

**Geología estructural y movimientos en masa Cachirí**

Autores

**Andrés Humberto Portilla Carreño, Sergio Alejandro Camacho Pineda**

Director

**Francisco Alberto Velandia Patiño**

Geólogo, Esp., MSc., PhD

Codirector

**Modesto Eusebio Portilla Gamboa**

Geólogo, Dip., Esp., MSc., DEA, PhD.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Programa de Geología

Bucaramanga

2025

**Dedicatoria Sergio**

A Dios, por mostrarme siempre el camino y ser mi guía constante, por darme fuerza en todo momento y enseñarme que las dificultades hacen parte del camino de la vida, y que con Él siempre podré enfrentarlas.

A mi madre, por su sacrificio, amor inquebrantable y por haber hecho siempre de mí su prioridad. Por sus palabras, consejos y regaños, que siempre reflejaron su preocupación por convertirme en un buen hombre. Gracias por enseñarme el valor del trabajo y la perseverancia.

A mi padre, por su ejemplo, apoyo y confianza; por enseñarme la importancia de la disciplina y el compromiso para alcanzar cada meta propuesta.

A mis hermanos, por su compañía, comprensión y por ser fuente de alegría.

A Natalia, mi amor, por acompañarme con paciencia y comprensión a lo largo de este proceso. Por su apoyo constante, por motivarme en los momentos más difíciles y celebrar conmigo cada paso de este camino. Su presencia ha sido muy importante y me hace muy feliz poder compartir con ella cada meta alcanzada en mi vida.

A mis abuelos, quienes con su sabiduría y amor sembraron en mí los valores que hoy me guían.

Y con especial gratitud a mi abuela Evangelina y a mi primo Alejandro, quienes ya no están físicamente conmigo, pero permanecen en mi corazón. Me enseñaron a ser humilde, a valorar a la familia pese a las dificultades, haciéndome sentir siempre importante y especial. Su recuerdo, sus enseñanzas y su amor me inspiran cada día; sin ellos, no estaría en el lugar en el que me encuentro hoy.

**Dedicatoria Andres**

A Dios por ser mi guía constante, por darme la sabiduría para aprender de cada experiencia y la oportunidad de culminar esta etapa con fe, esperanza y gratitud.

A mi familia por ser el pilar fundamental de mi vida y mi mayor fuente de motivación. A mis padres, por su amor incondicional y sacrificio; a mi madre, por todo lo que representa, por su ternura, por inculcarme el valor del esfuerzo, la humildad, paciencia y ejemplo de vida; y a mi padre, por sus enseñanzas y consejos por mostrarme con su ejemplo la importancia del trabajo, la constancia. A mis abuelas, mis segundas madres, por su cariño, compañía y oraciones que siempre fueron luz en mi camino. A mi hermano, por su apoyo y por impulsarme a seguir este sueño de ser profesional, y a mi tío MEPG por ser mi inspiración para elegir el camino de la geología.

A mis amigos quienes han sido un pilar importante durante este proceso, por acompañarme en cada etapa, por las risas, las fiestas, las salidas de campo y todos los momentos compartidos que hicieron de mi paso por la universidad una experiencia inolvidable y llena de alegría. En especial, quiero agradecer a un amigo muy cercano que ya no está físicamente conmigo, pero que marcó mi vida de una manera profunda; su recuerdo, su amistad y su ejemplo permanecerán siempre en mi corazón y en mi memoria FACG .

A una persona muy especial que ha sido mi compañía durante los últimos años, por su apoyo incondicional, por creer en mí incluso en los momentos más difíciles y por brindarme su cariño y motivación constante para seguir adelante YJRM.

A la Universidad Industrial de Santander, mi alma máter, por brindarme los espacios, los conocimientos y los valores que me formaron no solo como profesional, sino como una persona ética, crítica y comprometida con la sociedad.

Este trabajo de grado representa la culminación de un sueño y el inicio de mi camino profesional, que asumo con responsabilidad, ética y orgullo. Sin embargo, mi mayor orgullo no radica únicamente en este logro, sino en haber sido criado, orientado y amado por mi padre, quien con orgullo dice ser un campesino de Cachirí; y es precisamente ese el mayor honor de mi vida: ser hijo de un campesino de Cachirí.

**Firmes Cachirí**

**Agradecimientos**

A nuestro director, docente MSc. PhD, Francisco Alberto Velandia Patiño por su ayuda guía en el proceso.

A nuestro codirector , docente UNAL MSc. PhD. Modesto Eusebio Portilla Gamboa por su disposición, orientación y ayuda a lo largo del trabajo de grado.

A la docente MSc. PhD. Angelica Álvarez naranjo y Al docente MSc. PhD. Juan Diego Colegial Gutiérrez , por su apoyo y guía en el trabajo de grado.

## Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción .....	14
1. Objetivos .....	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos específicos .....	16
2. Localización .....	17
3. Marco Teórico .....	18
3.1 Estratigrafía.....	18
3.2 Geología estructural regional.....	23
3.3 Geomorfología .....	26
3.3.1. <i>Ambiente estructural</i> .....	28
3.3.2. <i>Ambiente denudacional</i> .....	28
3.3.3. <i>Ambiente fluvial</i> .....	29
3.3.4 <i>Descripción de subunidades geomorfológicas</i> .....	30
3.4 Movimientos en masa .....	31
4. Metodología .....	34
4.1. Estado del arte.....	34
4.2. Precampo .....	35
4.3. Campo .....	35
4.4. Recolección de datos geoespaciales.....	36
4.5. Análisis de la relación tectónico-estructural con movimientos en masa.....	36
4.6. Comparación con estudios previos.....	37
5. Resultados.....	37
5.1 Cartografía geológica.....	38
5.2 Geología estructural.....	55

5.3 Inventario de movimientos en masa.....	65
6. Discusión .....	68
6.1. Análisis de las variables.....	70
6.1.1. <i>Geología vs movimientos en masa</i> .....	71
6.1.2. <i>Geomorfología vs movimientos en masa</i> .....	72
6.1.3 <i>Geología estructural vs movimientos en masa</i> .....	74
7. Conclusiones .....	75
8. Recomendaciones .....	77
9. Referencias bibliográficas .....	78

## Listas Especiales Figuras

	Pág.
<b>Figura 1.</b> <i>Zona de estudi del trabajo de grado</i> .....	17
<b>Figura 2.</b> <i>Unidades litoestratigráficas de la cuenca del Valle medio del Magdalena</i> .....	20
<b>Figura 3.</b> <i>Unidades litoestratigráficas de la cuenca del Catatumbo</i> .....	22
<b>Figura 4.</b> <i>Mapa morfoestructural de la falla de Suratá</i> .....	24
<b>Figura 5.</b> <i>Modelos de fallas en dominó</i> .....	25
<b>Figura 6.</b> <i>Mapa Geomorfológivo del área de estudio</i> .....	27
<b>Figura 7.</b> <i>Movimientos en masa por mecanismo de rotura y material involucrado</i> .....	31
<b>Figura 8.</b> <i>Clasificación de movimientos en masa cruden y varnes (1996)</i> .....	32
<b>Figura 9.</b> <i>Tipos básicos de movimientos en masa (Hüngr et al, 2014)</i> .....	33
<b>Figura 10.</b> <i>Clasificación movimientos en masa (Hüngr et al., 2014)</i> .....	33
<b>Figura 11.</b> <i>Mapa de transectas</i> .....	40
<b>Figura 12.</b> <i>Fotografías de afloramiento del Gneis de Bucaramanga</i> .....	42
<b>Figura 13.</b> <i>Fotografías de afloramiento de Metasedimentitas de Guaca La Virgen</i> .....	43
<b>Figura 14.</b> <i>Fotografías de afloramiento del Grupo Girón</i> .....	44
<b>Figura 15.</b> <i>Fotografías de afloramiento de la Formación Rio Negro</i> .....	45
<b>Figura 16.</b> <i>Fotografías de afloramiento de la Formación Tibú-Mercedes</i> .....	46
<b>Figura 17.</b> <i>Fotografías de afloramiento de la Formación Aguardiente</i> .....	47
<b>Figura 18.</b> <i>Fotografías de afloramiento de la Formación Capacho</i> .....	48
<b>Figura 19.</b> <i>Fotografías de afloramiento de la Formación La Luna</i> .....	49
<b>Figura 20.</b> <i>Fotografía de Terraza aluviotorrencial del corregimiento de Cachirí</i> .....	50

<b>Figura 21.</b> <i>Fotografía de Deposito Aluvial en la Quebrada Dos Aguas</i> .....	51
<b>Figura 22.</b> <i>Fotografía Deposito aluviotorrencial en la Quebrada La Violeta</i> .....	52
<b>Figura 23.</b> <i>Fotografía del coluvión en la Vereda San Luis</i> .....	53
<b>Figura 24.</b> <i>Mapa geológico del área de estudio</i> .....	54
<b>Figura 25.</b> <i>Mapa geomorfológico modificado</i> .....	55
<b>Figura 26.</b> <i>Indicador morfológico a escala meso de afloramiento</i> .....	57
<b>Figura 27.</b> <i>Cortes del mapa geológico</i> .....	58
<b>Figura 28.</b> <i>Indicadores morfológicos de la Falla de Suratá en las veredas San Luis y Marcela</i>	59
<b>Figura 29.</b> <i>Indicadores morfológicos de la Falla de Suratá en la Finca Lagunita</i> .....	60
<b>Figura 30.</b> <i>Fotografías de las Veredas Gramalotico y San José con indicadores morfológicos</i>	62
<b>Figura 31.</b> <i>Orientación de estructuras lineales y direcciones principales de esfuerzos</i> .....	64
<b>Figura 32.</b> <i>Mapa de inventario de movimientos en masa</i> .....	66
<b>Figura 33.</b> <i>Mapa geológico y de movimientos en masa</i> .....	72
<b>Figura 34.</b> <i>Mapa geomorfológico y de movimientos en masa</i> .....	73

**Lista Especial Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Estadísticas del inventario de movimiento en masa	67

**Lista de Apéndices**

**Ver los apéndices adjuntos y pueden ser visualizados en el Repositorio Institucional**

Apéndices A. Mapa geológico del área de estudio

Apéndices B. Ortomosaico

## Resumen

**Título:** Geología estructural y movimientos en masa Cahirí

**Autores:** Andrés Humberto Portilla Carreño y Sergio Alejandro Camacho Pineda

**Palabras clave:** Geología estructural, Macizo de Santander, Morfodinámica

### Descripción:

En la parte alta de la cuenca del río Cahirí, ubicada en el municipio de Suratá (Santander), se presenta una alta recurrencia de movimientos en masa que afectan de manera notable el paisaje y las actividades humanas en la zona. Estos procesos ocurren principalmente sobre depósitos no litificados, los cuales recubren diversas unidades cretácicas caracterizadas por su heterogeneidad y diferente grado de meteorización. Los estudios previos realizados en el área muestran inconsistencias cartográficas, escasa información detallada y la ausencia de inventarios completos de movimientos en masa, lo cual limita la comprensión integral de la relación entre litologías, estructuras geológicas y procesos morfo dinámicos activos.

En este trabajo se analizaron de manera detallada las relaciones tectónico-estructurales vinculadas con la ocurrencia de movimientos en masa, integrando cartografía geológica a escala detallada, análisis estructural en campo, la elaboración de un inventario actualizado y la interpretación de imágenes captadas mediante dron. Se lograron identificar 42 movimientos, entre los que predominan flujos de lodo y detritos, además de algunos deslizamientos menores. Los resultados muestran que, aunque estructuras regionales como las fallas Suratá y La Violeta influyen en la configuración del relieve y en el control del drenaje, los factores litológicos en especial los materiales poco consolidados y con alta susceptibilidad a la saturación representan los principales condicionantes de inestabilidad. Las lluvias intensas y prolongadas actúan como detonantes directos de estos procesos.

Los resultados obtenidos constituyen una base técnica sólida para la gestión del riesgo, la planificación territorial y el desarrollo de futuros estudios que profundicen en la dinámica geomorfológica de la región \*\*

---

\*\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Francisco Alberto Velandia Patiño.  
Coodirector: Modesto Eusebio Portilla Gamboa.

### Abstract

**Title:** Structural geology and mass movements Cachirí

**Authors:** Andrés Humberto Portilla Carreño and Sergio Alejandro Camacho Pineda

**Keywords:** Structural Geology, Santander Massif, Morphodynamics, Remote Sensing

### Description:

In the upper reaches of the Cachirí River basin, located in the municipality of Suratá (Santander), there is a high frequency of mass movements that significantly impact the landscape and human activities in the area. These processes occur primarily on unlithified deposits, which overlie various Cretaceous units characterized by their heterogeneity and varying degrees of weathering. Previous studies in the area have shown cartographic inconsistencies, a lack of detailed information, and the absence of comprehensive inventories of mass movements, which limits a complete understanding of the relationship between lithologies, geological structures, and active morphodynamic processes.

This study analyzed in detail the tectonic-structural relationships associated with the occurrence of mass movements, integrating detailed geological mapping, field structural analysis, the creation of an updated inventory, and the interpretation of drone-captured images. Forty-two movements were identified, predominantly mudflows and debris flows, along with some minor landslides. The results show that, although regional structures such as the Suratá and La Violeta faults influence the topography and drainage patterns, lithological factors, especially poorly consolidated materials with high susceptibility to saturation, are the main drivers of instability. Intense and prolonged rainfall acts as a direct trigger for these processes.

The results obtained provide a solid technical basis for risk management, land-use planning, and the development of future studies that delve deeper into the geomorphological dynamics of the region.

††

---

\*Undergraduate Project

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Director: Francisco Alberto Velandia Patiño.  
Coodirector: Modesto Eusebio Portilla Gamboa.

## Introducción

Los movimientos en masa son una de las principales amenazas en el territorio colombiano y generan el mayor número de víctimas fatales y pérdidas económicas (Sepúlveda y Petley, 2015). Estos fenómenos se caracterizan por el desplazamiento descendente de masas de roca, suelo o detritos en una ladera bajo la influencia de la fuerza de gravedad (Cruden y Varnes, 1996), detonados por lluvias, sismos o actividad antrópica. Conocer y caracterizar estos procesos es de gran importancia, ya que forman parte esencial del modelamiento del paisaje y muestran el comportamiento de la formación de pendientes en diferentes entornos a lo largo del tiempo (Glade et al., 2007). En casos extremos, los movimientos en masa están asociados al riesgo de la vida humana (Petley, 2012), lo que resalta la necesidad de una mejor comprensión de estos fenómenos.

La parte alta de la cuenca hidrográfica del río Cachirí (Suratá, Colombia) se encuentra en un sector, donde estos procesos se presentan en depósitos coluviales que recubren unidades rocosas del Cretácico. Sin embargo, la cartografía disponible en las planchas 98 (Fuquen et al., 2011) y 110 (Ward et al., 1973) del Servicio Geológico Colombiano (SGC) muestra inconsistencias en la continuidad de las unidades litoestratigráficas, ya que los contactos no coinciden al ser empalmados en dichas planchas geológicas. A ello se suma que la cartografía de la plancha 110 omite procesos coluviales significativos y que, aunque el SGC elaboró el Mapa Nacional de Movimientos en Masa a escala 1:100.000 (SGC, 2019), en este no se inventariaron los fenómenos presentes en el Complejo de Páramos de Santurbán. Estas limitaciones generan vacíos en la comprensión de los factores condicionantes y, en consecuencia, incertidumbre frente a la distribución de los procesos de inestabilidad en la zona.

Los movimientos en masa históricos y recientes han tenido un impacto directo en la vida de los habitantes del corregimiento de Cachirí, municipio de Suratá, afectando terrenos de cultivo, caminos y vías de comunicación, con repercusiones económicas y sociales para las comunidades locales. La ausencia de un inventario detallado y de estudios técnicos específicos ha impedido un manejo adecuado del riesgo, lo que hace necesario comprender con mayor profundidad las características intrínsecas del terreno, los factores desencadenantes como las lluvias extremas de 2010-2011, que podrían intensificarse con el Cambio Climático Global y la relación de estos fenómenos con la geología estructural del Macizo de Santander.

En este sentido, la distribución litológica y las estructuras principales de deformación constituyen elementos clave para un análisis morfodinámico integral. La caracterización geomorfológica y geológica de la parte alta de la cuenca del río Cachirí permitirá unificar los contactos discrepantes de la cartografía existente, generar un inventario actualizado de la morfodinámica local y aportar bases técnicas para futuros estudios en la región. De esta manera, el presente trabajo de grado se enfocó en recopilar, generar y analizar información (litología, fotografías aéreas mediante dron y morfogénesis) que permitió caracterizar los movimientos en masa, identificar sus relaciones con las diferentes variables geológicas que contribuyen a la explicación de su origen.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Analizar las relaciones tectónico-estructurales con la generación y evolución de movimientos en masa en la parte alta de la cuenca hidrográfica del río Cachirí, a partir del control de la cartografía geológica y morfoestructural de la zona de estudio.

### **1.2 Objetivos específicos**

Llevar a cabo un control de la cartografía geológica de la parte alta de la cuenca hidrográfica del río Cachirí (planchas geológicas 98 y 110 del SGC), mediante la interpretación de imágenes de dron y trabajo de campo.

Definir la cinemática de las estructuras geológicas de la zona a partir de indicadores morfológicos y de escala meso en afloramientos.

