

Modelo Estructural Preliminar para el Área de Bucaramanga

Diego Alejandro Galán Martínez

Kelyt Felet Mora Ortiz

Trabajo de Grado para Optar el Título de Geólogo

Director

Guillermo Vargas Pieschacón

Esp. Geotecnia Ambiental

Codirector

Giovanny Jiménez Díaz

PhD. en Ciencias

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicoquímica

Escuela de Geología

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

Para mi Padre, por tanta paciencia y sobre todo por tanto apoyo en las decisiones, retos y desafíos que he emprendido en mi vida.

A mis nonos, por su especial cariño y porque siempre han estado pendientes de mi de formación.

Muchas, muchas gracias. Los amo.

Diego

Dedicatoria

A Dios y Padre Celestial creador del universo.

A mi amada esposa y mi hija por su amor y apoyo.

A mi madre y mi hermano por su apoyo incondicional, en cada una de mis metas trazadas.

A la Morza y el Nigga por su amistad inquebrantable.

Felet

Agradecimientos

Agradecemos a nuestro director Guillermo Vargas por su incondicional apoyo en el desarrollo de este trabajo.

A nuestro codirector Giovanni Jiménez por su gran apoyo durante el desarrollo de este trabajo de grado.

A Cemex por permitirnos desarrollar estudios dentro de sus predios.

A todos nuestros profesores quienes aportaron en nuestra formación académica durante todos estos años.

Tabla de Contenido

Introducción	18
1. Objetivos	20
1.1 Objetivo General	20
1.2 Objetivos Específicos	20
2. Localización Geográfica	21
3. Metodología	22
3.1 Primera Etapa: Recopilación bibliográfica	22
3.2 Segunda Etapa: Análisis de imágenes y/o fotointerpretación	22
3.3 Tercera Etapa: Recolección de datos de campo	22
3.4 Cuarta Etapa: Interpretación de datos y/o fase de oficina	23
3.5 Quinta Etapa: Elaboración del Informe final	23
4. Geología Regional	23
5. Estratigrafía Local	25
6. Estado del Arte	30
6.1 Falla de Bucaramanga	31
6.2 Falla Suárez	34
6.3 Modelos Estructurales Propuestos	38
7. Resultados	47
7.1 Inspección de Campo	47
7.2 Análisis de Datos Estructurales	51
7.2.1 Zona Norte.	52

7.2.2 Zona Occidental	58
8. Discusiones	65
8.1 Sistemas de fallas	65
8.1.1 Fallas del sector norte.	65
8.1.2 Sistema de fallas transversales.	67
8.1.3 Sistema de fallas NNW-SSE.....	68
8.2 Modelos Estructurales.....	70
8.2.1 Cortes Geológicos.....	73
8.3 Evolución Geológica y Modelo Estructural.....	78
8.3.1 Etapa I Mioceno-Plioceno.....	78
8.3.2 Etapa II Pleistoceno.	79
8.3.3 Etapa III Pleistoceno.	80
8.3.4 Etapa IV Holoceno.....	81
9. Conclusiones	82
10. Recomendaciones.....	83
Referencias Bibliográficas	84

Lista de Tablas

Tabla 1. Estaciones de campo del área de estudio	47
--	----

Lista de Figuras

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. Imagen satelital tomada de Bing Aerial	21
Figura 2. Marco tectónico regional del sector NW de Suramérica. Tomado de y modificado de (Corredor, 2003).....	25
Figura 3. Panorámica de los miembros que conforman la formación Bucaramanga. De base a techo: Organos (Qbo), Finos (Qbf), Gravoso (Qbg) y Limos Rojos (Qblr). Margen derecha de la quebrada La Joya, vista desde el barrio Campo Hermoso. Tomado de INGEOMINAS (2001).....	30
Figura 4. Cortes atreves de la zona Bucaramanga-Ruitoque-Los santos. Tomado y modificado de (Julivert M. , 1958)	31
Figura 5. Corte entre la Cordillera Central y Oriental. Se observan las Fallas del Suarez y Bucaramanga. Tomado de (Julivert M. , 1961)	32
Figura 6. Comportamiento de la falla Rio de Oro y Suarez. Tomado de (Diederix, Hernández Moreno, Torres Jaimes, & Botero Santa, 2008)	36
Figura 7. Corte transversal se manera oblicua a las fallas principales. Tomado de (Araque Gómez & Otero Ramírez, 2016).....	36
Figura 8. Interpretación Fotogeológica del área de Bucaramanga. Tomado de (Clavijo Torres & Vargas Pieschacon, 2017)	38
Figura 9 Proceso evolutivo de la zona de mesas. Tomado de Julivert (1958).....	40
Figura 10. Escalón de falla que divide la dovola de Bucaramanga en dos bloques. Tomado y modificado de (de Porta, 1959).....	41
Figura 11. Zona occidental y oriental del bloque norte de la dovola de Bucaramanga. Tomado y modificado de (Navas G, 1962)	42

Figura 12. Bloque diagrama de la depresión tectónica de Bucaramanga. Tomado de Niño y Vargas (1992).	43
Figura 13. Evolución estructural y sedimentológico de la depresión tectónica de Bucaramanga.	44
Figura 14. Modelo de Dominos transpresivos. Tomado de Velandia (2017).	46
Figura 15. Mapa de estaciones del área de estudio	51
Figura 16. Zona norte del área de estudio.	53
Figura 17. Diagramas rosa para los datos de diaclasas en la zona norte del área de estudio (orientaciones en azimuth de rumbo).	55
Figura 18. Tensor de esfuerzos obtenido a partir de los datos de estrías encontrados en el sector del barrio Villa Helena.	56
Figura 19. Tensor de esfuerzos obtenido a partir de los datos de estrías encontrados en el sector Bavaria, sobre el escarpe la Virgen.	57
Figura 20. Tensor de esfuerzos obtenido a partir de los datos de estrías encontrados en la zona norte en general.	58
Figura 21. Zona occidental del área de estudio	60
Figura 22. Diagramas rosa para los datos de diaclasas presentes en la zona occidental del área de estudio.	61
Figura 23 . Tensor de esfuerzos obtenido a partir de los datos de estrías encontrados en la zona occidental.	62
Figura 24. Diagramas rosa obtenidas en cada sector del área de trabajo	63
Figura 25. Tensores de esfuerzos obtenidos en el área de trabajo.	64
Figura 26. Afloramiento de Fm. Girón puesto en contacto con depósitos del miembro Órganos debido a fallamiento normal.	66

Figura 27. Afloramiento de miembro órganos afectado por neotectónica en el barrio Kennedy en cercanías al puente las olas.	66
Figura 28. Evidencia de falla encontrada en la salida a Rionegro, en la vía que conduce al barrio Colorados.	67
Figura 29. Evidencia de fallamiento normal encontrada en la estación E121.	69
Figura 30. Evidencia de fallamiento normal en depósitos cuaternarios, encontradas en el lote propiedad de Santander.SAS. en la vía al aeropuerto.	69
Figura 31. Evidencia de fallamiento normal en miembros de la formación Bucaramanga, encontrada al W del barrio La Campiña del municipio de Girón.	70
Figura 32. Evidencia del cabalgamiento al E de la falla Suárez, encontrada en la vereda la Alta del municipio de Girón	70
Figura 33. cuadro comparativo de los modelos estructurales para el área de Bucaramanga	72
Figura 34. Pull-apart a través de una falla medianamente oblicua y fallas maestras no paralelas. Tenga en cuenta que la compresión y la elevación se producen a un lado del Pull-apart, mientras que en el otro se desarrolla un “espacio” extensional. Tomado de (Allen & Allen, 2013).	73
Figura 35. Ubicación de los cortes geológicos realizados en el área de estudio.	73
Figura 36. Corte geológico en dirección WNW-ESE del bloque norte de la depresión tectónica de Bucaramanga. Se observan unidades del Paleozoico superior y Mesozoico. Tapada por el cuaternario, se muestra la falla mencionada por Navas (1991) que pone en contacto la formación Girón (occidente) y la formación Diamante (oriente).	74
Figura 37. Corte geológico en dirección WSW-ENE del bloque sur de la depresión tectónica de Bucaramanga. Se observa el escalonamiento al W del sistema de fallas de Rio de Oro (SFRO) en la parte central del área de estudio.	75

Figura 38. Corte geológico WSW-ENE del bloque sur de la depresión de tectónica de Bucaramanga. Escalonamiento al W del sistema de fallas de Rio de Oro (SFRO) en la parte sur del área de estudio.....	76
Figura 39. Corte geológico en dirección N-S del área de estudio. Se observa la geometría producida por el sistema de fallas transversales (SFT) de la cuenca pull-apart.	77
Figura 40. Corte esquemático A de la etapa I, Mioceno – Plioceno.....	78
Figura 41. Corte esquemático B de la etapa I, Mioceno – Plioceno.	79
Figura 42. Corte esquemático C de la etapa II, Pleistoceno.	79
Figura 43. Corte esquemático D de la etapa II, Pleistoceno.	80
Figura 44. Corte esquemático de la etapa III, Pleistoceno.....	80
Figura 45. Corte esquemático de la etapa IV, Holoceno.	81

Resumen

TITULO:

MODELO ESTRUCTURAL PRELIMINAR PARA EL ÁREA DE BUCARAMANGA *

AUTORES:

KELYT FELET MORA ORTIZ**

DIEGO ALEJANDRO GALÁN MARTÍNEZ**

PALABRAS CLAVES:

Geología estructural de Bucaramanga, Falla Bucaramanga-Santa Marta, Falla del Suarez, Strike-slip fault, falla rumbo-deslizante, Cuenca de tracción, Pull-apart basin, strike slip basin, depresión tectónica, strike slip deformation.

La “meseta” de Bucaramanga y su área metropolitana, ubicada en el departamento de Santander, Colombia, ha sido objeto de estudio durante más de 60 años, de controversia a nivel sedimentológico y paleoambiental, como también a nivel de desarrollo estructural por las fallas que limitan la cuenca, la cinemática de estas y su evolución tectónica. El levantamiento de la cordillera oriental permite el levantamiento de los bloques adyacentes a la cuenca, conocidas como la región de las mesas (Julivert, 1958) y el macizo de Santander, configurándose una depresión donde se depositarían los sedimentos que conforman hoy la formación Bucaramanga, esto debido a los sistemas fluviales que afectan que la afectan. Se realizan trabajos de campo para recolectar datos cinemáticos y determinar un modelo estructural para la región. Dando como resultado la identificación de dos nuevos sistemas de fallas, el sistema de fallas Río de Oro y el sistema de fallas transversales a la “meseta” de Bucaramanga. De la misma manera la determinación de una componente de rumbo dextral para la falla Suarez y la determinación de la falla Chitota de cinemática sinistral normal. Así se llega a la conclusión de que la cuenca sobre la que está construida la ciudad de Bucaramanga es de tipo Pull-Apart.

* Trabajo de grado. Modalidad Investigación

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Guillermo Vargas Pieschacón, Msc. Geología ambiental.

Abstract

TITLE:

PRELIMINARY STRCTURAL MODEL FOR THE AREA OF BUCARAMANGA

AUTHORS:

KELYT FELET MORA ORTIZ**

DIEGO ALEJANDRO GALÁN MARTÍNEZ**

KEYWORDS:

Geología estructural de Bucaramanga, Falla Bucaramanga-Santa Marta, Falla del Suarez, Strike-slip fault, falla rumbo-deslizante, Cuenca de tracción, Pull-apart basin, strike slip basin, depresión tectónica, strike slip deformation.

The "Meseta" of Bucaramanga and its metropolitan area, located in the department of Santander, Colombia, has been investigated for more than 60 years, of controversy at the sedimentological and paleoenvironmental level, as well as at the level of structural development due to the faults that limit the basin, the kinematics of these and their tectonic evolution. The uplift of the eastern cordillera allows the uplift of the blocks adjacent to the basin, known as the "Mesas" region (Julivert, 1958) and the Santander massif, forming a depression where the sediments of the Bucaramanga formation will be deposited. This is due to the fluvial systems that affect it. Field work is done to collect kinematic data and determine a structural model for the region. Resulting in the identification of two new fault systems, the Rio de Oro fault system and the transverse to the "meseta" of Bucaramanga fault system. In the same way, the determination of a dextral component for the Suarez fault and the determination of the Chitota fault with normal sinistral kinematics. In this way, it is concluded that the basin on which the city of Bucaramanga is built is of the Pull Apart type.

*Bachelor Thesis. Investigation modality

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Guillermo Vargas Pieschacón, Msc. Geología ambiental

Introducción

Existen diferentes propuestas de modelos estructurales para explicar la presencia de depósitos cuaternarios en el área de Bucaramanga ((Julivert M. , 1958); (Pulido Gonzales, 1979); (Niño Agudelo & Vargas Pieschacon, 1992); (Paris, Machette, Dart, & Haller, 2000); (López & Barrero, 2002); (Acosta, Leonergan, & Coward, 2004); (Diederix, Hernández Moreno, Torres Jaimes, & Botero Santa, 2008) entre otros). Adicionalmente, en los mapas propuestos por el INGEOMINAS para la región ((Ward, y otros, 1973); Diederix, 2008; entre otros) no se plantean fallas cubiertas en la mayor parte de la “meseta” de Bucaramanga. Vargas (Clavijo Torres & Vargas Pieschacon, 2017) plantea para el sector norte (barrios Lizcano, Esperanza III, Mirador, Jose Maria Cordoba, Villa Helena, Villa Rosa, Villa María) una serie de fallas con dirección NE-SW y otras en dirección NW-SE con evidencias de actividad en el cuaternario, y ha identificado hacia el sur, lineamientos que podrían tener este mismo comportamiento.

La siguiente investigación se desarrolla sobre el flanco oriental de cordillera oriental de Colombia, en el área metropolitana de Bucaramanga la cual está construida sobre una depresión tectónica limitada por el segmento Bucaramanga del sistema de fallas Bucaramanga - Santa Marta y la falla Suarez, al este y oeste respectivamente, las cuales a su vez convergen al norte de dicha ciudad en la salida hacia el municipio de Rionegro.

Desde el punto de vista sedimentológico dichas fallas adquieren un rol importante en esta zona en cuanto a la acumulación de lo que se conoce como la terraza o abanico aluvial de Bucaramanga con ápice en lo que hoy es el barrio morrorico según (Niño Agudelo & Vargas Pieschacon, 1992). Por esta razón, diferentes estudios tectónicos se han llevado a cabo en esta zona, como los desarrollados por (de Porta, 1959) y (Navas G, 1962) para el sector norte de la ciudad. Así como

los desarrollados por (Julivert M. , 1958) en el sector sur, entre otros. Sin embargo, se puede afirmar que no hay consenso en cuanto a la evolución estructural asociada. Por tal motivo, el objetivo de este estudio es tratar de encajar las piezas dejadas por los diferentes autores, a partir de los datos estructurales obtenidos en este trabajo y su respectivo análisis, para así poder corroborar lo planteado por estos mismos. Finalmente, del procesamiento y localización de esta información se podrá plantear un modelo estructural para el área que permita entender la evolución de la depresión tectónica de Bucaramanga entre el Holoceno y el presente.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

- Proponer un modelo estructural para el área de Bucaramanga con base en la caracterización de afloramientos asociados a lineamientos y fallas propuestas por diferentes autores entre el Rio Frio y el sector de Colorados en Área de Bucaramanga.

1.2 Objetivos Específicos

- Definir Estado del arte de la geología estructural de la región.
- Recopilar y evaluar los diferentes modelos estructurales propuestos para el área de Bucaramanga.
- Contrastar los diferentes modelos estructurales propuestos en el área.
- Documentar evidencias de la presencia de las fallas propuestas por diferentes autores en el área de Bucaramanga y evaluar su actividad reciente.

2. Localización geográfica

El área de estudio del presente proyecto se localiza en la región nororiental del país, sobre la cordillera oriental de los andes colombianos, en el departamento de Santander, dentro del área metropolitana de Bucaramanga, comprendiendo el área limitada al Oeste por la falla del Suarez, al Este por el sistema de fallas de Bucaramanga, al sur por el río frío y al norte por la confluencia de las fallas Suarez y Bucaramanga (Figura 1).

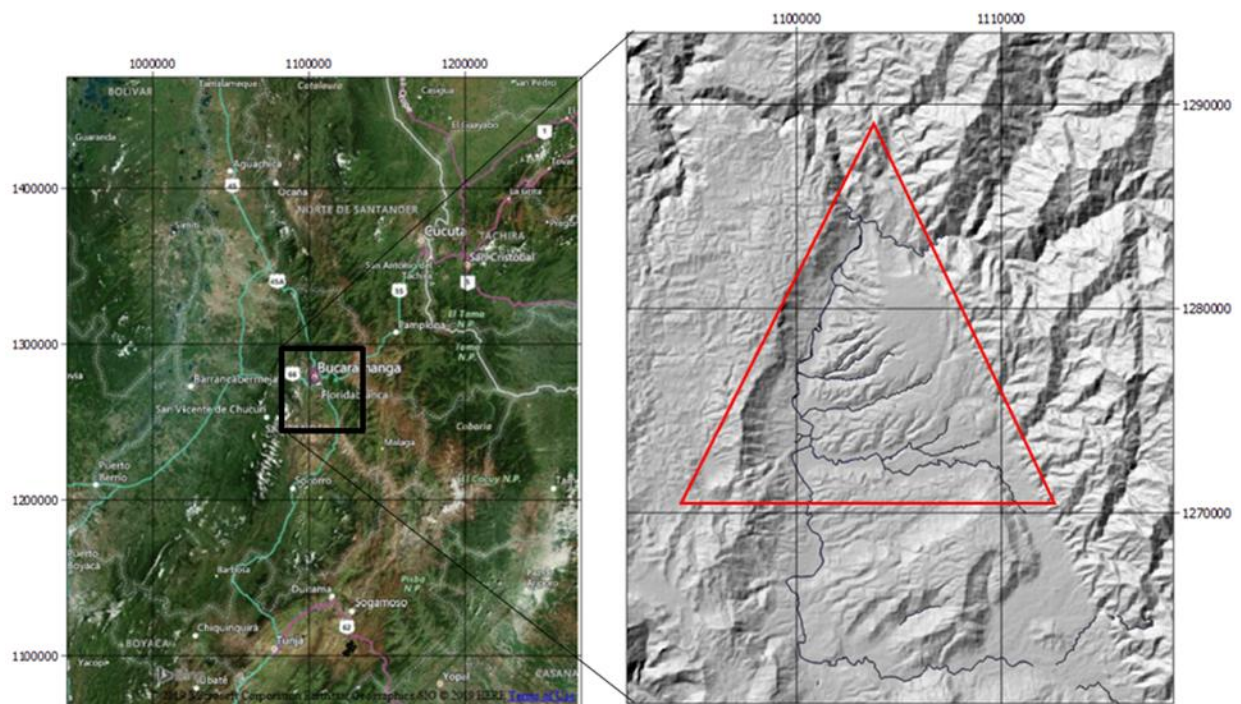


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. Imagen satelital tomada de Bing Aerial

3. Metodología

3.1 Primera Etapa: Recopilación bibliográfica

Definidos los objetivos del trabajo se inicia la búsqueda de la información disponible que ayude a conocer y comprender los diferentes modelos estructurales y/o evolutivos propuestos desde los primeros trabajos como los de Julivert para el área de Bucaramanga. Para este fin se tuvo en cuenta información publicada en revistas científicas, proyectos de investigación, libros, etc. Esta información recopilada se analizó y se evaluó y se tuvo en cuenta para el desarrollo de las siguientes fases del proyecto de investigación.

3.2 Segunda Etapa: Análisis de imágenes y/o fotointerpretación

En esta etapa se realizó un análisis de las imágenes satelitales y aerofotografías usando herramientas SIG y herramientas tradicionales como el estereoscopio, con el objetivo de interpretar estructuras y/o lineamientos en el área de Bucaramanga. También se establecieron puntos de control para la comprobación en campo de fallas y/o estructuras observadas en las fotografías y/o imágenes satelitales.

3.3 Tercera Etapa: Recolección de datos de campo

En esta fase del proyecto se verificaron las observaciones realizadas en la etapa anterior, se tomaron datos estructurales de diaclasamiento, planos estriados y planos de estratificación y evidencias de campo sobre las estructuras encontradas en el área de estudio para su posterior análisis.

3.4 Cuarta Etapa: Interpretación de datos y/o fase de oficina

Con la información obtenida en campo y la recopilada anteriormente, se evaluó usando softwares de análisis estructural e interpretó dando como resultado la definición de un modelo preliminar estructural para el área de Bucaramanga también haciendo uso de herramientas ofimáticas.

3.5 Quinta Etapa: Elaboración del Informe final

Basado en la información obtenida en campo, información bibliográfica recopilada y habiendo cumplido con los objetivos planteados, se elabora este informe final para ser entregado a la escuela de Geología de la Universidad industrial de Santander.

