

# ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

Análisis estructural de las fallas presentes en una zona aledaña a la Falla de Bucaramanga entre el río Tona y el sector Los Curos en Piedecuesta

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Jerson Leonel Bohórquez Correa y Dana Ximena Santos Galvis

Director

Angélica Álvarez Naranjo

Doctora en Geología y Geofísica

Codirector

Francisco Velandia Patiño

Doctor en Geociencias

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Geología

Bucaramanga

2026

**Dedicatoria**

*A mis padres Flor y Leonel, pues conozco cuánto representa para ellos este título.*

*A la familia Bohórquez Correa por el innumerable apoyo y motivación constante.*

*A la familia Correa Bohórquez por acogerme siempre como uno de ellos.*

*A Yeison, Darío, Juan Pablo, Madeleine y Danna por ser mi guía en las situaciones donde se nubló mi camino.*

**Jerson**

**Dedicatoria**

*A mis padres, Julia y Orlando, a mis hermanas Sara y Andrea, y a mi nona Chisca, por ser el refugio constante de amor y apoyo.*

*A mis amigos, por llenar de luz y compañía el camino.*

**Dana**

### **Agradecimientos**

*Los autores expresan su más sincero agradecimiento a la profesora Angélica Álvarez, directora del trabajo de grado, por su invaluable guía, acompañamiento y paciencia a lo largo de todo el proceso de investigación. Su orientación académica, compromiso y disposición fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de este proyecto.*

*Al Semillero de Geología Estructural y Tectónica (SEGET) de la Escuela de Geología y a su director, el profesor Francisco Velandia, codirector del trabajo de grado, por el respaldo constante y el apoyo económico que hizo posible la ejecución de esta investigación. De igual manera, se extiende el agradecimiento a los integrantes del semillero, cuyo apoyo en la discusión y el trabajo de campo fue indispensable, en especial a Felipe, Julio, Maleja, Cristina y Benjamín por su colaboración y compromiso.*

*Un reconocimiento especial a Juan Manuel y Yeison, quienes aportaron generosamente de su tiempo y dedicación, contribuyendo de manera significativa al desarrollo de este proyecto.*

*A sus familiares y amigos, quienes brindaron su apoyo, motivación y acompañamiento a lo largo del proceso formativo, siendo un pilar fundamental en la culminación de esta etapa académica.*

*Agradecimiento especial a los trabajadores del campo, cuyo esfuerzo y dedicación representan nuestras raíces y el valor del trabajo que inspira este camino.*

**Tabla de contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	13
1. Objetivos .....	17
1.1. Objetivo General .....	17
1.2. Objetivos Específicos.....	17
2. Marco Tectónico Y Geológico .....	17
2.1. Evolución Tectónica Y Geológica Regional .....	17
2.2. Estratigrafía .....	19
2.3. Geología Estructural .....	26
3. Metodología .....	30
3.1. Control Cartográfico .....	30
3.2. Análisis Morfoestructural.....	31
3.3. Deformación Frágil .....	32
3.4. Deformación Dúctil.....	33
3.5. Procesamiento De Datos .....	34
3.5.1. Determinación De Tensores De Deformación.....	34
3.6. Secciones geológicas transversales .....	35
3.7. Movimientos En Masa. ....	35
4. Resultados .....	36

# ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

4.1. Cartografía Geológica .....	36
4.2. Cartografía Estructural .....	40
4.3. Cartografía morfoestructural .....	42
4.4. Cinemática De Las Estructuras .....	45
4.5. Secciones geológicas.....	49
4.6. Estructuras de deformación frágil en escala mesoscópica .....	51
4.7. Estructuras de deformación dúctil.....	54
4.8. Tensores.....	57
4.9. Movimientos En Masa .....	60
5. Discusión.....	65
5.1. Cinemática de las Estructuras y Estilo Estructural .....	65
5.2. Análisis Morfoestructural.....	67
5.3. Tensores.....	69
5.4. Relación Estructural Y Movimientos En Masa .....	71
6. Conclusiones .....	71
Referencias bibliográficas.....	74

**Lista de figuras**

Figura 1 <i>Localización de la zona de estudio</i> .....	14
Figura 2 <i>Mapa geológico base del área de estudio</i> .....	21
Figura 3 <i>Principales fallas del Macizo de Santander</i> .....	29
Figura 4 <i>Morfoestructuras asociadas a una falla dextral</i> .....	31
Figura 5 <i>Criterios cinemáticos para una falla dextral</i> .....	33
Figura 6 <i>Mapa de estaciones</i> .....	37
Figura 7 <i>Mapa geológico del área</i> .....	38
Figura 8 <i>Mapa de estructuras y lineamientos</i> .....	41
Figura 9 <i>Mapa Morfoestructural de la Zona</i> .....	42
Figura 10 <i>Morfoestructuras presentes en campo</i> .....	44
Figura 11 <i>Panorámicas de las diferentes fallas encontradas</i> .....	47
Figura 12 <i>Cortes geológicos del área de estudio (A-A') Y (B-B')</i> .....	50
Figura 13 <i>Expresiones frágiles encontradas en campo</i> .....	51
Figura 14 <i>Proyecciones estereográficas para los datos de diaclasas</i> .....	53
Figura 15 <i>Proyecciones estereográficas y contornos para los datos de venas, diques y planos</i> ..	54
Figura 16 <i>Indicadores cinemáticos en la estación JD-010</i> .....	55
Figura 17 <i>Indicadores cinemáticos dúctiles en la estación JD-014</i> .....	55
Figura 18 <i>Indicadores cinemáticos en la estación JD-026</i> .....	56
Figura 19 <i>Indicadores cinemáticos dúctiles sobre la falla del Río Hato</i> .....	56
Figura 20 <i>Indicadores cinemáticos dúctiles para la estación JD-060</i> .....	57
Figura 21 <i>Distribución de los tensores obtenidos</i> .....	58
Figura 22 <i>Distribución espacial de los movimientos en masa en relación con la distancia a fallas y lineamientos</i> .....	61

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

Figura 23 *Mapa de pendientes en relación con movimientos en masa*..... 64

**Lista de tablas**

Tabla 1 <i>Datos de planos estriados con cinemáticas</i> .....	46
Tabla 2 <i>Proximidad de movimientos en masa a las fallas en rangos cada 100 m</i> .....	62
Tabla 3 <i>Proximidad movimientos en masa en rangos cada 100 m vs Lineamientos</i> .....	63
Tabla 4 <i>Relación entre la inclinación del terreno y los movimientos en masa</i> .....	65

**Lista de apéndices**

**Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional.**

Apéndice A: Datos de diaclasas por estación

Apéndice B: Datos de Venas y Diques

Apéndice C: Datos de foliaciones

Apéndice D: Datos de planos pulidos sin cinemática, planos con intenso fracturamiento y brechas

## Resumen

**Título:** Análisis estructural de las fallas presentes en una zona aledaña a la falla de Bucaramanga entre el río Tona y el sector Los Curos en Piedecuesta\*

**Autores:** Jerson Leonel Bohórquez Correa\*\* y Dana Ximena Santos Galvis\*\*

**Palabras Clave:** Cartografía, deformación, tensores de esfuerzo, morfoestructural, indicadores cinemáticos

**Descripción:** El presente trabajo analiza la configuración estructural de la zona comprendida entre el río Tona y el sector Los Curos, en el municipio de Piedecuesta, al suroeste del Macizo de Santander, con el propósito de comprender la interacción entre las fallas locales asociadas a la Falla de Bucaramanga y los procesos de deformación. A partir del control cartográfico se identificaron las principales estructuras, unidades litológicas y contactos, mientras que el análisis morfoestructural permitió reconocer rasgos geomorfológicos vinculados con la actividad tectónica y su relación con los movimientos en masa.

Para el desarrollo del estudio se emplearon sensores remotos, control cartográfico y mediciones estructurales en campo, junto con el procesamiento de datos frágiles y dúctiles mediante los softwares Stereonet y WinTensor, orientados al análisis de tendencias y obtención de tensores de deformación. Los resultados revelan la presencia de un régimen transpresivo controlado por la Falla de Bucaramanga y otras fallas, que muestran variaciones locales de tipo dextral y sinistral reflejando un régimen local transcurrente dominante, cuya heterogeneidad cinemática se relaciona con la convergencia entre el núcleo del Macizo de Santander y la Cuña de Pamplona. El modelo estructural propuesto integra la información recopilada, aportando una mejor comprensión de los procesos tectónicos que caracterizan esta región y su expresión en el paisaje, permitiendo entender cómo las variaciones estructurales influyen en la distribución y el comportamiento de los riesgos asociados, especialmente los movimientos en masa.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Programa académico. Directora: Angélica Álvarez Naranjo. Doctora en Geología y Geofísica. Codirector: Francisco Alberto Velandia Patiño. Doctor en Geociencias.

## Abstract

**Title:** Structural analysis of the faults present in an area adjacent to the Bucaramanga Fault, between the Tona River and the Los Curos sector in Piedecuesta. \*

**Authors:** Jerson Leonel Bohórquez Correa\*\* and Dana Ximena Santos Galvis\*\*

**Key Words:** Cartography, deformation, stress tensors, morphostructural analysis, kinematic indicators.

**Description:** The present study analyzes the structural configuration of the area between the Tona River and the Los Curos sector, in the municipality of Piedecuesta, located southwest of the Santander Massif. Its purpose is to understand the interaction between local faults associated with the Bucaramanga Fault and their influence on deformation processes. Through cartographic control, the main structures, lithological units, and contacts were identified, while the morphostructural analysis allowed the recognition of geomorphological features linked to tectonic activity and their relationship with mass movements.

For the development of the study, remote sensing, cartographic control, and structural field measurements were employed, together with the processing of brittle and ductile data using Stereonet and WinTensor software, aimed at trend analysis and the determination of deformation tensors. The results reveal the presence of a transpressive regime controlled by the Bucaramanga Fault and other faults, which exhibit local dextral and sinistral variations reflecting a dominant local transcurrent regime, whose kinematic heterogeneity is related to the convergence between the core of the Santander Massif and the Pamplona Wedge. The proposed structural model integrates the collected information, providing a better understanding of the tectonic processes that characterize this region and their expression in the landscape, allowing an understanding of how structural variations influence the distribution and behavior of associated hazards, especially mass movements.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Academic Program. Directora: Angélica Álvarez Naranjo. PhD in Geology and Geophysics. Codirector: Francisco Alberto Velandia Patiño. PhD in Geosciences.

## Introducción

Las fallas geológicas juegan un papel importante en la deformación local de una zona, su influencia ayuda a la modificación del paisaje e influyen en los procesos morfológicos locales como movimientos en masa. Actualmente se cuenta con diversos modelos regionales que estudian las principales estructuras en diversos ámbitos, sin embargo, los estudios locales para Piedecuesta y municipios aledaños son escasos impidiendo una visión detallada de su configuración estructural. Esta investigación busca abordar la interacción entre las estructuras geológicas presentes en el suroeste del Macizo de Santander (Falla de Bucaramanga y asociadas) a través de un enfoque integral. Para ello, se llevó a cabo una actualización de la cartografía geológica, que permitió identificar y delimitar las unidades de roca y las fallas locales. Además, se realizó un análisis morfoestructural basado en sensores remotos y observaciones de campo, que facilitó la interpretación de patrones geomorfológicos y su relación con las estructuras subyacentes. Paralelamente, se determinaron los tensores de esfuerzo responsables de la deformación local mediante el estudio de indicadores cinemáticos frágiles y dúctiles, lo que permitió comprender los mecanismos tectónicos operantes. Finalmente, se planteó un modelo estructural que integró los datos recopilados y analizados, estableciendo relaciones entre las fallas identificadas y su influencia en las amenazas geológicas, especialmente los movimientos en masa, fundamentales para la planificación territorial y la mitigación de riesgos.

- Localización

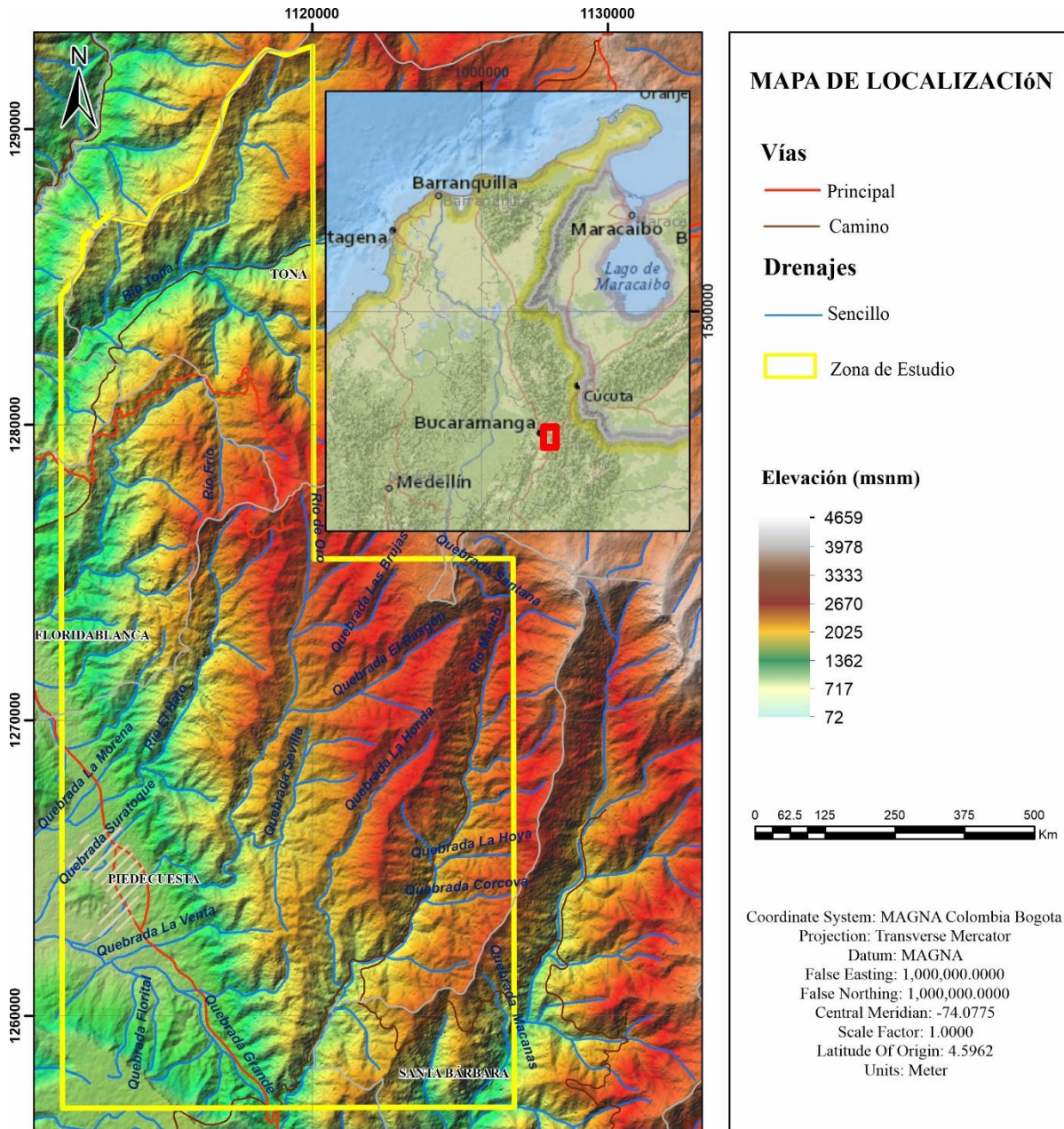
La zona se encuentra localizada al NW de la Cordillera Oriental, en inmediaciones del Macizo de Santander; cubre un área que incluye de sur a norte desde la Mesa de Los Santos, a la altura del sector Curos hasta el municipio de Tona. Comprende parte de los municipios de

# ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

Piedecuesta, Santa Bárbara y Floridablanca. En ella se encuentran los ríos Frío, de Oro, Manco y Tona (Figura 1).

**Figura 1**

*Localización de la zona de estudio.*



*Nota:* Los Insumos cartográficos fueron obtenidos de la cartografía 1:100.000 del instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y el modelo de elevación digital 12.5 m de ALOS PALSAR de la plataforma Alaska Search.

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

- Planteamiento del problema

La zona suroeste del Macizo de Santander está influenciada por estructuras geológicas regionales, como la Falla de Bucaramanga con tendencia NNW y cinemática sinistral - inversa, así como por fallas transversales con orientación NE y cinemática de rumbo dextral (con componente de buzamiento variable) (Ward et al., 1973; Taboada et al., 2000; Acosta et al., 2007; Velandia, 2017; Velandia et al., 2020; Diederix et al., 2020, Villamizar-Escalante et al., 2024; Amaya et al., 2025). Existen diferentes modelos geológicos regionales que relacionan espacial y temporalmente estas estructuras y otros que dan especial énfasis a su actividad reciente a partir de geomorfología cuantitativa y termocronología (Amaya, 2016; Velandia et al., 2021; Villamizar-Escalante et al., 2024). Pero aún no se cuenta con suficientes estudios locales que permitan conocer las estructuras NE y su interrelación con la Falla de Bucaramanga, especialmente en cuanto a su cartografía y relaciones de corte. Debido a lo expuesto anteriormente, este proyecto de investigación tiene como propósito realizar un análisis estructural mediante la actualización de la cartografía geológica existente, el estudio de indicadores cinemáticos frágiles y dúctiles, la caracterización morfoestructural y la obtención de tensores de esfuerzo.

Las fallas geológicas como la Falla Bucaramanga controlan gran parte del paisaje y son una evidencia de la deformación causada por el campo de esfuerzos (Diederix et al., 2008; Velandia & Bermúdez, 2018; Diederix et al., 2020; Villamizar-Escalante et al., 2024). Algunas de estas fallas se constituyen en fuentes sismogénicas (Velandia et al., 2020), especialmente hacia el oriente del Macizo de Santander, pero sin mucha evidencia en su parte occidental. Además, en estudios de amenazas por remoción en masa en escala regional se ha definido cierto control de las estructuras en la ocurrencia de estos fenómenos. Este estudio servirá como aporte para obtener

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

una mejor comprensión de la deformación local y su complejidad tectónica, enriqueciendo el conocimiento geológico y proporcionando información sobre el fracturamiento en la zona, su control en el tránsito de fluidos, amenazas geológicas y planificación territorial.

## 1. Objetivos

### 1.1. Objetivo General

Realizar un análisis estructural del sector suroeste del Macizo de Santander en las zonas de influencia de fallas con orientación NE, a partir de control cartográfico y el estudio de estructuras frágiles y dúctiles.

### 1.2. Objetivos Específicos

- Definir estilos estructurales de la zona a partir del control de la cartografía geológica y la elaboración de secciones transversales.
- Efectuar un análisis morfoestructural de la zona de estudio a partir de sensores remotos y observaciones de campo.
- Determinar los tensores responsables de la deformación local a través del procesamiento de los indicadores cinemáticos frágiles y dúctiles.
- Analizar la relación de las estructuras identificadas con las amenazas geológicas, específicamente los movimientos en masa.

## 2. Marco Tectónico Y Geológico

### 2.1. Evolución Tectónica Y Geológica Regional

Los Andes de Colombia, Venezuela y Ecuador con más de 9000 km de extensión en el occidente de América del Sur representan la terminación norte del Cinturón Andino que a su vez se divide en tres cordilleras caracterizadas por una evolución y estructura divergente (Taboada et al., 2000; Moreno-Sánchez et al., 2020). Comprenden una región tectónica compleja generada por

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

la interacción entre las placas oceánicas del Caribe y de Nazca y la placa continental Sudamericana (Cortes et al., 2005).

La Cordillera Oriental colombiana es intracontinental y está situada en el costado oriental de los Andes septentrionales (Taboada et al., 2000). Se ensancha progresivamente hacia el norte, presentando diferentes estilos tectónicos y una morfología variable. Su deformación se manifiesta mediante fallas principalmente transpresivas de rumbo, cabalgamientos y plegamientos generados por inversión tectónica durante el Cenozoico, con dos direcciones estructurales principales: NE-SW y N-S (Taboada et al., 2000; Horton et al., 2020; Kammer et al., 2020). Se caracteriza por un basamento polimetamórfico Precámbrico y Paleozoico, deformado durante varios eventos orogénicos pre-Mesozoicos. A su vez se encuentran superpuestos por rocas sedimentarias del Paleozoico y Mesozoico, rocas volcánicas, evaporitas, clastos marinos y depósitos continentales del Cenozoico (Case et al., 1990; Taboada et al., 2000; Horton et al., 2020; Jiménez et al., 2022).