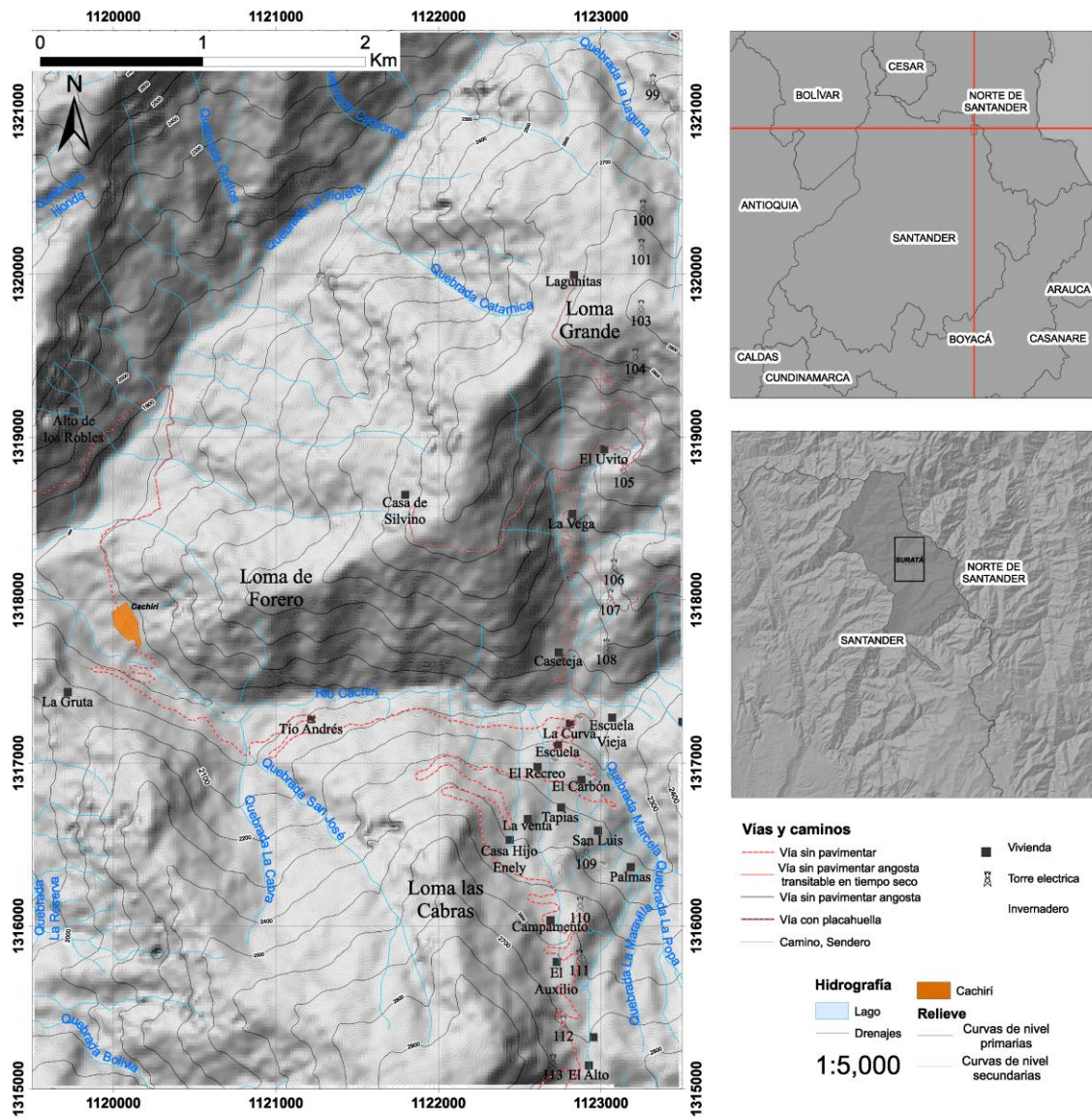
Analizar la configuración de la morfodinámica de la zona con base en la cartografía de movimientos en masa a escala 1:25.000.

Establecer las relaciones tectónico-estructurales y su relación con la generación de movimientos en masa geohistóricos en la parte alta de la cuenca hidrográfica del río Cachirí.

2. Localización

Figura 1

Zona de estudio del trabajo de grado.



Nota: El área de estudio se encuentra en la parte alta de la cuenca del río Cachirí, en el territorio del municipio de Surata, departamento de Santander, Colombia. Geográficamente

corresponde a la zona nororiente de la Cordillera Oriental, en el sector oriente del Macizo de Santander, dentro del Complejo de Páramos de Santurbán.

Los límites del área de investigación fueron definidos considerando las unidades geológicas de interés en estudios preexistentes, así como los principales sistemas de drenaje: al sur, limita con la Laguna del Alto; al norte, con el cauce principal de la Quebrada La Violeta; al occidente, con la Quebrada Dos Aguas; y al oriente, por las quebradas Las Palmas y La Popa (

Figura 1). En este polígono se concentra un área que presenta procesos morfodinámicos activos, estructuras tectónicas importantes y discrepancias en la relación espacial de formaciones geológicas propuestas por el Servicio Geológico Colombiano en las planchas 98 y 110 a escala 1:100.000.

La principal vía de acceso a la zona es la que conecta al casco urbano del municipio de Suratá y uno de sus corregimientos, Cachirí, desde donde parten caminos veredales que llevan a lugares como Laguna del Alto, las veredas San Luís, Marcela, Vega de Páramo, Tablanca, Gramalotico y sitios de interés paisajístico como el Sagrado Corazón, El Paramillo y Lagunitas, entre otros. Estos caminos también son importantes en el estudio, ya que los movimientos en masa afectan la movilidad y la conexión entre las comunidades que habitan este territorio.

### **3. Marco Teórico**

#### **3.1 Estratigrafía**

Según la geología de las planchas 98 Durania (Fuquen et al., 2011) y 109 Rionegro (Ward et al., 1973) a escala 1:100.000, el área de estudio presenta una variedad litológica importante. En primer lugar, afloran rocas metamórficas correspondientes a la Formación Silgará

de edad Paleozoica, constituidas por metasedimentitas y esquistos. Posteriormente, se reconocen rocas ígneas intrusivas de edad Triásico descritas como cuarzomonzonitas correlacionables como el Granito de Arboledas para la plancha 97, así mismo se describen rocas sedimentarias conglomeráticas del Jurásico y Cretácico (Figura 2). Los depósitos cuaternarios básicamente corresponden a depósitos aluviales.

Las rocas cristalinas aflorantes en la zona de estudio corresponden a la Formación Silgará, la cual se compone principalmente de rocas metasiliciclásticas en las cuales predominan metareniscas, metacuarzoarenitas y en menor proporción metapelitas (Mantilla-Figueroa et al., 2016). Adicionalmente afloran rocas ígneas descritas como cuarzomonzonitas, de este modo, esta unidad ígnea se correlaciona con el Granito de Arboledas, descrito como un granito leucocrático rosado naranja de grano fino; esta unidad intruye en algunos sectores a la Formación Silgará, en otros se encuentra en contacto fallado con el Gneis de Bucaramanga o lo cubren algunos depósitos cuaternarios (Zapata et al., 2016).

El Servicio Geológico Colombiano (SGC), en las planchas 98 Durania (Fuquen et al., 2011) y 110 (Ward et al., 1973), propone formaciones principalmente correspondientes a la Cuenca del Valle Medio del Magdalena. No obstante, debido a la cercanía geográfica al Macizo de Santander y a la similitud litológica observada en la zona de estudio, se optará por emplear como referencia la Cuenca del Catatumbo.

Figura 2

Unidades litoestratigráficas de la cuenca del Valle Medio del Magdalena

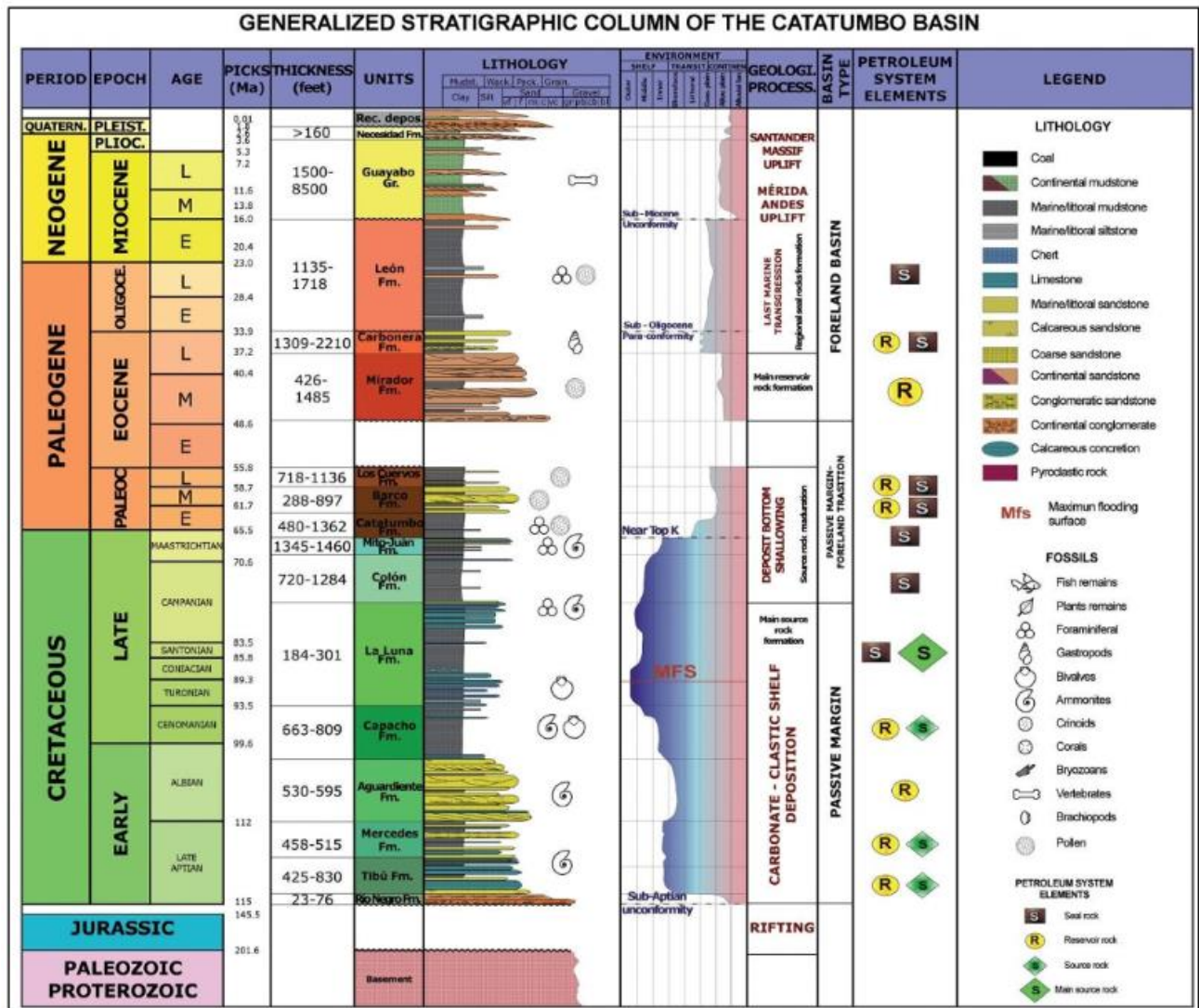
	Edad	Unidad litoestratigráfica	Nomenclatura	Litología	Descripción								
Cenozoico	Holoceno	Aluviones	Q2al, Q2c		Depósitos aluviales, coluviales y abanicos aluviales.								
		Coluviones	Q2aa		Terrazas y conos de deyección.								
	Paleógeno Neógeno Cuaternario	Pleistoceno	Terrazas y conos de deyección	Q1tf									
		Plioceno											
		Mioceno											
		Oligoceno											
		Eoceno											
		Paleoceno											
		Mesozoico	Cretácico Superior	Maastrichtiano			Formación Umir	k6u		En la base areniscas de cuarzo, fosfática y glauconítica. Hacia el techo areniscas de cuarzo en capas medianas.			
				Campaniano			Formación La Luna	M. Galembó			k3-4g	Alternancia de calizas fosilíferas y lodolitas calcáreas de color negro. Hacia el tope chert azul-negro y fosforitas.	
Santoniano	M. Pujamana			k2-3p									
Coniaciano	M. Salada			k2s									
Turoniano				k1s									
Cretácico Inferior	Cenomaniano			Formación El Salto	b6s		Calizas en capas medianas y gresas. Calizas y lodolitas. Calizas y areniscas de cuarzo. Calizas color negro, en capas medianas y gruesas intercaladas con lodolitas terrígenas y lodolitas.						
	Albiano			Formación Simiti	b6s			Calizas y lodolitas.					
				Formación Tablazo	b6t			Calizas y areniscas de cuarzo.					
	Jurásico Superior			Formación La Paja	Aptiano			b5- b4p				Calizas color negro, en capas medianas y gruesas intercaladas con lodolitas terrígenas y lodolitas.	
					Barremiano								
			Hauteriviense		Formación Rosa Blanca				M. Zapatocha	b5- rza			Intercalaciones de calizas fosilíferas con lodolitas grises oscuras.
									M. El Sapo	b4- rs			
									M. Zo	b3- rz			
									M. Carrizal	b2- rc			
			Valanginiano		Formación Cumbre				Jgc	Jgls			Lodolitas fosilíferas y areniscas de cuarzo. Areniscas de cuarzo y lodolitas laminadas.
Formación Los Santos													
Jurásico Inferior	Grupo Girón		Formación Angostura del Río Lebríja	Jgrl		Areniscas ligeramente conglomeráticas y lodolitas pardas rojizas.							
			Oxfordiano										
			Medio										
Triásico Superior	Formación Bocas		Rhaetiano	Tfb		Areniscas lodosas de color pardo rojizo con niveles de Tobas.							
		Norianiano											
		Carniano											
Paleozoico	Medio												
	Inferior												
	Pérmico												
		Carbonífero											
	Devónico												
	Silúrico												
	Ordovícico	Esquistos del Silgará	O1s				Esquistos, filitas y cuarcitas de bajo grado de metamorfismo.						
Cámbrico													
Proterozoico	Gneis de Bucaramanga	Npb		Gneises pelíticos y máficos, cuarcitas granatíferas y sillimaníticas, anfíbolitas, mármoles y migmatitas.									

Nota: Utilizadas por el SGC en las planchas 98 y 110. Información tomada de Ward et al., (1973), Royero y Clavijo (2001), Etayo et al., (2020), Alarcón et al. (2020), Osorio-Afanador y Velandia (2021), Jiménez y García (2023).

En la cuenca del Catatumbo se reconocen similitudes con la cuenca del Valle Medio del Magdalena, compartiendo formaciones jurásicas como el Grupo Girón descritas como areniscas de grano medio a grueso, conglomeráticas, en su mayoría muy compactas, es decir, bien cementadas; sin embargo, para la secuencia cretácicas se identifican formaciones como Río Negro, Tibú-Mercedes, Aguardiente, Capacho y La Luna (ANH, 2012; Ward et al., 1973). El Cretácico inicia con la Formación Río Negro, compuesta por intercalaciones de areniscas grises a amarillas, de grano fino a grueso, en ocasiones conglomeráticas, con pequeños niveles de arcillolitas grises laminadas. Le sigue la Formación Tibú- Mercedes está constituida por una secuencia de lutitas de color gris oscuro a negro, fisibles, con restos de conchas y peces, intercaladas con calizas lumaquéllicas y areniscas cuarzosas calcáreas y bioturbadas, seguidas por calizas arenosas y fosilíferas, intercaladas con lutitas, dolomitas y areniscas, más arriba se tiene la Formación Aguardiente se caracteriza por areniscas cuarzosas de grano grueso intercaladas con lutitas y calizas. Posteriormente, aflora la Formación Capacho, conformada por lutitas calcáreas y margas gris oscuras, con intercalaciones de calizas finas, propias de un ambiente marino profundo y con alto contenido de materia orgánica. Finalmente, la Formación La Luna corresponde a calizas negras y gris oscuras, laminadas, con abundante materia orgánica y texturas de tipo mudstone y wackestone, en algunos casos fosilíferas y con intercalaciones locales de niveles silíceos (Figura 3).

Figura 3

Unidades Litoestratigráficas de la Cuenca del Catatumbo



Nota: Muestra la Formación La Quinta y el cambio de espesor en la Formación Río

Negro. Tomada de Pedraza y Ramírez (2011).

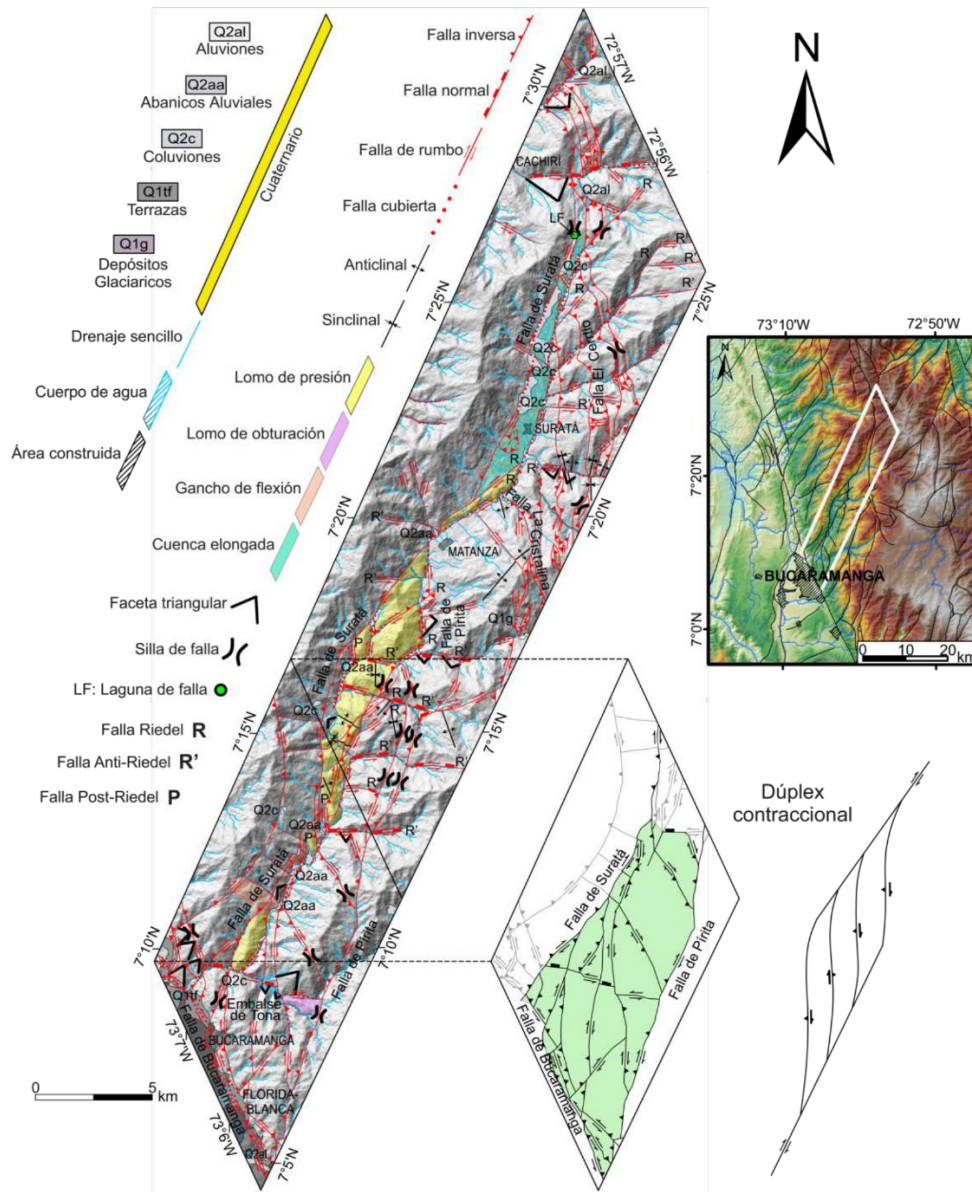
### 3.2 Geología estructural regional

Las principales estructuras que delimitan al oriente el Macizo de Santander se conocen como las fallas Río Servitá - Mutiscua y Las Mercedes, y al occidente la Falla de Lebrija (Velandia, 2017) o Los Santos, las principales estructuras de deformación son la Falla Bucaramanga (transpresiva sinestral) como estructura primaria y la Falla de Suratá que presenta una cinemática en rumbo dextral y un componente inverso hacia el norte de la estructura (Laguado, 2023). También se han propuesto modelos estructurales compresivos que proponen estilos de piel gruesa y delgada para la Cordillera Oriental, con predominio de fallas de cabalgamiento, retrocabalgamiento, dúplex y techos pasivos (Colletta et al., 1990; Toro, 1990; Dengo y Covey, 1993; Cooper et al., 1995; Roeder y Chamberlain, 1995; Toro et al., 2004; Saylor et al., 2012a; Tesón et al., 2013, citados en Velandia, 2017).

