

Caracterización morfo-estructural y análisis de lineamientos en el Campo Volcánico
Monogenético Guamuéz- Sibundoy (Colombia).

Autores:

Darcy Lisbeth Chapuel Cuasapud
Lisbeth Tatiana Murillo Orobio

Tesis presentada como requisito para optar al título de geólogo

Director:

Luis Álvaro Botero Gómez
Geólogo MSc

Co-director:

Hugo Murcia
Geólogo MSc y PhD

Grupo de Investigación en Estratigrafía y Vulcanología (GIEV) Cumanday
Universidad de Caldas
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Programa de Geología
Manizales
2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

Alvaro

Manizales, Diciembre de 2023

Dedicatoria

A las personas que más admiro y respeto; mi padre, Alberto Chapuel y mi madre, Olga Cuasapud.

A ellos les debo la vida y todo lo que soy, porque creen en mí y en mis capacidades.

Darcy Lisbeth Chapuel Cuasapud

A mi familia, por apoyarme incondicionalmente, por la lealtad y el amor con el que me han acompañado, por ser parte de mi vida y querer siempre lo mejor para mí, por enseñarme que con esfuerzo podemos lograr todo lo que queremos, cada meta que he podido alcanzar es gracias a ustedes y para ustedes, saben lo mucho que los amo y aprecio todo lo que han hecho por mí.

Lisbeth Tatiana Murillo Orobio

Agradecimientos

A mis padres quienes son la base de mi formación, por ser la motivación que me impulsa a seguir con mis objetivos, por sus enseñanzas, cariño, comprensión y apoyo incondicional.

A mis abuelitas por ser el mejor ejemplo de humildad y superación, gracias por regalarme alegrías y pedir por mí en sus oraciones.

A mi hermana y a mi sobrino que me han dado palabras de aliento y apoyo en el proceso de formación académica.

A mi leal amiga y tocaya Lisbeth Tatiana, que a pesar de las dificultades que hemos encontrado en este proceso, ha demostrado ser perseverante y comprometida. Por compartir conmigo experiencias y bellos momentos.

Darcy Lisbeth Chapuel Cuasapud

Le agradezco a mis abuelos, por su amor, por creer en mí siempre, gracias por enseñarme e impulsarme a trabajar por mis sueños.

A mi madre, por todo su esfuerzo, amor y dedicación para ayudarme a culminar este proceso, gracias madre por enseñarme a nunca rendirme.

A mis tíos por tanto afecto, por ser mis amigos, por sus consejos, por llevarme siempre en sus oraciones y por estar siempre para mí.

A mi hermano y a mis primos por llenar mi vida de momentos felices y ser mi motor para cumplir todo lo que me he propuesto.

A Sebastián por ser mi confidente y acompañarme siempre.

A mi amiga y compañera de trabajo Darcy, por compartir conmigo este proceso y por todos los momentos que hemos vivido en el transcurso de nuestra carrera.

A mis amigas: Carolina, María José, Karol, Alexandra y a mi amigo Jerson por estar incondicionalmente para mí durante esta etapa de mi vida.

Lisbeth Tatiana Murillo Orobio

Al Grupo de Investigación en Estratigrafía y Vulcanología (GIEV) Cumanday, por brindarnos la oportunidad de realizar este proyecto.

A nuestro asesor Luis Álvaro Botero Gómez, por orientarnos durante este proceso con tanta paciencia, por enseñarnos tanto, no solo para nuestra carrera sino también para la vida, nuestra absoluta gratitud y admiración como profesional y amigo.

A nuestro director Hugo Murcia, por sus consejos y por contribuir su conocimiento en el desarrollo de este trabajo, para él siempre nuestro respeto y admiración.

A nuestra Universidad de Caldas, por formarnos y enseñarnos a amar esta profesión.

Contenido

1. Introducción	10
1.1 Planteamiento del problema	12
1.2 Objetivos.....	13
1.2.1 Objetivo general	13
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
Marco geológico.....	14
2.1 Configuración tectónica.....	14
2.2 Geología estructural regional.....	15
2.2.1 Piedemonte Llanero y Valle del Magdalena	15
2.2.2 Sistema de Fallas Algeciras	16
2.2.3 Fallas asociadas al Sistema de Fallas de Algeciras	16
2.3 Geología regional	17
2.3.1 Basamento	18
2.4 Campo Volcánico Monogenético Guamuéz-Sibundoy (CVMGS)	20
2.4.1 Morfología.....	20
2.4.2 Control estructural.....	20
2.4.3 Composición.....	22
2.4.4 Temporalidad	22
3. Marco teórico	23
3.1 Vulcanismo Monogenético.....	23
3.2 Geomorfología.....	23
3.2.1 Rasgos fisiográficos denudacionales.....	23
3.2.2 Rasgos fisiográficos de origen volcánico.....	25
3.2.3 Rasgos fisiográficos de origen fluvial.....	26
3.2.4 Rasgos fisiográficos de origen glacial	26
3.2.5 Rasgos fisiográficos tectónicos-estructurales.....	26
3.3 Morfotectónica.....	29
3.3.1 Lineamientos estructurales	29
3.3.2 Sistemas de diaclasas	30
4. Metodología	31
4.1 Análisis morfométrico	31

4.2	Análisis geomorfológico	31
4.3	Cartografía de lineamientos.....	32
4.4	Trabajo de campo	32
Resultados		33
5.1	Análisis morfométrico	33
5.1.1	Análisis de drenajes.....	36
5.1.2	Análisis de anomalías en los patrones de drenaje	40
5.2	Análisis geomorfológico	43
5.2.1	Ambiente denudacional:.....	43
5.2.2	Ambiente volcánico.....	45
5.2.3	Ambiente fluvial:.....	48
5.2.4	Ambiente glaciar:	49
5.2.5	Ambiente estructural	50
5.3	Análisis de lineamientos.....	54
5.4	Análisis de sismicidad	63
5.5	Área geotérmica asociada.....	65
6.	Discusión.....	68
6.1	Rasgos morfoestructurales.....	68
6.2	Fallamiento	80
6.3	Modelo estructural del campo volcánico.....	86
Conclusiones		91
Anexos.....		93
Referencias bibliográficas		94

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de localización de la zona objeto de estudio.....	11
Figura 2. Mapa geológico de la zona objeto de estudio.....	19
Figura 3. Insumos para análisis de resultados de la zona objeto de estudio.	34
Figura 4. Mapa de pendientes para la zona objeto estudio	35
Figura 5. Sistema de drenajes de la zona objeto de estudio.....	37
Figura 6. Patrones de drenaje desarrollados en la zona de estudio	38
Figura 7. Mapa de anomalías de drenajes de la zona objeto de estudio.....	42
Figura 8. Panorámica de las laderas erosivas disectadas aledañas al volcán Campanero.....	44
Figura 9. Vista panorámica del Valle de Sibundoy.....	45
Figura 10. Mapa de disección vertical	46
Figura 11. Panorámica del volcán Taita Muchivioy	47
Figura 12. Panorámica del volcán Guayapungo	47
Figura 13. Textura vesicular en lavas andesíticas de los Muchivioy	48
Figura 14. Panorámica de la Laguna de La Cocha.....	49
Figura 15. Diaclasas y fracturas en la quebrada de la vereda El Naranjal.	50
Figura 16. Lomeríos estructurales y una silleta de falla	52
Figura 17. Mapa geomorfológico de la zona objeto de estudio	53
Figura 18. Mapa de lineamientos de la zona objeto de estudio.	55
Figura 19. Diaclasas en afloramiento rocoso en la Garganta de Balsayaco.....	56
Figura 20. Diaclasas en afloramiento rocoso en la vía hacia la vereda El Porotal.	57
Figura 21. Diaclasas en afloramiento rocoso en el río Vigichoy	58
Figura 22. Diaclasas y fracturas ubicadas en el río Viginchoy	59
Figura 23. Estructuras y productos aportados por volcanes Muchivioy	60
Figura 24. Diaclasas en afloramiento rocoso al norte del volcán Campanero	61
Figura 25. Diaclasas y fracturas en la vereda El Naranjal	62
Figura 26. Mapa de sismicidad de la zona objeto de estudio.....	64
Figura 27. Aguas termales El Salado ubicados en la vereda Balsayo.....	65
Figura 28. Fuentes termales sector SE	66
Figura 29. Fuentes termales del sector SE	67
Figura 30. Representación esquemática del sistema morfo-estructural del sector NE.	69
Figura 31. Panorámica de deslizamiento reciente y de gran magnitud en el sector El Salado	70
Figura 32. Panorámica de deslizamiento de gran magnitud en la vía a la vereda El Porotal.	70
Figura 33. Diaclasas en afloramiento rocoso en el sector Garganta de Balsayaco.	71

Figura 34. Diaclasas en afloramiento rocoso en la vertiente del río Viginchoy	72
Figura 35. Representación esquemática del sistema morfo-estructural del sector SE.....	73
Figura 36. Representación esquemática del sistema morfo-estructural del sector SW.....	75
Figura 37. Valle Estero, cerro Patascoy, lomeríos estructurales y laderas erosivas disectadas.	76
Figura 38. Sector norte de la Laguna de La Cocha y laderas erosivas disectadas.	77
Figura 39. Representación esquemática del sistema morfo-estructural del sector NW.....	78
Figura 40. Relación de las unidades geomorfológicas con lineamientos propuestos.	79
Figura 41. Zoom drenajes sector NE del área de estudio.	81
Figura 42. Zoom drenajes del sector SE del área de estudio.	83
Figura 43. Zoom drenajes del sector SE del área de estudio	84
Figura 44. Mapa de fallas y lineamientos.	85
Figura 45. Modelo estructural de la zona objeto de estudio.	87
Figura 46. Mecanismos de ascenso de magma del CVMGS	90

Lista de tablas

Tabla 1. Recopilación de características de los volcanes del CVMGS	21
Tabla 2. Rangos de inclinación según Carvajal, (2012).....	24
Tabla 3. Valores de área en Ha y su equivalente en porcentaje de los rangos de inclinación	33
Tabla 4. Nombres de los ríos o segmentos deflectados y su sentido de rumbo.	40

Resumen

El Campo Volcánico Monogenético Guamuéz-Sibundoy (CVMGS) está localizado en el flanco oriental de la Cordillera Central, en los departamentos de Nariño y Putumayo, 4 km al SW de la ciudad de Santiago, en una depresión amplia que se conoce como Valle de Sibundoy. Esta zona se encuentra influenciada por un conjunto de fallas relacionadas con el Sistema de Fallas de Algeciras (SFA). Con el objetivo de comprender la actividad tectónica registrada en los rasgos morfoestructurales y la interacción con el CVMGS, se empleó el uso de sistemas de información geográfica (SIG) para procesar modelos digitales del área de estudio y de esta manera, realizar una caracterización geomorfológica base para el análisis. Para esto, se extrajo el relieve sombreado, las pendientes, los drenajes, los aspectos y los lineamientos con posible origen estructural. Los resultados indicaron características estructurales con una acentuación hacia la zona SE del Valle de Sibundoy donde la falla San Francisco-Yunguillo podría ser la principal responsable de que se encuentren emergidas las formaciones Saldaña, Villeta y el Monzongranito de Mocoa. A su vez, se identificaron geoformas como escarpes estructurales, escarpes facetados y ganchos de flexión asociados con la cinemática NE de esta falla principal. Adicionalmente, se evidenciaron deflexiones en los ríos Putumayo, Cascajo, Volcanyaco, Viginchoy y segmentos rectilíneos en rocas volcánicas que coinciden con el trazo de algunos lineamientos. La concentración de lineamientos transversales a lo largo del rumbo de las fallas regionales presentes en la zona de estudio puede deberse a la existencia de fallas locales o lineamientos generados en la zona de daño de las fallas principales. Estas fallas pueden evidenciarse mediante lineamientos continuos predominantes en dirección NWW-SEE, NW-SE, NNE-SSW y NE-SW. Teniendo en cuenta lo anterior, se asocia los lineamientos en sentido NE-SW con la falla San Francisco-Yunguillo y los lineamientos en sentido NW-SE con la falla Sibundoy y el SFA. La presencia de microcuencas asociadas con lineamientos, sugiere la formación de éstas debido a levantamientos y una posterior erosión. En conclusión, la configuración actual del relieve fue controlada principalmente por procesos estructurales responsables de los cambios morfométricos asociados a la formación del Valle de Sibundoy, así como la exhumación del sector SE del CVMGS. Igualmente, las expresiones de lineamientos permitieron ajustar posibles tendencias tectónicas asociadas con fallas previamente reconocidas permitiendo proponer un modelo estructural asociado al CVMGS.

1. Introducción

El Campo Volcánico Monogenético Guamuéz-Sibundoy (CVMGS) (Flórez, 2003; Monsalve-Bustamante et al., 2020), está localizado en el flanco oriental de la Cordillera Central, en los departamentos de Nariño y Putumayo (Figura 1), 4 km al SW de la población de Santiago. En esta zona se destaca una depresión amplia de aproximadamente 98,32 km² de extensión, con predominio de depósitos Cuaternarios, que se conoce como Valle de Sibundoy (Velandia et al., 2001). El basamento del área de estudio está relacionado con el Complejo Migmatítico de La Cocha-Río Téllez, el cual corresponde a rocas ígneas de composición granodiorítica, afectadas por el fenómeno de blastesis, y de rocas metamórficas, principalmente ortoneises, paraneises, granulitas y anfibolitas (Murcia & Cepeda, 1991). Suprayaciendo este complejo, se encuentran depósitos Cuaternarios como el abanico Guamuéz conformado por bloques de hasta 1 m de diámetro, predominantemente de líticos de rocas ígneas intrusivas y volcánicas (Núñez, 2003). También se encuentra el abanico del Valle de Sibundoy con predominante composición volcánica, ya sea por acumulación directa de depósitos de caída o por la erosión y transporte de las rocas y depósitos volcánicoclásticos localizados hacia las vertientes próximas al valle (Núñez, 2003). En el área también se encuentran los volcanes monogenéticos recientemente estudiados agrupados en el CVMGS (Rivera-Lara, 2021). Este campo se ve influenciado por los sistemas de fallas Algeciras, del río Suaza y el río Cauca, en los cuales se destaca la falla San Francisco- Yunguillo (Murcia & Cepeda, 1991). Esta falla corresponde en este sector con el trazo principal del Sistema de Fallas de Algeciras (SFA) que controla el flanco sur de la cuenca (Velandia et al., 2001). De acuerdo con el Servicio Geológico Colombiano (anteriormente INGEOMINAS) en el año 1834 y 1935 se registraron sismos con epicentro en el Valle de Sibundoy, los cuales podrían ser un indicio de la actividad neotectónica de la zona que se relacionan con los segmentos de falla del sistema al borde sur de la cuenca (Núñez, 2003).

En este trabajo se presenta el conocimiento de la geología estructural y actividad tectónica del CVMGS, con base en fotointerpretación, identificación de lineamientos y datos corroborados en campo. En relación con la información obtenida, se realiza la caracterización geomorfológica, análisis de drenajes e identificación de lineamientos como insumo para plantear un modelo tectónico-estructural que permita definir la posible interacción entre estructuras presentes en la zona como fallas y fracturas en el basamento con el ascenso de magma.

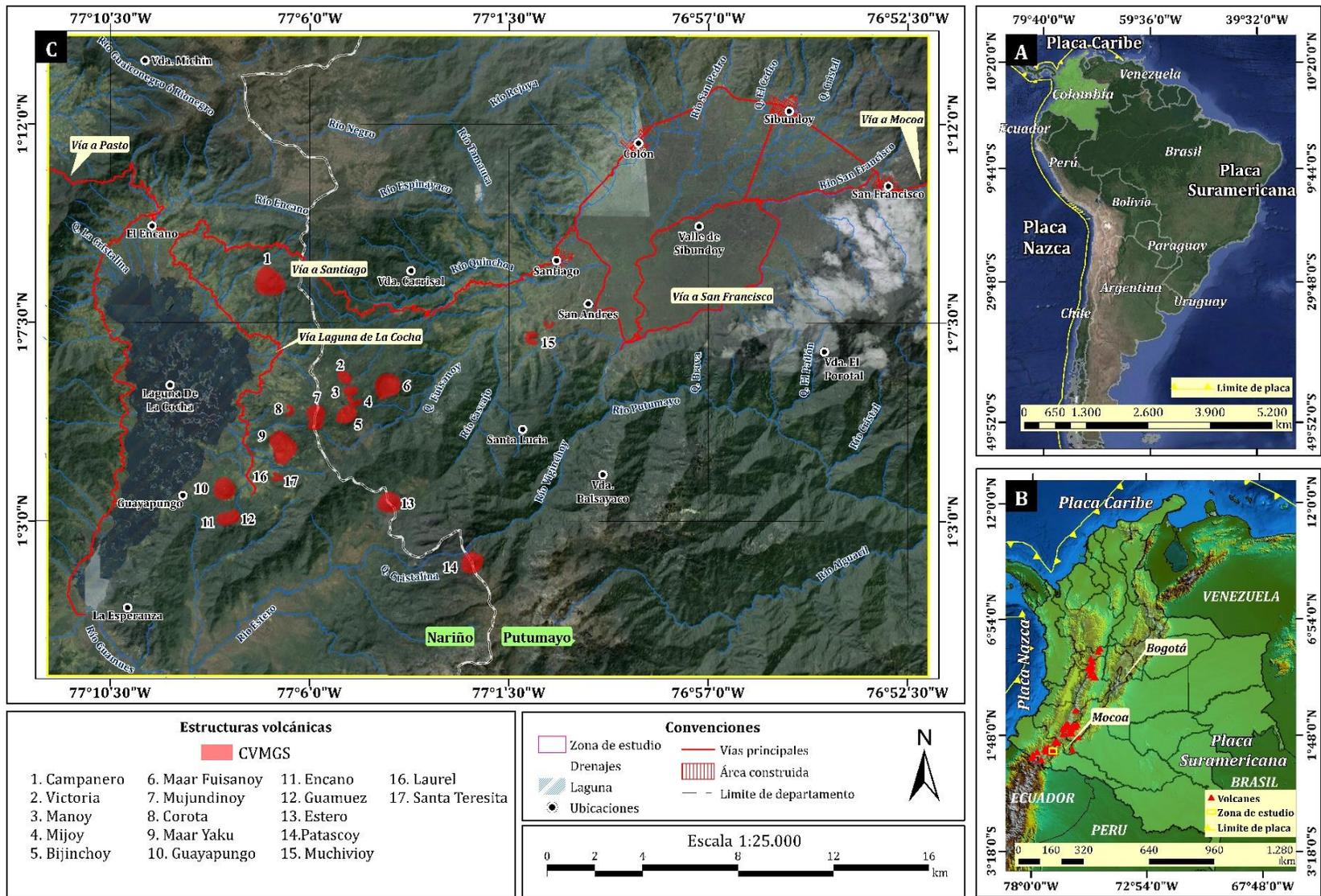


Figura 1. Mapa de localización de la zona objeto de estudio. **A)** Colombia en Suramérica **B)** Distribución de estructuras volcánicas en Colombia y ubicación del área de estudio delimitada por polígono amarillo. **C)** Zona de estudio con la ubicación de las estructuras volcánicas del Campo Volcánico Monogenético Guamuéz-Sibundoy delimitados por polígonos rojos y las principales fallas de la zona de estudio reportadas por el Servicio Geológico Colombiano (2020) y Restrepo et al., (2021). Elaborado en ArcGIS a partir del DEM 12,5 m a escala 1:25.000.

1.1 Planteamiento del problema

En Colombia se han reconocido campos volcánicos monogenéticos, como por ejemplo “la provincia volcánica alcalibasáltica en el departamento del Huila (Monsalve–Bustamante et al., 2020) o el campo volcánico monogenético Pijaos ubicado en la Zona Volcánica del Norte (NVZ, 2° S a 4°30'N) (Velandia et al., 2021). Además, se encuentran otros campos volcánicos recientemente reconocidos: Samaná (Sánchez-Torres et al., 2019; 2022), Tapias-Guacaica (Vargas-Arcila et al., 2023) y Villamaría-Termale (Botero-Gómez et al., 2018; Osorio et al., 2018; Cavell, 2020; Castro, 2021; Salazar-Muñoz et al., 2021, Botero-Gómez, 2022), este último relacionado con un fuerte control estructural.

Uno de los campos volcánicos monogenéticos ubicados en el sur del país es el CVMGS, del cual se tiene poca información tanto de su temporalidad como de su origen, sin embargo, se sugiere que la formación del mismo es reciente y que está relacionada con el Sistema de Fallas Algeciras y su interacción con las fallas locales existentes del departamento de Putumayo y Nariño (Monsalve-Bustamante et al., 2020). A pesar de que el área está cubierta por depósitos Cuaternarios, aún existen evidencias de la influencia tectónica sobre el relieve lo que permite un acercamiento a los procesos que modelaron el nombrado Valle de Sibundoy.

Teniendo en cuenta que la zona está sometida a eventos sísmicos probablemente debido a la reactivación de las fallas (Udias & Bufon, 2017), un análisis morfo estructural que involucre un análisis digital (modelos de elevación digital, mapas que incluyen información de drenajes, lineamientos, pendientes, geomorfología, a partir de los cuales se realiza fotointerpretación) y su complementación con los datos obtenidos en campo se convierte en un insumo indispensable para continuar entendiendo el comportamiento estructural en la zona.

De esta manera, esta investigación busca dar respuesta a los siguientes interrogantes: ¿Cuál es la relación estructural del área de estudio con la formación del CVMGS? ¿Cuáles son las evidencias fisiográficas que pueden estar asociadas con la tectónica regional? ¿Cuál es la relación morfotectónica con el modelamiento del relieve actual en la zona?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Caracterizar el Campo Volcánico Monogenético Guamuéz-Sibundoy (CVMGS) a partir de lineamientos, dando énfasis en el comportamiento volcanotectónico de la zona a través de sistemas de información geográfica y evidencias obtenidas en campo.

1.2.2 Objetivos específicos

- ❖ Realizar una caracterización geomorfológica del área de influencia del Campo Volcánico Monogenético Guamuéz-Sibundoy por medio de insumos de sistemas de información geográfica.
- ❖ Realizar un análisis morfométrico del relieve en la zona de estudio, que permita resaltar los lineamientos con el uso de herramientas digitales.
- ❖ Proponer un modelo estructural que integre información geomorfológica y geológica del área a partir de análisis de datos obtenidos por medios digitales y corroborados en campo.

2. Marco geológico

2.1 Configuración tectónica

La configuración tectónica de Colombia está caracterizada por un margen continental deformado en el límite de tres placas tectónicas: suramericana, Nazca y Caribe (Taboada et al., 1998, Figura 1A). La subducción de estas placas, da origen a la cadena montañosa denominada los Andes del Norte la cual tiene una edad Cenozoica (Taboada et al., 1998). Esta cadena orogénica resulta de procesos de subducción-obducción y colisiones que ocurrieron en el margen occidental de Colombia abarcando desde el Precámbrico hasta la actualidad (McCour et al., 1984). Los Andes Colombianos comprenden tres dominios tectónicos: el cratón Sudamericano en el este, el complejo caribeño en el norte, y las placas oceánicas de Cocos y Nazca en el este (Taboada et al., 1998). Los Andes Colombianos abarcan a tres secuencias montañosas (Acosta et al., 2007): cordilleras Oriental, Central y Occidental, separadas por los valles interandinos como el Valle del río Magdalena, el Valle del río Cauca, y los valles del río Atrato y el río San Juan y la serranía de Baudó (Toussaint & Restrepo, 1994).

La convergencia relativa entre la Placa del Caribe en dirección ESE con respecto a la Placa Suramericana generó la deformación del Norte del territorio Colombiano y la franja Norte de la Cordillera Oriental (Taboada et al., 1998). El levantamiento de esta cordillera y la configuración de su relieve resulta de una fase orogénica andina del Pliocuaternario (Helmes et al., 1995). La Cordillera Oriental se desprende de esta cadena andina al sur de Colombia, se extiende hasta el macizo de Santander y se encuentra situada en una antigua cuenca Jurásica-Cretácea (Taboada et al., 1998). La Cordillera Central está relacionada con la tectónica de subducción generada por la convergencia de la Placa Nazca y la Placa Suramericana (Ingeominas, 1988). Esta cordillera fue sometida a levantamientos durante el Cretácico Superior por una acreción de la Cordillera Occidental (Cooper, 1995). El vulcanismo en la Cordillera Central (Figura 1B) está dado por la subducción de la placa Nazca al Occidente de Colombia, presentando una actividad tectónica y volcánica reciente (Taboada et al., 1998). Finalmente, la formación del occidente de Colombia se dio durante el Cretácico y Terciario (Duque-Caro, 1990). Durante este periodo de tiempo, episodios de colisión relacionados con la convergencia de la placa Nazca generaron el emplazamiento del bloque del Chocó y el Prisma de Acreción del Pacífico (Taboada et al., 1998).

2.2 Geología estructural regional

El sistema de fallas activas en Colombia se da como resultado de la convergencia de las placas Nazca, Caribe y Suramericana y se extienden paralelamente a los piedemontes de las cordilleras colombianas (Taboada et al., 1998). En la Cordillera Central predomina el Sistema de Fallas de Romeral (Cline, 1981). Algunos de los tramos principales de este sistemas de fallas, de sur a norte son: Buesaco, Cauca-Almaguer, Silvia Pijao, Guabas-Pradera, Quebrada Nueva, Manizales-Aranzazu y Espíritu Santo (Taboada et al., 1998). Al oeste de Colombia las fallas estan dispuestas en direccion NNE, como las fallas de Cauca-Patia con una componente en rumbo lateral derecho (Paris & Romero, 1994). Los segmentos que se destacan de este sistema son las fallas Garrapatas y la Argelia con componente inverso dextral (Taboada et al., 1998).

Ademas de los componentes estructurales mencionados, para la zona de estudio se tiene en cuenta el comportamiento estructural que influye hacia el sur de Colombia y se describe a continuacion.

2.2.1 Piedemonte Llanero y Valle del Magdalena

Hacia el este de Colombia se destacan fallas con azimut NE-SW y fallas con dirección cercana N-S, que dan origen a la geometría de la Cordillera Oriental colombiana; estas fallas que tenían componentes normales se reactivaron a fallas inversas y de rumbo durante el Cenozoico por el cambio de eventos extensivos a compresivos (Helmes et al., 1995). Hacia el Sur del Páramo Sumapaz se destacan estructuras en flor a lo largo de la falla Santa Marta-Bucaramanga y fallas inversas en direccion N-S. Hacia el sur la Cordillera Oriental limita con dos grandes sistemas de falla: el Sistema del Piedemonte Llanero y el Sistema del Valle del Magdalena. En el Piedemonte Llanero se encuentran evidencias de fallamiento por estructuras como: lomos de presión, escarpes de falla inversa, valles, cuencas de tracción, y corrientes alineadas y desplazadas (Paris & Romero, 1994). Tres zonas hacen parte del Piedemonte Llanero: en el sector sur se destacan las fallas de Mocoa y Florencia, las cuales se caracterizan por su componente inverso en direccion NNE, además con componente de rumbo lareral derecho y de alto angulo son de importancia las fallas de Altamira-Algeciras y Sibundoy. El sector centro se caracteriza por la disposicion de fallas en echelón y por fallas inversas de azimut NE, como fallas principales se encuentra los Sistema de fallas de Servita-Santa María, Guaicaramo y Yopal. Hacia el norte se da un cambio de azimut con respecto al sector sur a N-S y se destaca la falla Santa Marta Bucaramanga en el Macizo de Santander (Taboada et al, 1998). Del mismo modo, el Valle Alto del Magdalena tiene segmentos de las fallas Algeciras-Altamira y de Suaza con una componente de rumbo lateral derecha y como segmentos al suroccidente se encuentran las fallas de Afiladores y Sibundoy las cuales representan un fallamiento activo que sigue la cinemática principal.

2.2.2 Sistema de Fallas Algeciras

El Sistema de Fallas Algeciras (SFA) es un conjunto de fallas que tienen continuidad desde la frontera con el Ecuador hasta unirse con el sistema de Fallas de Guaicaramo; estos sistemas de fallas pueden estar relacionadas genéticamente con fases progresivas de la orogenia andina (Velandia et al., 2001). Particularmente, para la zona SW de Colombia el SFA ha tenido varias denominaciones como Suaza, Garzón, Pitalito y Altamira (Murcia, 1991, Velandia et al., 2005). Sin embargo, Velandia (2005) denomina como SFA a la integración de un conjunto de fallas locales mapeadas con tendencia NE-SW las cuales están distribuidas en seis sectores: Algeciras-Balsillas, Zuluaga-Garzón, Altamira-Pitalito, San Juan de Villalobos-Yunguillo, Sibundoy-La Cocha y Monopamba-Ecuador. Las características del relieve estructural catalogan a la falla como rumbo deslizando lateral derecha (Vergara, 1996; Paris & Romero, 1994; Velandia, 2005; Anderson et al., 2016; Cediel & Shaw, 2019) cuyas evidencias estructurales a lo largo de la falla son observadas en el desplazamiento moderado de abanicos Cuaternarios, lomos de presión, drenajes decapitados, ganchos de flexión, facetas triangulares, cuencas de tracción y alineamientos de rasgos morfotectónicos (Diederix, 2020; Gómez-Hurtado et al., 2022). Para la zona de estudio, en el sector Sibundoy- La Cocha, el SFA está relacionado con fallas que siguen la tendencia regional en dirección NE-SW y fallas transversales en dirección NW-SE; formando levantamiento y depresiones que pueden hacer parte de un sistema de “*wrench fault*” como el Valle de Sibundoy (Figura 2C) y la Laguna de La Cocha (Velandia et al., 2001; Velandia et al., 2005).

2.2.3 Fallas asociadas al Sistema de Fallas de Algeciras

2.2.3.1 *Falla Sibundoy*

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

2.2.3.2 *Falla Quinchoa*

Esta falla tiene una dirección de rumbo ENE-WSW la cual se encuentra cubierta en su trazo por el Valle de Sibundoy. Se caracteriza por ser una estructura en echelón; su mecanismo de formación está asociado con los rasgos neotectónicos de la falla San Francisco-Yunguillo con componente en rumbo dextral y dirección NE-SW; algunos de los ríos que atraviesan el Valle de Sibundoy como el

Putumayo y Quinchoa presentan trazos orientados que se sugiere están asociados con el control estructural de la falla (Nuñez, 2003).

2.2.3.3 Falla Colón

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

2.2.3.4 Falla San Francisco-Yunguillo

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

2.2.3.5 Falla de La Victoria

Esta falla tiene una dirección NE-SW con cinemática dextral, atribuida por estar asociada como una falla paralela al sistema de fallas de Río Suaza con dirección NE-SW y desplazamiento en rumbo dextral, atraviesa la Laguna de La Cocha y continua su trazo hacia el NE de la zona de estudio.

2.3 Geología regional

Las características litológicas, origen tectónico y cronológico de los Andes Colombianos se encuentran distribuidos principalmente en tres cordilleras (Bustamante, 2010, 2011, 2016). Las rocas más antiguas de Colombia son de edad Precámbrica y hacen parte del escudo Guyanés (Taboada et al., 1998). Estas rocas están ubicadas en la franja central de la Península de la Guajira; al lado occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, a lo largo del flanco oriental de la Cordillera Central y en el Macizo de Garzón de la Cordillera Oriental, las rocas extienden algo más hacia el norte y hacia el oeste de Colombia dada su relación con fallas en su mayoría de rumbo (Irving, 1971).

En este orden la Cordillera Oriental se compone de rocas ígneas y metamórficas Precámbrico-Paleozoicas (Cortes et al., 2006) suprayacidas por rocas sedimentarias marinas siliciclásticas del Paleozoico-Cenozoico (Restrepo et al., 2020) intruidas por diques y *sills* gabroícos (Bustamante, 2016). Este basamento se encuentra levemente plegado asociado con un evento que se atribuye a un pandeo de la corteza debido a esfuerzos compresivos. La Cordillera Central litológicamente esta compuesta de rocas metamórficas de alto grado: granulitas y gneises del Precámbrico, rocas del

Paleozoico temprano como filitas, rocas del Paleozoico y Mesozoico como esquistos, cuarcitas, migmatitas y rocas plutónicas (Suarez, 1990; Anderson et al., 2016). De manera discordante sobre las rocas metamórficas del Paleozoico Inferior se encuentran depositadas rocas sedimentarias marinas del Paleozoico Superior (Caballero et al., 2010). El basamento de la Cordillera Occidental se compone de rocas cristalinas alóctonas ultramáficas y máficas de afinidad oceánica que se acrecentaron durante el Mesozoico (Villagomez et al., 2011). Además Toro-Toro et al. (2020) asocia las rocas de este basamento a un metamorfismo de alto grado como las Granulitas Mistrató.

2.3.1 Basamento

Las rocas que conforman el basamento de la zona de estudio se encuentran distribuidas en las cordilleras Central y Oriental; de edad Precámbrica y formando parte de la Cordillera Central está el Complejo Migmatítico La Cocha- Río Téllez conformado por un conjunto de rocas metamórficas principalmente migmatitas, esquistos, gneises y anfibolitas que presentan alta densidad de diaclasamiento con pequeñas mineralizaciones a las cuales se asocian aureolas de alteración hidrotermal (Núñez, 2003; Zapata-García et al., 2017). Estas rocas se encuentran en contacto fallado con el Batolito de Sombrerillos y rocas sedimentarias del Cretácico a través de una falla inversa paralela a la falla San Francisco-Yunguillo; mientras que la relación de contacto con el Batolito de Mocoa no es clara (Restrepo et al., 2021; Nuñez, 2003).

El Batolito de Sombrerillos composicionalmente varía entre cuarzo-monzonita, granodiorita, granito, monzogranito y gabronorita (Restrepo et al., 2021). A partir de dataciones U-Pb en circones García (2018) reporta una edad de 189 ± 7 Ma en la región de Garzón, más al norte de la Cordillera Oriental y está en contacto fallado con la Formación Saldaña conformada por una sucesión de rocas volcánicas, tobas, lavas, aglomerados, areniscas tobaceas, areniscas líticas y lodolitas de edad Jurásica (Nuñez, 2003).

El Batolito de Mocoa corresponde a monzogranitos, con variaciones a granito, granodiorita, cuarzomonzonita, cuarzodiorita y monzodiorita (Nuñez, 2003) con una edad de cristalización entre $181,8 \pm 1,3$ y $170,7 \pm 2,1$ Ma (Zapata-Garcia et al., 2017). Para la zona de estudio esta unidad se encuentra en contacto fallado con rocas sedimentarias Cretácicas de las Formaciones Caballos y Villeta y en contacto intrusivo con el Complejo Migmatítico La Cocha Río Téllez y la Formación Saldaña (Nuñez, 2003; Arango et al., 2015).