El Macizo de Santander (MS) está ubicado dentro de la Cordillera Oriental siendo limitada al oeste por la Falla de Bucaramanga, al este por el sistema de fallas Mutiscua-Las Mercedes (MMFS), al sur por la falla del río Servitá y al norte por la falla Haca (García-Delgado et al., 2020). En cuanto a su deformación, Velandia, (2017) y Velandia et al., (2020) proponen un régimen transpresional con un estilo estructural tipo dominó que afecta al MS. Por su parte, Amaya et al., (2020) exponen una estructura del MS compuesta por distintos bloques tectónicos con historias distintas. Asimismo, Diederix et al., (2020) describen cerca de Ocaña, una estructura en dúplex que genera una flor positiva asociada a la Falla de Bucaramanga. Diversos estudios también destacan la interacción existente entre la Cuña de Pamplona y el Macizo de Santander resaltando

la deformación asociada a esta interacción (Velandia, 2017; Velandia et al., 2020; Villamizar-Escalante et al., 2024; Amaya et al., 2025).

### 2.2. Estratigrafía

La zona de estudio localizada al suroeste del Macizo de Santander está representada por las unidades geológicas cartografiadas en los cuadrángulos H12 y H13 según Ward et al. (1977a, 1977b). Las rocas que componen el MS corresponden a rocas metamórficas como neises, esquistos, cuarcitas principalmente el neis de Bucaramanga y los esquistos del Silgará, areniscas del Devónico, cuerpos plutónicos Triásico-Jurásicos y rocas sedimentarias posteriores (Ward et al., 1973; Restrepo-Pace, 1995; Osorio et al., 2008; Moreno-Sánchez et al., 2020) (Figura 2).

#### 2.2.1. Rocas Metamórficas

Las unidades metamórficas de la región forman parte del basamento del Macizo de Santander y muestran un rango de metamorfismo desde facies de esquistos verdes hasta metamorfismo de alto grado.

**2.2.1.1. Neis de Bucaramanga (Pbm, Pebm):** Constituye el basamento del Macizo de Santander. Se compone de paraneises cuarzofeldespáticos, hornbléndicos, micáceos y granatíferos, además de anfibolitas, migmatitas, cuarcitas y mármoles (Urueña & Zuluaga, 2011), (Mantilla-Figueroa & García-Ramírez, 2018). Este complejo ha sido intruido por plutones félsicos desde el Paleozoico hasta el Jurásico, lo que ha influido en su evolución estructural (Goldsmith et al., 1971; Ward et al., 1973). Su metamorfismo ha sido datado entre  $680 \pm 140$  Ma y  $864 \pm 66$  Ma, utilizando métodos como Rb-Sr, K-Ar y SHRIMP U/Pb (Restrepo-Pace et al., 1997; Cordani et al., 2005).

**Esquistos del Silgará (pDs):** Son una unidad metasedimentaria caracterizada por pizarras, filitas, metaareniscas y esquistos, que presentan variaciones en el grado metamórfico desde facies de esquistos verdes hasta facies de anfíbolita (Ward et al., 1973; Royero & Clavijo, 2001). Se subdivide en diferentes franjas según la litología y el grado de metamorfismo.

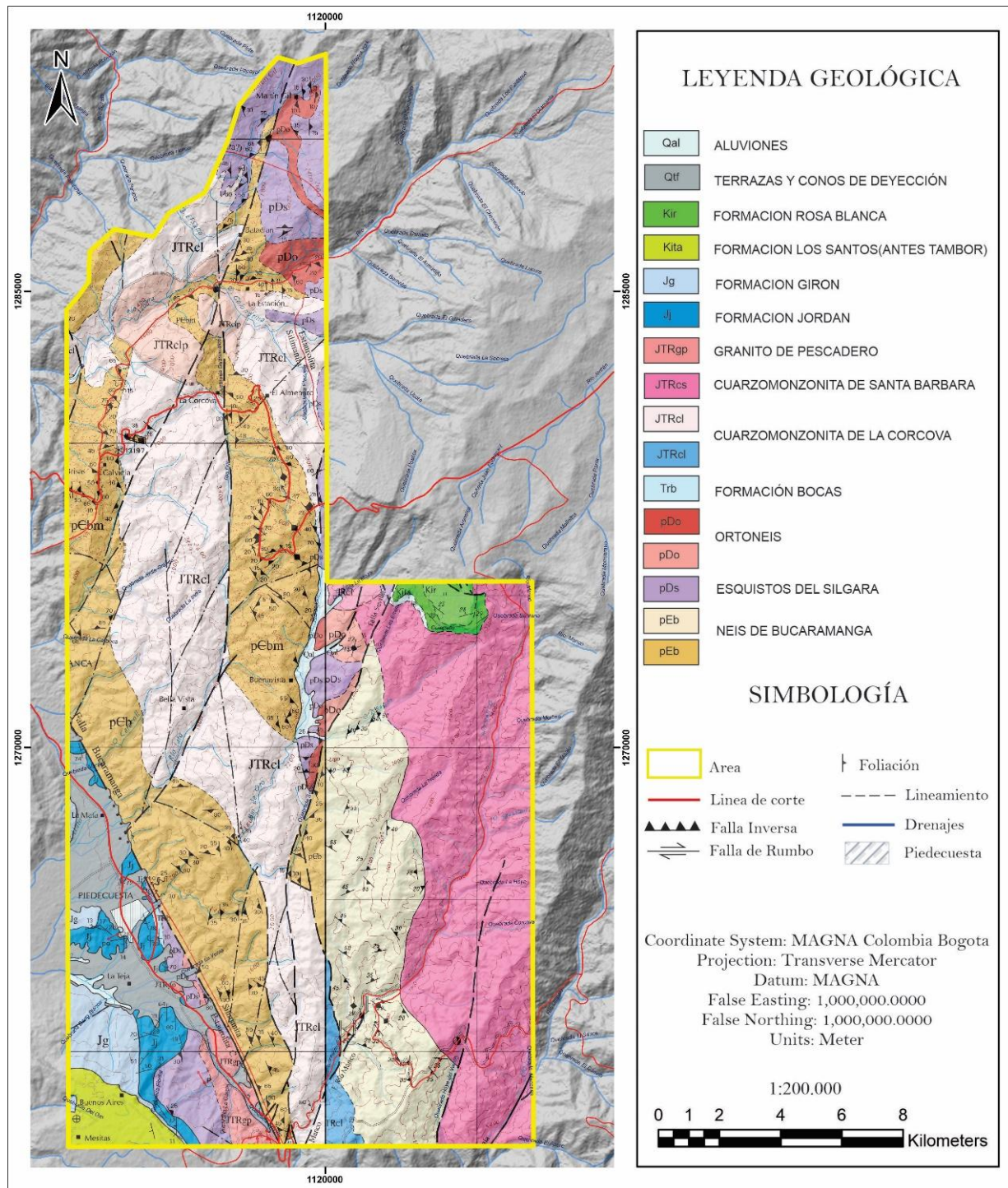
En la franja Matanza-Cachirí, se encuentran cuarcitas y esquistos micáceos con una edad máxima de deposición del protolito de aproximadamente 940 Ma (Neoproterozoico temprano). En la franja Piedecuesta-Aratoca, denominada Esquistos del Chicamocha, se han identificado metabasitas con una edad de 500 Ma (Cámbrico Medio) (Mantilla-Figueroa et al., 2016). Finalmente, en la Mesa de San Pedro, se presentan las Filitas de San Pedro, con metamorfismo muy bajo y dataciones de aproximadamente 450 Ma (Ordovícico Tardío) (Mantilla-Figueroa et al., 2016).

**2.2.1.2. Ortoneis (pDo):** Unidad metamórfica de origen ígneo con una estructura néisica bien definida y una composición que varía entre félsica e intermedia. Se encuentra intruyendo al Neis de Bucaramanga y está cubierto en discordancia por sedimentitas del Devónico Medio. Su edad se encuentra entre el Proterozoico superior y el Paleozoico inferior. Dataciones Rb/Sr en roca total han dado edades de  $450 \pm 80$  Ma, mientras que análisis K/Ar en una metadiorita cercana han registrado una edad de  $413 \pm 30$  Ma (Goldsmith et al., 1971). La unidad está conformada por neises cuarzo-feldespáticos que presentan una variabilidad composicional entre tonalita y granodiorita, con lentes de anfíbolita dispersos. Estas rocas corresponden a un metamorfismo de medio y alto grado, de una edad que se considera Pre-Devónica (Ward et al., 1973).

# ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

**Figura 2**

*Mapa geológico base del área de estudio*



*Nota:* La estratigrafía está tomada y modificada de las planchas H12 y H13 (Ward et al., 1973)

### 2.2.2. *Rocas Ígneas*

Corresponden a intrusivos plutónicos de composición predominantemente félsica, con edades comprendidas entre el Triásico y el Jurásico.

**2.2.2.1. Cuarzomonzonita de La Corcova (JTRcl):** También denominada Plutón de La Corcova o Monzogranito de La Corcova, es un cuerpo intrusivo que aflora a lo largo de la carretera Bucaramanga-Pamplona. Está compuesto por feldespato potásico, cuarzo, plagioclasa, biotita y moscovita, con minerales accesorios como apatito, circón y óxidos de hierro. También presenta alteraciones secundarias de clorita, sericita y epidota (Ward et al., 1973).

Su edad ha sido estimada en el límite Triásico-Jurásico, aunque algunos autores sugieren que corresponde completamente al Jurásico (Royero & Clavijo, 2001; Rodríguez et al., 2016). En la zona de estudio, se presentan tres variaciones litológicas: una biotítica de grano fino (JTRcl), una de textura porfirítica (JTRclp) y una mezcla de monzogranito y granito biotítico, de color gris claro a rosado pálido (JTRcg) (Ward et al., 1973; Hincapié & Veloza, 2009).

**2.2.2.2. Cuarzomonzonita de Santa Bárbara:** Es un cuerpo intrusivo que aflora en sectores como Los Curos, Santa Bárbara, Baraya y Berlín. Su composición mineralógica incluye feldespato potásico, plagioclasa, cuarzo y biotita, con fenocristales de feldespato potásico de hasta 2 cm. La roca varía en color desde rosado y rosado anaranjado hasta gris violáceo, y presenta una textura de grano medio a grueso, inequigranular (Royero & Clavijo, 2001).

La edad ha sido determinada mediante dataciones radiométricas K/Ar en biotita, obteniendo edades de enfriamiento de  $192 \pm 7$  Ma y  $194 \pm 7$  Ma, correspondientes al Jurásico Temprano (Goldsmith et al., 1971; Ward et al., 1973). Por otro lado, las edades isócronas Rb-Sr en roca total, feldespato alcalino y plagioclasa han dado valores de  $214 \pm 12$  Ma,  $192 \pm 16$  Ma y  $152$

$\pm 12$  Ma (Rodríguez-García et al, 2020), sugiriendo una evolución magmática más prolongada (Ordóñez, 2003).

**2.2.2.3. Granito de Pescadero (JTRgp):** Es un granito leucocrático de color rosado anaranjado, con una textura equigranular o ligeramente porfirítica. Fue inicialmente definido como unidad litológica por Ward et al. (1973), y su composición mineralógica incluye plagioclasa (albita), ortoclasa, micropertita y cuarzo en proporciones casi iguales. También contiene minerales accesorios como óxidos de hierro, moscovita, biotita y circón (Royero & Clavijo, 2001).

Este granito es altamente homogéneo en su composición y se distingue en el campo por su tonalidad rosada característica. Su edad ha sido determinada mediante diversos métodos geocronológicos. Dataciones K-Ar en biotita arrojaron una edad de  $193 \pm 6$  Ma, mientras que análisis U-Pb en circones han indicado edades de  $194,8 \pm 3,2$  Ma y  $199,1 \pm 1,3$  Ma, lo que lo ubica en el Jurásico Temprano (Zapata et al., 2016). Este granito aflora en los alrededores de Umpalá, en el municipio de Piedecuesta, y está asociado a metasedimentos, con afloramientos bien definidos a lo largo de la carretera Bucaramanga-Pamplona (Ward et al., 1973).

### **2.2.3. Rocas Sedimentarias**

Las unidades sedimentarias se extienden desde el Jurásico hasta el Cuaternario y registran importantes eventos tectónicos y climáticos que han influido en la sedimentación

**2.2.3.1. Formación Bocas (TRb):** Unidad sedimentaria de edad Triásico superior (Alarcón et al., 2020). Caracterizada por una alternancia de limolitas, areniscas y arcillolitas calcáreas de colores gris verdoso y gris oscuro. También incluye conglomerados grises verdosos con nódulos calcáreos y capas delgadas de rocas volcánicas en su parte superior, lo que sugiere una influencia volcánica en su deposición (Remy et al., 1975). Su espesor es de aproximadamente

590 m y se encuentra en discordancia estratigráfica sobre el Neis de Bucaramanga y las formaciones Silgará y Floresta según (Toro-Toro et al., 2021). Su contacto suprayacente es concordante con la Formación Jordán (Royero & Clavijo, 2001).

**2.2.3.2. Formación Jordán (Jj):** Compuesta por areniscas de tonalidad gris verdosa, de grano grueso a ligeramente conglomeráticas, con estratificación cruzada bien definida. En su parte superior, presenta limolitas de color marrón rojizo y rojo grisáceo, intercaladas con areniscas de grano fino en capas medianas. También se han identificado dos capas delgadas de tobas soldadas félsicas (Ward et al., 1973; Royero & Clavijo, 2001). Su ambiente de deposición ha sido interpretado como continental y vulcanoclástico, lo que concuerda con la actividad del Grupo Plutónico de Santander durante el Jurásico Temprano (Alarcón et al., 2020). Su espesor varía entre 300 y 660 m.

**2.2.3.3. Formación Girón (Jg):** Originalmente denominada "Serie Girón" por Hettner (1892), se caracteriza por una megasecuencia de areniscas, conglomerados y limolitas de colores rojizos. Sus características principales incluyen areniscas de grano medio a grueso, de tonos rojo violáceo a gris verdoso, con estratificación cruzada y conglomerados con fragmentos de cuarzo (Cediel, 1968; Ward et al., 1973). Su espesor puede alcanzar hasta 4.650 m en el Río Lebrija. Estudios estructurales y sedimentológicos modernos han interpretado parte de esta unidad como resultado de sedimentación sinextensional en un sistema de rift jurásico tardío, condicionado por fallas regionales y bloques exhumados del Macizo de Santander (Osorio-Afanador & Velandia, 2021), con evidencias de actividad volcánica contemporánea durante el Jurásico Inferior y Medio (Royero & Clavijo, 2001; Jaramillo et al., 2023) o según estratigrafía de polaridad magnética se tiene una edad de deposición del Jurásico Tardío al Cretácico Temprano según (Jiménez et al., 2021; Etayo-Serna & Guzman-Ospitia, 2019).

**2.2.3.4. Formación Los Santos (Kita):** También conocida como Formación Tambor, fue descrita por Cediel (1968) y redefinida por Laverde (1985). Se compone de lodolitas rojo-grisáceas, areniscas conglomeráticas y cuarzoareniscas de tonos grises amarillentos con estratificación cruzada. Su espesor es de aproximadamente 218 m. Estudios recientes han identificado asociaciones de facies fluviales y transgresivas en secciones como Platanalito, interpretadas como depósitos de desembocadura de estuario y sistemas fluviales sintectónicos (Laverde-Montaña et al., 2024; Laverde-Montaña, 2023). La unidad muestra variaciones litológicas significativas vinculadas a controles estructurales y cambios en el nivel de base, y se dispone en contacto discordante con la Formación Girón y concordante con la suprayacente Formación Cumbre. Su edad se asigna al Cretácico Inferior (Berriasiano) (Etayo-Serna & Guzman-Ospitia, 2019) y se correlaciona regionalmente con unidades equivalentes en cuencas adyacentes.

**2.2.3.5. Formación Rosa Blanca (Kir):** Es una unidad de edad Valanginiana-Hauteriviana, compuesta en su parte inferior por capas de caliza, yeso y oolitos con ostrácodos y dolomías. En la parte superior, se encuentran areniscas y lodolitas calcáreas con depósitos evaporíticos de yeso y polihalita, lo que indica condiciones de alta salinidad y aguas tranquilas durante su formación (Royero & Clavijo, 2001). Su espesor varía entre 150 y 425 m, con contactos concordantes tanto con la Formación Cumbre como con la suprayacente Formación Paja. Se ha comparado con la Formación Tibú-Mercedes de la Cuenca Catatumbo-Maracaibo, destacando similitudes en su ambiente deposicional (Etayo, 1968; Etayo & Rodríguez, 1985; Etayo-Serna & Guzman-Ospitia, 2019).

## 2.2.4. *Depósitos cuaternarios*

**2.2.4.1. Terrazas y Conos de Deyección (Q<sub>tf</sub>):** Esta unidad está conformada por depósitos aluviales en abanicos y terrazas de edad Pleistoceno (Royero & Clavijo, 2001). En el área de estudio, aflora a lo largo del río Tona y la quebrada Colorado. Hacia el sur, en dirección a Floridablanca y Piedecuesta, los conos aluviales se presentan menos disecados y forman una superficie casi continua que desciende hacia el oeste. Cada cono coincide en su ápice, aunque en una posición más elevada, con la desembocadura de un valle que proviene del frente montañoso (Ward et al., 1973).

**2.2.4.2. Q<sub>al</sub>: aluviones:** Esta unidad está compuesta por depósitos de aluviones, coluviones y derrubios de edad Holoceno (Royero & Clavijo, 2001). En el área de estudio, aflora Cerca del municipio de Tona a lo largo del río Tona y de la quebrada Colorado cerca del municipio de Piedecuesta.

## 2.3. **Geología Estructural**

El Macizo de Santander se caracteriza por una tectónica traspresional controlada por fallas longitudinales de cinemática sinistral (Velandia et al., 2020) como la Falla de Bucaramanga la cual delimita el margen occidental del macizo (Figura 3). Este estilo tectónico comprende también fallas transversales internas con cinemática de rumbo dextral (Kammer et al., 2020; Velandia, 2017; Velandia et al., 2020; Villamizar-Escalante et al., 2024; Amaya et al., 2025), tendencia NE-SW, una geometría curva y consideradas fallas secundarias (Kammer et al., 2020; Velandia, 2017; Velandia et al., 2020). La zona de estudio es afectada por estructuras de tendencia NE siendo estas las Fallas de Sevilla, El Picacho y del Río Manco, otras de tendencia NW como las fallas de Bucaramanga y Río de Oro, y la Falla la Cocalina con tendencia E-W.

### **2.3.1. Falla de Bucaramanga**

Según Ward et al., (1973) fue definida por Julivert (1961) como una estructura perteneciente a una serie de fallas inversas de alto buzamiento con el bloque oriental levantado. Royero y Clavijo (2001) hacen mención a ella como un sistema de fallas de rumbo sinistral. Es la estructura más importante en la zona (Figura 3) al actuar como motor para la exhumación del macizo (Amaya et al., 2017, 2020), y como mecanismo para la reconfiguración de esfuerzos y absorción de la deformación causada por la cuña de pamplona en el Macizo de Santander (Velandia, 2017; Velandia et al., 2020, Villamizar-Escalante et al., 2024; Amaya et al., 2025). Presenta rasgos que la definen como falla activa y atraviesa la zona sur con una dirección NNW exponiendo rocas del precámbrico en su bloque levantado y las pone en contacto con rocas sedimentarias e ígneas del Jurásico (Ward et al., 1973). Representa el límite entre el Macizo de Santander al este y la Región de Mesas y Cuestas al oeste (Ward et al., 1973; Velandia et al., 2020) modelando el paisaje mediante expresiones morfoestructurales prominentes (Diederix et al., 2008, 2020; Velandia & Bermúdez, 2018)

### **2.3.2. Falla del Río De Oro**

Descrita por Ward et al., (1973) como la Falla del Río Tona y redefinida por Bejarano y Navas, (2018) como la Falla del Río de Oro, es una falla regional con orientación N15°E y una longitud aproximada de 32 km. Se desprende de la Falla de Bucaramanga controlando el cauce del Río de Oro (Figura 8 a) y sigue hacia las inmediaciones del municipio de Tona hasta chocar con la Falla La Cristalina (Bejarano y Navas, 2018). Presenta vergencia al W, una cinemática de rumbo sinistral y componente inversa con el bloque oeste levantado, pone en contacto los Esquistos de Silgará con las formaciones Girón y Los Santos hacia la parte norte y con las rocas ígneas del

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

Jurásico en la parte sur de la zona de estudio (Ward et al., 1973; Bejarano y Navas, 2018). Es desplazada dextralmente por las Fallas La Cocalina y del Río Tona (Bejarano y Navas, 2018).