El modelo de dominó transpresivo para el Macizo de Santander (Velandia, 2017; Velandia et al., 2020) (Figura 5) explica la cinemática combinada con rumbo sinestral para las fallas longitudinales laterales (Falla Bucaramanga y subparalelas) y una cinemática contraria para las fallas secundarias internas (Falla de Suratá, dextral con componente inverso). Teniendo en cuenta la naturaleza del modeló en dominó, los espacios vacíos que se generan dan lugar a áreas de distensión, transtensión o zonas de fracturas abiertas (Velandia, 2017) donde pueden ocurrir movimientos en masa.

Figura 4

Mapa morfoestructural de la Falla de Suratá.



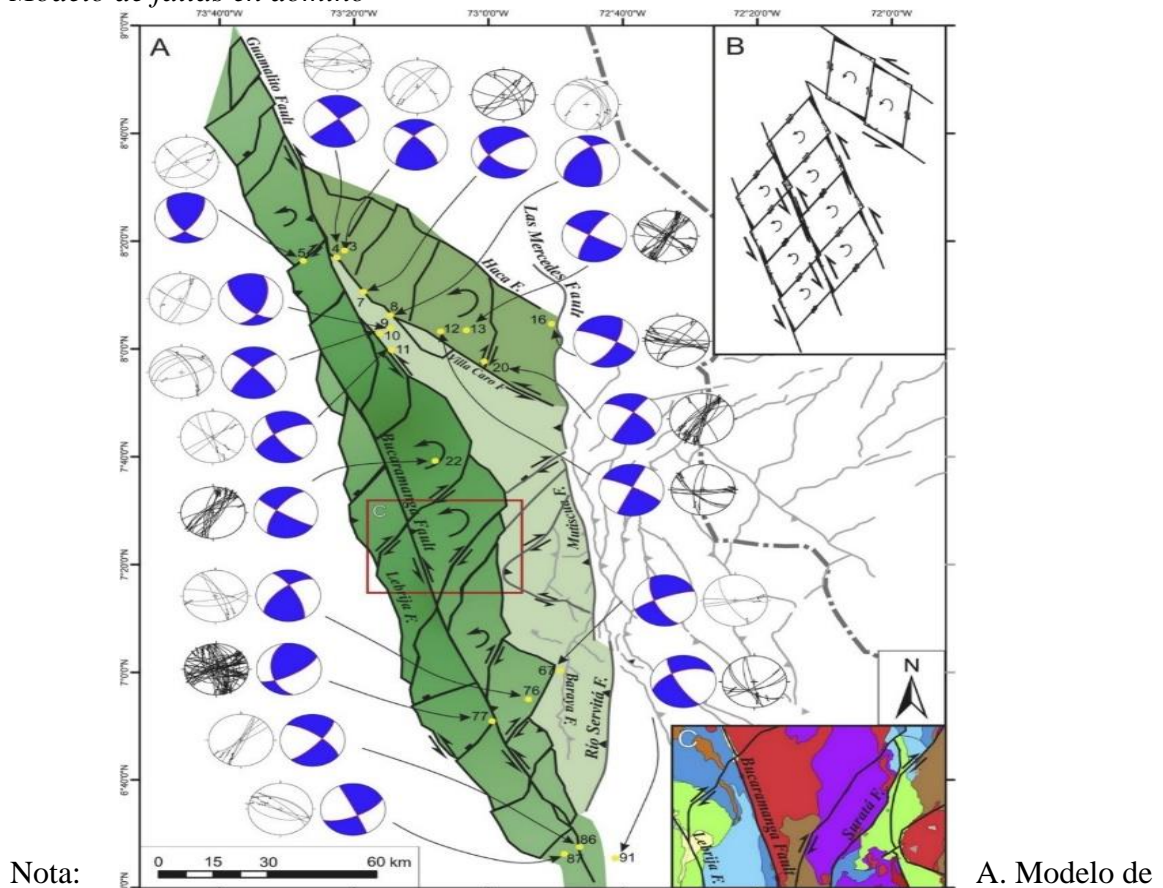
Nota: Tomado de Laguado (2023).

De igual manera, en estudios más detallados se observan las principales morfoestructuras de la Falla de Suratá, evidenciando la coexistencia de geofomas transpresivas y transtensivas

que reflejan la complejidad de su cinemática (Figura 4). Entre las primeras se destacan lomos de presión, facetas triangulares, silletas de falla, ganchos de flexión y pliegues oblicuos, rasgos típicos de sistemas de cizalla con componente compresivo. Por otro lado, las geoformas transtensivas se manifiestan como cuencas elongadas y depresiones locales que concentran depósitos de sedimentos, asociadas a procesos de apertura dentro del corredor de esta gran estructura (Laguado, 2023).

**Figura 5**

*Modelo de fallas en dominó*



Nota: A. Modelo de dominós transpresivos para el Macizo de Santander, con fallas de deslizamiento sinestrales paralelas. Tensores de esfuerzo relacionados con compresión.

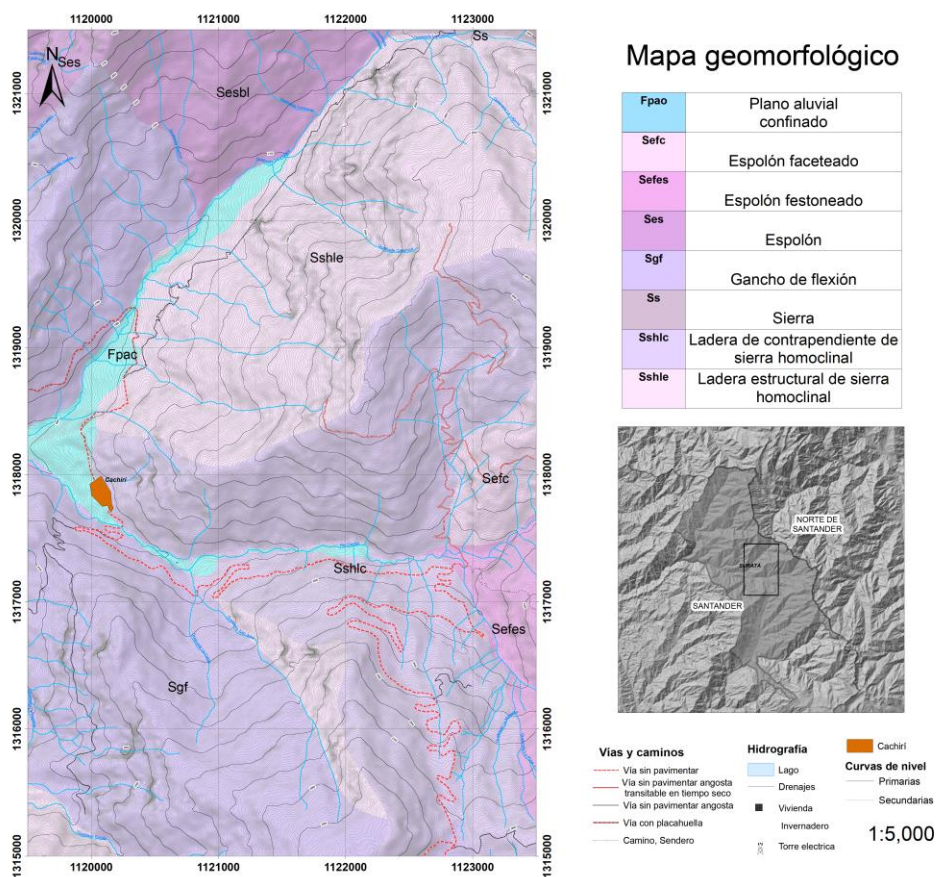
horizontal O-E representados como pelotas de playa (blanco en compresión y de color en extensión) y los planos involucrados proyectados hacia el hemisferio inferior. el Macizo de Santander (SM) en color verde, oscuro para los dominós de Cáchira y Girón, y más oscuro para el dominó de Teorama. B. Modelo esquemático de fallas en dominó, modificado de Christie-Blick y Biddle (1985). C. Mapa geológico modificado de Gómez et al., (2015). Tomado de Velandia et al., (2020).

### **3.3 Geomorfología**

En el área de estudio de acuerdo con el SGC en los mapas geomorfológicos Plancha 109 Rionegro (SGC, 2014); Plancha 98 Arboledas (SGC, 2015); Plancha 110 Pamplona (SGC, 2015); Plancha 97 San Alberto (SGC, 2014); se presentan tres ambientes geomorfológicos: estructural, denudacional y fluvial (Figura 6).

Figura 6

Mapa geomorfológico del área de estudio.



Nota: Tomado de Planchas 97 San Alberto (SGC, 2014), 98 Arboledas (SGC, 2015), 109 Rionegro (SGC, 2014) y 110 Pamplona (SGC, 2015).

### **3.3.1. Ambiente estructural**

Agrupación de geoformas ligadas a la dinámica tectónica interna, en particular a plegamientos y fallamientos. Su morfología refleja la disposición de los estratos y la litología, conservando evidencias de las estructuras originales. Son comunes las sierras anticlinales o sinclinales, cuestras, espinazos y mesetas estructurales, modeladas posteriormente por procesos de erosión diferencial y denudación (SGC, 2013).

Según el mapa geomorfológico escala 1:100.000 propuesto por el SGC se tienen geoformas como sierras (Ss, Dsd), alineamientos montañosos con drenajes subparalelos, y los espolones (Ses, Sefc, Sefes, Sgf), que se presentan en distintas morfologías asociadas al fallamiento. Asimismo, se desarrollan laderas homoclinales (Sshlc, Sshle), superficies inclinadas que siguen la disposición de los estratos y en las cuales se concentran procesos de inestabilidad como deslizamientos rotacionales. Estas geoformas evidencian el fuerte control estructural en la configuración del relieve. Rionegro (SGC, 2014); Plancha 98 Arboledas (SGC, 2015); Plancha 110 Pamplona (SGC, 2015); Plancha 97 San Alberto (SGC, 2014).

### **3.3.2. Ambiente denudacional**

Estos ambientes se caracterizan por la acción conjunta de la meteorización, la erosión y los movimientos en masa, procesos que desgastan y remodelan el relieve original. Las geoformas típicas incluyen colinas, lomas, cerros residuales y conos de talus, generadas por la degradación y reducción progresiva del paisaje bajo condiciones gravitacionales y pluviales (SGC, 2013).

Según el mapa geomorfológico escala 1:100.000 propuesto por el SGC se tienen geoformas como terrazas sobreelevadas (Dts), que corresponden a antiguos niveles de

acumulación fluvial modificados por levantamiento tectónico, y unidades como lomas denudadas (Dld, Dldeml, Dldemm) y colinas residuales (Dcr, Dcrd), que son elevaciones aisladas formadas por erosión y meteorización diferencial. Estas geoformas muestran la prolongada acción de los procesos denudativos sobre los distintos litotipos de la Cordillera Oriental. Rionegro (SGC, 2014); Plancha 98 Arboledas (SGC, 2015); Plancha 110 Pamplona (SGC, 2015); Plancha 97 San Alberto (SGC, 2014).

### ***3.3.3. Ambiente fluvial***

Está conformado por geoformas originadas por la dinámica de ríos y quebradas, donde la erosión y la sedimentación moldean cauces, llanuras de inundación, terrazas y abanicos aluviales. Estos procesos están asociados tanto a la dinámica normal de los ríos como a eventos de inundación o crecientes, lo que da lugar a depósitos y modelados característicos en los valles (SGC, 2013).

Según el mapa geomorfológico escala 1:100.000 (SGC, 2015) el ambiente fluvial está representado principalmente por planos aluviales confinados (Fpac) y geoformas asociadas a cauces y terrazas. Se observan como superficies planas y alargadas en los valles encajonados, con depósitos que reflejan episodios sucesivos de acreción y erosión lateral. Su configuración evidencia la influencia de la tectónica en el encauzamiento de los ríos. Rionegro (SGC, 2014); Plancha 98 Arboledas (SGC, 2015); Plancha 110 Pamplona (SGC, 2015); Plancha 97 San Alberto (SGC, 2014).

### 3.3.4 Descripción de subunidades geomorfológicas

De acuerdo con la descripción de las anteriores unidades geomorfológicas, las unidades denudacionales están representadas por las terrazas sobreelevadas o “colgadas” (Dts), superficies relativamente planas a ligeramente onduladas que se encuentran a mayor altura que el nivel base local. Estas geoformas corresponden a antiguos niveles de terrazas fluviales aisladas por procesos de incisión, en donde predominan procesos de erosión frente a los de deposición. Se ubican en zonas elevadas respecto a los cauces principales y constituyen remanentes geomorfológicos asociados a la dinámica fluvial pasada.

En cuanto a las unidades fluviales, el plano aluvial confinado (Fpac) corresponde a superficies llanas u onduladas que bordean los cauces. Se forman a partir de procesos de inundación y acumulación de sedimentos finos, en algunos casos acompañados por diques naturales.

Las unidades estructurales como los espolones facetados (Sefc) se asocian a fallas inversas que originan facetas triangulares y laderas escarpadas vinculadas a movimientos en masa. Los espolones festoneados (Sefes) presentan crestas alomadas y abruptas, con deslizamientos y procesos erosivos que forman terrazas en “pata de vaca”. Los espolones simples (Ses), por su parte, también se disponen de manera perpendicular a las fallas, con pendientes moderadas a fuertes. Los ganchos de flexión (Sgf) exhiben morfologías arqueadas en planta, relacionadas con fallas de rumbo y drenajes subparalelos. Las sierras (Ss) corresponden a laderas largas, cóncavas y convexas, con drenaje subdendrítico a paralelo. Finalmente, las laderas de contrapendiente de sierras homoclinales (Sshlc) y las laderas estructurales de sierras

homoclinales (Sshle) se desarrollan sobre rocas sedimentarias inclinadas, mostrando pendientes escarpadas, drenajes subparalelos (SGC, 2015).

**3.4 Movimientos en masa**

Los movimientos en masa, en Geología, se abordan desde los aspectos geomorfológicos de la superficie de rotura, del medio por el cual se propaga el material desestabilizado y los tipos de material térreo involucrado. Tradicionalmente estos aspectos técnicos se estudian a partir de las primeras clasificaciones establecidas por Varnes (1978), como se muestra en la (Figura 7).

**Figura 7**

*Movimientos en masa por mecanismo de rotura y material involucrado*

*Varnes (1978)*

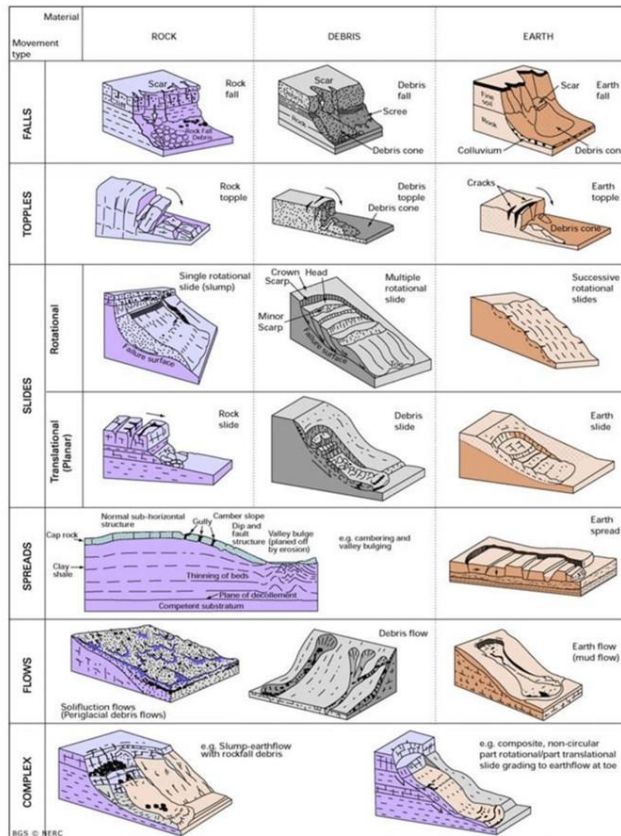
TYPE OF MOVEMENT	TYPE OF MATERIAL			
	BEDROCK		SOILS	
<u>FALLS</u>	<u>ROCKFALL</u>		<u>SOILFALL</u>	
FEW UNITS <u>SLIDES</u>	ROTATIONAL <u>SLUMP</u>	PLANAR <u>BLOCK GLIDE</u>	PLANAR <u>BLOCK GLIDE</u>	ROTATIONAL <u>BLOCK SLUMP</u>
MANY UNITS		<u>ROCKSLIDE</u>	<u>DEBRIS SLIDE</u>	<u>FAILURE BY LATERAL SPREADING</u>
<u>FLOWS</u>	ALL UNCONSOLIDATED			
	ROCK FRAGMENTS	SAND OR SILT	MIXED	MOSTLY PLASTIC
	<u>ROCK FRAGMENT FLOW</u>	<u>SAND RUN</u>	<u>LOESS FLOW</u>	
DRY			<u>RAPID EARTHFLOW</u>	<u>DEBRIS AVALANCHE</u>
				<u>SLOW EARTHFLOW</u>
WET		<u>SAND OR SILT FLOW</u>	<u>DEBRIS FLOW</u>	<u>MUDFLOW</u>
<u>COMPLEX</u>	COMBINATIONS OF MATERIALS OR TYPE OF MOVEMENT			

Nota: Tomado de Varnes 1978, Slope movement types and processes. In R. L. Schuster y R. J. Krizek (Eds.), Landslides: Analysis and Control (Transportation Research Board Special Report 176, pp. 11–33). National Academy of Sciences.

