

Cinemática, Dinámica y modelo estructural de La Falla Las Mercedes entre las veredas La Primavera – La Quinta en el municipio de Lourdes, Norte de Santander

(Kinematics, dynamics and structural model of the Las Mercedes Fault between La Primavera and La Quinta in the municipality of Lourdes, Norte de Santander).

Isaac David Quintero Villalba ^a;

^a Facultad de Ciencias Básicas, Universidad de Pamplona, Colombia E-mail: isaac.quintero@unipamplona.edu.co

^b Departamento de Geología, Colombia

Resumen

En la zona de Lourdes, Norte de Santander, en el área comprendida entre La Primavera y La Quinta, se encuentran rocas sedimentarias cretácicas pertenecientes a las formaciones geológicas Colón Mito Juan, La Luna, Cogollo y Aguardiente. La presencia de la falla Mercedes pone en contacto estas unidades cretácicas con el ortogneis de Bucarasica, que corresponde a rocas metamórficas paleozoicas. El área de estudio abarca aproximadamente 7 km², donde se realizó una cartografía geológica a escala 1:10.000. En esta zona se registraron 46 medidas de datos estructurales a planos de estratificación y 336 diaclasas. Con esta información se definieron 2 bloques tectónicos, cuyos datos fueron analizados y procesados utilizando programas como Wintensor 5.9.2, Stereonet v.11 y Faultkin 8.3. para culminar se identificaron dos eventos tectónicos asociados a la Falla Las Mercedes. El más antiguo de estos eventos habría dado lugar a la exhumación del Ortoneis de Bucarasica. Posteriormente, se habrían generado esfuerzos de rumbo sinistral, para finalmente presentarse tensores de compresión que originaron pliegues en la zona.

Abstract

In the area of Lourdes, Norte de Santander, in the area between La Primavera and La Quinta, there are Cretaceous sedimentary rocks belonging to the geological formations Colón Mito Juan, La Luna, Cogollo and Aguardiente. The presence of the Mercedes fault brings these Cretaceous units into contact with the Bucarasica orthogneiss, which corresponds to Paleozoic metamorphic rocks. The study area covers approximately 7 km², where geological mapping was carried out at a scale of 1:10,000. In this area, 46 structural data measurements were recorded in stratification planes and 336 diaclasses. With this information, 2 tectonic blocks were defined, whose data were analyzed and processed using programs such as Wintensor 5.9.2, Stereonet v.11 and Faultkin 8.3. To conclude, two tectonic events associated with the Las Mercedes Fault were identified. The oldest of these events would have led to the exhumation of the Bucarasica Ortoneis. Subsequently, sinistral strike-slip stresses would have been generated, to finally present compressive stresses that originated folds in the area.

Palabras clave: Cinemática, Las Mercedes, Geología estructural

Keywords: Kinematics, Las Mercedes, Geología, structural geology

1. Introducción

El territorio colombiano presenta una configuración tectónica compleja, resultado de diversos procesos geológicos que han moldeado su relieve a lo largo de millones de años. Un claro ejemplo de esta complejidad es la Cordillera Oriental, una cadena montañosa que alberga en su interior una historia geológica fascinante.

La Cordillera Oriental, tiene sus raíces en la era Precámbrica, cuando se formó como parte de una cadena Caledoniana. Sin embargo, su evolución no ha terminado ahí. A lo largo del tiempo, la cordillera ha sido afectada por diferentes sistemas de fallas, como el Sistema de Fallas Las Mercedes [1,2], ha jugado un papel fundamental en su configuración actual.

La Falla de Las Mercedes, por su magnitud e importancia, ha sido objeto de numerosos estudios en las últimas décadas. Estos estudios han permitido comprender mejor su cinemática y dinámica, revelando que se trata de una falla inversa que enfrenta rocas Predevónicas y Cretácicas [2]. Sin embargo, la mayoría de estos estudios se han realizado a grandes escalas, lo que limita la comprensión detallada de

las estructuras que resultan de la actividad de la falla y su significancia en el modelo tectónico de la región.