4. Geología Regional

El continente sudamericano posee como rasgo geológico más importante a la cordillera de Los Andes, la cual se ubica en el borde occidental de dicho continente y se extiende desde Argentina pasando por Chile, Bolivia, Perú, Ecuador hasta llegar a Colombia y parte de Venezuela. Esta

cadena montañosa se ubica paralela a la zona de subducción entre las placas tectónicas Nazca y Sudamérica, con el particular caso de Colombia en donde se produce una triple convergencia con la placa caribe. Así, dicha convergencia de placas en el sector NW de Suramérica crea una zona de deformación continental definida por cabalgamientos en dirección NE-SE y fallas de rumbo (Gomez, 2001), (Corredor, 2003) y (Cortés, Angelier, & Colleta, 2005) en (Jimenez Diaz, 2008)) (**Figura 2**). Este triple encuentro de placas tectónicas le da una característica especial a la fisiografía de Colombia y a la cordillera andina en general, pues en este país el orógeno experimenta una división en tres importantes ramales conocidos como cordilleras occidental, central y oriental, las cuales poseen diferentes periodos de levantamiento.

La ramificación en tres cordilleras hace que en Colombia se presente una geomorfología bastante accidentada en casi la mitad del territorio y además provoca que el basamento colombiano pueda ser dividido en tres zonas separadas por megasuturas. Al Este, el Macizo de Guyana, La provincia central, definida por las cordilleras Oriental, Valle del Magdalena y la parte Este de la Cordillera Central y al Oeste, afloran rocas con afinidad de la corteza oceánica acrecionada al continente (Cooper, y otros, 1995) (**Figura 2**)

La falla de Romeral es el límite entre rocas de afinidad continental al Este y rocas de afinidad oceánica al Oeste ((Barrero, 1979); (Gomez, 2001)). La acreción de bloques de corteza oceánica de edad Cretácico Superior dan origen al levantamiento de la Cordillera Occidental (Barrero, 1979). Diferentes fases de deformación han actuado en la provincia central, los pulsos de levantamiento de la Cordillera Oriental inician en el Paleógeno y finalizan en el Plioceno - Pleistoceno con una fase de mayor deformación, caracterizada por la inversión de antiguas fallas normales (Cooper, y otros, 1995), (Cortés, Angelier, & Colleta, 2005).



La zona de estudio está ubicada al nororiente del país en el departamento de Santander, en y en los alrededores de la ciudad de Bucaramanga, sobre el flanco occidental de la cordillera oriental y se caracteriza por ser un graben limitado por las fallas de Bucaramanga y Suarez al este y oeste respectivamente. Las litologías presentes en dicha zona abarcan los tres tipos de rocas con edades que van desde el precámbrico al cuaternario, con el abanico aluvial como rasgo más distintivo de

la ciudad desde el punto de vista geológico, conocido como Formación Bucaramanga (Niño Agudelo & Vargas Pieschacon, 1992)

De manera general estas rocas se encuentran caracterizadas y cartografiadas por el (INGEOMINAS, 2001) y por (Ward, y otros, 1973) en el Mapa de la Geología de los Cuadrángulos H-12 y H13, las cuales de más antigua a más joven son:

Neis de Bucaramanga (pEb): Se trata de una secuencia estratificada de rocas metasedimentarias de alto grado metamórfico, que consisten principalmente en paragneis pelítico, semi-pelítico y arenáceo, esquisto y cantidades subordinadas de neis calcáreo, mármol, neis hornbléndico y anfibolita, localmente migmatizado.

Se encuentra aflorando en tres fajas: la más occidental (faja Bucaramanga) al este de la Falla Bucaramanga-Santa Marta, la central que comprende el área de Berlín y California-Cachirí y la oriental que aparece cerca de Chitagá al sur de Pamplona. En la faja Bucaramanga, se observan meta-pelitas, semi-pelitas y meta-areniscas, con presencia restringida de neis hornbléndico y anfibolita (Ward, y otros, 1973) Varios autores concuerdan en asignar una edad precámbrica al neis de Bucaramanga, como (Goldsmith, Marvin, & Mehnert, 1971) quien reporta edades de 680 ± 140 M.a basados en Rb-Sr, además (Ward, y otros, 1973) basados en K – Ar reportan una edad de 945 ± 40 M.a, más adelante (Restrepo-Pace, Ruiz, Gehrels, & Cosca, 1997) reportan 800 ± 50 M.a basados en Ar-Ar, entre otros autores.

Formación Diamante (PCd): Miembro inferior del grupo Suratá descrito por (Dickey, 1941). Llamada así por la cantera de Cementos Diamante S.A., ubicada en el norte de Bucaramanga en donde además se encuentra la sección tipo de dicha formación (Ward, y otros, 1973). De acuerdo a estos autores se compone de areniscas purpuras oscuras de grano fino intercaladas con arcillolitas del mismo color en la parte inferior. De shale gris oscuro intercaladas con calizas del mismo color

y arcillolita limosa gris en la parte media. De caliza cristalina gris oscuro de grano fino a medio con algunas cantidades intercaladas de arcillolita limosa o arenisca limosa. En (Ward, y otros, 1973) La edad para esta formación fue asignada con la ayuda del Servicio Geológico de Estados Unidos a partir del contenido fosilífero, principalmente braquiópodos, arrojando un resultado que va desde el carbonífero al pérmico medio.

Formación Tiburón (TRpt): Miembro superior del grupo Suratá (Dickey, 1941), distinguido por capas masivas de conglomerado con guijos de caliza de la infrayacente formación diamante, incluidos en una matriz calcárea, gris, de grano fino. La edad de la Formación Tiburón puede indicarse solo aproximadamente como más joven que la Diamante, de edad Carbonífero y Pérmico, de la cual se deriva y más antigua que la Formación Bocas cuya edad es, probablemente pero no definitivamente, Triásico.

Formación Bocas (TRb): Se encuentra suprayaciendo la Formación Tiburón y se compone de limolita gris verdosa, arcillosa, micácea, ligeramente calcárea con intercalaciones de arenisca de grano medio, feldespática y shale negro, carbonaceo, con lentes de arenisca oscura. Además, presenta capas de arenisca marrón rojiza de grano muy fino a limosa, ligeramente calcárea en los niveles superiores en contacto con la Formación Jordán y caliza gris oscura, dura, cristalina de grano fino, altamente fracturada en los niveles inferiores en contacto con la Formación Tiburón (Ward, y otros, 1973).

Formación Girón (Jg): Con este nombre se reconoce a un conjunto de grueso de areniscas, conglomerados y limolitas color marrón rojizo que están ampliamente expuestas al oeste de Bucaramanga y toman el nombre de la población de Girón (Ward, y otros, 1973). (Cediel, 1968) logró medir 4.650 m de esta formación y la caracterizó en siete facies litológicas compuestas por areniscas rojizas de grano grueso con estratificación cruzada intercaladas con capas de

conglomerados y areniscas conglomeráticas, arcillolitas y limolitas del mismo color. La edad de esta formación ha sido por mucho tiempo fuente de incertidumbre y especulación ya que las edades dadas han variado desde el carbonífero al cretácico. Sin embargo, la Formación Girón ha sido correlacionada con la Formación La Quinta en Venezuela y a la cual se le ha asignado una edad de Jurásico superior. Por esta y otras informaciones se ha podido soportar una edad Jurásico para el Girón.

Formación Bucaramanga (Figura 3): El (INGEOMINAS, 2001) lo definió como un importante depósito sedimentario de edad Cuaternaria clasificado como un abanico aluvial erosionado según su morfología, y posiblemente asociado en su mayor parte al río Suratá. Se acumula sobre una depresión de origen tectónico, sobre el cual se ubica el casco urbano de la ciudad de Bucaramanga. Este abanico limita al nororiente y oriente con el Macizo de Santander, al noroccidente y occidente con el cerro de Palonegro y el río de Oro, y al sur con la Mesa de Ruitoque. De acuerdo al INGEOMINAS, en ese mismo trabajo, el espesor del depósito aumenta de oriente a occidente y aunque el valor real de éste se desconoce, siendo actualmente motivo de investigación, algunos cortes geológicos permiten estimar, en los sectores más espesos, valores promedios cercanos a los 250 metros. Basados en trabajos anteriores que buscaban definir la Formación Bucaramanga, como el de (Hubach, 1952) y (Niño Agudelo & Vargas Pieschacon, 1992), el (INGEOMINAS, 2001) propuso dividir dicha formación de base a techo en (1) miembro Órganos (Qbo), (2) miembro Finos (Qbf), (3) miembro Gravoso (Qbg) y (4) miembro Limos Rojos (Qblr) (Figura 3).

Miembro Órganos (Qbo): Aflora en las laderas y escarpes de la parte occidental de la Meseta de Bucaramanga y el Área Metropolitana, en los alrededores del municipio de Girón, anillo vial, en las estribaciones de la parte norte de la mesa de Ruitoque y en los cortes de la carretera que

comunica la población de Girón con la ciudad de Bucaramanga (INGEOMINAS, 2001). Posee un aspecto conglomerático debido a los depósitos de gravas y bloques poco consolidados, constituidos principalmente de areniscas medias y silíceas y algunos fragmentos de rocas ígneas plutónicas, neises, liditas y cherts. Estos fragmentos son redondeados a subredondeados, pobremente seleccionados. Dichos niveles conglomeráticos se encuentran intercalados con niveles finos constituidos por arcillas arenosas y arenas arcillosas compactas y con algún contenido de materia orgánica (Bueno y Solarte., 1994 en (INGEOMINAS, 2001).

Miembro Finos (Qbf): Definido como una extensa capa lenticular horizontal, más o menos continua, de unos 15 m de espesor promedio, donde alternan niveles arcillosos, limoarenosos y arenolimosos, de colores gris verdosos. Dividido en un (1) conjunto arcilloso de colores gris a verde, en la base, y un (2) conjunto arenoso amarillento a pardo amarillento, en el tope (Hubach, 1952).

Miembro Gravoso (Qbg): Se extiende principalmente por la escarpa occidental y norte de Bucaramanga. Exhibe niveles gravosos, gravoarenosos y gravolodosos. Los cantos son, en su mayor parte, tamaño grava de diámetro promedio 15 cm y bloques de roca, en menor cantidad, hasta de 0,8 m de diámetro, subangulares a subredondeados, en matriz areno-arcillo-limosa, color pardo rojizo, rojizo y ocre pálido; en general el depósito es matriz soportado, aunque localmente se presenta clasto soportado (Niño Agudelo & Vargas Pieschacon, 1992).

Miembro Limos Rojos (Qblr): Se localiza en el sector urbanizado de Bucaramanga, aunque no se extiende uniformemente. Está constituido por arenas arcillosas gravosas y limos de colores rojizos, amarillentos y naranjas. Se observó la presencia esporádica de bloques angulares de arenisca asociados superficialmente a este miembro; estos cantos pueden estar embebidos dentro

de limos rojos y se caracterizan por estar meteorizados. Suprayace al segmento gravoso y su contacto con éste es gradacional (Julivert M. , 1963).

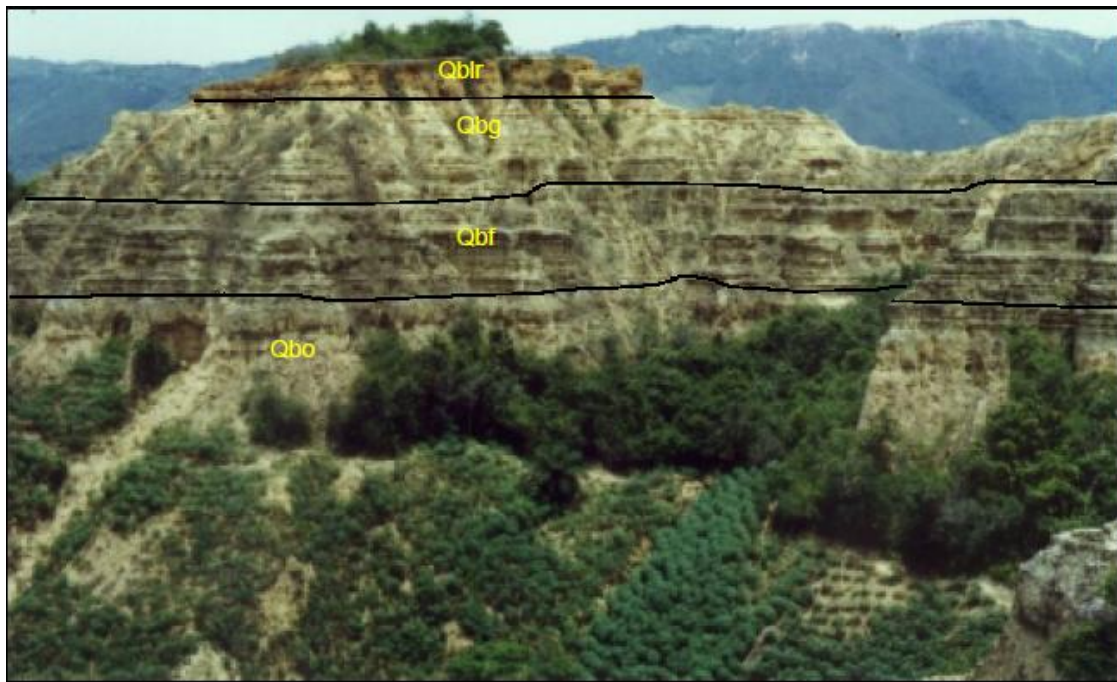


Figura 3. Panorámica de los miembros que conforman la formación Bucaramanga. De base a techo: Organos (Qbo), Finos (Qbf), Gravoso (Qbg) y Limos Rojos (Qblr). Margen derecha de la quebrada La Joya, vista desde el barrio Campo Hermoso. Tomado de INGEOMINAS (2001).

6. Estado del arte

El municipio de Bucaramanga y su área metropolitana ha sido objeto de estudio en numerosas investigaciones de carácter geológico; desde análisis sedimentológicos y estratigráficos como también estudios de la tectónica local y sus implicaciones a nivel regional. Estructuralmente, Bucaramanga es atravesada por la Falla del Suárez al oeste de la ciudad y la Falla Bucaramanga al este, las cuales, además, convergen al norte de la ciudad.

La Falla Bucaramanga se extiende entre el Municipio de Curumaní y la parte más norte del Macizo de Santander y junto con las fallas de Algarrobo, (entre los municipios de Bosconia y Curumaní) y Santa Marta (que se propaga entre la Sierra Nevada de Santa Marta y el Municipio de Bosconia) constituyen el Sistema de Falla de Bucaramanga (SFB) (Cuéllar Cárdenas, López Isaza, Osorio Naranjo, & Carrillo Lombana, 2012).

(Julivert M. , 1961) y (Navas G, 1962) destacan un carácter vertical para la Falla Bucaramanga (Figura 5) de manera que esta levanta el Macizo de Santander y cuyo salto es más pronunciado hacia el norte mientras que hacia el sur dicho levantamiento se va haciendo tenue hasta finalmente desaparecer bajo la Arenisca de Arcabuco.

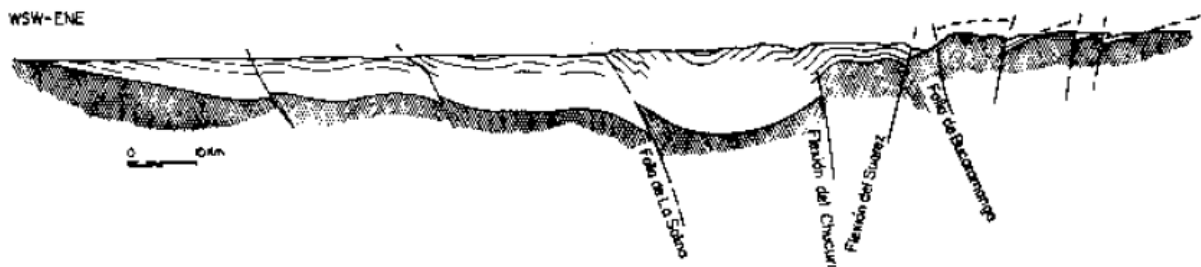


Figura 5. Corte entre la Cordillera Central y Oriental. Se observan las Fallas del Suarez y Bucaramanga. Tomado de (Julivert M. , 1961)

Posteriormente, (Pinto, J. & Téllez, 1999) concuerdan en que la Falla Bucaramanga se origina en un ambiente tectónico compresivo lo cual le da su característica de rumbo deslizante con componente inverso e indican que posee una orientación general N16W hasta que se intercepta con la Falla Suárez en donde varía a N25W. adicionalmente, reconocen que la falla se bifurca en dos ocasiones: una, en las cercanías del municipio El Playón y otra, hacia el norte de los barrios Pan de Azúcar y Los Cedros generando lo que se conoce como los trazos Bucaramanga Este y Bucaramanga Oeste los cuales son cortados por la Falla El Picacho al norte del barrio La Cumbre.

Consecutivamente, se unen al este de la escuela Manzanares en donde la falla es desplazada por la falla Hato y a partir de allí se crea el Trazo Bucaramanga Sur.

En (Cuéllar Cárdenas, López Isaza, Osorio Naranjo, & Carrillo Lombana, 2012), en el trabajo “Análisis Estructural del Segmento Bucaramanga del Sistema de Fallas de Bucaramanga (SFB) entre los Municipios de Pailitas y Curumaní” a través de análisis estructurales, llegan a la conclusión de que el segmento Bucaramanga del Sistema de Fallas de Bucaramanga tiene un comportamiento de desplazamiento de rumbo al NNW con un movimiento sinistral y una componente inversa de alto ángulo. Además, señalan que de acuerdo con la manifestación de pseudotaquilitas la Falla Bucaramanga actúa como una falla con deslizamiento friccional capaz de generar eventos sísmicos.

De acuerdo con la (Otero Ramírez & Casadiegos Agudelo, 2017), la falla Bucaramanga tiene una expresión geomorfológica bastante pronunciada producto de su actividad en el área metropolitana, en donde se pueden encontrar desde facetas triangulares, drenajes desplazados, lomos de falla, lomos de gancho, entre otras geoformas que denotan el carácter sinistral de dicha falla. Además, los datos tomados de diaclasas y estrías coinciden con la cinemática establecida en la literatura para la falla Bucaramanga, la cual le concede un movimiento sinistral con componente aparentemente inverso. Por otro lado, en dicha investigación se menciona una serie de ramificaciones de la Falla Bucaramanga en sectores de Piedecuesta, Floridablanca y El Playón. Por otra parte, identifican una serie de fallas transversales a la Falla Bucaramanga las cuales cortan e interceptan dicha falla, en algunos casos desplazándola, como es el caso del Sistema de Fallas de Suratá que en las coordenadas E 1106467.3 y N 1283090.7 la desplazan en sentido dextral. Por último, definen una serie de trazos de la Falla Suárez, indicando su longitud aproximada, así como su ubicación inicial y final, en las que se puede evidenciar su existencia.

6.2 Falla Suárez

La Falla Suárez divide la Región de Las Mesas en dos unidades estructurales de segundo orden, una occidental formada por la Plataforma de Lebrija y Macizo de Zapatoca y otra oriental que comprende Bucaramanga, las mesas de Ruitoque y Los Santos y el área de Barichara - Curití San Gil (Julivert M. , 1958). En esta publicación denominada “La Morfoestructura de la Zona de las Mesas al SW de Bucaramanga” Julivert le asigna a la Falla Suárez una orientación general N – S y se extiende paralela al Suárez hasta la unión de este y el Río Chicamocha a partir del cual se nombra como Río Sogamoso y posteriormente se orienta paralela al Río de Oro, al W de Bucaramanga. De acuerdo a este trabajo la Falla Suárez no se comporta como tal en toda su extensión, sino que aparece como una falla o flexión, como se logra apreciar en la localidad de La Fuente hasta un poco más allá de la unión del Suárez y el Chicamocha, ya que la cobertera que está por encima de la falla tiende a adaptarse, provocando que se pueda producir o no fractura, dependiendo de la magnitud del salto, como se puede ver que mientras la falla afecta directamente niveles inferiores (Girón), se manifiesta como flexión en niveles superiores (cretácico). Por otra parte, agrega que, al norte, la falla pone en contacto a la formación Girón de la plataforma de Lebrija y al cuaternario de la terraza de Bucaramanga.

Más adelante, (Navas G, 1962) en su publicación “Geología del Carbonífero al N de Bucaramanga” renombra la Falla Suárez en el sector en que se acomoda paralela al Río de Oro denominándola del mismo modo. Proponiendo así, el Sistema de Fallas Suárez – Río de Oro. La Falla del Río de Oro se aleja de dicho río hacia el oeste del barrio Café Madrid proyectándose por el flanco E de la cuchilla del Pablón afectando sedimentos del Girón, posteriormente se proyecta

por la cuchilla de San Ignacio poniendo en contacto al Girón y el Carbonífero hasta que la falla se encuentra con la Falla Bucaramanga en las cercanías de la quebrada Hoya Honda. Por otra parte, Navas identifica una falla de menor importancia pero que divide el bloque hundido, limitado por las fallas mayores (Suárez y Bucaramanga), en una zona oriental constituida por sedimentos del carbonífero y una zona occidental constituida por sedimentos del Girón. Dicha falla puede observarse en las periferias de la carretera principal cerca a la quebrada La Mona.