A partir de la clasificación establecida por Varnes (1978), se han desarrollado trabajos de actualización sobre la clasificación de movimientos en masa, como las desarrolladas por Cruden y Varnes (1996), que preservan lo básico de este tipo de procesos geológicos (Figura 8): Tipo de movimiento y Material terreo involucrado.

**Figura 8**

*Clasificación de movimientos en masa Cruden y Varnes (1996)*

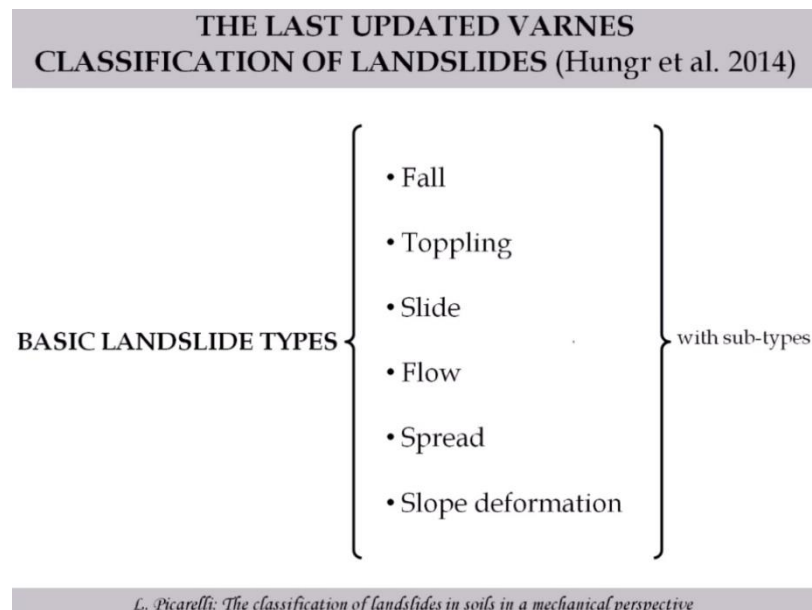


Nota: Tomado de Cruden y Varnes 1996, Cruden, D. M., y Varnes, D. J. (1996a). Landslide types and processes. In Transportation Research Board Special Report 247: Landslides—Investigation and Mitigation (pp. 36–75). National Research Council.

El mejor entendimiento de los procesos que se desarrollan en la naturaleza y que explican de una mejor forma la ocurrencia y comportamiento de las desestabilizaciones del terreno de una determinada región ha conllevado a actualizaciones en la clasificación de los movimientos en masa como se muestra en la Figura 9 y más recientes como la presentada en la Figura 10.

**Figura 9**

*Tipos básicos de movimientos en masa (Hüngr et al, 2014)*



Nota: Tomada de Hungr et at 2014, Hungr, O., Leroueil, S., y Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides, 11(2), 167–194.

**Figura 10**

*Clasificación movimientos en masa (Hüngr et al., 2014)*

Type of movement	Rock	Soil
Fall	1. <i>Rock/ice</i> fall <sup>a</sup>	2. <i>Boulder/debris/silt</i> fall <sup>a</sup>
Topple	3. <i>Rock block</i> topple <sup>a</sup>	5. <i>Gravel/sand/silt</i> topple <sup>a</sup>
	4. <i>Rock flexural</i> topple	
Slide	6. <i>Rock rotational</i> slide	11. <i>Clay/silt</i> rotational slide
	7. <i>Rock planar</i> slide <sup>a</sup>	12. <i>Clay/silt</i> planar slide
	8. <i>Rock wedge</i> slide <sup>a</sup>	13. <i>Gravel/sand/debris</i> slide <sup>a</sup>
	9. <i>Rock compound</i> slide	14. <i>Clay/silt</i> compound slide
	10. <i>Rock irregular</i> slide <sup>a</sup>	
Spread	15. <i>Rock slope</i> spread	16. <i>Sand/silt</i> liquefaction spread <sup>a</sup>
		17. <i>Sensitive clay</i> spread <sup>a</sup>
Flow	18. <i>Rock/ice</i> avalanche <sup>a</sup>	19. <i>Sand/silt/debris</i> dry flow
		20. <i>Sand/silt/debris</i> flowslide <sup>a</sup>
		21. <i>Sensitive clay</i> flowslide <sup>a</sup>
		22. <i>Debris</i> flow <sup>a</sup>
		23. <i>Mud</i> flow <sup>a</sup>
		24. <i>Debris</i> flood
		25. <i>Debris</i> avalanche <sup>a</sup>
		26. <i>Earth</i> flow
		27. <i>Peat</i> flow
Slope deformation	28. <i>Mountain</i> slope deformation	30. <i>Soil</i> slope deformation
	29. <i>Rock</i> slope deformation	31. <i>Soil</i> creep
		32. <i>Solifluction</i>

For formal definitions of the landslide types, see text of the paper.

<sup>a</sup> Movement types that usually reach extremely rapid velocities as defined by Cruden and Varnes (1996). The other landslide types are most often (but not always) extremely slow to very rapid

Nota: Tomada de Hungr et al 2014, Hungr, O., Leroueil, S., y Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194.

## 4. Metodología

La metodología que se empleó en este trabajo de grado se estructuró en seis fases que se presentan a continuación:

### 4.1. Estado del arte

Se reunió y revisó información bibliográfica de estudios previos o relacionados con la temática abordada, tales como artículos (e.g. Glade et al., 2007; Sepúlveda y Petley, 2015; Phillips y Davies, 1991; Chevalier, Bateman, Pinzón, Hürlimann y Ziegler, 2013) y guías metodológicas (e.g. Servicio Geológico Colombiano, 2012). Se recopiló información sobre la geología regional, incluyendo los mapas existentes del Servicio Geológico Colombiano, así como la bibliografía contenida en las planchas geológicas 97 (Arias-Tauta y Vargas-Higuera,

1981), 98 (Fuquen et al., 2010), 109 y 110 (Ward et al., 1973). Adicionalmente, se consideraron herramientas electrónicas como geovisores e.g. SGC (2019).

#### **4.2. Precampo**

Se realizó un alistamiento de implementos a usar en campo tales como martillo geológico, brújula, lupa, GPS, libreta de campo, mapas topográficos y ácido clorhídrico, entre otros, con el fin de asegurar la adecuada recolección de datos durante la actividad de campo.

Se planearon salidas de campo centradas en la vía Suratá–Cachirí y sus veredas, que abarcaron recorridos limitados por la Laguna del Alto (sur), la Quebrada La Violeta (norte), la Quebrada La Popa (oriente) y la Quebrada Dos Aguas (occidente).

#### **4.3. Campo**

El trabajo de campo se llevó a cabo mediante cinco transectas distribuidas estratégicamente en el área de estudio, tomando como referencia la cartografía elaborada por el SGC (2015). En cada transecta se registraron tanto las características litológicas como los datos estructurales obtenidos a partir de la descripción detallada de los afloramientos. La cantidad de estaciones y la extensión de cada transecta estuvieron determinadas por las condiciones del terreno, así como por los cambios litológicos y morfológicos identificados, con el propósito de definir de manera precisa la secuencia litológica.

Se realizó un mapeo geológico detallado de la zona mediante la toma de datos de campo identificando las litologías presentes y las estructuras geológicas relevantes teniendo como objetivo el empalme de las planchas 98 y 110 propuestas por el SGC (2015).

#### **4.4. Recolección de datos geoespaciales**

Se obtuvieron imágenes de dron DJI Mini 3 Pro para generar un ortomosaico (ver Anexo B) y de esta manera determinar la geometría y distribución de los diferentes movimientos en masa en la vereda San Luis en la parte alta de cuenca hidrográfica del Rio Cachirí, adicionalmente mediante estas imágenes se estudió geología de la zona de estudio.

A partir de imágenes de *BaseMap* en el software ArcGIS se delimitaron los movimientos en masa. Posteriormente, mediante el DEM obtenido de ALOS PALSAR con resolución de 12 metros se hizo uso de herramientas como Slope y Curvature para generar mapas de pendientes y curvaturas y a partir de estos se analizaron los polígonos correspondientes. En estos se aplicó la herramienta Zonal Statistics, con el fin de determinar la pendiente promedio de cada movimiento en masa y establecer si éstos se desarrollaban en superficies cóncavas o convexas.

#### **4.5. Análisis de la relación tectónico-estructural con movimientos en masa**

Se reconocieron las orientaciones predominantes de las fallas, lineamientos y drenajes en el área de estudio, las cuales fueron posteriormente representadas gráficamente a través del software FracPaQ. Este programa, de código abierto y disponible en MATLAB™ (Healy et al.,

2017), está diseñado para la caracterización y el análisis de sistemas de fracturas en rocas y minerales.

Mediante el software Stereonet, se representaron las orientaciones de los planos de falla y las familias de diaclasas, a partir de los datos estructurales recolectados en campo. Este programa, de código abierto y distribución gratuita está diseñado para la visualización y análisis estadístico de datos estructurales, permitiendo representar estereográficamente planos y lineaciones a partir de mediciones de campo.

Se procesaron los datos recolectados en campo, el análisis SIG y las observaciones morfológicas para entender cómo las características tectónicas y estructurales afectan a los movimientos en masa.

#### **4.6. Comparación con estudios previos**

Se compararon los datos obtenidos durante el trabajo de campo, los análisis SIG y las interpretaciones morfodinámicas con estudios previos realizados en la región.

### **5. Resultados**

A continuación, se presentan los resultados de esta investigación derivados del desarrollo de cada objetivo específico.

### 5.1 Cartografía geológica

La cartografía geológica del área de estudio se realizó a partir de la integración de cinco transectas principales (Figura 11), con las cuales se identificaron 9 unidades geológicas distribuidas en la zona, dichas unidades se distribuyen en cada transecta de la siguiente manera.

**La transecta uno** se llevó a cabo a lo largo del trayecto comprendido entre la Loma de Tío Lorenzo a cincuenta metros al oriente de la finca Las Palmas y la Loma Las Cabras a cincuenta metros al occidente de la finca La Venta, atravesando la Torre 110 de energía de alta tensión. En sentido oriente–occidente se reconocieron areniscas finas a gruesas intercaladas con arcillolitas, que se correlacionan con la Formación Río Negro. Más adelante aparecen arcillolitas gris oscuras de estructura tabular, calizas intercaladas por margas y niveles de chert, asociadas a la Formación Tibú-Mercedes. En la Loma de la Torre 110 afloran calizas grises masivas, correlacionadas con la Formación Aguardiente. Sobre ellas se identificaron intercalaciones de arcillolitas y calizas propias de la Formación Capacho y finalmente calizas negras laminadas con abundante materia orgánica, vinculadas a la Formación La Luna. En algunos tramos las unidades están cubiertas por depósitos cuaternarios de origen coluvial.

**La transecta dos** se desarrolló en el sector sur del área de estudio, abarcando la divisoria de aguas entre la cuenca del río Cachirí y la cuenca del río Suratá, pasando por la Laguna del Alto. En esta zona se observaron areniscas rojas de grano medio a grueso y conglomerados, que se correlacionan con el Grupo Girón. Más al oriente se reconocieron arcillolitas oscuras que pertenecen a la Formación Tibú- Mercedes. Hacia el occidente afloran filitas y cuarcitas micáceas, que se relacionan con las Metasedimentitas de Guaca La Virgen. El área presenta además extensos depósitos coluviales que cubren parcialmente las litologías.

**La transecta tres** se realizó a lo largo del cauce de la Quebrada Marcela, desde la confluencia con la Quebrada El Muleto hasta su desembocadura en el río Cachirí. En sentido oriente–occidente se describieron areniscas rojas con niveles conglomeráticos, que corresponden al Grupo Girón. Más adelante afloran calizas grises masivas, relacionadas con la Formación Aguardiente, y posteriormente areniscas finas a gruesas, correlacionadas con la Formación Río Negro. En las inmediaciones de la Vereda Marcela se reconocieron depósitos coluviales que cubren parte de las unidades, mientras que en la Vereda San Luis las rocas están mejor expuestas.

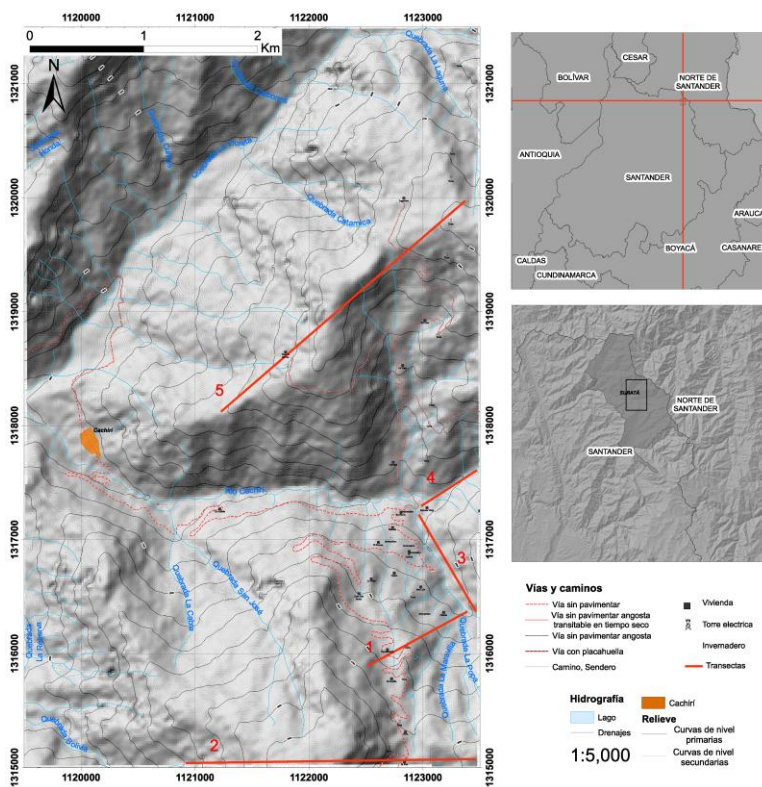
**La transecta cuatro** se desarrolló desde la Escuela Vieja de Marcela hasta el camino que conduce a La Taravita cien metros cauce arriba de la Quebrada Tablanca desde la desembocadura con el Río Cachirí. En este perfil se observaron areniscas con intercalaciones conglomeráticas, que se correlacionan con el Grupo Girón, aunque en gran parte se encuentran cubiertas por depósitos cuaternarios y abanicos coluviales. De forma complementaria, en estaciones cercanas se identificaron calizas masivas vinculadas a la Formación Tibú-Mercedes.

**La transecta cinco** se extendió desde la Loma de Forero cincuenta metros al occidente de Silvino hasta la Loma de la Torre 103 cien metros al sur de Lagunitas. En este trayecto, de occidente a oriente, se registraron areniscas y conglomerados, correlacionados con el Grupo Girón. Más adelante se encontraron arcillolitas gris oscuras, correspondientes a la Formación Tibú-Mercedes, seguidas por calizas grises de la Formación Aguardiente. Finalmente, se repiten nuevamente areniscas y conglomerados del Grupo Girón, lo que indica una repetición estratigráfica relacionadas a un pliegue.

Adicionalmente, en los sectores occidentales del área de estudio particularmente en las veredas Gramalotico y La Violeta se identificaron gneises con cuarzo y plagioclasa, que corresponden al Gneis de Bucaramanga, y filitas con intercalaciones de cuarcitas y esquistos, correlacionadas con las Metasedimentitas de Guaca La Virgen. Estas unidades constituyen el basamento metamórfico más antiguo del área, sobre el cual se disponen las secuencias sedimentarias Jurásica y Cretácicas.

**Figura 11**

*Mapa de transectas.*



Nota: Mapa de localización elaborado y modificado con transectas para la presente investigación (2025).

Adicionalmente se hizo una descripción detallada de las unidades aflorantes teniendo en cuenta los parámetros de la libreta de campo dando como resultado:

**Unidad 1 - Gneis de Bucaramanga (PEb):** Esta compuesta principalmente por rocas metamórficas, predominando los gneises, con presencia subordinada de esquistos y cuarcitas. El gneis presenta una foliación bien desarrollada, formada principalmente por Cuarzo y Feldespato Plagioclasa. Su color es pardo amarillento (5Y 6/4 según la escala de Munsell), con una estructura gnéisica marcada por la orientación preferencial de los clastos y un brillo vítreo. La textura es de grano grueso. En el área de estudio se identificaron dos variedades de gneis, una de las cuales exhibe clastos de menor tamaño y contiene minerales "ojosos", como la Muscovita.

Los esquistos presentes en esta unidad están compuestos principalmente por minerales micáceos y Cuarzo. Presentan coloraciones verdosas (10YR 2/2 según Munsell), con estructura esquistosa bien definida, textura de grano fino y un brillo sedoso característico. Algunas muestras, fueron clasificadas como cuarcitas (Figura 12).

**Figura 12***Fotografías de afloramiento del Gneis de Bucaramanga*

Nota: Fotografía de afloramiento tomada durante la investigación (2025).

Unidad 2 - Metasedimentitas de Guaca La Virgen (Pgv): Compuesta principalmente por rocas metamórficas, predominando las filitas, seguidas por cuarcitas y, en menor proporción, esquistos. Las rocas presentan foliaciones bien desarrolladas, compuestas por minerales micáceos como Muscovita y Biotita. Muestran una estructura esquistosa de tipo filítico y un característico brillo satinado. Su color es pardo grisáceo (Munsell 5YR 6/2), con textura de grano fino. La unidad presenta intercalaciones de cuarcitas y esquistos (Figura 13).

**Figura 13**

*Fotografías de afloramiento de Metasedimentitas de Guaca La Virgen*



Nota: Imagen de afloramiento durante el estudio (2025)

Unidad 3 – Grupo Girón (Jg): Conformada por rocas sedimentarias clásticas con variabilidad granulométrica que va desde areniscas finas hasta conglomerados. Presenta tonalidades predominantemente pardo-rojizas (Munsell 5R 4/6). Mineralógicamente, está compuesta por Cuarzo, Feldespatos Plagioclasa y fragmentos líticos.

Se distribuye principalmente al occidente del área de estudio, mientras que hacia el nororiente aflora principalmente a largo del cauce de la Quebrada La Violeta. En el sector oriental, particularmente en la zona de la Quebrada Tablanca, se observan intercalaciones de areniscas finas y arcillolitas. La unidad se encuentra en contacto fallado con la Unidad dos hacia el occidente y con otras unidades sedimentarias hacia el oriente (Figura 14).