Es en este contexto que surge la presente investigación, la cual busca profundizar en el estudio de la Falla de Las Mercedes a una escala más detallada. A través de un análisis geológico minucioso, se pretende identificar y caracterizar las estructuras geológicas asociadas a la falla, así como comprender su papel en la evolución tectónica de la Cordillera Oriental.

2. Generalidades

2.1 Localización

El municipio de Lourdes se sitúa en el noroeste del territorio colombiano, específicamente en el departamento de Norte de Santander. Su ubicación geográfica lo coloca a 68 kilómetros de distancia de la ciudad de Cúcuta, la capital departamental. El municipio se encuentra a una altura promedio de 1366 metros sobre el nivel del mar, lo que le otorga un clima templado y agradable.

En cuanto a su extensión territorial, Lourdes abarca un área total de 87 kilómetros cuadrados. Su población, de acuerdo a estimaciones recientes, se aproxima a los 3600 habitantes,

distribuidos principalmente en el casco urbano y las zonas rurales aledañas.

**MAPA LOCALIZACIÓN DE LOURDES
NORTE DE SANTANDER
COLOMBIA
2024**

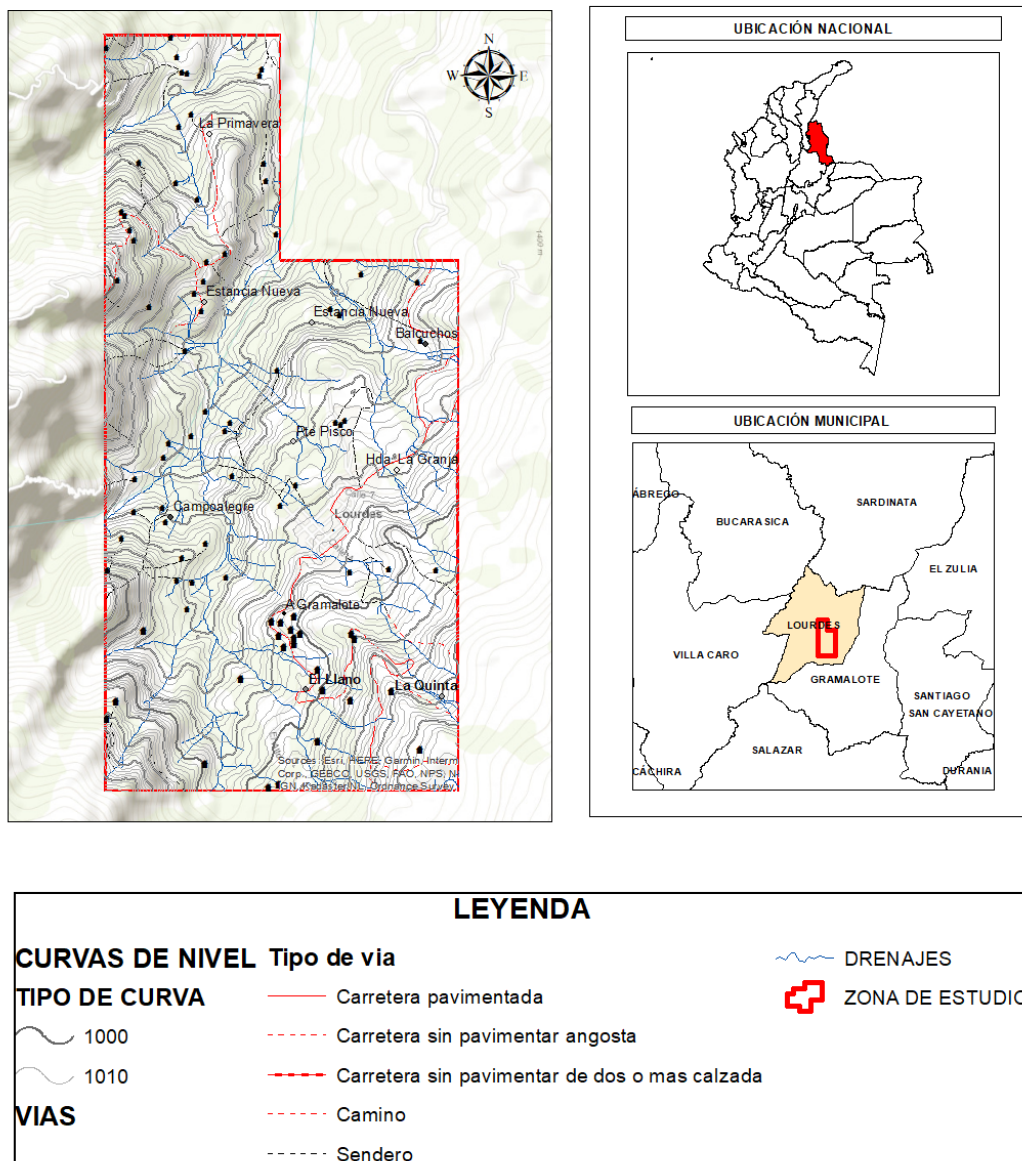


Figura 1. Mapa de localización del municipio de Lourdes- Norte de Santander
Fuente: Autor

2.2 Alcances y limitaciones

Esta investigación contribuye al conocimiento de la geología estructural en la zona central del departamento de Norte de Santander (flanco oriental de la Cordillera Oriental). Se presenta la cinemática, dinámica y el modelo estructural de la falla Las Mercedes en Lourdes, Norte de Santander, abarcando las veredas La Primavera y La Quinta, mediante la información cartográfica y estructural recopilada y analizada en cada fase del estudio.

En la fase de campo uno de los retos que se presentaron al realizar el levantamiento cartográfico pertinente fue el acceso de algunas zonas, debido a la topografía presente en el lugar y la poca presencia de senderos o terrenos que permitan transitar sin mayor dificultad; por otro lado, la observación de ciertos cuerpos litológicos se vio limitada debido a la presencia significativa de cuaternarios en la región, los cuales ocultan estas unidades estratigráficas.