### **2.3.3. *Falla de Sevilla***

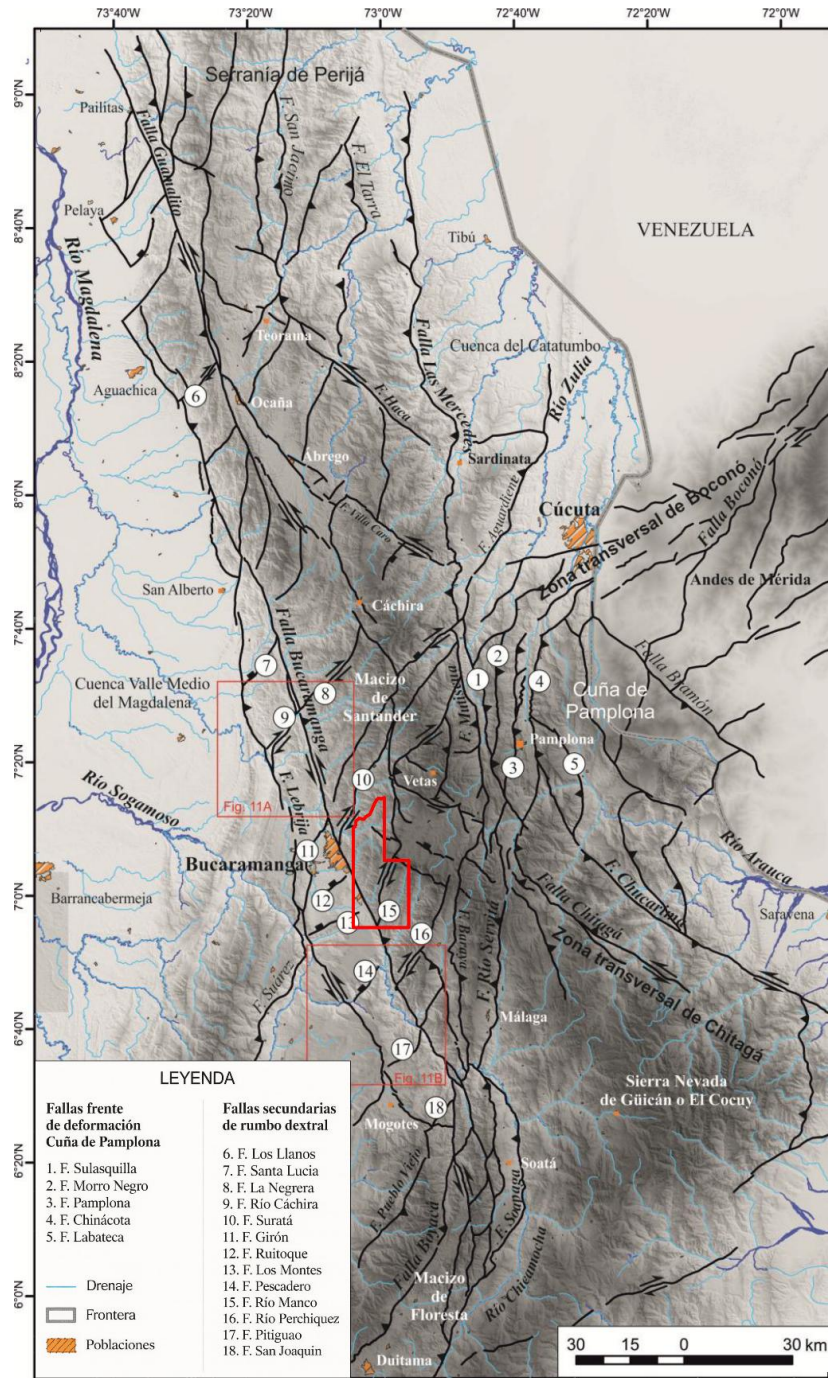
Esta estructura fue descrita originalmente por Ward et al., (1973) como una falla paralela a la Falla el Picacho que se extiende desde la Falla de Bucaramanga con dirección N20°E y una longitud aproximada de 20 km sobre el trazo de la quebrada Sevilla (Figura 8). Afecta en el basamento la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara, la Cuarzomonzonita La Corcova, el Neis de Bucaramanga al suroeste. Al noreste afecta las Formaciones sedimentarias de Girón, Los Santos y Rosa Blanca, poniéndolas en contacto con los Esquistos del Silgará en su parte más noreste (Ulloa y Gomes, 2007; Ward et al., 1973). Bejarano y Navas, (2018) le atribuyen una cinemática de rumbo dextral con componente inversa siendo el W el bloque levantado y vergencia al E.

### **2.3.4. *Falla El Picacho***

Definida por Ward et al., (1973) como una estructura con dirección N25°E que se extiende por más de 11 km aproximadamente, se desprende de la Falla del Río de Oro en la vereda Cristales, cruzando por el sector el Picacho y finaliza en un lineamiento al norte de la Falla Ucatá. Afecta los Esquistos de Silgará y el Neis de Bucaramanga hacia el sur mientras que en su parte nororiental afecta las formaciones Girón y Los Santos, formaciones que conforman el sinclinal del Picacho. Presenta una cinemática de rumbo dextral con componente inversa siendo el lado oeste el levantado y exhibiendo un desplazamiento vertical de 400 – 500 m aproximadamente (Bejarano y Navas, 2018; Ward et al., 1973). Esta falla desplaza levemente la Falla Ucatá.

Figura 3

Principales fallas del Macizo de Santander



Nota: el polígono rojo representa el área de estudio ubicada en un sector al suroeste del Macizo de Santander. Adaptado de Velandia, (2017).

### **2.3.5. *Falla del Río Manco***

Descrita por primera vez por Ward et al., (1973). Es una falla con orientación N20°E y una extensión aproximada de 18 km que se desprende desde la Falla de Bucaramanga y se extiende por el trazo del Río Manco hasta cerca de su nacimiento. Corta la Cuarzomonzonita La Corcova, la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara y el Neis de Bucaramanga. Tiene una cinemática de rumbo dextral y desplaza levemente la Falla de Bucaramanga (Villamizar-Escalante et al., 2024; Ward et al., 1973).

## **3. Metodología**

### **3.1. Control Cartográfico**

La cartografía geológica se realizó con base en la información recopilada durante las estaciones de campo. En cada una de ellas se llevaron a cabo las descripciones necesarias para el desarrollo del estudio, incluyendo la compilación de datos estructurales como fracturas, venas, planos estriados y foliación. Asimismo, se efectuó la descripción litológica macroscópica de las unidades aflorantes y el registro de los contactos entre estas. Finalmente, se realizó la caracterización geomorfológica presente a lo largo de la zona de estudio. Esta información se registró de manera ordenada en la libreta de campo para el posterior trazado de contactos y estructuras en un entorno GIS, tomando como referencia la cartografía 1:100.000 de los cuadrángulos H12 y H13 realizada por Ward et al., (1973) y con el apoyo del Modelo Digital de Elevación (MED) AP\_22188\_FBS\_F0120\_RT1 el cual se obtuvo de la página web de Alaska Satellite Facility perteneciente al instituto de Geofísica de la Universidad de Alaska Fairbanks por medio del satélite ALOS PALSAR.

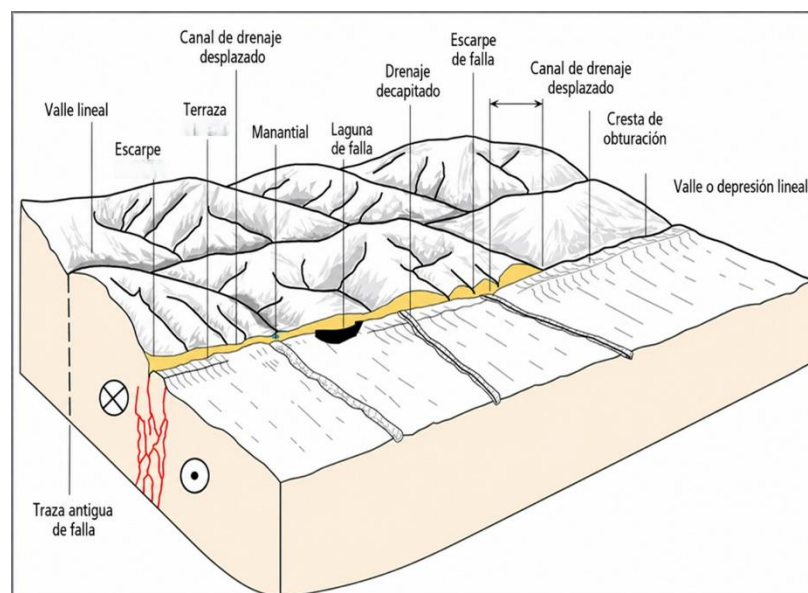
## 3.2. Análisis Morfoestructural.

El análisis morfoestructural de la zona tuvo como objetivo identificar las características geomorfológicas asociadas a las principales estructuras geológicas presentes. Este estudio se realizó mediante el uso de datos obtenidos a partir de sensores remotos, complementados con observaciones directas realizadas durante el trabajo de campo.

Adicionalmente, se utilizaron panorámicas para facilitar la interpretación de la zona y la identificación de morfoestructuras relacionadas con el trazo de las fallas principales como facetas triangulares, valles lineales, drenajes deflectados y desplazados, cuencas pull-apart, lomos de presión y obturación, lagunas de falla, rezumaderos, bermas y pliegues asociados (Keller & Pinter; 1999; Fossen, 2010) (Figura 4). Estas morfoestructuras contribuyen en la definición de la continuidad de las fallas encontradas y la identificación de características estructurales y morfológicas relacionadas con la cinemática de estas (Vedder y Wallace, 1970).

### Figura 4

*Morfoestructuras asociadas a una falla dextral tomada y modificada de Vedder y Wallace (1970)*



### 3.3. Deformación Frágil

La deformación frágil es el cambio permanente en las rocas de la corteza superior que se fracturan cuando el estrés acumulado supera la resistencia de ruptura local generando una deformación localizada. La fracturación implica la trituración, reorganización de granos y rupturas instantáneas de las redes cristalinas a escalas atómicas. Es propia de una menor temperatura y tasas de deformación más rápida e incluye fracturas de cizalla, donde el movimiento relativo es paralelo a la fractura, y fracturas de apertura o extensión, que incluyen juntas, fisuras y venas (Fossen, 2010; Van Der Pluijm & Marshak, 2004).

La toma de datos frágiles se hizo dependiendo el tipo de dato a recopilar. Los datos de diaclasas se recopilaron mediante la medición de la dirección e inclinación del buzamiento del plano de fractura a lo largo de una línea de muestreo. Este método conocido como *scanline* es una técnica fiable en la que se traza una línea sobre una superficie de roca aflorante en donde se miden y describen todas las fracturas que la intersectan (Chaminé et al., 2014) y se realizó de manera estratégica en distintas estaciones en donde la densidad de datos sea considerable, buscando efectuar al menos un muestreo de fracturas en cada litología presente en el área de estudio.

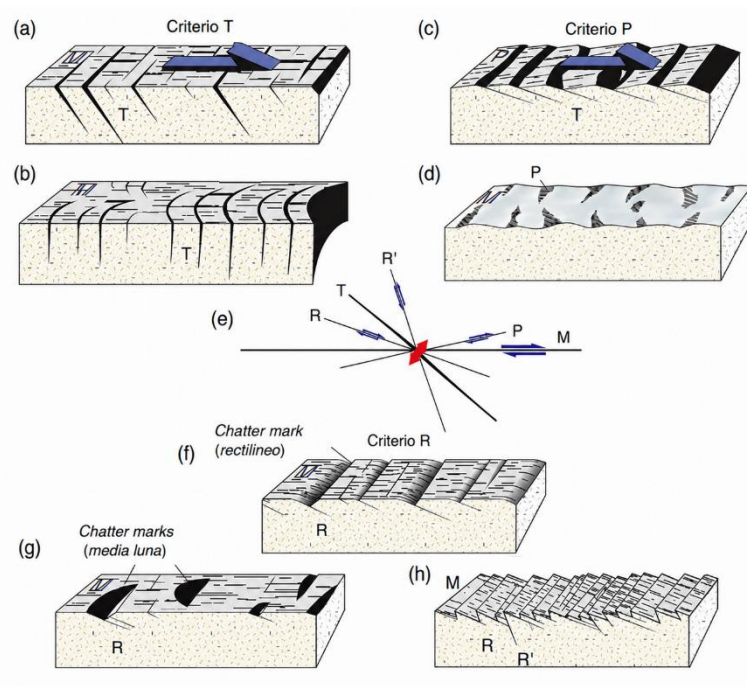
Los datos de los planos de falla se tomaron midiendo la dirección e inclinación del buzamiento del plano y la dirección de las estrías considerando su pitch, dirección de pitch y rake con el fin de aumentar la confiabilidad de los datos. El sentido del desplazamiento se determinó mediante el uso de indicadores cinemáticos y criterios que se encuentren asociados al plano de falla. Los indicadores contemplan estructuras compresionales o extensionales como estilolitos y mineralizaciones, ya que su geometría se relaciona directamente con el sentido del deslizamiento

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

en la superficie de falla (Fossen, 2010). Por otro lado, los criterios los describe Fossen, (2010) basado en Petit (1987) en donde se consideran pequeñas fracturas a lo largo de la falla con ciertos arreglos geométricos desarrollados de acuerdo a el sentido de movimiento de la falla. Estas fracturas son tipo riedel (R y R') siendo estas las más comunes y por tanto el criterio cinemático más utilizado, de extensión (T) y de cizalla (P) (Figura 5).

**Figura 5**

*Criterios cinemáticos para una falla dextral*



*Nota:* La M representa la superficie de deslizamiento (falla). Tomado de Fossen, (2010) basado en Petit, (1987)

### 3.4. Deformación Dúctil

La deformación dúctil está relacionada con las zonas de cizalla y representadas por el desarrollo de milonitas (Fossen, 2016) que se forman en condiciones aproximadas de temperatura

y presión desde los 300°C a 850°C, con presencia de una fase de fundido de 3Kbar a 9Kbar respectivamente (Passchier y Trouw, 2005).

En el régimen dúctil las mediciones se hicieron sobre foliaciones, lineaciones y zonas de cizalla. Para las foliaciones se tomó azimut de rumbo e inclinación del plano, las medidas de lineaciones consideran trend y plunge de la línea. Las zonas de cizalla fueron medidas de acuerdo con lo expuesto en el afloramiento, tomando planos sobre los que se da la cizalla, ejes axiales de plegamientos en estructuras y orientación de estas. En caso de llegarse a encontrar rocas con deformación dúctil que cumplan ciertas condiciones requeridas para un análisis petrográfico más eficiente, es necesario medir los planos necesarios para la orientación de muestras recolectadas para este fin, además de la identificación de indicadores cinemáticos como deformación intracristalina (Blenkinsop, 2002; Passchier y Throw, 2005), maclado mecánico (Blenkinsop, 2002; Passchier y Trouw, 2005; Vernon, 2004) y recristalización dinámica (Blenkinsop 2002; Passchier y Trouw, 2005; Vernon, 2004; Fossen, 2016).

### **3.5. Procesamiento De Datos**

#### ***3.5.1. Determinación De Tensores De Deformación.***

Los datos recopilados en campo fueron procesados en distintos programas según su tipo. Los planos con estrías y foliaciones se procesaron mediante el software de uso libre WinTensor tomando como referencia la metodología descrita por Velandia, (2017) que está basada en Delvaux & Sperner, (2003) en donde se usan los métodos de Diedros Rectos Mejorado (I.R.Dihedr) y de Optimización Rotacional (R. Optim). Estos métodos permiten la inversión de los datos obtenidos en campo y se basan en la suposición de Bolt, (1959) el cual dicta que el deslizamiento en un plano ocurre en la dirección del esfuerzo cortante máximo resuelto (Delvaux & Sperner, 2003).

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

La metodología sigue una serie de pasos con el fin de obtener tensores de calidad. El primer paso es ingresar los datos al programa y realizar un filtro de los datos según su distribución en círculo de Mohr, planos de falla y estría en el hemisferio sur del estereograma e histogramas de frecuencia por Función F5. Seguido a ello se procesan con el método de Diedros Rectos Mejorado hasta alcanzar valores de conteo de 0% para  $\sigma_1$  y 100% para  $\sigma_3$  y una desviación de conteo menor a 30, lo que permite filtrar los planos en el círculo de Mohr dejando aquellos que están en el campo de los neoformados y reactivados. Al cumplir estos requisitos se puede aplicar el método Optimización Rotacional filtrando hasta tener un valor de desviación máxima de deslizamiento  $\alpha$  menor a 30 obteniendo así tensores de calidad con características que engloban el uso de la mayor cantidad de datos posibles, el uso de planos ubicados en el campo de círculo de Mohr como neoformados o reactivados y que presentan distintas orientaciones, la coherencia en la orientación de deslizamiento de los planos focales e histogramas con F5 tendiendo a 0 (Velandia, 2017).

### **3.6. Secciones geológicas transversales**

Se elaboraron cortes geológicos perpendiculares a las principales estructuras del área de estudio para analizar la configuración geométrica de las unidades de roca y las estructuras. Estos cortes servirán como apoyo para construir un modelo estructural de la zona, permitiendo interpretar su evolución tectónica y caracterizar las interacciones entre las diversas estructuras identificadas.

### **3.7. Movimientos En Masa.**

Los movimientos en masa se refieren al desplazamiento de material a lo largo de una o varias superficies. Este fenómeno es fácilmente identificable en una zona relativamente delgada y puede involucrar una única masa o varias masas relativamente independientes. El movimiento durante el deslizamiento puede desarrollarse de manera progresiva, lo que significa que no

comienza de inmediato a lo largo de la superficie de falla, sino que ocurre de forma gradual (Suárez, 2009).

Se analizó la relación entre las estructuras principales y las amenazas geológicas, específicamente los movimientos en masa, mediante el catálogo de MM ya existente obtenido del Servicio Geológico de Colombia, tomando como punto de referencia la ubicación de los movimientos en masa reportados de manera histórica como actual. Posteriormente, se evaluó su proximidad a las estructuras existentes para determinar si existe una relación espacial entre estas estructuras y la ocurrencia de los movimientos en masa, proporcionando información clave para comprender y evaluar las amenazas geológicas

### **4. Resultados**

#### **4.1. Cartografía Geológica**

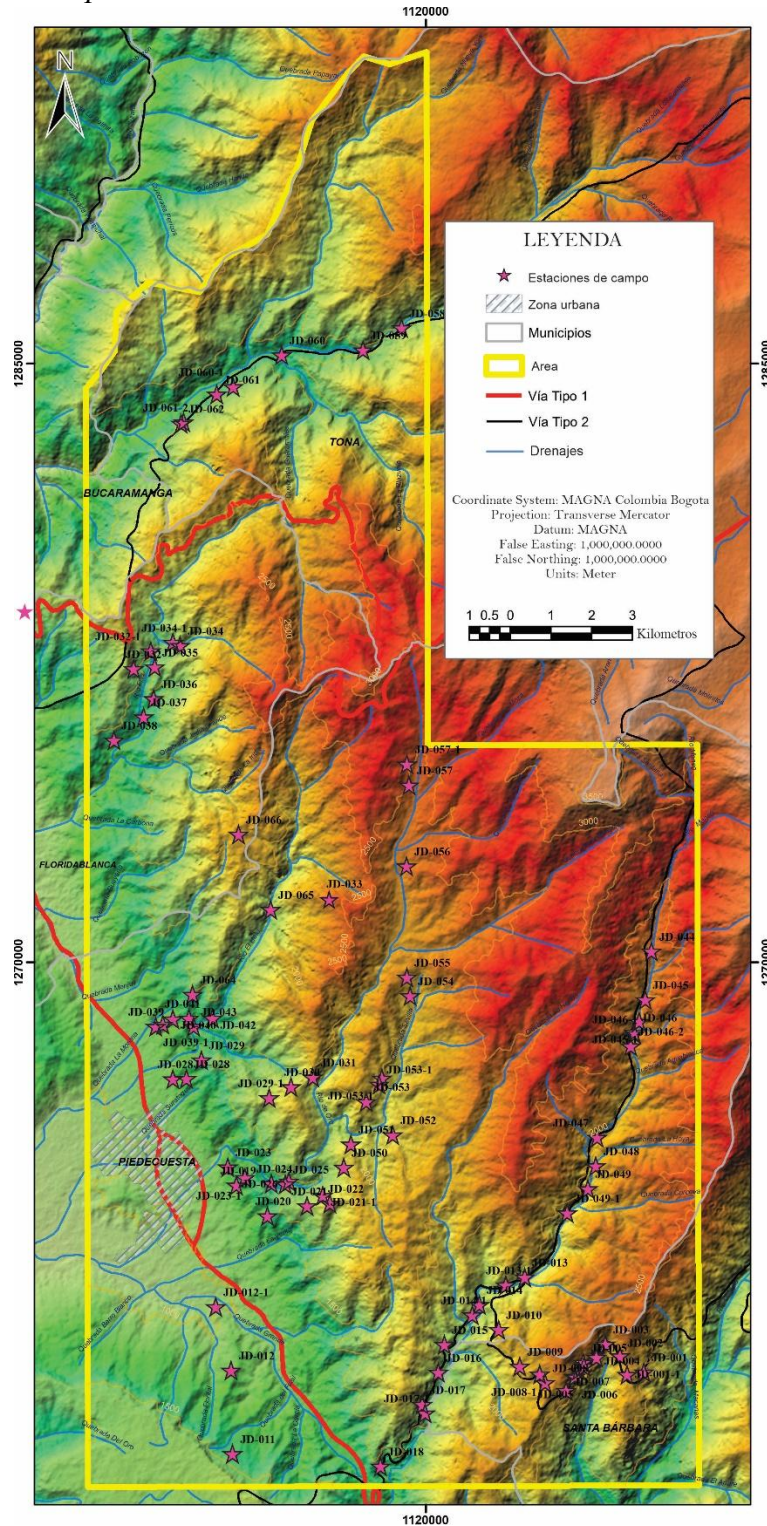
El control cartográfico, reconocimiento de morfoestructuras, y el análisis estructural se desarrolló mediante el uso de sensores remotos y el trabajo de campo que consistió en un total de 66 estaciones (Figura 6) en las cuales se realizaron panorámicas, descripciones litológicas, búsqueda e identificación de contactos y recolección de datos estructurales tanto en estructuras primarias como secundarias. Las estaciones se distribuyeron a lo largo de las estructuras principales, ubicándose en carreteras, veredas, caminos y quebradas.