Conforme a la cinemática que presenta la Falla Suárez, (Pulido Gonzales, 1979) indica que se comporta como una falla inversa levantando su bloque occidental. Sin embargo, en ciertas zonas este comportamiento varía, lo cual se ve reflejado en la variación del buzamiento de los estratos que van desde inclinaciones de 20° al sur hasta 60° hacia el norte. Mas adelante, (Diaz Bahamon & Suarez Acevedo, 1998), a partir de su investigación en municipios como Güepa, Zapatoca y Bucaramanga concluyen que la Falla Suárez tiene un movimiento normal en el sector de Güepa mientras se comporta como inversa hacia el norte. Posteriormente, (Paris, Machette, Dart, & Haller, 2000) señalan que la Falla Suárez posee un comportamiento inverso con componente de rumbo sinistral. Dicho movimiento es confirmado en (Diederix, Hernández Moreno, Torres Jaimes, & Botero Santa, 2008), a partir de unos ganchos de falla sinestrales cercanos a la intersección de la Falla Suárez con el Río Suratá, así como los datos de estrías tomadas en las cercanías de la Ladrillera de Los Domínguez al sur de Girón. Estos indicios muestran el movimiento oblicuo que se le ha atribuido a la falla. Adicionalmente, identifican a La Falla del Río de Oro como una falla satélite que posee un movimiento de cabalgamiento que superpone a la Formación Girón sobre depósitos del Abanico (**Figura 6**). Este comportamiento inverso con componente sinistral es confirmado más recientemente en las investigaciones de (Araque Gómez & Otero Ramírez, 2016) (**Figura 7**).

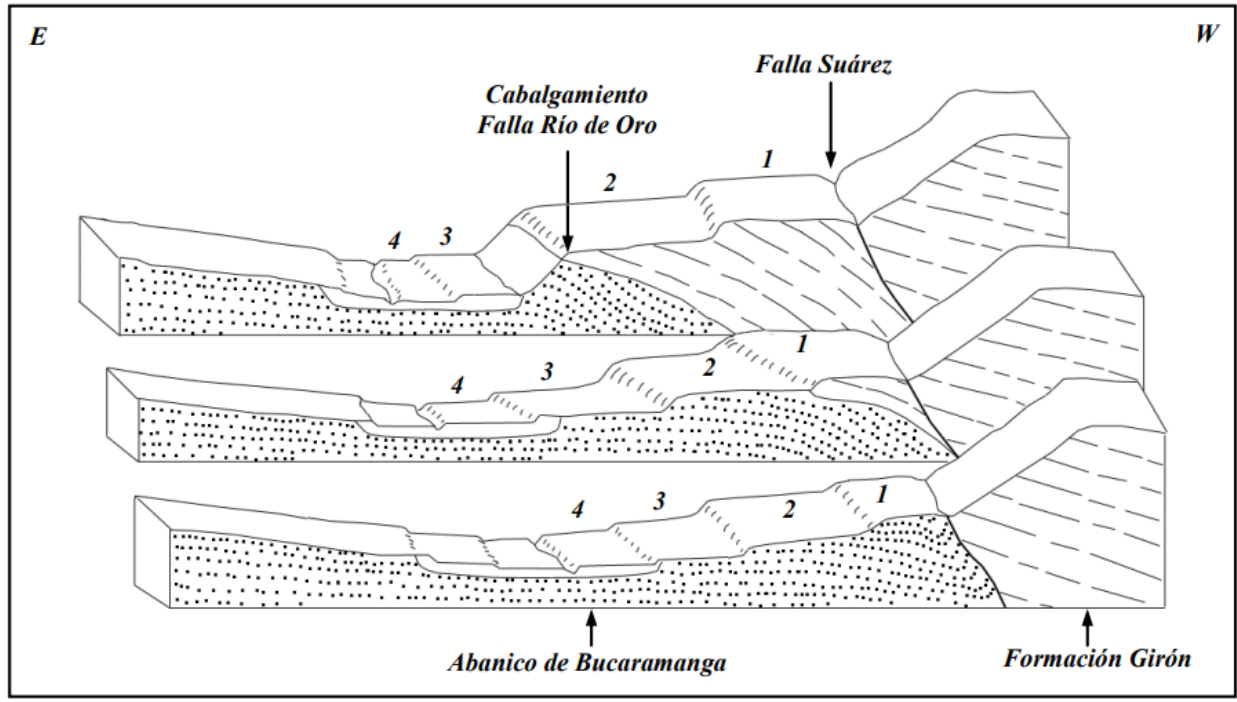


Figura 6. Comportamiento de la falla Río de Oro y Suárez. Tomado de (Diederix, Hernández Moreno, Torres Jaimes, & Botero Santa, 2008)

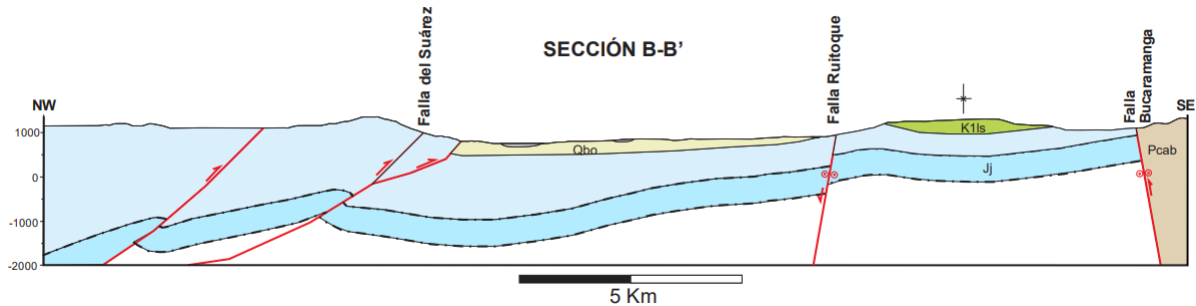


Figura 7. Corte transversal se manera oblicua a las fallas principales. Tomado de (Araque Gómez & Otero Ramírez, 2016)

Según (Otero Ramírez & Casadiegos Agudelo, 2017) en su trabajo denominado “APOYO AL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS SISTEMAS DE FALLAS SUÁREZ, SAN VICENTE, BUCARAMANGA Y SURATÁ” confirmaron que la Falla Suárez no tiene ninguna interacción con las estructuras presentes en la zona de manera que esta no sufre desplazamiento alguno y además, observaron que la falla presenta ramificaciones en la zona norte así como una curvatura

pronunciada, con una diferencia de unos 30 grados con respecto al rumbo general, en el sector del puente del Río Sogamoso lo cual se ratifica con el procesamiento de datos de diacласas tomados en dicha zona. Por último, definen una serie de trazos de la Falla Suárez, indicando su longitud aproximada, así como su ubicación inicial y final, en las que se puede evidenciar su existencia.

En otra parte del informe realizado por (Clavijo Torres & Vargas Pieschacon, 2017), se llevó a cabo un análisis fotogeológico para el área de Bucaramanga en el que se lograron identificar las Fallas Bucaramanga y Suárez y fallas locales asociadas a dichos sistemas de fallas. Asociadas a la Falla Bucaramanga y paralelas a esta, se reportaron una serie de fallas en dirección N-NW, nombradas en dicho estudio como B-1, B-2, B-3, B-4 y B-5 y que podrían explicar el desplazamiento del contacto entre los segmentos Órganos Inferior y Superior. Asimismo, mencionan una sucesión de fallas transversales en dirección W-NE que cortan y desplazan al Sistema de Fallas de Bucaramanga, de tipo normal con un importante componente de rumbo dextral que serían el producto de una distensión tectónica hacia el sur y explicarían el levantamiento de las unidades Paleozoicas al norte de la depresión y la presencia de las Mesas de Ruitoque y de los Santos en el límite sur de la misma. A su vez, señalan fallas paralelas a la Falla Suárez de gran continuidad y que cortan al sistema de Fallas de Bucaramanga

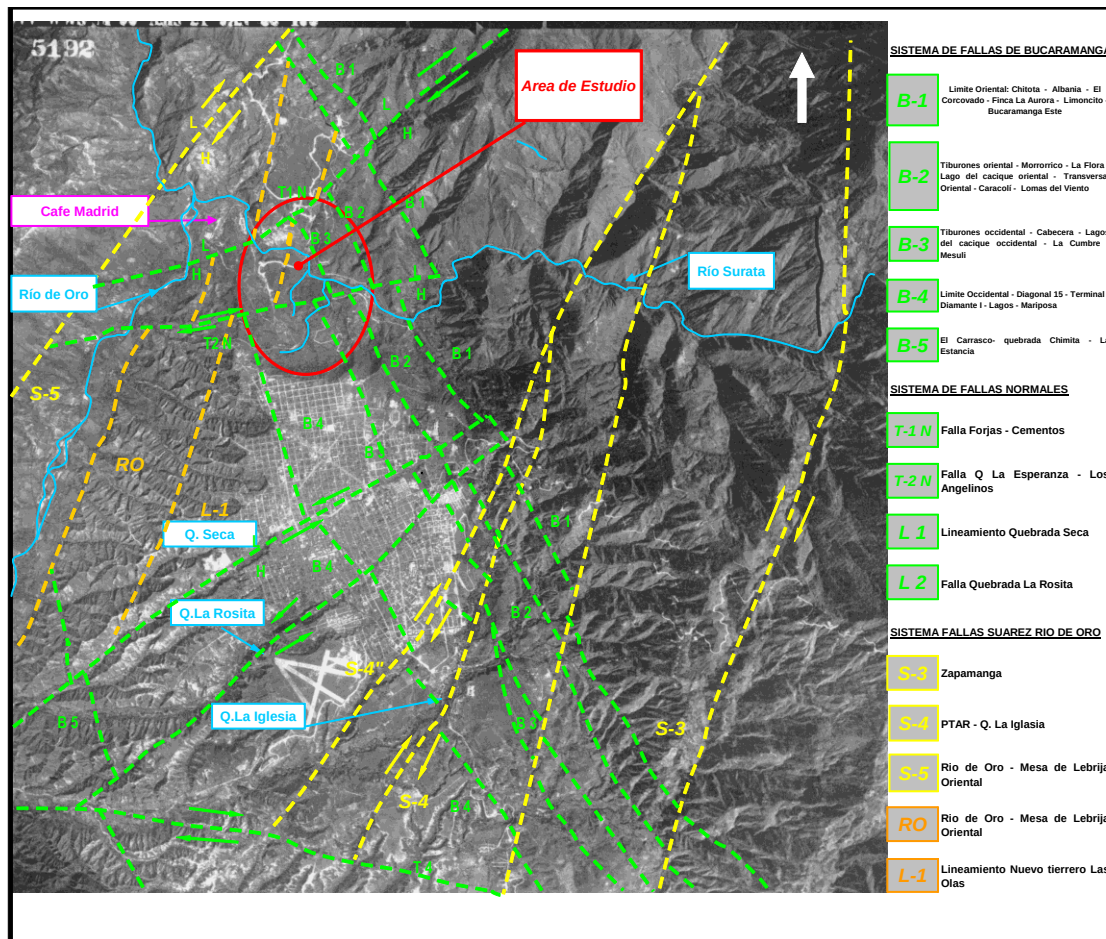


Figura 8. Interpretación Fotogeológica del área de Bucaramanga. Tomado de (Clavijo Torres & Vargas Pieschacon, 2017)

6.3 Modelos Estructurales Propuestos

Los modelos evolutivos propuestos para el área de Bucaramanga se vienen desarrollando desde hace más de 50 años y a medida que se profundiza en las investigaciones consecuentes tanto a nivel local como regional se ha ido esclareciendo el proceso evolutivo del área de Bucaramanga. Inicialmente Julivert al que posteriormente se le unieron De Porta y Navas han logrado dejar diferentes aportes para diferentes regiones del área de Bucaramanga y que vistas de una manera

conjunta se ha podido reconocer una historia evolutiva para la acumulación del Abanico de Bucaramanga.

De esta manera (Julivert M. , 1958), como ya se dijo anteriormente, hace un primer acercamiento en el que propone un modelo evolutivo, en el cual describe que, el área donde se localiza la terraza de Bucaramanga se encuentra limitada por las fallas Suarez, Bucaramanga (que convergen al norte de la ciudad) y Los monjes, al oeste, este y sur respectivamente. Esta última orientada en dirección ENE-WSW que separa la mesa de Ruitoque de las mesas Los Santos. El relieve actual se deriva de una superficie arrasada de edad pliocena, momento de inicio de la elevación que da lugar al relieve actual. Afirma que no se produjo un relieve acusado debido a existía un equilibrio erosión-elevación. Asimismo, menciona que la falla Suarez divide la región de Las Mesas en dos, dejando (1) el bloque occidental de Lebrija-Zapatoca con una tendencia de elevación hacia el sur y (2) el bloque oriental de las mesas de Ruitoque-Los Santos y Bucaramanga, el cual se levanta de manera oblicua al SE. Por otra parte, menciona que el labio hundido de las fallas que limitan dicha región se mueve en dirección a Bucaramanga, dejando una dovela triangular hundida que permite la acumulación del abanico de Bucaramanga (**Figura 9**). Julivert resalta que la sedimentación del abanico de Bucaramanga se produce al tiempo que se hunde la dovela y que luego de producirse un levantamiento general los ríos terminan de excavar la terraza para producir el relieve actual.

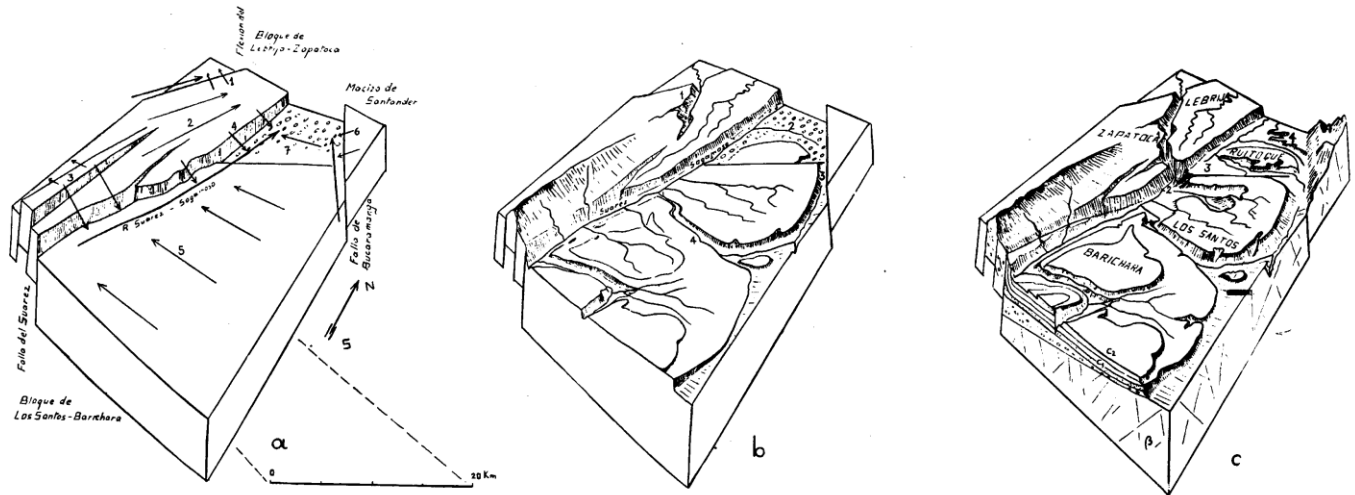


Figura 9. Proceso evolutivo de la zona de mesas. Tomado de Julivert (1958)

Más adelante, (de Porta, 1959) complementa que la dovela propuesta por (Julivert M., 1958) quedó dividida en dos bloques debido a la acción de un escalón de falla de orientación NW-SE creado por la falla de Bucaramanga, que está controlando el curso del Rio Surata desde donde cambia la dirección hasta la confluencia con el Rio de Oro. El bloque norte corresponde al bloque hundido, pero que topográficamente está más elevado debido al basculamiento del bloque sur.

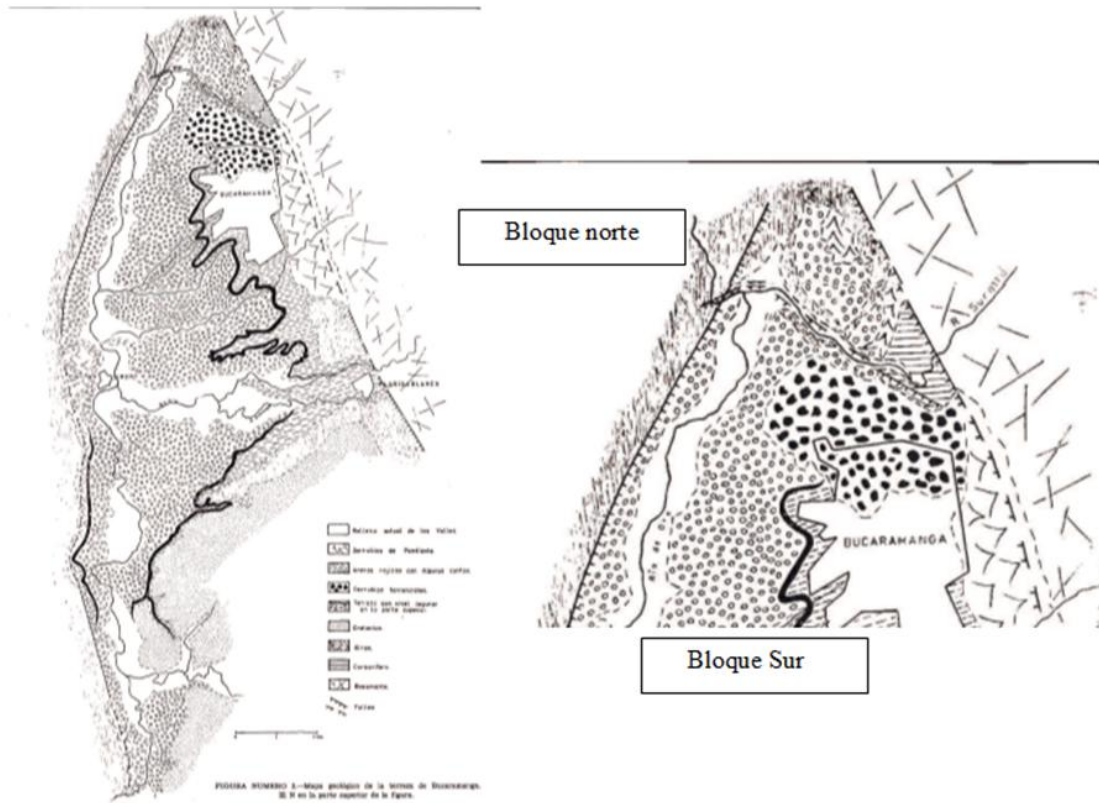


Figura 10. Escalón de falla que divide la dovela de Bucaramanga en dos bloques. Tomado y modificado de (de Porta, 1959)

Tres años más tarde, (Navas G, 1962) agregaría información para el bloque norte mencionado por (de Porta, 1959) afirmando un estilo tectónico de bloques debido a la acción de las fallas Suarez, Bucaramanga y una tercera de menor importancia que divide la dovela de Bucaramanga en dos zonas (**Figura 11**), una oriental formada por sedimentos del carbonífero (Fm. Diamante) y otra occidental constituida por sedimentos del Girón. La continuidad de esta tercera falla se encuentra enmascarada por los sedimentos cuaternarios de la terraza de Bucaramanga y son consideradas las tres fallas como accidentes de zócalo que han actuado hasta tiempos recientes.

A partir de la información entregada por Julivert, De Porta y Navas se podría construir un modelo estructural para el área metropolitana de Bucaramanga desde las Mesas de Los Santos-Ruitoque; Mesas Lebrija-Zapatoca hasta el norte de Bucaramanga a la salida hacia Rionegro.