3. Metodología

El estudio de la deformación tectónica en el municipio de Lourdes, Norte de Santander, Colombia, se llevó a cabo siguiendo una metodología rigurosa que se dividió en 4 fases. Cada fase se enfocó en un aspecto específico del análisis, abarcando desde la recopilación de información bibliográfica hasta la interpretación final de los datos.

3.1 Pre Campo

3.1.1 Recopilación de información bibliográfica.

La investigación comenzó con una exhaustiva revisión de la literatura existente sobre la geología estructural de la falla de Las Mercedes, la cinemática y la dinámica de las mismas, así como su impacto en la zona por la que esta se prolonga del municipio de Lourdes y sus alrededores. Se consultaron diversas fuentes confiables, incluyendo el Servicio Geológico colombiano, Trabajos de grado entre otras, dedicadas a la geología colombiana, las cuales realizan análisis en diferentes zonas del país. Toda la información suministrada como mapas geológicos a diferentes escalas con sus memorias explicativas, imágenes satelitales, cortes geológicos, bases topográficas 87IIIB y 87IIID tomadas del IGAC, tesis y artículos científicos realizados por diferentes autores.

Cabe destacar, que la información recopilada en esta fase, fue fundamental para establecer el marco teórico de la investigación, identificar las áreas de estudio previas y definir los objetivos específicos del proyecto.

3.1.2 Fotointerpretación de la zona:

Partiendo del uso del mapa geológico de la plancha 87-Sardinata a escala 1:100.000 y la aplicación de sensores remotos en los cuales se utilizó como insumos las fotografías aéreas R-1202- 0127, R-1202-0125, y R-1202-0126 (Figura 9) del sensor WILD RC-8 tomadas en el 1992,

se llevó a cabo el proceso de fotointerpretación con ayuda de un estereoscopio de espejos, enfocado en la caracterización de drenajes, geología y geomorfología, lo que genera una visión amplia que sirve panorama general para la zona a estudiar.