**Figura 14**

*Fotografías de afloramiento del Grupo Girón*



Nota: Imagen de afloramiento (2025)

Unidad 4 – Formación Río Negro (K1rn): Compuesta por rocas sedimentarias clásticas con granulometría que varía desde areniscas finas hasta areniscas gruesas. Presenta tonalidades pardo-grisáceas (Munsell 10R 8/1). Compuesta por Cuarzo, Feldespatos Plagioclasa, fragmentos líticos y óxidos (Figura 15).

Se distribuye hacia el oriente del área de estudio, en la Quebrada Palmas y a lo largo del camino hacia las veredas Tablanca y la finca Laureles. Se observa una gradación normal de las areniscas e intercalaciones con arcillolitas en algunos sectores. Esta unidad se encuentra en contacto con la unidad cinco.

**Figura 15**

*Fotografías de afloramiento de la Formación Río Negro*



Nota: Fotografía de afloramiento desarrollada en trabajo de campo (2025)

Unidad 5 – Formación Tibú-Mercedes (K1tm): Se compone principalmente por lutitas de tonalidad gris oscuro (Munsell 10R 4/1), con estructura tabular, intercaladas con niveles de calizas lumaquélicas, areniscas cuarzosas calcáreas y bioturbadas. Hacia la parte superior de la secuencia se presentan calizas arenosas y fosilíferas, acompañadas por margas, dolomitas y chert con intercalaciones de arcillolitas. En la base afloran margas de granulometría fina, reactivas al ácido y de color gris claro (Munsell 10R 6/1), seguidas por niveles de chert con estructura tabular cortado por venas de calcita de tonalidad negro-grisácea (10R 2/1). En el tope predominan calizas tipo mudstone, intercaladas con arcillolitas de color gris oscuro (10R 3/1).

Aflora hacia el oriente del área de estudio, en la Quebrada Las Palmas, la vía al Sagrado Corazón y Laureles, así como en la ladera de la Loma de Las Palmas (Figura 16).

**Figura 16**

*Fotografías de afloramiento de la Formación Tibú-Mercedes*



Nota: Fotografía de afloramiento tomada la investigación (2025)

Unidad 6 - Formación Aguardiente (K1a): Si bien en la literatura la Formación Aguardiente se describe como una unidad predominantemente compuesta por areniscas cuarzosas, en el área de estudio el miembro aflorante se encuentra representado principalmente por calizas de color gris oscuro (10R 3/1), con estructura tabular y dispuestas en paquetes gruesos. Se localiza al oriente del área de estudio, especialmente en la Loma de la Torre 110 cien metros al sur del Campamento y sobre el filo divisorio entre la cuenca del río Cachirí y la cuenca de La Violeta (Figura 17).

**Figura 17**

*Fotografías de afloramiento de la Formación Aguardiente*



Nota: Fotografía de afloramiento durante la investigación (2025)

Unidad 7 – Formación Capacho (K1c): Compuesta por arcillolitas y calizas de color gris oscuro (10R 4/1–10R 3/1), con estructura tabular. Las arcillolitas se presentan en capas delgadas, mientras que las calizas se disponen en paquetes gruesos. Esta unidad aflora en la parte baja de la Loma de la Torre 110 y a lo largo del camino hacia el invernadero entre la finca Palmas y Tapias, extendiéndose también hacia el oriente del área de estudio. Se encuentra en contacto normal con la unidad ocho (Figura 18).

**Figura 18**

*Fotografías de afloramiento de la Formación Capacho*



Nota: Imagen de afloramiento (2025).

Unidad 8 – Formación La Luna (K21): Compuesta por rocas químicas con estructura tabular y tonalidad pardo-grisácea (10R 3/2, según Munsell). Fue clasificada como liditas e incluye intercalaciones de arcillolitas con coloración similar. En esta unidad se observan repliegues y flexiones, y aflora predominantemente en la zona de la cantera El Bosque en la Torre 110, hacia el oriente del área de estudio (Figura 19).

**Figura 19**

*Fotografías de afloramiento de la Formación La Luna*

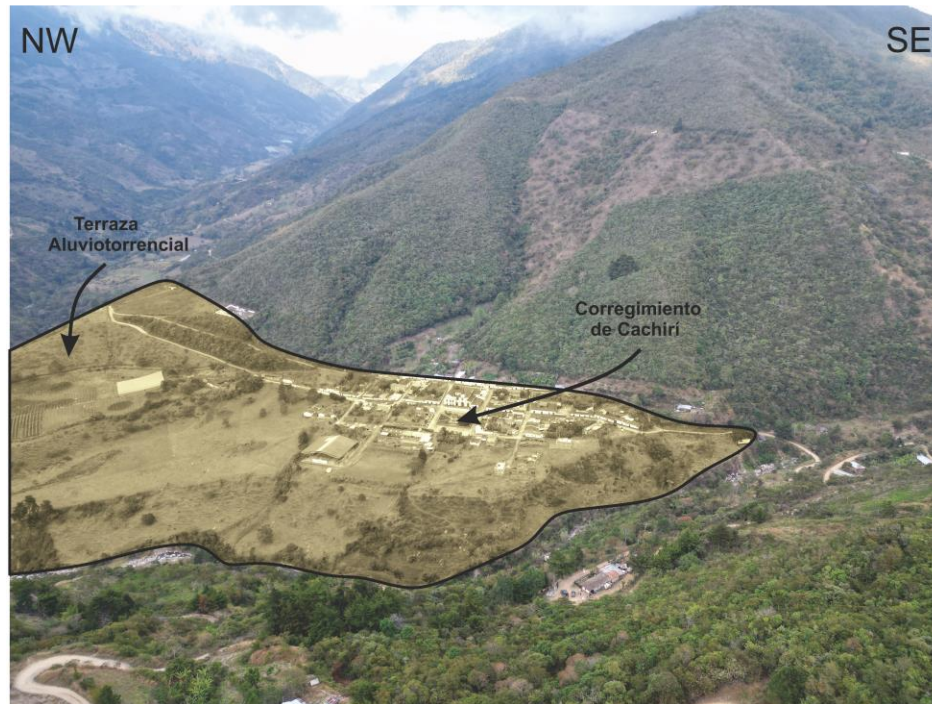


Nota: Fotografía de afloramiento obtenida durante la investigación de campo (2025)

Unidad 9 – Terraza aluviotorrencial (Qt): Deposito cuaternario conformado principalmente por superficies planas elevadas respecto al cauce actual. están constituidas por sedimentos de granulometrías de grava a arena con matriz arenosa con intercalaciones de limos. En el área de estudio se identificaron principalmente en el corregimiento de Cachirí, así como en la desembocadura de las quebradas Marcela y Tablanca, donde conforman terrazas retrogresivas vinculadas a incisión y agradación del drenaje (Figura 20).

**Figura 20**

*Fotografía de Terraza aluviotorrencial del corregimiento de Cachirí*



Nota: Fotografía de afloramiento obtenida durante la investigación de campo (2025)

Unidad 10 - Depósito Aluvial (Qal): Depósitos cuaternarios constituidos por materiales de gravas, arenas y limos dispuestos en barras de canal diques y llanuras de inundación los clastos mayoritariamente son subredondeados a angulosos predominantemente se tienen fragmentos de líticos rodados de unidades sedimentarias y metamórficas de localidades cercanas. Se localizan principalmente en los cauces de la Quebrada Dos Aguas (Vereda Gramalotico) y la Quebrada la Violeta (Figura 21).

**Figura 21**

*Fotografía de Depósito Aluvial en la Quebrada Dos Aguas*

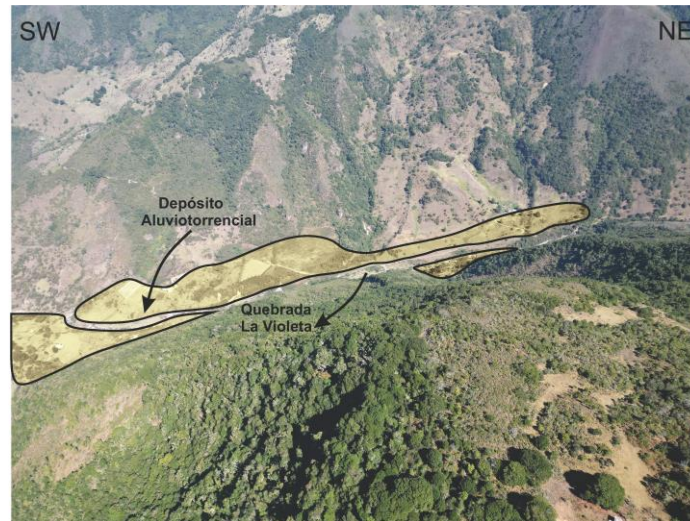


Nota: Imagen de afloramiento (2025)

Unidad 11 - Depósito Aluviotorrencial (Qat): Depósito cuaternario de bloques gravas y arenas gruesas con matriz arenosa y limo arcillosa, se asocian a procesos de flujo de detritos antiguos que transportaron líticos de gran tamaño hasta los cauces y posteriormente fueron moldeados por el drenaje haciendo que se vean alargados. Estos depósitos se encuentran principalmente en la Quebrada La Violeta, la Quebrada Marcela, la Quebrada Tablanca y el río Cachirí, donde se muestran estas geoformas torrenciales y acumulaciones alargadas (Figura 22).

**Figura 22**

*Fotografía Depósito aluviotorrencial en la Quebrada La Violeta*

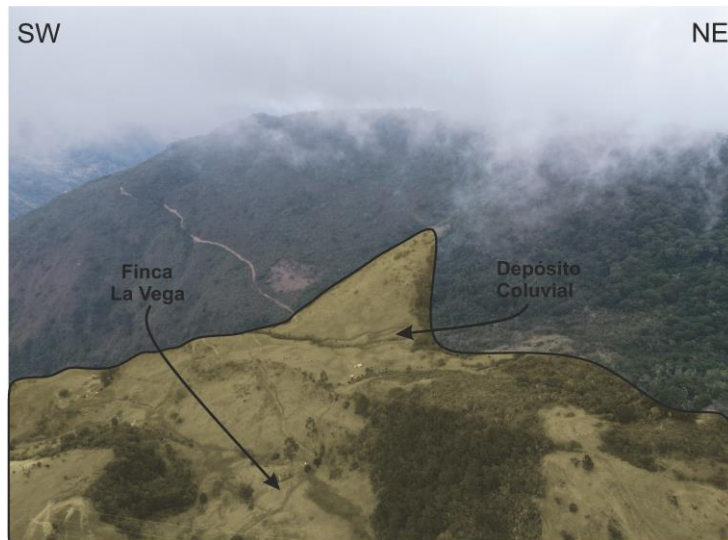


Nota: Fotografía de afloramiento desarrollada en trabajo de campo (2025)

Unidad 12 - Depósito Coluvial (Qc): Depósitos cuaternarios localizados en las laderas del área de estudio conformado principalmente por clastos de grano grava y arena en una matriz arcillosa de coloraciones pardo-amarillas (Munsell 10YR 5/3 -10YR6/4) se encuentran en el área de estudio principalmente cayendo a los cauces de la Quebrada La Violeta y el río Cachirí en la Vereda San Luis, estos son propensos a movimientos en masa (Figura 23).

**Figura 23**

*Fotografía del coluvión en la Vereda San Luis*



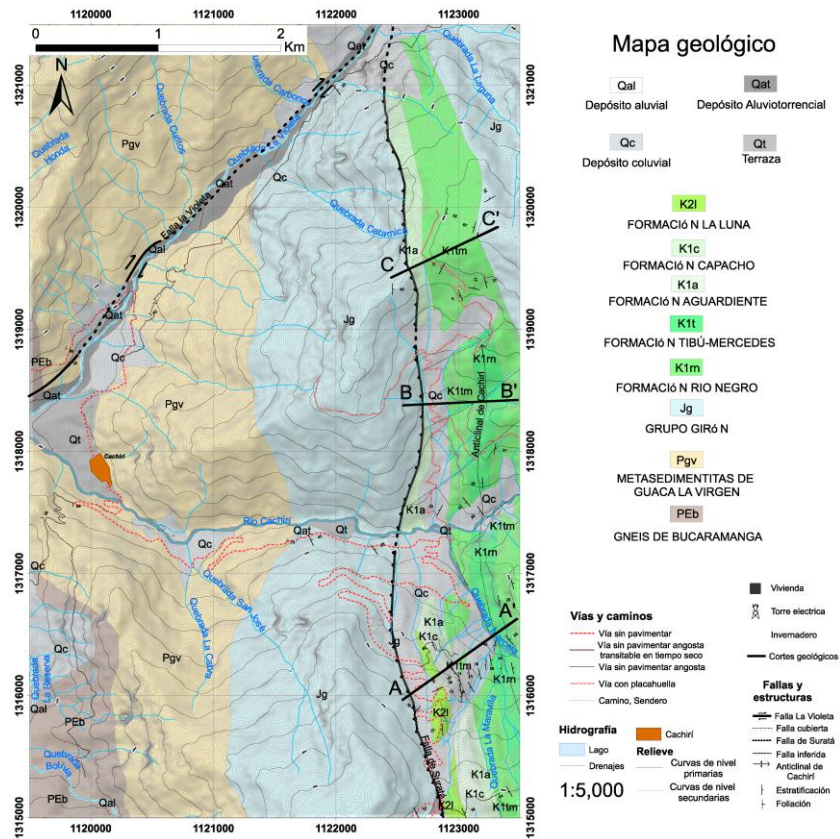
Nota: Fotografía de afloramiento tomada la investigación (2025)

Una vez finalizado el trabajo de campo, es decir, mediante la realización de estaciones geológicas en las transectas y otras distribuidas en la zona de estudio, se integró la información y se obtuvo el mapa geológico, el cual constituye la síntesis cartográfica del levantamiento realizado (Figura 24).

Figura 24

Mapa geológico del área de estudio

Ver anexo A

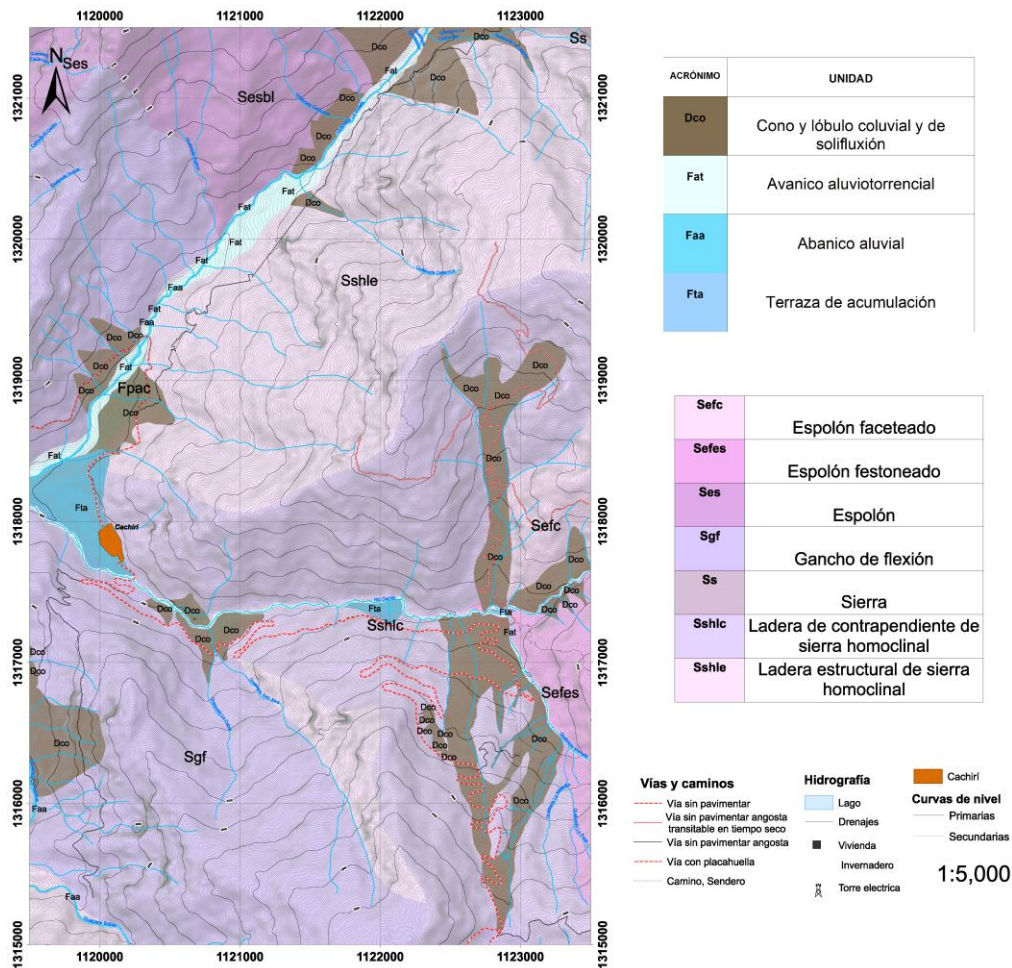


Nota: Mapa geológico elaborado a partir del análisis de campo y datos propios (2025)

Adicionalmente, según los datos obtenidos en campo y como aporte para complementar el mapa geomorfológico propuesto por el (SGC, 2015), se tiene que las unidades cuaternarias predominantes corresponden principalmente a un ambiente aluviotorrencial (Figura 25).

Figura 25

Mapa geomorfológico modificado



Nota: Mapa geológico del servicio geológico y modificado.

Tomado de Planchas 97 San Alberto (SGC, 2014), 98 Arboledas (SGC, 2015), 109 Rionegro (SGC, 2014) y 110 Pamplona (SGC, 2015).