Hacia el sector NW de la zona de estudio afloran rocas del Cenozoico (Nuñez, 2003), compuestas por: lavas, depósitos de flujos piroclásticos y tobas volcánicoclásticos (Restrepo et al., 2021). Las lavas son de composición fundamentalmente andesítica, de color gris con diferentes tonalidades, textura afanítica y porfirítica (Nuñez, 2003). A estas rocas Murcia & Pichler (1986), les asignan un rango de edad entre finales del Mioceno e inicios del Plioceno y finales del Plioceno e inicio del Pleistoceno.

El Cuaternario está representado por diversos depósitos volcánicos, glaciares, coluviales y aluviales, dentro de los aluviales se encuentran terrazas y depósitos lacustres y en los volcánicos, depósitos de caída piroclástica, lahares y lavas (Núñez, 2003).

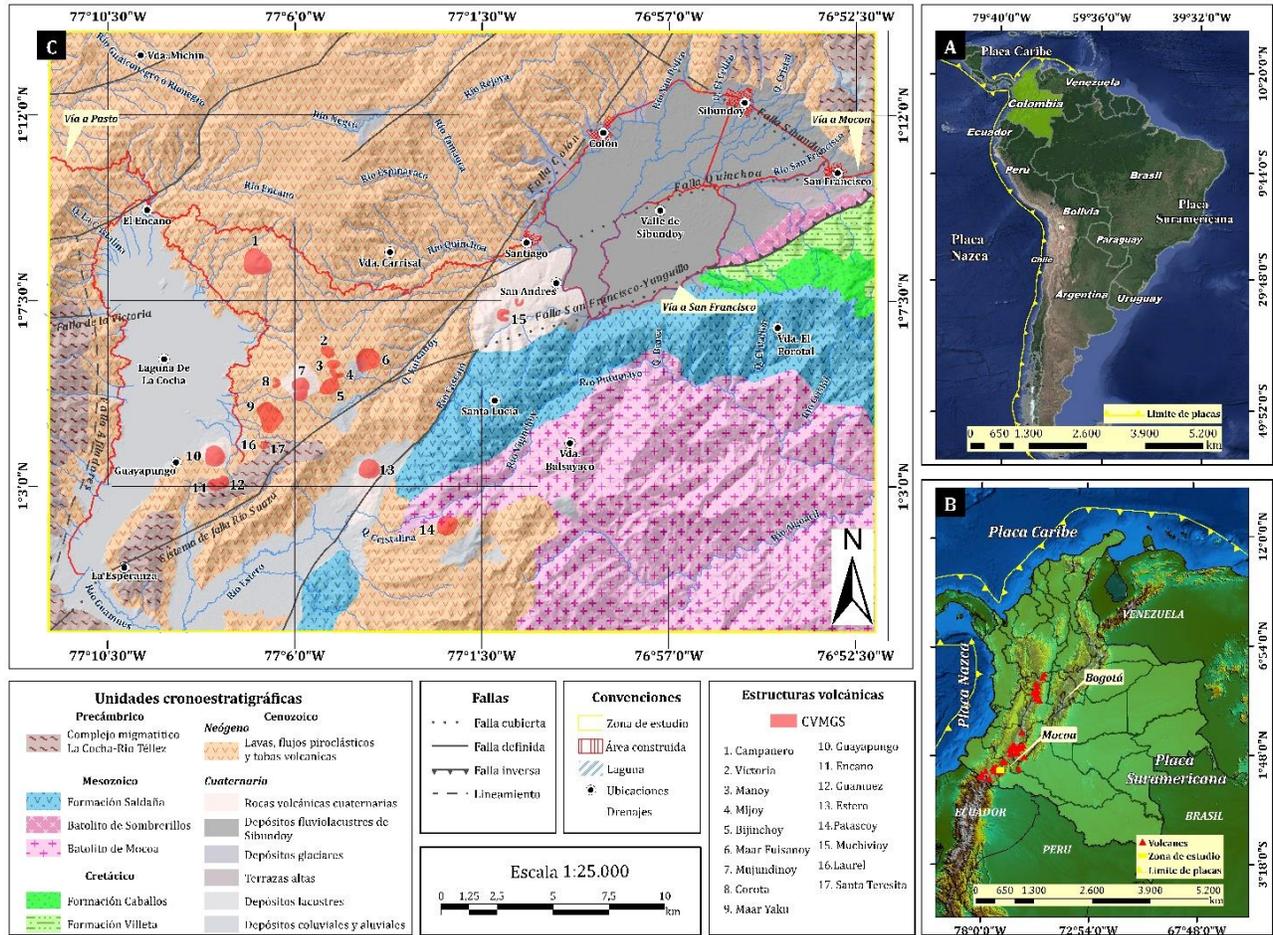


Figura 2. Mapa geológico de la zona objeto de estudio. **A)** Colombia en Suramérica. **B)** Distribución de estructuras volcánicas en Colombia y ubicación del área de estudio delimitada por polígono amarillo. **C)** Mapa geológico con unidades cronoestratigrafías (Modificado y adaptado de Núñez, 2003; Restrepo et al., 2021) se ubican las estructuras volcánicas del Campo Volcánico Monogenético Guamuéz-Sibundoy delimitados por polígonos rojos y las principales fallas de la zona reportadas por el Servicio Geológico Colombiano (2020) y Restrepo et al. (2021). Elaborado en ArcGIS a partir del DEM 12,5 m a escala 1:25.000.

2.4 Campo Volcánico Monogenético Guamuéz-Sibundoy (CVMGS)

El Campo Volcánico Monogenético Guamuéz-Sibundoy (CVMGS) corresponde a volcanes emplazados en el macizo colombiano (cordilleras Central y Oriental) al sur occidente del país, en los departamentos de Nariño y Putumayo (Núñez, 2003) (Figura 2B). Su formación se da como respuesta al magmatismo generado por los procesos de subducción oblicua de la placa Nazca bajo la placa suramericana (Montes et al., 2019; Restrepo et al., 2021). Este evento magmático Paleoceno – Eoceno fue emplazado en un régimen tectónico transtensional, con el esfuerzo compresivo horizontal máximo (σ_1) en dirección NE-SW (Grajales et al., 2020) y se considera como vulcanismo de retro-arco (Diederix et al., 2020).

2.4.1 Morfología

En estudios anteriores los volcanes identificados y descritos por Robayo & Castro (2001) y Robertson et al. (2002) incluían dentro del conjunto Volcánico Sibundoy-Guamuéz a los volcanes: Sibundoy, El Campanero, Mujundinoy, Bijinchoy, Guayapungo, Cerro Estero, Patascoy y Cerro Alcalde. A partir de esto (Flórez, 2003), describe estructuras volcánicas como: cráteres, domos, domos coladas en buen estado de conservación y otros degradados por erosión glaciaria, como el cerro Alcalde y El Cerro Patascoy. Rivera-Lara (2021) menciona la existencia de 17 estructuras volcánicas pertenecientes al CVMGS, con morfologías: cónicas, piramidal, pequeño escudo, flujos de lava y cráteres abierto y cerrado (Tabla 1).

2.4.2 Control estructural

Estudios realizados asocian el control estructural del CVMGS con la influencia dada por el SFA que se evidencia en: un lineamiento prácticamente NE-SW al occidente de la Laguna de La Cocha de los volcanes Victoria, Manoy, Mujundinoy, Maar Fuisanoy, Santa Teresita, Laurel, Encano y Guamuéz, un lineamiento transversal en la zona centro oriental de la Laguna de La Cocha alineando los volcanes Victoria, Manoy, Mijoy y Bijinchoy; en este mismo sentido, el alineamiento sobre un trazo de falla paralelos al río Estero de los volcanes Estero y Muchivioy (Rivera-Lara, 2021). La relación del SFA con la formación de cuencas *pull apart* y el vulcanismo monogenético dentro del área de estudio se da debido a regímenes de esfuerzos transtensionales que pueden atribuirse a procesos del manto (Diederix et al., 2020). A su vez, el SFA estaría facilitando el ascenso del magma (Rivera-Lara, 2021).

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

Núm.	Temporalidad	Volcán	Coordenadas	Altitud	Morfología	Características
1	1	Campanero.	1°8'13" N; 77°6'42" W	3020	Volcán tipo disectado.	Se considera como una geoforma reciente debido a que los drenajes no presentan un patrón definido, los flancos del volcán tienen contornos lisos regulares sin deformaciones.
2	11	Victoria.	1°6'05" N; 77°4'59" W	3072	Volcán tipo herradura.	Estructura cónica más pequeña y menos voluminosa dentro del CVMGS.
3	9	Manoy.	1°5'47" N; 77°4'52" W	3114	Volcán tipo amorfo.	Se encuentra rodeado por los flujos lávicos del volcán Mijoy
4	8	Mijoy.	1°5'36" N; 77°4'46" W	3128	Volcán tipo herradura.	Tiene parte de su estructura destruida por los flujos de lava emitidos.
5	12	Bijinchoy.	1°5'15" N; 77°4'59" W	3057	''Cráter y domo-colada'' Flórez, 2003). Cráter y domo colada.	El volcán tiene una fractura que atraviesa toda la cima de la estructura: puede estar relacionada como el centro de emisión de los flujos de lava.
6	13	Maar Fuisanoy.	1°5'56" N; 77°4'05" W	3048	Volcán tipo maar.	Cráter con morfología suave y pendientes ligeras, formadas por un posible anillo piroclástico.
7	6	Mujundinoy Norte. Mujundinoy Sur.	1°5'21" N, 77°5'38" W; 1°5'04" N, 77°5'39" W	3180	Cráter y domo colada. Flórez, 2003) Volcán compuesto. Robertson et al., (2002)	Dos estructuras individuales entre sí que comparten la base
8	7	Corota.	1°5'20" N; 77°6'16" W	3072	Volcán tipo herradura	Contornos con forma de media luna.
9	14	Maar Yaku.	1°4'31" N; 77°6'20" W	3048	Volcán tipo maar.	Se define como un volcán tipo maar por socavar el basamento circundante y ubicarse en el cráter del volcán Yaku.
10	3	Guayapungo.	1°3'33" N; 77°7'41" W	2839	Volcán tipo ideal	Es la segunda estructura con mayor volumen dentro del campo volcánico, presenta irregularidades en los contornos de su flanco oriental lo que puede deberse a un mayor desarrollo de drenajes superficiales.
11-12	2	Encano- Guamuéz.	1°2'56" N, 77°7'31" W; 1°2'52" N, 77°7'41" W	2968	Volcanes tipo anidados.	Por su tiempo de exposición tiene un buen desarrollo de drenajes sobre sus flancos.
13	5	Estero	1°3'14" N; 77° 3' 59" W	2840	Volcán tipo ideal	Los contornos del volcán Estero son irregulares presentan salientes y entradas alrededor de la estructura; interpretadas como evidencia de erosión fluvial por la formación de drenajes superficiales sin un patrón definido.
14	4	Patascoy.	1°1'54" N; 77°2'17" W	3340	E-V, degradado.	El flanco occidental de la estructura está parcialmente destruido lo que da la apariencia de que el cráter está abierto en esa dirección. La morfología de este flanco puede estar asociada con la actividad volcánica.
15	10	Muchivioy (volcán Sibundoy) M Muchivioy T	1°7'16" N, 77°0'25" W; 1°6'59" N, 77°0'46" W	2306 2385	Volcanes tipo herradura Estratovolcán. Robertson et al., (2002)	Estructuras volcánicas relacionadas y de las cuales se tiene evidencia de su temporalidad de acuerdo con los flujos lávicos, siendo así el más reciente el taita Muchivioy, la mayor parte de la estructura de mama muchivioy se encuentra cubierta por los flujos lávicos del taita Muchivioy.
16		Laurel Santa	1°3'48" N, 77°6'33" W; 1°3'49" N, 77°6'24" W	2923 2952	Volcán tipo herradura.	Tienen una morfología que no es clara, sin embargo, se establecen como dos estructuras de origen volcánico por presentar una similitud geomorfológica, aunque de menor tamaño que el volcán Corota.
17		Teresita.				

2.4.3 Composición

Algunos estudios anteriores (e.g. Nuñez, 2003; Rodriguez & González, 2004, Diederix et al., 2020), definen la composición del vulcanismo de Guamuéz-Sibundoy como basáltica de acuerdo a la petrografía; de acuerdo con análisis geoquímicos lo clasifican como basaltos ultramáficos y nefelínicos. Sin embargo, Robertson et al. (2002) describe a este conjunto de volcanes como andesíticos.

2.4.4 Temporalidad

Rivera-Lara (2021), a partir de un análisis morfométrico, en el que incluye el análisis de la forma de los contornos, análisis en la relación (Hco/Wco) y un análisis foto interpretativo define una secuencia morfo-cronológica de los volcanes del CVMGS de la siguiente manera:

1) De acuerdo al análisis de la forma de los contornos, clasifica a los volcanes desde el más reciente al más antiguo en el siguiente orden: volcán Campanero, volcán Guayapungo y volcán Estero. 2) A partir del análisis de los valores y variación del índice (Hco/Wco) realizados para el conjunto de volcanes interpretados como conos de escoria establece una secuencia cronológica desde el más antiguo al más reciente en la que incluye a los volcanes: Campanero, Guayapungo, Estero, Manoy, Taita Muchivioy y el volcán Victoria. 3) Hacia la zona centro oriental de la Laguna de La Cocha realiza un análisis fotointerpretativo en el que incluye a los volcanes Mujundinoy N-Mujundinoy S, estableciendo que el volcán Mujundinoy S, es más joven que el volcán Mujundinoy N y a través del análisis de flujos de lava propone el orden cronológico desde el más antiguo al más reciente para los volcanes: Mijoy, Manoy, Victoria, Bijinchoy y Maar Fuisanoy. 4) Entre las estructuras Maar Yaku y el volcán Corota sugiere que este último es el más reciente de los dos y al comparar al volcán Corota con el volcán Mijoy al oriente, el volcán Corota se interpreta como más reciente que el Mijoy debido a su estructura mejor conservada. 5) Por relación entre los productos de los volcanes Guayapungo, Encano y Guamuéz, el más reciente es el último en mención, mientras que entre los volcanes Patascoy y Estero, el volcán Patascoy es el más joven; Hacia el sector NE los productos lávicos del volcán Taita Muchivioy se encuentran rodeando parte de la estructura mamá Muchivioy, lo que permite establecer que el volcán taita Muchivioy es el más reciente entre los dos.

Finalmente, la morfo-cronología de los volcanes en general del más reciente al más antiguo es: Campanero, Encano, Guamuéz, Guayapungo, Patascoy, Estero, Mujundinoy N-Mujundinoy S, Corota, Mijoy, Manoy, Taita Muchivioy-Mamá Muchovioy, Victoria, Bijinchoy, Maar Fuisanoy y Maar Yaku .

3. Marco teórico

3.1 Vulcanismo Monogenético

Los volcanes monogenéticos corresponden a edificios volcánicos pequeños resultantes de un solo evento eruptivo (Acocella, 2021). La agrupación de estos volcanes se conoce como campos monogenéticos generalizados, consistentes en un conjunto de volcanes, cada uno de los cuales ha hecho una única erupción (Acocella, 2021). Sin embargo, se han propuesto campos volcánicos monogenéticos con pocos volcanes (e.g Murcia et al., 2019; Velandia et al., 2021; Vargas-Arcila et al., 2023). El desarrollo de los campos volcánicos monogenéticos está controlado principalmente por el entorno tectónico regional, aunque se encuentran en cualquier entorno tectónico, estando la mayoría relacionados con regímenes extensionales (Acocella, 2021); en el país se relacionan campos volcánicos en un ambiente compresivo de subducción (e.g. Botero-Gómez et al., 2018; Sánchez Torres et al., 2022). En ocasiones, el entorno tectónico regional controla la aparición y la distribución de los volcanes (Avellán et al., 2020).

3.2 Geomorfología

Las unidades geomorfológicas están controladas por las variaciones litológicas, estructurales, procesos exógenos que incluyen meteorización y erosión sin control tectónico, acumulación-erosión y colapso de materiales producto de eventos volcánicos (Gutiérrez & Gutiérrez, 2016). Los procesos geomorfológicos corresponden a los cambios que sufre el planeta Tierra, ya sean originados por procesos endógenos o superficiales y modelan el paisaje, los cuales pueden clasificarse en ambientes, unidades geomorfológicas y rasgos de acuerdo con el objetivo del trabajo (Carvajal, 2012). Los ambientes pueden ser: morfoestructural, volcánico, denudacional, fluvial y lagunar, marino y costero, glaciar y periglacial, eólico, kárstico y antropogénico de acuerdo con las geoformas predominantes de determinada área. Los rasgos fisiográficos presentados en los resultados de este trabajo se describen a continuación de acuerdo con el ambiente asociado.

3.2.1 Rasgos fisiográficos denudacionales

Asociados con procesos de meteorización, erosión y transporte de origen pluvial o gravitacional los cuales pueden variar de moderados a intensos de acuerdo con las condiciones del entorno; estos modelan el relieve y dejan remanentes de unidades preexistentes o crean nuevas a través de la acumulación de sedimentos (SGC, 2015). Las condiciones climáticas secas generan disección y pérdida de suelo y la erosión se manifiesta de forma laminar, surcos y cárcavas, contrario a esto

las condiciones húmedas favorecen la meteorización del suelo y movimientos en masa, flujos y el transporte de escombros asociados a procesos gravitatorios (Carvajal, 2012; Terrones, 2023).

3.2.1.1 *Loma desnuda (Dld)*

Prominencia topográfica con una altura menor de 200 m sobre su nivel de base local, con una morfología alomada y elongada, laderas cortas a moderadas y forma recta a convexas. Su origen está relacionado a procesos intensos de meteorización y erosión diferencial sobre diversas litologías.

3.2.1.2 *Ladera (Dl)*

Las propiedades fundamentales para la definición de una ladera son: (1) la geometría local, (2) las relaciones externas del relieve, (3) la escala y (4) los procesos relacionados (Goudie, 2004). Comúnmente, las laderas forman cadenas, secuencias de unidades de pendiente vinculadas que van desde la divisoria de drenaje hasta el fondo del valle (Huggett, 2022). Como caracterización básica, una ladera se puede definir como una unidad de relieve inclinada con un ángulo de pendiente mayor que un umbral inferior mínimo (que delimita las laderas de las llanuras) y menor que un umbral máximo superior (que delimita las laderas de las paredes verticales como acantilados o voladizos (Goudie, 2004). Según Carvajal (2012) estas se pueden clasificar de acuerdo a las pendientes como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Rangos de inclinación según Carvajal (2012)

Rango de inclinación	Descripción
< 5°	Plana o suavemente inclinada
6 - 10°	Inclinada
11 - 15°	Muy inclinada
16 - 20°	Abrupta
21 - 30°	Muy abrupta
31 - 45°	Escarpada
> 45°	Muy Escarpada

3.2.1.3 *Planicie (Dp)*

Superficie extensa con un aspecto aterrazado, morfología suave y ondulada inclinada y limitada hacia los cauces por escarpes que alcanzan varios metros de altura. Su origen se relaciona con un cauce que se desplaza lateralmente dentro de su llanura aluvial (SGC, 2015).

3.2.1.4 *Cuenca desnuda (Dcd)*

En un sentido estrictamente estructural, describe una estructura sinformal con un afloramiento circular o casi circular, es decir donde los buzamientos de las extremidades son radiales. En un sentido topográfico o estratigráfico describen una depresión que contiene sedimentos o es capaz de recibir sedimentos. Las cuencas en este sentido pueden ser marinas o continentales y pueden presentar una amplia variación en tamaño y forma, la mayoría son de origen tectónico (Kearey, 1993).

3.2.2 Rasgos fisiográficos de origen volcánico

Los procesos volcánicos involucran la acumulación principalmente de productos como piroclastos y lavas generados por la emisión de magma a la superficie (Gutiérrez & Gutiérrez, 2016). Estos procesos son endógenos y agentes geomórficos que crean nuevas formas de relieve durante diferentes episodios de erupción (Huggett et al., 2022), pueden acumular depósitos que cubren la superficie, erosionar formas de relieve preexistentes (Thouret, 1999; Bierman & Montgomery, 2013), reorganizar los cursos de drenaje (e.g., Zingaretti et al., 2023) y sobrecargar los ríos con material volcánico (Bierman & Montgomery, 2013). Las geoformas resultantes de la actividad volcánica dependen del estilo eruptivo, la viscosidad del magma, los productos eruptivos y el relieve preexistente (Rodríguez-González et al., 2015).

3.2.2.1 Edificio volcánico (Ve)

La erupción repetida de magma y la acumulación de depósitos volcánicos de uno o más respiraderos en el mismo lugar a lo largo del tiempo desarrolla un edificio volcánico (Acocella, 2021). Esto comúnmente tiene una forma cuasi-cónica y es de decenas a miles de metros de altura y varias decenas de metros a varias decenas de kilómetros de ancho. El edificio puede caracterizarse por una depresión en la cumbre, o cráter, de hasta unos pocos cientos de metros de ancho y profundidad.

3.2.2.2 Lavas (VI)

La erupción de lava, roca fundida, es la característica más destacada de los volcanes (Bierman & Montgomery, 2013). Los controles de primer orden sobre la eventual geomorfología de los flujos de lava son proporcionados por la tasa de erupción y la cantidad total de lava emitida, la viscosidad, la topografía sobre la cual fluye la lava y el ambiente externo (es decir, atmósfera, agua o hielo) (Goudie, 2004).

3.2.3 Rasgos fisiográficos de origen fluvial

El relieve modelado por procesos fluviales está controlado principalmente por la corriente de canales que tienen tres procesos: transporte, erosión y depositación, transportan sedimentos desde las zonas más altas erosionadas hasta depositarse en tierras bajas (Biernan & Montgomery, 2013; Charlton, 2007; Gutiérrez & Gutiérrez, 2016). Estos procesos controlan la morfología y la dinámica de los canales (Sharma, 2010), los cuales tienen gran variedad de dimensiones, desde pequeños riachuelos hasta grandes extensiones morfohidrológicas donde la geomorfología fluvial está asociada a la evolución del drenaje, procesos tectónicos y/o volcánicos (e.g, Woodward et al., 2007; Latrubesse, 2015).

3.2.3.1 Plano o llanura de inundación (Fpi)

La planicie de inundación se considera generalmente como el área de tierra relativamente plana que se extiende desde las orillas de la corriente principal hasta la base de las paredes del valle y sobre la cual fluye el agua de la corriente principal en momentos de alta descarga (Goudie, 2004). Las llanuras aluviales se construyen por acreción lateral y vertical de sedimentos que resultan de (1) la deposición de carga suspendida que se asienta por el flujo de desbordamiento, (2) la deposición de la carga de fondo de la migración lateral del canal, y (3) la fusión de superficies locales formadas por aluvión atrapado por obstrucciones como deslizamientos de tierra, crecimiento de plantas que obstruyen los canales y atascos (Bierman & Montgomery, 2013).

3.2.3.2 Laguna (Flg)

Depósito natural de agua de dimensiones inferiores, en relación con los lagos tanto en área como en profundidad. Esta varía dependiendo del ambiente y las condiciones donde este localizada, y de la acumulación de sedimentos; su relación está dada con depresiones que se inundan en épocas de alta pluviosidad y son poco drenadas (SGC, 2015).

3.2.4 Rasgos fisiográficos de origen glaciar

Incluyen a geoformas originadas por procesos de erosión ocasionada por el movimiento de las masas de hielo en zonas de alta montaña durante épocas glaciales o en la actualidad; estos eventos modelaron el sustrato rocoso preexistente, generando grandes cantidades de sedimento que fueron transportados o acumulados en las laderas adyacentes (SGC, 2015), poseen una morfología en forma de lengua o lóbulo y un escarpe frontal y lateral como resultados del desplazamiento lento ladera o valle abajo, presentando cordones y surcos en su superficie (Brenning et al., 2010).

3.2.5 Rasgos fisiográficos tectónicos-estructurales

El entorno tectónico es el control principal sobre el patrón global de fisiografía regional y carácter del paisaje (Bierman & Montgomery, 2013). Debido a que la deformación de la corteza está asociada con la tectónica de placas, ésta es responsable de los principales elementos morfoestructurales a gran escala de la Tierra (Gutiérrez & Gutiérrez, 2016). De aquí que el entorno tectónico y la geología estructural influyen en la forma del relieve a través de la acción directa de fallas e isostasia y a través de las influencias indirectas de la variabilidad espacial en la resistencia a la erosión generada por plegamiento, fallas y compensación de rocas de diferente litología (Bierman & Montgomery, 2013). Según Gutiérrez & Gutiérrez, (2016) las formas terrestres Cuaternarias son los principales marcadores utilizados para probar y evaluar la actividad reciente de las estructuras tectónicas. Una falla es una superficie o zona a lo largo de la cual un lado se ha movido en relación con el otro en una dirección paralela a la superficie o zona (Goudie, 2004).

El fracturamiento que acompaña a una falla, facilita la erosión, de manera que riachuelos, ríos y quebradas tienden a seguir la falla (Niemeyer, 1999). Sin embargo, debe tenerse presente que la expresión morfológica más o menos destacada de una falla no permite concluir nada sobre la importancia de su rechazo. La morfología de una falla se expresa con ventajas en fotos aéreas e imágenes satelitales y constituye uno de los criterios para identificar la presencia de una falla (Niemeyer, 1999).

3.2.5.1 Escarpes estructurales (See)

Un escarpe estructural es una forma de relieve tectónica que coincide con un plano de falla que ha desplazado la superficie del suelo (Goudie, 2004). Los escarpes de falla comúnmente tienen un perfil longitudinal en forma de arco, con el mayor desplazamiento y altura en la zona central, disminuyendo progresivamente hacia las puntas de falla (Gutiérrez & Gutiérrez, 2016).

3.2.5.2 Facetas triangulares o facetas de falla

Superficie inclinada triangular y erosiva, que representa la cara de un espolón o cresta truncada por acción de una falla. Las facetas triangulares que marcan un frente montañoso son el producto del levantamiento de un cerro por movimiento de una falla y los procesos de degradación, declinación de la pendiente, erosión y disección sobre el escarpe que ha resultado del movimiento de la falla (Argentino & Andino, 2009). Las facetas de falla son accidentes geográficos transgresivos en el tiempo, más antiguos en el vértice que en la base; algunas facetas pueden mostrar características geomórficas indicativas de diferentes etapas de actividad de fallas y erosión (Gutiérrez & Gutiérrez, 2016).

3.2.5.3 Gancho de flexión (Sgf)

Es un caso especial de lomo de obturación, probablemente el resultado del desplazamiento lateral de un espolón o cresta por fallamiento transcurrente simultáneo a la incisión del canal de drenaje, que progresa con igual velocidad que el desplazamiento de la falla. De esta manera el drenaje va modificando el lomo de obturación sin desconectarlo del espolón y sin bloqueo del valle, que seguirá un curso desviado (Argentino & Andino, 2009).

3.2.5.4 Espolón (Ses)

Su origen obedece al truncamiento por procesos de fallamiento inverso o de rumbo dejando facetas triangulares y a procesos de erosión diferencial en litologías de distinta resistencia.

3.2.5.5 Wrench fault

El término hace referencia a rupturas en la corteza en las que el movimiento relativo dominante de un bloque al otro es horizontal y los planos de falla verticales, esto implica que el término es sinónimo de falla de rumbo y falla transcurrente (Moddy et al., 1956). Teniendo en cuenta la orientación y el sentido del desplazamiento, Fossen (2010) menciona cinco categorías que describen las fracturas resultantes del proceso tectónico: fracturas de riedel, fracturas de corte P, fracturas de corte R, fracturas de extensión T, estructuras compresivas como pliegues y fallas inversas (Sarhan, 2017).

3.2.5.6 Cuencas pull apart

Son depresiones estructurales que se forman a lo largo de fallas de rumbo donde la segmentación de las fallas genera procesos de extensión/transensión (Harff et al., 2016). Su evolución estructural y morfología se determina a través de causas como la tasa de extensión, la relación largo/ancho de la cuenca además de cambios en la dirección de la extensión (Farangitakis et al., 2021).

3.2.5.7 Estructura en echelón

Son estructuras asociadas a una tectónica de rumbo que se relacionan con un estilo estructural transcurrente. El término “en echelón” se refiere al arreglo de las estructuras a lo largo de una zona lineal al punto de que los pliegues, fallas u otras estructuras del mismo tipo se encuentran paralelas entre ellas y se encuentran oblicuas con el mismo ángulo al rumbo de la falla principal; los segmentos de falla tipo “riedel” se distribuyen en echelón y posteriormente con el incremento de la deformación se producen fallas inversas, pliegues e hidrofracturas (Torres, 2018).

3.3 Morfotectónica

En los estudios morfotectónicos, la orientación de varios elementos como diaclasas, lineamientos, ríos, líneas de cresta son de vital importancia. Si las orientaciones de tales características se correlacionan, se puede suponer que tienen un origen común (Scheidegger, 2003). Así, las diaclasas son las estructuras tectónicas más comunes en la superficie terrestre, presentándose en una gran variedad de rocas y ambientes tectónicos (Niemeyer, 1999). Ellas afectan profundamente la fisiografía de la superficie terrestre, por ejemplo, a través del control sobre el trazado y el diseño de las redes de drenaje. También son de particular importancia las fallas, las cuales son fracturas planares a lo largo de la cual la roca se ha desplazado según una dirección que es generalmente paralela al plano de ruptura, como consecuencia de la aplicación de un esfuerzo de cizalla (Niemeyer, 1999). De este modo, el análisis morfotectónico juega un papel importante a la hora de descifrar los efectos de la actividad tectónica en la evolución geomorfológica (Dar et al., 2013), además de ser ampliamente utilizada en el reconocimiento de la existencia de fallas a partir de diferentes paramentos morfotectónicos (e.g. Acosta et al., 2007; Restrepo-Moreno et al., 2019; Solano Acosta et al., 2007)

3.3.1 Lineamientos estructurales

La palabra lineamiento fue introducida por Hobbs (1904) para caracterizar las relaciones espaciales de las características del paisaje que incluyeron: crestas o límites de áreas elevadas, las líneas de drenaje, líneas de costa y líneas de límite de formaciones, de tipos de rocas petrográficas, o de líneas de afloramientos, barrancos o valles y líneas visibles de fractura o zonas de brecha de falla. Según Hobbs, cualquier número de estas características puede unirse de extremo a extremo para constituir un lineamiento. Autores como Papadaki et al., (2011) y Ahmadi & Pekkan (2021), asocian los lineamientos a la actividad tectónica de la superficie terrestre con fallas, fracturas, diaclasas o límites litológicos, por lo tanto, el análisis de lineamientos geológicos podría contribuir a la caracterización e identificación de fallas activas, unidades tectónicas y regiones sísmicamente activas (Soliman & Han, 2019). El análisis de lineamientos a través de imágenes satelitales es una herramienta útil para detectar regiones volcánicas, zonas de alteración y mineralización (Cengiz et al., 2006). Estos a su vez representan zonas de debilidad que pueden proporcionar canales de alta permeabilidad para el ascenso de magmas y fluidos cuando estas estructuras están bajo tensión o transtensión (Jeremy, 2000).

3.3.2 Sistemas de diaclasas

Se definen como fracturas a lo largo de las cuales no existe desplazamiento; son planos de discontinuidad en la roca sin desplazamiento (Niemeyer, 1999, Twiss et al., 2007, Pastor-Galán et al., 2011). Estas fracturas desarrollan orientaciones que están controladas por régimen de tensiones del entorno tectónico (Peacock et al., 2005). Cuando una diaclasa tiene características superficiales planas, orientaciones paralelas, además interceptan en ángulo recto al plano de estratificación, se denominan sistemáticas; en cambio, si las diaclasas poseen geometrías irregulares y no cortan a las diaclasas sistemáticas, terminando generalmente contra los planos de estratificación se denominan diaclasas no sistemáticas. (Niemeyer, 1999, Twiss et al., 2007). Por lo tanto, se denomina sistema de diaclasas a dos o más conjuntos de diaclasas que afectan el mismo volumen de roca (Twiss et al., 2007). El análisis de un sistema de diaclasas en cuanto a su orientación y geometría permite inferir los esfuerzos responsables de su formación y además ayudan a comprender la cinemática de regiones donde no es posible encontrar otros criterios estructurales. (Marín Lechado, 2005).

4. Metodología

Para el desarrollo de este trabajo se realizó un análisis fotointerpretativo de mapas a escala 1:25.000 obtenidos a partir del procesamiento digital en el *software* de información geográfica ArcGIS, con base a un modelo de elevación digital (DEM) con resolución 12,5 m obtenido del satélite Alos Palsar. Los diferentes ítems que se proponen se describen a continuación.

4.1 Análisis morfométrico

Se generó un mapa de sombras mediante la herramienta *hillshade* con el fin de observar cambios en el relieve del terreno y tomarlo como base para digitalizar otros insumos cartográficos como un mapa de aspectos. Para su análisis se tomó en cuenta la clasificación de orientación de las laderas propuesta por Bonachea 2006, Sevilla- Caicedo 2018 a partir de la cual se definen nueve rangos: PLANO (dada por el valor de -1), N, NE, E, SE, S, SW, W, NW. Se realizó también un mapa de pendientes mediante la herramienta *Slope*, siguiendo la propuesta de la estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia según Carvajal (2012). El mapa de drenajes fue generado mediante el uso de los programas SAGA (Sistema para Análisis Geocientíficos Automatizados) QGIS y ArcGIS, a pesar de que el programa SAGA genera drenajes que en su mayoría coinciden con el relieve del terreno, en algunos casos no todos los drenajes son verdaderos y en las zonas planas no se generan, por lo tanto, fue necesario corregir manualmente su trazo apoyados en imágenes satelitales de SAS Planet con resolución de 20 m. Estos insumos permitieron resaltar sobre el modelo de elevación digital algunas unidades estructurales como lo son los lineamientos, usando como base el mapa de sombras, el mapa de aspectos y anomalías en los drenajes que se convirtieron en insumos importantes para proponer la cinemática de las fallas que se sugiere podrían estar relacionadas con el ascenso de magma y la posible formación de los volcanes que hacen parte del CVMGS.

4.2 Análisis geomorfológico

La interpretación geomorfológica de la zona se basó en la delimitación de las macrogeoformas trazadas manualmente, codificadas y descritas de acuerdo al catálogo de objetos de geomorfología de Carvajal (2012) en el cual se incluye una primera clasificación según el ambiente morfogenético agrupados en: ambiente morfoestructural (S), ambiente volcánico (V), ambiente denudacional (D), ambiente fluvial y lagunar (F), ambiente marino y costero (M), ambiente glaciar y periglaciar (G), ambiente eólico (E), y ambiente kárstico (K). Carvajal (2012) define a la unidad como geoforma individual homogénea generada a través de procesos como la erosión y depositación. La subdivisión de estas unidades es clasificada como subunidad geomorfológica y relaciona los materiales y su disposición estructural con la topografía del

terreno, su definición se basa en su posición dentro de una unidad o el proceso geomorfológico dominante.