Las fotografías aéreas proporcionaron una perspectiva detallada de la superficie terrestre, permitiendo identificar elementos como **Geoformas**, donde se reconocieron relieves montañosos. Donde estas geoformas proporcionaron información sobre la historia geomorfológica de la región y los procesos erosivos que han actuado sobre ella. Por otro lado, se pudieron identificar los **patrones de drenaje**, identificando ríos, quebradas, arroyos y otros cursos de agua. Esta información permitió inferir la inclinación del terreno, la presencia de fallas y otros elementos estructurales.

Cabe resaltar, que esta fase, fue una herramienta valiosa para la planificación del trabajo de campo y para la identificación de áreas de interés para un análisis más detallado.

3.3 Trabajo de campo

3.3.1 Cartografía geológica

En trabajo de campo, se realizó una cartografía a escala 1:10.000 donde se buscó obtener la información de las rocas y depósitos presentes en la zona (tomando datos estructurales, muestras de roca y demás insumos necesarios) para realizar de manera detallada la descripción litológica y textural mediante los métodos de clasificación de Folk y Dunham [3]. Posteriormente, se realizó una descripción estratigráfica de las mismas con el fin de poseer evidencias sólidas de la cinemática y dinámica propuestas en el modelo estructural de la zona de estudio.

3.3.2 Caracterización geomorfológica

En el desarrollo del modelo deformacional, se tuvieron en cuenta una serie de aspectos fundamentales al llevar a cabo la caracterización geomorfológica. A lo largo de este proceso, se consideraron elementos clave para comprender la cinemática y dinámica de las estructuras.

En el trabajo de campo, se identificaron diversas geoformas, como facetas triangulares deslizamientos, patrones de drenaje, entre otros. Prestando especial atención a la topografía. Por otro lado, las fotografías aéreas e Modelos de elevación digital (DEM) tomaron un papel importante en esta etapa. De igual manera se tuvieron en cuenta aspectos morfodinámicos con el fin de tener presente los procesos que moldean la zona de estudio.

Cabe destacar, que la identificación de elementos geomorfológicos en campo, contribuyó a la comprensión de los procesos de movimientos en masa, sedimentación y otros fenómenos.

3.3.3 Pavimentos

Para esta actividad, se realizó levantamiento de 7 km² a escala 1:10000, donde se obtuvo la delimitación de

estaciones en las cuales, se llevó a cabo un control detallado de metro cuadrado (1m x 1m). Con la anterior metodología se obtuvieron los llamados pavimentos.

Para esta actividad, fue vital importancia la toma correcta de datos de diaclasamiento, planos de falla y pliegues; con el fin de obtener resultados de cinemática y dinámica adecuados para la zona de estudio. A su vez, fue importante realizar una clasificación de las diaclasas con base en su disposición espacial, dimensiones y su abundancia relativa.

Posteriormente, se registraron parámetros fundamentales como **frecuencia** (número de planos de diaclasas cortados por una línea que se traza perpendicular a estas estructuras), **espaciamiento** (distancia entre los diferentes planos de fracturas), **abertura** (distancia perpendicular entre las paredes de la discontinuidad cuando no hay presencia de relleno), **rugosidad** del plano de la discontinuidad (irregularidad de la superficie) y finalmente el **relleno** (material que se deposita en las **aberturas** de las diaclasas).

Posteriormente, en los pavimentos se realizó el análisis de estructuras geológicas, incluyendo un registro correcto de la orientación de cada diaclasa.

Con base a lo anterior, se encontraron los sistemas de diaclasas, a los cuales se les identificó la presencia de dos o más familias en el cuerpo rocoso de estudio. Donde se conocen algunos tipos como lo son los ortogonales, conjugados, irregulares y sigmoidales.

Por otro lado, se tuvieron en cuenta las características superficiales de las diaclasas [4,5].