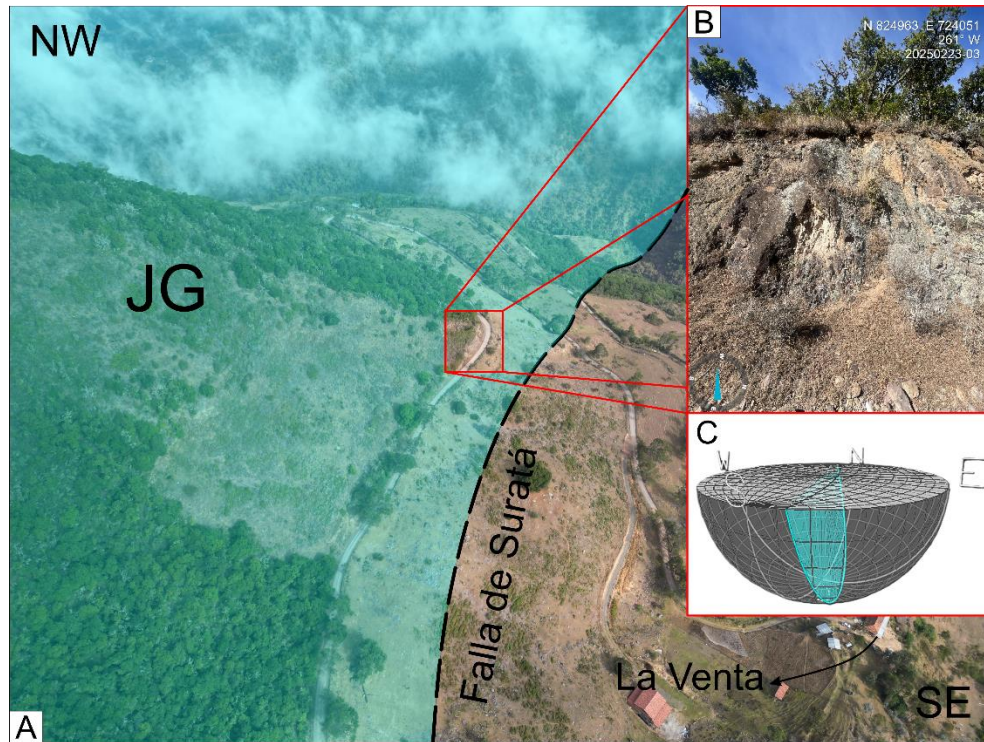
## 5.2 Geología estructural

La geología estructural de la zona está dominada por las fallas de Suratá y La Violeta, siendo estas estructuras antitéticas en el modelo de dominó transpresivo del Macizo de Santander

(Velandia, 2017). La cinemática de la Falla de Suratá cambia su componente de buzamiento a lo largo de toda su extensión, siendo principalmente dextral compresiva en la mayoría de todo su trayecto (Laguado, 2023). Para la zona de estudio, el plano de falla aflorante en la unidad perteneciente a las rocas del Grupo Girón muestra una dirección en su buzamiento y planos escalonados con cinemática normal y dirección en azimut de rumbo de 347/79 (Figura 26). Sin embargo, dadas las condiciones del terreno, se tiene únicamente este plano de falla, por lo cual no es posible determinar con certeza si el comportamiento de la Falla de Suratá se presenta de igual manera en todo su trazo. No obstante, este rasgo estructural podría corresponder a una estructura local de desplazamiento de equilibrio, donde el fracturamiento del macizo y la pronunciada pendiente de la ladera habrían favorecido el movimiento descendente de bloques para compensar y estabilizar esta parte del relieve. En este sentido, se optó por comprender la estructura de la Falla de Suratá con base en modelos más detallados realizados anteriormente, que permiten una interpretación más completa de su comportamiento regional (Laguado, 2023).

Figura 26

*Indicador morfológico a escala meso de afloramiento*



Nota: Fotografía aérea capturada para la obtención de indicadores morfoestructurales del área de estudio (2025)

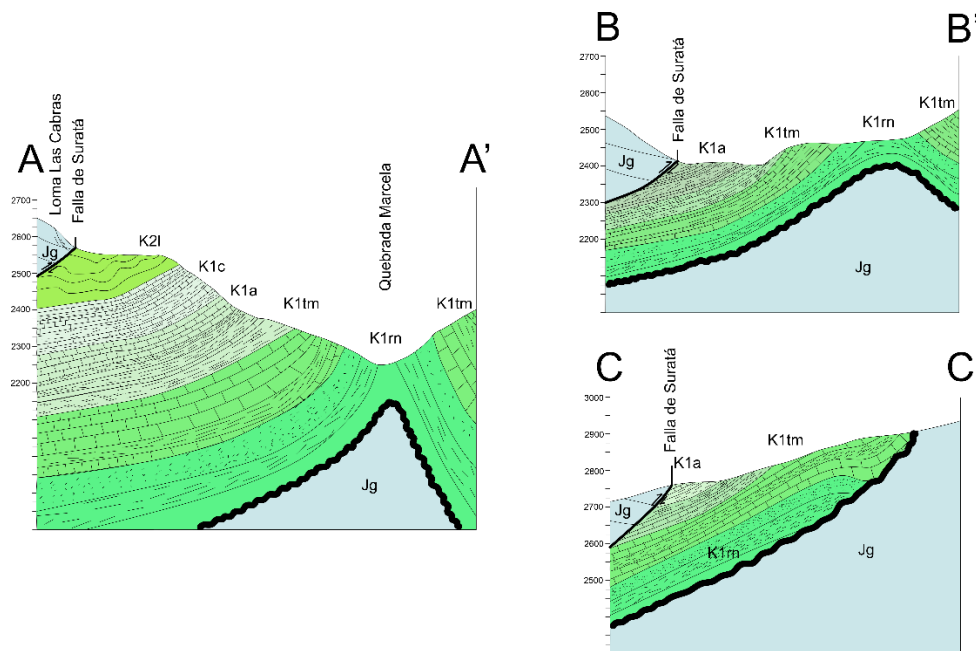
A. Fotografía panorámica de dron DJI mini 3 pro; B. Fotografía de afloramiento de la unidad conglomerática correspondiente al Grupo Girón; C. Modelo 3D del plano de falla obtenido mediante el software Stereonet.

Las unidades cretácicas se distribuyen al oriente de la Falla de Suratá, conformando un anticlinal cuyo eje se encuentra con inmersión hacia el norte (Figura 27). Estas rocas evidencian

un intenso grado de fracturamiento, presentando mayor deformación a medida que disminuye la distancia entre la falla, generando un fuerte plegamiento claramente visible en la unidad ocho, Formación La Luna (Figura 19).

**Figura 27**

*Cortes del mapa geológico*



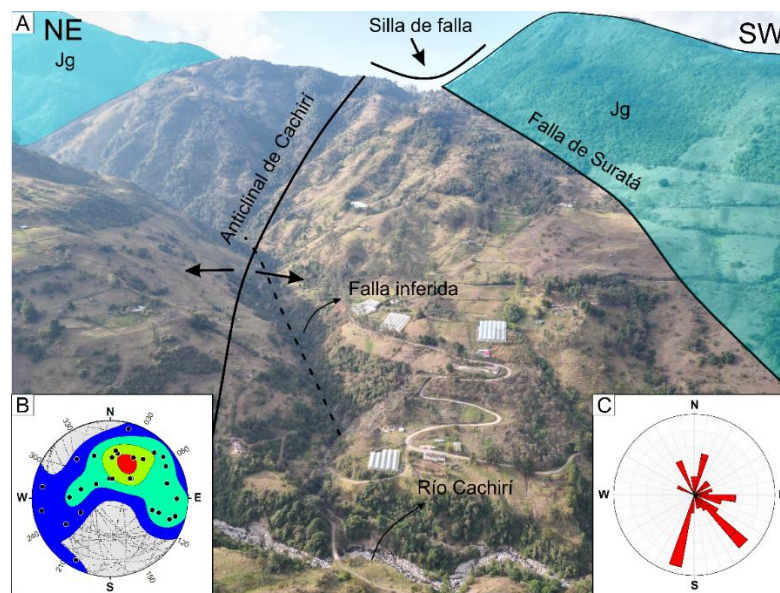
Nota: Corte geológico elaborado con base en observaciones y datos de campo (2025)

El área presenta una relación estructural entre el anticlinal de Cachirí y la Falla de Surata, evidenciándose que esta última posee una orientación general casi norte-sur (N-S) (Figura 24), paralela al eje del pliegue denominado en este trabajo como Anticlinal de Cachirí. Así mismo, los datos de las principales familias de diaclasas medidas en las unidades cretácicas que conforman el anticlinal, presentan tres direcciones preferenciales: la primera, paralela a la Falla

de Suratá, con rumbo  $N15^{\circ}E-S15^{\circ}W$ ; la segunda, perpendicular a la falla y al eje del anticlinal, con una orientación aproximada hacia el oriente; y la tercera, oblicua respecto a ambas estructuras, con direcciones predominantes  $S25^{\circ}E-N25^{\circ}W$  (Figura 24 y Figura 28). Estas relaciones sugieren una estrecha vinculación entre el sistema de fracturamiento y la configuración estructural regional controlada por la Falla de Suratá en el sector conformado entre el Río Cachirí y la Laguna del Alto.

### Figura 28

*Indicadores morfológicos de la Falla de Suratá en las veredas San Luis y Marcela*



Nota: Imagen tomada por dron con fines de análisis de indicadores morfoestructurales (2025)

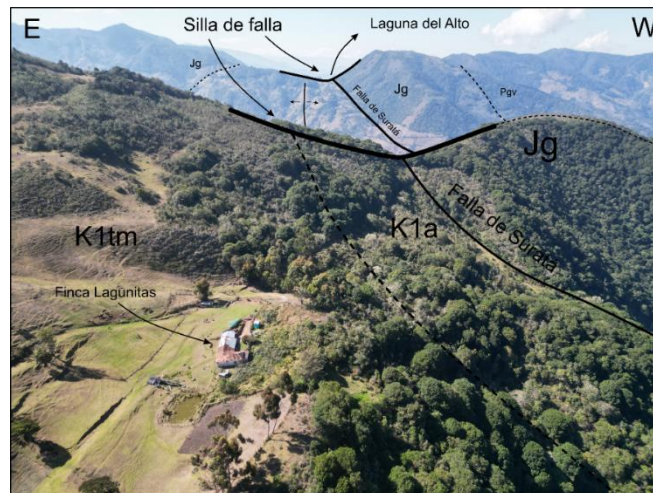
A. Fotografía panorámica de dron DJI mini 3 pro; B. Orientación de diaclasas de las Formaciones sedimentarias que conforman el Anticlinal de Cachirí. C. Diagrama de rosas para las formaciones cretácicas.

A lo largo de su trayecto, la Falla de Suratá muestra diferentes indicadores morfológicos asociados a su actividad tectónica. Entre ellos se reconocen dos sillas de falla definidas. La primera se ubica hacia el sur del área de estudio y coincide con la divisoria de aguas entre las cuencas de los ríos Suratá y Cachirí. La segunda silla de falla se localiza en el sector de Lagunitas, donde la continuidad de la Falla de Suratá produce una nueva depresión morfológica. En este sector también se observa el contacto fallado entre las rocas del Grupo Girón y las rocas cretácicas correspondientes a las Formaciones Tibú-Mercedes y Aguardiente, reflejando el fuerte control tectónico de la falla sobre la disposición litológica y el modelado del relieve local

Figura 29).

### Figura 29

#### *Indicadores morfológicos de la Falla de Suratá en la Finca Lagunitas*

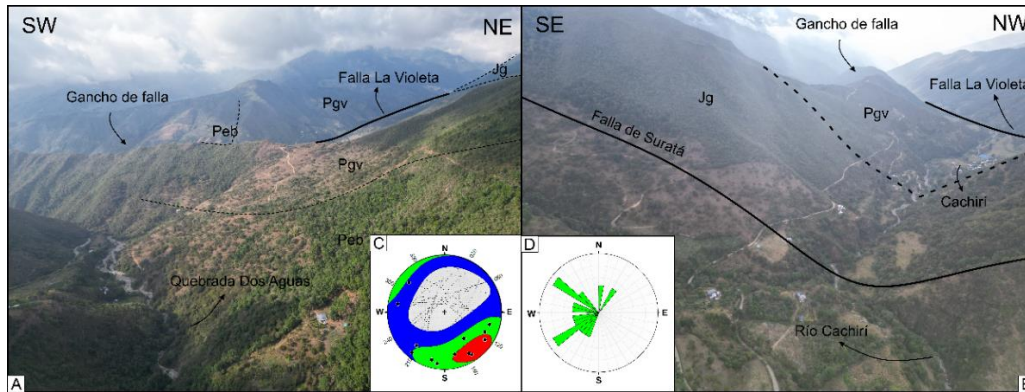


Nota: Fotografía aérea realizada para documentar características morfoestructurales del terreno (2025)

Hacia el noroccidente del área de estudio se identifica La Quebrada La Violeta la cual se muestra como un drenaje alineado (Figura 24), evidenciando un control estructural directo sobre este. En este sector se reconoce además un gancho de falla al costado del casco urbano de Cachirí, claramente distinguible en el relieve (Figura 30) sin embargo la orientación y ubicación de este no se contempla en el área de estudio, podría estar asociado a estructuras de mayor complejidad. Estos rasgos morfológicos sugieren la presencia de una componente de cizalla lateral en la Falla La Violeta. Por otro lado, las rocas aflorantes a lo largo de su trazo presentan un sistema de diaclasas con orientaciones preferenciales nororiente–suroccidente y noroccidente–suroriente (Figura 30), configurando un patrón de fracturamiento paralelo y perpendicular a la Falla La Violeta, similar a los datos obtenidos para la Falla de Suratá. Estas estructuras sugieren un control tectónico sobre la fracturación y la disposición del macizo rocoso. La coexistencia de la alineación de la quebrada, el gancho de falla, las unidades litológicas mencionadas y el patrón de diaclasas refuerza la interpretación de una actividad tectónica significativa, coherente con el marco estructural regional dominado por la influencia de la Falla de Suratá y sus estructuras asociadas, siendo importante para definir la relación tectono-estructural con los movimientos en masa presentes en este sector.

**Figura 30**

*Fotografías de las Veredas Gramalotico y San José con indicadores morfológicos*



Nota: Imagen de dron obtenida para la identificación de indicadores morfoestructurales (2025)

A. Fotografía panorámica Vereda Gramalotico; B. Fotografía panorámica Vereda San José; C. Orientación de diaclasas para las rocas cristalinas y del Grupo Girón cercanas a La Falla La Violeta. D. Diagrama de rosas para la vereda La Violeta.

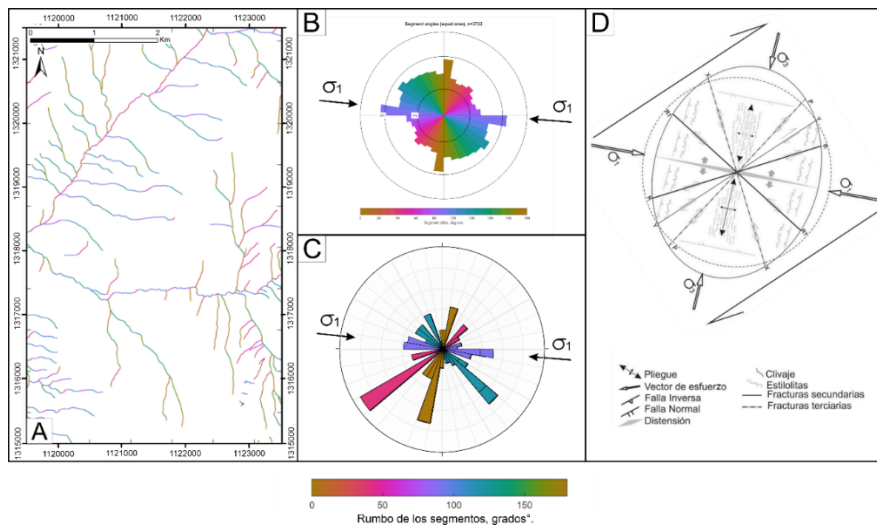
La red fluvial analizada mediante el programa FracPacQ (Healy et al., 2017), evidencia una clara organización estructural en la zona, reflejando la influencia de las fallas principales y lineamientos sobre el control de la red hidrográfica (Figura 31). Dado que varios cauces principales siguen trayectorias paralelas, la orientación de mayor jerarquía es similar a la presente en la Falla de Suratá, siendo esta una estructura compresiva, con una influencia en la orientación de los drenajes casi N-S (Figura 31). Otras tendencias obtenidas muestran gran cantidad de drenajes orientados perpendicularmente con relación a la Falla de Suratá, corroborando el vínculo directo con el fracturamiento analizado mediante la orientación de las

diaclasas y la dirección preferencial de escorrentía perpendicular a las principales estructuras en diferentes sectores (Figura 31), contribuyente importante en la generación de procesos de inestabilidad.

Dichas estructuras, perpendiculares a la Falla de Suratá, presentan una orientación casi oriente–occidente, evidenciada tanto en la disposición de los drenajes como en el análisis de la orientación de las diaclasas. De acuerdo con el modelo de fracturamiento que ilustra los principios de la Ley de Anderson (Rosello, 2009), estas estructuras perpendiculares corresponden a zonas de tensión (Figura 31). En este sentido, se interpreta que dichas zonas favorecen la inestabilidad y la generación de movimientos en masa dentro del área de estudio. Estos sectores se encuentran presentes a lo largo de toda el área, sin embargo, se observan con mayor claridad en el río Cachirí, donde se evidencian deslizamientos a lo largo de su cauce, cuya dirección coincide con la de estas estructuras de tensión interpretadas a partir del modelo de fracturamiento. De igual manera, aunque en menor proporción, se identifican orientaciones nororiente–suroccidente, asociadas a drenajes controlados por estructuras que siguen la misma dirección de la Falla La Violeta, la cual presenta una cinemática dextral.

Figura 31

*Orientación de estructuras lineales y direcciones principales de esfuerzos*



Nota: Mapa de orientación drenajes obtenido mediante el software FracPaQ; B. Diagrama de rosas orientación de drenajes; C. Diagrama de rosas de orientación de diaclasas del área de estudio; D. Modelo de fracturamiento según los principios de la Ley de Anderson tomado de Rosello (2009).

En la zona se reconocen sistemas de diaclasas y fracturas secundarias que se disponen de manera subparalela y oblicua respecto a las fallas mayores (Figura 31). Estas discontinuidades favorecen el fracturamiento del macizo rocoso y controlan la formación de escarpes, valles lineales y pendientes abruptas en sectores próximos a los planos de falla. Estos rasgos geomorfológicos, junto con la orientación de los drenajes, ponen en evidencia que la estructura tectónica ha moldeado el relieve, influyendo tanto en la disposición de las unidades geológicas como en la organización de la red hidrográfica.

### 5.3 Inventario de movimientos en masa

La Cordillera Oriental constituye un territorio altamente susceptible a la ocurrencia de movimientos en masa. En este sentido, el Servicio Geológico Colombiano ha elaborado registros nacionales de estos procesos a través de la base de datos SIMMA; sin embargo, en el área específica de estudio no se reportan eventos previos en dicha base de datos.

Como parte del trabajo de grado se elaboró un mapa de inventario de movimientos en masa mediante la interpretación de imágenes aéreas y satelitales. Se utilizaron fotografías aéreas captadas con dron, imágenes de BaseMap con resolución de 12 metros en ArcGIS, así como registros históricos de Google Earth correspondientes a los años 2015, 2016 y 2017, en los cuales fue posible reconocer con mayor claridad evidencias de inestabilidad superficial. Las imágenes de Google Earth provienen de sensores satelitales Maxar Technologies y CNES/Airbus, lo que permitió complementar la cartografía base y realizar un análisis multitemporal de las áreas inestables.