4.3 Cartografía de lineamientos

Para la delimitación de lineamientos estructurales fueron considerados los rasgos lineales, rectilíneos o curvilíneos que resaltan en el DEM y pueden asociarse con zonas de debilidad estructural, alineación de escarpes, valles, segmentos de los ríos o constituir fracturas muy bien definidas a las cuales se les puede asociar con el trazo de una falla. Esta aproximación se hizo generando diferentes *hillshades* con intervalos de azimut establecidos cada 30° y tomando como altitud del sol 45°, esto con el fin de destacar las trazas en las diferentes posiciones de la luz; la digitalización se hizo de forma manual, permitiéndose realizar un análisis detallado teniendo en cuenta el comportamiento de los drenajes, los rasgos lineales que se observan en el relieve sombreado y la inclinación de la pendiente a través del mapa de aspectos, procurando evitar errores de SIG. Los datos de azimut obtenidos de cada lineamiento fueron procesados en el programa ESTERONET para crear diagramas de rosas divididos en cuatro cuadrantes del área de interés y así detallar las orientaciones preferenciales de los mismos.

4.4 Trabajo de campo

El trabajo de campo se realizó teniendo en cuenta algunos factores como: áreas boscosas, escarpadas y sectores de resguardos indígenas que limitan la obtención de datos, por lo tanto; se establecieron rutas estratégicas para adquirir información guiadas por algunos habitantes de la población. Se hizo un recorrido a lo largo de los principales ríos de la zona de estudio en búsqueda de evidencias estructurales que relacionen fracturas, lineamientos, fallas y discontinuidades en general. Además, se realizaron mediciones de datos estructurales y un análisis macroscópico de las muestras recolectadas en diferentes afloramientos. La finalidad de estos datos e interpretaciones fue complementar información geomorfológica y a través de las evidencias estructurales encontradas en campo proponer un modelo estructural del Campo Volcánico Monogénico Guamuéz-Sibundoy y plantear escenarios para el emplazamiento del vulcanismo asociados al tectonismo regional.

Resultados

5.1 Análisis morfométrico

La zona de estudio se analizó desde el punto de vista morfométrico, iniciando con un análisis de sombras con el objetivo de comprender las formas del terreno y facilitar la visión de la información topográfica (Figura 3). Asimismo, se generó un mapa de pendientes (Figura 4), en el cual se resaltaron a través de rangos de inclinación los valores de pendientes en la zona de estudio: valores bajos corresponden a zonas planas y valores elevados corresponden a las zonas más escarpadas. En la zona se identificaron las tendencias del relieve como un primer nivel de aproximación, indicando topografía plana o suavemente inclinada con un área de 21113,9 Ha concentrada en el Valle de Sibundoy, la zona NW del mismo y los depósitos lacustres de la laguna de La Cocha, que corresponden al 21,3% del área total (Tabla 3); con igual distribución se encuentran pendientes inclinadas con un área de 13496,7 Ha equivalentes a un 13,6% del área total. Las pendientes muy inclinadas con un área de 13151,4 Ha y pendientes abruptas con un área de 12149,3 Ha abarcan en la zona el sector NW y SW del Valle de Sibundoy con porcentajes de área total de 13,2 y 12,2 %, respectivamente. Las pendientes muy abruptas, están distribuidas en la mayor parte de la zona de estudio con un área de 21721,7 Ha y se concentran principalmente hacia el NW y SE de la laguna de La Cocha y alrededor del Valle de Sibundoy. El rango de inclinación para pendientes escarpadas con un área de 16172,5 Ha; 16,3% del área total y muy escarpadas con un área de 1315,7 Ha; 1,3% del área total, tienen mayor densidad hacia los sectores S y NW del Valle de Sibundoy y el N de La laguna de La Cocha.

Tabla 3. Valores de área en Ha y su equivalente en porcentaje de los rangos de inclinación para la zona de estudio.

Rango de inclinación	Descripción	Área total en Ha	Porcentaje
< 5°	Plana o suavemente inclinada	21113,9406	21,30106588
6 - 10°	Inclinada	13496,7383	13,61635505
11 - 15°	Muy inclinada	13151,4406	13,2679971
16 - 20°	Abrupta	12149,3418	12,25701706
21 - 30°	Muy abrupta	21721,7901	21,91430254
31 - 45°	Escarpada	16172,5501	16,31588161
> 45°	Muy Escarpada	1315,72	1,327380755
	TOTAL	99121,5215	100

Con la intención de resaltar la orientación de las laderas, se generó un mapa de aspectos (Figura 3). En este se obtuvo la posición de las laderas con respecto a los puntos cardinales y a su vez se delimitaron geoformas, lineamientos y procesos erosivos.

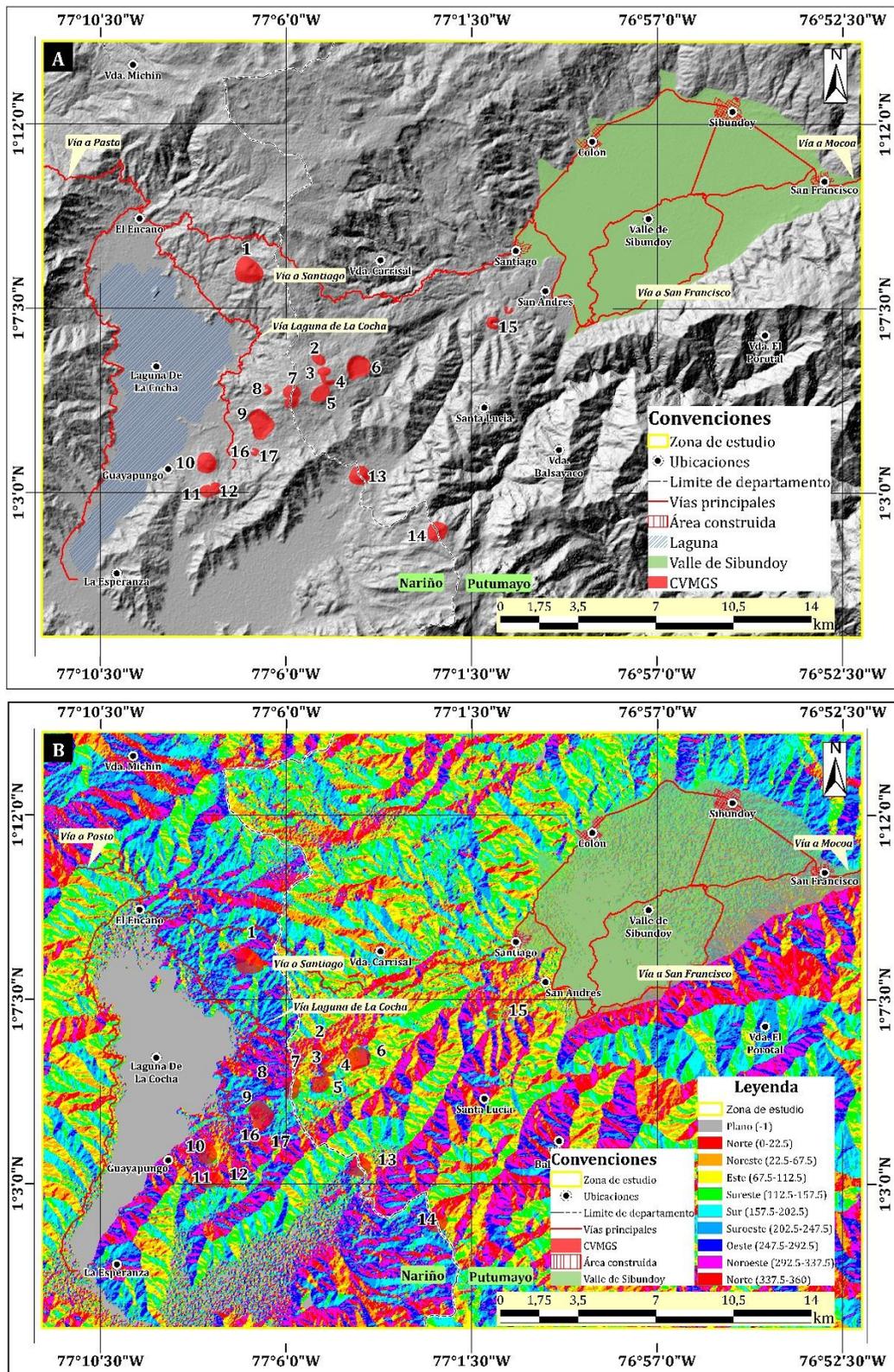


Figura 3. Insumos para análisis de resultados de la zona objeto de estudio, elaborados a partir del DEM 12,5 m a escala 1:25.000 **A)** Mapa de sombra con la ubicación de las estructuras volcánicas del CVMGS delimitados por polígonos rojos. **B)** Mapa de aspectos con la ubicación de las estructuras volcánicas del CVMGS delimitados por polígonos rojos.

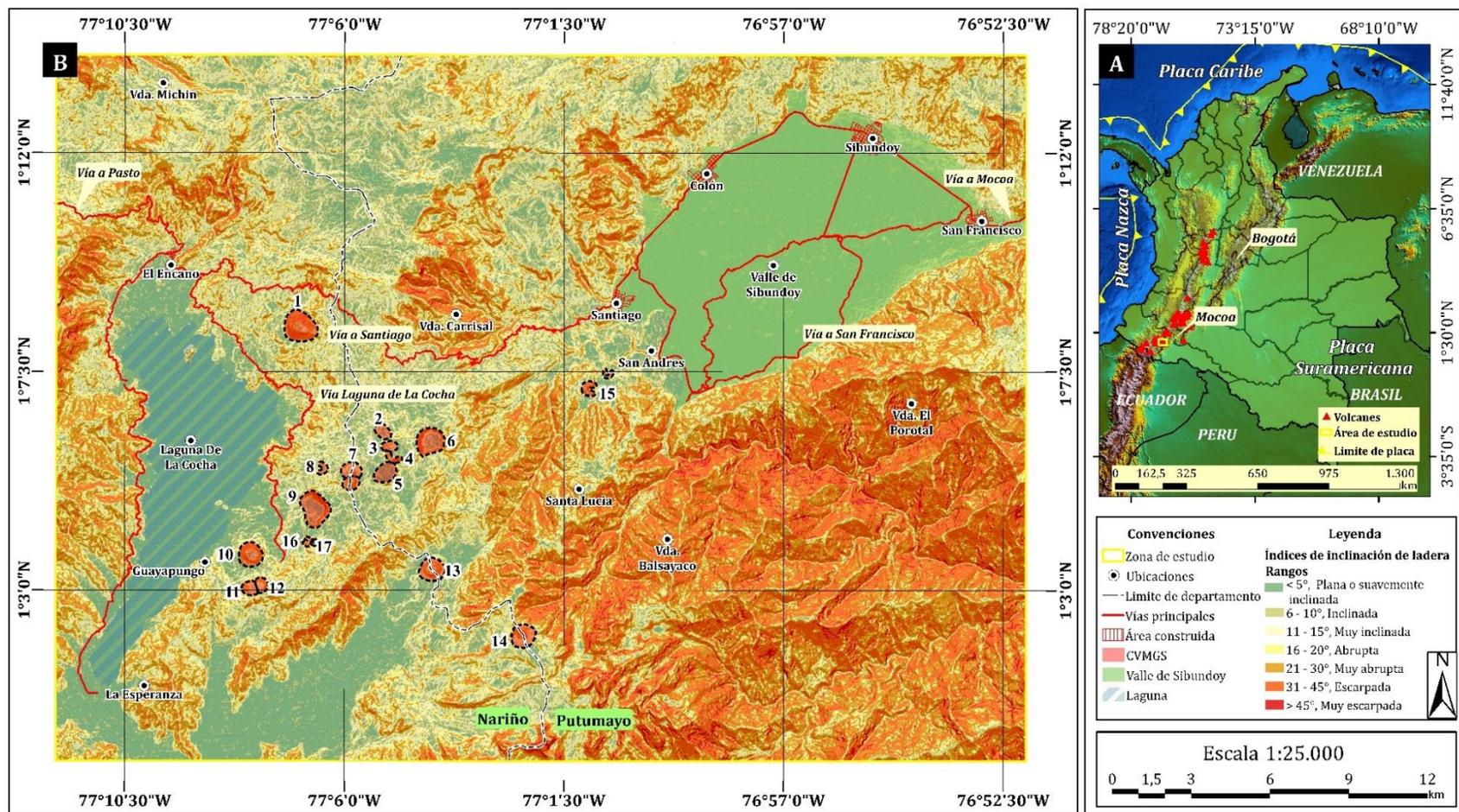


Figura 4. Mapa de pendientes para la zona objeto estudio. **A)** Distribución de estructuras volcánicas en Colombia y ubicación del área de estudio delimitada por polígono amarillo. **B)** Mapa de pendientes de acuerdo a los índices de inclinación de ladera propuestos por Carvajal (2012). Elaborado en ArcGIS a partir del DEM 12,5 m a escala 1:25.000.

5.1.1 Análisis de drenajes

Para la zona de estudio se realizó la clasificación de los patrones de drenaje. Estos consisten principalmente en drenajes de tipo dendrítico, sub-dendrítico, sub-paralelo, radial y asimétrico como se muestran en Figura 5 y a los cuales se les realiza un zoom para cada patrón de drenaje como se muestra en la figura 6 y 7.

El sector NE de la zona de estudio (Figura 6) se caracteriza por el desarrollo de patrones sub-paralelos cuyos segmentos se unen a lo largo de los ríos principales que atraviesan el Valle de Sibundoy: al E se encuentran los ríos Putumayo y San Francisco cuyos segmentos de drenaje largos están en dirección NW-SE; al N están representados por las quebradas La Hidra y Cristal cuyos segmentos están en dirección NNE-SSW y al W por el río San Pedro, al cual se unen segmentos que se muestran paralelos en dirección NW-SE. Estos patrones se desarrollan en rocas metamórficas del Complejo Migmatítico la Cocha Río-Téllez, rocas volcánicas del Neógeno y las formaciones Villeta, Caballos, Batolito de Sombrerillos y Saldaña. Los segmentos que drenan al Valle de Sibundoy están desarrollados en depósitos fluviolacustres y pasan de sub-paralelos a sub-dendríticos en flujos de lavas, y depósitos volcanoclásticos que cubren la mayor parte del área. Al NW de la zona de estudio se desarrollan principalmente patrones dendríticos, sub-dendríticos, y radiales. En particular, los patrones radiales corresponden con los volcanes Mujundinoy y Guayapungo. De la misma manera, se observan redes de drenaje con patrones asimétricos. Estos se desarrollan sobre depósitos volcánicos y en algunos sectores del Complejo Migmatítico la Cocha Río-Téllez al SW de la zona y al SE abarcando parte de la Formación Saldaña.

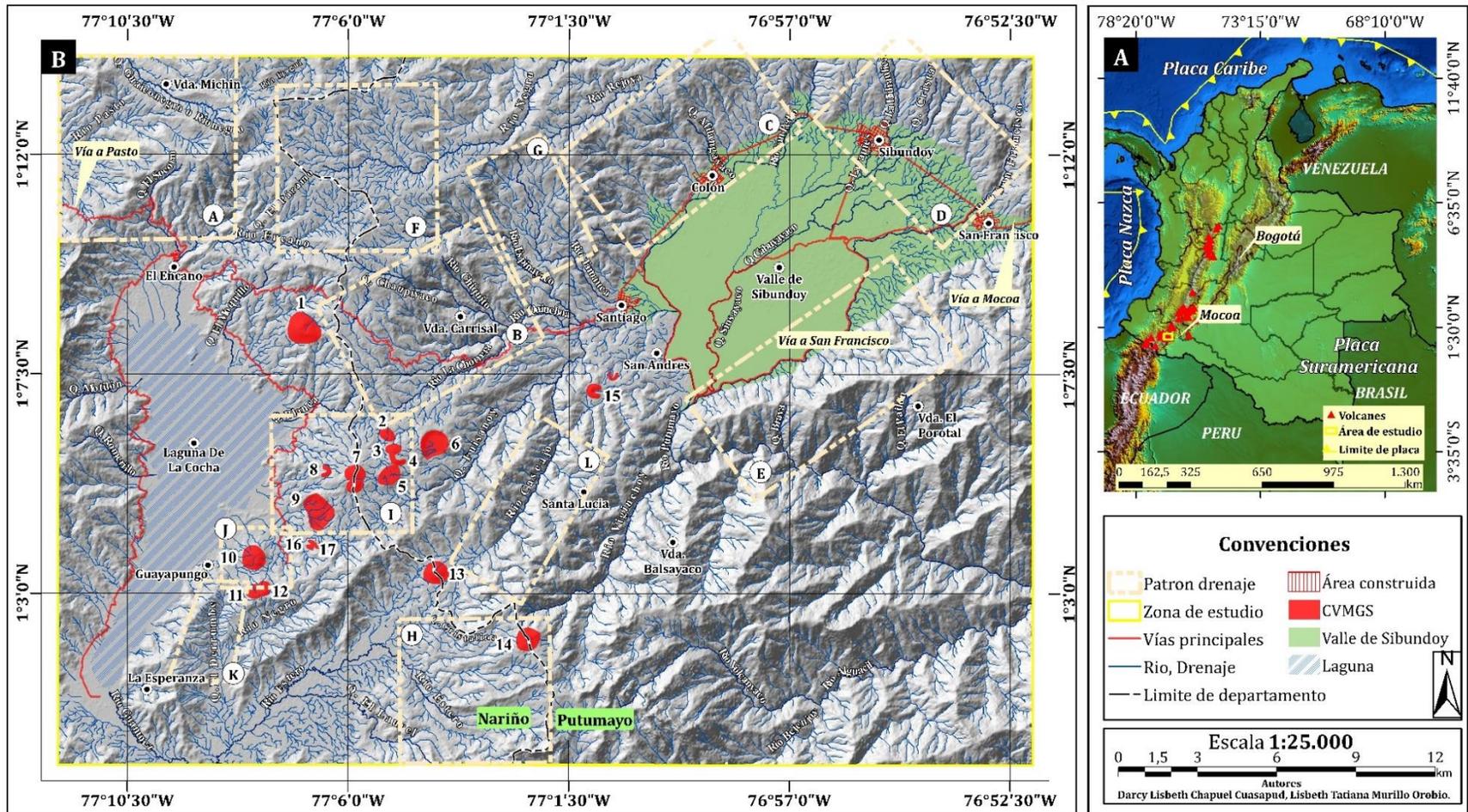


Figura 5. Sistema de drenajes de la zona objeto de estudio. **A)** Distribución de estructuras volcánicas en Colombia y ubicación del área de estudio delimitada por polígono amarillo. **B)** Mapa de drenajes donde se delimita con polígonos de color crema los patrones de drenaje, además se ubica las estructuras volcánicas que hacen parte del CVMGS delimitadas en polígonos de color rojo en la zona de estudio. Elaborado mediante el uso de los programas SAGA (Sistema para análisis Geocientíficos Automatizados), QGIS y ArcGIS a escala 1:25.000.

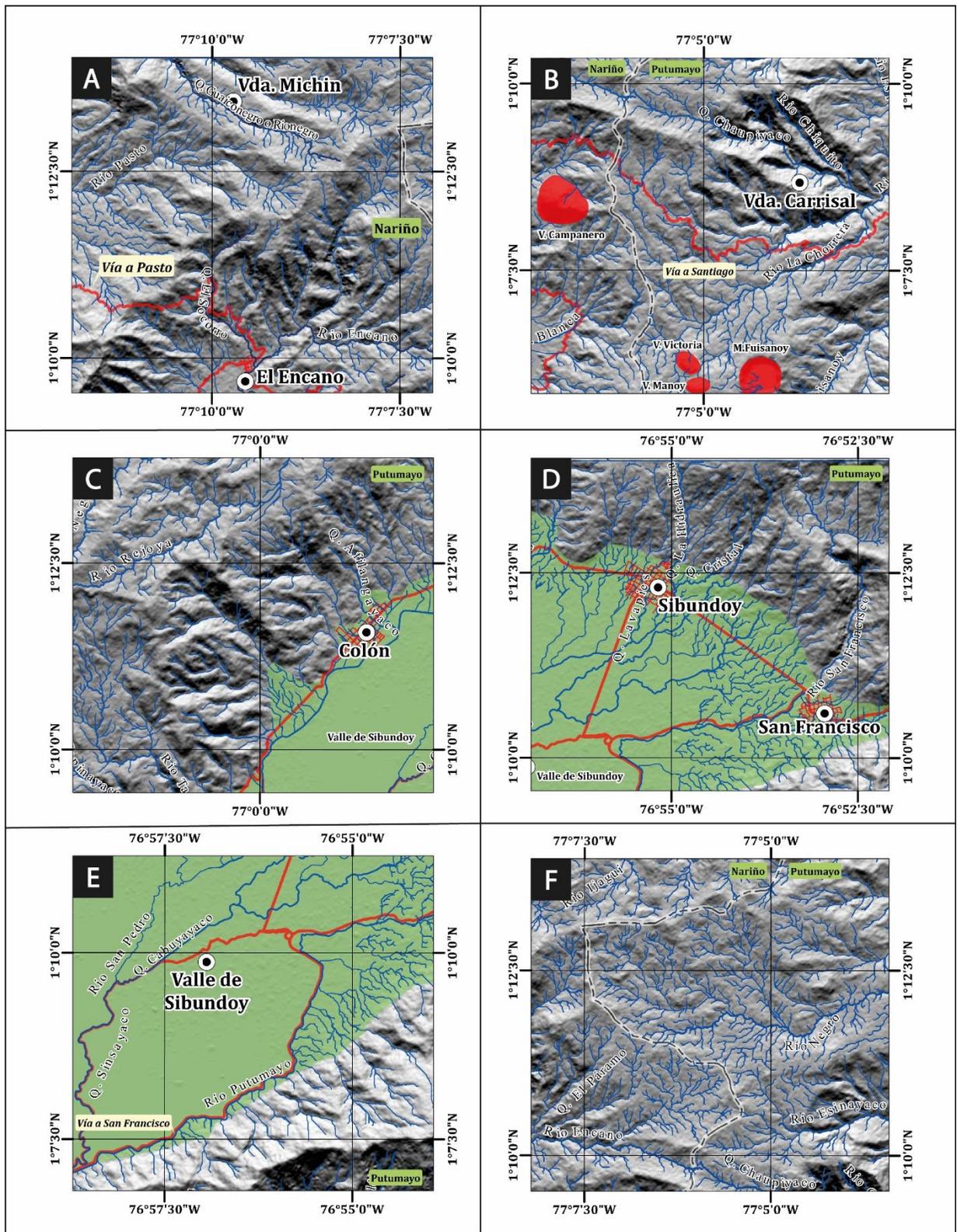


Figura 6. Patrones de drenaje desarrollados en la zona de estudio, los cuales se describen desde la letra (A) hasta la (F) respectivamente: A) subparalelo, B) subparalelo, C) subparalelo, D) subparalelo, E) subparalelo, F) dendrítico.

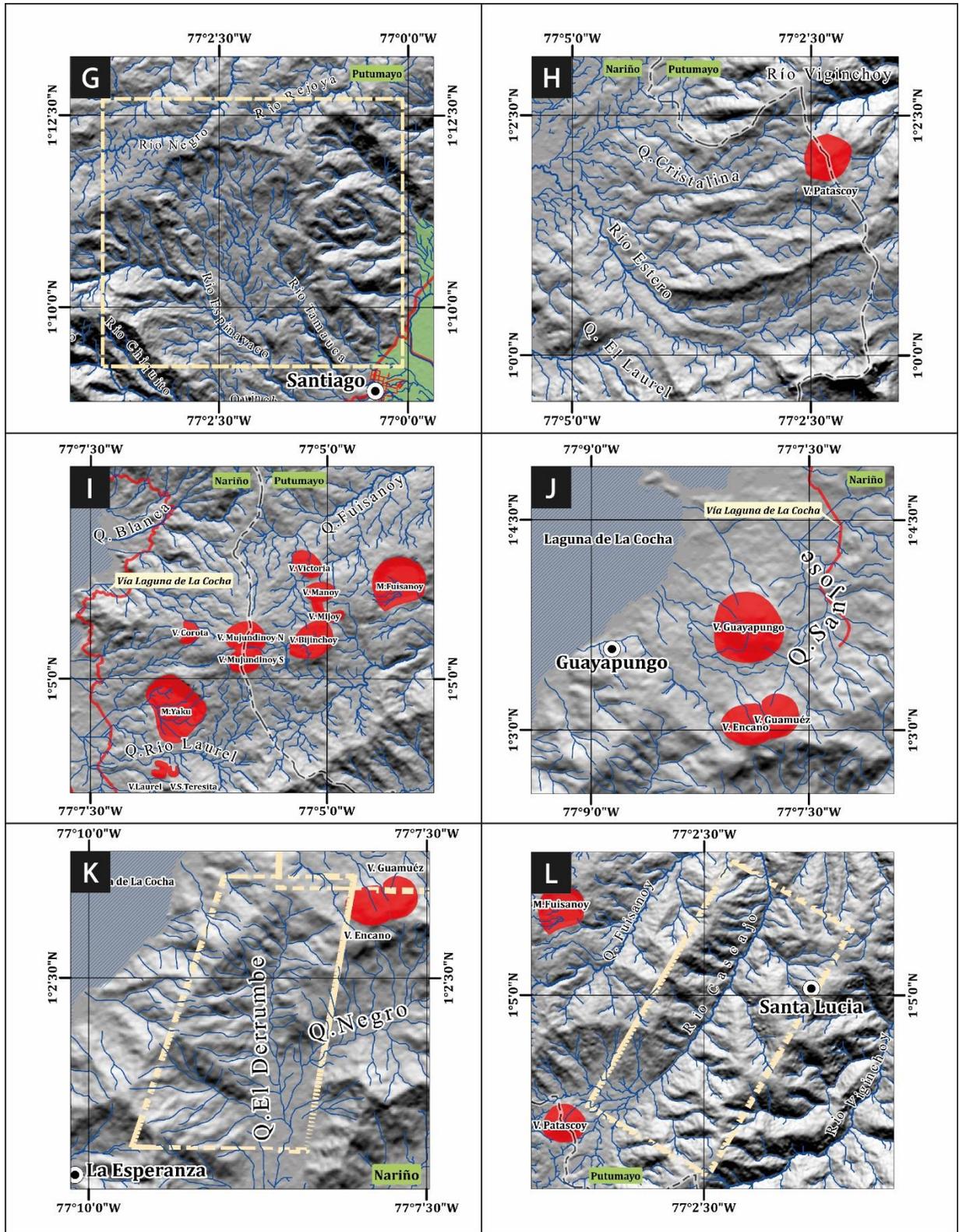


Figura 6. Continuación. Patrones de drenaje desarrollados en la zona de estudio, los cuales se describen desde la letra (G) hasta la (L) respectivamente: **G)** subdendrítico, **H)** subdendrítico, **I)** radial, **J)** radial, **K)** asimétrico, **L)** asimétrico.

5.1.2 Análisis de anomalías en los patrones de drenaje

Según Howard (1967) los drenajes proporcionan características estructurales a partir de anomalías que se observan como desviaciones locales en patrones de drenajes y corrientes individuales. Así, varios estudios realizados en anomalías de drenajes sugieren que éstas pueden ser asociadas con estructuras geológicas y discontinuidades estructurales. Siguiendo este concepto, para la zona de estudio se tienen en cuenta las anomalías de corrientes individuales de algunos ríos y quebradas que desarrollan rectilinealidad y deflexiones (Figura 7). Las ubicaciones geográficas de las deflexiones asociadas a un sentido de rumbo se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Nombres de los ríos o segmentos deflectados y su sentido de rumbo en el área de estudio.

Deflexión	Área	Río/Quebrada	Sentido de Rumbo
D1	Colón	San Pedro	E-W y NNE-SSW
D2	San Francisco	San Francisco	ENE-WSW, NW-SE y NNE-SSW
D3	San Francisco	San Francisco	NW-SE y NNE-SSW
D4	Santiago	Tamauca	NW-SE, ENE-WSW y NW-SE
D5	Santiago	Espinayaco	NW-SE, NNE-SSW Y NW-SE
D6	Santiago	San Pedro	NW-SE y NNE-SSW
D7	San Andrés	Quebrada Sinsayaco	Múltiples deflexiones: NW-SE, NE-SW, NNW-SSE y NNE-SSE
D8	San Andrés	Quinchoa	E-W y NNW-SSE
D9	Santa Lucia	Putumayo	NNE-SSW y WNW-ESE
D10	Santa Lucia	Cascajo	NNW-SSE y NE-SW
D11	Santiago	Cascajo	E-W, NNW-SSE y E-W
D12	Carrisal	Negro	NW-SE y ENE-WSW
D13	Carrisal	Quebrada Blanca	NE-SW y WNW-ESE
D14	Carrisal	La Chorrera	NNW-SSE y NE-SW
D15	El Encano	Encano	NNW-SSE y WNW-ESE
D16	El Encano	Quebrada La Cristalina	WNW-ESE y NNW-SSE
D17	Guayapungo	Negro	Múltiples deflexiones: NE-SW, NNW-SSE y NE-SW
D18	Valle Estero	Quebrada El Laurel	NW-SE y NNE-SSW
D19	Balsayaco	Bejenjoy	ENE-WSW y NNE-SSW
D20	Balsayaco	Volcanyaco	NNE-SSW y NW-SE
D21	Balsayaco	Putumayo	NNW-SSE y WNW-ESE
D22	N de la V. Carrisal	Negro	NE-NNW y SW

La ocurrencia de la alineación entre los segmentos rectilíneos del río Encano y la quebrada Chaupiyaco en sentido WNW-ESE generan un trazo de rectilinealidad considerado como anomalía (Figura 7). Del mismo modo, el río Negro y la quebrada Fuisanoy drenan en sentidos contrarios, pero siguen la misma dirección NE-SW lo que genera la rectilinealidad de los

mismos. El río La Chorrera y el río Negro en el sector de la vereda Carrisal siguen su curso de forma paralela y alineados en sentido NE-SW; el río Cascajo en el sector de Santa Lucia en dirección NNE-SSW; el río Viginchoy en el sector de Balsayaco en dirección NNE-SSW y el río Alguacil con rumbo ENE-WSW, cuyas corrientes individuales también desarrollan trazos largos y rectilíneos en la zona.

En la zona NW-SE del área se observan varias deflexiones en las corrientes de los ríos y quebradas, principalmente en los que cruzan por la planicie del Valle de Sibundoy; el río San Pedro tiene cambios abruptos en la dirección de flujo. Hacia el tramo norte presenta una deflexión hacia el E-W formando un ángulo recto con el siguiente tramo lineal que sigue su curso hacia el NNE-SSW (D1). El siguiente cambio abrupto se da en la conexión con el río Quinchoa, al NW-SE y luego hacia el NNE-SSW en un tramo relativamente recto (D6). La siguiente deflexión se da en el tramo del río Quinchoa en dirección E-W y NNW-SSE formando un ángulo relativamente recto cuyo segmento continúa siendo lineal hasta desembocar en el río Putumayo (D8). Al extremo este del Valle de Sibundoy, el río San Francisco presenta un cambio en sentido NW-SE y NNE-SSW (D3) hasta conectarse con el río Putumayo el cual sigue su curso al ENE-WSW hasta deflectarse en dirección NW-SE y NNE-SSW (D2) que continua su curso al borde de la Formación Saldaña y el Monzogonito de Mocoa. Por otro lado, al SE de la zona el río Volcanyaco tiene una fuerte deflexión en ángulo recto y junto con el río Bejenjoy siguen la forma de un gancho de flexión. Todas estas características se pueden ver en la Fig. 7.

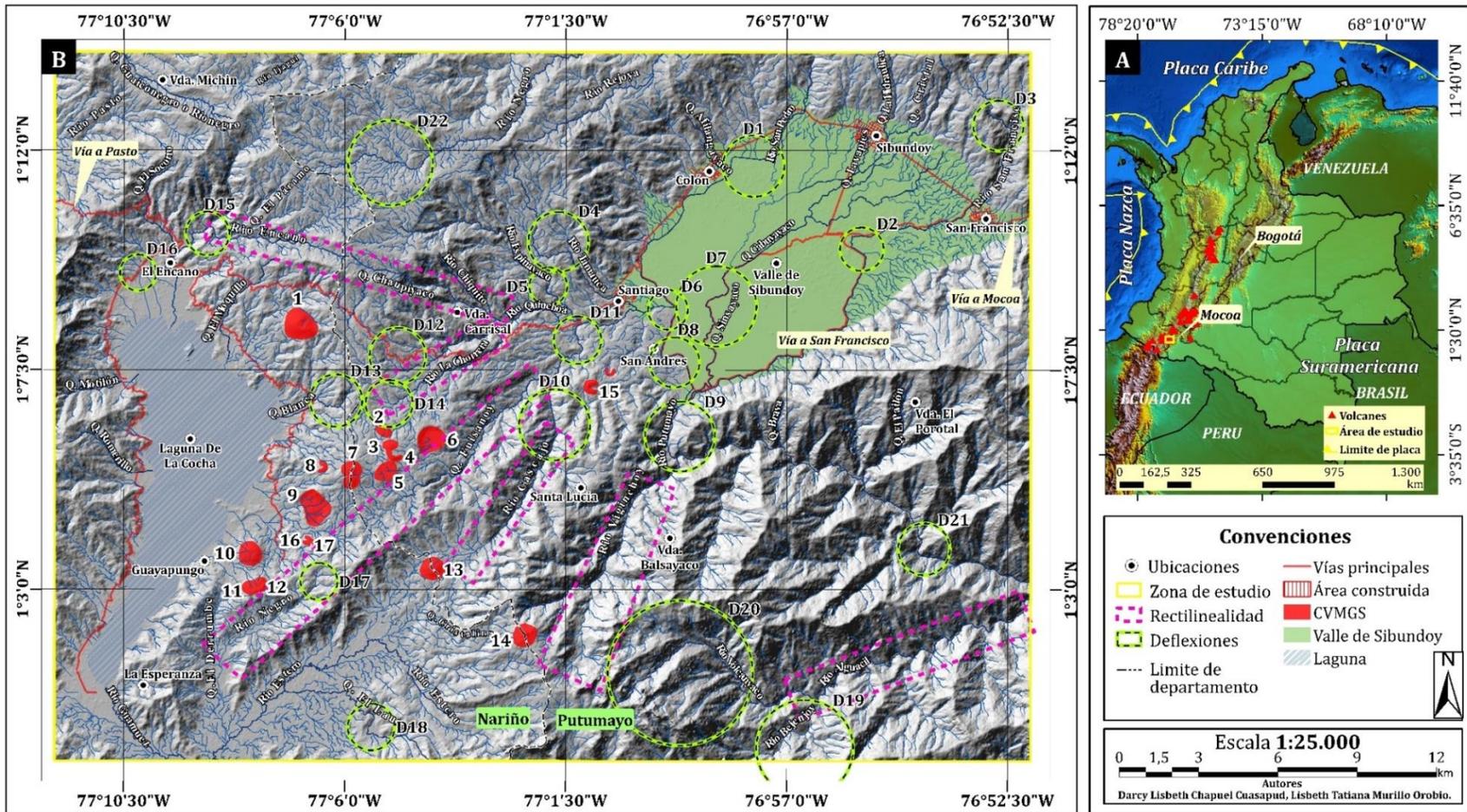


Figura 7. Mapa de anomalías de drenajes de la zona objeto de estudio. **A)** Distribución de estructuras volcánicas en Colombia y ubicación del área de estudio delimitada por polígono amarillo. **B)** Mapa de drenajes donde se delimita con círculos de color verde las deflexiones y con polígonos de color púrpura la rectilinealidad, además se ubica las estructuras volcánicas del Campo Volcánico Monogenético Guamuéz- Sibundoy delimitados con polígonos rojos en la zona de estudio. Elaborado mediante el uso de los programas SAGA (Sistema para Análisis Geocientíficos Automatizados), QGIS y ArcGIS a escala 1:25.000.