3.4 Laboratorio:

En esta fase, se recopilaban todos los datos y productos obtenidos en las fases anteriores especialmente en la fase de campo, para realizar la debida interpretación y análisis de las diaclasas y fallas por medio de software como **WinTensor**, **Stereonet** y **FaultKin** para posteriormente ser graficados en diagramas (Balón de playa).

En estos se pudo representar la dirección de los esfuerzos presentes en la zona, con el fin de comprender la cinemática y dinámica. Los análisis de estos resultados se desarrollaron teniendo en cuenta los pavimentos.

3.4.1 Interpretación y análisis de datos:

En esta fase crucial se llevó a cabo la síntesis e interpretación profunda de la vasta información recopilada en las etapas previas. El objetivo fundamental fue desentrañar los enigmas de la tectónica que moldea el área de estudio, estableciendo relaciones significativas entre los diversos datos obtenidos.

3.4.2 Análisis Estratigráfico

Se analizaron las características de las rocas sedimentarias, incluyendo su tipología, orden de superposición y contenido paleontológico.

3.4.3 Análisis Geomorfológico

Se interpretaron las formas del relieve terrestre en función de los procesos geológicos que las han moldeado.

Se analizaron elementos como la pendiente, la red de drenaje y la presencia de geoformas específicas, permitiendo inferir la evolución geomorfológica de la zona.

3.4.4 Análisis Estructural

Se integraron los datos de orientación de estructuras geológicas (diaclasas, fallas, foliaciones), obteniendo diagramas de rosas y demás diagramas relevantes. Estos diagramas permitieron identificar las direcciones principales de esfuerzos.

3.4.5 Análisis Cinemático

Se analizaron las estructuras geológicas en conjunto, considerando su geometría, orientación y relaciones mutuas. Se aplicaron principios de cinemática tectónica para inferir el sentido y magnitud del movimiento relativo entre bloques rocosos a lo largo de las fallas.

3.5 Escritura y Divulgación

En esta fase final se consolidaron los resultados de la investigación en un formato formal y accesible para la comunidad científica y el público en general.

En esta fase, se redactó este documento, siguiendo las normas establecidas por la institución educativa. Donde se incluyó una introducción detallada, la metodología empleada, los resultados obtenidos, la discusión de los resultados, las conclusiones y las referencias bibliográficas.

4. Antecedentes y justificación

Durante los últimos años, investigaciones han enriquecido notablemente el conocimiento geológico de los aspectos estructurales en Norte de Santander, abordando diferentes rasgos significativos que evalúan el conocimiento científico y así mismo incide a extraer más resultados geológicos del mismo, Para comenzar la falla de Las Mercedes fue mencionada por primera vez en el informe denominado “Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America. Bulletin of the Geological society of America, la exposición de planos de la Falla Las Mercedes, descienden presentando un alto grado de buzamiento hacia el oeste, además el desplazamiento total de la zona se estima en 2500 metros aproximadamente. [6]

Después de casi dos décadas, “Geología del cuadrángulo G -13 Cúcuta”, analiza que en el área occidental del cuadrángulo se encuentra un complejo ígneo metamórfico, limitado por la falla Las Mercedes, que presenta un rumbo N-S y un buzamiento hacia el oeste, cabe recalcar que esta exhibe un cabalgamiento al este sobre los estratos cretáceos y Terciarios [7], señaló en la “Investigación geológico-minera para la exploración de carbones en el área de El Carmen, Catatumbo, Norte de Santander” que la falla de Las Mercedes al oeste del Río Sardinata presenta una dirección S-N, de tipo inverso, la cual cuenta con un bajo ángulo de cabalgamiento, ocasionando un contacto de

cuerpos ígneos y metamórficos pertenecientes al pre-Mesozoico con una secuencia sedimentaria del Mesozoico y Cenozoico. “Tectónica de sobrecojamiento y sus implicaciones en el área de Pamplona- Labateca”, relaciona un rasgo estructural que representa gran importancia, ya que estas estructuras posiblemente se asocian a el sistema de Fallas de Las Mercedes y Guaicaramo, las cuales son deducidas como fallas inversas con movimiento al este, gracias a estos análisis se generan varios criterios que pueden aportar a la interpretación referente al desarrollo tectónico respecto a la cordillera Oriental.[8]