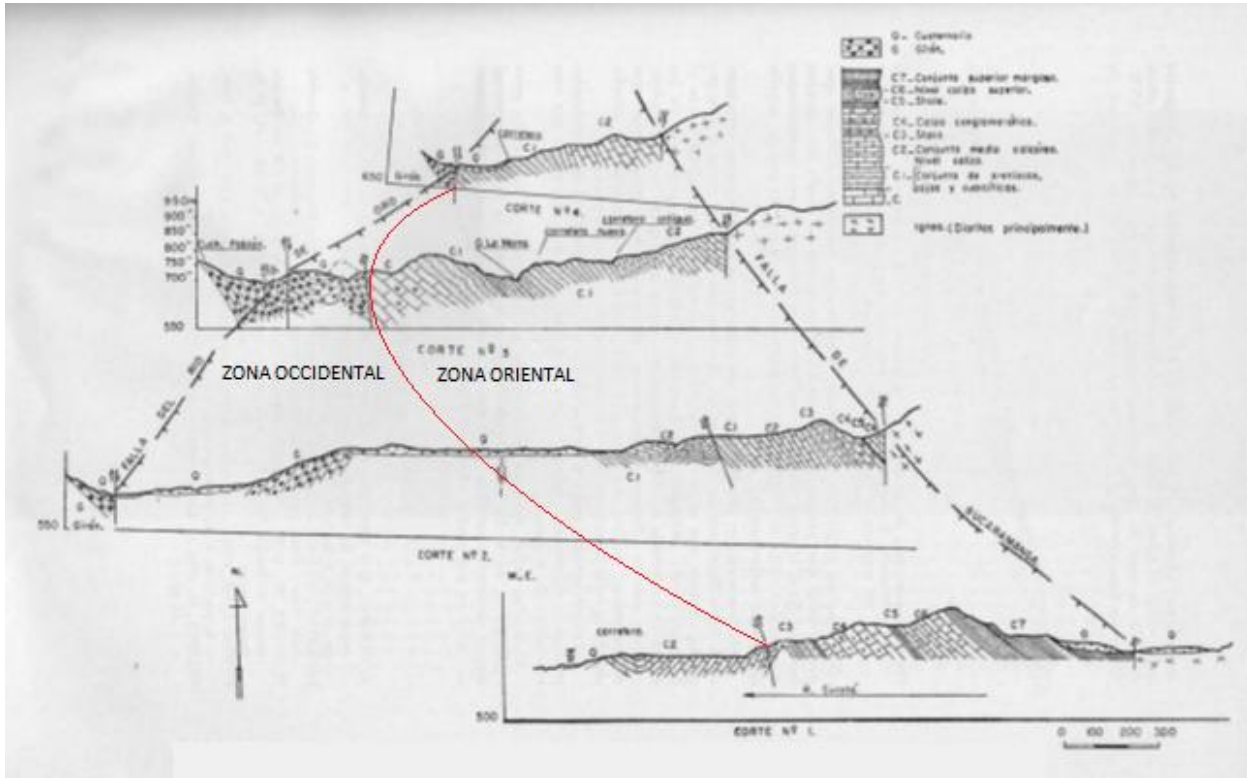


Figura 11. Zona occidental y oriental del bloque norte de la dovola de Bucaramanga. Tomado y modificado de (Navas G, 1962)

Conforme a (León Silvestre, 1991) en su trabajo “Mapa Geológico de Santander” la Falla Bucaramanga ha estado activa desde el paleozoico y dicha actividad puede verse reflejada por el desplazamiento de abanicos entre Bucaramanga y Piedecuesta. León señala que esta falla es de tipo transcurrente con desplazamiento sinistral lo que ha generado una serie de fallas anastomosadas en las que se ha producido un hundimiento local y ha dado origen a cuencas de tracción (Pull Apart Basin), como en la que se encuentra la ciudad de Bucaramanga.

Posteriormente, (Niño Agudelo & Vargas Pieschacon, 1992) harían un aporte desde el punto de vista sedimentológico y estructural en el que proponen un modelo de desarrollo para la cuenca de Bucaramanga (Figura 12). En este aseguran que en el Mioceno-Plioceno se produce una reactivación de la falla Bucaramanga y las fallas transversales Los Santos (Falla Los Monjes según Julivert) y Ruitoque (propuesta en dicho trabajo) a las que le asignan una cinemática normal y que generan la depresión tectónica (dovela). Posteriormente en el Pleistoceno temprano, se origina la deposición del abanico de Bucaramanga con ápice al sur de Morrorrico y aseguran que en el Holoceno se produce la migración hacia el norte del río Suratá por movimiento sinistral de la falla de Bucaramanga.

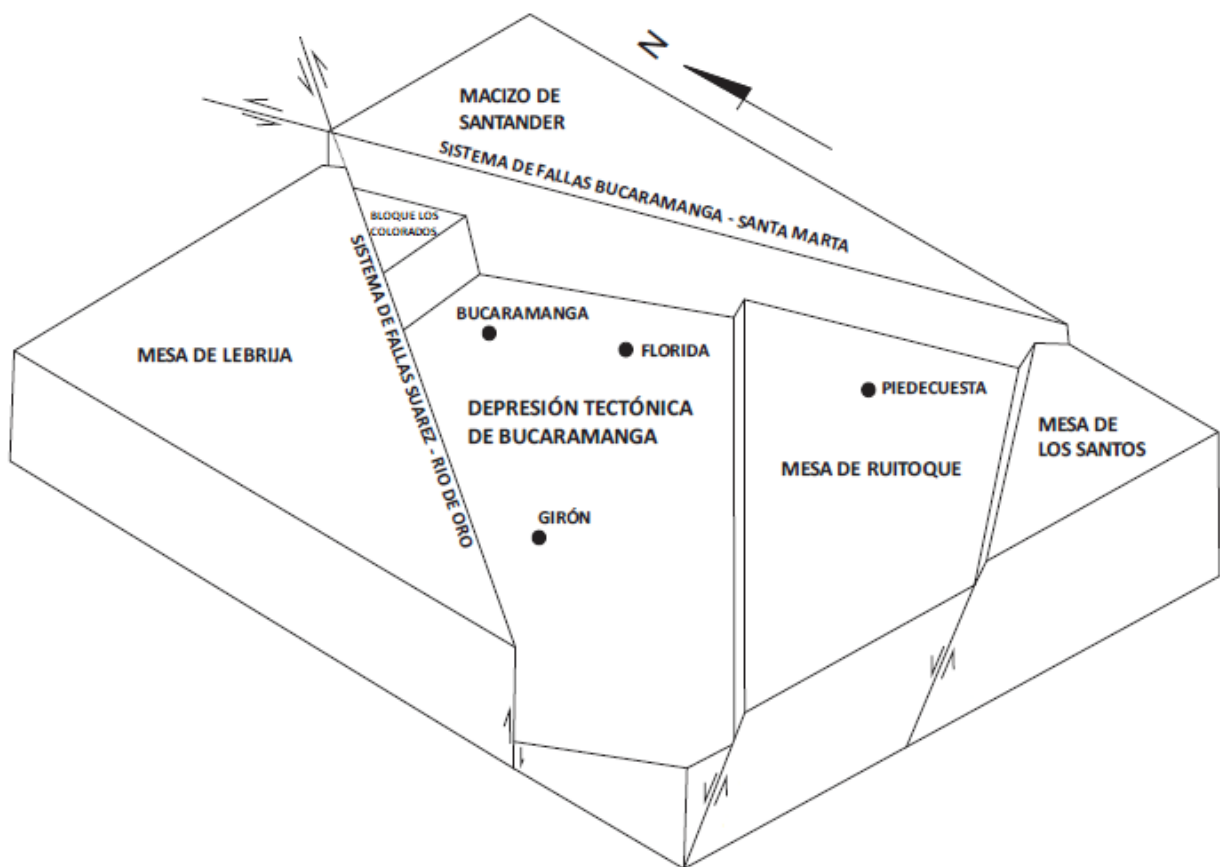


Figura 12. Bloque diagrama de la depresión tectónica de Bucaramanga. Tomado de Niño y Vargas (1992).

(Clavijo Torres & Vargas Pieschacon, 2017) Proponen una serie de cortes geológicos en el que ilustran el proceso de evolución estructural y sedimentológico de la depresión tectónica de Bucaramanga (Figura 13)

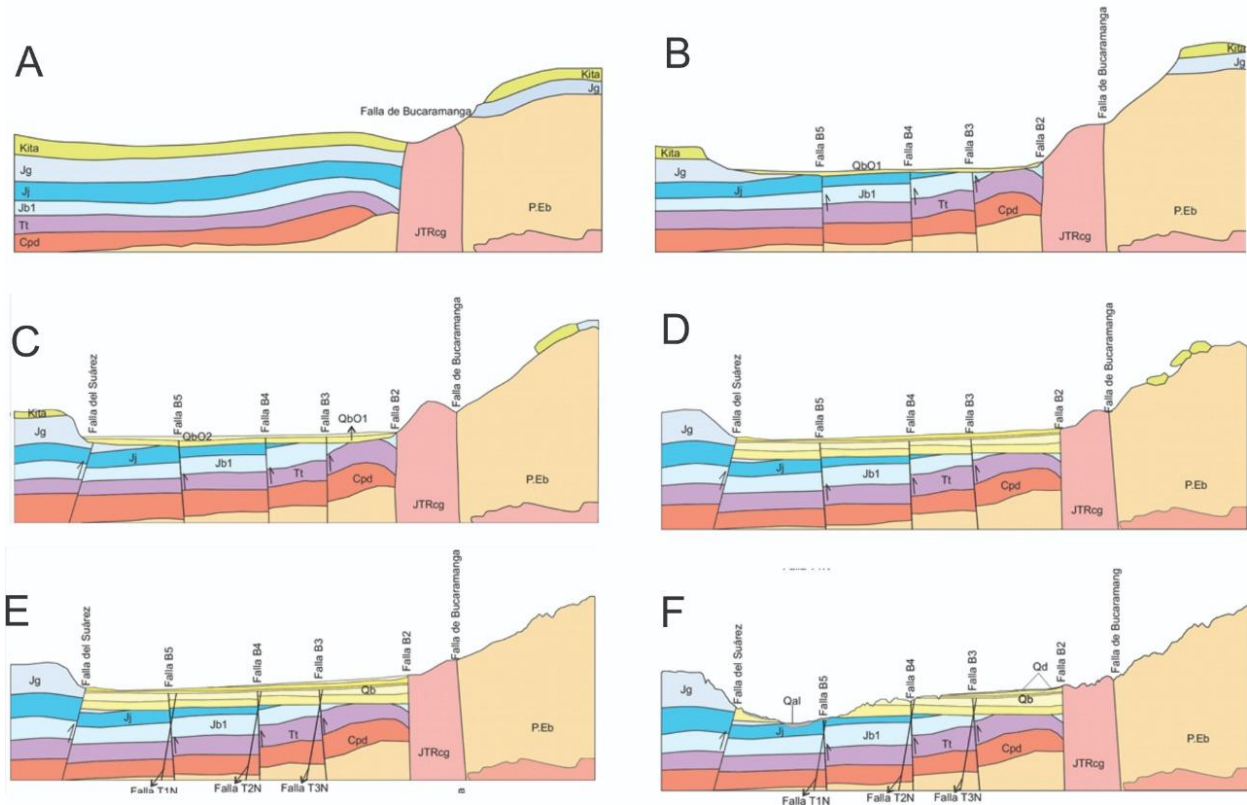
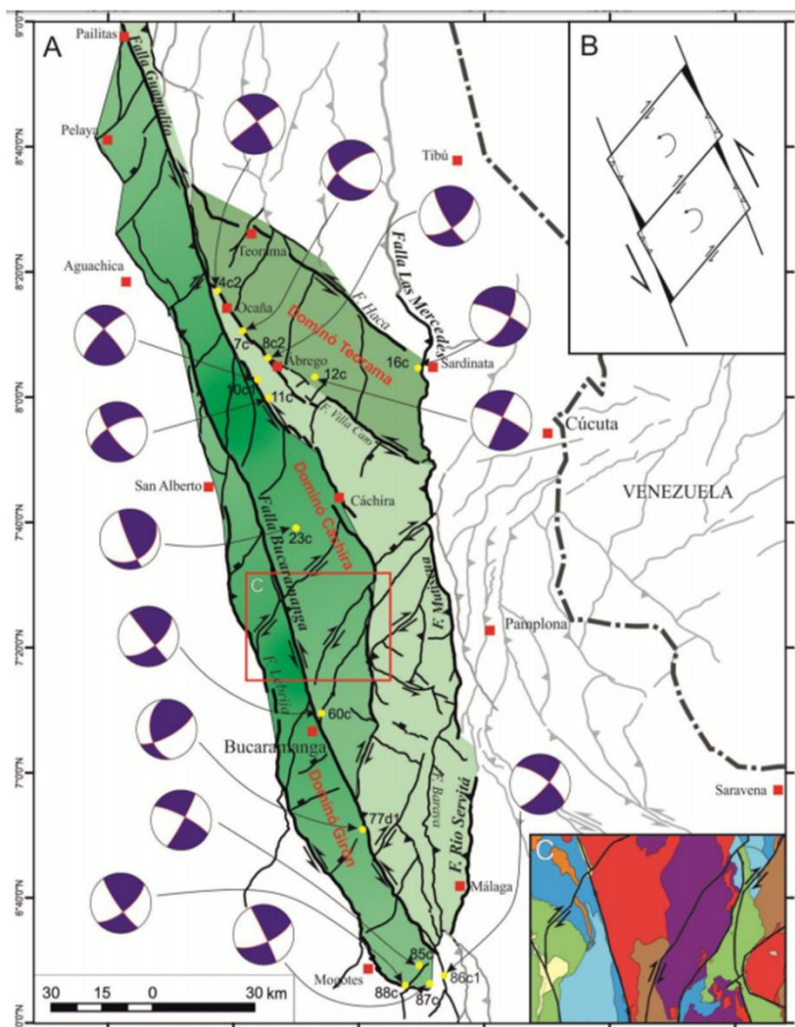


Figura 13. Evolución estructural y sedimentológica de la depresión tectónica de Bucaramanga. A) Primera fase de deformación Mioceno-Plioceno. Inicio de la depresión tectónica de Bucaramanga con predominancia de actividad del sistema de fallas de Bucaramanga. B) Segunda Fase. Inicio de la depositación de la formación Bucaramanga, segmento Órganos Inferior (QbO1), continua actividad del sistema de fallas de Bucaramanga. C) Tercera Fase. Continua depositación de la formación Bucaramanga, segmento Órganos Superior (QbO2) con actividad de los sistemas de falla de Bucaramanga y Suarez y probable cambio en la red de drenaje y/o condiciones climáticas que afectaron la fuente de los detritos. D) Cuarta fase. Continua depositación de la formación Bucaramanga, depositación del segmento Gravoso (QbG) y el segmento Finos (QbF), con un cambio en las condiciones hidroclimáticas y de actividad sísmica. E) Quinta fase. Culmina depositación de la formación Bucaramanga con la depositación del segmento Limos Rojos (QbLR) probablemente asociado a la actividad preponderante del sistema de falla transversales asociadas al sistema de fallas del Suarez, comprobable desplazamiento de decenas de metros de las terrazas de la falla de Bucaramanga y un cambio en la dirección de los ríos principales (Suratá, Frío y de Oro) de NE-SW a E-W y SE-NW con basculamiento hacia el norte de la depresión, conformándose el río Lebrija al NW de la depresión tectónica por la confluencia de los ríos Suratá y de Oro, iniciándose la erosión de la llamada terraza de Bucaramanga con un primer gran deslizamiento en el norte y en la escarpa occidental donde las nacientes quebradas de Chitota, Zanjón de Regadero, Picha, Cuyanita, etc. Fueron disectando los depósitos hasta alcanzar los niveles de las rocas y/o depósitos más antiguos. F) Sexta fase. La erosión continua y la dinámica de las corrientes además de la actividad antrópica fueron dando al área su conformación actual, generándose los depósitos aluviales, antiguos, recientes y los coluviones: Órganos removido, Terrazas aluviales, y rellenos. En esa etapa hay evidencias de actividad de los sistemas de fallas transversales. Tomado de Clavijo y Vargas (2017)

(Velandia Patiño, 2017) en su tesis doctoral, propone una estructura en flor positiva y simétrica de Bucaramanga, basado en las fallas paralelas de Bucaramanga, como principal, Guamalito al E y Lebrija al W a las cuales le asigna una cinemática sinistral con componente inverso, apoyado en los tensores de esfuerzos asociados a estas fallas, desarrollados en su trabajo, que confirman el predominio de la transcurrancia pura y que en conjunto configuran un sistema transpresivo. Además, deduce para el tramo principal de la falla de Bucaramanga un movimiento de entre 18 y 30 km para dicho desplazamiento sinistral. Asimismo, menciona una serie de fallas en dirección NNE de movimiento dextral, ubicadas entre las fallas mayores de la estructura en flor. De esta manera, el autor propone para dicha estructura en flor un modelo de dominós transpresivos (**Figura 14**), en donde las fallas internas, secundarias y confinadas entre las fallas mayores presentan cinemática contraria (dextral). De acuerdo al autor el modelo responde a la cizalla simple que genera principalmente un tensor regional W-E con azimuth aproximado de 95° . Dichos dominós los nombra como dominó Cáchira entre las fallas de Bucaramanga y Guamalito, y dominó Girón entre las fallas de Bucaramanga y Lebrija, este último coincide con la zona de estudio de la presente investigación. Por otro lado, basado en un estudio de termocronología de baja temperatura en apatitos y circones, calcula una tasa promedio de exhumación de 0.3 y 0.4 km/Ma para la falla de Bucaramanga y asegura que el pulso más reciente por reactivación se produce hace unos 400.000 años.



7. Resultados

7.1 Inspección de Campo

La Inspección de campo realizada en el área de estudio se basó en los lineamientos observados en las aerofotografías adquiridas en el IGAC, imágenes satelitales, Modelos Digitales de Elevación (DEM) y en las fallas propuestas por los diferentes autores anteriormente mencionados, especialmente las fallas cartografiadas en los mapas geológicos de la plancha H12 (Ward, y otros, 1973), el “Mapa Morfotectónico del Sistema de Fallas Bucaramanga” de (Diederix, Hernández Moreno, Torres Jaimes, & Botero Santa, 2008) y los mapas geológicos de la “Zonificación Sismogeotécnica Indicativa Del Área Metropolitana De Bucaramanga” realizada por el (INGEOMINAS, 2001), (INGEOMINAS, 2006) (INGEOMINAS, 2009).

Se enfatiza que para este trabajo y en el control de campo realizado se basa en la toma de datos estructurales como estarías o espejos de falla, diaclasas, y datos de estratificación cercanas los sistemas de fallas presentes en la zona de estudio, donde fueron realizadas 124 estaciones de trabajo las cuales se listan en la tabla siguiente (Tabla 1) con la respectiva información de geolocalización en el sistema de coordenadas planas MAGNA-SIRGAS Zona Bogotá y el mapa de estaciones correspondiente (Figura 15).