5.2 Análisis geomorfológico

La zona de estudio se analizó desde el punto de vista geomorfológico a escala 1:25.000 a partir de un modelo de elevación digital, iniciando con una caracterización de los ambientes y una subdivisión de estos de acuerdo con sus características en subunidades geomorfológicas. Se tienen cuatro ambientes que han modificado el relieve actual de la zona de estudio: denudativo, estructural, volcánico y fluvial.

El ambiente denudacional tiene mayor influencia geomorfológica, dado por la combinación de procesos erosivos y meteorización, asociado tanto a la influencia del clima y la tectónica (Burbank & Pinter, 1999). Así, el levantamiento tectónico provoca que la intensidad de erosión sea mayor en relieve escarpado (Nichols, 2009).

Las subunidades producidas en un ambiente estructural están controladas por las estructuras geológicas (características litológicas y estructurales) y por la erosión diferencial (Gutiérrez & Gutiérrez, 2016); en este sentido, el área de estudio está influenciada por la presencia de un conjunto de fallas regionales y locales asociadas con el Sistema de Fallas Algeciras, que afectan diferentes unidades como la Formación Saldaña, Complejo Migmatítico La Cocha-Río Téllez, Formación Villeta, Formación Caballos y depósitos Cuaternarios como fluviales, volcánicos.

Por otro lado, la presencia del CVMGS está relacionada con geoformas de origen volcánico principalmente por la acumulación de productos volcánicos (Figura 10). El ambiente fluvial está representado por geoformas que son generadas por las corrientes de agua, principalmente de los ríos en los que se incluyen: hacia el NE, el río Putumayo, quebrada Sinsayaco, río San Pedro, río Quinchoa, que atraviesan el Valle de Sibundoy; en el sector central el río La Chorrera, quebrada Fuisanoy, quebrada Cascajo, quebrada Samanoy; y en la zona sur de la Laguna de la Cocha los ríos: Estero, Guamuéz y Negro, estos están relacionados con el trazo de fallas y lineamientos que provocan deflexiones y pueden influenciar en la densidad y el tipo de drenaje.

5.2.1 Ambiente denudacional:

El ambiente denudacional predomina en las zonas aledañas a la Laguna de La Cocha en el Valle de Sibundoy y hacia el sur del mismo. Este presenta un porcentaje de cobertura del área de 52,8 % y está asociado con las subunidades geomorfológicas como: laderas erosivas, laderas erosivas disectadas, planicies y cuencas denudadas.

5.2.1.1 *Laderas erosivas (Dle)*

Estas geoformas están ubicadas en el sector NW del área de estudio, donde los procesos de meteorización y erosión de los productos volcánicos se asocian con la intensidad del interperismo y la denudación actual de las laderas. En su extensión se presentan los cauces de los ríos: Negro, Rejoya, Espinayaco, Chiquito, Quinchoa, Chaupiyaco y las quebradas: Guaiconegro o Río negro y Chaupiyaco.

5.2.1.2 *Laderas erosivas disectadas (Dled)*

Estas geoformas están ubicadas en el sector NE y SW del área de estudio, desarrolladas en rocas volcánicas de la Formación Saldaña, el Complejo Migmatítico La Cocha-Río Téllez, y lavas y depósitos volcanoclásticos. Como contribuyentes para la transformación de estas unidades se tienen: 1) El trazo del Sistema de Fallas de río Suaza. Y 2) Fracturas y lineamientos en dirección NW-SE en el flanco NW del Valle de Sibundoy. Los procesos erosivos actuales hacia el sector NW del área de estudio se relacionan con el ambiente fluvial de la Laguna de La Cocha. En su extensión se presentan los cauces de los ríos: Encano, Rejoya, San Francisco, Estero, Guamuez y las quebradas: El Laurel, Blanca, El Moquillo, Motilón, El Socorro, La Hidráulica, Afilangayaco, y Chaluayaco (Figura 8).

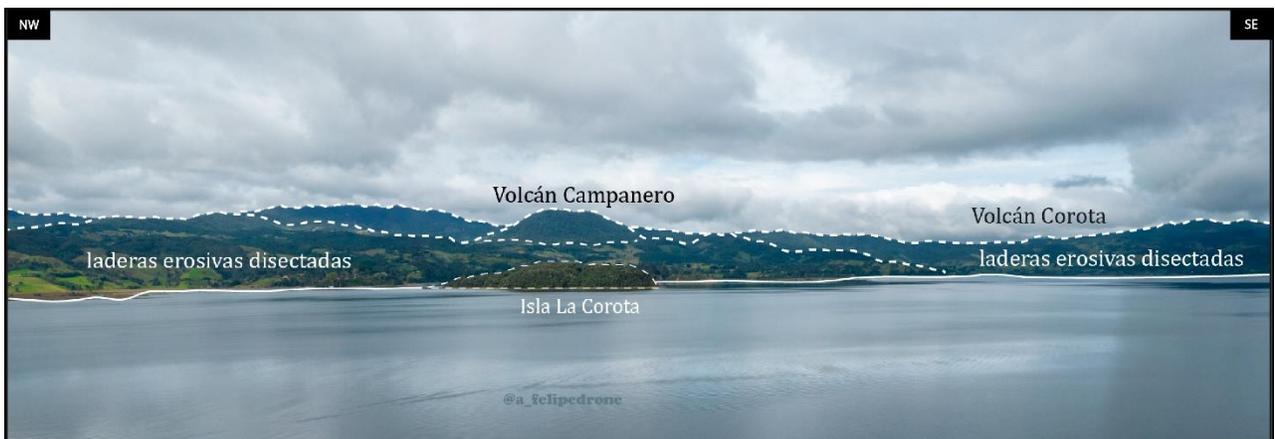


Figura 8. Vista panorámica de las laderas erosivas disectadas aledañas al volcán Campanero, al fondo se observa el volcán Corota, (Créditos: Andrés Felipe Cabrera R. @a_felipedrone)

5.2.1.3 *Planicie (Dp)*

Esta geoforma está representada por el Valle de Sibundoy (Figura 9) y ubicada en el sector NE del área de estudio. Como contribuyente para la transformación de esta planicie donde se depositan sedimentos fluviolacustres se tienen: 1) El trazo de las fallas: San Francisco-Yunguillo, Colón, Quinchoa y Sibundoy. Y 2) Fracturas y lineamientos en dirección NW-SE en el flanco NW del Valle de Sibundoy. En su extensión se presentan los cauces de los ríos: San Francisco, San Pedro, las

quebradas: Cabuyabaco, Lavapies y Sinsayaco, asociados con las fallas: Quinchoa, Sibundoy, Colón y San Francisco-Yunguillo.



Figura 9. Vista panorámica del Valle de Sibundoy, tomada desde la vereda San Andrés. Se observan las lavas de los volcanes Taita y Mama Muchivoy que cubren parte del valle, y la intersección de las fallas San Francisco-Yunguillo y la falla Sibundoy; se delimitan escarpes faceteados en el flanco E y laderas erosivas disectadas en el flanco N del valle.

5.2.1.4 Cuenca denudada (Dcd)

Estas geoformas predominan en el sector SE del área de estudio, están desarrolladas sobre rocas del Batolito de Mocoa y las rocas volcánicas de la Formación Saldaña, Como contribuyente para la transformación de estas subunidades se tienen: 1) lineamientos paralelos al trazo del Sistema de Fallas de Río Suaza, 2) procesos erosivos debido al levantamiento y exhumación del macizo rocoso en el sector SE del área de estudio. En su extensión se presentan los cauces de los ríos: Putumayo y Alguacil, las quebradas: Brava y el pailón.

5.2.2 Ambiente volcánico

De este ambiente hacen parte los 17 volcanes que conforman el CVMGS y lavas producto de la actividad volcánica de edad más reciente en la zona (Figura 10), lo cual generó que una fracción del área de estudio esté cubierta y modelada por el esparcimiento de flujos de lava. La relación está dada por la morfología plana del área donde estas geoformas tuvieron facilidad de esparcimiento y alcanzaron las zonas más bajas. Los edificios volcánicos están relacionados con el Sistema de Fallas de Río Suaza, a lo largo de este trazo se da la mayor concentración de los domos que hacen parte del CVMGS. Este ambiente presenta un porcentaje de cobertura del área de 3,6 %.

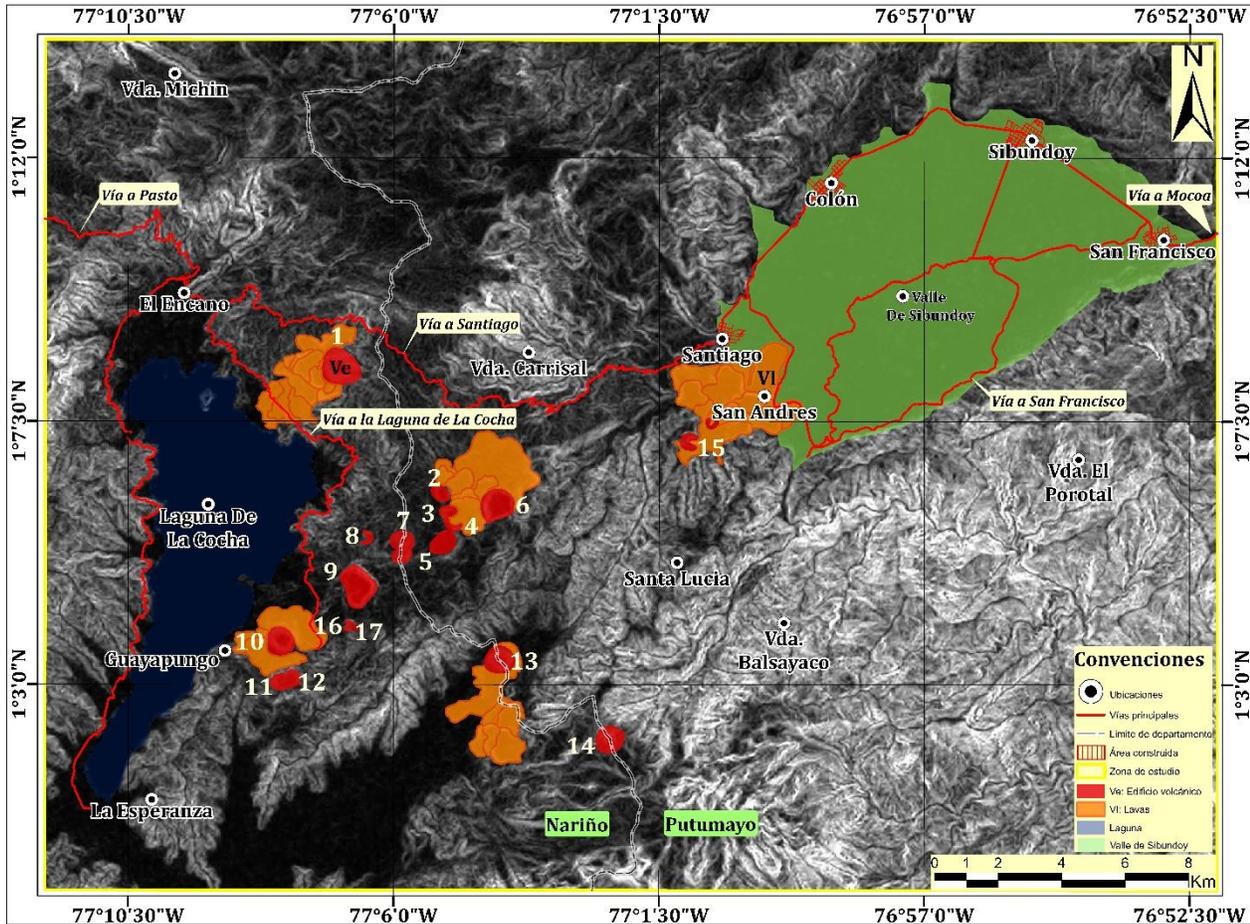


Figura 10. Mapa de disección vertical donde se delimitan las lavas asociadas con algunos de los volcanes del Campo Volcánico Monogenético Guamuéz-Sibundoy a escala 1:25.000.

5.2.2.1 Edificio volcánico (Ve)

Estas geofomas están distribuidas por sectores en el área de estudio. En el sector NE encuentran los volcanes Taita y Mama Muchivioy (Figura 11), mientras que el sector NW se encuentra cubierto por lavas y depósitos volcanoclásticos producto del vulcanismo monogenético, aquí se ubica el volcán Campanero. En el sector SW se presenta la concentración de los volcanes: Victoria, Manoy, Mijoy, Bijinchoy, Maar Fuisanoy, Mujundinoy, Corota, Maar Yaku, Guayapungo (Figura 12), Encano, Guamuez, Laurel, Santa Teresita, Estero y Patascoy que en general se ubican a lo largo de la tendencia NE-SW del Sistema de Fallas de Río Suaza. En su extensión se presentan los cauces de los ríos: Viginchoy, Cascajo y la Chorrera y las quebradas: Fuisanoy, Blanca, Chupaderos y el Moquillo.



Figura 11. Panorámica del volcán Taita Muchivioy cerca de la Vereda Tamavioy desde el punto de referencia $1^{\circ}07'10''$ N- $77^{\circ}00'29''$ W.



Figura 12. Panorámica del volcán Guayapungo (créditos a: Andrés Felipe Cabrera R. @a_Felipedrone)

5.2.2.2 Lavas (VI)

Estas geoformas están distribuidas hacia el sector NW y SE del área de estudio. Los análisis realizados en el mapa de disección vertical (Figura 10), permitieron la delimitación de lavas producto de la erupción de los volcanes: Campanero, Victoria, Manoy, Mijoy, Guayapungo, Estero, Taita y mama Muchivioy. En su extensión se presenta el cauce del río: la Chorrera y las quebradas: Fuisanoy y Sinsayaco (Figura 13).



Figura 13. Textura vesicular en lavas andesíticas de los volcanes Taita y Mama Muchivioy, las vesículas más grandes miden 1 cm.

5.2.3 Ambiente fluvial:

En la zona de estudio este ambiente se encuentra representado principalmente por La Laguna de La Cocha y el Valle Estero estos cubren un porcentaje de área de 9,8 % y en épocas de alta pluviosidad tienden a aumentar su nivel debido a las aguas que drenan de zonas montañosas del sector. De la misma manera, se genera erosión, transporte de material y sedimentación en los cauces de los drenajes del área, principalmente el río Guamuéz y sus tributarios.

5.2.3.1 Plano o llanura de inundación (Fpi)

Esta superficie alargada está ubicada en los sectores NW y SE del área de estudio bordeando a la Laguna de La Cocha. Su depósito está constituido por sedimentos lacustres de Laguna de La Cocha originados durante eventos de inundación fluvial (Figura 14). En su extensión se presentan los cauces de los ríos: Guamuéz, Encano, Estero, las quebradas: el Moquillo, Blanca, Laurel y el trazo del Sistema de Fallas de Río Suaza y la falla Afiladores.

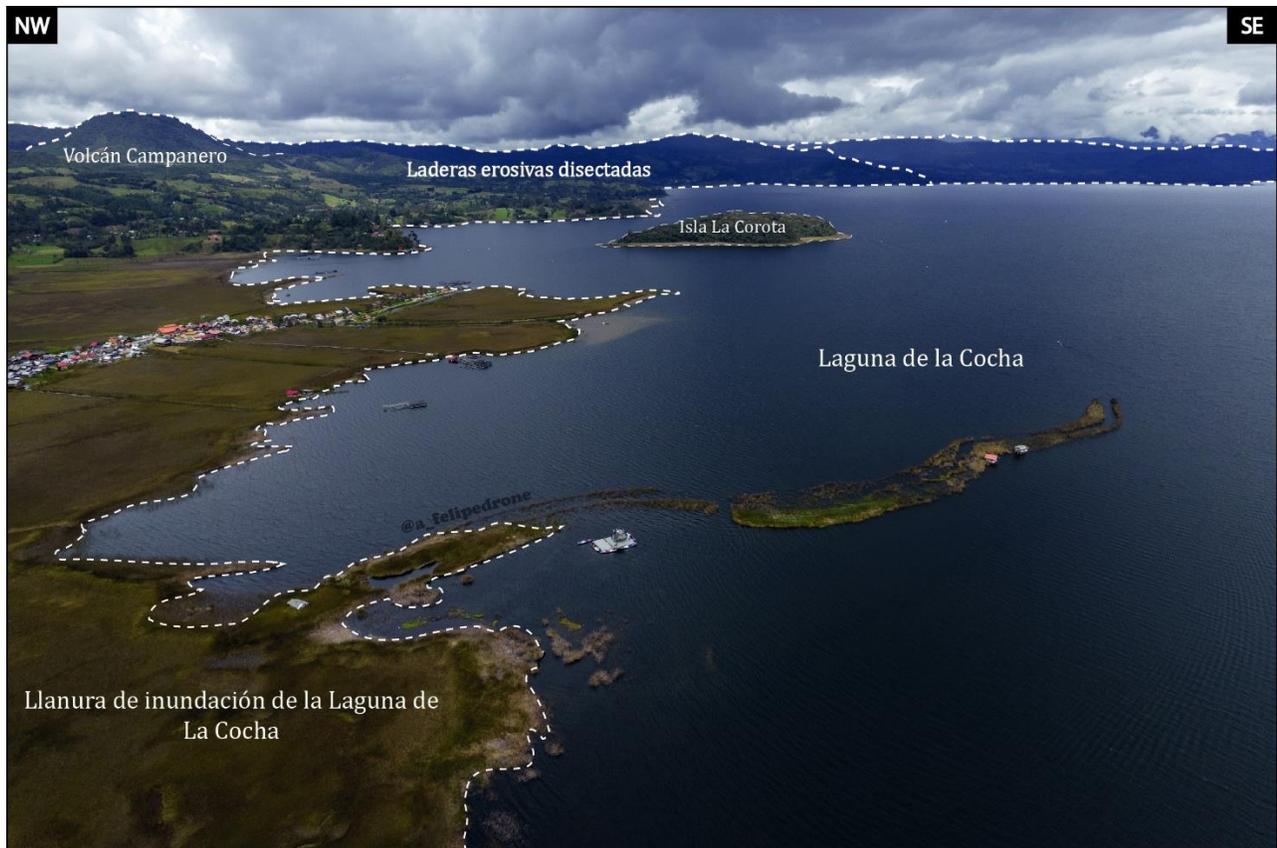


Figura 14. Panorámica de la Laguna de La Cocha donde se aprecia una fracción de la llanura de inundación, al fondo el volcán Campanero y laderas erosivas disectadas del flanco E de la laguna. (Créditos a: Andrés Felipe Cabrera R. @a_Felipedrone.).

5.2.3.2 *Laguna (Fl)*

Esta geoforma abarca parte del sector NW y SW del área de estudio y está representada por la Laguna de La Cocha. Estudios anteriores en la zona de estudio atribuyen su origen a procesos tectónicos y hundimientos en el valle de erosión (Ortiz, 1970). En su extensión se presenta el trazo del Sistema de Fallas de Río Suaza, la falla Afiladores y la Falla de la Victoria y el cauce de los ríos: Guamuéz, Encano, Estero, y las quebradas: el Moquillo, Blanca, Laurel, Motilón y Romerillo.

5.2.4 **Ambiente glaciar:**

La zona de estudio estuvo modelada por la presencia de subunidades glaciares. Según Florez (2003) se destacaban morrenas laterales, frontales y de fondo, estas se encuentran asociadas a circos y valles glaciares en U. A pesar de esto en la actualidad la zona está modelada por un ambiente denudacional que se superpone a las evidencias de un ambiente glaciar y por lo tanto no se incluyen geoformas de este tipo en los resultados de este trabajo.

5.2.5 Ambiente estructural

El ambiente estructural predomina en las zonas SE y SW del área de estudio y está representado por el relieve con pendientes abruptas, geformas como: lomeríos y escarpes estructurales, ganchos de flexión, espolones y escarpes faceteados abarcan un porcentaje de cobertura equivalente al 33,6% del área de estudio. Algunas de estas geformas se relacionan con lineamientos y pueden corresponder con zonas de daño por fallamientos locales (Figura 15).

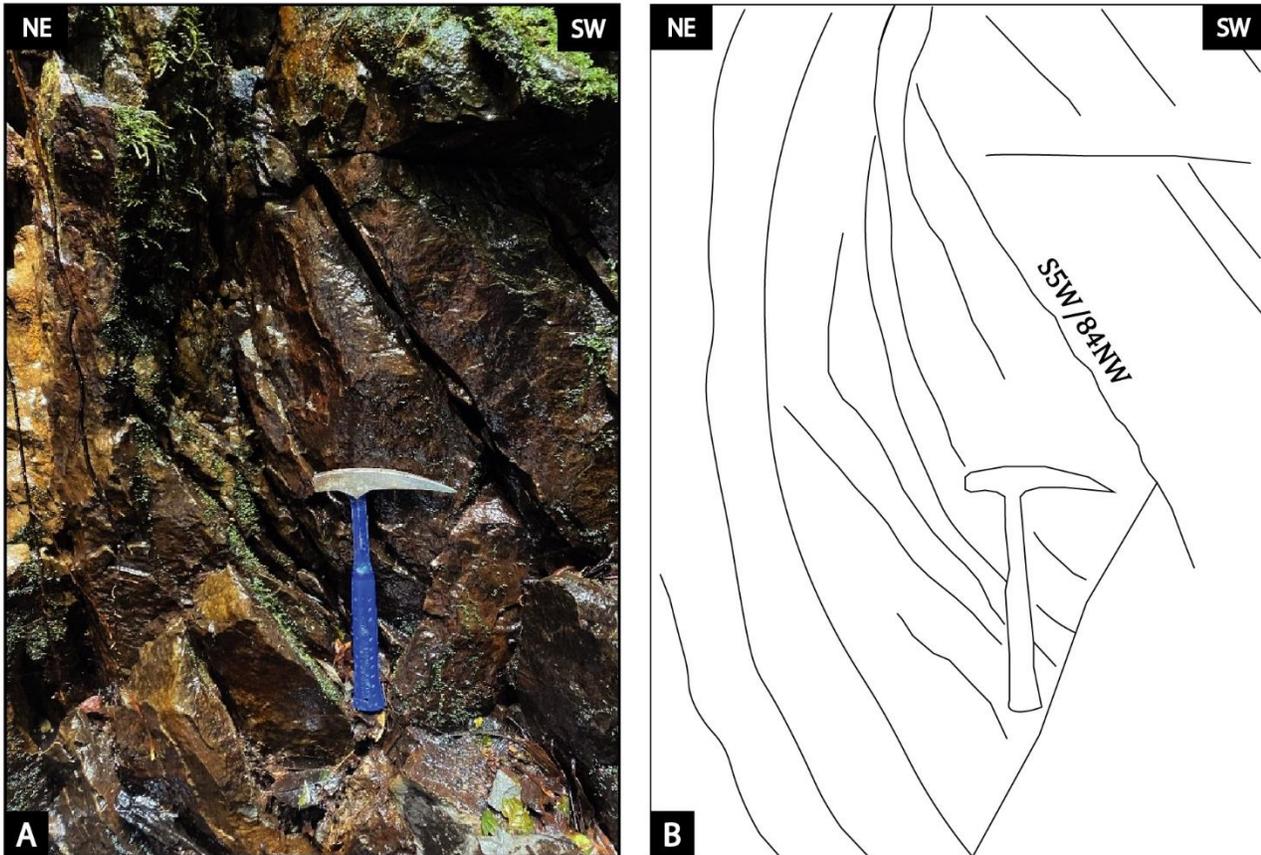


Figura 15. Afloramiento característico en la quebrada de la vereda El Naranjal ($01^{\circ}04'28''$ N, $77^{\circ}08'13''$ W). **A)** Diaclasas y fracturas. **B)** Diagrama esquemático de la orientación preferencial de las diaclasas.

5.2.5.1 *Escarpe estructural (See)*

Estas geformas están ubicadas en el sector SE del área de estudio, desarrolladas sobre las rocas volcánicas de la Formación Saldaña y rocas plutónicas del Batolito de Mocoa. En su extensión se presentan los cauces de los ríos: Putumayo, Cascajo, Volcanyaco, Alguacil, y las quebradas: Brava y Fuisanoy. Las subunidades se encuentran influenciadas por el régimen transtensional del Sistema de Fallas de Algeciras y fallas regionales como el trazo del Sistema de Fallas del Río Suaza y lineamientos que siguen una tendencia con dirección NE-SW.

5.2.5.2 *Escarpe faceteado (Slfc)*

Estas geoformas están ubicadas en el flanco SE del Valle de Sibundoy, desarrolladas sobre rocas volcánicas de la Formación Saldaña, rocas plutónicas del Batolito de Mocoa y el Batolito de Sombrerillos y asimismo en rocas sedimentarias de las Formaciones: Caballos y Villeta. En su extensión se presentan los cauces de los ríos: Putumayo, Viginchoy y Cascajo. Las subunidades se encuentran estructuralmente influenciadas por el trazo de la falla San Francisco-Yunguillo, el Sistema de Fallas de Río Suaza y lineamientos paralelos a esta que se concentran hacia el SE del sector.

5.2.5.3 *Gancho de flexión (Sgf)*

Estas geoformas están ubicadas en el sector SE del área de estudio. Su morfología alargada se relaciona con la deflexión en algunos drenajes de la zona y el desplazamiento lateral del Sistema de Fallas de Río Suaza y lineamientos en dirección NE-SW paralelos al trazo de la misma, además de lineamientos paralelos a la falla San Francisco- Yunguillo. Estas subunidades se encuentran desarrolladas sobre rocas volcánicas de la Formación Saldaña y rocas plutónicas del Batolito de Mocoa. En su extensión se presentan los cauces de los ríos: Viginchoy, Volcanyaco y Alguacil.

5.2.5.4 *Lomeríos estructurales (Sloe)*

Estas geoformas están ubicadas en el sector SE del área de estudio. Están desarrolladas sobre las rocas volcánicas de la Formación Saldaña y rocas plutónicas del Batolito de Mocoa. En su extensión se presentan los cauces de los ríos: Putumayo, Viginchoy, Volcanyaco y Alguacil. Las subunidades se encuentran estructuralmente influenciadas por lineamientos paralelos al trazo del Sistema de Fallas de Río Suaza y la falla San Francisco-Yunguillo (Figura 16).

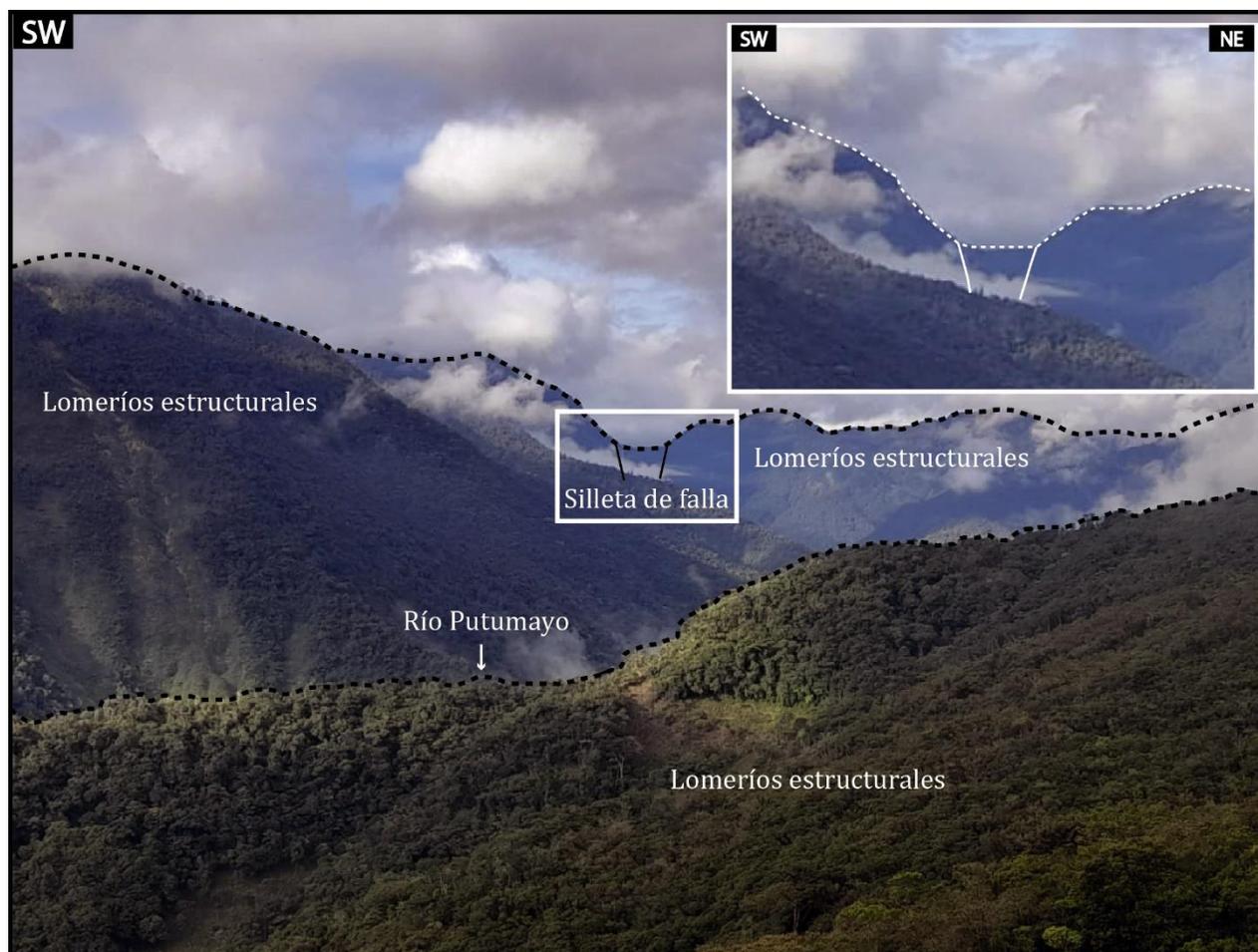


Figura 16. Panorámica tomada desde el punto de referencia Vereda Balsayaco, al fondo se observan lomeríos estructurales y una silleta de falla asociada con el trazo de la falla San Francisco-Yunguillo.

5.2.5.5 *Espolón (Ses)*

Estas geoformas están ubicadas en el sector SE del área de estudio (Figura 17). Están desarrolladas sobre las rocas volcánicas de la Formación Saldaña en su extensión se presentan los cauces de los ríos: Putumayo y la quebrada Brava. Las subunidades se encuentran estructuralmente influenciadas por lineamientos paralelos al trazo del Sistema de Fallas de Río Suaza.

Tabla 5. Ambientes geomorfológicos en los que se clasifican las subunidades geomorfológicas de la zona de estudio y los valores de área en Ha y porcentaje.

Ambiente	Sumatoria de áreas (Ha)	Porcentaje %
Denudacional	52815,38196	52,8
Estructural	33688,93655	33,6
Fluvial	9889,245874	9,8
Volcánico	3605,950214	3,6
TOTAL	99999,51459	99,9 %

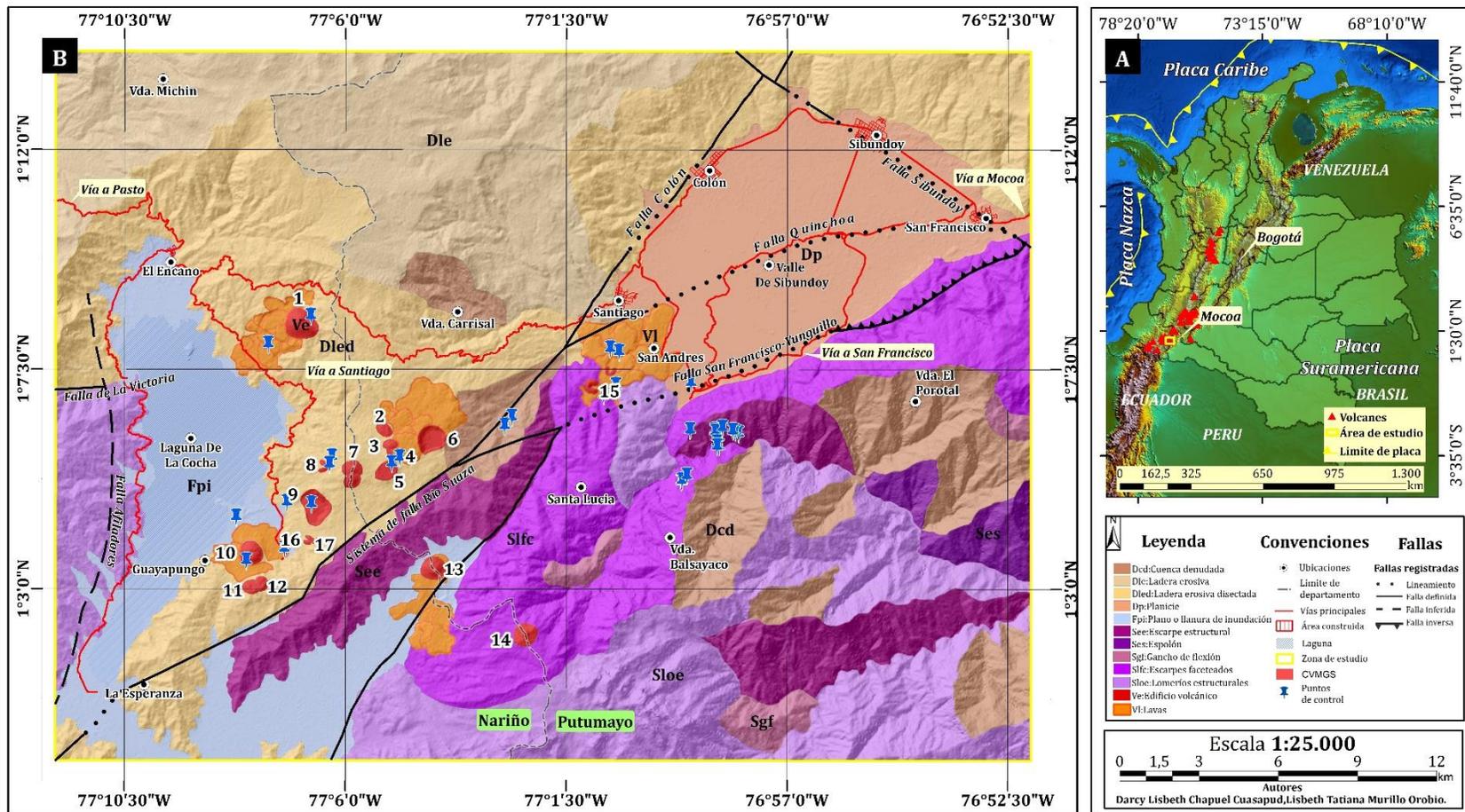


Figura 17. Mapa geomorfológico de la zona objeto de estudio. **A)** Distribución de estructuras volcánicas en Colombia y ubicación del área de estudio delimitada por polígono amarillo. **B)** Mapa geomorfológico con la ubicación de las estructuras volcánicas del CVMGS delimitados por polígonos rojos y las principales fallas de la zona de estudio reportadas por el Servicio Geológico Colombiano (2020) y Restrepo et al. (2021). Elaborado en ArcGIS a partir del DEM 12,5 m a escala 1:25.000. Se ubica estaciones de campo (Anexo 2).