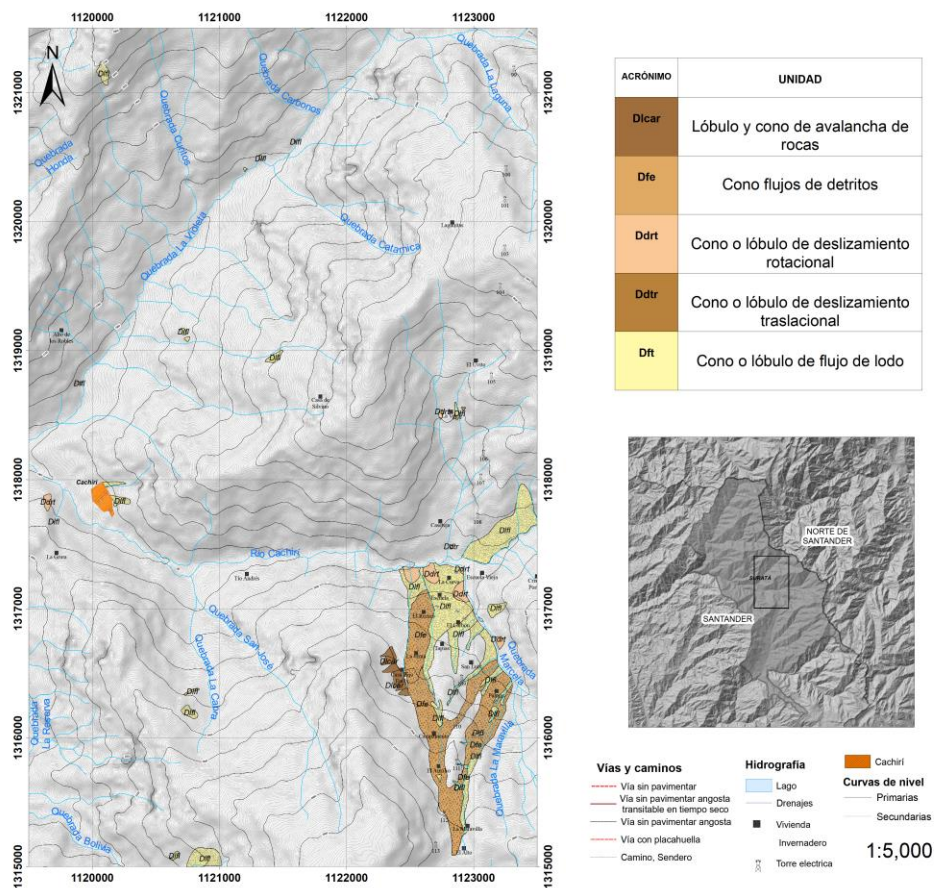
Sobre estas fuentes, en el software ArcGIS se delimitaron los polígonos de los movimientos en masa y se caracterizaron según su morfología, pendiente promedio y curvatura. Para ello, se empleó el Modelo Digital de Elevación ALOS PALSAR, a partir del cual se generaron los mapas de pendientes y curvaturas con las herramientas Slope y Curvature. Posteriormente, mediante Zonal Statistics, se calculó la pendiente promedio de cada polígono, identificando si los movimientos se desarrollaban en superficies de carácter cóncavo (valores negativos de curvatura) o convexo (valores positivos) (Tabla 3).

En la

Figura 32 se presenta el mapa del inventario de movimientos en masa así construido el cual corresponde a nivel de catalogo debido a que no fue posible determinar la fecha exacta de la ocurrencia de los movimientos en masa.

Figura 32

Mapa de inventario de movimientos en masa



Nota: Mapa de inventario de movimientos en MSA elaborado a partir de observaciones de campo y análisis propio (2025)

A continuación, se presenta la tabla de las estadísticas asociadas a los polígonos de los movimientos en masa registrados en la zona de estudio que se generan a partir de las herramientas de ArcGIS para tal propósito, así como la información obtenida en trabajo de campo.

**Tabla 1**

Estadísticas del inventario movimientos en masa.

0	Unidad	Nombre subunidad geomorfológica	coordenada X	coordenada Y	Ambiente	Pendiente	curvatura	Arema m <sup>2</sup>
1	Flujo de detritos	Cono flujo de detritos	1122565,708	1316794,142	Denudacional	21,51	0,20	104920,25
2	Flujo de detritos	Cono flujo de detritos	1122776,834	1315956,919	Denudacional	19,36	-0,16	235177,80
3	Flujo de detritos	Cono flujo de detritos	1123106,513	1316161,229	Denudacional	27,78	-0,10	110501,85
4	Flujo de detritos	Cono flujo de detritos	1122917,688	1315700,531	Denudacional	20,16	-1,31	5170,35
5	Flujo de roca	Cono o lobulo de avalancha de rocas	1122356,744	1316536,611	Denudacional	21,42	-0,33	5309,66
6	Flujo de roca	Cono o lobulo de avalancha de rocas	1122408,187	1316468,751	Denudacional	20,86	-1,14	8500,88
7	Flujo de roca	Cono o lobulo de avalancha de rocas	1122435,031	1316405,691	Denudacional	28,17	-0,17	4569,22
8	Flujo de roca	Cono o lobulo de avalancha de rocas	1122455,361	1316351,736	Denudacional	31,62	-0,52	3256,92
9	Flujo de roca	Cono o lobulo de avalancha de rocas	1122334,374	1316596,772	Denudacional	22,78	0,16	5036,10
10	Flujo de roca	Cono o lobulo de avalancha de rocas	1122342,433	1316653,744	Denudacional	24,46	-0,21	5444,97
11	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1123237,426	1316341,774	Denudacional	25,57	-0,12	6544,16
12	Deslizamiento rotacional	Cono o lobulo de deslizamiento rotacional	1122906,087	1317296,051	Denudacional	8,64	-0,44	1195,32
13	Deslizamiento rotacional	Cono o lobulo de deslizamiento rotacional	1122894,778	1317124,198	Denudacional	20,14	-0,07	11911,03
14	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1123132,482	1316450,504	Denudacional	25,08	-0,59	10720,22
15	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1123063,496	1316614,088	Denudacional	24,22	-0,27	30421,69
16	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1122529,626	1317169,535	Denudacional	24,56	-0,32	26367,00
17	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1122766,366	1316992,475	Denudacional	17,33	0,00	142595,26
18	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1122722,595	1316197,346	Denudacional	19,62	-0,01	8741,98
19	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1123033,341	1316026,756	Denudacional	35,96	0,66	2094,57
20	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1122928,749	1315956,718	Denudacional	30,67	1,92	671,11
21	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1122730,525	1315693,408	Denudacional	15,94	0,91	1325,00
22	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1123175,785	1316998,078	Denudacional	22,28	-0,48	10523,33
23	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1122887,431	1316780,155	Denudacional	18,57	-0,19	35434,53
24	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1123007,902	1316815,196	Denudacional	21,48	0,41	10552,31
25	Deslizamiento rotacional	Cono o lobulo de deslizamiento rotacional	1122665,719	1317271,619	Denudacional	21,98	0,11	13494,25
26	Deslizamiento rotacional	Cono o lobulo de deslizamiento rotacional	1122514,001	1317270,207	Denudacional	24,26	-0,22	12733,46
27	Deslizamiento rotacional	Cono o lobulo de deslizamiento rotacional	1123205,585	1316744,443	Denudacional	23,83	-0,84	4693,98
28	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1122947,119	1315579,08	Denudacional	17,58	-1,03	22995,99
29	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1123156,494	1316192,023	Denudacional	23,45	-0,30	4185,13
30	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1122922,822	1315782,87	Denudacional	27,53	0,34	1283,10
31	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1122874,008	1315629,013	Denudacional	21,50	-0,63	2332,96
32	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1120882,699	1315068,515	Denudacional	31,68	-0,47	32459,52
33	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1120652,544	1315085,154	Denudacional	31,40	0,31	2620,20
34	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1120764,2	1316197,221	Denudacional	29,35	0,36	7601,15
35	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1120782,469	1316361,079	Denudacional	28,69	0,33	1832,62
36	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1119692,244	1317673,613	Denudacional	40,56	-2,74	96,38
37	Deslizamiento rotacional	Cono o lobulo de deslizamiento rotacional	1119647,464	1317831,474	Denudacional	32,98	0,40	6349,52
38	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1120154,748	1317969,344	Denudacional	21,30	0,25	4687,45
39	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1120216,678	1317840,148	Denudacional	29,35	-0,05	7716,84
40	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1119893,059	1318748,241	Denudacional	30,74	-2,19	698,48
41	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1120746,899	1319091,795	Denudacional	31,68	0,75	1086,55
42	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1120716,949	1319149,878	Denudacional	29,68	-0,88	1944,67
43	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1121433,408	1318948,595	Denudacional	24,08	-0,07	6419,12
44	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1120088,699	1321152,227	Denudacional	38,92	0,34	10986,76
45	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1121201,325	1320407,533	Denudacional	26,25	-1,10	519,88
46	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1121323,495	1320496,244	Denudacional	23,55	-0,55	782,91
47	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1121594,391	1320620,241	Denudacional	23,83	-1,10	140,00
48	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1123245,477	1317611,793	Denudacional	23,07	-0,15	124405,66
49	Deslizamiento rotacional	Cono o lobulo de deslizamiento rotacional	1122742,221	1318509,589	Denudacional	12,28	-1,20	1858,71
50	Flujo de lodo	Cono o lobulo de flujo de lodo	1122868,839	1318518,792	Denudacional	17,36	-0,33	3920,30
51	Deslizamiento traslacional	Cono o lobulo de deslizamiento rotacional	1122920,767	1318552,288	Denudacional	29,32	-2,05	558,30
52	Deslizamiento rotacional	Cono o lobulo de deslizamiento traslacional	1122824,192	1317485,49	Denudacional	19,01	-1,10	478,08

Nota: Tabla estadística de los movimientos en masa del área de estudio (2025)

El análisis del inventario de movimientos en masa en la zona de estudio muestra que la dinámica de los movimientos en masa es principalmente en forma de flujo, estos abarcan las superficies afectadas de 524.000 m<sup>2</sup> seguido de flujos de detritos con alrededor de 456.000 m<sup>2</sup>, adicionalmente se tienen flujos de roca y deslizamientos rotacionales que representan un menor porcentaje y por último deslizamientos traslacionales que son marginales. Estos procesos de movimientos en masa se desarrollan en rango de pendientes que oscila entre los 8° y 40°.

## 6. Discusión

Se propone aquí que las unidades aflorantes correspondientes al Cretácico se encuentran con una secuencia que evidencia una estructura en anticlinal con su eje con inmersión y terminación hacia el norte en la vereda Vega de Paramo hacia la quebrada La Violeta, lo cual no coincide con la cartografía realizada por el SGC de la plancha 97 (Arias-Tauta y Vargas-Higuera, 1981), plancha 98 (Fuquen et al., 2010), planchas 109 y 110 (Ward et al., 1973), en la cual los contactos entre unidades geológicas del Cretácico son fallados, cuestión que no se observó en nuestro trabajo de campo; por lo tanto los indicadores morfológicos de nuestro trabajo de grado establecen estructuras como fallas, facetas triangulares, ganchos de falla, eje del anticlinal y drenajes alineados (

Figura 29, Figura 30 y Figura 31).

De igual manera, las observaciones en campo no apoyan la presencia de cuerpos intrusivos graníticos, sino más bien un cuerpo gnéisico que varía en granulometría en ciertos sectores, con mineralogía principalmente de cuarzo y plagioclasa, correlacionado al Gneis de

Bucaramanga, muy común en esta parte del Macizo de Santander. Adicionalmente para la zona occidental el SGC cartografía la Formación Silgará, sin embargo, se optó por tomar las nomenclaturas de Metasedimentitas de Guaca La Virgen para dicha unidad teniendo en cuenta descripciones presentadas por Hernández-Montenegro et al. (2014).

La zona se encuentra fuertemente influenciada por fallas geológicas regionales, el análisis de la geología estructural indicó que la mayor deformación para las unidades cretácicas está representada por estructuras como la Falla de Suratá, de este modo, el fracturamiento y el control estructural que conlleva una estructura de esta magnitud influenciaría de manera directa los procesos de remoción en masa (Laguado, 2023), sin embargo, la correlación entre los rasgos morfológicos, la distribución de los procesos de remoción en masa y las unidades geológicas aflorantes muestran que el principal contribuyente para dichos procesos corresponde a la litología, especialmente en depósitos no litificados.

Según Laguado (2023), los tensores de esfuerzo asociados a la Falla de Suratá evidencian una cinemática dextral inversa. Este régimen compresivo favorece la generación de pliegues que originan áreas cóncavas y convexas, las cuales influyen en los procesos de infiltración y escorrentía de aguas en el terreno, constituyéndose en un factor detonante para la ocurrencia de movimientos en masa. A partir del trabajo de campo realizado, se determinó que la Falla de Suratá ejerce influencia sobre los procesos de inestabilidad; sin embargo, el factor principal correspondiente a esta estructura es la disposición del anticlinal y las estructuras perpendiculares asociadas a zonas de tensión. Esta configuración estructural genera áreas de inestabilidad a lo largo de drenajes y lineamientos perpendiculares a la Falla de Suratá, así mismo orienta los movimientos en masa hacia un contrapendiente y genera un plegamiento intenso del terreno, lo

que favorece la infiltración de agua hacia los depósitos no litificados y, en consecuencia, incrementa la susceptibilidad de movimientos en masa sobre las pendientes estructurales.

Complementariamente, el análisis morfométrico de las pendientes y la curvatura del terreno permite profundizar en la relación entre la estructura, la litología y los procesos de movimientos en masa observados. Estos procesos de movimientos en masa se desarrollan en rango de pendientes que oscila entre los 8° y 40°, lo cual coincide con lo aseverado en el trabajo de tesis doctoral de las relaciones de lluvias históricas y movimientos en masa en el Pirineo Catalán (Portilla, 2010; Portilla, 2014), en donde se determina que no hay una relación directa que a mayor pendiente topográfica se dé mayor susceptibilidad a la desestabilización del terreno, sino que, dependiendo también de la disponibilidad de formaciones superficiales, estos se encuentran en rangos de pendiente topográfica entre 15° y 35°. Adicionalmente, según los datos recolectados, se tiene que la mayoría de los movimientos en masa se encuentran concentrados en valores negativos de curvatura, lo que evidencia superficies cóncavas que favorecen la acumulación de agua y detritos, incrementando las condiciones de saturación y susceptibilidad al movimiento en masa, coincidente con lo estipulado por Portilla (2014). Este patrón es coherente con lo observado en otros contextos montañosos por autores como Glade et al., (2007) y Sepúlveda y Petley (2015), quienes destacan que la interacción entre litología poco competente, morfología cóncava y condiciones de humedad es determinante en la activación de procesos de remoción en masa.

### **6.1. Análisis de las variables**

De acuerdo con lo presentado en la sección de resultados de nuestro trabajo de grado y a lo estipulado en el marco teórico a continuación se realiza el análisis de las variables, geología,

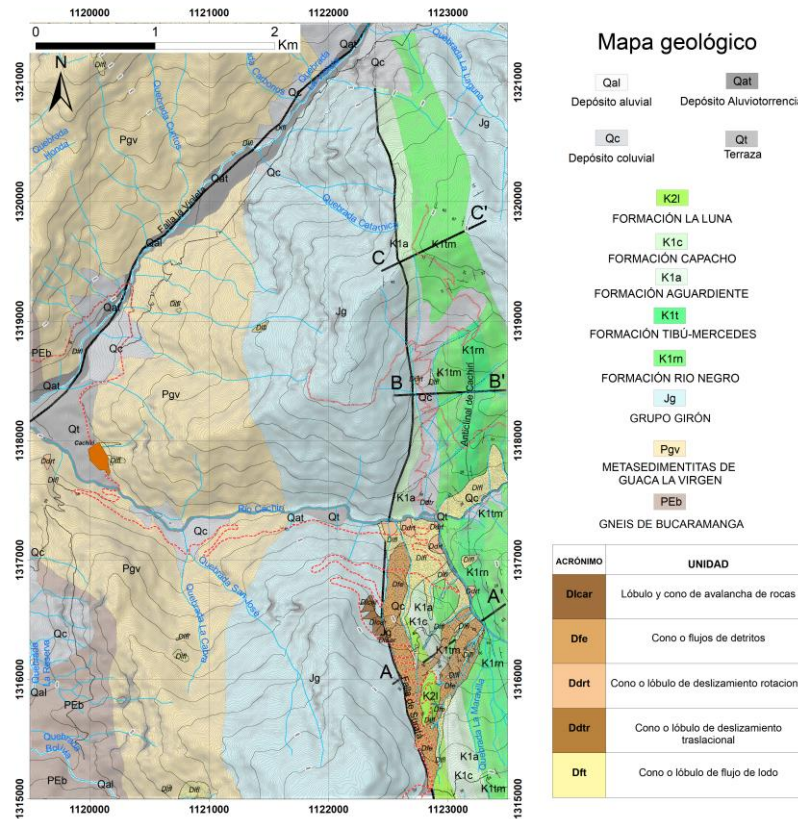
geomorfología y geología estructural vs la distribución geográfica de los movimientos en masa con el fin de determinar las correlaciones existentes entre ellos.

### **6.1.1. Geología vs movimientos en masa**

El análisis entre la geología y la distribución de los movimientos en masa evidencia una clara concentración de estos procesos en sectores específicos del área de estudio, particularmente sobre los depósitos coluviales ubicados en la vereda San Luis. Estos depósitos no litificados presentan una alta susceptibilidad a la inestabilidad, lo que explica la recurrencia de movimientos en masa en dicha zona. De igual manera, otros sectores de la cuenca alta del río Cachirí muestran también la presencia de depósitos coluviales no litificados. No obstante, las características morfométricas, la extensión y, especialmente, la composición litológica de los depósitos localizados sobre estas unidades ricas en limos y arcillas favorecen la acumulación de humedad y la pérdida de cohesión, incrementando su susceptibilidad a la remoción. En consecuencia, se infiere que los factores geológicos, en particular la naturaleza litológica, actúan como los principales factores condicionantes en la ocurrencia y concentración de los movimientos en masa en la zona de estudio (Figura 33).