Tabla 1.
Estaciones de campo del área de estudio

ESTACIÓN	COORDENADAS	
	NORTE	ESTE
E001	1282455	1105925

E002	1284841	1105381
E003	1284911	1105421
E004	1284267	1105122
E005	1285123	1105665
E006	1284282	1104711
E007	1282942	1104277
E008	1283745	1104857
E009	1283846	1104859
E010	1283850	1104860
E011	1283902	1104886
E012	1284027	1104823
E013	1285448	1103918
E014	1283458	1104046
E015	1283464	1104036
E016	1285377	1103891
E017	1283417	1104965
E018	1283522	1104974
E019	1284430	1105788
E020	1284445	1105770
E021	1284457	1105718
E022	1284546	1105708
E023	1284629	1105730
E024	1284651	1105736
E025	1272299	1099202
E026	1272227	1099221
E027	1270719	1098348
E028	1270880	1098423
E029	1271642	1098228
E030	1271791	1098114
E031	1271725	1097934
E032	1271624	1098754
E033	1272842	1099057
E034	1273121	1099296
E035	1276414	1099633
E036	1276816	1099598
E037	1277394	1099791
E038	1277412	1099763
E039	1277416	1099751
E040	1277766	1099922
E041	1277984	1100038
E042	1278452	1100215

E043	1280743	1101361
E044	1281187	1100600
E045	1282178	1100079
E046	1282089	1100159
E047	1274648	1099117
E048	1274644	1099114
E049	1274639	1099113
E050	1274632	1099108
E051	1274625	1099104
E052	1274612	1099102
E053	1274605	1098998
E054	1274601	1098995
E055	1274598	1098993
E056	1274596	1098991
E057	1283861	1105968
E058	1284070	1106076
E059	1284792	1105260
E060	1284900	1105362
E061	1284912	1105371
E062	1284925	1105379
E063	1284889	1105419
E064	1284933	1105437
E065	1285328	1105320
E066	1285439	1105333
E067	1285439	1105334
E068	1285269	1105398
E069	1285270	1105400
E070	1283946	1104898
E071	1283966	1104893
E072	1283944	1104897
E073	1283922	1104895
E074	1283903	1104890
E075	1283880	1104882
E076	1283863	1104875
E077	1274715	1099945
E078	1274312	1100079
E079	1276107	1099669
E080	1285362	1104926
E081	1284900	1105285
E082	1284888	1105288
E083	1284886	1105298

E084	1284894	1105292
E085	1284910	1105300
E086	1284932	1105284
E087	1284922	1105287
E088	1284921	1105312
E089	1284912	1105328
E090	1284919	1105368
E091	1284926	1105376
E092	1284927	1105377
E093	1284328	1105380
E094	1284942	1105392
E095	1284945	1105392
E096	1284949	1105393
E097	1284952	1105394
E098	1284954	1105396
E099	1284956	1105397
E100	1284957	1105398
E101	1284957	1105400
E102	1284958	1105401
E103	1284961	1105405
E104	1283119	1105311
E105	1283119	1105304
E106	1283179	1106262
E107	1283201	1106213
E108	1283056	1106122
E109	1283390	1106116
E110	1283241	1105002
E111	1283160	1105103
E112	1285562	1103870
E113	1285644	1103364
E114	1285970	1103929
E115	1286035	1103971
E116	1274641	1099106
E117	1273221	1099252
E118	1272846	1098928
E119	1272841	1098943
E120	1272401	1099428
E121	1272206	1099369
E122	1271556	1100422
E123	1275806	1099602
E124	1275912	1099595

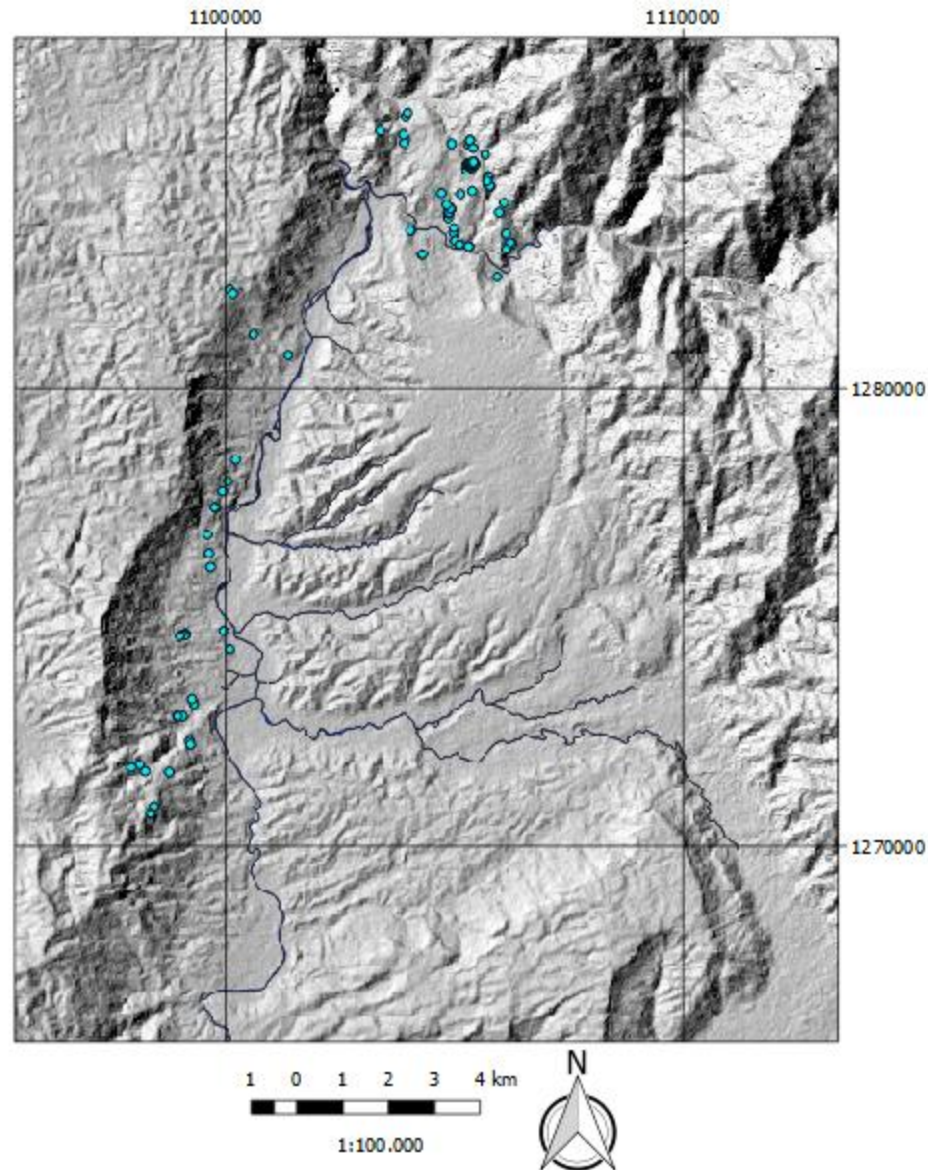


Figura 15. Mapa de estaciones del área de estudio

7.2 Análisis de Datos Estructurales

El área estudiada fue dividida en dos zonas (**Figura 16**) en las que se concentraron los datos principalmente de planos estriados y diaclasas. Dichas zonas fueron diferenciadas basados en la asociación estructural de los datos tomados con las fallas principales, así como su ubicación dentro

del área metropolitana de Bucaramanga. De esta manera, se nombró como zona norte a la región en la que se reunieron datos asociados a la falla Bucaramanga en dicho sector de la ciudad y como zona occidental a la región en la que se encontraron datos asociados a la falla Suarez en las inmediaciones del municipio de Girón, sobre el escarpe o cuchilla de Palonegro. Los datos serán presentados en tablas Excel y registros fotográficos cuando corresponda. Además, fueron analizados a partir de diagramas rosas en el software Stereonet, para los datos de diaclasas y análisis de esfuerzos en el software Win-Tensor utilizando el método de R. Dihedron, R. Optimo y círculos de Mohr para los planos estriados.

7.2.1 Zona Norte. Esta zona como se dijo anteriormente se encuentra en el norte de la ciudad y está delimitada por el escarpe de la virgen y el barrio colorados. Los datos recolectados se encuentran principalmente en la cantera de cementos de CEMEX y la planta de tratamiento de agua, en desarrollo, Angelinos de la AMB, así como en los alrededores de la vereda del mismo nombre. En menor proporción se encuentran datos sobre la vía a Rionegro, el escarpe de la virgen en las cercanías de Bavaria, en el barrio Colorados y en el barrio Villa helena. En la cantera de cementos de CEMEX los datos se encontraron sobre la formación Diamante, aprovechando su explotación en la que se encontraron numerosos planos estriados. Por su parte, en la Planta Angelinos los datos se localizan principalmente sobre rocas de la Formación Tiburón y Girón en las que se tomaron planos diaclasados y estriados.

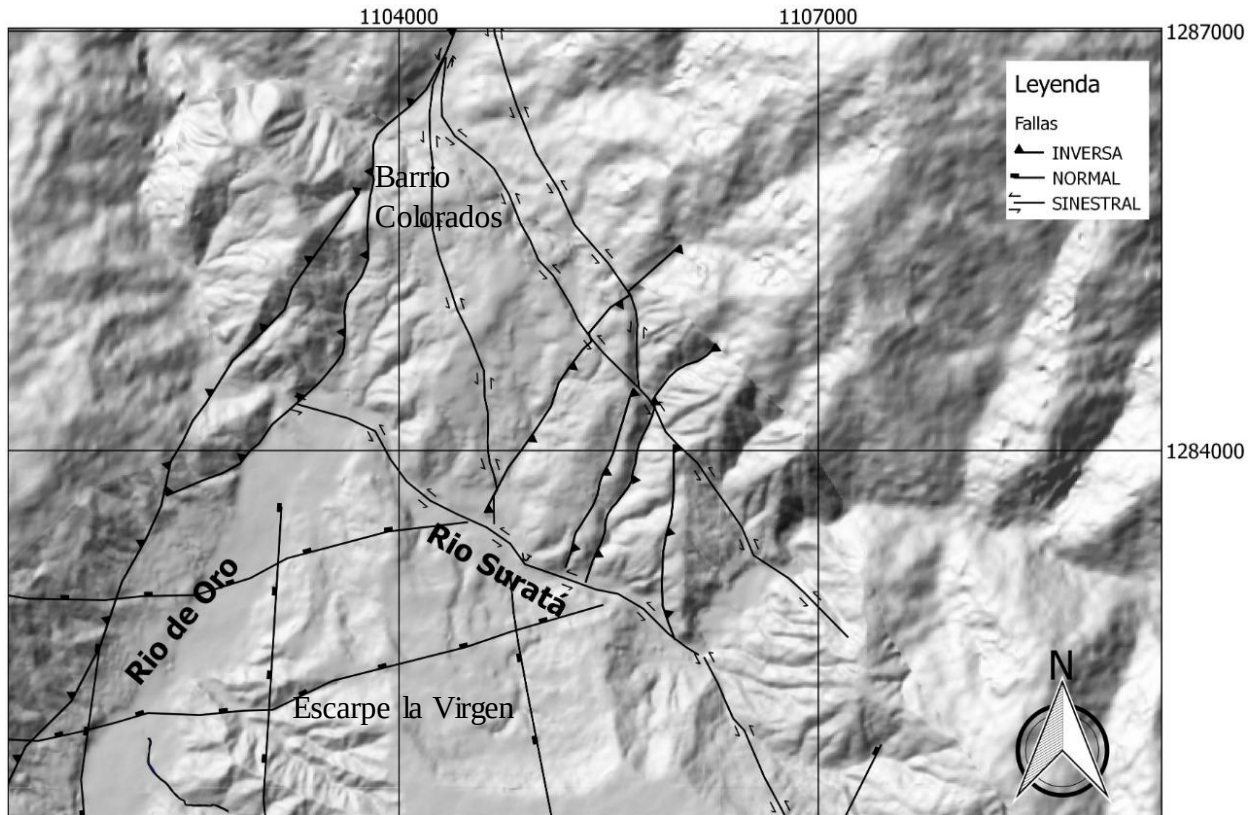
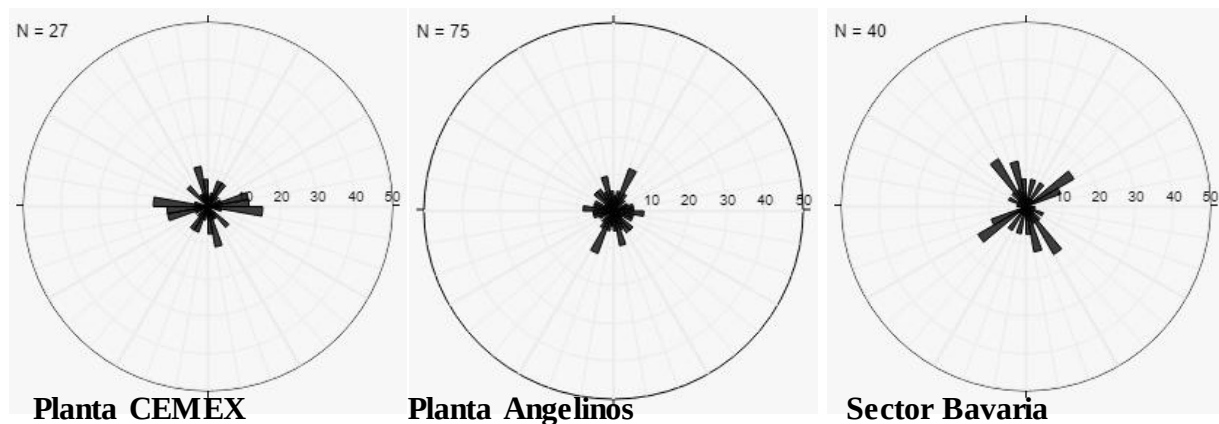


Figura 16. Zona norte del área de estudio.

7.2.1.1 Diaclasas. En total, para esta zona, fueron tomados 191 datos de diaclasas repartidos de la siguiente manera: 27 datos tomados en la cantera de cementos CEMEX, en la Planta Angelinos se midieron un total de 75 planos diaclasados, 23 datos tomados sobre la vía que conduce a Bavaria, 40 diaclasas medidas en el barrio colorados y 26 en el barrio Villa helena (Figura 17).

Dichos datos se graficaron y analizaron en el software Stereonet con la ayuda de diagramas rosa que facilitan, de manera visual, el reconocimiento de las principales direcciones de diaclasamiento relacionadas con los principales sistemas de fallas. En CEMEX se logra apreciar dos orientaciones bien definidas. Una en dirección NNW que puede estar asociada a la falla Bucaramanga y otra en dirección WNW posiblemente asociada a las fallas transversales presentes en el área de

Bucaramanga. En la Planta Angelinos se observa una orientación clara en dirección N25E de fallas inversas que pueden ser estructuras relacionadas a la actividad de la falla Bucaramanga y otra de menor importancia en dirección N15W nuevamente relacionada con la falla Bucaramanga. En el sector de Bavaria se observan dos orientaciones principales, una dirección N60E asociada al sistema de fallas transversales de cinemática normal y una dirección N40W que podría estar asociada a un sistema de fallas que cortan la terraza de Bucaramanga de NNW-SSE. Más al norte en el barrio Colorados, de nuevo son manifiestos dos orientaciones principales en dirección N40E y N50W en donde la primera puede estar relacionada a la falla Suarez y la otra a la falla Bucaramanga. Finalmente, en el barrio Villa helena se evidencia una orientación en dirección N70W coherente a la falla Chitota que reorienta el curso del rio Suratá y posiblemente ligada a la falla Suratá una orientación en dirección N40E.



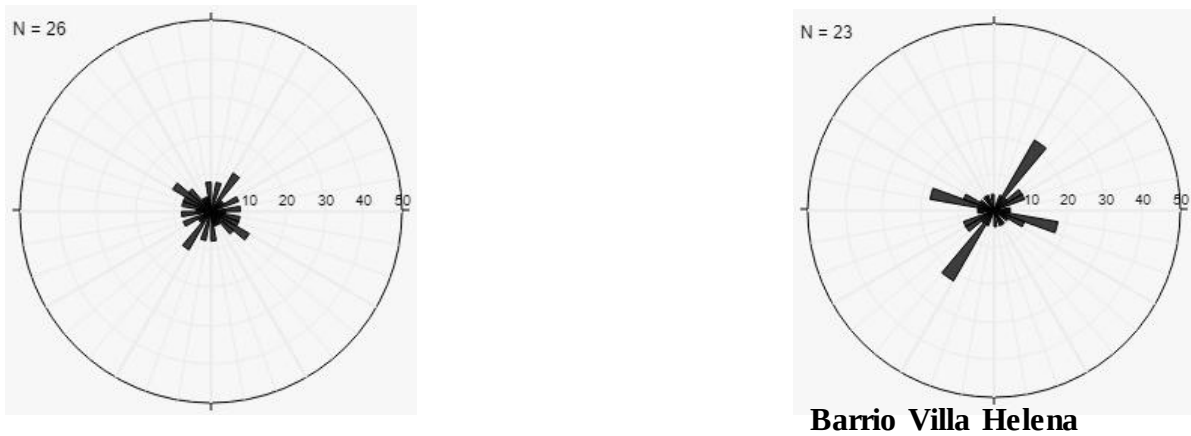


Figura 17. Diagramas rosa para los datos de diaclasas en la zona norte del área de estudio (orientaciones en azimuth de rumbo)

7.2.1.2 Estrías. Los datos de planos estriados fueron agrupados en el sector del barrio Villa Helena, en el Sector Bavaria y por último se decidió agrupar todos los datos de la zona norte bajo el mismo tensor de esfuerzos para observar su relación con la falla de Bucaramanga. Estos datos fueron procesados y analizados con la ayuda del software Win-Tensor. Hay que resalta, que fue necesario depurar los datos con el método PBT y a continuación fueron procesados con R. Dihedr y luego con R Optimo.

De acuerdo a las direcciones mostradas en el tensor de esfuerzos obtenido en el sector del barrio Villa Helena (**Figura 18**), se pueden observar que los datos se acopian en dos orientaciones claras. Una orientación NNW y otra orientación NW. La primera es coherente con la dirección de la falla Bucaramanga y la segunda parece corresponder al lineamiento del río Suratá que cambia radicalmente la dirección previa de este. La dirección NW-SE del tensor de esfuerzos puede confirmar lo anterior. De acuerdo a este, los planos relacionados a la falla Bucaramanga muestran el mismo movimiento de rumbo sinestral con componente inversa. De igual manera, los planos vinculados al lineamiento del río Suratá se comportan de manera similar, aunque no muestran un movimiento significativo en la vertical.

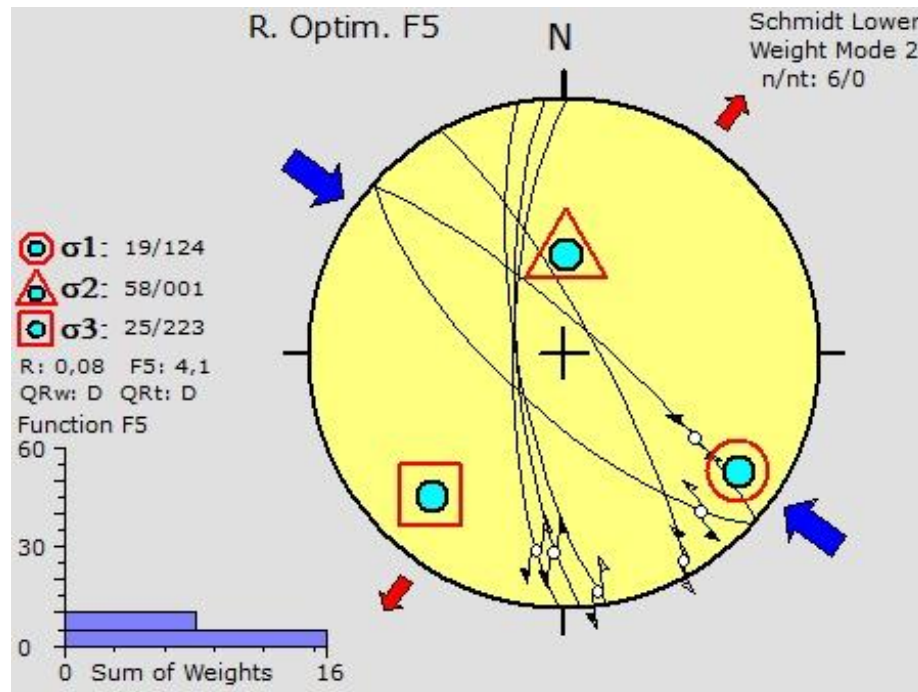


Figura 18. Tensor de esfuerzos obtenido a partir de los datos de estrías encontrados en el sector del barrio Villa Helena.

En el sector Bavaria los datos de planos estriados evidencian dos orientaciones. En dirección NW, asociados al lineamiento del río Suratá y en dirección NE datos encontrados sobre el escarpe la Virgen. Para los primeros, el tensor de esfuerzos de dirección NNW-SSE (**Figura 19**) confirma el movimiento sinistral que parece tener esta falla asociada a dicho río, aunque esta vez muestra un claro movimiento descendente. Por otro lado, los segundos presentan una cinemática normal con algún movimiento lateral derecho.

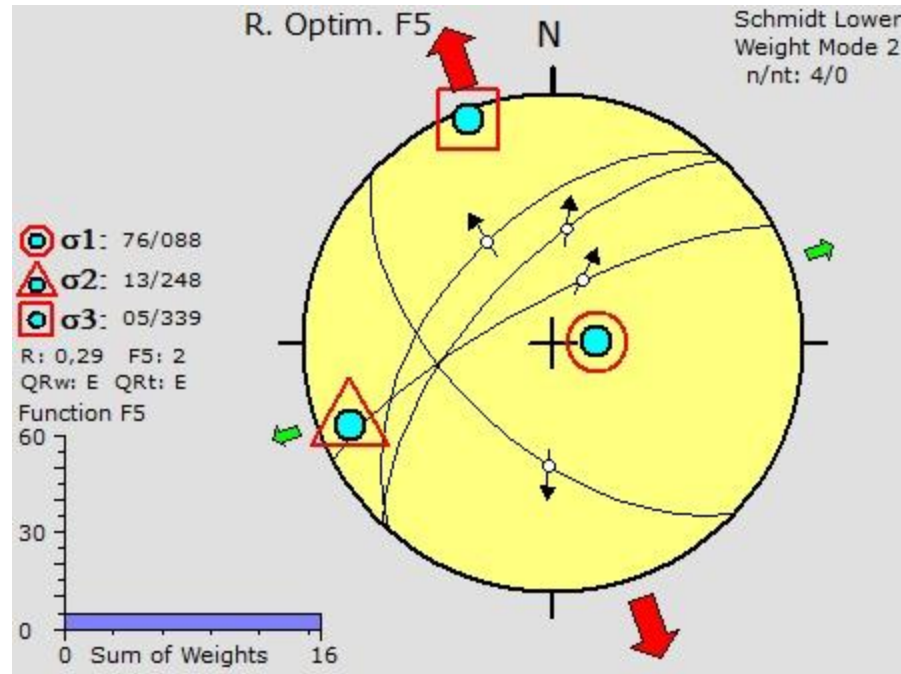


Figura 19. Tensor de esfuerzos obtenido a partir de los datos de estrías encontrados en el sector Bavaria, sobre el escarpe la Virgen.