5.3 Análisis de lineamientos

Con base en los insumos generados en este trabajo se destacan estructuras producto de la deformación frágil como: fallas, lineamientos y fracturas. Esto se realizó teniendo en cuenta los rasgos lineales y curvilíneos que cortan o desplazan a otras estructuras y se identifican con la combinación de capas de relieve sombreado, pendientes y orientación de laderas. Estas estructuras con dirección NE-SW y lineamientos transversales en dirección NW-SE corresponden a trazos regionales del Sistema de Fallas de Algeciras (SFA). Este conjunto de fallas en sentido NE-SW clasificada como una estructura compleja tipo “*wrench fault*” abarca una extensión regional desde la frontera con Ecuador hasta unirse con el Sistema de Fallas de Guaicáramo y en la zona de estudio se encuentran representada por las fallas: Afiladores, el Sistema de Fallas de Río Suaza, la falla San Francisco-Yunguillo, la falla Colón, la falla Quinchoa y la falla Sibundoy (Velandia et al., 2001).

Un total de 1026 lineamientos fueron definidos en el área de estudio (Figura 18; Anexo 1). Para el cuadrante NE con 188 datos tienen una tendencia NNE-SSW, NE-SW, ENE-WSW y NNW-SSE (Figura 18-C1), en el cuadrante NW se registran 254 datos los cuales muestran una tendencia predominante hacia el NNE-SSW y NE-SW, otras tendencias están orientadas en dirección NW-SE (Figura 18-C2). La tendencia de los lineamientos para el cuadrante SW con un total de 188 datos registrados muestra tres tendencias principales WNW-ESE, ENE-WSW y NNE-SSW (Figura 18-C3) y en el cuadrante SE tiene el mayor número de lineamientos con 410 datos, la tendencia principal tiene una orientación NE-SW y otras orientaciones NNW-SSE y NNE-SSW (Figura 18-C4).

En el área de estudio se observa una tendencia general de lineamientos NE-SW los cuales se sugiere están relacionados con la falla San Francisco-Yunguillo. Sin embargo, para el sector NE dominado por la Falla Sibundoy los lineamientos estarían relacionados con la misma por su dirección NW-SE. La concentración de lineamientos transversales a lo largo del rumbo de las fallas locales presentes en toda la zona de estudio puede deberse a la existencia de fallas como la falla Sibundoy y otras no registradas en la literatura. Estas zonas de falla pueden visualizarse mediante la correlación de lineamientos continuos.

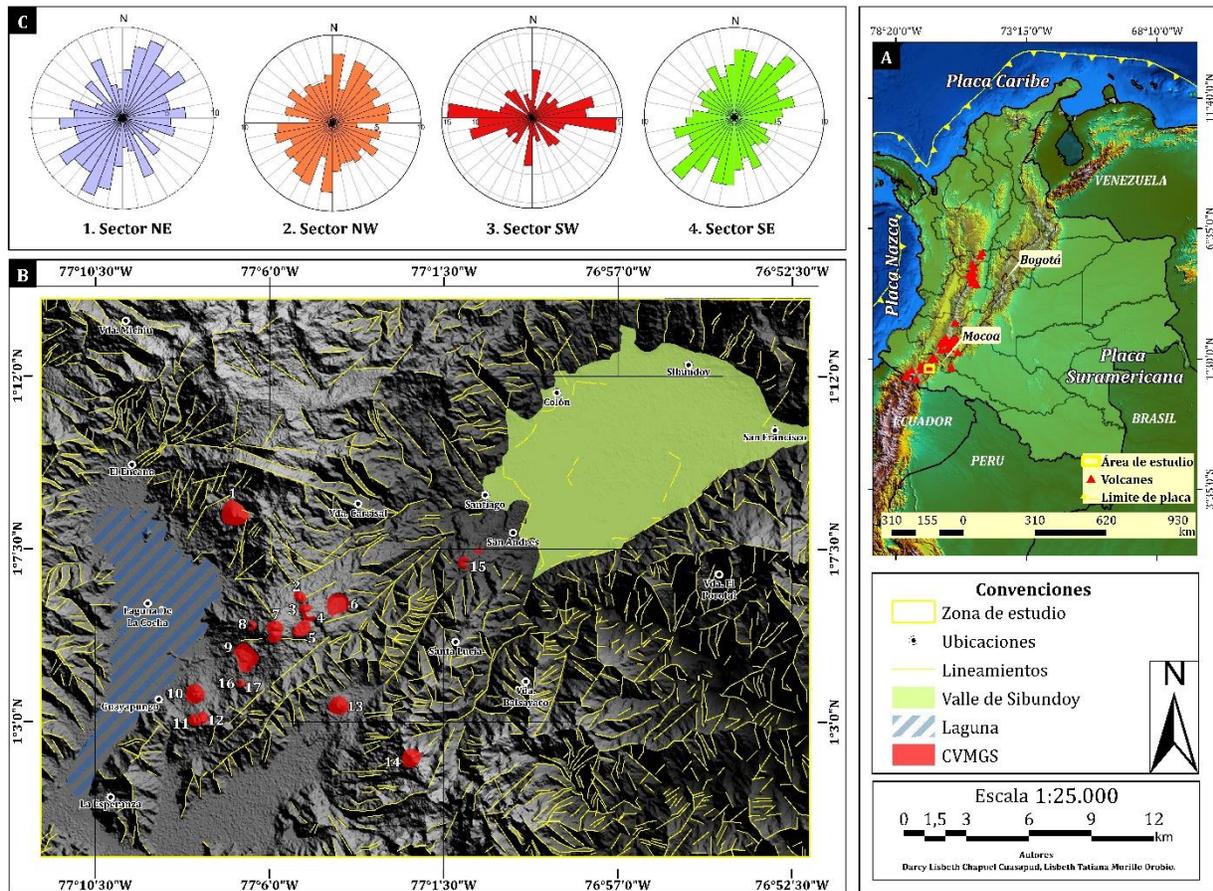


Figura 18. Mapa de lineamientos de la zona objeto de estudio. **A)** Distribución de estructuras volcánicas en Colombia y ubicación del área de estudio delimitada por polígono amarillo. **B)** Mapa de lineamientos y la ubicación de las estructuras volcánicas del Campo Volcánico Monogenético Guamuéz-Sibundoy delimitados por polígonos rojos, elaborado en ArcGIS a partir del DEM 12,5 m para la zona de estudio a escala 1:25.000. **C)** Diagramas de rosas con la orientación de los lineamientos generados para los sectores NE, NW, SW y SE de la zona de estudio, elaborados en el programa stereonet.

El trabajo de campo contribuyó a la recopilación de datos estructurales, parámetros de orientación, identificación de familias de diaclasas y rasgos morfoestructurales principalmente en rocas volcánicas y plutónicas del Mesozoico a lo largo del sector NE-SE y hacia el sector NW-SW en depósitos volcánicos de edad Neógena. Esto permitió reconocer la influencia tectónica del Sistema de Fallas de Algeciras y su relación con la formación del CVMGS. En la zona de estudio se tiene en cuenta algunos factores que limitan el acceso a la información, por lo tanto, el itinerario de campo consistió en cartografiar principalmente los cauces de ríos, quebradas y algunos afloramientos aledaños al Valle de Sibundoy y zonas cercanas al CVMGS en el departamento de Nariño.

En general, la presencia de diaclasas se extiende a lo largo del flanco SE del Valle de Sibundoy y se desarrollan en rocas clasificadas como andesitas y sienitas principalmente. En estaciones

geográficas (Anexo 2) como la Garganta de Balsayaco (Figura 19) se reconoce tres familias de diaclasas que siguen las siguientes direcciones: S29W/10SE, S56E/87NE, N68E/67NW y no se observan criterios cinemáticos asociados, las rocas en afloramiento presentan textura porfirítica, compuesta de plagioclasa en un 80% con cristales subhedrales a anhedrales, bajo contenido de cuarzo y anfíbol escaso, y masa fundamental afanítica de tonalidad gris.

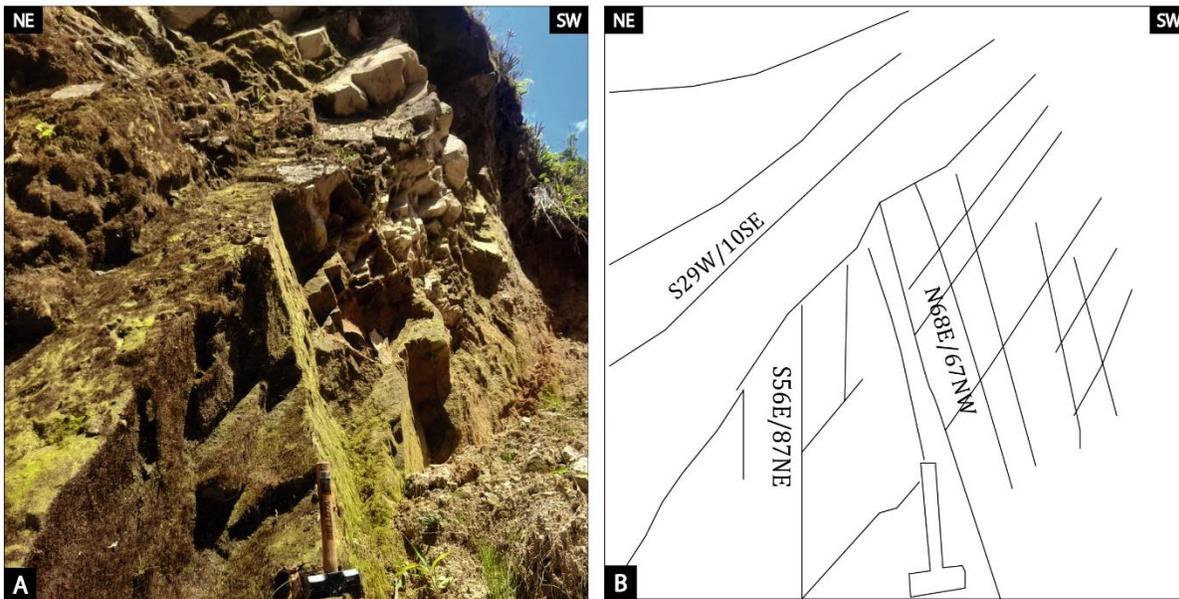


Figura 19. A) Diaclasas en afloramiento rocoso en la Garganta de Balsayaco ($1^{\circ} 06'15''N$, $76^{\circ} 58'58''W$). **B)** Dibujo esquemático de las familias de diclasas.

En otras estaciones ubicadas en la vía hacia la vereda el Porotal (Figura 20) se destaca un afloramiento donde se observa un posible contacto fallado entre una roca con textura fanerítica, holocristina con cristales de feldespatos, plagioclasa y anfíbol, y una roca con textura porfirítica con cristales de plagioclasa y anfíbol y masa fundamental de tonalidad gris. La primera se clasifica como sienita formando parte del Batolito de Mocoa, mientras que la segunda como volcánica intermedia formado parte de la Formación Saldaña. Estas rocas presentan en la orientación tres familias de diaclasas con las siguientes direcciones: N22E/20NW, N42W/68SW, S47W/63SE.



Figura 20. A) Diaclasas en afloramiento rocoso en la vía hacia la vereda El Porotal, muestra el contacto fallado entre rocas de dos litologías. ($1^{\circ} 06'14''N$, $76^{\circ} 58'06''W$) B) Sienita, parte superior. C) Roca volcánica intermedia, parte inferior.

Estos sistemas de diaclasas muestran una orientación NE-SW que coincide con la orientación del trazo de la falla San Francisco-Yunguillo y con lineamientos paralelos al Sistema de Falla de Río Suaza.

Hacia el sector SE, existe un alto grado de diaclasamiento que se observa en afloramientos de rocas intermedias en el río Viginchoy (Figura 21), las cuales tienen una familia primaria en dirección S37E/41NE y otras familias en dirección S35W/61SE, N76W/64SW.

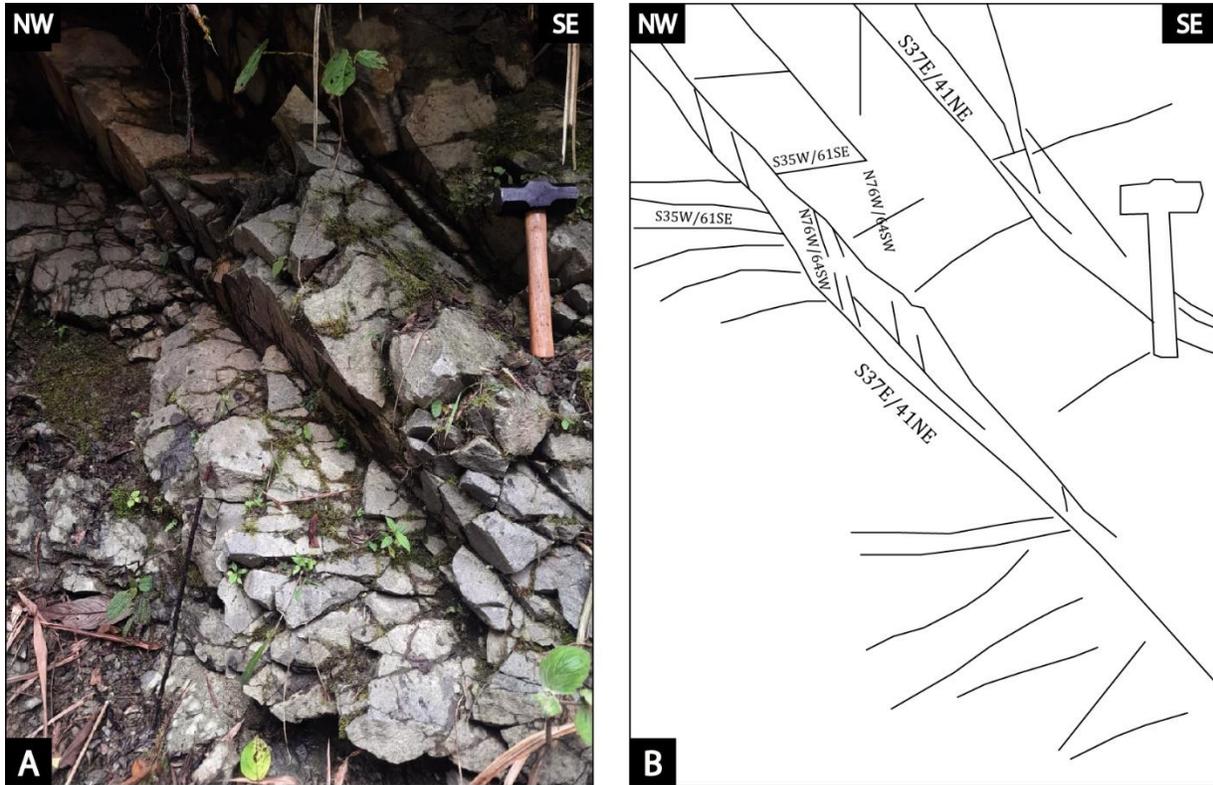


Figura 21. A) Diaclasas en afloramiento rocoso en el río Viginchoy ($1^{\circ} 06'14''N$, $76^{\circ} 58'06''W$)
B) Dibujo esquemático de las familias de diaclasas.

De igual forma en esta zona, pueden reconocerse diaclasas y fracturas (Figura 22) con dirección S85E/21NE que pone en contacto rocas intermedias con variación en su textura y fracturamiento. La parte superior se compone de rocas con cristales de plagioclasa y tonalidad gris, y la parte inferior de rocas afaníticas fuertemente diaclasadas con orientaciones preferenciales en dirección S77W/86 SE y S8E/6NE.



Figura 22. A) Diaclasas y fracturas ubicadas en el río Viginchoy, las rocas de la parte inferior no están afectadas por el plegamiento, pero se encuentran diaclasadas. ($1^{\circ} 05'19''N$, $76^{\circ} 59'02''W$) B) Dibujo esquemático del afloramiento. C) Cambio en la textura de las rocas que componen el afloramiento.

En zonas aledañas al municipio de San Andrés, acumulaciones de lavas altamente fracturadas y afaníticas probablemente provenientes de los volcanes Taita y Mama Muchivioy, corresponden a estructuras conocidas como túmuli (Figura 23-A). Estas se consideran como levantamientos en forma de lomo de ballena que ocurren generalmente en flujos con montículos y se caracterizan por presentar relieves positivos y “hendidura de inflación de lava” por lo que pueden presentar evidencia de inflación o crecimiento endógeno (Duraishwami et al., 2001)

En una de las vías aledañas a dichos volcanes se encuentran depósitos de caída con proyectiles balísticos (Figura 23-B) tamaño bombas que son moderados a altamente vesiculados. Las vesículas se disponen de manera concentrada en forma de "bandas" o "zonación". Los depósitos de la zona se caracterizan por ser masivos y estar compuestos de fragmentos de escoria angulares y líticos volcánicos de tamaño lapilli a bloque con la misma angulosidad, además de tener una

coloración rojiza asociada a la alteración del medio (Figura 23-C). Por lo tanto, se asocia estos depósitos con la fase explosiva probablemente de los volcanes Muchivioy. Otros depósitos se caracterizan por presentar fragmentos de pómez, cristales de plagioclasa, anfíbol, cuarzo y biotita.

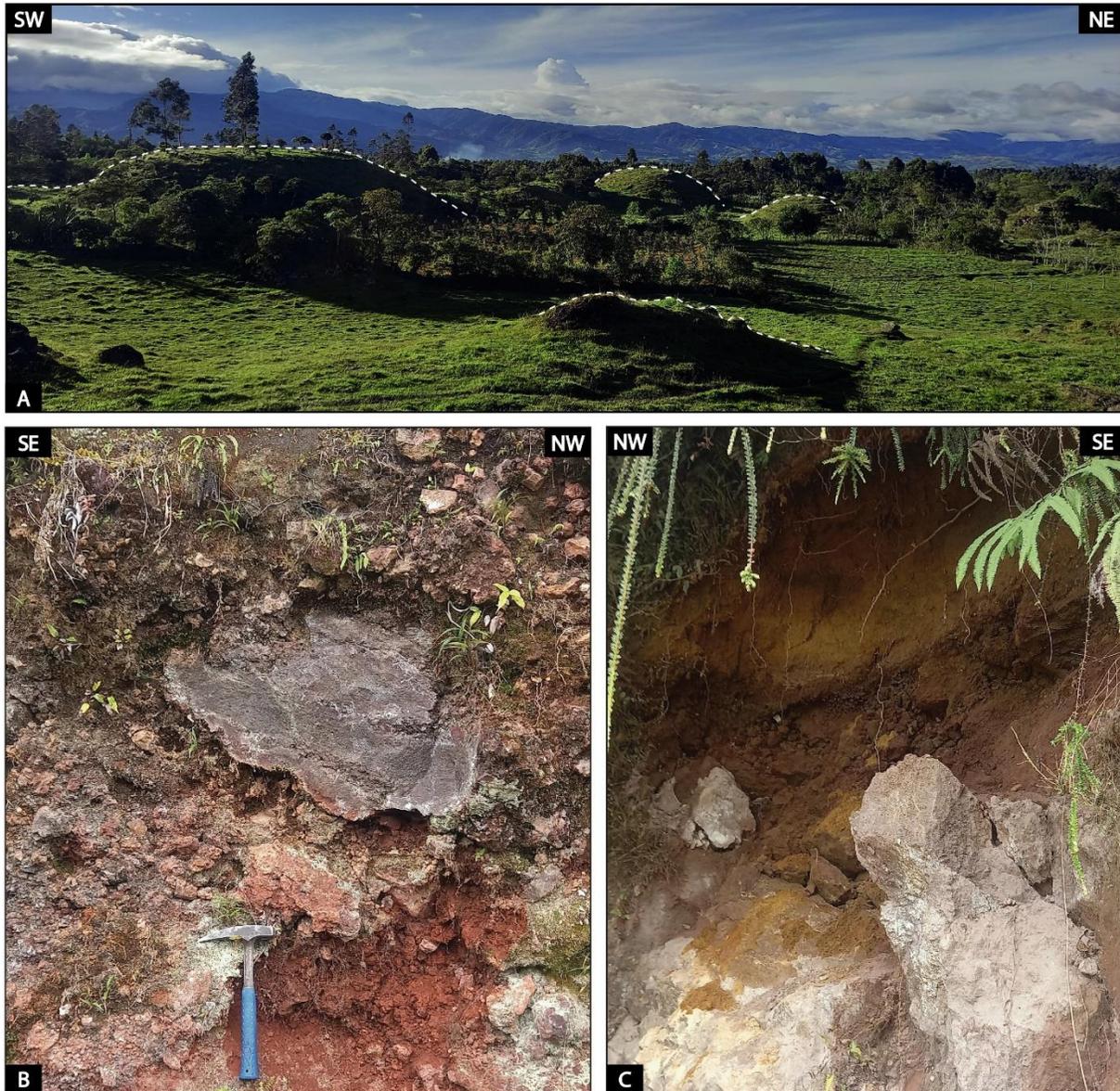


Figura 23. Estructuras y productos aportados por la influencia de los volcanes Taita y Mama Muchivioy **A)** Estructuras de Túmuli de los volcanes Muchivioy ubicadas en la vereda Balsayaco ($01^{\circ}07'13''$ N, $76^{\circ}58'57''$ W). **B)** Projectiles balísticos tamaño Bomba. **C)** Depósito de caída piroclástica.

En el sector NW-SW del área de estudio se tuvo una aproximación con algunas de las estructuras del CVMGS ubicadas en el departamento de Nariño. En la vereda Santa Rosa situada hacia el sur del volcán Campanero (Figura 24) se mide la tendencia principal de diaclasas con datos S50E/44SW, S28E/39SW, S39W/38SW, S52W/88SE. Al norte del volcán Campanero afloran rocas muy alteradas con textura porfirítica en la que las diaclasas tienen las siguientes direcciones:

N26W/45NE, N26W/47NE y N53W/30NE, que coinciden con lineamientos en dirección NW-SE resaltados en la figura 18.

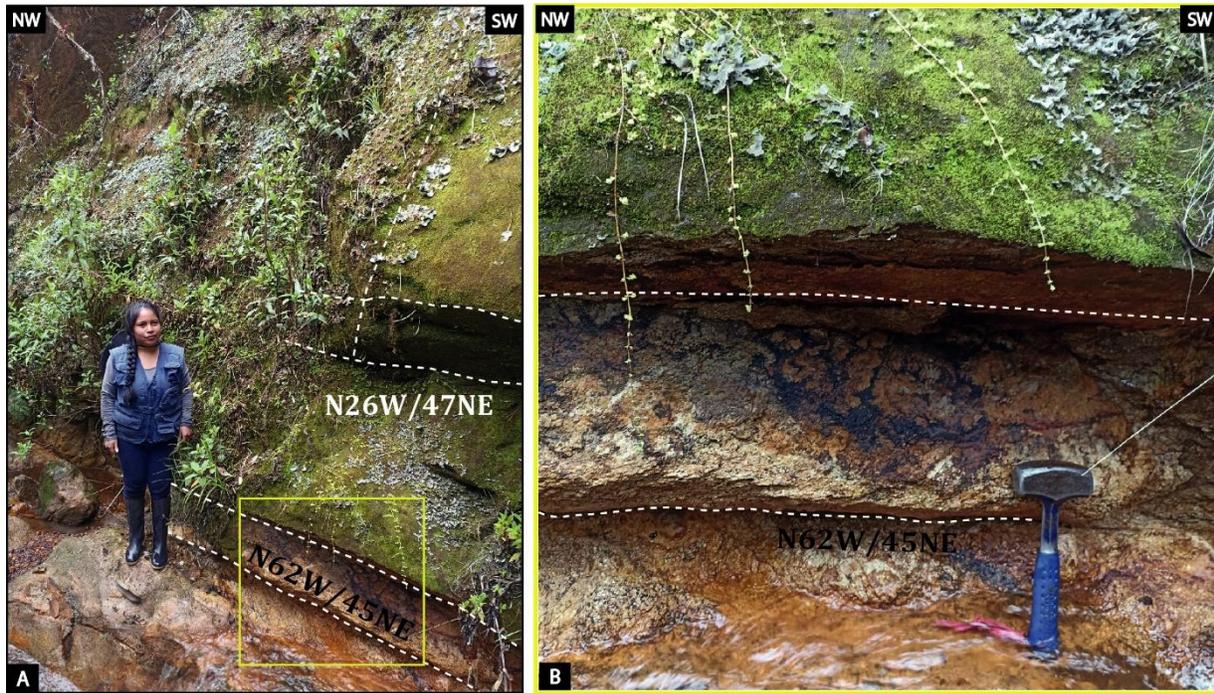


Figura 24. Diaclasas en afloramiento rocoso característico al norte del volcán Campanero ($1^{\circ}08'35''N$, $77^{\circ} 6'42''W$); se observa la orientación preferencial NW-SE de las diaclasas.

En una de las quebradas aledañas al volcán Guayapungo se encuentran fracturas, sin embargo, no se evidencia estructuras relacionadas con cinemática por lo que probablemente son fracturas asociadas al enfriamiento de los flujos de lava de dicho volcán. Por otro lado, en la quebrada de la vereda Naranjal se encuentra un afloramiento de lavas con textura afanítica y fenocristales de olivino. Esta presenta fracturas de enfriamiento y diaclasas oblicuas altamente fracturadas a cizalladas con zonas deformadas en dirección N5E/84 NW (Figura 25).

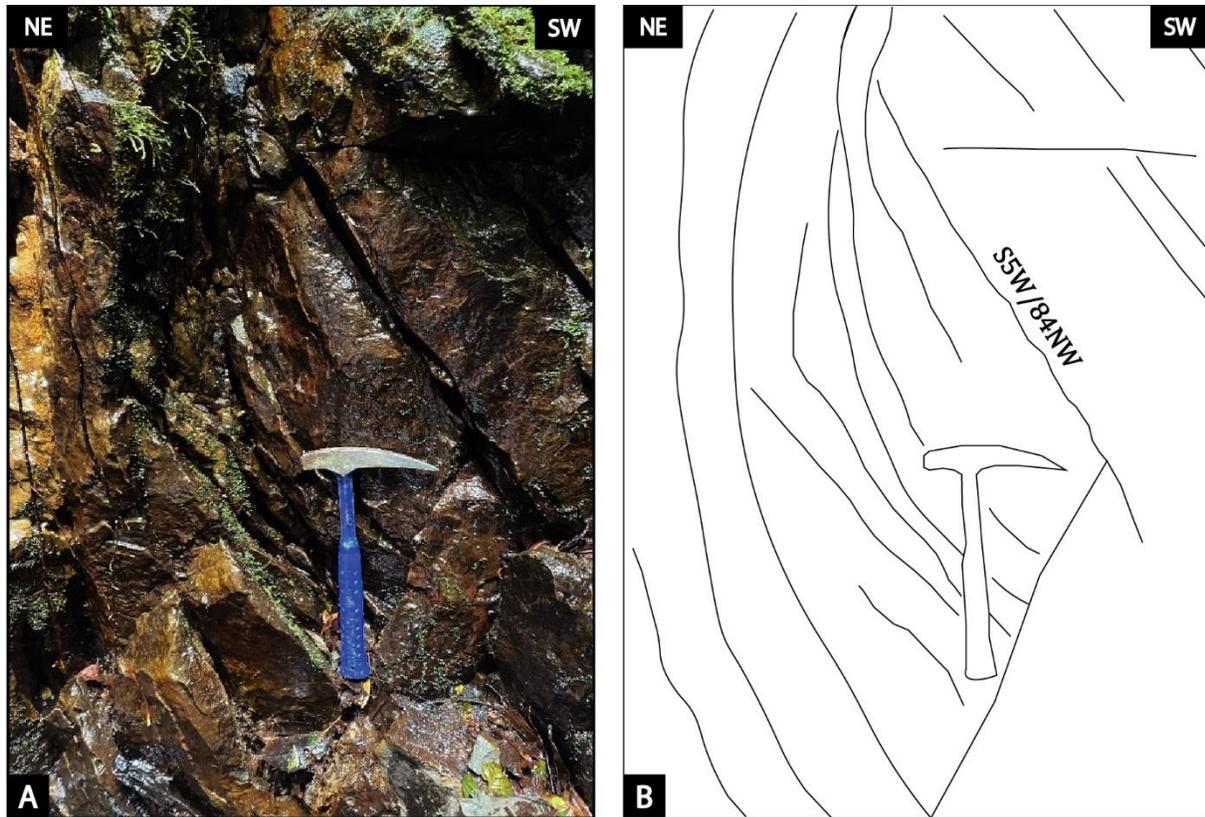


Figura 25. Afloramiento característico en la quebrada de la vereda El Naranjal ($01^{\circ}04'28''$ N, $77^{\circ}08'13''$ W). **A)** Diaclasas y fracturas. **B)** Diagrama esquemático de la orientación preferencial de las diaclasas.

5.4 Análisis de sismicidad

Generalmente la sismicidad en Colombia se distribuye en: 1) Sismos de corteza asociados a los principales sistemas de fallas, 2) sismicidad de subducción del pacífico, 3) sismicidad intermedia de Boyacá-Santander y Nido de Bucaramanga y, 4) sismicidad de corteza difusa (Taboada et al., 1998). El Sistema de Fallas de Algeciras con componente dextral, del cual hacen parte los ramales ubicados en el sector de Sibundoy-Laguna de La Cocha considerado como una cuenca “*pull apart*” y su extensión hacia el Ecuador, corresponde a un sistema de fallas con importante potencial sismogénico con sismos probables entre 6,5 y 7,7 Ms, estimándose periodos de retorno entre 100 y 150 años y 600-1200 años con velocidades del orden de 4 a 8 mm/año (Soulas et al., 1991).

Los datos obtenidos a través del catálogo de sismicidad del SGC permiten proponer dos condiciones sísmicas para el área estudiada: 1) sismos superficiales (< 20 km de profundidad) que obedecen a la actividad tectónica de los trazos de fallas locales pertenecientes al Sistema de Fallas de Algeciras y, 2) sismos profundos relacionados a zonas de subducción.

Los resultados obtenidos en el análisis se pueden agrupar con el trazo de fallas locales y de microfracturas frágiles que en este trabajo se definen como lineamientos y corresponden a fracturas o segmentos de fallas que han sido cubiertos por depósitos Cuaternarios (Figura 26).

En este mismo sentido, se sugiere que el ascenso de magma que dio paso a la formación de los volcanes del CVMGS se dio a través de fallas y fracturas, que se clasifican como activas y presentan actividad sísmica de acuerdo con la concentración sismogénica en el sector.

La mayor concentración de sismos corticales asociados a los principales sistemas de fallas se encuentra hacia el sector NW de la zona de estudio; estos alcanzan un rango de profundidad entre 1 y 20 km y un amplio rango de magnitud desde 0,6 hasta 3,1. Este evento se asocia al trazo de lineamientos y fracturas continuas en la zona estructuralmente influenciada por las fallas: Victoria y Afiladores. Otra concentración importante de sismos se encuentra hacia el sector SE. Estos alcanzan un rango de profundidad entre 1 y 20 km y magnitudes entre 1,5 y 1,9; la sismicidad en este sector puede relacionarse con el trazo de la falla más cercana, la falla San Francisco-Yunguillo y lineamientos paralelos al Sistema de Fallas de Río Suaza. El trazo del Sistema de Fallas de Río Suaza presenta poca actividad sísmica, a pesar de que paralelos a esta se concentran la mayoría de los volcanes del CVMGS. Estas evidencias sugieren poca actividad de la falla y como consecuencia una menor influencia sísmica en esta fracción del área de estudio. Los sismos que corresponden a procesos de subducción con un rango de profundidad entre 20 y 42 km y magnitudes entre 1,0 y 1,9 se registran en el Valle de Sibundoy.

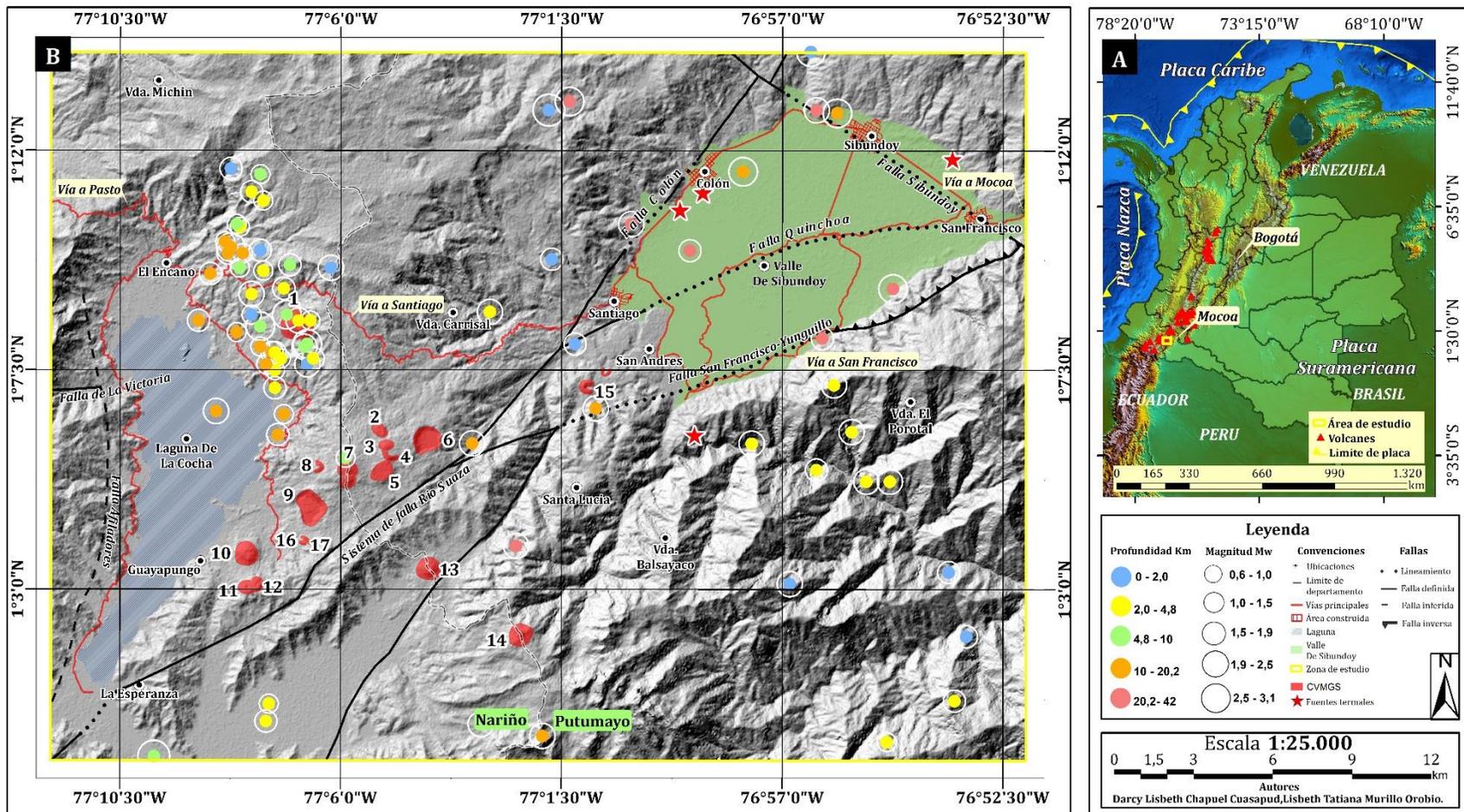


Figura 26. Mapa de sismicidad de la zona objeto de estudio. A) Distribución de estructuras volcánicas en Colombia y ubicación del área de estudio delimitada por polígono amarillo. B) Mapa de localización de sismos clasificados por magnitud y profundidad y la ubicación de las estructuras volcánicas del Campo Volcánico Monogenético Guamuéz-Sibundoy delimitados por polígonos rojos y distribución de fuentes termales ubicadas con estrellas de color rojo. Elaborado en ArcGIS a partir del DEM 12,5 m para la zona de estudio a escala 1:25.000.