Para la elaboración del mapa geológico del área de estudio se realizó un control cartográfico a escala 1:100000 (Figura 7) a partir de los mapas geológicos preexistentes de los cuadrángulos H12 y H13, empleando la nomenclatura de Ward et al. (1977a, 1977b). El control se realizó con datos identificados en campo y se complementó con información de sensores remotos.

# ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

**Figura 6**

*Mapa de estaciones de campo.*

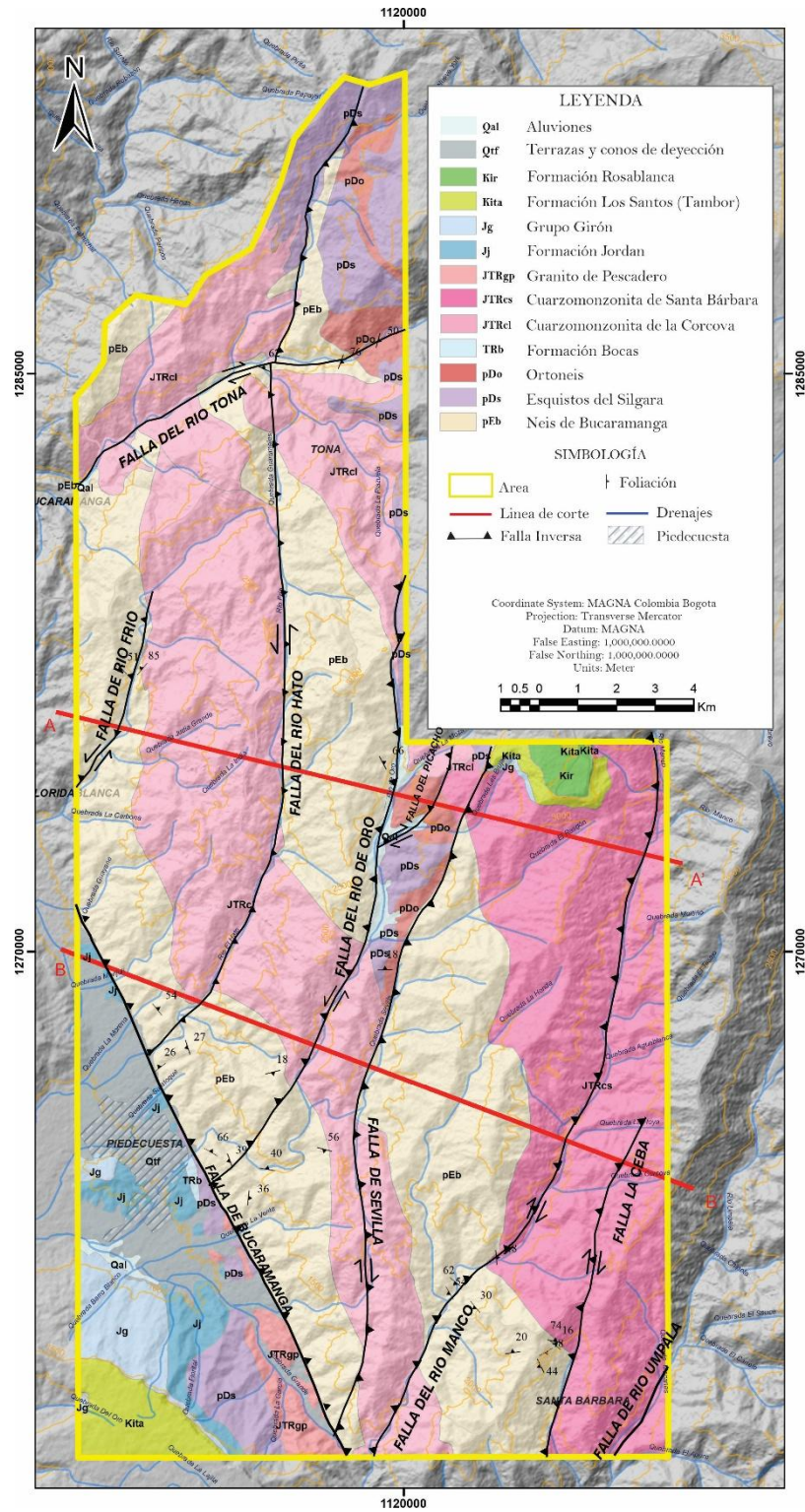


*Nota:* Las estrellas representan los puntos donde se hicieron descripciones y tomas de datos.

# ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

**Figura 7**

*Mapa geológico del área*



## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

*Nota:* Mapa creado a partir del control cartográfico de los cuadrángulos H-12 y H-13 a escala 1:100000 (Ward et al., 1973)

### **4.1.1. Rocas Metamórficas**

El basamento metamórfico del Macizo de Santander se encuentra representado en la zona de estudio por el *Neis de Bucaramanga* (pEb), el *Ortoneis* (pDo) y los *Esquistos del Silgará* (pDs), afloran como franjas alargadas en dirección N-S y NW-SE de la zona de estudio (Figura 7). En la estación JD-26 se identificaron migmatitas descritas como metatexita con estructura estromática plegada en algunas zonas.

En el Ortoneis se identificaron cuerpos de diorita intruyendo el Neis cuarzomonzonítico, esta unidad se encontró en contacto con el Neis de Bucaramanga y Los Esquistos del Silgará, esta unidad se encuentra afectada por numerosas intrusiones y una fuerte actividad hidrotermal.

### **4.1.2. Rocas Ígneas**

Las rocas ígneas intrusivas corresponden a cuerpos plutónicos de composición predominantemente félsica. Mediante el control de cartografía, se verificó la presencia de la *Cuarzomonzonita de La Corcova* (JTRcl) (Figura 7) en el extremo oeste y al sureste de la zona, esta roca se encuentra en contacto intrusivo con el neis de Bucaramanga. En la parte central, se confirmó la presencia de la *Cuarzomonzonita de Santa Bárbara* (JTRcs), se encuentra en contacto intrusivo con en el neis de Bucaramanga, el *Granito de Pescadero* (JTRgp) y los Esquistos del Silgará.

### **4.1.3. Rocas Sedimentarias**

La sucesión sedimentaria en la zona de estudio inicia con unidades mesozoicas. Afloran la *Formaciones Bocas* (TRb), *Formación Jordán* (Jj), *Grupo Girón* (Jg) al SW de la zona (Figura 7).

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

Hacia el noroeste afloran las formaciones cretácicas *Los Santos* (Kita) y *Rosa Blanca* (Kir). Finalmente, se identificaron los depósitos cuaternarios no consolidados, incluyendo las *Terrazas* y *Conos de Deyección* (Qtf) donde se encuentra la zona urbana del municipio de Piedecuesta y *Aluviones* (Qal) alrededor de la falla del Río de Oro al NE de la zona.

### 4.2. Cartografía Estructural

La cartografía estructural de la zona permitió la identificación de diez estructuras que definen la arquitectura de la zona. A partir de los datos de campo, junto con la información bibliográfica existente y el análisis de sensores remotos se elaboró un mapa de fallas (Figura 8A). Para complementar el análisis, se elaboró un mapa de lineamientos que recopila las principales tendencias estructurales identificadas (Figura 8B).

El mapa de estructuras revela un patrón cinemático heterogéneo. Las fallas La Ceba, Río Manco, Sevilla, Picacho y del Río Tona con una orientación NE-SW se configuran como fallas de rumbo con cinemática dextral. Por su parte, las fallas del Río de Oro, del Río Hato y del Río Frío presentan una cinemática sinistral. Todas las fallas anteriores, excepto la del Río Tona, muestran una cinemática oblicua de tipo inverso (Figura 8A).

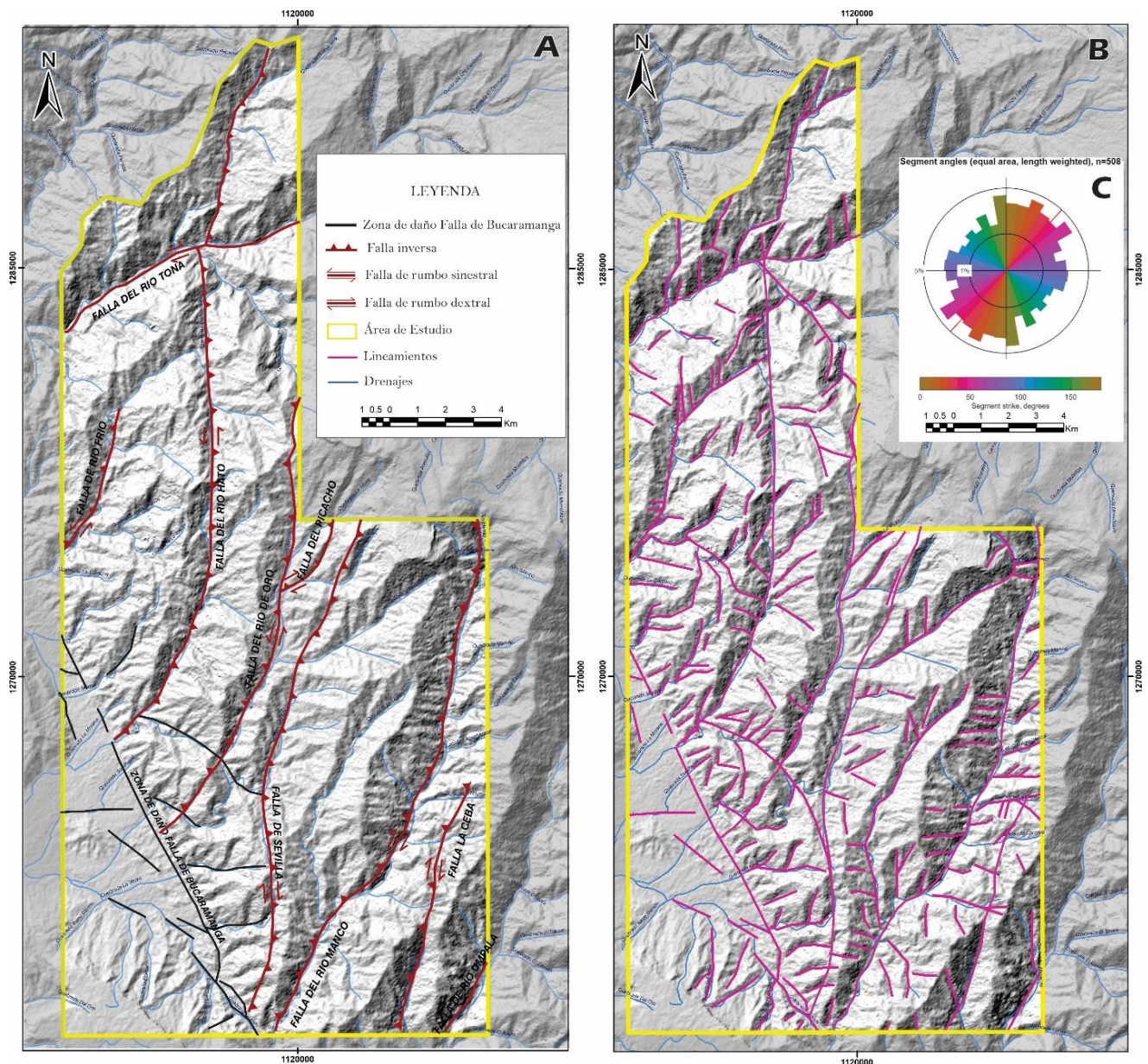
El análisis del diagrama de rosas (Figura 8 C), elaborado a partir de 224 lineamientos mediante la herramienta FracPaQ, evidencia una tendencia principal con un rango de azimut entre  $350^\circ$  y  $60^\circ$ , y una segunda tendencia entre  $80^\circ$  y  $100^\circ$ . La mayor concentración de segmentos se orienta en dirección NE-SW, con una longitud promedio de 1.4 km. Estos lineamientos se distribuyen principalmente a lo largo de los trazos de las fallas y dentro de la zona de daño asociada a la Falla de Bucaramanga. Los lineamientos ubicados en el sector sur del área, asociados a la Falla del Río Manco, presentan una tendencia predominante Este-Oeste. En contraste, los lineamientos

# ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

vinculados a la zona de daño de la Falla de Bucaramanga muestran una orientación dominante noreste-oeste (NE–SW). Hacia el norte, en relación con la Falla del Río Tona, se observa una tendencia más marcada en dirección norte-sur. En general, estos lineamientos se disponen de forma oblicua o perpendicular respecto a las estructuras principales del área (Figura 8 B).

**Figura 8**

*Mapa de estructuras y lineamientos*



*Nota:* A) Mapa de estructuras. B) Mapa de Lineamientos de la Zona de Estudio. Presenta los lineamientos estructurales y topográficos interpretados a partir de la geomorfología usando un Modelo de elevación digital (MED) AP\_22188\_FBS\_F0120\_RT1 C) Principales orientaciones de los lineamientos analizados mediante el software FracPaQ.

### 4.3. Cartografía morfoestructural

En la zona de estudio se identificaron mediante el análisis de modelos de elevación digital y observaciones en campo, varios tipos de morfoestructuras asociadas a las principales fallas trazadas: ganchos de flexión, lomos de obturación, lomos de presión, espolones, cuencas de falla, cimas deflectadas, cauces deflectados, facetas triangulares, hombreras, silletas de falla y valles lineales (Figura 9).

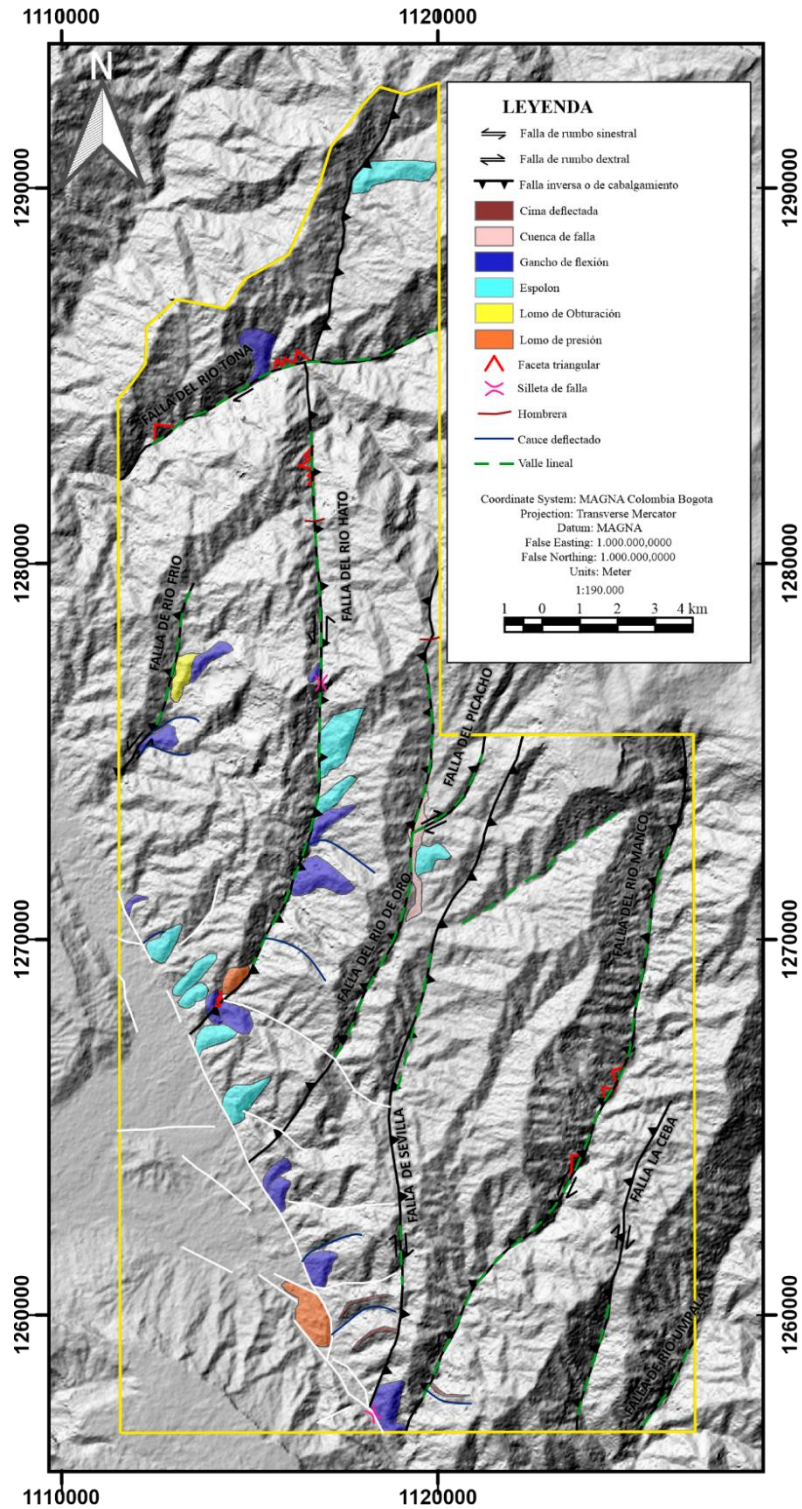
Todas las fallas presentan valles lineales a lo largo de sus trazos, no obstante, en las fallas de los ríos Umpalá, Sevilla y La Ceba, estos valles lineales constituyen la única expresión morfoestructural reconocida. La Falla del Río Manco muestra una cima y un cauce deflectado en el extremo suroccidental, cerca del sector Los Curos y facetas triangulares cerca a la escuela de San Isidro (Figura 9). En el caso de la Falla del Río de Oro, se reconoció una hombrera en inmediaciones del sector El Picacho, más al sur, sobre la vía Sevilla–km 40, se identificó una cuenca alineada con el trazo de la falla (Figura 10 d), acompañada de un espolon hacia el este (Figura 9).

La Falla del Río Hato presenta una alta densidad de expresiones morfoestructurales apoyando su cinemática sinistral. Se observaron ganchos de flexión recurrentes al sur sector La Nevera, al norte del río Tona y sobre la quebrada El Encanto, allí, se encuentran junto con un lomo de presión y facetas triangulares (Figura 10a y b). Adicionalmente, se reconocieron facetas triangulares cerca al sector La Corcova y silletas de falla y espolones en el sector La Nevera (Figura 9).

# ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

Figura 9

Mapa Morfoestructural de la Zona



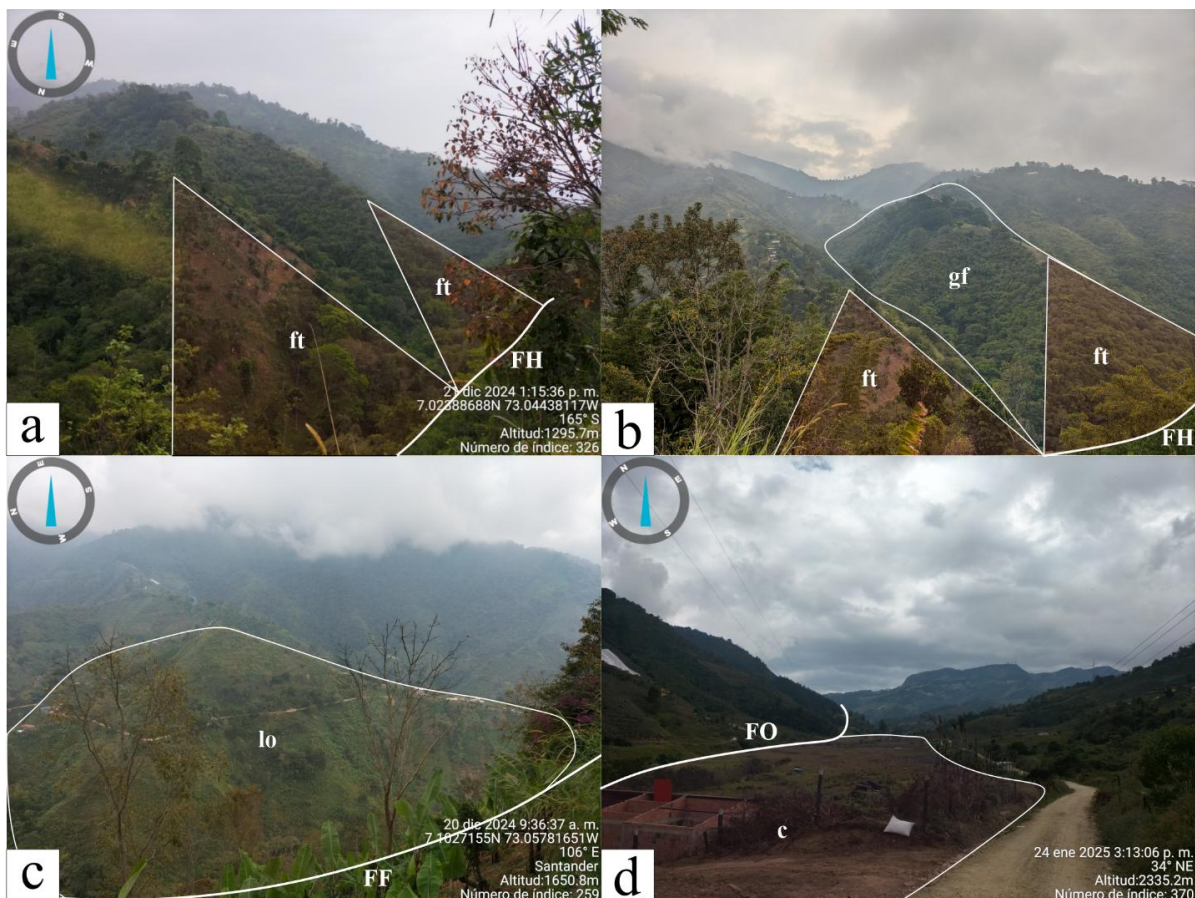
## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

*Nota:* el mapa muestra las expresiones morfoestructurales encontradas en el área de estudio, complementadas con las descritas en Velandia & Bermudez (2018) para la zona de daño de la Falla de Bucaramanga.

En cuanto a la Falla del Río Frío, esta muestra dos ganchos de fallas, varios cauces deflectados y un lomo de obturación entre las cascadas Los Venados y La Judía (Figura 10 c). Por otro lado, la Falla del Río Tona exhibe facetas triangulares y un gancho de falla en cercanías al cruce con la Falla del Río Hato. La Falla de Bucaramanga presenta varios ganchos de flexión y espolones distribuidos a lo largo del trazo que atraviesa la zona de estudio. En el sector los curos se encontró la presencia de una silleta de falla, cauces y ríos deflectados, además de un lomo de presión (Figura 9).

**Figura 10**

*Morfoestructuras presentes en campo*



*Nota:* Las panorámicas corresponden a: a. Vista de facetas triangulares (ft) cercanas a La falla del Río Hato (FH) cerca a la cascada el Ensueño; b. Vista de facetas triangulares vistas en “a” y un gancho de flexión (gf) asociado a la falla del Río Hato; c. Lomo de obturación (lo) asociado a la falla de Río Frío (FF), fotografía tomada cerca al km 15 vía Bucaramanga – Pamplona; d. Cuenca (c) asociada a la falla del Río de Oro (FO) en la vereda Cristales.

### **4.4. Cinemática De Las Estructuras**

Debido a la escasez de datos estructurales en las fallas de Río de Oro, Río Umpalá y Picacho, no se encontraron modificaciones significativas en sus configuraciones previamente descritas, por tanto, no se describen en este capítulo. La Falla de Bucaramanga se trazó siguiendo la zona de daño cartografiada por Velandia y Bermúdez (2018) y teniendo en cuenta el análisis morfoestructural en este estudio. Debido a esto, a continuación, solo se describen las principales características de las 6 estructuras restantes que contaron con datos significativos a lo largo de la zona de estudio.

#### **4.4.1. Falla del Río Manco**

La falla del Río Manco es una estructura con dirección SSW-NNE que se extiende por más de 20 km en la zona de estudio controlando el cauce del Río con el mismo nombre (Figura 8A). Afecta la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara, el Neis de Bucaramanga y la Cuarzomonzonita de la Corcova (Figura 7). Su trazo y continuidad fueron confirmadas a partir de datos obtenidos en campo a lo largo de la vía Curos- Málaga, en el km 118 (estación 14 y 16) y sobre la vía que conduce a la Escuela San Isidro al E de Piedecuesta. Los planos estriados registrados evidencian una cinemática de rumbo dextral con un ligero componente en la vertical inverso (Tabla 1).

#### **4.4.2. Falla de Sevilla**

La falla de Sevilla es una estructura de dirección SSW-NNE conservando una vergencia al NWW. Se extiende por alrededor de 18 km desde donde se desprende de la falla de Bucaramanga en el sector Los Curos pasando por el sector Sevilla (Figura 11f) y continuando hacia las

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

inmediaciones del Picacho (Figura 8A). Afecta la Cuarzomonzonita de la Corcova y el Neis de Bucaramanga al sur de Sevilla y pone en contacto el Ortoneis y los Esquistos del Silgará al norte de esta misma localidad (Figura 7). Para la definición de su configuración se encontraron datos en la estación 51 que soportan una cinemática de rumbo dextral (Tabla 1).

**Tabla 1**

*Datos de planos estriados con cinemáticas*

<b>Azimut de buzamiento</b>	<b>Buzamiento</b>	<b>Rake</b>	<b>Pitch</b>	<b>Cinemática</b>	<b>Estación</b>
272	82	105	75NW	Dextral	JD-04
45	80	10	10NW	Sinestral-normal	JD-06
280	76	18	18N	Dextral	JD-06
262	57	25	25S	Dextral-inversa	JD-14
12	60	24	156SE	Sinestral-inversa	JD-16
302	66	26	26SW	Dextral-inversa	JD-16
100	87	18	18N	Dextral-inversa	JD-16
135	74	170	10SSW	Dextral	JD-16
110	72	5	5NNE	Dextral	JD-16
50	84	154	26SW	Dextral	JD-17
154	82	146	34NW	Dextral	JD-26
280	88	138	42NNE	Sinestral-inversa	JD-34
106	88	47	47NNE	Sinestral-normal	JD-34
125	74	42	42NE	Sinestral	JD-34
125	60	30	30NE	Sinestral	JD-34
125	56	42	42NE	Dextral-inversa	JD-34
255	62	51	51S	Dextral	JD-34
243	86	140	40W	Sinestral-inversa	JD-42
204	88	78	78SE	normal-dextral	JD-44
264	84	154	26NW	Sinestral	JD-46
220	80	100	80W	dextral	JD-51
135	52	68	68SE	dextral	JD-51
300	58	74	74NW	Inversa-sinestral	JD-60
353	87	10	10NW	Dextral-normal	JD-60
70	86	80	80NE	Normal-sinestral	JD-60
172	86	177	03NE	Dextral	JD-60
80	60	10	10N	Dextral	JD-62

*Nota:* La Tabla muestra los distintos planos estriados encontrados en el trabajo de campo, la cinemática correspondiente y su respectiva estación.

Figura 11

*Panorámicas de las diferentes fallas encontradas*



*Nota:* a: Panorámica de la falla del Río Hato (FH) y la falla Bucaramanga (FB) desde el sector los Ermitaños; b: Trazo de la falla del Río Hato desde el sector los Ermitaños; c: Trazo de la falla del Río Manco desde la vía Curos – Málaga; d: panorámica de la falla la Ceba, fotografía desde el sector la Ceba; e: Falla de Río Frío vista desde pasos debajo de la quebrada la Judía; f: Vista de la falla de Sevilla vista desde el W del sector Sevilla.

### **4.4.3. Falla del Río Tona**

La falla de Río Tona es una estructura de dirección W-E que se extiende por alrededor de 10 km por el cauce del Río Tona controlando su configuración (Figura 8A). Afecta la Cuarzomonzonita de la Corcova, el Neis de Bucaramanga y parte del Ortoneis. Cerca de su trazo exhibe datos de planos estriados en la estación 60, estos corresponden a un azimut de buzamiento 353/87, con cinemática de rumbo dextral (Tabla 1).

### **4.4.4. Falla del Río Frío**

La Falla del Río Frío se desprende de la falla de Bucaramanga con una orientación SW-NE y sigue el curso del Río Frío (Figura 11 e) por alrededor de 6 km hasta cercanías del km 17 de la vía Bucaramanga-Pamplona (Figura 8A). Afecta solo el Neis de Bucaramanga y la Cuarzomonzonita de la Corcova. Esta estructura fue definida con base en los datos encontrados en la estación 34 que arrojan un azimut de buzamiento de 125/74 (Tabla 1), con una cinemática sinistral, dicha cinemática apoyada por las morfoestructuras encontradas en su trazo (Figura 9).

### **4.4.5. Falla del Río Hato**

La falla del Río Hato es una estructura con una orientación SW-NE en la zona más cercana a la Falla de Bucaramanga, se extiende hasta el norte de la zona estudiada por el trazo del Río Hato (Figura 11 a y b) hacia el sector la Corcova y sigue hacia el W del casco urbano de Tona conservando una orientación S-N (Figura 8A). Afecta el Neis de Bucaramanga, la Cuarzomonzonita de la Corcova y los Esquistos del Silgará. Es desplazada dextralmente por la falla del Río Tona. Los planos estriados encontrados (estación 42) muestran una cinemática de rumbo sinistral y componente vertical inverso (Tabla 1). Aunque Hincapié & Veloza, (2009)

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

denominan esta estructura como Falla del Río Frío, aquí se propone usar el nombre del Río Hato debido a que el cauce del Río Frío es controlado por una estructura distinta.

### **4.4.6. Falla La Ceba**

Esta falla corresponde a una estructura con orientación SW-NE que se desprende de la falla del Río Umpala, al sur del límite de la zona estudiada (Ward et al., 1973; Villamizar-Escalante et al., 2024) y se extiende por aproximadamente 10 km en la zona de estudio pasando por las inmediaciones del sector la Ceba hasta cercanías de la quebrada la Hoya al W del casco urbano de Santa Bárbara (Figura 8A). Es una falla de alto ángulo identificada con cinemática de rumbo dextral y componente vertical inverso (Tabla 1) que afecta el Neis de Bucaramanga y la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara.

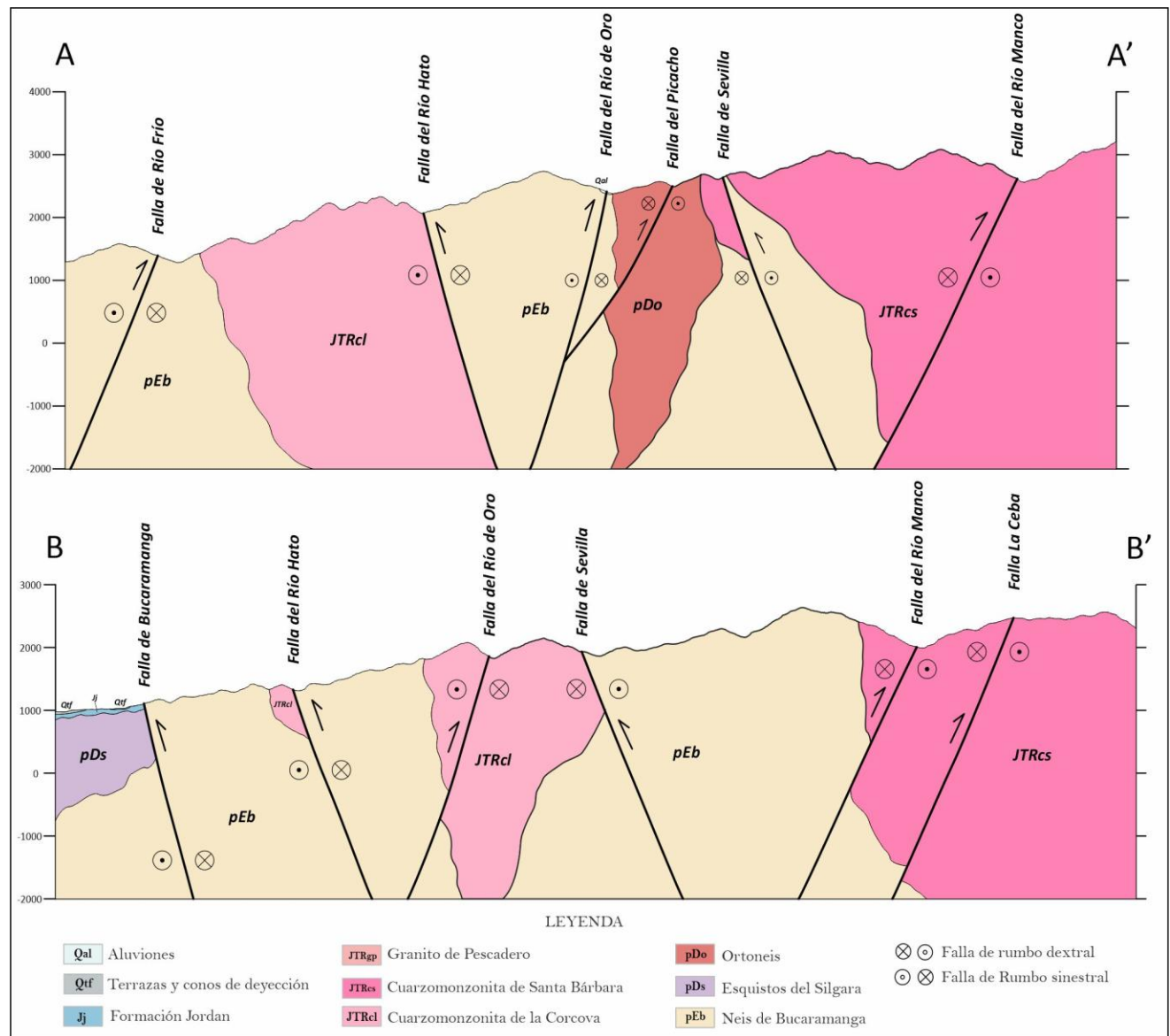
### **4.5. Secciones geológicas**

Para complementar la cartografía estructural, se elaboraron los cortes A-A' Y B-B' (Figura 12), La ubicación de estas líneas fue definida en una orientación aproximada W-E con el fin de intersectar las principales estructuras de manera perpendicular a su rumbo.

En las secciones se reconoce un basamento metamórfico constituido principalmente por el Neis de Bucaramanga, acompañado localmente por los Esquistos del Silgará, sobre el cual se emplazan cuerpos intrusivos como la Cuarzomonzonita de la Corcova al W, la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara al E y el Ortoneis en la sección central del corte A-A'. Estas unidades están afectadas por un sistema de fallas que generan la repetición de litologías a lo largo de los perfiles. Además, se presentan depósitos superficiales recientes correspondientes a unidades cuaternarias como aluviones, terrazas y conos de deyección que se observan sobre la zona de falla del Río de Oro y en el bloque Oeste de la falla de Bucaramanga (Figura 12).

Figura 12

Cortes geológicos del área de estudio (A-A') Y (B-B')



Nota: Los cortes geológicos se orientan de W a E. Las líneas de corte se ilustran en la Figura 7.

Las fallas presentan geometrías inclinadas y de alto ángulo, con planos continuos que segmentan las unidades y controlan su disposición. En ambos cortes se identifican las fallas del Río Hato, Río de Oro, Sevilla y Río Manco formando dos pop ups y una zona triangular que

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

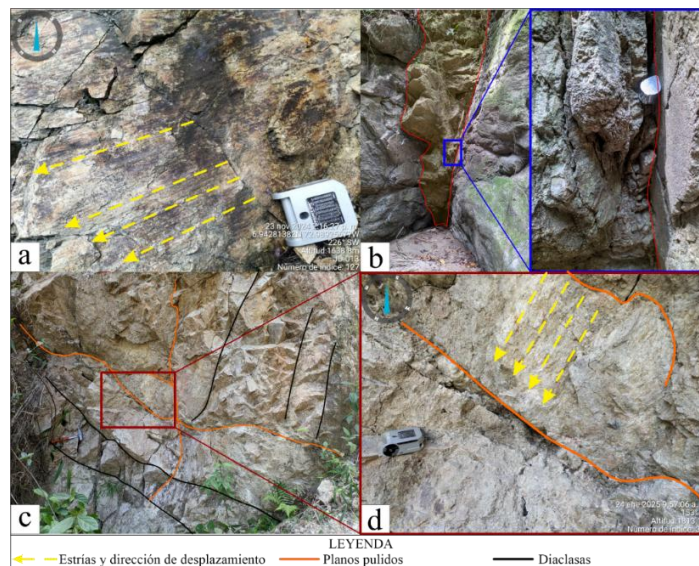
contiene unidades principalmente metamórficas. Las tendencias de buzamiento son principalmente hacia el SE y NW, con cambios locales en su orientación. Los contactos observados corresponden en su mayoría a contactos tectónicos asociados a las fallas, así como contactos intrusivos entre los cuerpos ígneos y el basamento metamórfico (Figura 12).

### 4.6. Estructuras de deformación frágil en escala mesoscópica

Debido a la dinámica estructural de la zona en donde las fallas moldean el paisaje deformando la roca, se favorece la meteorización y erosión, muchos afloramientos cuentan con un grado de meteorización alto, lo que no favorece la toma de una cantidad óptima de datos estructurales para la zona. En afloramientos poco meteorizados se logró la toma de 298 datos de diaclasas, 28 planos estriados con identificación de cinemática, 34 planos de foliación, 15 datos de venas, 5 de diques y 21 planos pulidos, brechas o zonas de intenso fracturamiento (Figura 13).

### Figura 13

*Expresiones frágiles encontradas en campo*



*Nota:* a) Estrías en la estación 16; b) brecha consolidada cerca a la cascada del Encanto; c y d) deformación frágil en la estación 51.

### **4.6.1. Diaclasas**

Las diaclasas fueron analizadas mediante un diagrama de rosas y proyección estereográfica por cada estación, lo que permitió identificar las principales tendencias de fracturamiento y la relación de estas tendencias con el trazo de las estructuras principales (Figura 14). En general, los resultados obtenidos evidencian asociaciones de diaclasas con direcciones predominantes NW-SE, orientación similar a la falla de Bucaramanga y SW-NE, similar a estructuras como la falla de Río Tona, Río Manco o Río Umpala. En las estaciones JD-025, JD-043 y JD-064 localizadas en las cercanías a la Falla de Bucaramanga y sobre los trazos de las fallas del Río Hato (cercanías a la Cascada El Ensueño) y Falla del Río de Oro (cercanías a la Cascada Las Golondrinas) se identifica mayor variabilidad en las orientaciones y una mayor densidad de datos. Las estaciones JD-016, JD-046 y JD-048 sobre el trazo del Río Manco muestran una tendencia de datos con orientación SW-NE, similar al trazo de la falla que controla este cauce. La estación JD-062 presenta dos orientaciones en los datos, la principal similar al trazo de la falla de Bucaramanga y el segundo similar al trazo de la falla del Río Tona, estructura Ubicada al N de esta estación.

