: Evidence of metamorphism in the Colombian  
1169 Caribbean Oceanic Plateau. *Journal of South American Earth Sciences*, 101,  
1170 102632. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102632>
- 1171 Torres Gonzalez, D. E. (2018). Caracterización de las estructuras asociadas a  
1172 sistemas de fallas tipo " strike slip" y su implicancia geológica-petrolera. La  
1173 cuenca Mio-oligocena de Tincopalca, sistema de fallas Condorama-Caylloma  
1174 en el sur del Perú. *ix ingepet 2018 (geo-ex-dt-02-n)*. 7pp.  
1175 <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3302>
- 1176 Toussaint, J. F., & Restrepo, J. J. (1994). The Colombian Andes during cretaceous  
1177 times. *Cretaceous tectonics of the Andes*. 61-100.  
1178 [https://doi.org/10.1007/978-3-322-85472-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-322-85472-8_2)
- 1179 Udias, A., & Buforn, E. (2017). *Principles of seismology*. Cambridge University  
1180 Press. New York.51 pp.

- 1181 Vargas-Arcila, L., Murcia, H., Osorio-Ocampo, S., Sánchez-Torres, L., Botero-  
1182 Gómez, L. A., & Bolaños, G. (2023). Effusive and evolved monogenetic  
1183 volcanoes: two newly identified (~ 800 ka) cases near Manizales City,  
1184 Colombia. *Bulletin of Volcanology*, 85(7). 42. [https://doi.org/10.1007/s00445-](https://doi.org/10.1007/s00445-023-01655-y)  
1185 [023-01655-y](https://doi.org/10.1007/s00445-023-01655-y)
- 1186 Velandia, F., Acosta, J., Terraza, R., & Villegas, H. (2005). The current tectonic  
1187 motion of the Northern Andes along the Algeciras Fault System in SW  
1188 Colombia. *Tectonophysics*, 399(1-4). 313-329.  
1189 <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.12.028>
- 1190 Velandia, F., Terraza, R., & Villegas, H. (2001). El Sistema de Fallas Algeciras hacia  
1191 el Suroeste de Colombia y la actual transpresión de Los Andes del Norte. *VIII*  
1192 *Congreso Colombiano de Geología, September 2017*. 11 pp.
- 1193 Velandia, J., Murcia, H., Németh, K., & Borrero, C. (2021). Uncommon mafic rocks  
1194 (MgO > 10 wt.%) in the northernmost Andean volcanic chain (4° 25 "N):  
1195 Implications for magma source and evolution. *Journal of South American*  
1196 *Earth Sciences*, 110. 103308. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103308>
- 1197 Vergara, H. (1996). Rasgos y actividad neotectónica de la Falla de Algeciras.  
1198 In *Memorias VII Congreso Colombiano de Geología Vol. 1*. 491-500.
- 1199 Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A., Winkler, W & Beltrán, A.  
1200 (2011). Geocronología, geoquímica y evolución tectónica de las cordilleras  
1201 Occidental y Central de Colombia. *Litos*, 125 (3-4). 875-896.

- 1202 Woodward, JC, Macklin, MG, Krom, MD, Williams, MA y Gupta, A. (2007). El Nilo:  
1203 evolución, ambientes fluviales cuaternarios y flujos de materiales. *Grandes*  
1204 *ríos: geomorfología y gestión*, 13. 261-289.
- 1205 Zapata-García, G., Rodríguez García, G., & Mejía, MIA (2017). Petrografía,  
1206 geoquímica y geocronología de rocas metamórficas aflorantes en San  
1207 Francisco Putumayo y la vía Palermo-San Luis asociadas a los complejos La  
1208 Cocha-Río Téllez y Aleluya. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (41). 47-64.
- 1209 Zingaretti, V. (2023). *Evolución geomorfológica del río Blanco Este tras las recientes*  
1210 *erupciones del volcán Calbuco, Chile*. Tesis de maestría. magister en  
1211 ciencias mención bosques y medio ambiente, Facultad de Ciencias forestales  
1212 y recursos naturales, Universidad Austral de Chile, Valdivia. 75 pp.
- 1213
- 1214

1215

**Material suplementario**

- 1216 **Anexo 1.** Tabla de valores de azimut de los lineamientos por sectores para la zona  
1217 de estudio. Sistema de coordenadas proyectadas en origen Bogotá.
- 1218 **Anexo 2.** Tabla de información de campo con estaciones georreferenciada.