5.5 Área geotérmica asociada

Las áreas geotérmicas de alta entalpia en Colombia, generalmente están relacionadas con rocas volcánicas, cuerpos intrusivos ígneos profundos y estructuras geológicas en rocas metamórficas (Botero-Gómez & López-Palacio, 2023). Estas áreas son resultado de la interacción natural del agua con fuentes de calor transmitidas desde el interior de la tierra (Martínez, 2021), se relacionan en superficie con fuentes termales que pueden ser transformadas o adaptadas por el hombre para su aprovechamiento por medio de baños termales, procesos de calefacción y generación de energía eléctrica (Rodríguez et al., 2019). En la zona de estudio se encuentran baños termales reconocidos por la comunidad entre los que se destacan los termales El Salado ubicados en la vereda Balsayaco, aproximadamente a 4.5 km del Municipio de San Andrés. Las rocas que afloran en el sector presentan un alto grado de fracturamiento (Figura 27) lo cual permite la circulación de agua hacia superficie.



Figura 27. Aguas termales El Salado ubicados en la vereda Balsayaco, estas corresponden a aguas calentadas por aporte volcánico o fallamiento (01°06'00" N, 76°58'25" W)

Las fuentes termales corresponden con el sector SE (Figura 28) del municipio de San Andrés y estructuralmente se relacionan con procesos extensivos en dirección NE-SW evidenciados por el

trazo de lineamientos paralelos al Sistema de Fallas de Río Suaza y la falla San Francisco-Yunguillo. Estas fallas se consideran activas debido a registros de sismicidad analizados en el ítem anterior mostrado en la Figura 26.

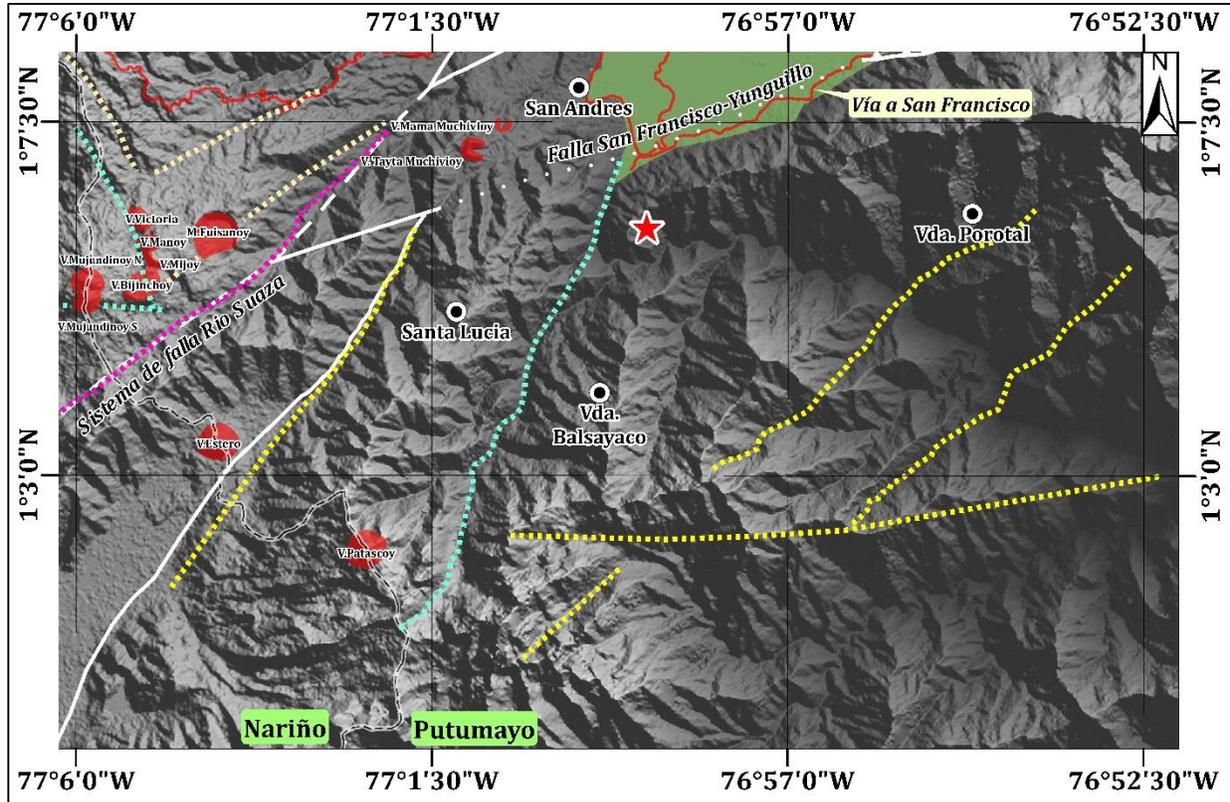


Figura 28. Sector SE del área de estudio donde se localiza una de las fuentes termales (El Salado) del sector relacionada con la influencia tectónica de la falla San Francisco-Yunguillo o aporte de calor de los volcanes Muchivioy.

Los lineamientos geológicos relacionados con fracturas, como fallas y uniones, actúan como rutas de flujo para fluidos calientes o los llamados fluidos geotérmicos en yacimientos geotérmicos (Soliman, 2019). Teniendo en cuenta que el Valle de Sibundoy se encuentra estructuralmente influenciado por el trazo de las fallas: 1) San Francisco-Yunguillo con componente inversa, 2) Colón y Quinchoa ambas con componente en rumbo dextral, y 3) Sibundoy con componente dextral, y una serie de lineamientos (Figura 29), se sugiere: 1) Que los sistemas de fallas en el sector propician mayor fracturamiento permitiendo la circulación de las aguas que posteriormente ascienden a través de zonas fracturadas. Y 2) la fuente de calor en la zona se relaciona probablemente con los volcanes Taita y Mama Muchovioy dada su cercanía con las fuentes termales reportadas o a su vez con el ascenso de magma que debido a las condiciones no lograron llegar a superficie.

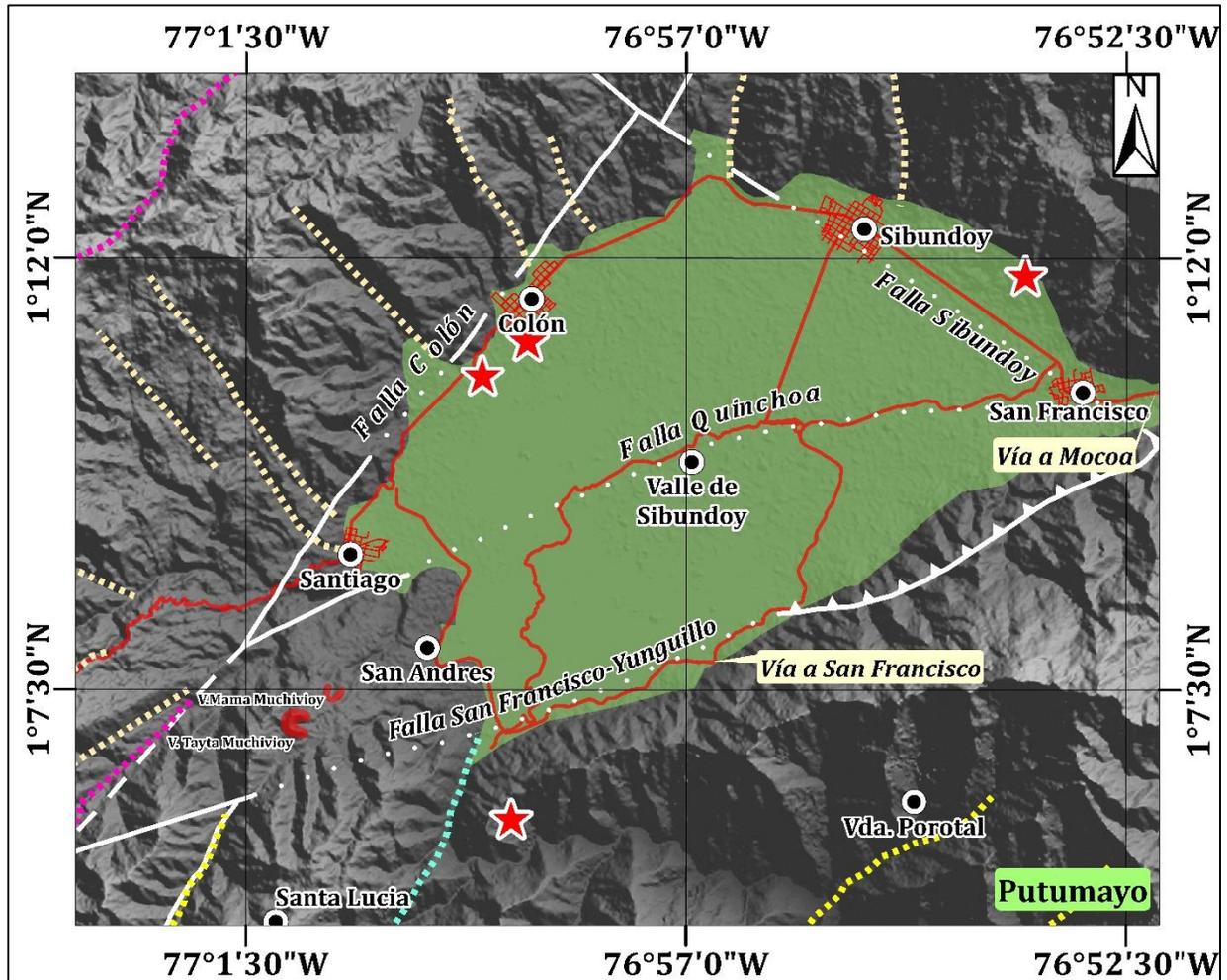


Figura 29. Sector NE del área de estudio donde se concentran las fuentes termales del sector, debido a la influencia de las fallas: Colón, Sibundoy y Quinchoa

6. Discusión

6.1 Rasgos morfoestructurales

El análisis de la morfología y la morfometría del terreno posibilita la comparación de distintos relieves y litologías para caracterizar zonas con influencia tectónica y comportamiento estructural diferente (Keller et al, 1996), la interacción de forma gradual entre los procesos tectónicos y geomorfológicos conduce a un modelamiento del paisaje, donde se desarrollan geoformas con rasgos característicos individuales que son esenciales para determinar cuáles son los procesos que contribuyen en su transformación. (Einsele, 1992). Los procesos tectónicos generan y modifican la topografía del terreno, sin embargo, también deben tenerse en cuenta los procesos superficiales que tienden a destruir o erosionar las geoformas dadas como respuesta a la dinámica de la superficie terrestre (Burbank & Anderson, 2013). A grandes rasgos, parte de la geomorfología de la zona de estudio está controlada por los sistemas de fallas y fracturas bajo un régimen transtensional. A escala regional, el Sistema de Fallas Algeciras a lo largo de su trazo es responsable de la formación de cuencas *pull-apart* que al sur de Colombia modela la morfología del Valle de Sibundoy, además las múltiples trazas de rumbo asociadas a este sistema que se extienden en dirección NE-SW y fallas transversales en dirección NW-SE actúan como límites estructurales de las unidades y subunidades geomorfológicas descritas. Estos procesos estructurales dan lugar a ocurrencia de deformaciones del terreno en superficie como grandes deslizamientos asociados al trazo de fallas y lineamientos cercanos.

Sector NE: A escala local los límites estructurales del Valle de Sibundoy están marcados por una zona de fallas de rumbo con tendencia NE-SW y fallas transversales NW-SE (Figura 30-A). En el flanco E el relieve montañoso exhibe la mayor evidencia morfológica relacionada con un componente estructural, puesto que la falla San Francisco-Yunguillo que se extiende a lo largo de este flanco, es responsable del desarrollo de escarpes facetados, orientados al NW, con pendientes que alcanzan valores superiores a los 20°. Las facetas inciden en el patrón de drenaje subparalelo donde el flujo de agua drena en dirección de la forma de las mismas (Figura 30-B). En los flancos W y N del valle limitados por la falla Colón y Sibundoy, respectivamente, a pesar de que actualmente se clasifican como laderas erosivas disectadas, aún se reconocen lineamientos en dirección NW-SE y NE-SW transversales a los sistemas de fallas mencionados como se muestra en la Figura 30-B. Finalmente, el Valle de Sibundoy que representa la morfología plana del sector NE de la zona de estudio, tiene influencia de las fallas que limitan sus flancos como se planteó anteriormente y se incluye además la falla Quinchoa; estas probablemente son las responsables de las fuertes deflexiones de los canales de drenaje principalmente en los ríos San Francisco, San Pedro y Sinsayaco (Figura 30-B).

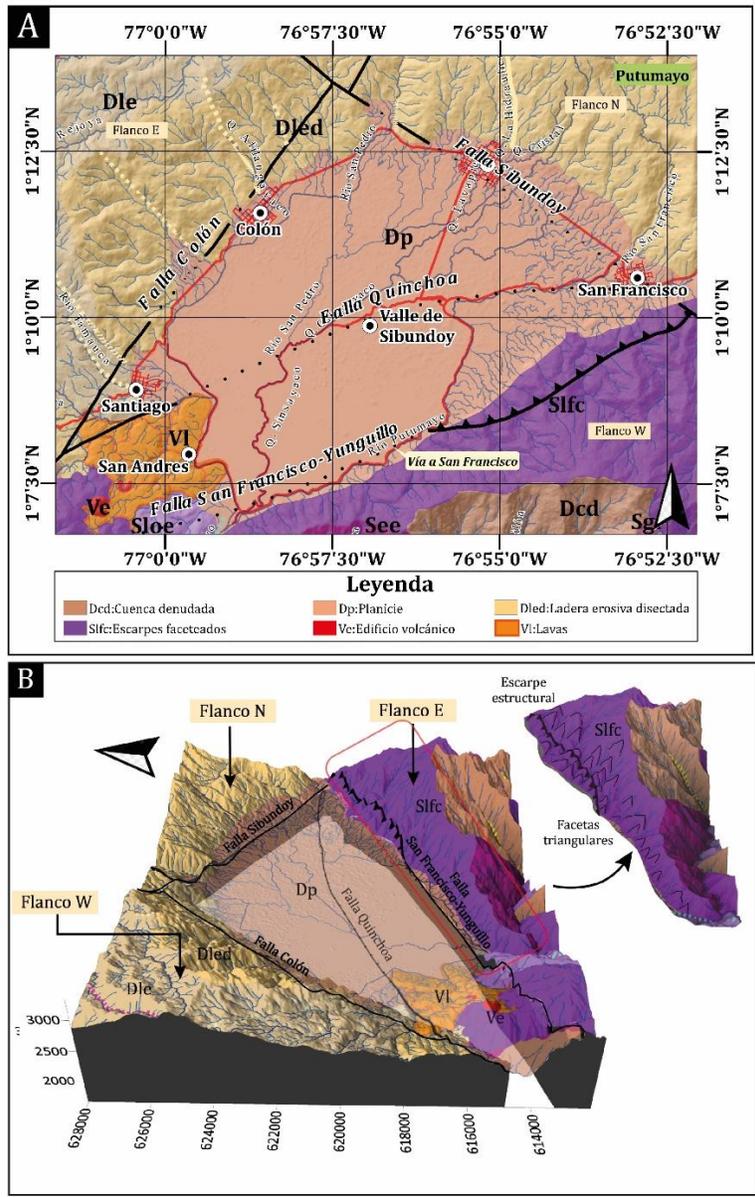


Figura 30. Representación esquemática del sistema morfoestructural del sector NE. **A)** Geomorfología, sistema de falla, cinemática y lineamientos del sector NE en vista de planta. **B)** esquema geomorfológico 3D ilustrando los rasgos morfo-estructurales del sector NE.

Por otro lado, en el sector conocido como Balsayaco se observa una serie de deslizamientos asociados con rocas altamente fracturadas y meteorizadas que se localizan a 1,65 km del trazo principal de la falla San Francisco-Yunguillo (Figura 31). Estos fenómenos geológicos que están colapsando la superficie del terreno se asocian con la cercanía que tienen con la zona de daño de la falla que incide en la inestabilidad de la zona, lo anterior combinado con otros procesos erosivos generados por el agua en temporada de lluvia y las altas pendientes dan lugar al desprendimiento de grandes volúmenes de roca (Figura 32).



Figura 31. A) Panorámica de deslizamiento reciente y de gran magnitud en el sector “El Salado” vereda Balsayaco, se observa bloques de roca mayores a 1m de diámetro y la inestabilidad de la zona ($01^{\circ} 06'13''N$, $76^{\circ} 58'27''W$). B) Rocas altamente fracturadas.



Figura 32. A) Panorámica de deslizamiento de gran magnitud en la vía que conduce a la vereda El Porotal ($1^{\circ}05'55''N$, $76^{\circ}58'25''W$). B) Contacto intrusivo entre rocas de diferente composición.

Sector SE: Esta zona representa la parte más elevada con pendientes mayores a 31° y geomorfologías muy escarpadas. En este sector predominan un conjunto de relieves formados por un control estructural que corresponden a escarpes, lomeríos estructurales y espolones estructurales, debido a la presencia de fallas con movimiento de rumbo con tendencia NE-SW paralelas al sistema de fallas de Río Suaza. Estas fallas a su vez son las responsables de las deflexiones que presenta el río Putumayo, cuyo análisis permitió definir la cinemática dextral de las mismas. Además, en el área de estudio el diaclasamiento con tendencia principal NE-SW sugiere la influencia tectónica de estas fallas (Figura 33). De la misma manera, al SE el trazo del Sistema de Falla del Río Suaza, genera una alta concentración de lineamientos rectilíneos que influyen en la disposición de las cuencas siguiendo una alineación paralela en sentido NE-SW.

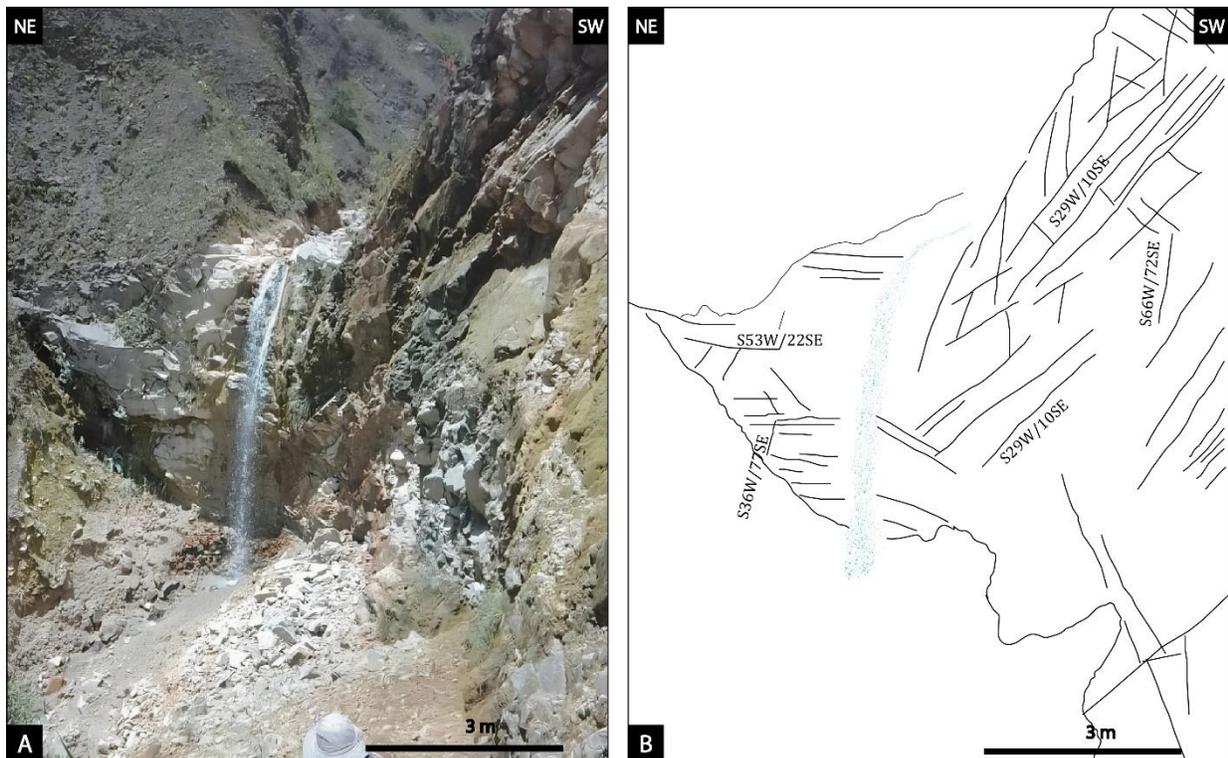


Figura 33. A) Diaclasas en afloramiento rocoso en el sector conocido como Garganta de Balsayaco ($01^\circ 06'15''N$, $76^\circ 58'58''W$). B) Dibujo esquemático del afloramiento.

Otros rasgos geomorfológicos que reflejan la influencia estructural en el sector SE es la presencia de ganchos de flexión que afectan depósitos que han sido cartografiados como Formación Saldaña y Batolito de Mocoa por Nuñez (2003), por lo que indicaría actividad tectónica durante el Jurásico o posterior. Se sugiere que el lineamiento en dirección NNE-SSW transversal a la falla San Francisco-Yunguillo se puede interpretar como una falla con cinemática dextral que además controla el curso del río Viginchoy. En este río, en el cual se evidencia un alto grado de diaclasamiento y fracturamiento se resalta la tendencia en sentido NE-SW dado que ésta coincide con la orientación de la falla propuesta. Sin embargo, la tendencia principal va orientada al NW-

SE, lo que indicaría que en la zona deben existir lineamientos que estén ejerciendo influencia en este sector con orientación NW-SE y que no se pueden reconocer en la interpretación (Figura 34).

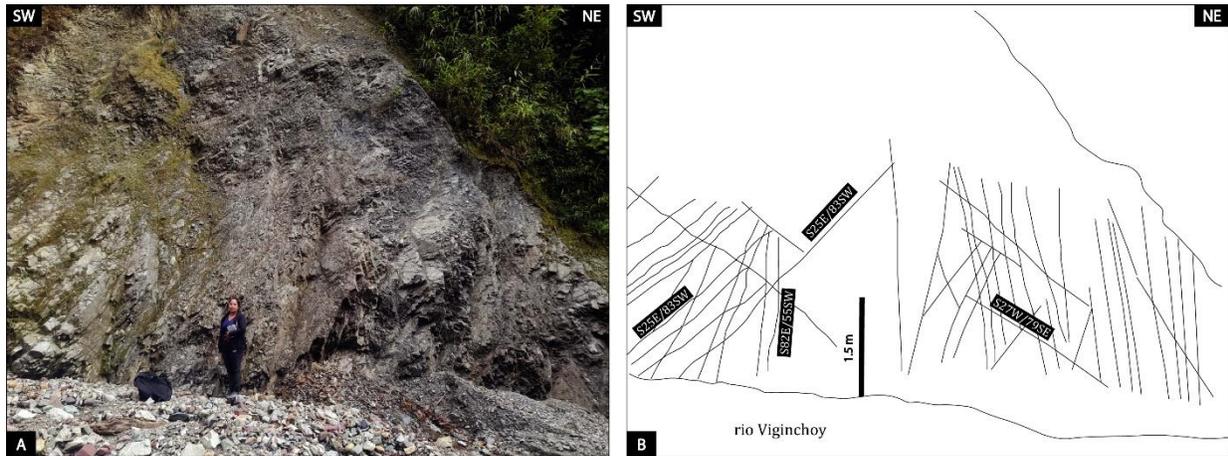


Figura 34. A) Diaclasas en afloramiento rocoso en la vertiente del río Viginchoy ($01^{\circ} 05'13''N$, $76^{\circ} 59'08''W$). B) Dibujo esquemático del afloramiento.

Adicional a esto, el análisis morfoestructural permite proponer una falla paralela a la falla San Francisco-Yunguillo que define su trazo por el notable lineamiento del río Alguacil en dirección ENE-WSW. Además, se asocia un gancho de flexión y escarpes estructurales a la zona de influencia ejercida por la misma y se le atribuye cinemática dextral pues desplaza a otras fallas longitudinales (Figura 35).

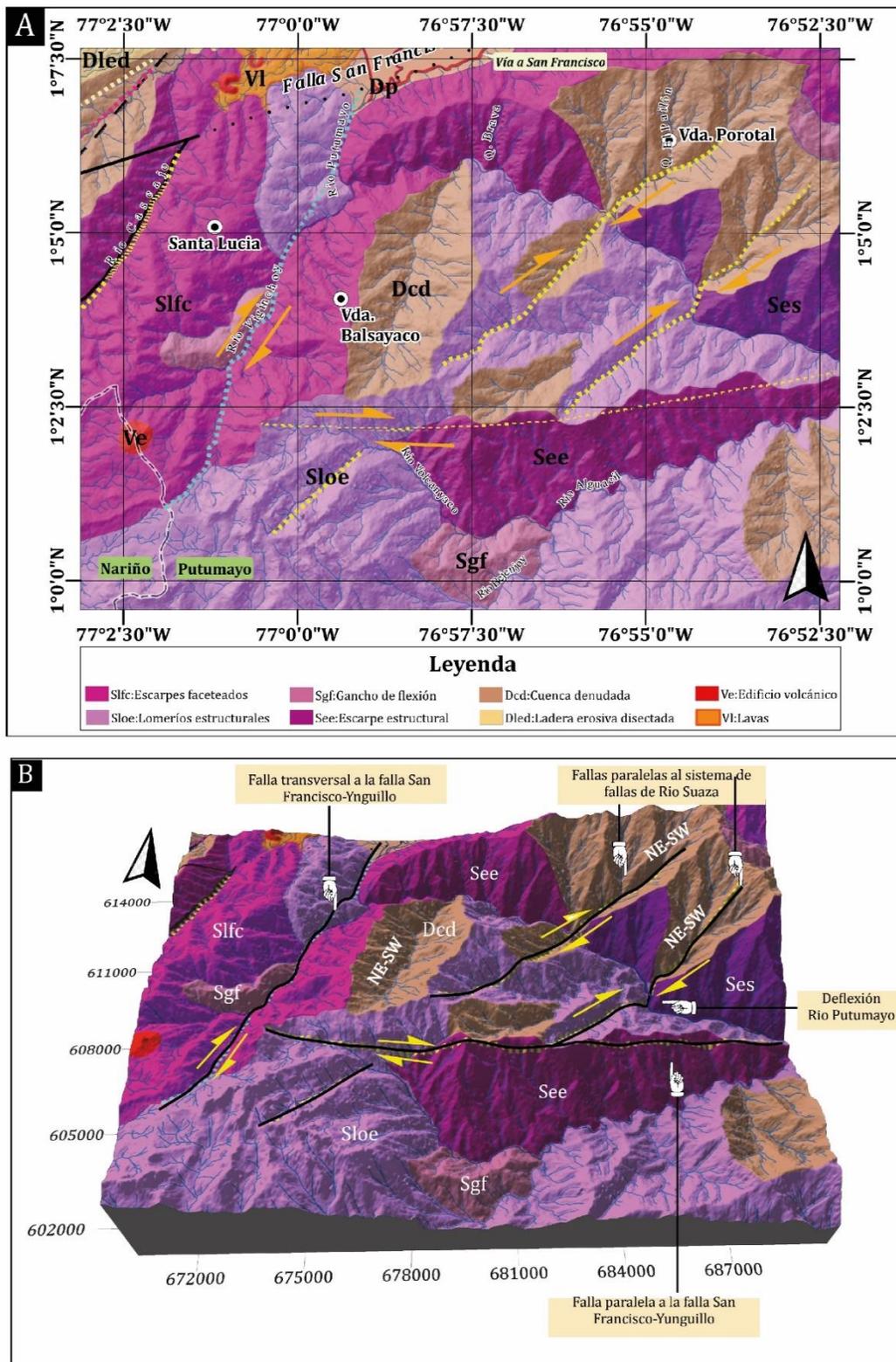


Figura 35. Representación esquemática del sistema morfoestructural del sector SE. **A)** Geomorfología, sistema de falla, cinemática y lineamientos del sector SE en vista de planta. **B)** esquema geomorfológico 3D ilustrando los rasgos morfo-estructurales del sector SE.

Sector SW: En esta zona el control estructural obedece al trazo en dirección NE-SW del Sistema de Fallas de Río Suaza con cinemática dextral y una falla paralela al mismo que controla el curso del río Cascajo puesto que fluye rectilíneo al trazo de falla en dirección NE-SW. De igual forma, se sugiere cinemática dextral dado la deflexión de la quebrada El Laurel. Como respuesta a los procesos estructurales generados por estas fallas se da la formación de un relieve montañoso alargado que conserva la misma dirección NE-SW de las fallas que limitan sus flancos; el escarpe estructural del flanco W con orientación preferencial al NE, está limitado por el Sistema de Fallas de Río Suaza, mientras que el escarpe estructural del flanco E orientado al SE, está limitado por una falla paralela al Sistema de Fallas de Río Suaza (Figura 37). A esta última también se le puede atribuir otros rasgos morfológicos presentes en la vertiente oriental del río Cascajo, como la formación de escarpes faceteados y lomeríos estructurales. De la misma manera, el trazo de la Falla Afiladores al E de la Laguna de la Cocha desarrolla facetas triangulares y lineamientos rectilíneos que van en la disposición de cadenas montañosas alargadas siguiendo una alineación paralela en sentido NW-SE (Figura 36).

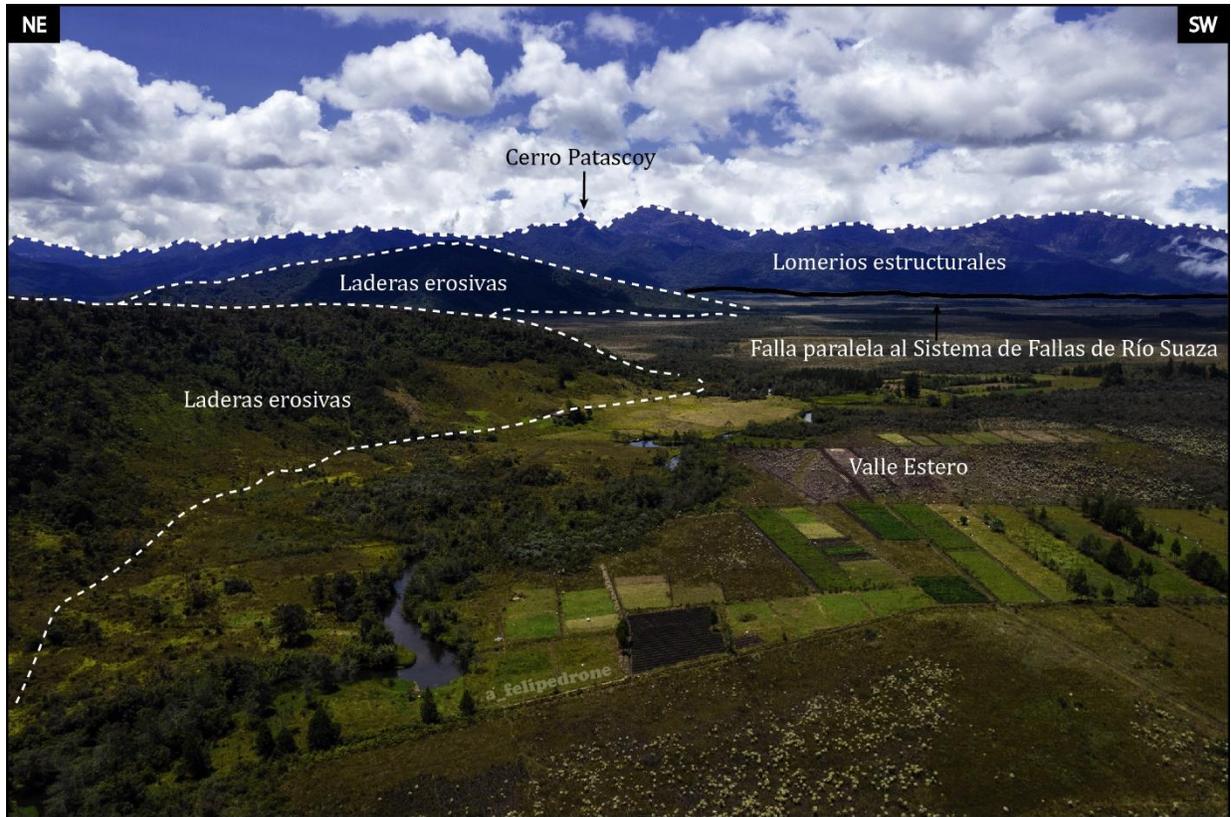


Figura 37. Foto panorámica del Valle Estero, al fondo se observa el cerro Patascoy, lomeríos estructurales y laderas erosivas disectadas ubicadas al SW de la zona de estudio (Créditos: Andrés Felipe Cabrera R. @a_felipedrone).