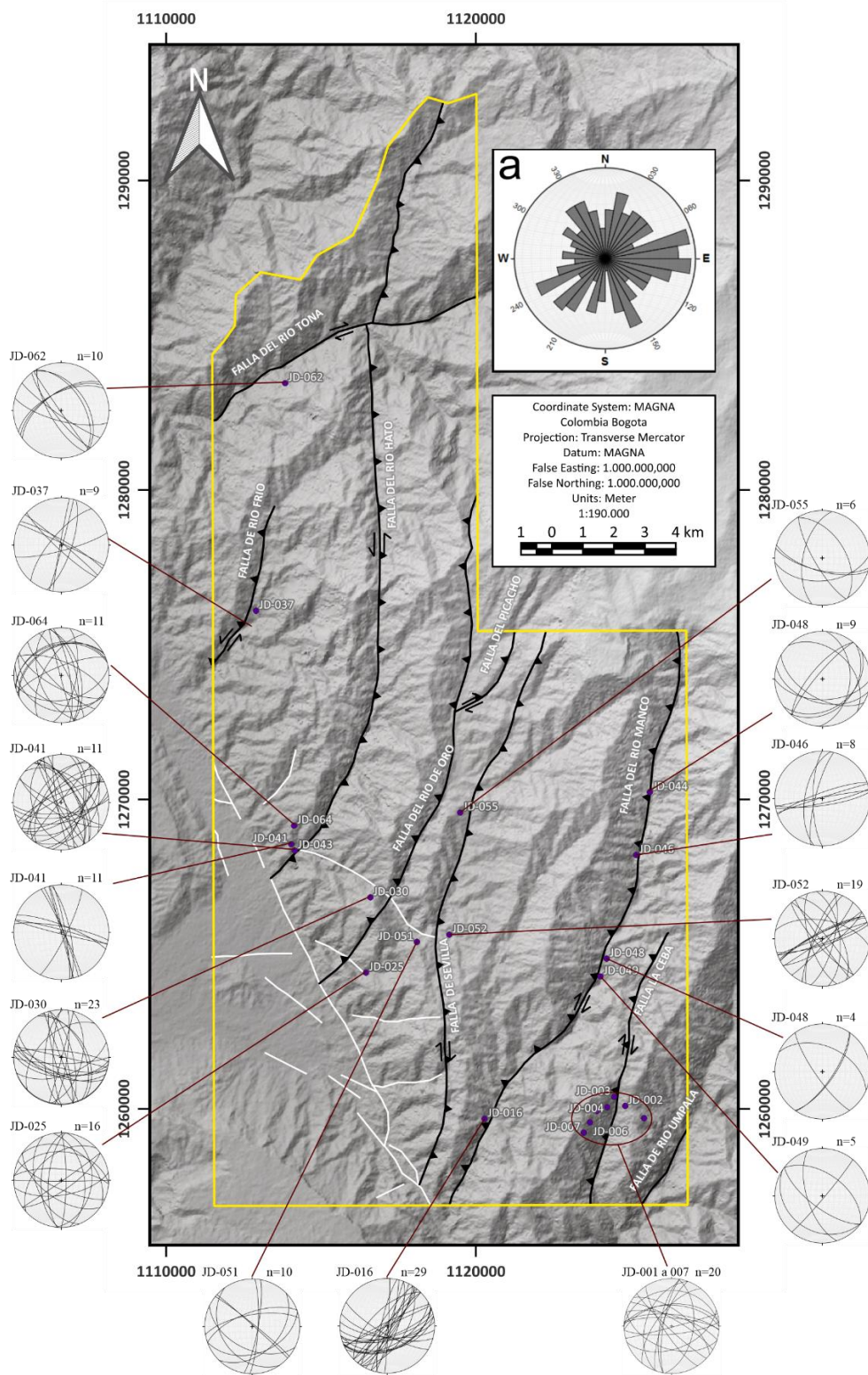
### **4.6.2. Venas, diques y planos fracturas**

El análisis de venas y diques arroja una dispersión considerable en cuanto a orientaciones, aún así, se logran identificar 3 orientaciones preferenciales. La primera con más densidad de datos muestra una orientación al S, la segunda conserva una orientación NWW – SEE y la tercera orientada hacia el SW (Figura 15 a). Por otro lado, los datos de a planos pulidos, brechas o zonas de intensa fracturación revela una agrupación de datos orientados hacia el SE, con azimut de 105° a 120° y otra que varía desde el S hasta el SW (Figura 15 b).

# ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

**Figura 14**

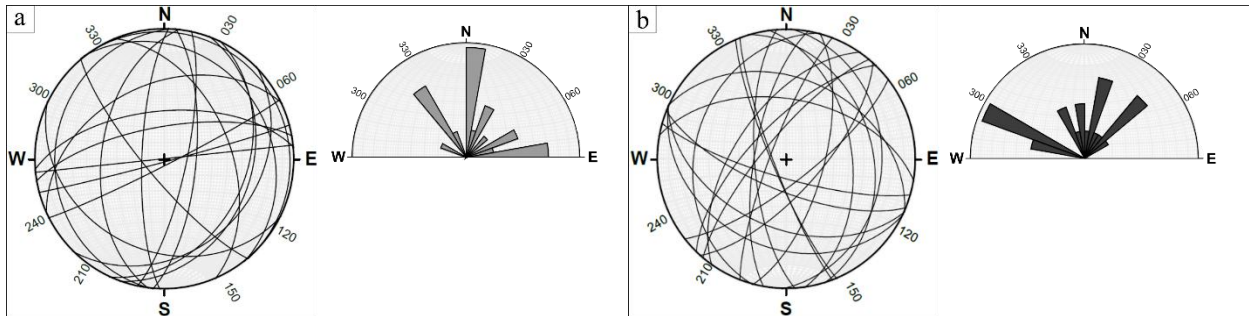
*Proyecciones estereográficas para los datos de diaclasas.*



*Nota:* El mapa muestra la distribución de las estaciones con datos significativos de diaclasas. El grafico “a” muestra el diagrama de rosas para el total de los datos.

**Figura 15**

*Proyecciones estereográficas y diagramas de rosas para los datos de venas, diques y planos.*



*Nota:* a) Representación de los datos de venas y diques encontrados en la zona de estudio; b) representación de los planos pulidos sin cinemática, planos con intenso fracturamiento y brechas encontradas en la zona.

#### 4.7. Estructuras de deformación dúctil

En el área de estudio se identificaron diversas estructuras de deformación dúctil en proximidades de las fallas de Río Manco, Río de Oro, Río Hato y Río Tona. En cercanías a la Falla del Río Manco, en las estaciones JD-10 y JD-14, se observa un afloramiento de neis biotítico altamente meteorizado con desarrollo de plegamientos asociados a estructuras de cabalgamiento y foliaciones  $S_{n+1}$  con tendencia hacia el SE, así como la presencia de porfiroclastos de cuarzo con geometrías tipo  $\sigma$  y  $\delta$ , algunos de ellos con sombras de presión y en ocasiones afectados por fracturamiento (Figura 16 y Figura 17).

**Figura 16**

*Indicadores cinemáticos en la estación JD-010*



*Nota:* Indicadores cinemáticos como plegamiento en la foliación ha causado por una falla inversa local (b) porfiroclasto de cuarzo con geometría  $\sigma$  (c) cercanos a la Falla del Río Manco.

**Figura 17**

*Indicadores cinemáticos dúctiles en la estación JD-014*



*Nota:* a) Plegamiento en la foliación cercano a porfiroclastos de cuarzo con geometría  $\sigma$ ; b) clastos de cuarzo estirados paralelos a la foliación; c) plegamientos en la foliación rodeando un porfiroclasto de cuarzo de tipo delta, con vergencia al NW en cercanías a la Falla del Río Manco.

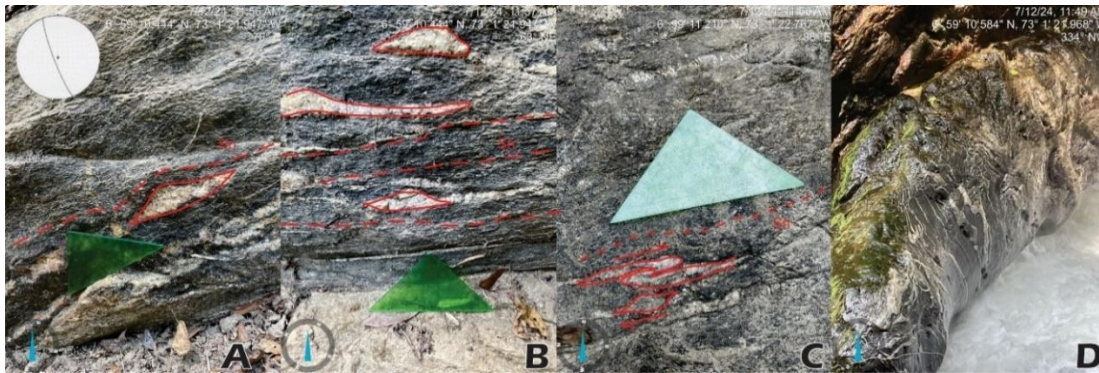
En la zona de la Falla del Río de Oro, en la estación JD-26, se reconocen cuerpos lenticulares de cuarzo dispuestos subparalelos a la foliación, así como venas de cuarzo plegadas

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

asociadas a porfiroclastos tipo  $\sigma$ ; adicionalmente, se identifican migmatitas tipo metatexita con estructura estomática plegada y mayor proporción de melanosoma respecto al leucosoma (Figura 18). En el entorno de la Falla del Río Hato, en las estaciones JD-28, JD-29 y JD-40, se evidencian plegamientos de la foliación  $S_n$ , con eje de pliegue de 270/12 y foliación asociada de 262/86, así como venas de cuarzo plegadas paralelas a esta y la deformación conjunta de cuerpos de anfibolita concordantes con la foliación (Figura 19).

### Figura 18

Indicadores cinemáticos en la estación JD-026



*Nota:* a y b) Cuerpos lenticulares de cuarzo subparalelos a la foliación; c) Vena de cuarzo plegada y un porfiroclasto de cuarzo de tipo sigma; d) metatexita con estructura estomática plegada, en la cascada las golondrinas cerca a la Falla del Río de Oro.

### Figura 19

Indicadores cinemáticos dúctiles sobre la falla del Río Hato



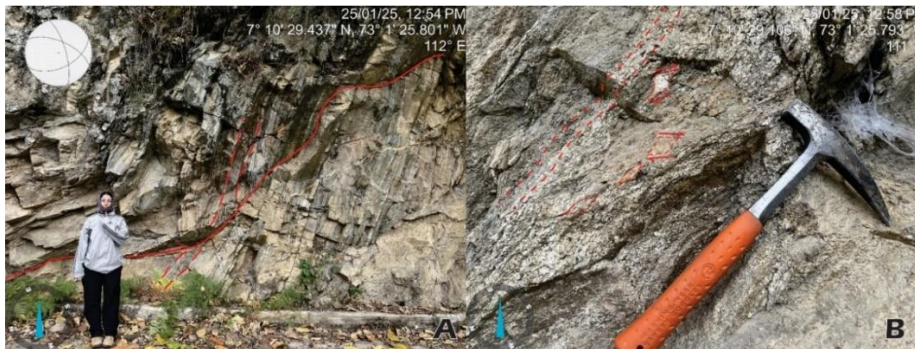
## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

*Nota:* a) Plegamiento de la foliación y proyección estereográfica de la foliación y plano axial del pliegue en la estación JD-028; b) Plegamiento de la foliación con una vergencia al SW en la estación JD-029; c) Cuerpo de anfibolita y plegamiento de la foliación con vergencia al SW en la estación JD-040.

Finalmente, en la Falla del Río Tona, en la estación JD-60, se observan estructuras de cabalgamiento que afectan la foliación Sn, junto con porfiroclastos con geometría tipo  $\sigma$  dispuestos de manera paralela a la foliación (Figura 20). En conjunto, estas estructuras constituyen evidencia de la deformación dúctil desarrollada en zonas de cizalla en el suroeste del Macizo de Santander.

### Figura 20

*Indicadores cinemáticos dúctiles para la estación JD-060*



*Nota:* a) Afloramiento con indicadores cinemáticos en una milonita; b) porfiroclastos de cuarzo con una geometría de tipo sigma cercanos a la falla del Río Tona

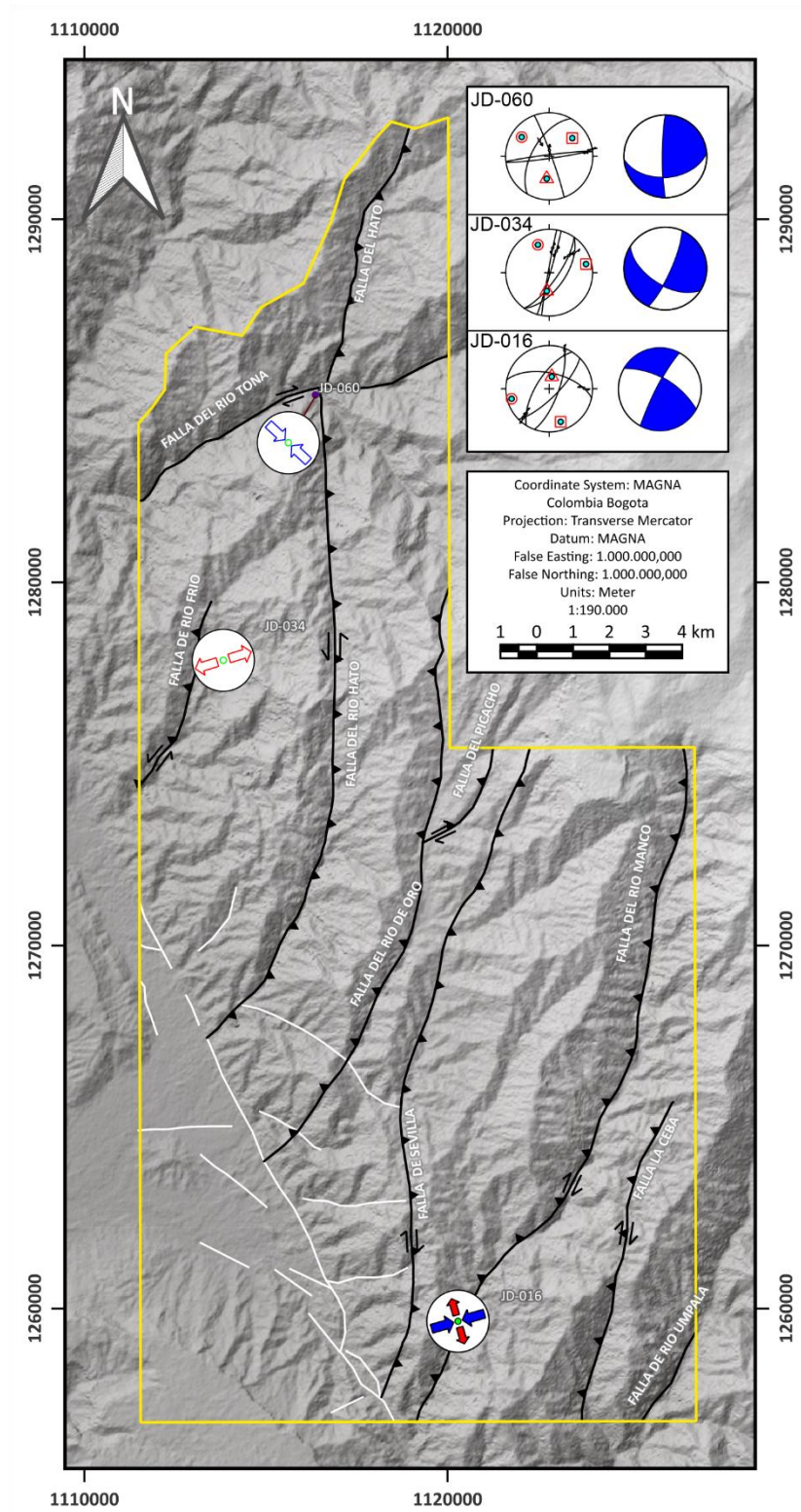
### 4.8. Tensores

El análisis de planos estriados permitió identificar tres tensores de deformación asociados a las fallas de Río Manco, Río Frío y Río Tona, denominados T1, T2 y T3, respectivamente (Figura 21). Solo en las tres estaciones asociadas a estos tensores se pudieron obtener 4 o más planos estriados necesarios para que el tensor resultante sea óptimo, por tanto, los resultados de tensores locales son escasos. El tensor T1 y T3 fueron analizados con el método de Diedros Rectos Mejorado (I.R.Dihedr) debido a sus pocos datos, por otro lado, para el tensor T2 fue posible

# ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

**Figura 21**

*Distribución de los tensores obtenidos*



## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

*Nota:* Representación y distribución de los tensores obtenidos. Las flechas en los círculos indican la dirección de los esfuerzos principales ( $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ ), las flechas sombreadas indican mayor confiabilidad del tensor. Los tensores de esfuerzo también se representan mediante diagramas tipo “balón de playa” (parte superior derecha), donde los cuadrantes en color azul indican compresión y los blancos extensión mientras que los diagramas estereográficos corresponden a la proyección de planos de falla y sus respectivas lineaciones.

realizar el análisis desde el método de Optimización Rotacional (R. Optim), a pesar de contar con mayor volumen de datos, estos conservan tendencias de rumbo similares; por tanto, este último tensor resulta menos óptimo en comparación con el T1 y T2 que tienen más de dos orientaciones.

El tensor T1, localizado en la estación JD-016, indica un régimen transpresivo con un eje máximo de compresión orientado SWW–NEE y un eje máximo de esfuerzo ( $\sigma_1$ ) orientado 11/251, lo que respalda la cinemática dextral descrita para la Falla del Río Manco, estructura que conserva una dirección SW-NE. Este tensor muestra ejes de compresión y extensión con menos desviación o incertidumbre en su dirección, mientras que en los dos tensores restantes la dirección de estos ejes se muestra con mayor incertidumbre, esta desviación se representa con ejes sin relleno de color.

El tensor T2 cercano al trazo de la Falla Río Frío, obtenido en la estación JD-034, corresponde a un régimen transcurrente, con extensión en dirección SWW–NEE y un eje máximo de esfuerzo ( $\sigma_1$ ) orientado 31/338, configuración similar a la observada en el tensor T3. El tensor T3, ubicado en la estación JD-060 en las cercanías de la Falla de Río Tona, evidencia un régimen transpresivo con dirección de compresión NW–SE y un eje máximo de esfuerzo ( $\sigma_1$ ) orientado 24/305, lo que apoya la cinemática dextral de la Falla del Río Tona.

### 4.9. Movimientos En Masa

El análisis de los procesos morfodinámicos se centró en la evaluación de los movimientos en masa en relación con fallas y lineamientos para identificar el grado de control estructural en la ocurrencia de estos fenómenos. Para este estudio se consideraron 34 movimientos en masa identificados en trabajo de campo y del SIMMA - Sistema de Información de Movimientos en Masa del SGC. A partir de los mapas de distancia a fallas y lineamientos, se evaluó la proximidad de los eventos a estas estructuras con el fin de establecer patrones de concentración que aporten a la comprensión del comportamiento geomorfológico de la zona.