Finalmente, el tensor de esfuerzos de dirección WNW-ESE (Figura 20) que se obtiene al procesar todos los datos hallados en la zona norte coincide con el tensor de la falla Bucaramanga reportado en investigaciones anteriores. Este concuerda con los tensores obtenidos para las zonas anteriormente dichas, evidenciando (1) una cinemática sinistral con componente inverso para las fallas paralelas a la falla Bucaramanga, (2) confirma una cinemática sinistral con componente normal para la falla que controla el tramo Bucaramanga del río Suratá e (3) indica un movimiento normal con componente dextral para las fallas encontradas en el escarpe la Virgen. Conforme a lo anterior, se propone en este trabajo de investigación nombrar al lineamiento del río Suratá como falla Chitota (en esta localidad, el río Suratá cambia de dirección) de cinemática sinistral con componente normal. Por otra parte, teniendo en cuenta la relación angular entre la falla Chitota y la falla Bucaramanga, así como la cinemática sinistral que comparten, se cree que la falla Chitota corresponde a una estructura riedel de la falla Bucaramanga.

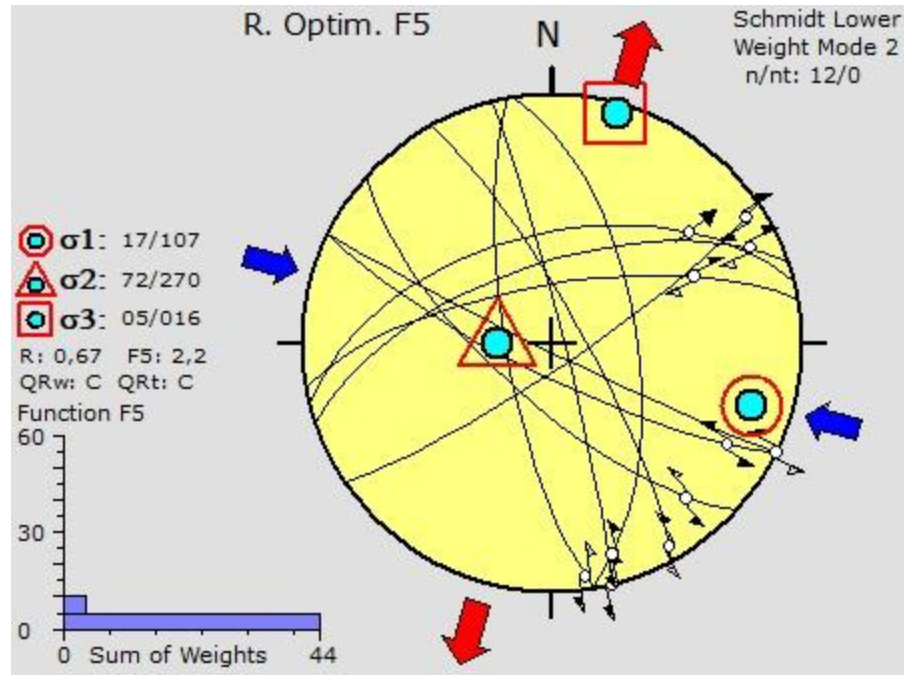


Figura 20. Tensor de esfuerzos obtenido a partir de los datos de estrías encontrados en la zona norte en general.

7.2.2 Zona Occidental. En esta zona como se dijo anteriormente se encuentra ubicada al occidente de la ciudad, en las inmediaciones del municipio de Girón (Figura 21). En este sector se han encontrado una serie de planos de estrías y diaclasamiento principalmente roca del Jurásico (Fm. Girón), datos en depósitos cuaternarios evidenciando tectónica reciente asociada a los sistemas de fallas Suarez y Rio de Oro (sistema de fallas distinto al propuesto por Niño y Vargas 1992 y Diederix 2008), y a unas fallas transversales que estarían afectando la roca de sόcalo que infrayace a la terraza de Bucaramanga. Estos planos de estrías encontrados en esta zona se procesaron y se obtuvieron unos tensores que definen la cinemática de las fallas presentes en la zona.

7.2.2.1 Diaclasas. Para la presentación de los datos de diaclasamiento se divide la zona occidental en 4 sectores, el sector vereda Rio de Oro sobre la cuchilla de Palonegro al nororiente del aeropuerto Palonegro, el sector Chimitá, el sector del Paraíso al noroccidente del barrio con el mismo nombre del municipio de Girón, y el sector de la vereda El Alto. En total en la zona occidental se tomaron 83 datos de diaclasas divididos de la siguiente manera: para el sector vereda Rio de Oro se tomaron 34 datos, en el sector de Chimitá 19 datos, en el sector del Paraíso 18 datos (

Figura 22).

Los datos de diaclasas fueron graficados y analizados con la ayuda del software Stereonet, generando diagramas de rosas (

Figura 22) las cuales facilitan la determinación de las principales direcciones de diaclasamiento relacionadas con los sistemas de fallas.

En la Vereda Rio de Oro se puede apreciar tres orientaciones bien definidas que varían en dirección N5W-N15W, N65W-N75W y N60E-N85E. Las primeras, asociadas al sistema de Fallas NNW-SSE, y las dos restantes relacionadas a los sistemas de fallas transversales a las fallas Bucaramanga y Suarez. En el sector de Chimitá se evidencian dos orientaciones N15W-N25E y N65E-N85E, las primeras direcciones asociadas al sistema de Fallas NNW-SSE y las segundas al sistema de fallas transversales respectivamente.



Figura 21. Zona occidental del área de estudio

En el sector del Paraíso se pueden observar dos orientaciones preferenciales las cuales tienen direcciones de N5W y la segunda con dirección N25E-N55E, dichas orientaciones asociadas al sistema de Fallas NNW-SSE y al sistema de fallas transversales respectivamente. En la vereda El Alto de municipio de Girón se evidencian dos direcciones de diaclasamiento de N35E y N85W ambas asociadas al sistema de fallas transversales.

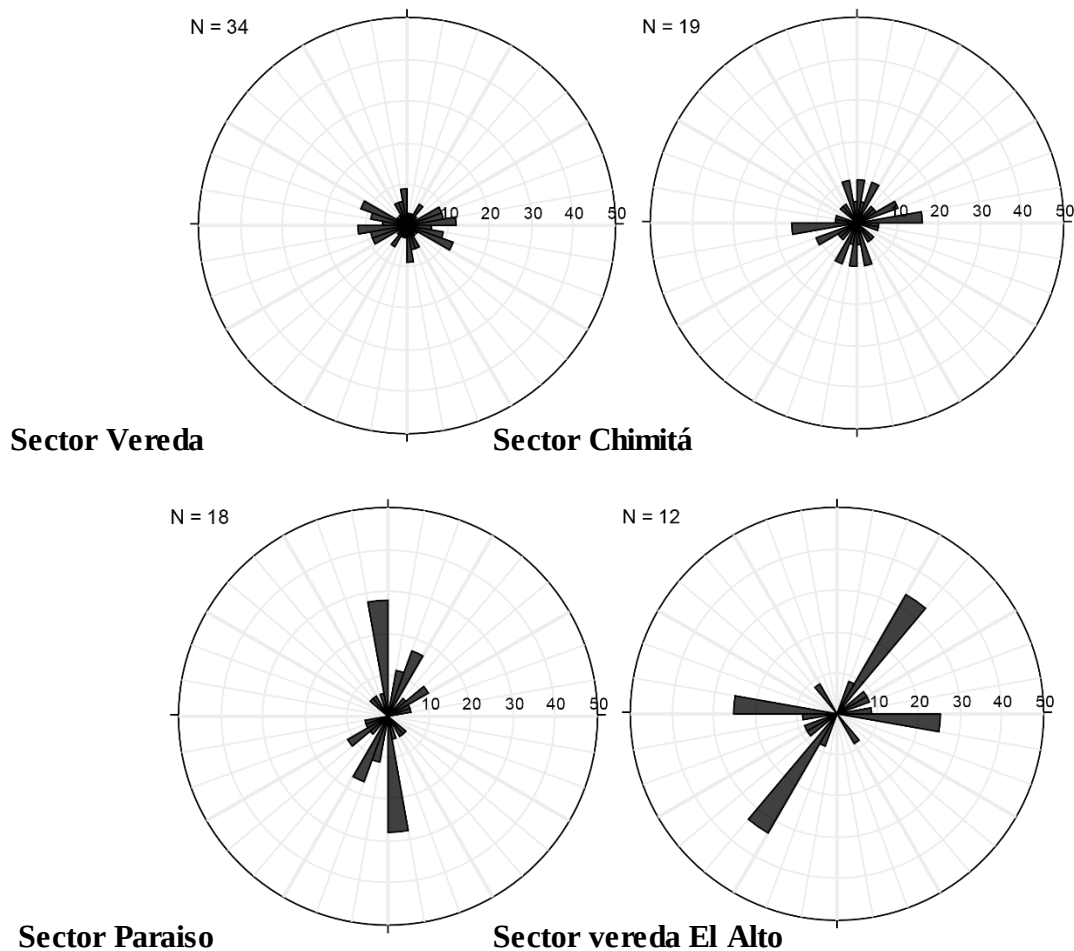


Figura 22. Diagramas rosa para los datos de diaclasas presentes en la zona occidental del área de estudio.

7.2.2.2 Estrías. Los datos de estrías tomados fueron igualmente agrupados teniendo en cuenta la ubicación geográfica y procesada con el software Win-Tensor. Al procesar los datos con el software se depuran los datos y se obtiene un tensor de esfuerzos de cinemática rumbo deslizante dextral (Figura 23), el cual guarda una relación estrecha con la falla del Suarez y al sistema de fallas casi “paralelas” definidas en este trabajo. Según las observaciones de campo, geomorfología y análisis de datos y el tensor, el sistema de fallas “paralelo” a la falla Suarez obtenido se les define una cinemática normal con rumbo dextral.

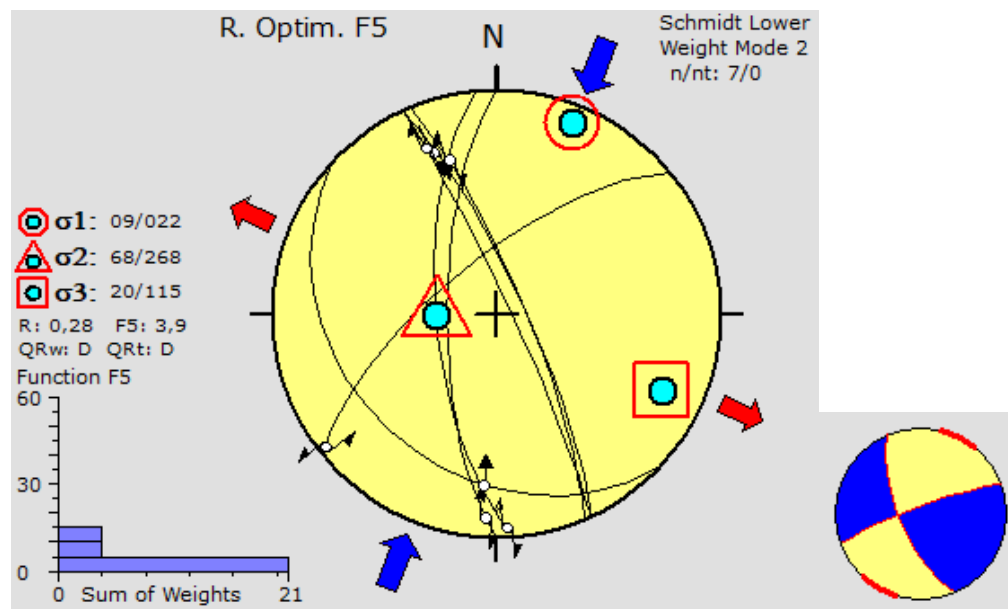


Figura 23 . Tensor de esfuerzos obtenido a partir de los datos de estrías encontrados en la zona occidental.

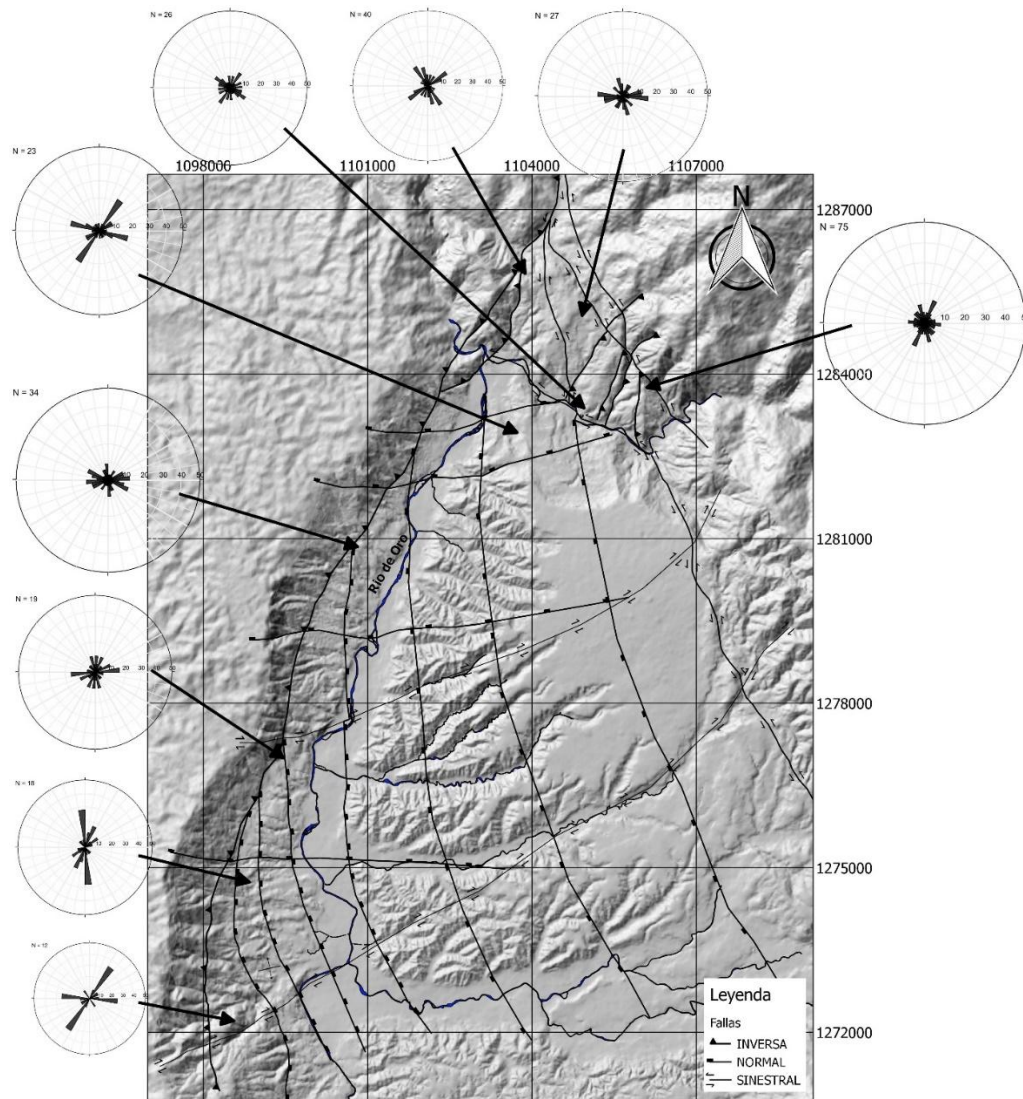


Figura 24. Diagramas rosas obtenidas en cada sector del área de trabajo

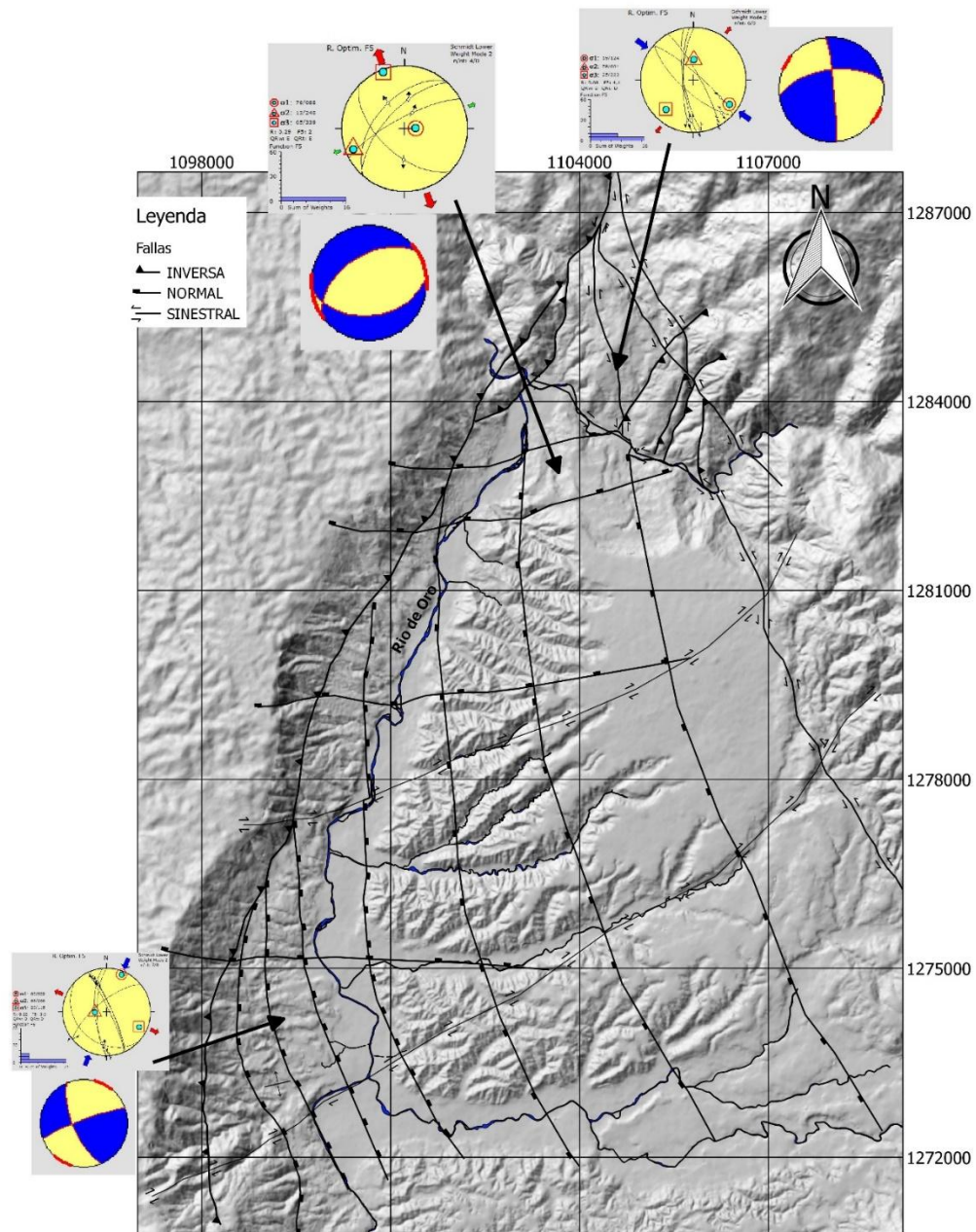


Figura 25. Tensores de esfuerzos obtenidos en el área de trabajo.

8. Discusiones

8.1 Sistemas de fallas

8.1.1 Fallas del sector norte. El sistema de fallas de Bucaramanga ha sido estudiado ampliamente por muchos autores, los cuales ya han definido a la falla como un sistema con cinemática rumbo deslizante sinistral con una componente inversa, la cual ha levantado el macizo de Santander. Por tal motivo no nos referiremos a la falla Bucaramanga, salvo a las fallas menores asociadas a la falla Bucaramanga presentes en la zona más norte de la ciudad. En cercanías a la planta de Angelinos se observan unas fallas con dirección N25E y N-S que corresponden a fallas inversas, producto de la actividad de la falla Bucaramanga. Propiamente en este sector de Angelinos se aprecia una alta actividad tectónica presentando una gran complejidad para la diferenciación de las unidades litológicas presentes en el sitio.

Por otro lado, las fallas presentes en cercanías a la planta de Bavaria, en los barrios Kennedy y Colseguros de cinemática normal, son explicadas mediante el tensor de esfuerzos encontrado para la zona, producto la extensión en la dovela, además de la evidencia física donde se aprecia los depósitos del miembro Órganos al lado de roca de la Fm Girón (Figura 26). Estas fallas han afectado los depósitos cuaternarios (miembro órganos) (Figura 27), los cuales presentan deformaciones, estrías y fracturamiento. Pero en depósitos más recientes no parece haber mucha influencia de las fallas o evidencia de neotectónica.



Figura 26. Afloramiento de Fm. Girón puesto en contacto con depósitos del miembro Órganos debido a fallamiento normal.



Figura 27. Afloramiento de miembro órganos afectado por neotectónica en el barrio Kennedy en cercanías al puente las olas.