Figura 33

Mapa geológico y de movimientos en masa



Nota: elaboración propia correspondiente a la investigación realizada (2025)

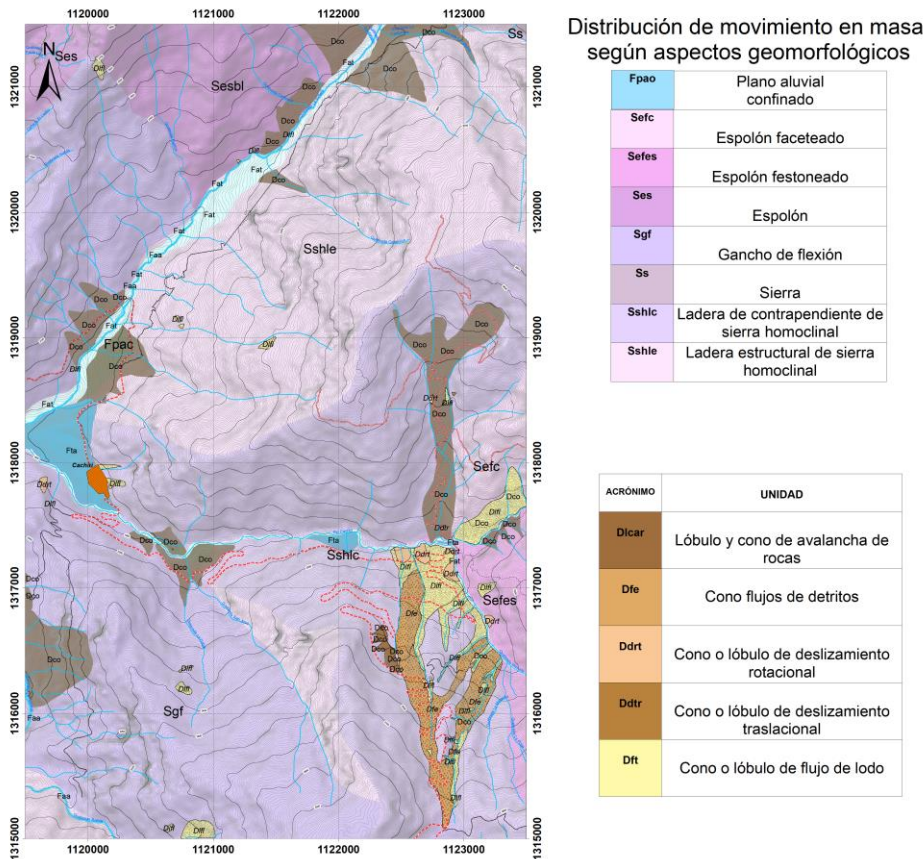
### 6.1.2. Geomorfología vs movimientos en masa

El análisis del mapa geomorfológico en relación con la distribución espacial de los movimientos en masa evidencia que la gran mayoría del área corresponden a geformas de ambiente estructural; espolones, ganchos de flexión, sierras y laderas. Sin embargo, estos procesos se concentran principalmente sobre geformas de origen denudacional las cuales se

encuentran en menor proporción a comparación del ambiente estructural. El ambiente denudacional está representado principalmente por geformas tales como conos o lóbulos coluviales. Los cuales albergan la gran mayoría de los movimientos en masa para la vereda San Luis. Aunque se identifican movimientos en masa en otras geformas asociadas, su ocurrencia es marginal (Figura 34)

**Figura 34**

*Mapa geomorfológico y de movimientos en masa*



Nota: Mapa geológico del servicio geológico, modificado y ajustado para la investigación.

Planchas 97 San Alberto (SGC, 2014), 98 Arboledas (SGC, 2015), 109 Rionegro (SGC, 2014) y 110 Pamplona (SGC, 2015).

### **6.1.3 Geología estructural vs movimientos en masa**

El análisis de los indicadores morfoestructurales, junto con la distribución espacial de los movimientos en masa, evidencia que dichos procesos se concentran principalmente sobre el flanco occidental del anticlinal identificado en la zona de estudio (Figura 33). Dicho anticlinal se desarrolla de forma paralela al trazado principal de la Falla de Suratá, la cual condiciona de manera significativa la disposición del relieve y la orientación de los indicadores morfoestructurales asociados. Se observa que varios de los flujos y deslizamientos presentan una orientación similar con la dirección de la Falla de Suratá, siguiendo parcialmente su traza y la de las estructuras secundarias con la misma tendencia estructural. Sin embargo, los procesos de desestabilización del terreno no se distribuyen a lo largo de todo el recorrido de dichas estructuras, lo que indica que la influencia tectónica no actúa como el factor condicionante principal. En este sentido, aunque los aspectos estructurales controlan parcialmente la orientación y generación de los movimientos, los factores litológicos, morfométricos e hidrológicos tienen un papel más determinante en la ocurrencia de los movimientos en masa.

Por lo tanto, los resultados obtenidos permiten afirmar que la litología y la morfodinámica superficial ejercen el papel predominante para la densidad y magnitud de los movimientos en masa. Las formaciones con predominio de arcillolitas, margas y materiales poco competentes muestran mayor susceptibilidad a movimientos en masa, mientras que las unidades

más competentes (areniscas y calizas) registran fenómenos aislados y de menor escala. De esta manera, se muestra que los factores litológicos y exógenos superan el control estructural.

## **7. Conclusiones**

Este estudio da un aporte al conocimiento geológico del corregimiento de Cachirí, en el municipio de Suratá, al elaborar una cartografía detallada a escala 1:5.000. Gracias a este trabajo fue posible precisar las unidades geológicas aflorantes en la zona, corregir inconsistencias de cartografía previa y aportar información que servirá como base para futuros estudios en el Macizo de Santander.

Los resultados evidenciaron la presencia de 52 movimientos en masa distribuidos en el área de estudio, lo que demuestra una marcada susceptibilidad del terreno frente a procesos de inestabilidad. La mayoría de estos corresponden a flujos de lodo y detritos, mientras que los deslizamientos rotacionales y traslacionales tuvieron una ocurrencia menor. Esta clasificación permite entender de manera clara la dinámica de las laderas y la influencia de las condiciones locales en el desarrollo de estos fenómenos.

Así mismo, la cartografía permitió identificar unidades de cuaternarios no registradas previamente, como depósitos coluviales, aluviales y aluviotorrenciales. Estos depósitos, al estar compuestos por materiales sueltos y con alta cohesión, constituyen el escenario principal de ocurrencia de los movimientos en masa de tipo flujo de lodo. Con ello se confirma que la litología ejerce un papel determinante en la morfodinámica de la zona, al controlar en gran medida los procesos de desestabilización del terreno.

El análisis morfológico reveló la fuerte influencia de las fallas regionales como la de Suratá y la de La Violeta en la configuración del relieve y en el control de la red de drenaje. Sin embargo, la comparación entre la cartografía estructural y el inventario de movimientos en masa demostró que la mayoría de estos fenómenos no se originan directamente en relación con planos de falla, sino en depósitos no litificados. Esto sugiere que, aunque la tectónica condiciona el marco general de deformación, son los procesos superficiales los que gobiernan la ocurrencia de inestabilidad en este sector.

Nota final: Como soporte de lo aseverado en este documento del trabajo de grado se tiene el archivo de la libreta de campo, así como la geodatabase del proyecto ArcGIS disponible a solicitud de los interesados mediante enlace de drive

<https://drive.google.com/file/d/1wPvx0ofd9XWD31VmZwCIV7gew5VozX1A/view?usp=sharing>

g.

## 8. Recomendaciones

Hacer un estudio a profundidad para determinar el comportamiento de la falla de Suratá en estos tramos y determinar con mayor exactitud cómo se comportan los esfuerzos para esta zona del Macizo de Santander y como este genera deformación en la zona.

Se aconseja un estudio petrográfico y geoquímico de las rocas cristalinas aflorantes en la zona de estudio, para determinar su edad y procesos de evolución geológica con fin de asociarlos a unidades cristalinas pertenecientes a el Macizo de Santander.

Finalmente, se recomienda realizar un trabajo de investigación para establecer la explicación de la ocurrencia del gran flujo de detritos geohistórico presente en la vereda San Luis, que se extiende desde la Laguna del Alto hasta los cauces de la Quebrada Marcela y el río Cachirí. Este evento, por su volumen y extensión superficial, no puede explicarse como detonado únicamente por lluvias, sino que debió involucrar un volumen importante de agua que justifique la reología del flujo. Dicha condición sugiere la participación de un cuerpo de agua mucho mayor al que actualmente se observa en la Laguna del Alto de Cachirí, el cual pudo haberse visto afectado por un movimiento tectónico. Este mismo proceso explicaría, además, la presencia de grandes bloques angulares métricos de conglomerados del Grupo Girón dispersos en gran parte de la superficie de las veredas San Luis, Vega de Páramo y La Violeta, en el corregimiento de Cachirí.

### 9. Referencias bibliográficas

- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2012). Cuenca Catatumbo: Integración geológica de la digitalización y análisis de núcleos. Agencia Nacional de Hidrocarburos.
- Alarcón, C. M., Clavijo-Torres, J., Mantilla-Figueroa, L. C., y Rodríguez, J. G. (2020). Nueva propuesta de edades para el registro sedimentario de las formaciones Bocas y Jordán y su relación con el desarrollo de la actividad magmática del Grupo Plutónico de Santander (Cordillera Oriental, Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(171), 262–278.
- Amaya-Ferreira, S. (2012). Caracterización petrográfica y petrológica de los neises, migmatitas y granulitas del Neis de Bucaramanga, en el Macizo de Santander, departamento de Santander [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia.
- Arias-Tauta, A., y Vargas-Higuera, R. (1981). Geología de las planchas 86 Ábrego y 97 Cáchira (Escala 1:100.000). Servicio Geológico Colombiano (SGC), Ministerio de Minas y Energía.
- Carvajal, J. (2011). Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia. Universidad Nacional de Colombia.
- Cediel, F. (1968). El Grupo Girón, una molasa mesozoica de la cordillera Oriental. *Boletín Geológico*, 16(1–3), 5–96.
- Chevallier, G. G. (2013). Assessing debris-flow hazard focusing on statistical morpho-fluvial susceptibility models and magnitude-frequency relationships: Application to the central-

- eastern Pyrenees [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya]. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Coe, A. L. (Ed.). (2010). Geological field techniques. Wiley-Blackwell.
- Coussot, P., y Meunier, M. (1996). Recognition, classification, and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*, 40(3–4), 209–227.
- Cruden, D. M., y Varnes, D. J. (1996a). Landslide types and processes. In *Transportation Research Board Special Report 247: Landslides—Investigation and Mitigation* (pp. 36–75). National Research Council.
- Cruden, D. M., y Varnes, D. J. (1996b). Sensitive clay landslides and nomenclature. In *Transportation Research Board Special Report 247: Landslides—Investigation and Mitigation* (pp. 36–75). National Research Council.
- Etayo, F. (1968). Sinopsis estratigráfica de la región de Villa de Leiva y zonas próximas. *Boletín de Geología UIS*, 21, 19–32.
- Etayo-Serna, F., Arenas, D. M., Sánchez, G. M., Melo, R. T., y Ospitia, G. G. (2020). Estudios geológicos y paleontológicos sobre el Cretácico en la región del embalse del río Sogamoso, Valle Medio del Magdalena. *Boletín de Geología*, 42(1), 21–40.
- Forero, A. (1990). El Paleozoico en Colombia. *Boletín de Geología*, 12(1–3), 1–75.
- Fuquen, J. A., Ceballos, L., Marín, E., Patiño, A., Pedraza, A., y Espinosa, A. (2010). Geología de las planchas 98 - Durania y 99 - Villa del Rosario, Norte de Santander, Colombia (Escala 1:100.000). Servicio Geológico Colombiano (SGC).
- Glade, T., Anderson, M. G., y Crozier, M. J. (2007). *Landslide hazard and risk*. Wiley.
- Grösser, J., y Prössl, K. F. (1991). Investigaciones paleontológicas y estratigráficas en el

- Paleozoico de la Cordillera Oriental (Colombia). *Geología Colombiana*, 16, 67–106.
- Healy, D., Rizzo, R. E., Cornwell, D. G., Farrell, N. J. C., Watkins, H., Timms, N. E., Gómez-Rivas, E., y Smith, M. (2017). FracPaQ: A MATLAB™ toolbox for the quantification of fracture patterns. *Journal of Structural Geology*, 95, 1–16.
- Hernández-Montenegro, J. D., Ramírez-Arévalo, T. A., Martínez-Gaitán, D., Aldana-Burgos, J., & Flórez-Peñaloza, J. R. (2014). Caracterización petrográfica y mineralógica de la Unidad Metasedimentitas de Guaca–La Virgen. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Huggett, R. (2007). *Fundamentals of geomorphology* (2nd ed.). Routledge.
- Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M. J., y Hutchinson, J. N. (2001). A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental y Engineering Geoscience*, 7(3), 221–238.
- Hungr, O., Leroueil, S., y Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2021). Mapa de cobertura de la tierra. Adaptación Corine Land Cover. República de Colombia. Escala 1:100.000. Periodo 2018. IDEAM.
- Jiménez, G., y García, C. A. (2023). Mineralogía magnética en rocas del Jurásico de la Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de Geología*, 45(2), 35–49.
- Julivert, M. (1968). *Léxico estratigráfico internacional*. Unión Internationale des Sciences Géologiques.
- Laguado, E. D. (2023). Análisis del estilo estructural de la Falla de Suratá, Macizo de Santander [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio Institucional UIS.

- Mantilla-Figueroa, L. C., García-Ramírez, C. A., y Valencia, V. A. (2016). Propuesta de escisión de la denominada “Formación Silgará” (Macizo de Santander, Colombia), a partir de edades U–Pb en circones detríticos. *Boletín de Geología*, 38(2), 15–34.
- Morales, L. G. (1958). General geology and oil occurrences of the Middle Magdalena Valley, Colombia. In *The Colombian petroleum industry (Special Volume 2, pp. 25–68)*. Asociación Colombiana de Petróleo.
- Moreno-Sánchez, M., Gómez-Cruz, A., y Buitrago-Hincapié, J. (2020). Paleozoic of Colombian Andes: New paleontological data and regional stratigraphic review. In J. Gómez y D. Mateus-Zabala (Eds.), *The geology of Colombia, Volume 1: Proterozoic – Paleozoic (pp. 167–203)*. Servicio Geológico Colombiano.
- Osorio-Afanador, D., y Velandia, F. (2021). Late Jurassic syn-extensional sedimentary deposition and Cenozoic basin inversion as recorded in the Girón Formation, northern Andes of Colombia. *Andean Geology*, 48(2), 237–266.
- Pedraza, P., y Ramírez, Y. (2011). Catatumbo Basin (Vol. 5, p. 135). ANH–University EAFIT.
- Petley, D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 40(10), 927–930.
- Phillips, C. J. (1988). Geological investigations of debris flow materials [Tesis doctoral, University of Canterbury]. University of Canterbury.
- Phillips, C. J., y Davies, T. R. H. (1991). Determining rheological parameters of debris flow material. *Geomorphology*, 4(2), 101–110.
- Portilla, M., Chevallier, G., y Hürlimann, M. (2010). Description and analysis of debris flows occurred during 2008 in the Eastern Pyrenees. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(8), 1635–1645. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1635-2010>

- Portilla Gamboa, M. E. (2014). Reconstrucción y análisis de ocurrencias regionales de múltiples eventos de movimientos en masa generados por lluvias históricas en los Pirineos [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya]. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona.
- Rossello, E. A., (2009). Control Estructural de mineralizaciones: determinación mecánica y pronósticos prospectivos, Curso dirigido, Medellín. Memorias CD.
- Royero, J., y Clavijo, J. (2001). Mapa geológico generalizado del departamento de Santander. Servicio Geológico Colombiano (SGC).
- Sepúlveda, S. A., y Petley, D. N. (2015). Regional trends and controlling factors of fatal landslides in Latin America and the Caribbean. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(8), 1821–1833.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2010). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa: Escala detallada. Servicio Geológico Colombiano.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2012). Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa (Escala 1:100.000). Servicio Geológico Colombiano.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2014a). Mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa. Plancha 097 San Alberto. Escala 1:100.000 (Convenio 009 entre la Universidad Industrial de Santander y el SGC). Servicio Geológico Colombiano.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2014b). Mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa. Plancha 109 Rionegro. Escala 1:100.000 (Convenio 009 entre la Universidad

- Industrial de Santander y el SGC). Servicio Geológico Colombiano.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2014c). Mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa. Plancha 110 Pamplona. Escala 1:100.000 (Convenio 009 entre la Universidad Industrial de Santander y el SGC). Servicio Geológico Colombiano.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2014d). Memoria explicativa de la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa: Escala 1:100.000, plancha 111BIS – La Chata. Servicio Geológico Colombiano.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2015). Mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa. Plancha 098 Arboledas. Escala 1:100.000 (Convenio 021 entre la Universidad Industrial de Santander y la Universidad de Caldas con el SGC). Servicio Geológico Colombiano.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa: Escala 1:25.000. Servicio Geológico Colombiano.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2019). Mapa de amenazas por movimientos en masa 2019. Servicio Geológico Colombiano.
- Takahashi, T. (1939). Debris flow. *Journal of the Faculty of Engineering, Hokkaido Imperial University*, 3(2), 123–133.
- Van-Zuidam, R. A. (1985). Aerial photo-interpretation terrain analysis and geomorphology mapping. ITC.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In R. L. Schuster y R. J. Krizek (Eds.), *Landslides: Analysis and Control* (Transportation Research Board Special Report 176, pp. 11–33). National Academy of Sciences.

- Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. In Transportation Research Board Special Report 247: Landslides—Investigation and Mitigation (pp. 36–75). National Research Council.
- Velandia, F. (2017). Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander – Énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia].
- Velandia, F., García-Delgado, H., Zuluaga, C., López, J., Bermúdez, M., y Audemard, F. (2020). Present-day structural frame of the Santander Massif and Pamplona Wedge: The interaction of the Northern Andes. *Journal of Structural Geology*, 137, 104087.
- Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, B., y Restrepo, H. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, departamento de Santander. *Boletín Geológico*, 21(1–3), 1–132.
- Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, J., Jaramillo, L., y Vargas, R. (1977a). Mapa geológico del cuadrángulo H-13 Pamplona (Escala 1:100.000). Servicio Geológico Colombiano (SGC).
- Ward, D., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz, J., Restrepo, H., y Gómez, E. (1977b). Mapa geológico del cuadrángulo H-12 Bucaramanga (Escala 1:100.000). Servicio Geológico Colombiano (SGC).
- Ward, W. C., Keller, G., y Stainforth, R. M. (1973). Stratigraphy and petroleum possibilities of the Catatumbo Basin, Colombia and Venezuela. *Geological Society of America Bulletin*, 84(3), 841–866.
- Zapata, G., Correa, A. M., Rodríguez, G., y Arango, M. I. (2016). Catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia: Granito de Pescadero (Cordillera Oriental, departamento

de Santander). Servicio Geológico Colombiano.