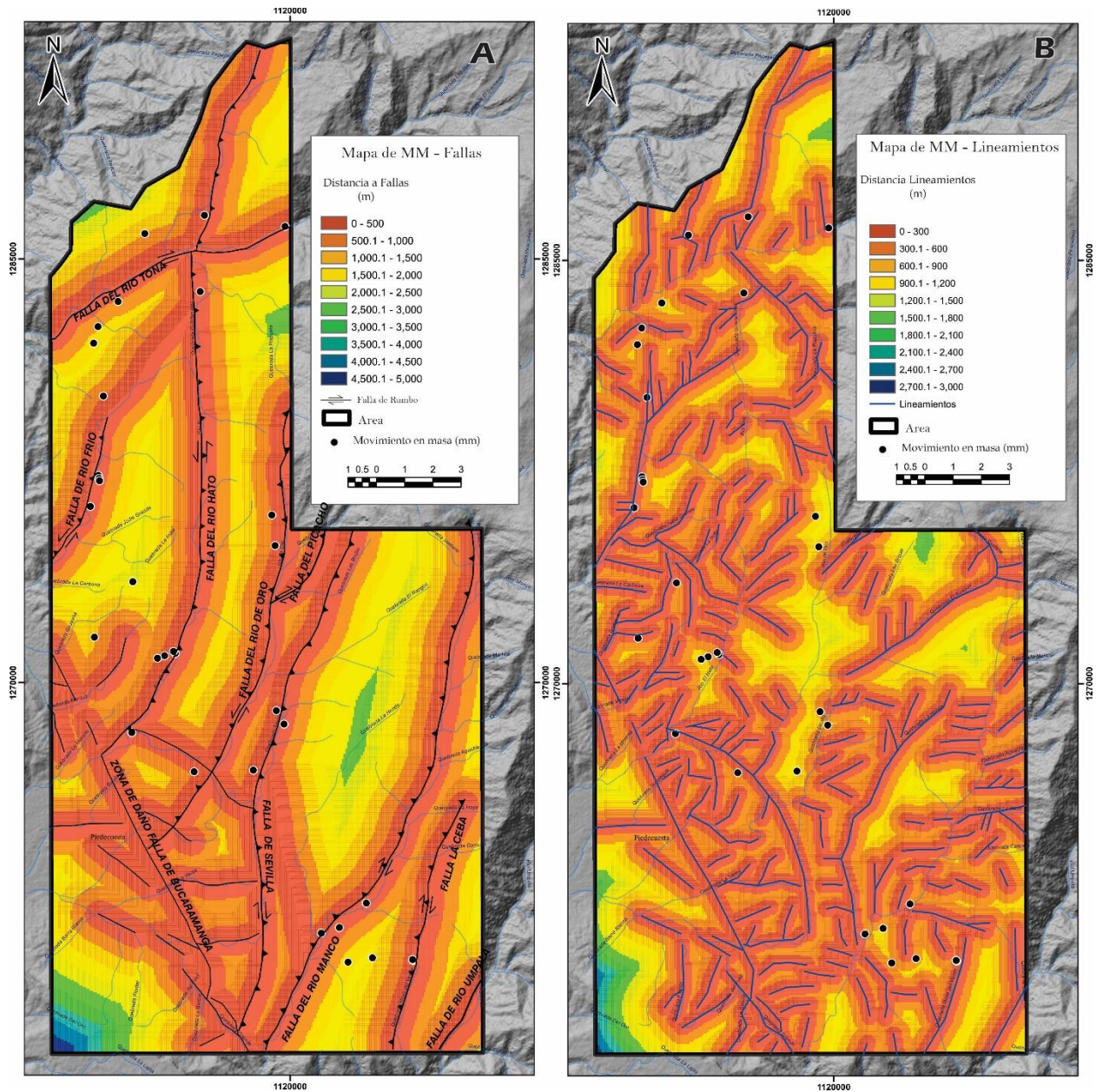
En el caso de las fallas (Figura 22 A), los resultados muestran que 25 de los 34 movimientos en masa (73 %) se localizan a menos de 500 m de distancia, lo que evidencia una marcada influencia de estas estructuras en la ocurrencia de inestabilidades. Adicionalmente, 3 eventos (9 %) se encuentran entre 500 y 1,000 m, 6 eventos (18 %) entre 1,000 y 2,000 m (Tabla 2). Más allá de esta distancia no se registraron movimientos en masa, lo cual resalta la relación directa entre cercanía a fallas y ocurrencia de los procesos.

En contraste, el análisis respecto a los lineamientos (Figura 22 b) muestra que 4 movimientos (12%) se ubican a menos de 100 m, 10 (29%) entre 100 y 200 m, 5 (15%) entre 200 y 300 m, 4 (12%) entre 300 y 500 m y 11 (32%) entre 500 y 1000 m. No hay eventos a más de 1000 m de los lineamientos (Tabla 3).

# ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

**Figura 22**

*Distribución espacial de los movimientos en masa en relación con la distancia a fallas y lineamientos*



*Nota:* La figura a muestra la relación de los movimientos en masa con las fallas. La b la relación con los lineamientos identificados en la zona

**Tabla 2**

*Proximidad de movimientos en masa a las fallas en rangos cada 100 m*

<b>RANGOS CADA 100 m - FALLAS</b>	<b>FRECUENCIA n</b>
0-100	5
100-200	9
200-300	6
300-400	3
400-500	2
500-600	2
900-1000	1
1000-1100	2
1200-1300	2
1600-1700	1
1900-2000	1
Total mm	34

*Nota:* La tabla muestra el número de movimientos en masa por rangos de 100 m

Con base en los datos, se observa que los movimientos en masa presentan una clara concentración en los rangos más cercanos tanto a fallas como a lineamientos. En el caso de las fallas, el mayor número de eventos se ubica entre 0–200 m (14 de 34 eventos, ~41%), con una disminución progresiva a medida que aumenta la distancia, aunque con pequeñas recurrencias intermedias (500–700 m). De forma similar, para los lineamientos, también se concentra la mayor frecuencia en los primeros 200 m (14 de 34 eventos, ~41%), seguida de una reducción más marcada y dispersión hacia distancias mayores, con algunos eventos aislados hasta 2000 m.

**Tabla 3**

*Proximidad movimientos en masa en rangos cada 100 m vs Lineamientos*

<b>RANGOS CADA 100 m - LINEAMIENTOS</b>	<b>FRECUENCIA n</b>
0-100	4
100-200	10
200-300	5
300-400	2
400-500	2
500-600	5
600-700	3
700-800	1
800-900	2
<b>Total mm</b>	<b>34</b>

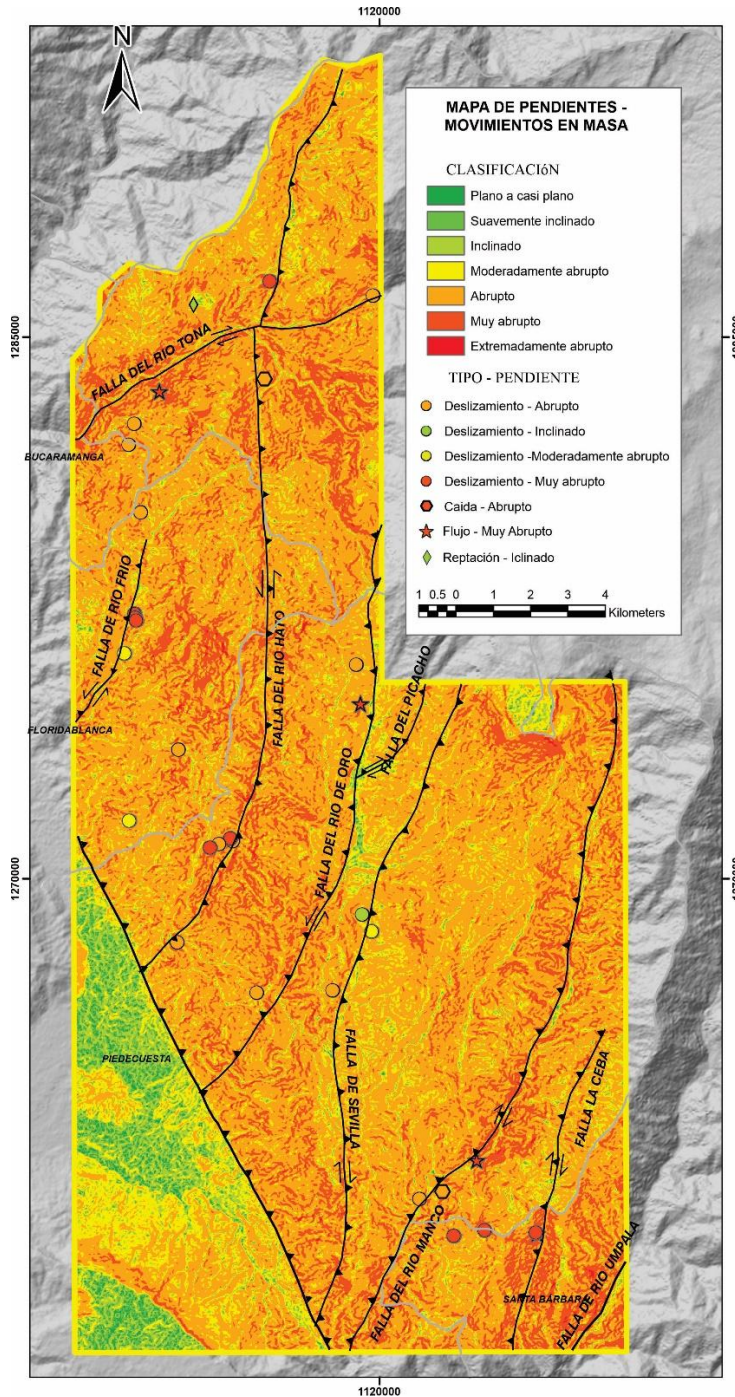
*Nota:* La tabla muestra el número de movimientos en masa por rango de cada 100 m vs la proximidad a los lineamientos.

El análisis de la distribución de los movimientos en masa con respecto a la pendiente del terreno (Figura 23) evidencia una tendencia al aumento de los eventos conforme se incrementa el ángulo de inclinación. Las zonas clasificadas como abruptas (16–35°) y muy abruptas (35–55°) concentran el mayor número de movimientos en masa, con 15 y 14 registros respectivamente (Tabla 4). Esto sugiere que la ocurrencia de movimientos en masa se asocia principalmente con pendientes superiores a 16°, donde son más comunes procesos de erosión y deslizamientos, según la Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa (SGC, 2017).

Por el contrario, las áreas con pendientes menores a 8°, clasificadas como planas, suavemente inclinadas o moderadamente inclinadas, presentan baja frecuencia o ausencia de movimientos en masa, correspondiendo a zonas de relieve suave y condiciones relativamente estables. Sin embargo, en la mayoría de los casos, las laderas adyacentes a los cauces donde se localizan las fallas presentan mayores pendientes, concentrando la ocurrencia de estos eventos.








Figura 23

Mapa de pendientes en relación con movimientos en masa



Nota: Mapa de pendientes reclasificado según la Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa (SGC, 2017)

**Tabla 4***Relación entre la inclinación del terreno y los movimientos en masa*

Inclinación (°)	Nombre de la clase	N° de movimientos en masa	Color
0 – 2	Plano o casi plano	0	
2 – 4	Suavemente inclinado	0	
4 – 8	Inclinado	2	
8 – 16	Moderadamente abrupto	3	
16 – 35	Abrupto	15	
35 – 55	Muy abrupto	14	
> 55	Extremadamente abrupto	0	

*Nota:* La tabla muestra el número de movimientos en masa por rango de pendiente, según la Guía Metodológica del SGC (2017) y el color asignado en el mapa de pendientes (Figura 23)

## 5. Discusión

### 5.1. Cinemática de las Estructuras y Estilo Estructural

El análisis estructural evidencia un contraste entre el sector Este y Oeste del área de estudio. Al Este, las fallas del Río Umpalá, La Ceba, Río Manco y Sevilla presentan orientaciones similares entre SW–NE, con un predominio de cinemática dextral y componentes inversos, coherentes con la acomodación de un régimen transpresivo asociado a la Falla de Bucaramanga. En contraste, hacia el Oeste las fallas del Río de Oro, Río Hato y Río Frío muestran orientaciones más variables, entre SSW–NNE y S–N, pero dominadas por una cinemática sinistral acompañada de componentes inversos más marcados (Figura 8A). De manera transversal la falla de Tona presenta una dirección W-E y una cinemática de rumbo dextral. En la zona se evidencia una tendencia de la vergencia al E, con excepción de las fallas de Sevilla y del Río Hato que presentan vergencia opuesta hacia el W. Las estructuras presentan cambios a lo largo de su traza, reflejando una leve concavidad. Esta geometría y heterogeneidad de cinemáticas podría estar relacionado con la

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

convergencia entre el núcleo del Macizo de Santander y la Cuña de Pamplona descrita por Amaya et al., (2025). Estos autores describen fallas oblicuas curvadas desarrolladas dentro de un marco regional de tectónica de indentación, asociadas con un efecto de contrafuerte (*buttressing effect*) y que resultan similares a la Falla de Sevilla, Río de Oro y Río del Hato.

Se identifica una estructura principal que se interpreta como una flor positiva (Figura 12), desarrollada a partir del plano principal de la Falla de Bucaramanga, que controla la deformación a escala regional. Bejarano & Navas, (2018) plantean que fallas como la Falla de Sevilla y El Picacho hacen parte de estructuras similares. Diederix et al., (2020) definen una flor positiva en Ocaña y Velandia et al., (2020) mencionan otra flor positiva, pero a escala regional. La presencia de estructuras similares a la observada en este estudio a lo largo de zonas cercanas refuerza la interpretación aquí propuesta.

En este contexto, el régimen transpresivo asociado a la Falla de Bucaramanga favorece la generación de fallas inversas y oblicuas como la Falla la Ceba, Río Manco, Sevilla, Río de Oro, Río del Hato, Picacho, Río Frío, las cuales presentan alto ángulo, posiblemente asociado a la inversión de estructuras extensionales (Velandia, 2017; Velandia & Bermúdez, 2018; Velandia et al., 2020; Jiménez et al., 2022; Villamizar-Escalante et al., 2024) que se ramifican hacia la superficie desde el plano principal, generando el levantamiento de los bloques (Figura 12). Estas fallas secundarias acomodan esta deformación y posiblemente favorecieron la intrusión de las unidades ígneas dentro de las rocas más antiguas.

Se observa una sectorización de las estructuras en función de las litologías aflorantes. Las fallas de La Ceba, Río Manco y Umpalá se desarrollan principalmente sobre la cuarzomonzonita de Santa Bárbara, mientras que las estructuras ubicadas hacia el Oeste del área afectan la

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

cuarzomonzonita de La Corcova y otras unidades adyacentes (Figura 7). Además, se evidencia una relación espacial entre las estructuras y los cuerpos intrusivos, observándose una tendencia en su distribución, ya que estos se disponen de manera continua a lo largo de las fallas. Esta disposición podría sugerir una relación tanto espacial como temporal, por tanto, según lo observado en los cortes (Figura 12), el sistema de fallas habría favorecido el proceso de intrusión de las Cuarzomonzonitas de la Corcova y Santa Bárbara.

Entre la Falla del Río de Oro y la Falla de Sevilla, en los cortes A-A' Y B-B' (Figura 12), se observa un bloque triangular formado por las vergencias opuestas en las fallas, posiblemente relacionado con la exhumación del basamento del macizo mencionado en varios estudios (Urueña Suárez, 2014; Villamizar-Escalante, 2017; Velandia & Bermúdez, 2018; Amaya et al., 2020; Villamizar-Escalante et al., 2024; Amaya et al., 2025).

### **5.2. Análisis Morfoestructural**

Esta propuesta surge de la integración entre la interpretación fotogeológica, la geomorfología observada en campo y el trabajo de Velandia & Bermúdez (2018) para la zona de daño de la Falla de Bucaramanga. Con este propósito, se propone un mapa de morfoestructuras como apoyo para la definición de la cinemática de las estructuras presentes en el área de estudio. El análisis morfoestructural realizado muestra cambios notables en la expresión geomorfológica a lo largo del área: mientras que en el sector NW se identifica una alta densidad de morfoestructuras, en el sector SE estas manifestaciones son mucho más limitadas o poco definidas (Figura 9). Este déficit, también reflejado en Villamizar-Escalante (2017) para la falla del Río Manco, podría estar relacionado con la litología predominante en esta zona, correspondiente a la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara (Figura 7).

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

Las estructuras predominantes en el área estudiada corresponden a ganchos de flexión y valles lineales. Los ganchos de flexión se desarrollan principalmente sobre el Neis de Bucaramanga, mostrando la relación entre litología y expresión morfoestructural, por tanto, este cuerpo metamórfico favorece la creación y conservación de morfoestructuras. Por otro lado, los valles lineales se disponen sobre casi todas las estructuras, mostrando como la dinámica estructural favorece procesos de erosión específicos que moldean el terreno de acuerdo con los trazos de las fallas (Figura 9).

Se identifican pocos lomos de presión, lo cual se relaciona con la limitada presencia de saltos laterales en las fallas. Sumado a ello, se evidencia la reorientación y modificación de cauces y divisorias topográficas que se disponen de manera deflectada, reconfiguración asociada a la dinámica de rumbo dominante en las fallas que atraviesan la zona. Por último, las morfoestructuras menos encontradas como lomos de obturación, silletas y hombreras de falla y cuencas, si bien no son demasiado notorias, sirvieron como guía para la definición más exacta de las estructuras (Figura 9).

Las morfoestructuras identificadas en el área de estudio son comparables con las descritas en zonas cercanas. En la Falla de Surata, Laguado, (2023) reporta la presencia de ganchos de falla, silletas y facetas triangulares. De manera similar, García y Villamizar, (2021) documentan morfoestructuras como ganchos de falla, lomos de obturación, lomos de presión y silletas de falla sobre la Falla de Bucaramanga cerca a Cepita, en secciones del Neis de Bucaramanga y el Batolito de Mogotes, siendo escasas en la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara. Estas observaciones son consistentes con lo analizado en este trabajo.

### 5.3. Tensores

El análisis conjunto de las cinemáticas de las fallas, los tensores de deformación obtenidos y la integración con una dinámica regional permite comprender de manera más precisa los esfuerzos que actúan localmente y la relación con el estilo estructural presente. En este caso los resultados locales indican que las fallas de Río Manco y Río Tona presentan regímenes de esfuerzo transpresivos y orientaciones de esfuerzo que apoyan su cinemática dextral. Aunque la orientación de compresión varía entre el tensor T1 y T3 (Figura 21), las diferencias también se reflejan en la orientación de las fallas, siendo consistentes con la elipse de deformación local de cada estructura. En contraste la falla de Río Frío muestra un régimen transcurrente sobre una cinemática sinistral sobre el trazo más S-N, una orientación concordante con la falla del Río Hato y Río de oro, estructuras con igual cinemática de rumbo. Este comportamiento coincide con lo esperado en un contexto transpresivo, en el cual la Falla de Bucaramanga actúa como la estructura principal y las demás fallas estudiadas se consideran secundarias donde la cinemática de rumbo varía en función del azimut de cada estructura, aunque a excepción de la falla del Río Tona, todas conservan una componente inversa en buzamiento.

La integración de los tensores con las cinemáticas evidencia una variación en el esfuerzo máximo de compresión con una dirección 255/11 en el T1 (al sur) y 305/24 y 358/31 en el T2 y T3 (al norte de la zona) respectivamente (Figura 21). Esta variación concuerda con la heterogeneidad del campo de esfuerzos asociado a la interacción del Macizo de Santander con la Cuña de Pamplona expuesta por Velandia, (2017) y estudiado posteriormente en diversos estudios (Amaya et al., 2020; Velandia et al., 2020; Villamizar-Escalante et al., 2024; Amaya et al., 2025). En este contexto, los tensores que muestran ejes de compresión orientados heterogéneamente en

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

direcciones NW–SE y NE–SW pueden interpretarse como respuesta a la absorción diferencial de esfuerzos oblicuos generados por la cuña, concordando especialmente con el modelo de Villamizar-Escalante et al., (2024). Dicho modelo ubica una trayectoria E-W del SHmax en dirección del área urbana de Bucaramanga, siendo este el límite de la variación radial de la dirección de los esfuerzos. Hacia el sur, la trayectoria se dispone hacia el SW, mientras que hacia el norte se dispone hacia el NW. Esta absorción de esfuerzos de manera radial genera estructuras dextrales SW-NE en el sector sur, como lo son las fallas de Sevilla, Río Manco y La Ceba, así como estructuras igualmente dextrales con dirección E-W en el sector norte, representada por la Falla del Río Tona (Figura 8A).

Los resultados obtenidos se asocian al régimen transpresivo descrito para el Macizo de Santander y la Falla de Bucaramanga (Velandia, 2017; Velandia & Bermúdez, 2018; Amaya et al., 2020; Velandia et al., 2020; Jiménez, 2022; Villamizar-Escalante et al., 2024; Amaya et al., 2025) Partiendo de ello, las variaciones entre cinemáticas dextrales y sinestrales de las fallas estudiadas reflejan ajustes internos del campo de esfuerzos generado por el desplazamiento lateral de la falla de Bucaramanga y el efecto de contrafuerte (*buttressing effect*) (Velandia et al., 2020; Villamizar-Escalante et al., 2024; Amaya et al., 2025). Así se genera un sistema heterogéneo en donde coexisten fallas con cinemáticas de rumbo opuestas. Así mismo, la variación en los ejes máximos de esfuerzo dispuesto para los tensores es coherente con la absorción de los esfuerzos creados por la Cuña de Pamplona. Dichos esfuerzos varían en dirección de su SHmax, orientándose al SW en la zona sur y cambiando hacia el NW cuando se migra al norte (Figura 21), justo como lo demuestran los tensores obtenidos, siendo así, la Cuña de Pamplona en su avance hacia el Macizo de Santander reconfigura los esfuerzos locales como mecanismo de absorción de la compresión recibida.