Para el sector norte también se evidencia una falla que pone en contacto las litologías de la Fm. Girón según Navas (1962), pero que se encuentra cubierta por depósitos cuaternarios. Aun cubierta la falla se determina el trazado según la morfología mostrada en imágenes satelitales y DEM, y

con evidencia tanto de diaclasamiento como de estrías asociadas a esta falla junto con el respectivo tensor, que justifica el trazado de la falla. Finalmente, la falla que reorienta el curso del río de Suratá, llamada falla Chitota en este trabajo, es evidenciada según los datos de diaclasamiento, estrías de falla y la evidente característica de control que ejerce sobre el río, como una falla sinistral de componente normal, asociada a la falla Bucaramanga como una estructura Ridel. Esta falla fue anteriormente definida por de Porta (1959) como una falla normal, la cual divide la dovela de Bucaramanga en dos bloques.



Figura 28. Evidencia de falla encontrada en la salida a Rionegro, en la vía que conduce al barrio Colorados.

8.1.2 Sistema de fallas transversales. Según los datos adquiridos en campo de diaclasa, análisis de imágenes satelitales, lineamientos, y morfología, se identifica una serie de fallas con orientación aprox. W-E y WSW-ENE y cinemática normal con componente dextral, estas estructuras tienen relación con las fallas de Ruitoque y los Santos (los montes), las cuales serían las responsables de generar el inicio del espacio de acomodación para la deposición de los sedimentos que conforman actualmente la terraza de Bucaramanga. Es importante resaltar que estas estructuras pueden estar relacionadas con la falla de Bucaramanga siendo estas fallas antitéticas a la falla Bucaramanga, pues estas se presentan con una cinemática dextral y formando

un ángulo aproximadamente de 80 grados con respecto a la falla Bucaramanga. Por otro lado, al ir avanzando hacia el norte de la terraza las fallas con orientación aproximada W-E tienden a ser fallas netamente normales, en especial las fallas presentes en los barrios Colseguros y Kennedy del norte de Bucaramanga.

8.1.3 Sistema de fallas NNW-SSE. Este sistema de fallas evidenciado principalmente en la cuchilla o escarpe de Palonegro el cual geomorfológicamente y con datos de diaclasas, estrías de falla y evidencia de afloramientos de roca de la Fm. Girón y cuaternarios, se interpretan para toda la zona de estudio. Las fallas más cercanas a la cuchilla de Palonegro presentan una cinemática de tipo normal con buzamiento y vergencia al E (Figura 29, Figura 30, Figura 31), mientras que las fallas de este sistema más cercanas a la falla Bucaramanga se interpretan de tipo normal con buzamiento al W. Esta configuración de las fallas produce un escalonamiento en los bloques internos de la dovela de Bucaramanga la cual es originada por una extensión local en la zona de Bucaramanga; Y al igual que el sistema de fallas transversales se generan debido a la extensión presentada en la dovela de Bucaramanga provocando un mayor espacio para la deposición de los sedimentos de la terraza de Bucaramanga.

En la inspección de campo en el sector occidental se pudo evidenciar el carácter inverso de la falla Suárez (Figura 32) en la vereda La Alta del municipio de Girón, donde se expone sin lugar a dudas el cabalgamiento con un ángulo cercano a los 40° suprayaciendo un nivel de brechamiento.



Figura 29. Evidencia de fallamiento normal encontrada en la estación E121.



Figura 30. Evidencia de fallamiento normal en depósitos cuaternarios, encontradas en el lote propiedad de Santander. SAS. En la vía al aeropuerto.



Figura 31. Evidencia de fallamiento normal en miembros de la formación Bucaramanga, encontrada al W del barrio La Campiña del municipio de Girón.



Figura 32. Evidencia del cabalgamiento al E de la falla Suárez, encontrada en la vereda la Alta del municipio de Girón

8.2 Modelos Estructurales

En el presente estudio se han recopilado y contrastado los diferentes modelos estructurales que se han propuesto para el área metropolitana de Bucaramanga en donde la mayoría parecen complementarse en lugar de contradecirse, haciendo punto a parte a la propuesta de Velandia (2017) la cual poseía un objetivo más regional que local pero que parece ajustarse, por lo menos de forma local, a lo que se ha podido investigar y analizar en el presente estudio principalmente en lo que respecta a la existencia de fallas transversales de cinemática normal y normal dextral que se encuentran confinadas por las fallas de Bucaramanga y Suárez.

Por una parte, en este trabajo se ha logrado evidenciar de acuerdo al análisis de esfuerzos, que el cambio abrupto en la dirección del río Suratá en las inmediaciones de Chitota probablemente se

deba a una falla de dirección NW de cinemática normal sinistral asociada a la falla Bucaramanga que divide la dovela en un bloque norte, hundido, y un bloque sur, levantado, y que como ya mencionaba De Porta (1959) la diferencia de altura entre estos bloques no sea tan pronunciada en la actualidad por el basculamiento al NW de la terraza de Bucaramanga.

Además, la falla que menciona Navas (1991) la cual divide el bloque norte de la dovela de Bucaramanga y pone en contacto la formación Girón y la formación Diamante también pudo ser argumentada en este trabajo. La falla de carácter normal reportada por Julivert (1958) entre las mesas de Los santos y Ruitoque (Falla Los Monjes), que provoca un hundimiento de la mesa Ruitoque y la falla también de carácter normal reportada por Niño y Vargas (1992) entre la mesa de Ruitoque y la terraza de Bucaramanga (Falla Ruitoque) aunque no fueron objeto de estudio en esta investigación guardan coherencia con las fallas transversales que atraviesan el casco urbano de Bucaramanga definidas en este trabajo (Figura 25) y previamente inferidas por Clavijo y Vargas (2017) (Figura 8). A continuación, se presenta un cuadro comparativo de los principales modelos estructurales para el área de Bucaramanga.

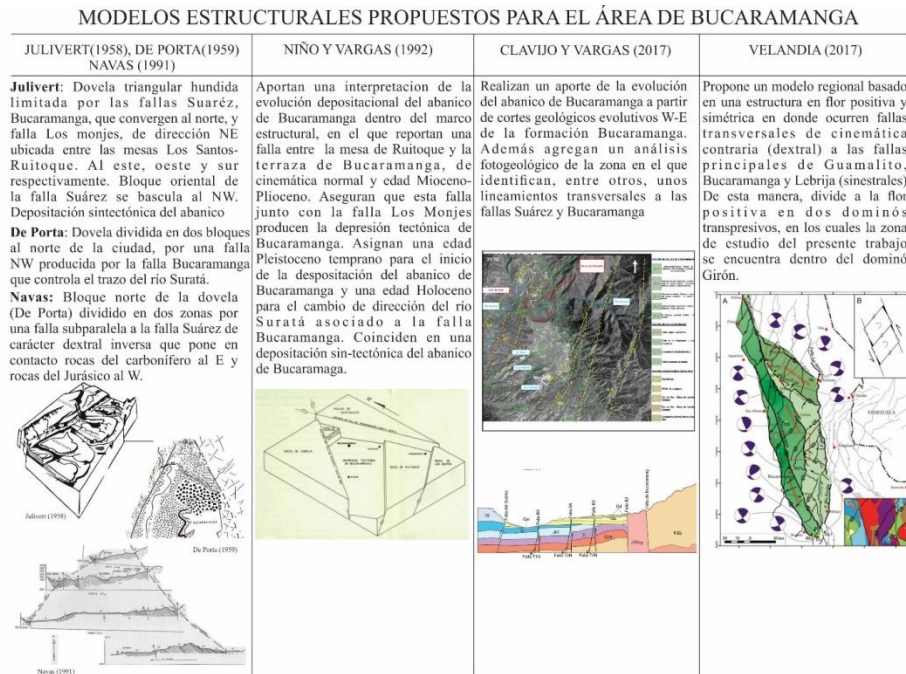


Figura 33. Cuadro comparativo de los modelos estructurales para el área de Bucaramanga

Teniendo en cuenta toda esta recopilación bibliográfica y lo que se pudo constatar en campo y oficina a partir de cortes geológicos y análisis estructural, se propone en este trabajo de investigación que el modelo estructural de la zona de estudio puede ajustarse a un Pull Apart (Figura 34) producido por dos fallas oblicuas entre si (Freund, 1971 en (Allen & Allen, 2013)) (Suárez-Bucaramanga en este caso) en donde el movimiento sinistral de la falla Bucaramanga y el comportamiento dextral, al menos local, de la falla Suárez produce una extensión en la que se forman una serie de fallas transversales (Sistema de fallas de transversales de Bucaramanga) y unas fallas NNW-SSE con cierta curvatura, característica propia de fallas normales (Figura 25) que provocan la apertura de la cuenca y por consiguiente el espacio para la deposición de la terraza de Bucaramanga. Este proceso de formación de la cuenca local de Bucaramanga ya había sido propuesto por (León Silvestre, 1991) aunque no de manera detallada.

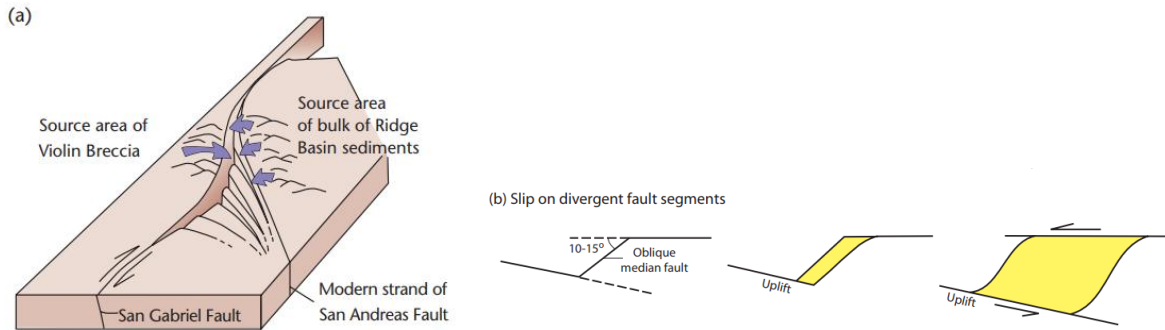


Figura 34. Pull-apart a través de una falla medianamente oblicua y fallas maestras no paralelas. Tenga en cuenta que la compresión y la elevación se producen a un lado del Pull-apart, mientras que en el otro se desarrolla un “espacio” extensional. Tomado de (Allen & Allen, 2013).

8.2.1 Cortes Geológicos.

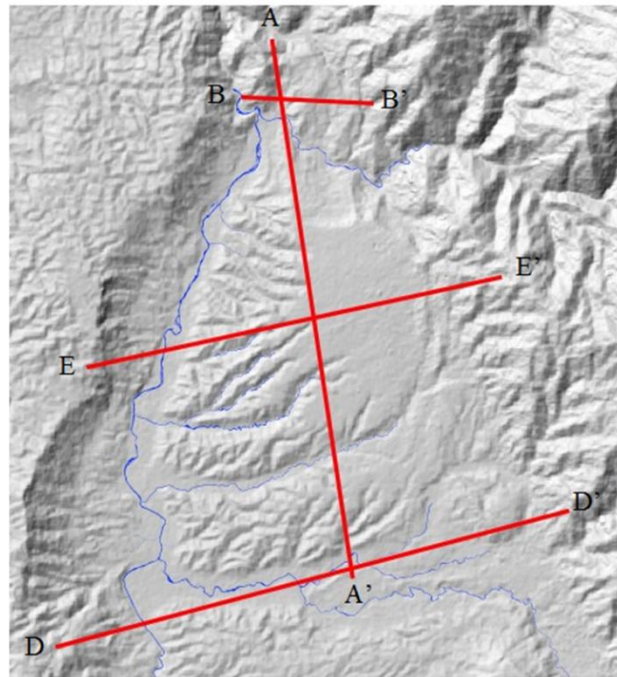


Figura 35. Ubicación de los cortes geológicos realizados en el área de estudio.

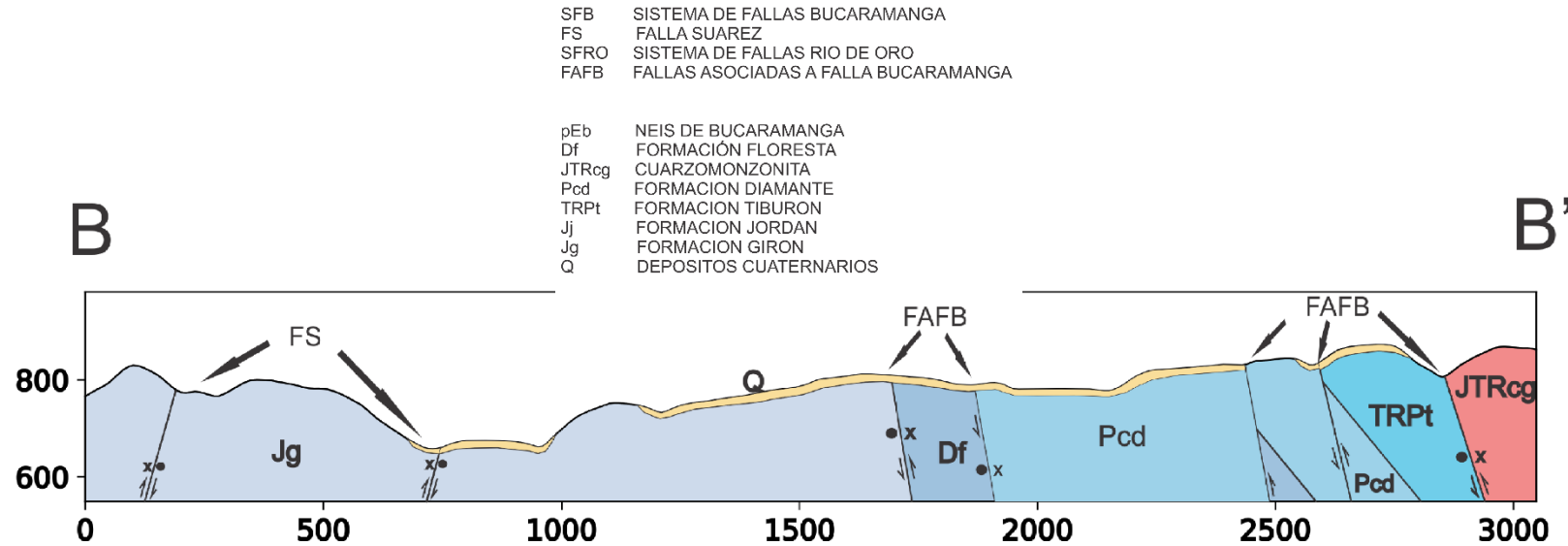


Figura 36. Corte geológico en dirección WNW-ESE del bloque norte de la depresión tectónica de Bucaramanga. Se observan unidades del Paleozoico superior y Mesozoico. Tapada por el cuaternario, se muestra la falla mencionada por Navas (1991) que pone en contacto la formación Girón (occidente) y la formación Diamante (oriente).

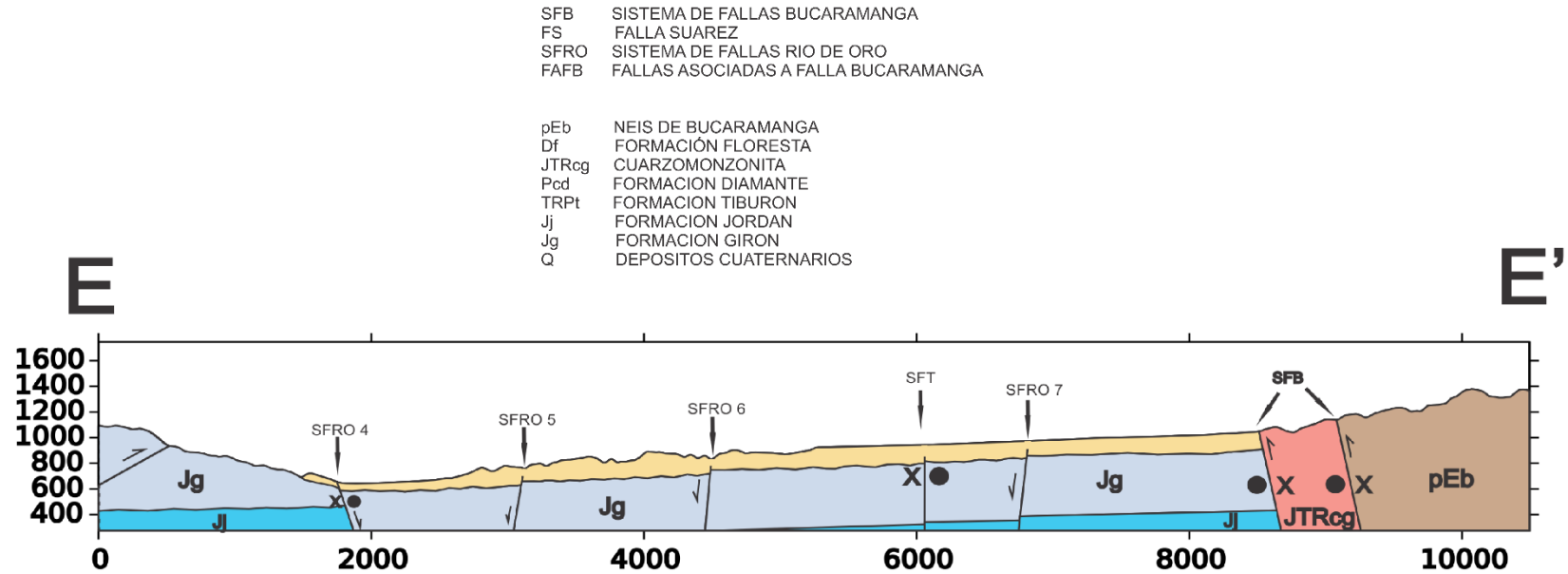


Figura 37. Corte geológico en dirección WSW-ENE del bloque sur de la depresión tectónica de Bucaramanga. Se observa el escalonamiento al W del sistema de fallas de Rio de Oro (SFRO) en la parte central del área de estudio.

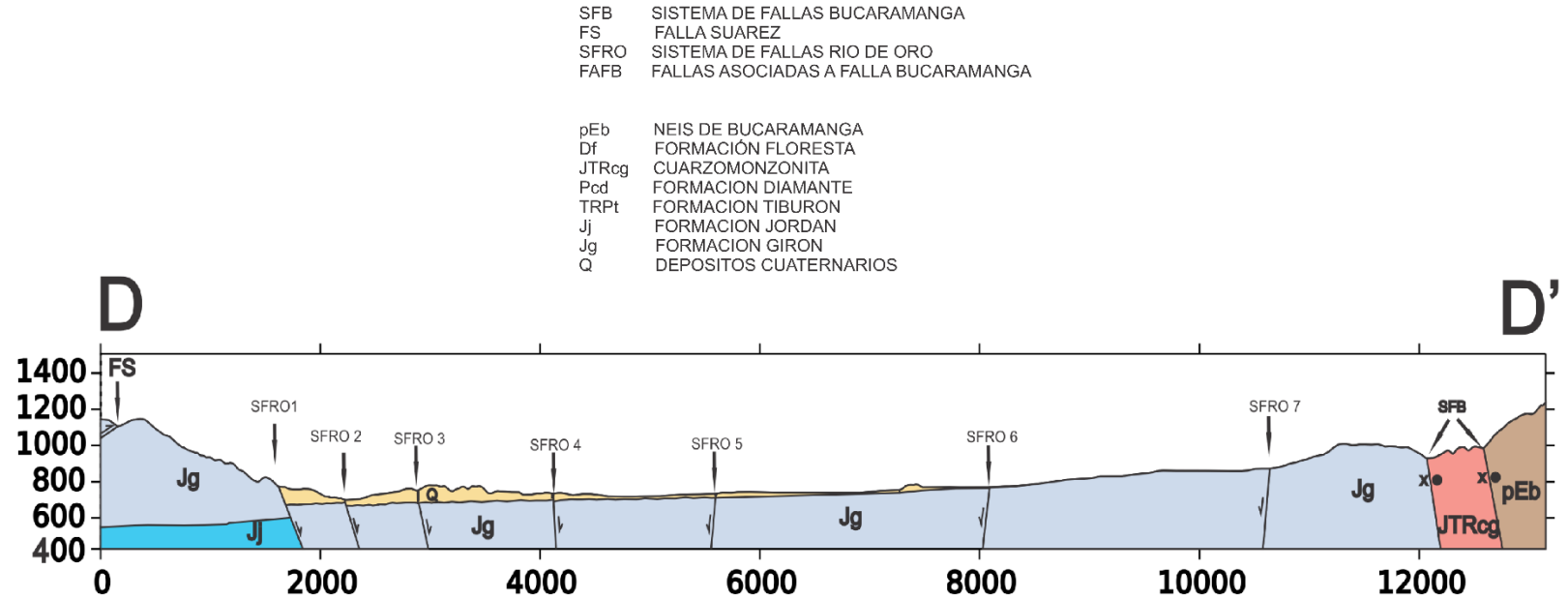


Figura 38. Corte geológico WSW-ENE del bloque sur de la depresión de tectónica de Bucaramanga. Escalonamiento al W del sistema de fallas de Río de Oro (SFRO) en la parte sur del área de estudio

SFB SISTEMA DE FALLAS BUCARAMANGA
 FS FALLA SUÁREZ
 SFRO SISTEMA DE FALLAS RIO DE ORO
 FAFB FALLAS ASOCIADAS A FALLA BUCARAMANGA

pEb NEIS DE BUCARAMANGA
 Df FORMACIÓN FLORESTA
 JTRcg CUARZOMONZONITA
 Pcd FORMACION DIAMANTE
 TRPt FORMACION TIBURON
 Jj FORMACION JORDAN
 Jg FORMACION GIRON
 Q DEPOSITOS CUATERNARIOS

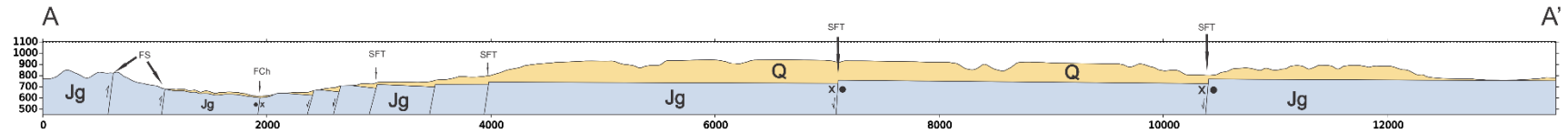


Figura 39. Corte geológico en dirección N-S del área de estudio. Se observa la geometría producida por el sistema de fallas transversales (SFT) de la cuenca pull-apart

8.3 Evolución Geológica y Modelo Estructural

8.3.1 Etapa I Mioceno-Plioceno. La depresión de Bucaramanga está limitada por las fallas Bucaramanga al E, Suarez al W (Figura 40) y la falla de los Santos al S; las dos primeras convergen al norte de la ciudad (Julivert M. , 1958). Esta depresión se asocia al proceso de exhumación del basamento cristalino y a los últimos levantamientos de la cordillera oriental, dando lugar al ascenso del macizo de Santander. Es en ese momento cuando comienza el levantamiento de la plataforma de arrasamiento y el comienzo de la actividad de la falla Suarez. Por la naturaleza transcurrente de la falla Bucaramanga, se producirían las fallas los Santos y Ruitoque, como estructuras relacionadas a esta transcurrencia, dejando durante el levantamiento general de la región de las mesas, un bloque que no se elevaría con la misma rapidez que el resto de la plataforma debido a la extensión dentro de la zona de Bucaramanga, asociadas a la componente de rumbo de la falla Suarez y la actividad rumbo deslizante de la falla Bucaramanga. Esta extensión hacia el SW en el área de Bucaramanga provoca la formación de unas fallas de cinemática normal casi paralelas a la falla Bucaramanga (Figura 41) con buzamiento al W y con cierta curvatura, permitiendo un hundimiento hacia el W de la dovela.