Por otro lado, debido a que las zonas de falla forman fracturas que facilitan el ascenso de intrusiones magmáticas a superficie (Faulds et al., 2015; Piquer et al., 2019; Botero-Gómez et al., 2022;), es importante resaltar la interacción entre la existencia de estructuras volcánicas y el control estructural asociado a su distribución espacial; así, se resalta la existencia de lineamientos volcánicos que pueden reflejar un control sobre la propagación del magma y el control de fallas preexistentes sobre su distribución (Le Corvec et al., 2013, Gómez-Vasconcelos et al., 2020, Grosse et al., 2020). Además, se tiene en cuenta los procesos distensivos que ejerce el SFA en la zona de estudio (Velandia et al., 2005). En este sentido para el sector SE evidencian dos alineaciones prominentes: 1) Alineación de los volcanes Victoria, Manoy, Mijoy y Bijinchoy que coinciden con el trazo de una falla dextral con orientación NNW-SSE trasversal al sistema de fallas de Río Suaza. Y 2) Alineación de los volcanes Mujundinoy Norte y Sur, Corota y Bijinchoy que coinciden con el trazo de una falla dextral con orientación E-W trasversal al sistema de fallas de Río Suaza. Este control en la alineación de los volcanes y la distribución espacial en general agrupada de los volcanes Guayapungo, Encano y Guamuez, Laurel, Santa Teresita, Maar Fuisanoy, Maar Yaku representan el entorno adecuado para que el magma ascienda a la superficie

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

Sector NW: En este sector el relieve hace parte de morfologías menos escarpadas como son las laderas erosivas y laderas erosivas disectadas (Figura 38), sin embargo, a partir del análisis de los resultados obtenidos se reconoce rasgos lineales que están asociados a fracturas, fallas y lineamientos. En este orden de ideas, es posible reconocer el trazo de la falla La Victoria en sentido NE-SW con cinemática dextral que es cortada y desplazada por dos fallas de desplazamiento sinistral trasversales en sentido WNW-ESE y NNW-SSE. Finalmente, otra falla al norte del poblado del Encano es cortada con desplazamiento sinistral por una falla transversal a la falla Afiladores (Figura 39).

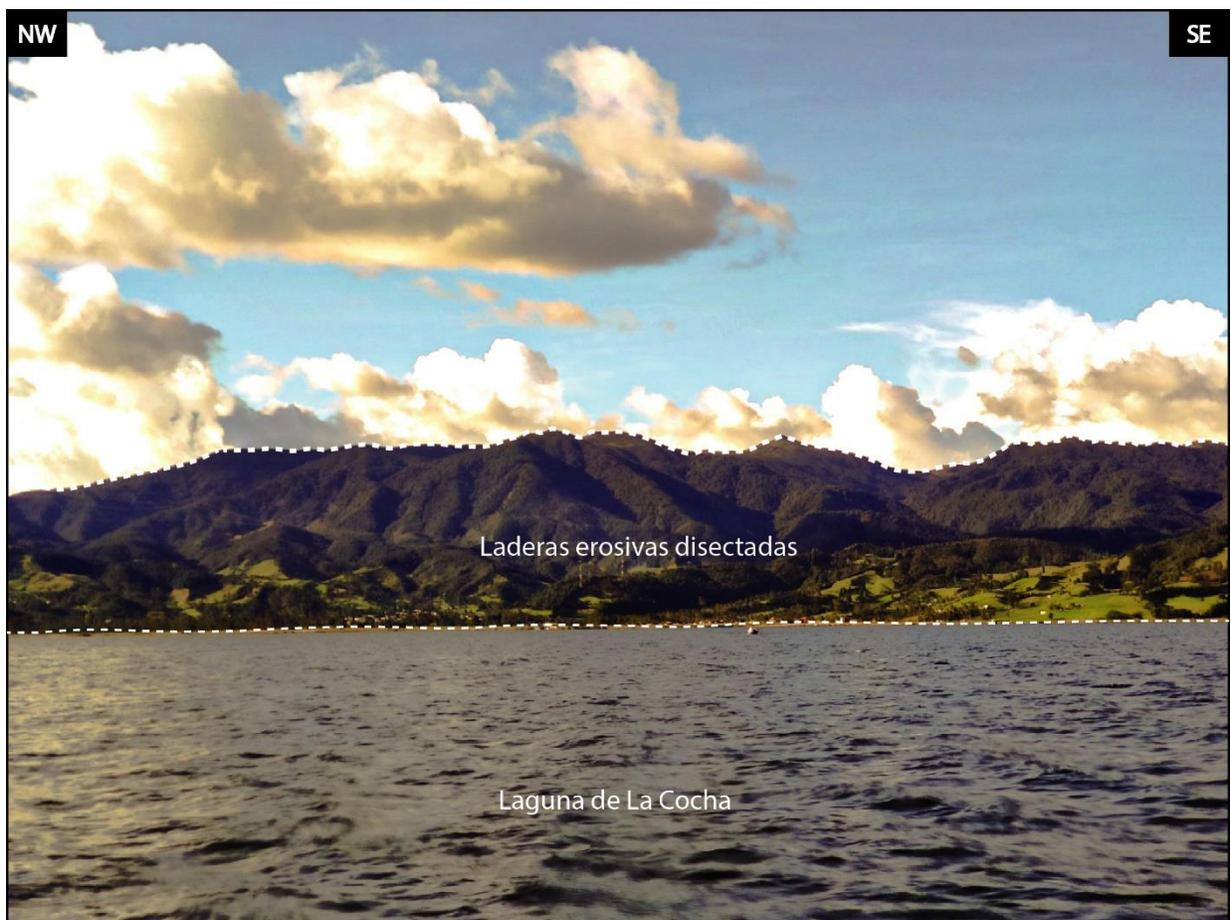


Figura 38. Foto panorámica del sector norte de la Laguna de La Cocha; al fondo se observan laderas erosivas disectadas. (Créditos: Víctor Camilo Rivera Lara).

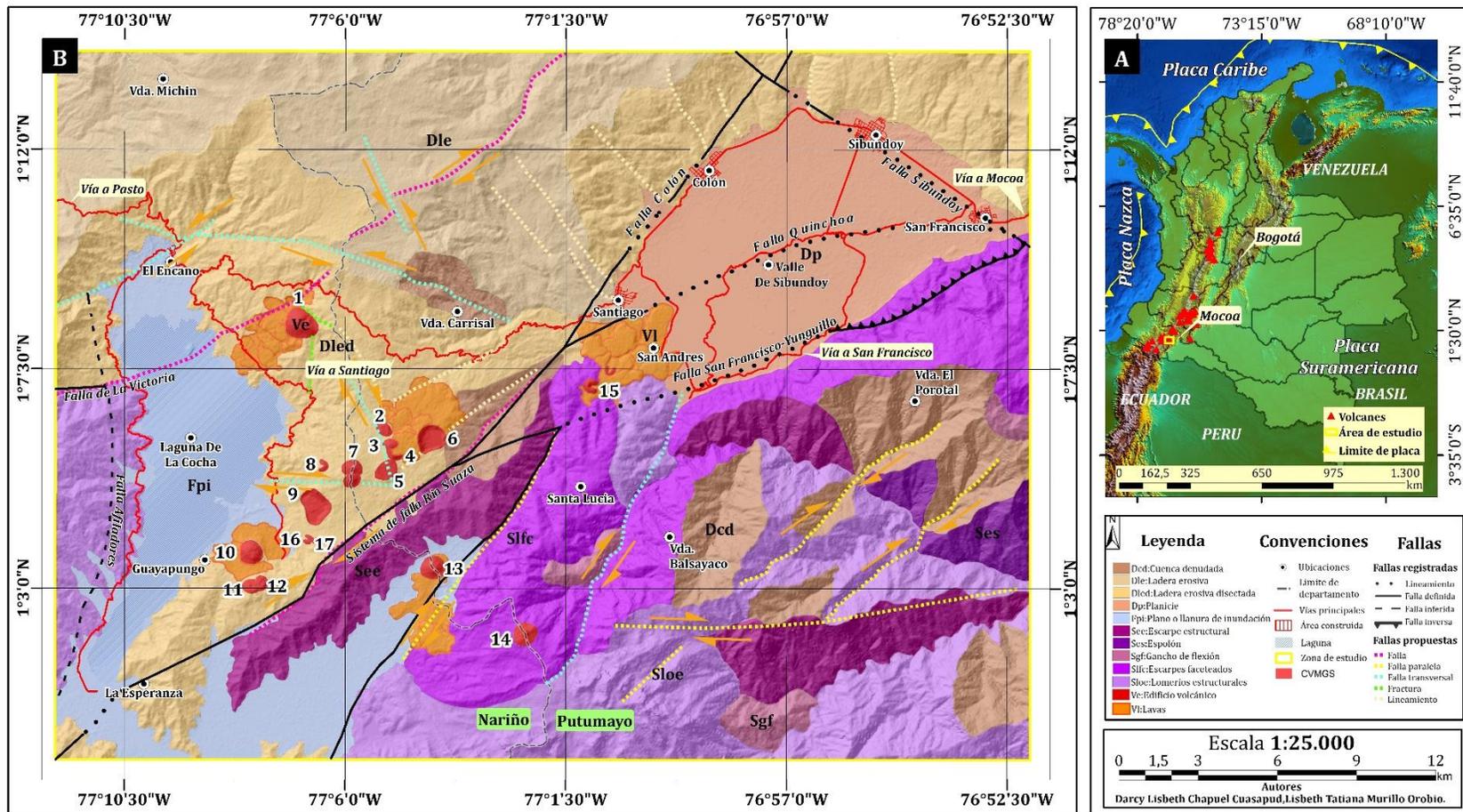


Figura 40. Relación de las unidades geomorfológicas con lineamientos propuestos en la zona objeto de estudio. **A)** Distribución de estructuras volcánicas en Colombia y ubicación del área de estudio delimitada por polígono amarillo. **B)** Mapa de la relación entre la geomorfología con los lineamientos propuestos, se incluye principales fallas de la zona de estudio reportadas por el Servicio Geológico Colombiano (2020) y Restrepo et al., (2021) las cuales fueron modificadas para este estudio. Elaborado en ArcGIS a partir del DEM 12,5 m. Escala 1:25.000.

6.2 Fallamiento

Las redes de drenaje presentan evidencias de la actividad tectónica actual, el tectonismo activo influye directamente en las formas de relieve, en la evolución, comportamiento y distribución de las redes de drenaje, estos son elementos del relieve susceptibles a perturbaciones tectónicas y/o climáticas (Pérez- Peña et al., 2004). La evolución de los diferentes sistemas de drenaje está relacionada con factores como: 1) la resistencia de las rocas a los procesos erosivos, y 2) un control estructural que influya en el comportamiento de los drenajes haciendo que estos sigan la tendencia de fallas o sean desviados por las mismas (Mount, 1954). Por otro lado, el análisis de drenaje en particular en una planicie proporciona pistas estructurales indetectables por otros métodos (Howard, 1967). Teniendo en cuenta esto, en el sector NE (Figura 41-A), se resaltan las tendencias de los ríos que drenan la planicie del Valle de Sibundoy en donde se encuentran las mayores concentraciones de anomalías en los drenajes de la zona. El cauce del río San Francisco al norte, está alineado con el trazo de la falla Quinchoa, sin embargo, es desviado probablemente por el macizo rocoso o por una falla hasta alinearse con el trazo de la falla San-Francisco Yunguillo (Figura 41-B). De la misma manera, el río San Pedro está controlado por el trazo de la falla Colón (Figura 41-C) en el cual se observan varias anomalías angulares (Figura 41-C).

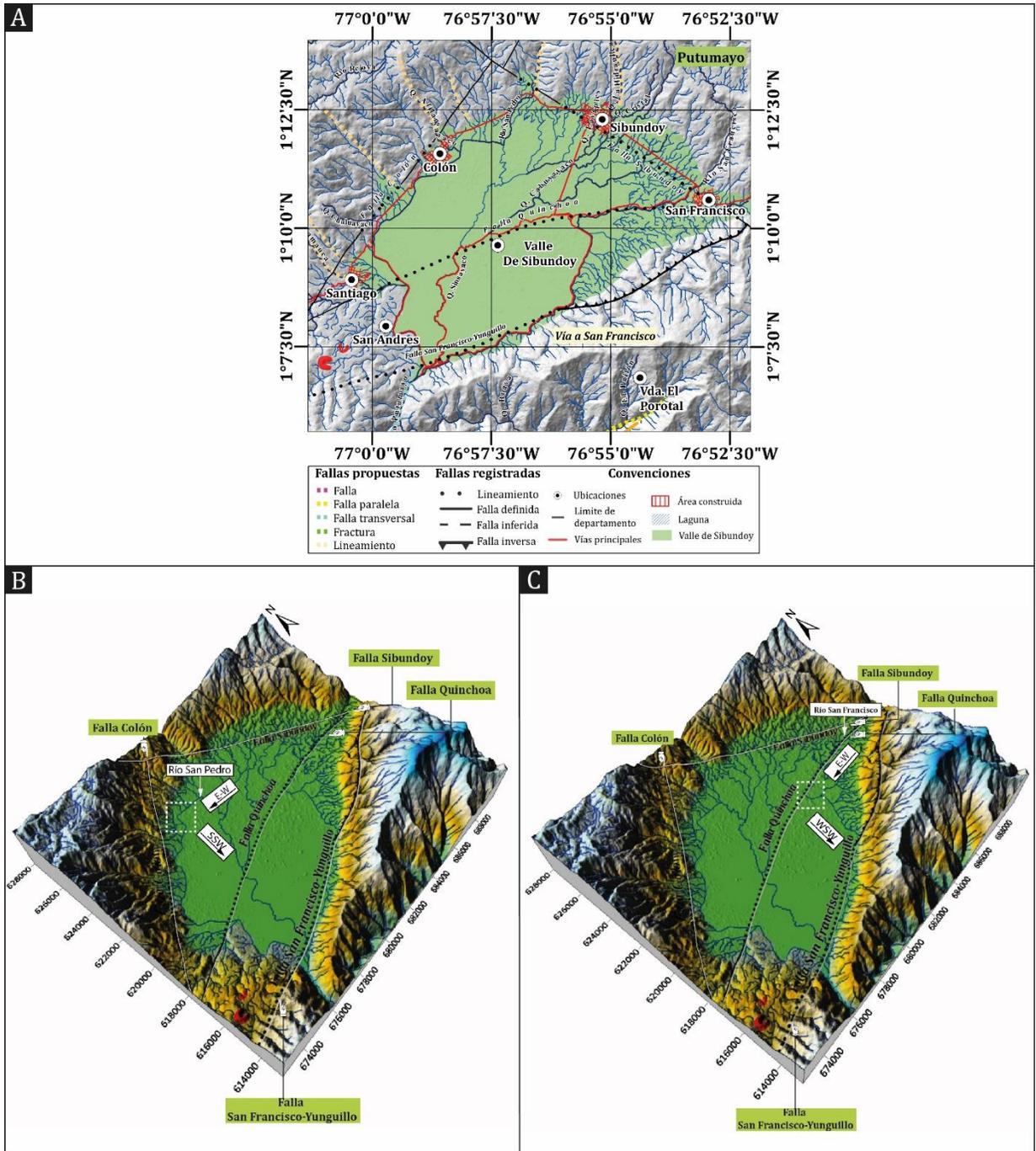


Figura 41. A) Sector NE del área de estudio. B) Zoom del cauce del río San Francisco controlado por el trazo de la falla Quinchoa. C) Zoom del cauce del río San Pedro controlado por la falla Colón y anomalías angulares.

En el sector SE del Valle de Sibundoy (Figura 42- A), la relación de la deflexión abrupta del río Alguacil-Bejenjoy (Figura 42-B) sugiere que la desviación en su trayectoria se debe a la influencia de un gancho de flexión. Del mismo modo se asocia el trazo del río Putumayo a un control estructural de la zona asociado con la falla San Francisco-Yunguillo que pasa al borde de un escarpe en el que se reconoce el desarrollo de facetas triangulares. Los segmentos largos lineales de los ríos Cascajo y Viginchoy fluyen en dirección NNE-SSW, se sugiere que el río Cascajo fluye por el trazo de una falla existente con cinemática dextral y el río Viginchoy está asociado con el trazo de un lineamiento; este último se encuentra transversal a la falla San Francisco-Yunguillo y su cinemática se propone dada su relación con un gancho de flexión (Figura 42-C). Al SE de la zona se propone el trazo de tres fallas: 1) la falla paralela a la falla San Francisco-Yunguillo en dirección ENE-WSW, la cual indica una cinemática dextral debido al desplazamiento de las fallas trasversales a la misma en dirección NE-SW, y 2) dos fallas en sentido de rumbo NE-SW paralelas al Sistema de Fallas de Río Suaza cuya cinemática dextral se deduce de la deflexión del río Putumayo en sentido NNW-SSE-WNW-ESE (Figura 42-D).

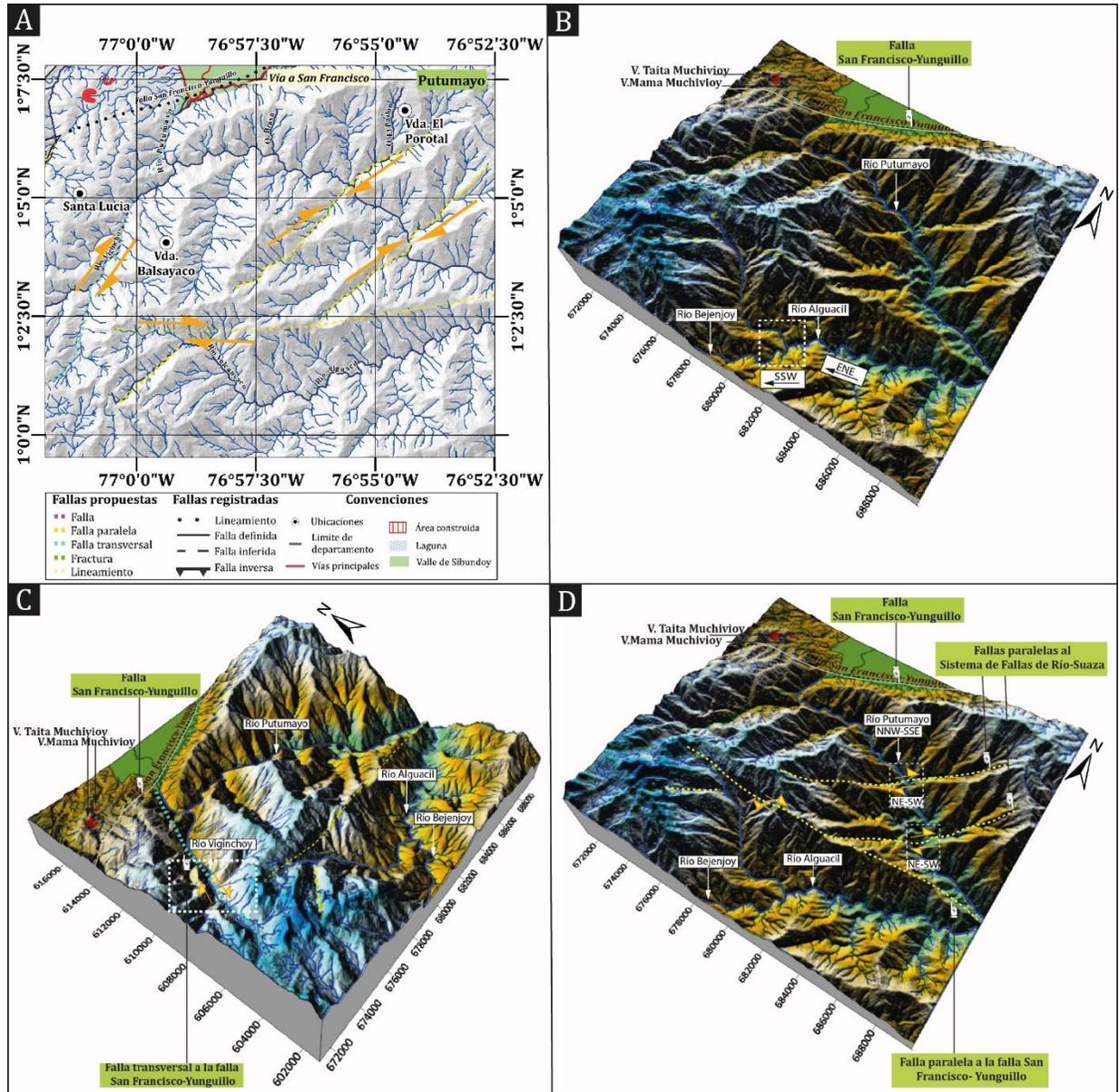


Figura 42. A) Sector SE del área de estudio. **B)** Zoom de la deflexión del río Alguacil-Bejenjoy. **C)** Cauce del río Viginchoy asociado con una falla transversal a la falla San Francisco-Yunguillo. **D)** Fallas en sentido de rumbo NE-SW paralelas al Sistema de Fallas de Suaza cuya cinemática dextral se deduce de la deflexión del río Putumayo en sentido NNW-SSE-WNW-ESE.

De acuerdo con los lineamientos asociados a la deflexión de los drenajes se propone la cinemática de ciertas fallas. De este modo, la rectilinealidad de los ríos Encano y Chaupiyaco sugieren la influencia de una zona de falla por la cual el drenaje sigue las fisuras ocasionadas por el evento deformativo; su trazo se propone como una falla con sentido de rumbo WNW-ESE y cinemática sinistral, siendo la responsable del desplazamiento de la falla de La Victoria (Figura 43). Del mismo modo, el trazo lineal del río Negro y la quebrada Fuisanoy en dirección NE-SW está asociada con un lineamiento acorde al Sistema de Fallas de Río Suaza. Aquí, la deflexión del río Negro en dirección NE-SW, NNW-SSE y NE-SW sugiere la cinemática dextral de las fallas en

la zona que influyen tanto en el drenaje como en las geoformas entre las que se destacan lomeríos estructurales.

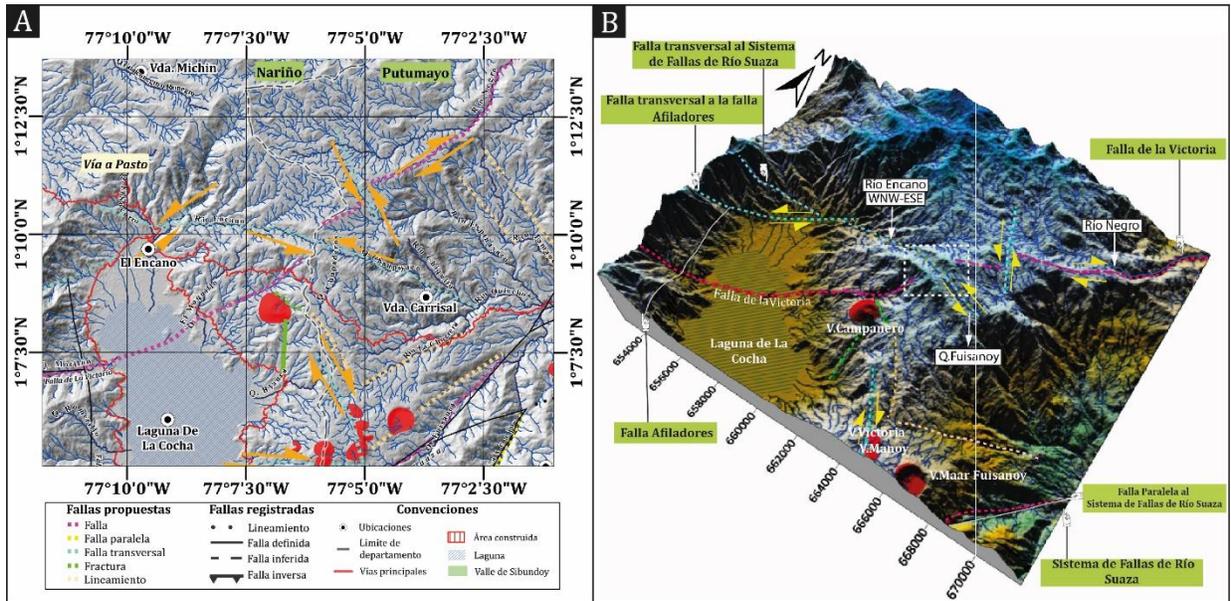


Figura 43. A) Sector NW del área de estudio. **B)** Zoom del sector NW del área de estudio donde se resalta el trazo de fallas transversales al Sistema de Fallas de Río Suaza, la interacción entre las fallas y la dirección en el cauce de ríos y quebradas del sector permiten asignar la cinemática propuesta para estas fallas.

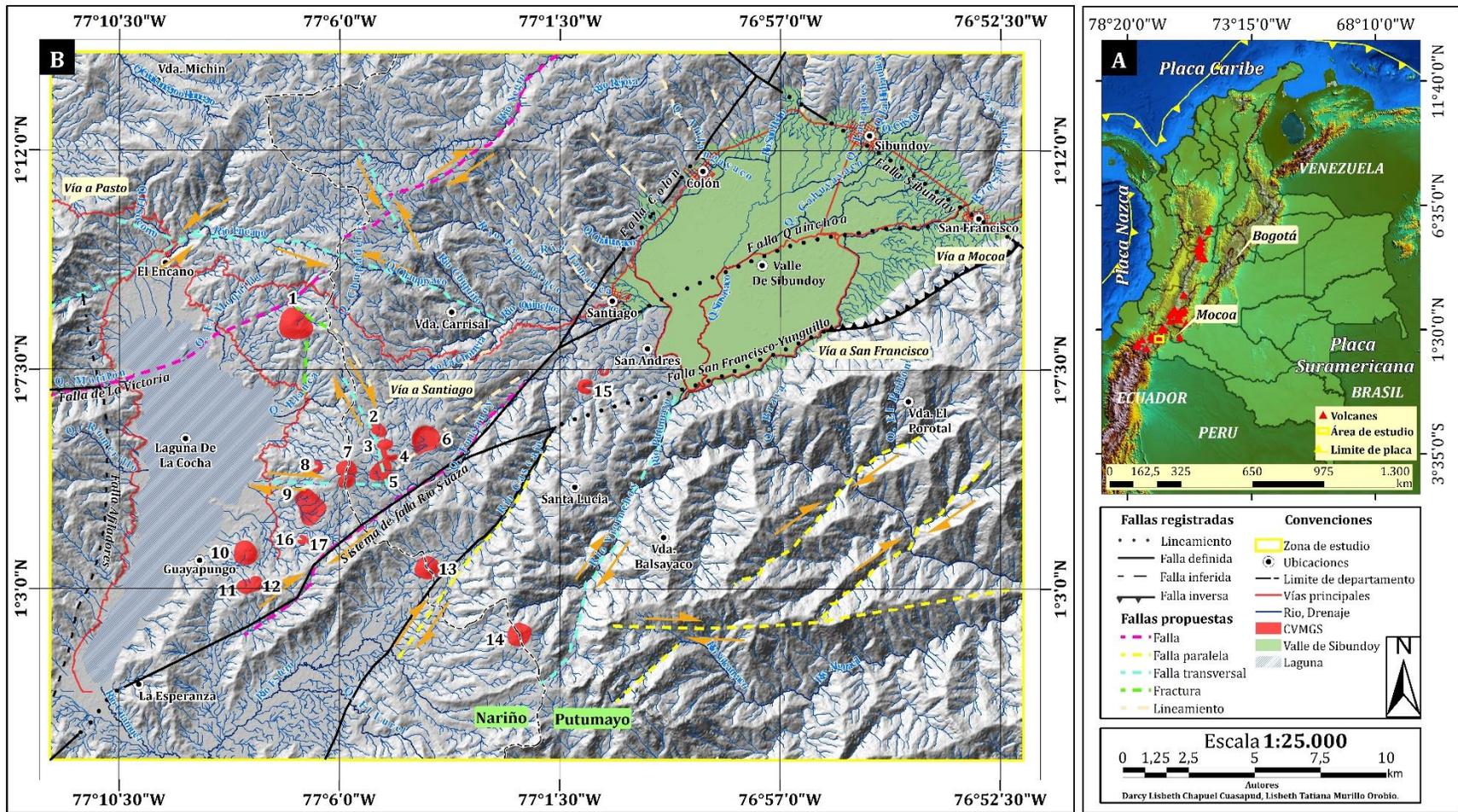


Figura 44. Mapa de fallas y lineamientos asociados con los sistemas de drenajes. **A)** Distribución de estructuras volcánicas en Colombia y ubicación del área de estudio delimitada por polígono amarillo. **B)** Mapa de fallas propuesta con cinemática atribuida a partir del análisis de drenajes y su relación con fallas que han sido reportadas por el Servicio Geológico Colombiano (2020) y Restrepo et al., (2021) las cuales fueron modificadas para este estudio. Elaborado en ArcGIS a partir del DEM 12,5 m. Escala 1:25.000.

6.3 Modelo estructural del campo volcánico

Los sistemas de fallas han sido asociados con la formación de campos volcánicos monogenéticos (e.g. Botero-Gómez et al., 2018; Osorio et al., 2018; Rivera-Lara, 2021; Botero-Gómez, 2022; Fitz Alvira, 2022, Vargas-Arcila et al, 2023,). Así, se ha evidenciado una relación directa entre rocas del basamento, sistemas de fallas regionales y locales y estructuras de origen volcánico (Tunstall et al., 2005). Estas a su vez influyen en la sismicidad y variaciones hidrotermales (Molin et al., 2003); Botero-Gómez et al., (2018) asocia los cruces de fallas entre sí y zonas de debilidad con espacios de dilatación a través de los cuales asciende el magma, atribuyendo la formación de los volcanes del Campo Volcánico Monogenético Villamaría-Termalés (CVMVT) a mecanismos como el cruce y desplazamiento de fallas con rumbo ortogonal, sintaxis tectónica dilatacional y curvaturas de falla con desplazamiento de rumbo. Los volcanes pueden encontrarse alineados preferencialmente sobre el trazo de fallas como es el caso de los 14 volcanes pertenecientes al CVMVT (Botero-Gómez et al., 2018). Así, la relación de los campos volcánicos monogenéticos con el control estructural puede contribuir al entendimiento de la distribución y temporalidad de los mismos. Vargas, (2020) asigna un control estructural a la zona donde se emplazaron los volcanes Las Margaritas a través de la interacción entre fallas y el escalonamiento que generó fracturas alargadas propicias para el ascenso de magma. Los campos volcánicos monogenéticos difieren con respecto a los campos volcánicos poligenéticos principalmente en que la cantidad de magma producto de las erupciones es menor; dicho esto, el emplazamiento del vulcanismo monogenético se asocia con mecanismos que ejercen un control estructural permitiendo una relación espacial de las geoformas en zonas con influencia tectónica (Le corvec et al., 2013).

Las fallas regionales y su efecto en la deformación frágil, así como la dirección de lineamientos y zonas de fractura que se destacan en el área de estudio (Figura 45), se comportan como los conductos por los cuales se dio la circulación de magma que contribuyó en la formación del CVMGS. Estas fallas longitudinales con desplazamiento de rumbo vertical en dirección NE-SW asociadas con el Sistema de fallas de Algeciras, abarcan un gran tramo del área de estudio y forman zonas de distensión debido a la expresión neotectónica de los trazos que componen este sistema que influye hacia el sur del país (Velandia et al., 2001) (Figura 45).

De acuerdo con los resultados presentados en este trabajo y las cinemáticas propuestas para las fallas en el área de estudio (Figura 45), se plantean por lo menos siete escenarios para el emplazamiento del vulcanismo monogenético en el Valle de Sibundoy (Figura 46). Estos escenarios se proponen teniendo en cuenta los registros geomorfológicos actuales y asumiendo actividad sísmica de las fallas implicadas durante el momento del emplazamiento de magma hacia superficie.

En este mismo sentido los escenarios favorables como mecanismos para su ascenso se asumen con disponibilidad de magma superficial y fracturamiento profundo. De acuerdo con los registros sísmicos actuales se tienen sismos con profundidades de hasta 42 km, la concentración de estos se da principalmente en el Valle de Sibundoy y se asocia con el trazo de la falla San Francisco-Yunguillo y la Falla Quinchoa que es uno de los ramales del Sistema de Falla de Río Suaza. Si existiese disponibilidad de magma y una fractura lo suficientemente profunda, el magma podría ascender por medio de alguno de los siguientes mecanismos:

1) El trazo de una falla paralela a otra

En este escenario se incluye al Volcán Estero, no se tiene un mecanismo estructural consistente para determinar el origen de esta estructura. Sin embargo; este se encuentra espacialmente relacionado con el trazo de una falla paralela al Sistema de Fallas de Río Suaza con dirección NE-SW, por lo que se propone el ascenso de magma a través de fallas preexistentes que actualmente están cubiertas por depósitos cuaternarios (Figura 46A), estas a su vez generan fracturas en profundidad acorde con el campo de esfuerzos a la hora de su emplazamiento, las cuales funcionan como alimentadores para la intrusión del material (e.g. Fitz Alvira, 2022).

2) Curvatura en las fallas

En este escenario se incluyen a los volcanes del CVMGS que están relacionados con el trazo del Sistema de Fallas de Río Suaza. Esta falla de rumbo con cinemática dextral en dirección NE-SW, presenta curvaturas en su trazo. Así, la liberación de presión permite que se den zonas de acomodación y distensión por donde el magma pudo ascender y generar el emplazamiento de los volcanes: Encano, Guamuéz, Guayapungo, Laurel y Santa Teresita (Figura 46B).

3) Interacción de por lo menos dos sistemas de fallas

En este escenario se incluyen los volcanes Taita y Mama Muchivioy. Teniendo en cuenta que el Valle de Sibundoy es atravesado por dos fallas regionales reconocidas como la Falla Colón y San Francisco-Yunguillo, se atribuye la asociación espacial de estos volcanes con la interacción de las mismas, generando concentración de tensiones que fracturan la corteza y permiten el ascenso de magma (Figura 46C).

4) La interconexión de por lo menos dos sistemas de fracturas

En este escenario se incluye el volcán Campanero, el sector NW en donde este se encuentra está influenciado por el trazo de fallas longitudinales como el Sistema de fallas de Río Suaza, un trazo continuo a la falla la Victoria y de lineamientos uno en sentido N-S y el otro en sentido NW-SE. Así, se proponen redes de fracturas las cuales tienen una densidad suficiente para interactuar y conformar un conducto eficaz para el ascenso de material a través de la liberación de tensión generada en la zona donde se dio el fracturamiento de la corteza (Figura 46D).

5) Contrastes litológicos

En este escenario se incluye el volcán Patascoy, su formación es el resultado de un claro contraste entre las lavas, depósitos volcanoclásticos y el Batolito de Mocoa. El contacto entre estas dos unidades generó zonas de debilidad debido a la diferencia de densidades entre rocas plutónicas y volcánicas que a su vez generaron espacios de acomodación por los cuales el magma ascendió hasta superficie (Figura 46E).