### 5.4. Relación Estructural Y Movimientos En Masa

El análisis de la correlación espacial entre los 34 movimientos en masa y las estructuras tectónicas reveló que una gran mayoría de los eventos de inestabilidad se concentran en las proximidades de las fallas y lineamientos. Específicamente, al evaluar la distancia a las fallas, se encontró que 24 de los movimientos se ubican en la banda de 0 a 500 m. Esta fuerte correlación espacial se explica por la naturaleza de las fallas, que actúan como zonas de debilidad inherente debido al intenso fracturamiento de las rocas. Dicho fracturamiento incrementa la permeabilidad, lo que facilita la infiltración de agua y la consiguiente elevación de la presión de poros, un factor clave en la reducción de la resistencia al corte del macizo rocoso. Estos mecanismos de inestabilidad, a escala local, se ven potenciados por el régimen tectónico transpresional del Macizo de Santander, que mantiene a la región en un estado de deformación continua. La actividad de estructuras regionales, como la falla de Bucaramanga, consideradas activas y con potencial sismogénico, refuerza la hipótesis de que los detonantes sísmicos pueden contribuir a la ocurrencia de estos fenómenos, lo que subraya la importancia del control estructural en la evaluación de riesgos geológicos.

## 6. Conclusiones

Se realizó la unificación de los fragmentos de las planchas H12 y H13 (Ward, 1977) incluidos en la zona de estudio, mediante un control cartográfico a escala 1:25000. Este proceso permitió verificar en campo la presencia y distribución de dichas unidades, así como reconocer el control estructural ejercido por las fallas sobre los cuerpos de roca aflorantes en el área.

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

El análisis morfoestructural permitió identificar once tipos de geoformas asociadas al trazo de las fallas principales, destacando los ganchos de flexión, espolones y las facetas triangulares, concentradas a lo largo de la mayoría de las estructuras, salvo en las fallas La Ceba y Río Umpalá, donde la litología más masiva de la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara limita su expresión morfoestructural. Los resultados evidencian la relación entre litología y deformación, reflejada en la concentración de ganchos de flexión sobre el Neis de Bucaramanga y en la disposición de valles lineales que siguen los trazos. En conjunto, estas características confirman que la morfología regional está controlada por una dinámica transpresional.

El análisis de tensores, junto con el análisis estructural confirmó un régimen transpresivo heterogéneo en la zona de estudio, caracterizado por la coexistencia de cinemáticas dextrales y sinestrales con componente inverso en fallas secundarias asociadas a la Falla de Bucaramanga. Se define un modelo de flor positiva con pop ups y zona triangular en medio de las fallas Río de Oro y Sevilla asociado a la exhumación de las rocas de basamento. Los resultados de los tensores muestran una variación en la orientación del esfuerzo máximo de compresión desde direcciones SW en el sector sur hacia direcciones NW en el sector norte, lo que refleja la variabilidad espacial del campo de esfuerzos. Esta distribución es consistente con la influencia regional ejercida por la Cuña de Pamplona, que redistribuye los esfuerzos oblicuos sobre el Macizo de Santander. Los tensores obtenidos reflejan la acomodación de esfuerzos locales como respuesta a la absorción de esfuerzos generados por la dinámica regional.

El análisis espacial de la correlación entre las estructuras y los movimientos en masa reveló que existe una marcada influencia de las fallas y lineamientos en la ocurrencia de estos fenómenos. La mayoría de los movimientos en masa se concentran a menos de 500 m de distancia de las fallas

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

y en un rango de 0 a 300 m en contraste con los lineamientos. Esta estrecha relación se debe a que las fallas y lineamientos asociados son zonas de debilidad inherente en el macizo rocoso, donde el intenso fracturamiento facilita la infiltración de agua y la reducción de la resistencia. La deformación continua de la región, producto del régimen tectónico transpresional del Macizo de Santander, potencia estos mecanismos de inestabilidad.

**Referencias bibliográficas**

- Acosta, J., Velandia, F., Osorio, J., Lonergan, L. y Mora, H. (2007). Strike–slip deformation within the Colombian Andes. In: Ries, A.C., Butler, R.W.H. & Graham, R.H. (editors), *Deformation of the continental crust: The legacy of Mike Coward*. Geological Society of London, *Special Publication 272*, London.  
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2007.272.01.16>
- Alarcón, C., Clavijo-Torres, J., Mantilla-Figueroa, L. y Rodríguez., J. (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). *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 44(173):1137-1151.
- Amaya Ferreira, S. (2016). *Termocronología y geocronología del basamento metamórfico del Macizo de Santander*, Departamento de Santander (Tesis de maestría/doctorado). Universidad Nacional de Colombia. Repositorio Institucional.
- Amaya, S., Zuluaga, C. y Bernet, M. (2017). New fissiontrackage constraints on the exhumation of the central SM: implications for the tectonic evolution of the Northern Andes, Colombia. *Lithos*, 282, 388–402, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.03.019>
- Amaya–Ferreira, S., Zuluaga, C. A. y Bernet, M. (2020). Different levels of exhumation across the Bucaramanga Fault in the Cepitá area of the southwestern Santander Massif, Colombia: Implications for the tectonic evolution of the northern Andes in northwestern South America. In: Gómez, J. & Mateus–Zabala, D. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 3 Paleogene – Neogene*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

Geológicas Especiales 37, p. 491–507.

Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.16>

Amaya, S., Velandia, F., Bernet, M., Zuluaga, C. A., Villamizar-Escalante, N. y López-Isaza, J.

A. (2025). Deformation towards the central part of the Santander Massif: New insights into the tectonic evolution of the Eastern Cordillera, Colombia. Geological Society of London. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.8172387>

Bejarano, D. y Navas, A. (2018). *Análisis estructural de los patrones de fracturamiento y su relación con el flujo de aguas subterráneas en inmediaciones del municipio de Tona, Macizo de Santander* (Trabajo de grado). Universidad Industrial de Santander.

Blenkinsop, T. G. (2002). Deformation microstructures and mechanisms in minerals and rocks. *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht, 150 p.

Case, J., Shagam, R. y Giegengack, R. (1990). Geology of the northern Andes; An overview. Geological Society of America, *The Geology of North America*, (H): 1-24.

Castiblanco, E. A. R., Ramírez, J. H. S., Cordón, J. L. C., González, G. A. T., Bello, E. M., Hernández, K. C. R., ... y Peña, G. L. R. (2021). Guía metodológica para zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000.

Cediel, F. (1968). El Grupo Girón, una molasa mesozoica de la Cordillera Oriental. Servicio Geológico Nacional. *Boletín Geológico*, 16 (1-3): 5-96. Bogotá.

Chaminé, H. I., Afonso, M. J., Ramos, L. y Pinheiro, R. (2014). Scanline Sampling Techniques for Rock Engineering Surveys: Insights from Intrinsic Geologic Variability and

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

Uncertainty. *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 6*, 357–361.

doi:10.1007/978-3-319-09060-3\_61

Cordani, U.G.; Cardona, A.; Jimenez, D. y Nutman, A. P. (2005): Geochronology of Proterozoic basement inliers from the Colombian Andes: tectonic history of remnants from a

fragmented Grenville belt. En: Cardona, A.; Chew, D.; Valencia, V.; Bayona, G.;

Miscovic, A. & Ibañez-Mejía, M. (2010): Grenvillian remnants in the Northern Andes:

Rodinia and Phanerozoic paleogeographics perspectives. *Journal of South American Earth Sciences*, 29: 92-104.

Cortés, M., Angelier, J. y Colletta, B. (2005). Paleostress evolution of the northern Andes

(Eastern Cordillera of Colombia): Implications on plate kinematics of the South

Caribbean region. *Tectonics*, 24(27), TC1008, doi: 10.1029/2003TC001551.

Delvaux, D. y Sperner, B. (2003). Stress tensor inversion from fault kinematic indicators and

focal mechanism data: the TENSOR program. In: *New Insights into Structural*

*Interpretation and Modelling* (D. Nieuwland Ed.). Geological Society, London, Special Publications, 212: 75-100.

Diederix, H., Torres, E., Hernández, C. y Botero, P. (2008). Modelo de evolución morfotectónica

cuaternaria basado en evidencias estructurales, neotectónicas y paleosimológicas de los

principales sistemas de falla en la región de Bucaramanga (Inédito). Servicio Geológico Colombiano (INGEOMINAS).

Diederix, H., Bohórquez, O. P., Mora-Páez, H., Peláez, J. R., Cardona, L., Corchuelo, Y., ... y

Díaz-Mila, F. (2020). Quaternary activity of the Bucaramanga Fault in the Departments

of Santander and Cesar. *The Geology of Colombia*, 4, 453-477.

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

Etayo, F. y Rodríguez, G. (1985). Edad de la Formación Los Santos. Proyecto Cretácico.

Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas, (16) Capítulo 26: 1-12. Bogotá.

Etayo-Serna, F. y Guzmán-Ospitia, G. (2019). Formación Rosa Blanca: subdivisión de la Formación y propuesta de Neoestratotipo. Sección laguna El Sapo, vereda El Carrizal, municipio de Zapatoca, departamento de Santander. Estudios geológicos y paleontológicos sobre el Cretácico en la región del embalse del río Sogamoso, Valle Medio del Magdalena, 1-54.

Fossen, H. (2010). *Structural Geology*. Cambridge University Press.

Fossen, H. (2016). *Structural Geology* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press.

Jiménez, G., García-Delgado, H. y Geissman, J. W. (2021). Magnetostratigraphy and magnetic properties of the Jurassic to Lower Cretaceous Girón Group (northern Andes, Colombia). *Geosphere*, 17(6), 2172–2196. <https://doi.org/10.1130/GES02186.1>

Jiménez, G., Geissman, J.W. y Bayona, G. (2022). Unraveling tectonic inversion and wrench deformation in the Eastern Cordillera (Northern Andes) with paleomagnetic and AMS data. *Tectonophysics* 834, 229356. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229>

García-Delgado, H., Machuca, S., Velandia, F. y Audemard, F. (2020). Along-strike variations in recent tectonic activity in the Santander Massif: New insights on landscape evolution in the Northern Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 98, 102472.

García Santos, J. y Villamizar Blanco, J. E. (2021). *Deformación y cinemática de la falla de Bucaramanga al sureste de Cepitá, Santander: un estudio mesoestructural y de tensores*

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

*de esfuerzo*. (Trabajo de grado) Universidad Industrial de Santander.

<https://noesis.uis.edu.co/items/449c435e-6220-4ee8-9bba-51a11ff7d653>

Goldsmith, R., Marvin, R. y Mehnert, H. 1971. Radiometric ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. U.S. *Geological Survey Professional Paper (750)*: 44-49. Washington.

Hettner, A. (1892). Die Kordillere von Bogotá, Gotha, Patermans Mitteil; 22, 131 p. Ergänzungsheft.

Hincapié, G. y Veloza, J. (2009). Informe hidrogeológico del Macizo de Santander. Instituto Colombiano de Geología y Minería Ingeominas.

Horton, B. K., Parra, M. y Mora, A. (2020). Construction of the Eastern Cordillera of Colombia: Insights from the sedimentary record. In: Gómez, J. & Mateus-Zabala, D. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 3 Paleogene – Neogene*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 37, p. 67–88. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.03>

Jaramillo Minorta, D. F., Barba Gonzales, K. J., Rojas Martínez, E. E., García González, J., Manco Jaraba, D. C. y Lascarro Navarro, F. D. (2023). Modelo sedimentario-deposicional de la Formación Girón en la sección del km 42 vía Girón-Zapatoca, Santander, Colombia. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 23(2). <https://doi.org/10.19053/1900771X.v23.n2.2023.16147>

Kammer, A., Piraquive, A., Gómez, C., Mora, A. y Velásquez, A. (2020). Structural styles of the Eastern Cordillera of Colombia. In: Gómez, J. & Mateus-Zabala, D. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 3 Paleogene – Neogene*. Servicio Geológico Colombiano,

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

Publicaciones Geológicas Especiales 37, p. 143–183. Bogotá.

<https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.06>

Keller, E., & Pinter, N. 1999. Active tectonics: Earthquakes, uplift and landscape. First edition.

Prentice Hall. New Jersey, 338p.

Laguado Acosta, E. (2023). *Análisis del estilo estructural de la Falla de Suratá, Macizo de Santander*. (Trabajo de grado) Universidad Industrial de Santander.

<https://noesis.uis.edu.co/items/4076e4cb-9060-4abc-9d4a-73dec253d1d8>

Laverde, F. (1985). La Formación Los Santos: Un depósito continental anterior al ingreso marino del Cretácico. Proyecto Cretácico. Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas, (16) Capítulo 20: 1-22. Bogotá.

Laverde-Montaña, F., Clavijo-Torres, J., Guzmán-Ospitia, G., y Torres-Zamora, A. (2024). La Formación Los Santos en la sección de Platanalito: un depósito fluvial y un depósito transgresivo en la desembocadura de un estuario, Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de Geología*, 46(3), 39–68.

Laverde Montaña, F. (2023). Revisiting the latest Jurassic–earliest Cretaceous Los Santos Formation, Eastern Cordillera of Colombia. B – A transgressive river mouth deposit in a syntectonic scenario. *Boletín Geológico*, 50(1).

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(1): 33-50.

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

- Mantilla-Figueroa, L. C. y García-Ramírez, C. A. (2018). Geología y geocronología de las litologías aflorantes en el tramo Mogotes-San Joaquín (sector SW del Macizo de Santander). *Boletín de Geología*, 40(1), 123-144.
- Moreno Sánchez, M., Gómez Cruz, A. y Buitrago–Hincapié, J. (2020). Paleozoic of Colombian Andes: New paleontological data and regional stratigraphic review. In: Gómez, J. & Mateus–Zabala, D. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 35, p. 167–203. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.09>
- Navas, J. (1962). Geología del carbonífero al norte de Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. *Boletín de Geología*, (11): 23-34. Bucaramanga.
- Ordóñez, O. (2003). *Caracterização geocronológica do magmatismo Fanerozóico no Macizo de Santander, Colômbia*. (Tesis doctoral, Universidade de Brasília).
- Osorio, J., Hernández, C., Torres, E. y Botero, P. (2008). Modelo geodinámico del Macizo de Santander. Ingeominas.
- Osorio Afanador, D. y Velandia, F. (2021). Deposición sedimentaria sinextensional del Jurásico tardío e inversión de la cuenca cenozoica registrada en la Formación Girón, Andes del norte de Colombia. *Geología Andina* 48 (2): 237-266
- Passchier, C. W., & Trouw, R. A. J. (2005). A Framework of Microtectonic Studies. *Microtectonics*, 1-7.
- Petit, J. P. (1987). Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. *Journal of structural Geology*, 9(5-6), 597-608.

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

Pinto V. J. E., Clavijo Torres, J., Gómez Isidro, S., Gutiérrez Toledo, D., Mora Ortiz, J. P., Rojas

Parra, N. R., Adarme, I. R., Aldana, S. C., Contreras, N. M., Díaz, E. J., Melo, L. F.,

Tarazona, G. R., Rincón, M. A., Vargas J., C. Y., Morales A., C. J., Velandia P., F.,

Hincapié V., G., Forero O., H., Duarte, R., ... De Bermoudes, O. (2007). Proyecto de investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa de Los Santos, sector noreste de Curití y borde occidental del Macizo de Santander, departamento de Santander.

Remy, R. (1975). Zur ontogenie der Sporangiphore von *Calamostachys spicata* var. *eimnerin*. var. und zur Aufstellung des Genus *Schimperia* n. gen. *Argu. Palaeobot.* 4, 83–92.

Restrepo-Pace, P. A. (1995). Late Precambrian to Early Mesozoic tectonic evolution of the Colombian Andes, based on new geochronological geochemical and isotopic data. PhD Thesis, University of Arizona, USA., 195p.

Restrepo-Pace, P.; Ruiz, J.; Gehrels, G. y Cosca, M. (1997): Geochronology and Nd isotopic data of the Grenville-age rocks in the Colombian Andes: new constraints for Late Proterozoic-Early Paleozoic paleocontinental reconstructions of the Americas. *Earth and Planetary Science Letters* 150: 427-441.

Rodríguez, G., Correa, A., Zapata, G. y Arango, M. (2016). Catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia Monzogranito de la Corcova Cordillera Oriental-Macizo de Santander Departamento Santander. Servicio Geológico Colombiano.

Rodríguez-García, G., Zapata, J. P., Correa-Martínez, A. M., Ramírez, D. A. y Obando, G. (2020). Contributions to the knowledge of plutonism of the Mocoa-Santa Marta Arc during the Early-Middle Jurassic, on the northwestern margin of the Andes, Colombia. *Boletín de Geología*, 42(3), 15-50.

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

Royero, J. y Clavijo, J. (2001). Mapa Geológico Generalizado Departamento de Santander. Ingeominas.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000.

Suárez, J. (2009). Nomenclatura y Clasificación de los Movimientos. J. Suárez, Deslizamientos-Análisis geotecnico.

Taboada, A., Rivera, L., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J. y Rivera, C. (2000). Geodynamics of the northern Andes: Subductions and Intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, 19(5): 787-813

Toro-Toro, L. M., Cardona-Ríos, J. J., Moreno-Sánchez, M. y Gómez-Cruz, A. D. J. (2021).

Petrografía y geoquímica de las rocas piroclásticas y efusivas de la Formación Bocas (Triásico Superior-Jurásico Inferior) y efusivas de la Formación Nogontova (Macizo de Santander, Colombia). *Boletín de Geología*, 43(1), 53-75.

Ulloa, A. y Gómez, S. (2007). Proyecto de investigación geológica e hidrogeológica en la región central del departamento de Santander, tomo I: memoria Explicativa de la Investigación Geológica e Hidrogeológica en el Macizo de Santander. Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS).

Urueña-Suárez, C. L. y Zuluaga, C. A. (2011). Petrography of the Bucaramanga Gneiss near to Cepita, Berlin and Vetas-Santander. *Geología Colombiana*, 36(1), 37-56.

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

Urueña, C. L. (2014). Metamorfismo, exhumación y termocronología del Neis de Bucaramanga. (Macizo de Santander, Colombia). Recuperado de:

<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/52825>

Van Der Pluijm, B. y Marshak, S. (2004). *Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics*. 2nd Edition, WW Norton, New York.

Vedder, J. G. y Wallace, R. E. (1968). Map showing recently active breaks along the San Andreas and related faults between Cholame Valley and Tejon Pass, California (No. 68-311). US Geological Survey.

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 de Doctorado). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 222p

Velandia, F., Bermúdez, M., Kohn, B., Bernet, M. y Zuluaga, C. (2017). Temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga con base en termocronología de baja temperatura.

Velandia, F. y Bermúdez, M. A. (2018). The transpressive southern termination of the Bucaramanga fault (Colombia): Insights from geological mapping, stress tensors, and fractal analysis. *Journal Of Structural Geology*, 115, 190-207.

<https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.07.020>

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 Norther Andes. *Journal of Structural Geology*, 137: 104087.

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL ZONA FALLA DE BUCARAMANGA

- Velandia, F., Bermúdez, M., Kohn, B., Bernet, M., Zuluaga, C. A. y Brichau, S. (2021). Patrones de exhumación cenozoica en los Andes del norte: Restricciones de la falla sur de Bucaramanga, Cordillera Oriental, Colombia. *Revista de Ciencias de la Tierra Sudamericanas*, *111*, 103473.
- Villamizar-Escalante, N. (2017). Historia de exhumación del bloque este de la falla de Bucaramanga usando termocronología de baja temperatura, Santander, Colombia. Recuperado de: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/64046>
- Villamizar-Escalante, N., Zuluaga, C. A., Bernet, M., Amaya, S., López-Isaza, J. A., García-Delgado, H. y Velandia, F. (2024). Deep-seated crustal faults and their role in the thermo-tectonic evolution of an active mountain belt: New evidence from the Northern Andes. *Journal Of Structural Geology*, *185*, 105177. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2024.105177>
- 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. (1977). Geología de la plancha 110 Pamplona, escala 1:100.000. Ingeominas.
- Zapata, G., Correa, A., García, G. y Mejía, M. (2016). Catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia. Granito de Pescadero. Cordillera Oriental departamento Santander. Servicio geológico colombiano.