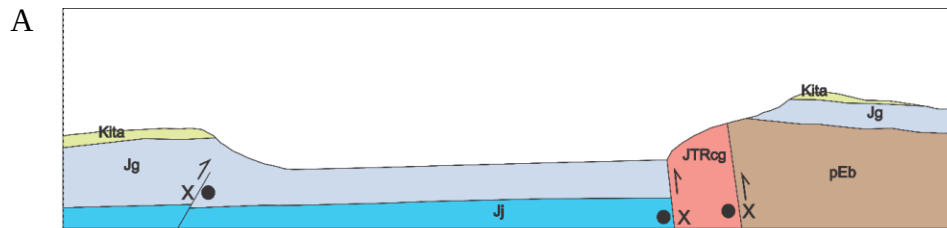


Figura 40. Corte esquemático A de la etapa I, Mioceno – Plioceno

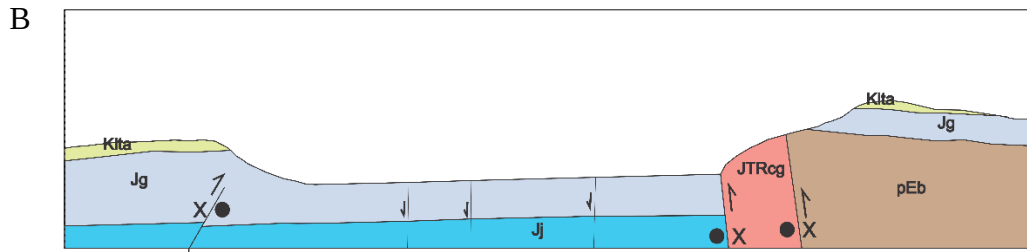


Figura 41. Corte esquemático B de la etapa I, Mioceno – Plioceno.

8.3.2 Etapa II Pleistoceno. En este lapso comienza a llenarse la cuenca con los sedimentos correspondientes al miembro Órganos Inferior (Qbo1) y Órganos Superior (Qbo2) de la formación Bucaramanga (Figura 42), donde es afectado por la tectónica continua de los Andes. Este continuo levantamiento de la cordillera junto a la actividad transcurrente de la falla de Bucaramanga y la componente de rumbo dextral de la falla Suarez provoca una extensión SSE en la zona de Bucaramanga, la cual provoca la aparición de nuevas fallas de tipo normal, dando mayor espacio de acomodación para los sedimentos de la formación Bucaramanga. Posteriormente, producto de la tectónica asociada a la transcurrancia de la falla Bucaramanga, se presentan unas fallas transversales (Figura 43) que cortan la formación Bucaramanga en sentido NE-SW y ENE-WSW con cinemática dextral normal.

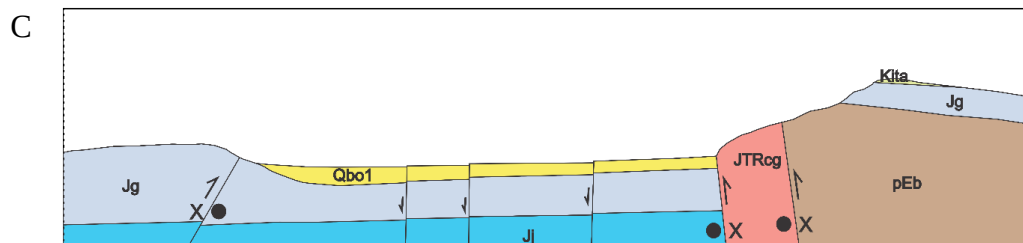


Figura 42. Corte esquemático C de la etapa II, Pleistoceno.

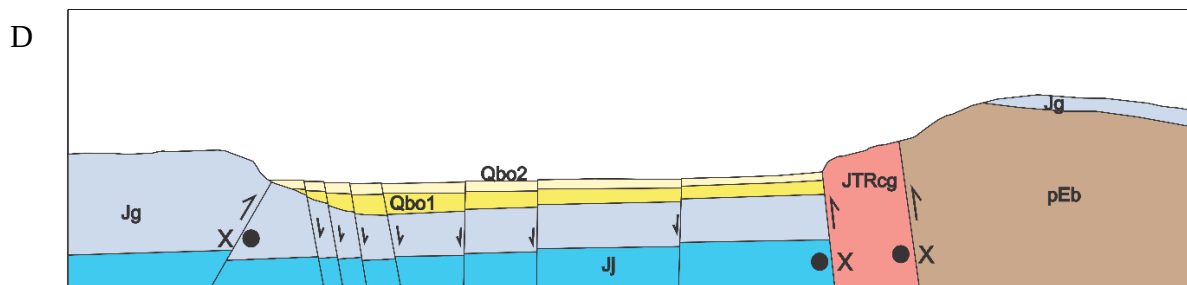


Figura 43. Corte esquemático D de la etapa II, Pleistoceno.

8.3.3 Etapa III Pleistoceno. En este periodo de tiempo continua la sedimentación dentro de la cuenca por nuevos sedimentos que suprayacen a los niveles Órganos inferior y superior, con los correspondientes niveles o miembros Finos (Qbg), Gravoso (Qbg) y Limos Rojos (Qblr) (Figura 44). Posterior a los eventos depositacionales, se cree que hubo un nuevo evento extensivo produciendo la depresión hacia el norte de la ciudad donde es encausado el río Suratá y donde se evidencia tectónica reciente en los depósitos que se preservan en esta parte de la ciudad. Este evento dejaría a la dovela de Bucaramanga dividida en dos bloques debido al escalón de falla de Chitota (escalón mencionado por De Porta, 1959) que modifica drásticamente la dirección del río Suratá de SW a NW.

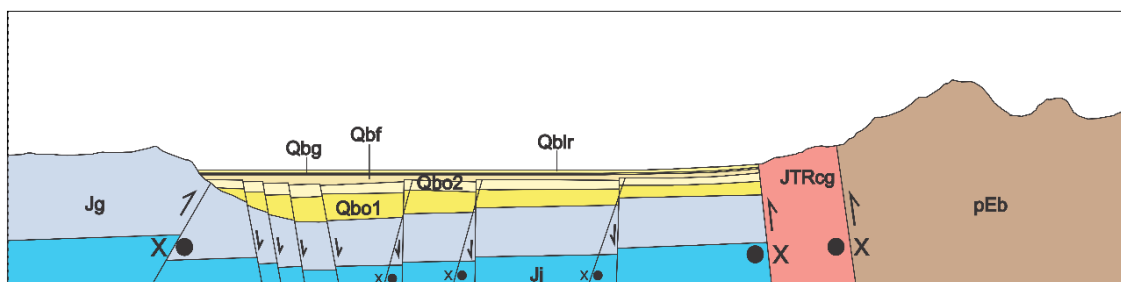


Figura 44. Corte esquemático de la etapa III, Pleistoceno

8.3.4 Etapa IV Holoceno. Finalmente, en el Holoceno se presentaría la erosión retrogresiva y disección en los depósitos de la meseta de Bucaramanga por parte de las quebradas (Figura 45), las cuales están controladas estructuralmente por las fallas transversales mencionadas en este trabajo, dando como resultado la topografía actual de la formación Bucaramanga.

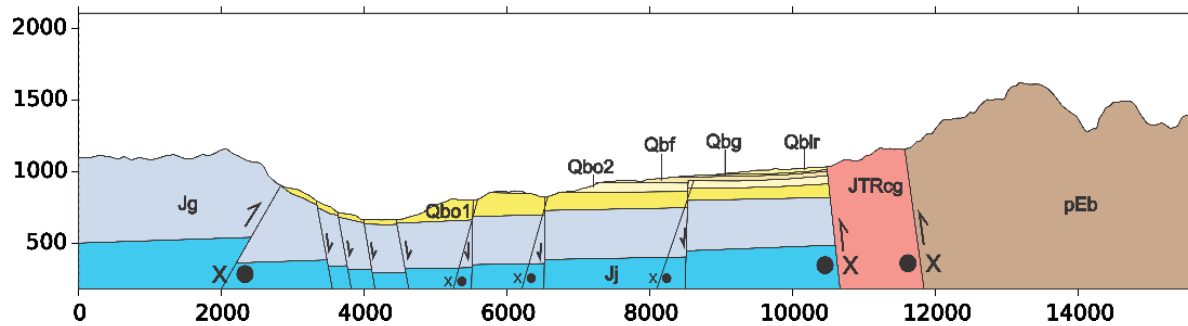


Figura 45. Corte esquemático de la etapa IV, Holoceno.

9. Conclusiones

El lineamiento que controla el cambio en el rumbo del río Suratá, haciendo un codo de casi 90° en los alrededores de Chitota, en el norte de la ciudad de Bucaramanga ha sido nombrado como falla Chitota, de dirección NW y con cinemática de rumbo sinistral y una componente normal. Esta falla se considera como una estructura riedel asociada a la falla Bucaramanga.

La depresión tectónica de Bucaramanga se ha formado en 3 etapas: (1) Hundimiento producido por las fallas Bucaramanga, Suarez y Ruitoque, al este, oeste y sur respectivamente. (2) Hundimiento progresivo originado por el sistema de fallas paralelas asociadas a la falla Bucaramanga que produce un escalonamiento en dirección SW. (3) Hundimiento progresivo ocasionado por un escalonamiento hacia el NW producido por el sistema de fallas transversales.

Las fallas normales encontradas en el escarpe la Virgen en el sector de Bavaria así como los tensores de esfuerzos asociados a esta zona corroboran el predominio de un ambiente extensivo y apoya la idea de un hundimiento general hacia el NW de la terraza de Bucaramanga.

Se propone que la falla Suárez tiene un comportamiento de rumbo dextral, al menos de forma local para el área Bucaramanga basados en los datos estructurales y los consecuentes tensores de esfuerzos encontrados en la zona occidental en los alrededores del municipio de Girón.

De acuerdo a las evidencias encontradas en la zona norte, este estudio apoya la idea de una falla, cubierta por el cuaternario, que dividiría el bloque norte de la depresión tectónica de Bucaramanga, en donde pone en contacto rocas del jurásico (Fm. Girón) al oeste con rocas del carbonífero (Fm. Diamante) al este.

En este estudio se ha podido corroborar la reciente actividad tectónica que ha actuado sobre el área debido a las evidencias encontradas sobre los depósitos de la terraza de Bucaramanga,

ubicados en la zona norte por las inmediaciones del barrio Kennedy en la carretera que conduce a la costa y en la zona occidental, en el municipio de Girón al NW del barrio Paraíso, en un lote propiedad de Santander.SAS sobre la vía al aeropuerto.

10. Recomendaciones

Se recomienda realizar estudios de detalle para los afloramientos afectados por tectónica recientes, encontrados en el desarrollo de este proyecto.

Realizar campañas de campo o trabajos de grado para recopilar mayor información relacionadas a los sistemas de fallas que han afectado durante el tiempo geológico la evolución de la cuenca/ depresión tectónica de Bucaramanga.

Realizar estudios de dataciones para precisar eventos geológicos relacionados al desarrollo de la cuenca/depresión tectónica de Bucaramanga.

Realizar estudios de geofísica para corroborar las fallas propuestas y evidenciar nuevas fallas que estén afectando el área Bucaramanga.

Referencias Bibliográficas

- Acosta, J., Leonergan, L., & Coward, M. (2004). Oblique transpression in the western thrust front of the Colombian Eastern Cordillera. *Journal of South America*, 181-194.
- Allen, P. A., & Allen, J. R. (2013). *Basin analysis: Principles and application to petroleum play assessment*. John Wiley & Sons.
- Araque Gómez, C. N., & Otero Ramírez, J. L. (2016). *Zonas transversales y su relación con estructuras Regionales, Flanco O Cordillera Oriental*. Bucaramanga.
- Barrero, D. (1979). *Geology of the central Western Cordillera, west of Buga and Roldanillo Colombia*. Publicacion Geologica Especial, Ingeominas.
- Cediel, F. (1968). *El Grupo Girón, una molasa mesozoica de la Cordillera Oriental*. INGEOMINAS. Boletín Geológico.
- Clavijo Torres, J., & Vargas Pieschacon, G. (2017). *Estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del sector norte de Bucaramanga (barrios Lizcano, Esperanza iii, Mirador, Jose Maria Cordoba, Villa Helena, Villa Rosa, Villa María)*. Informe final de Geología, estratigrafia y evolución. Bucaramanga.
- Cooper, M., Addison, F., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R., Hayward, A., . . . Taborda, A. (1995). Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. *AAPG(79)*, 1421 – 1443.
- Corredor, F. (2003). eismic strain rates and distributed continental deformation in the northern Andes and three-dimensional seismotectonics of the northwestern South America. *Tectonophysics*, 147 – 166.

- Cortés, M., Angelier, J., & Colleta, B. (2005). Paleostress evolution of the northern Andes (Eastern Cordillera of Colombia): Implications on plate kinematics of the South Caribbean region. *Tectonics*, 24.
- Cuéllar Cárdenas, M. A., López Isaza, J. A., Osorio Naranjo, J. A., & Carrillo Lombana, E. J. (Julio-Diciembre de 2012). ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL SEGMENTO BUCARAMANGA DEL SISTEMA DE FALLAS DE BUCARAMANGA (SFB) ENTRE LOS MUNICIPIOS DE PAILITAS Y CURUMANÍ, CESAR - COLOMBIA. *Boletín de Geología*, Vol. 34(Nº 2), 73-101.
- de Porta, J. (1959). La Terraza de Bucaramanga. *Boletín de Geología*, 5-13.
- Díaz Bahamon, G. D., & Suarez Acevedo, M. J. (1998). *Evidencias neotectónicas de la Falla del Suárez en su confluencia con el sistema de Fallas de Bucaramanga*. Bucaramanga.
- Dickey, P. A. (1941). Pre-Cretaceous Sediments In Cordillera Oriental of Colombia. *AAPG Bulletin*, 25, 1789-1795.
- Diederix, H., Hernández Moreno, C., Torres Jaimes, E. M., & Botero Santa, P. A. (2008). *Modelo de evolución morfotectónica cuaternaria basado en evidencias estructurales, neotectónicas y paleosismológicas de los principales sistemas de falla en la región de Bucaramanga*. Bogotá.
- Goldsmith, R., Marvin, R., & Mehnert, H. (1971). *Radiometric ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia*. U.S. Geol. Survey Prof.
- Gomez, E. (2001). *Tectonic control on the late Cretaceous to Cenozoic sedimentary fill of the Middle Magdalena Valley Basin, Eastern Cordillera and Llanos Basin, Colombia*.
- Hubach, E. (1952). *Interpretación Geológica de la erosión y de los deslizamientos en Bucaramanga y medidas de defensa*. Servicio Geológico Nacional, Bogotá.

- INGEOMINAS. (2001). *Zonificación sismogeotécnica indicativa del Area Metropolitana de Bucaramanga*. Bogotá.
- INGEOMINAS. (2006). *ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA DE ALGUNAS LADERAS DE LOS MUNICIPIOS DE BUCARAMANGA, FLORIDABLANCA, GIRON Y PIEDECUESTA*.
- INGEOMINAS. (2009). *ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA DE ALGUNAS LADERAS DE LOS MUNICIPIOS DE BUCARAMANGA, FLORIDABLANCA, GIRÓN - REVISIÓN*. Bogotá.
- Jimenez Diaz, G. (2008). *ANALISIS DE LA DEFORMACION Y MODELO ESTRUCTURAL BASADO EN DATOS PALEOMAGNETICOS Y CINEMATICOS EN EL SECTOR SUR DEL VALLE SUPERIOR DEL MAGDALENA (ANTICLINAL DE LA HOCHA)*. Bogotá.
- Julivert, M. (1958). *La Morfoestructura de la Zona de las Mesas al SW de Bucaramanga (Colombia S. A.)*. Bucaramanga.
- Julivert, M. (1961). Geología de la Vertiente W de la Cordillera Oriental en el Sector de Bucaramanga. *Boletín de Geología*, 8(2), 35-43.
- Julivert, M. (1963). Nuevas observaciones sobre la estratigrafía y tectónica del Cuaternario de los alrededores de Bucaramanga. *Boletín de Geología*(15), 41-56.
- León Silvestre, L. A. (1991). Mapa Geológico de Santander. *Boletín de Geología*, Vol. 20 (Núm. 35), 53-63.
- López, E., & Barrero, A. (2002). *Cross section 2 - Puerto Wilches to Arauca Field*, in: *Upper crust models of Colombia, Chapter 2 deformed continental crust, Eastern Colombia*. INGEOMINAS.

- Navas G, J. (1962). Geología del Carbonífero al N. de Bucaramanga. *Boletín de Geología*(11), 23-34.
- Niño Agudelo, A. E., & Vargas Pieschacon, G. (1992). *GEOLOGIA Y GEOTECNIA DE LA ESCARPA NOROCCIDENTAL DE LA MESETA DE BUCARAMANGA* . Bucaramanga.
- Otero Ramírez, J. L., & Casadiegos Agudelo, L. (2017). *Apoyo al informe del análisis estructural de los sistemas de fallas: Suárez, San Vicente, Bucaramanga y Suratá*. Bucaramanga.
- Paris, G., Machette, G. N., Dart, R. L., & Haller, K. M. (2000). *Map and Database of Quaternary Faults in Colombia and its Offshore Regions*.
- Pinto, J., & Téllez, G. (1999). *Interpretación de los rasgos neotectónicos asociados al sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta en el departamento de Santander mediante el procesamiento digital de imágenes de radar y satélite con SIG*. Bucaramanga.
- Pulido Gonzales, O. (1979). GEOLOGÍA DE LAS PLANCHAS 135 (SAN GIL) Y 151 (CHARALÁ) CUADRÁNGULO I-12. *Boletín Geológico*, 23(2), 39-78.
- Restrepo-Pace, P. A., Ruiz, J., Gehrels, G., & Cosca, M. (1997). Geochronology and Nd isotopic data of 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.
- Velandia Patiño, F. A. (2017). *Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander - énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga*. Bogotá.
- Ward, D. E., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz, J., Restrepo, H., & Gomez, E. (1973). *Geología del Cuadrángulo H-12, Bucaramanga, y H-13, Pamplona, Departamento de Santander y Norte de Santander*. Boletín Geológico, INGEOMINAS.