6) Sintaxis tectónica dilatacional

En este escenario se incluyen los volcanes Victoria, Manoy, Mijoy, Bijinchoy, Mujundinoy Norte y Sur y la Corota, la sintaxis tectónica dilatacional consiste en la interacción de fallas con comportamiento transcurrente que se desplazan en sentidos contrarios. De esta manera en la zona de intersección se puede dar contracción o dilatación dependiendo del movimiento de las fallas. En la zona de estudio se propone que el ascenso del magma se dio a través del proceso de sintaxis tectónica dilatacional teniendo en cuenta los lineamientos propuestos que se asocian espacialmente con la alineación NNW- SSE de los volcanes: Victoria, Manoy, Mijoy y Bijinchoy y alineación E-W de los volcanes: Bijinchoy, Mujundoy Norte y Sur y la Corota. (Figura 46F).

7) El trazo de un lineamiento paralelo a una falla

En este escenario se incluyen los volcanes Maar Fuisanoy y Maar Yaku, a pesar de que el sector SW es un área cubierta por lavas de edad Neógena, se pudo evidenciar un lineamiento paralelo al Sistema de Fallas de Río Suaza que se acentúa hacia el NE del maar Fuisanoy; este sería el alimentador que permitió la formación de los maares Yaku y Fuisanoy. El ambiente húmedo o con saturación de agua en la zona y el contacto de esta misma con zonas de altas temperaturas generadas en profundidad y transmitidas a través del trazo de esta falla dieron paso a erupciones explosivas que modelaron su estructura (Figura 46G).

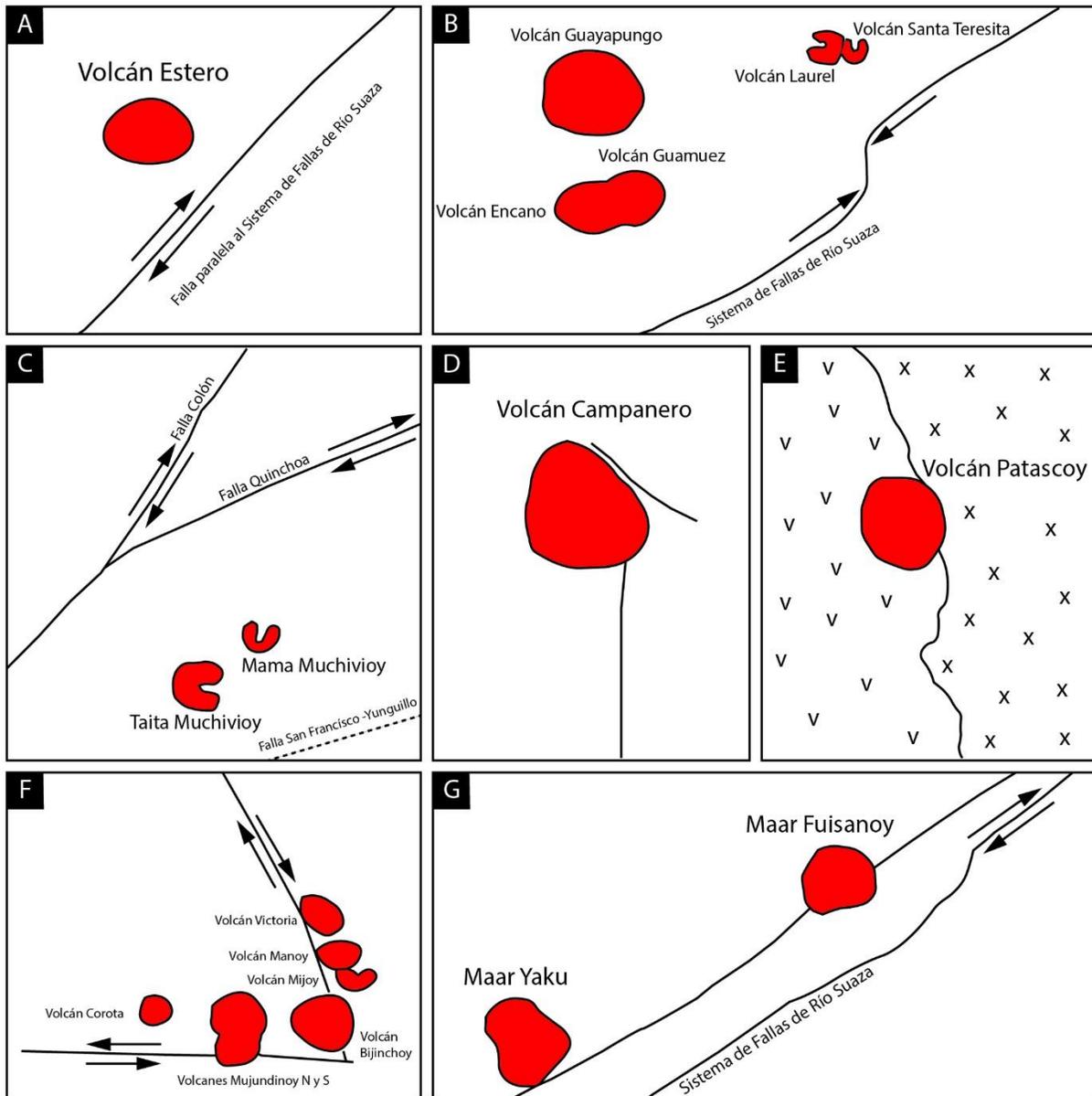


Figura 46. Mecanismos de ascenso de magma asociados con lineamientos/fallas propuestos en el modelo estructural: **A)** El trazo de una falla paralela a otra, **B)** Curvatura de una falla. **C)** Interacción de por lo menos dos sistemas de fallas. **D)** La interconexión de por lo menos dos sistemas de fracturas. **E)** Contrastes litológicos. **F)** Sintaxis tectónica dilatacional. **G)** El trazo de un lineamiento paralela a una falla.

Conclusiones

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

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

La zona de estudio presenta lineamientos con tendencias de rumbo NNE-SSW, NE-SW, ENE-WSW, NW-SE, WNW-ESE, estos lineamientos están asociados con las fallas San Francisco-Yunguillo, Sibundoy y el Sistema de Fallas de Río Suaza. La concentración de lineamientos transversales a lo largo del trazo de las fallas locales presentes en el área puede deberse a la existencia de zonas de falla como la falla Sibundoy y otras no registradas en la literatura; estas zonas de falla pueden visualizarse mediante la correlación de lineamientos continuos.

La sismicidad en las zonas aledañas a la Laguna de La Cocha y la manifestación de fuentes de agua geotérmica que se encuentran en el Valle de Sibundoy se relaciona con fallas y fracturas que no han sido reconocidas en la literatura; por lo tanto, se sugiere que las fallas que se proponen en este estudio no corresponden a estructuras nuevas sino a fallas cubiertas por depósitos Cuaternarios que además de tener actividad sismogénica se relacionan con el ascenso de magma para la formación de los volcanes pertenecientes al CVMGS.

Con los insumos analizados en este trabajo, se destacan fallas regionales que no han sido registradas en la literatura, su relación con los componentes morfométricos y geomorfológicos en el sector permite nombrarlas y sugerir una cinemática teniendo en cuenta las fallas ya reconocidas, de acuerdo con esto en el sector se proponen: 1) Fallas longitudinales en dirección NE-SW paralelas al Sistema de fallas de Río Suaza con componente en rumbo dextral, y 2) Fallas

transversales en dirección ENE-WSW paralelas a la falla San Francisco-Yunguillo con componente en rumbo sinistral.

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

Anexos

- Anexo 1.** Tabla de valores de azimut de los lineamientos por sectores para la zona de estudio.
- Anexo 2.** Tabla de información de campo con estaciones georreferenciada.
- Anexo 3.** Mapa de localización de la zona objeto de estudio.
- Anexo 4.** Mapa geológico de la zona objeto de estudio.
- Anexo 5.** Insumos para análisis de resultados de la zona objeto de estudio.
- Anexo 6.** Mapa de pendientes de la zona objeto de estudio.
- Anexo 7.** Mapa de los sistemas de drenaje de la zona objeto de estudio.
- Anexo 8.** Mapa de anomalías de drenaje de la zona objeto de estudio.
- Anexo 9.** Mapa de disección vertical de la zona objeto de estudio.
- Anexo 10.** Mapa geomorfológico de la zona objeto de estudio.
- Anexo 11.** Mapa de lineamientos de la zona objeto de estudio.
- Anexo 12.** Mapa de sismicidad de la zona objeto de estudio.
- Anexo 13.** Mapa de fallas y lineamientos relacionados con los sistemas de drenaje.
- Anexo 14.** Modelo estructural de la zona objeto de estudio.
- Anexo 15.** Mecanismos de ascenso de magma, asociados con lineamientos/fallas.

Referencias

- Acocella, V. (2021). *Volcano-tectonic processes*. Switzerland: Springer. 562 pp.
- Acosta, J., Velandia, F., Osorio, J., Lonergan, L., & Mora, H. (2007). Strike-slip deformation within the Colombian Andes. *Geological Society, London, Special Publications*, 272(1), 303-319.
- Ahmadi, H., & Pekkan, E. (2021). Fault-based geological lineaments extraction using remote sensing and GIS a review. *Geosciences*, 11(5), 183 pp.
- Anderson, V. J., Horton, B. K., Saylor, J. E., Mora, A., Tesón, E., Breecker, D. O., & Ketcham, R. A. (2016). Andean topographic growth and basement uplift in southern Colombia: Implications for the evolution of the Magdalena, Orinoco, and Amazon river systems. *Geosphere*, 12(4), 1235-1256.
- Arango, M.I., Rodríguez, G., Zapata, G., Bermúdez, J.G. (2015). Catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia: monzogranito de Altamira. *Servicio Geológico Colombiano*. 24 pp.
- Argentino, A. S. G. M., & Andino, P. M. (2009). *Atlas de deformaciones cuaternarias de los Andes*. Argentina. 322 pp.
- Avellán, D. R., Cisneros- Máximo, G., Macías, J. L., Gómez-Vasconcelos, M. G., Layer, P. W., Sosa-Ceballos, G., & Robles-Camacho, J. (2020). Eruptive chronology of monogenetic volcanoes northwestern of Morelia—Insights into Volcano-tectonic interactions in the central- eastern Michoacán-Guanajuato Volcanic Field, México. *Journal of South American Earth Sciences*. 102554.
- Bierman, P. R., Montgomery, D. R., & Massey, C. A. (2013). *Key Concepts in Geomorphology- NSF supports community-based creation of a new style of textbook*. In AGU Fall Meeting Abstracts. EE.UU. 592 pp.
- Bonachea Pico, J. (2006). *Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos*. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias, Universidad de Cantabria, Santander, España. 103 pp.
- Botero-Gómez, L. A. (2022). *Control estructural y relación temporal de los volcanes pertenecientes al campo volcánico monogenético Villamaría-Termal, Caldas, Colombia*. Tesis de maestría, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Caldas, Manizales, caldas. 131 pp.
- Botero-Gómez, L. A., & López-Palacio Julián. (2023). Estado de la geotermia en Colombia: educación prospectiva y producción. *Energía y geociencias, ACGGP*. 32-34.
- Botero-Gómez, L. A., Osorio, P., Murcia, H., Borrero, C., & Grajales, J. A. (2018). Campo Volcánico Monogenético Villamaría-Termal, Cordillera Central, Andes colombianos (Parte I): Características morfológicas y relaciones temporales. *Boletín de Geología*. 85-102 pp.

- Brenning, A., & Azócar, G. F. (2010). Minería y glaciares rocosos: impactos ambientales, antecedentes políticos y legales, y perspectivas futuras. *Revista de Geografía Norte Grande*, (47).143-158.
- Burbank, & Pinter. (1999). Landscape evolution: the interactions of tectonics and surface processes. *Basin Research*, 11 (1). 1-6.
- Burbank, DW & Anderson, RS (2013). Geomorfología tectónica. segunda edición. *Geociencia ambiental e ingeniería 2013*; 19 (2). 198-200.
- Bustamante, A., Juliani, C., Hall, C. M., & Essene, E. J. (2011). 40Ar/39Ar ages from blueschists of the Jambaló region, Central Cordillera of Colombia: implications on the styles of accretion in the Northern Andes. *Geologica Acta*.Vol. 9, Núm. 3. 351-362.
- Bustamante, C., Archanjo, C. J., Cardona, A., & Vervoort, J. D. (2016). Late Jurassic to Early Cretaceous plutonism in the Colombian Andes: A record of long-term arc maturity. *Bulletin GSA*, 128(11-12), 1762-1779.
- Bustamante, C., Cardona, A., Bayona, G., Mora, A., Valencia, V., Gehrels, G., & Vervoort, J. (2010). U-Pb LA-ICP-MS geochronology and regional correlation of Middle Jurassic intrusive rocks from the Garzón Massif, Upper Magdalena Valley and Central Cordillera, southern Colombia. *Boletín de Geología*, 32(2), 93-109.
- Caballero, V., Parra, M., & Mora Bohórquez, A.R. (2010). Levantamiento de la Cordillera Oriental de Colombia durante el Eoceno tardío-Oligoceno temprano: proveniencia sedimentaria en el Sinclinal de Nuevo Mundo, cuenca Valle Medio del Magdalena. *Boletín de geología*, 32 (1), 45-77.
- Carvajal, J. H. (2012). Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia. *Bogotá: INGEOMINAS*, 25, 27.84 pp.
- Castro, J. S. (2021). *As condições de cristalização dos vulcões Amazonas, Sancancio e Lusitania do Campo Vulcânico Monogenético Villamaría-Termale, em Manizales, Colômbia*. Tesis de pregrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.68 pp.
- Cavell, D. E. (2020). *Petrogenesis of Colombian Arc Volcanoes: A Regional Study*. Tesis de doctorado, Department of Earth Sciences, The University of Birmingham, England. 416pp.
- Cediel, F., & Shaw, R. P. (2019). *Geology and Tectonics of Northwestern South America: The Pacific-Caribbean-Andean Junction*. Springer International Publishing. Switzerland. 1001.
- Cengiz, O., Sener, E., & Yagmurlu, F. (2006). A satellite image approach to the study of lineaments, circular structures and regional geology in the Golcuk Crater district and its environs (Isparta, SW Turkey). *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(2), 155-163.
- Charlton, R. (2007). *Fundamentals of fluvial geomorphology*. Routledge. London. 224.

- Cline, K. M., Page, W. D., Gilliam, M. L., Cluff, L. S., Arias, L. A., Benalcázar, L. G., & López, J. H. (1981). Quaternary activity on the Romeral and Cauca Faults, northwest Colombia. *Revista CIAF*, 6 (1-3). 115-116.
- Cooper, M. A., Addison, F. T., Álvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, A.B., Howe, S., Martínez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A.J & Taborda, A. (1995). Desarrollo de cuencas e historia tectónica de la cuenca de los Llanos, Cordillera Oriental y Valle Medio del Magdalena, Colombia. *Boletín AAPG*, 79 (10). 1421-1442.
- Cortés, M., Colletta, B. y Angelier, J. (2006). Estructura y tectónica del segmento central de la Cordillera Oriental de Colombia. *Revista de Ciencias de la Tierra Sudamericana*, 21 (4).437-465.
- Dar, R. A., Chandra, R., & Romshoo, S. A. (2013). Morphotectonic and lithostratigraphic analysis of intermontane Karewa basin of Kashmir Himalayas, India. *Journal of mountain science*, 10. 1-15.
- Diederix, H., Bohórquez, O. P., Mora-Páez, H., Peláez, J. R., Cardona, L., Corchuelo., Ramírez, J & Díaz-Mila, F. (2020). The Algeciras Fault System of the Upper Magdalena Valley, Huila Department. *The geology of Colombia*, 4.423-452.
- Duque-Caro, H. (1990). The Choco Block in the northwestern corner of South America: Structural, tectonostratigraphic, and paleogeographic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 3(1).71-84.
- Duraiswami, R. A., Bondre, N. R., Dole, G., Phadnis, V. M., & Kale, V. S. (2001). Tumuli and associated features from the western Deccan Volcanic Province, India. *Bulletin of Volcanology*, 63. 435-442.
- Einsele, G. (1992). Sedimentary Basins; Evolution, Facies and Sediment Budget. *Springer-Verlag*. Berlin.632 pp.
- Farangitakis, GP, McCaffrey, KJ, Willingshofer, E., Allen, MB, Kalnins, LM, van Hunen, J & Sokoutis, D. (2021). La evolución estructural de las cuencas separables en respuesta a cambios en el movimiento de las placas. *Investigación de cuencas*, 33 (2).1603-1625.
- Faulds, J., & Hinz, N. (2015). Favorable tectonic and structural settings of geothermal systems in the Great Basin region, western USA: Proxies for discovering blind geothermal systems. In *Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015 (No. DOE-UNR-06731-02)*. Nevada Bureau of Mines and Geology, University of Nevada, Reno.
- Fitz Alvira, N. (2022). *Geología y análisis vulcano-tectónico del vulcanismo monogenético al sur del graben de Penjamillo, Michoacán (México)*. Tesis de maestría, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mexico. 131 pp.
- Flórez, A. (2003). *Colombia: evolución de sus relieves y modelados*. Universidad Nacional de Colombia. Red de Estudio de Espacio y Territorio, RET. Bogotá. 240 pp.

- Fossen, H. (2016). *Structural geology. Second edition*. Cambridge university press. England.503 pp.
- García-Chinchilla, D. A., & Vlach, S. R. F. (2019). Geological mapping of intrusive rocks: a case study in the Garzón region, the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. *Geología USP. Serie Científica*, 19(4), 43-62.
- Gómez-Hurtado, E., Aguirre-Hoyos, L. M., Diederix, H., Audemard M., F. A., Mora-Páez, H., Bohórquez-Orozco, O. P., Muñoz, O. F., González, D. A., López-Isaza, J. A., Escobar-Rey, L. K., Martínez-Díaz, G. P., Ramírez-Cadena, J., Idárraga-García, J., López-Herrera, N. R., Barragán, W., Tique, Y. P., Fonseca, H. A., Jiménez, J. A., & Plazas-Ruiz, J. M. (2022). *Neotectónica y paleosismología de la Falla de Algeciras, Huila, Colombia* (Vol. volumen 44). Libros del Servicio Geológico Colombiano.267 pp.
- Gómez-Vasconcelos, M. G., Macías, J. L., Avellán, D. R., Sosa-Ceballos, G., Garduño-Monroy, V. H., Cisneros-Máximo, G., Layer, P. W., Benowitz, J., López-Loera, H., López, F. M., & Pertou, M. (2020). The control of preexisting faults on the distribution, morphology, and volume of monogenetic volcanism in the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field. *Bulletin GSA*, 132(11-12). 2455-2474.
- Goudie, A. (2004). *Encyclopedia of geomorphology* (Vol. 2). New York. Psychology Press.101 pp.
- Grajales, J. A., Nieto-Samaniego, Á. F., Barrero-Lozano, D., Osorio, J. A., & Cuellar, M. A. (2020). Emplazamiento del magmatismo Paleoceno-Eoceno bajo un régimen transtensional y su evolución a un equilibrio dinámico en el borde occidental de Colombia. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 37(3), 250-268.
- Grosse, P., Ramacciotti, M. L. O., Fochi, F. E., Guzmán, S., Orihashi, Y., & Sumino, H. (2020). Geomorphology, morphometry, spatial distribution and ages of mafic monogenetic volcanoes of the Peinado and Incahuasi fields, southernmost Central Volcanic Zone of the Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 401, 106966.
- Gutiérrez, F., & Gutiérrez, M. (2016). *Landforms of the earth: an illustrated guide*. Springer. 270 pp
- Harff, J., Meschede, M., Petersen, S., Thiede, J. (2016). *Encyclopedia of Marine Geosciences*. Springer Dordrecht. 961 pp.
- Helmens, K. F., & Van der Hammen, T. (1995). Memoria explicativa para los mapas del Neogeno-Cuaternario de la Sabana de Bogota-Cuenca alta del Rio Bogotá (Cordillera Oriental, Colombia). *Análisis Geográficos*, 24, 91-142.
- Hobbs, W. H. (1904). Lineaments of the Atlantic border region. *Bulletin of the Geological Society of America*, 15(1), 483-506.
- Howard, A. D. (1967). Drainage analysis in geologic interpretation: a summation. *AAPG bulletin*, 51(11), 2246-2259.
- Huggett, R., & Shuttleworth, E. (2022). *Fundamentals of geomorphology*. Taylor & Francis. 533 pp

- Irving, E. M. (1971). La evolución estructural de los Andes más septentrionales de Colombia. *Boletín geológico*, 19 (2), 1-90.
- Kearey, P. (2009). *The Encyclopedia of the solid earth sciences*. John Wiley & Sons. 736 pp.
- Keller, E. A., & Pinter, N., (1996). *Active tectonics: Earthquakes Uplift and Landscapes*. Prentice Hall. 362 pp.
- Latrubesse, E. M. (2015). Large rivers, megafans and other Quaternary avulsive fluvial systems: A potential “who's who” in the geological record. *Earth-Science Reviews*, 146, 1-30.
- Le Corvec, N., Spörli, K. B., Rowland, J., & Lindsay, J. (2013). Spatial distribution and alignments of volcanic centers: clues to the formation of monogenetic volcanic fields. *Earth-Science Reviews*, 124, 96-114.
- Marín Lechado, C. (2005). Estructura y evolución tectónica reciente del Campo de Dalías y de Níjar en el contexto del límite meridional de las Cordilleras Béticas orientales. Tesis doctoral, Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, Granada, España. 307 pp.
- Martínez Martínez, J. A. (2021). *Marco Jurídico sobre la generación de Energía Geotérmica en Colombia*. Tesis de pregrado, Facultad de Ciencias Jurídicas, Programa de derecho, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. 97 pp.
- McCourt, W. J., Aspden, J. A., & Brook, M. (1984). New geological and geochronological data from the Colombian Andes: continental growth by multiple accretion. *Journal of the Geological Society*, 141(5), 831-845.
- Molin, P., Acocella, V., & Funiciello, R. (2003). Structural, seismic and hydrothermal features at the border of an active intermittent resurgent block: Ischia Island (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121(1-2), 65-81.
- Mon, R. (2005). Control tectónico de la red de drenaje de los Andes del norte argentino. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60(3), 461-466.
- Monsalve-Bustamante, M. L., Tapias, J. G., & Nuñez-Tello, A. (2020). Rear–Arc Small–Volume Basaltic Volcanism in Colombia: Monogenetic Volcanic Fields. *The Geology of Colombia, Volume 4 Quaternary*. Servicio Geológico Colombiano, 4, 353-396.
- Montes, C., Rodríguez-Corcho, A. F., Bayona, G., Hoyos, N., Zapata, S., & Cardona, A. (2019). Continental margin response to multiple arc-continent collisions: The northern Andes–Caribbean margin. *Earth-Science Reviews*, 198, 102903.
- Moody, J. D., & Hill, M. J. (1956). Wrench-fault tectonics. *Geological Society of America Bulletin*, 67(9), 1207-1246.
- Mount, J. F. (1954). *California rivers and streams: The conflict between fluvial process and land use* ; University of California Press. 378 pp.
- Murcia, A., & Cepeda, H. (1991). Memoria explicativa: Geología de la plancha 429 - Pasto, Escala 1:100.000. *Ingeominas*, Bogotá. 17 pp.

- Murcia, A., & Pichler, H. (1986). Geoquímica y dataciones radiométricas de las ignimbritas cenozoicas del SW de Colombia. In: Memorias del Simposio Internacional sobre Neotectónica y Riesgo Volcánicos. *Revista CIAF*, 1,2 (1-30), 346-363.
- Murcia, H., Borrero, C., & Németh, K. (2019). Overview and plumbing system implications of monogenetic volcanism in the northernmost Andes' volcanic province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 383, 77-87.
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and stratigraphy*. John Wiley & Sons. 432 pp.
- Niemeyer, H. (1999). *Apuntes de geología estructural*. Antofagasta, Chile, 138 pp.
- Núñez, A. (2003). Reconocimiento Geológico Regional de las Planchas 411 La Cruz, 412 San Juan de Villalobos, 430 Mocoa, 431 Piamonte, 448 Monopamba, 449 Orito y 465 Churuyaco Departamentos de Caquetá, Cauca, Huila, Nariño y Putumayo. Escala 1:100.000. Memoria explicativa. *Ingeominas*, Bogotá. 259 pp.
- Ortiz, W. C. (1970). La Cocha: Un Lago Andino en el Sur de Colombia. *Boletín de la Sociedad Geográfica de Colombia*, 17(101), 1-13.
- Papadaki, E. S., Mertikas, S. P., & Sarris, A. (2011). Identification of lineaments with possible structural origin using ASTER images and DEM derived products in Western Crete, Greece. *EARS eProceedings*, 10(1), 10.
- París, G., & Romero, J. A. (1994). Fallas activas en Colombia. *Boletín geológico*, 34(2-3), 4-25.
- Pastor-Galán, D., Gutiérrez-Alonso, G., Weil, A.B. (2011). Orocline timing through joint analysis: Insights from the Ibero-Armorican Arc. *Tectonophysics* 507, 31–46.
- Peacock, D. C. P., & Mann, A. (2005). Evaluation of the controls on fracturing in reservoir rocks. *Journal of Petroleum Geology*, 28(4), 385-396.
- Pérez-Peña, JV, Azañón, JM, & Delgado, J. (2004). Metodología para el análisis de redes de drenaje mediante índices geomorfológicos y su relación con la tectónica activa. *Geotemas*, 6, 259-262.
- Piquer, J., Yáñez, G., Rivera, O., & Cooke, D. R. (2019). Long-lived crustal damage zones associated with fault intersections in the high Andes of Central Chile. *Andean Geology*, 46(2), 223-239.
- Pubellier, M., Deffontaines, B., Quebral, R., & Rangin, C. (1994). Drainage network analysis and tectonics of Mindanao, southern Philippines. *Geomorphology*, 9(4), 325-342.
- Restrepo, M., Bustamante, C., Cardona, A., Beltran-Trivino, A., Bustamante, A., Chavarria, L., & Valencia, V. A. (2021). Tectonic implications of the jurassic magmatism and the metamorphic record at the southern Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 111, 103439.
- Restrepo-Moreno, S. A., Foster, D. A., Bernet, M., Min, K., & Noriega, S. (2019). Morphotectonic and orogenic development of the Northern Andes of Colombia: A low-temperature thermochronology perspective. In: *Geology and Tectonics of Northwestern South America: The Pacific-Caribbean-Andean Junction*. Springer International Publishing, 749-832.

- Richards, JP (2000). Lineaments revisited. *Society of Economic Geologists Newslette*, 42 (1), 14-20.
- Rivera-Lara, V. (2021). *Estudio morfométrico y geomorfológico del campo volcánico mono genético Guamuez – Sibundoy, Colombia*. Tesis de pregrado, Programa de geología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Caldas, Manizales. 100 pp.
- Robayo, B. I., & Castro, W. (2001). *Evaluación de riesgos naturales en la cuenca del río Guamués, Nariño*. Tesis de pregrado, programa de Geografía, Departamento de Geografía, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Robertson, K., Flórez, A., & Ceballos, J. L. (2002). Geomorfología volcánica, actividad reciente y clasificación en Colombia. In: Cuadernos de Geografía. *Revista Colombiana de Geografía*, 11(1-2), 37-76.
- Rodríguez Ospina, G., Alfaro Valero, C., & González Idárraga, C. E. (2019). *Geotermia en Colombia*. Libros del Servicio Geológico Colombiano. 32 pp.
- Rodríguez, G., & González, H. (2004). Características geoquímicas y marco tectónico de los basaltos alcalinos del sur de Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (16), 9-22.
- Rodríguez-González, A., & Fernandez-Turiel, J. L. (2015). Las geoformas volcánicas y su modelado morfométrico con Sistemas de Información Geográfica (SIG). *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23 (1), 40-48.
- Salazar-Muñoz, N., de la Ossa, C. A. R., Murcia, H., Schonwalder-Ángel, D., Botero-Gómez, L. A., Hincapié, G., Dasilva, J. C., & Sánchez-Torres, L. (2021). Andesitic (SiO₂: ~ 60 wt%) monogenetic volcanism in the northern Colombian Andes: Crystallisation history of three Quaternary volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 412, 107194.
- Sánchez Torres, L., Murcia, H., & Schonwalder Ángel, D. (2022). The northernmost volcanoes in South America (5–6° N): the potentially active Samaná Monogenetic Volcanic Field. *Frontiers in Earth Science*, 10, 880003.
- Sánchez-Torres, L., Toro, A., Murcia, H., Borrero, C., Delgado, R., & Gómez-Arango, J. (2019). El Escondido tuff cone (38 ka): a hidden history of monogenetic eruptions in the northernmost volcanic chain in the Colombian Andes. *Bulletin of Volcanology*, 81(12), 1-14.
- Sarhan, M. A. (2017). Wrench tectonics of Abu Gharadig Basin, Western Desert, Egypt: a structural analysis for hydrocarbon prospects. *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 1-14.
- Scheidegger, A. E. (2003). *Morphotectonics*. Springer, Berlin. 197 pp.
- Sevilla Caicedo, S. P. (2013). *Análisis SIG para el modelamiento de movimientos de ladera usando software libre en el tramo el Tiro Río Sabanilla de la vía Loja Zamora*. Tesis de pregrado, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador. 98 pp.
- SGC, S.C. (2015). *Memoria explicativa mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa. Escala 1:100.000. Plancha 430- Mocoa* (Inf. téc.). Servicio Geológico Colombiano. Bogotá D.C., Col. 92 pp.

- Sharma, V. K. (2010). *Introduction to process geomorphology*. CRC Press. Taylor & Francis group, Boca Raton. 415 pp.
- Solano Acosta, J.D.; Despaigne Diaz, A.I.; Pearse, J. (2020). Morphotectonic analysis of the upper guajira, Colombia. a gis and remote sensing approach. 2020100476. <https://doi.org/10.20944/preprints202010.0476.v1>
- Soliman, A., & Han, L. (2019). Effects of vertical accuracy of digital elevation model (DEM) data on automatic lineaments extraction from shaded DEM. *Advances in space research*, 64(3), 603-622.
- Soulas, J.P., Egüez, A., Yepes, H., & Pérez, V.H. (1991). Tectónica activa y riesgo sísmico en Los Andes Ecuatorianos y el extremo sur de Colombia. *Boletín de Geología Ecuatoriano* 2(1), 3-11.
- Suarez, A. F. (1990). The basement of the Eastern Cordillera, Colombia: An allochthonous terrane in northwestern South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 3(2-3), 141-151.
- Taboada, A., Dimaté, C. y Fuenzalida, A. (1998). Sismotectónica de Colombia: deformación continental activa y subducción. *Física de la Tierra*, 10. 111-147.
- Terrones Mendoza, D. J. (2023). *Caracterización Geomorfológica del Distrito de Magdalena, Caserío La Viña y Huaquillas*. Tesis de pregrado. Facultad de ingeniería. Universidad Nacional de Cajamarca. Perú.153 pp.
- Thouret, J. C. (1999). Volcanic geomorphology an overview. *Earth-science reviews*, 47(1-2), 95-131.
- Toro-Toro, L. M., Vallejo, F., Salazar-Ríos, A., Murcia, H., Osorio-Ocampo, S., García-Arias, M., & Arredondo, C. (2020). Granulitic rocks at the Western Cordillera of Colombia: Evidence of metamorphism in the Colombian Caribbean Oceanic Plateau. *Journal of South American Earth Sciences*, 101, 102632.
- Torres Gonzalez, D. E. (2018). Caracterización de las estructuras asociadas a sistemas de fallas tipo " strike slip" y su implicancia geológica-petrolera. La cuenca Mio-oligocena de Tincopalca, sistema de fallas Condorama-Caylloma en el sur del Perú. *ix ingepet 2018 (geo-ex-dt-02-n)*. 7pp.
- Toussaint, J. F., & Restrepo, J. J. (1994). The Colombian Andes during cretaceous times. *Cretaceous tectonics of the Andes*. 61-100.
- Tunstall, C., & Folguera, A. (2005). Control estructural en el desarrollo de una concentración anómala de calderas en los Andes de Neuquén: Complejo Volcánico Pino Hachado (38° 30'S y 71° O). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60(4). 731-741.
- Twiss, R. J., & Moores, E. M. (2007) *Structural Geology*. W. H. Freeman; second edition. 532 pp.
- Udias, A., & Buforn, E. (2017). *Principles of seismology*. Cambridge University Press. New York.51 pp.

- Vargas, L. M. (2020). *Caracterización de los volcanes Las Margaritas 1 y 2, Campo Volcánico Monogenético Tapias-Guacaica, Colombia*. Tesis de pregrado, Programa de geología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Caldas, Manizales. 76 pp.
- Vargas-Arcila, L., Murcia, H., Osorio-Ocampo, S., Sánchez-Torres, L., Botero-Gómez, L. A., & Bolaños, G. (2023). Effusive and evolved monogenetic volcanoes: two newly identified (~ 800 ka) cases near Manizales City, Colombia. *Bulletin of Volcanology*, 85(7). 42.
- Velandia, F., Acosta, J., Terraza, R., & Villegas, H. (2005). The current tectonic motion of the Northern Andes along the Algeciras Fault System in SW Colombia. *Tectonophysics*, 399(1-4). 313-329.
- Velandia, F., Terraza, R., & Villegas, H. (2001). El Sistema de Fallas Algeciras hacia el Suroeste de Colombia y la actual transpresión de Los Andes del Norte. *VIII Congreso Colombiano de Geología, September 2017*. 11 pp.
- Velandia, J., Murcia, H., Németh, K., & Borrero, C. (2021). Uncommon mafic rocks (MgO > 10 wt.%) in the northernmost Andean volcanic chain (4° 25 "N): Implications for magma source and evolution. *Journal of South American Earth Sciences*, 110. 103308.
- Vergara, H. (1996). Rasgos y actividad neotectónica de la Falla de Algeciras. In *Memorias VII Congreso Colombiano de Geología Vol. 1*. 491-500.
- Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A., Winkler, W & Beltrán, A. (2011). Geocronología, geoquímica y evolución tectónica de las cordilleras Occidental y Central de Colombia. *Litos*, 125 (3-4). 875-896.
- Woodward, JC, Macklin, MG, Krom, MD, Williams, MA y Gupta, A. (2007). El Nilo: evolución, ambientes fluviales cuaternarios y flujos de materiales. *Grandes ríos: geomorfología y gestión*, 13. 261-289.
- Zapata-García, G., Rodríguez García, G., & Mejía, MIA (2017). Petrografía, geoquímica y geocronología de rocas metamórficas aflorantes en San Francisco Putumayo y la vía Palermo-San Luis asociadas a los complejos La Cocha-Río Téllez y Aleluya. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (41). 47-64.
- Zingaretti, V. (2023). *Evolución geomorfológica del río Blanco Este tras las recientes erupciones del volcán Calbuco, Chile*. Tesis de maestría. magister en ciencias mención bosques y medio ambiente, Facultad de Ciencias forestales y recursos naturales, Universidad Austral de Chile, Valdivia. 75 pp.