“Mapa geológico generalizado del departamento de Norte Santander” que el territorio Norte Santander es dividido por dos distintas regiones, donde la occidental es representada por fallas de rumbo y por otra parte la región oriental revela pliegues anticlinales y fallas inversas asociado a la falla de Bucaramanga, Las Mercedes y Labateca.[9]

“Map and database of quaternary faults and folds in Colombia and its offshore regions” el sistema de fallas Moronegro – Las Mercedes incluye la falla Las Mercedes el cual cuenta con varias fallas en la cordillera oriental colombiana. Parte de una amplia zona de fallas curvas que cambian de NW a N y NE al adentrarse a Venezuela. Se consideran fallas inversas, asociadas con la extensión hacia el SW de la falla Boconó [2]. Además de esto, un año más tarde ilustraron en el “Mapa geológico generalizado departamento de Santander” donde se clasifican distintas provincias, siendo una de estas la provincia cordillera oriental la cual se identifica, por anticlinales y sinclinales, los cuales se encuentran limitados por fallas inversas y de cabalgamiento.[10] Una década más tarde, la geología de las planchas 98 – Durania y 99 Villa del rosario, se especifica la falla Gramalote como una falla de cabalgamiento que pone en contacto rocas jurásicas con rocas cretácicas y terciarias [7], así mismo esta presenta una inclinación preferente hacia el oriente. Además de esto el sector oriental está compuesto por formaciones rocosas del Cretácico y Paleógeno que son impactadas por el Sistema de Fallas de Aguardiente y el Sistema de Fallas del Zulia. En esta zona se menciona el sinclinal del Zulia conformado por rocas del Cenozoico, donde las fallas y lineamientos muestran una orientación general casi paralela de N38°E. [11]

De igual forma, “Cartografía geológica de la plancha 87 – Sardinata departamento de Norte de Santander” donde muestra que la Falla Las Mercedes es la estructura principal en el área, dividiéndola en dos sectores asociados al Macizo de Santander y la Cuenca de Catatumbo. Es una falla inversa norte-sur que une rocas ígneas y metamórficas con sedimentarias. El análisis del Servicio Geológico Colombiano revela características de “escama delgada” en el Cerro Tasajero, relacionada con la Falla Las Mercedes, la Falla de Aguardiente y el Sistema de Fallas del Zulia [12]. Finalmente, como un aporte significativo, “Sección estructural en las quebradas la Patilla y Garrochero, y las veredas Alto del Ángulo y la Patilla, en el municipio de Salazar de las Palmas, Norte de Santander, Colombia. Villa

del rosario” dos familias de lineamientos, los cuales se relacionan a estudios de fotointerpretación, donde la primera familia presenta una orientación NNE-SSW, mostrando similitud con el sistema de fallas de Las Mercedes y la Falla de Gramalote, por otro lado, la segunda familia tiene una orientación preferente hacia el NE-SW, donde muestra cerros escalonados que representan un régimen de desgarre sobre La Falla de Gramalote.[13]

La falla de Las Mercedes en Lourdes, Norte de Santander, representa un área de gran interés científico a causa de su potencial geológico y sus implicaciones en la geodinámica regional. Estudiar detalladamente esta falla desde una perspectiva geológica que permitirá analizar la evolución de las deformaciones en la región y la interacción con otras estructuras geológicas a su alrededor. Mediante técnicas como la cartografía, estratigrafía, el análisis de fotografías aéreas y el estudio de la deformación de macizo rocoso, se podría obtener una visión más clara de los efectos que ocasiona esta falla. La comprensión de la cinemática y dinámica de la falla de Las Mercedes en Lourdes, contribuye de manera significativa con el avance del conocimiento científico en geología estructural, donde se realizará un análisis de la tectónica que sufre esta parte del territorio Nortesantandereano y a su vez la comprensión e implicaciones de la falla en las unidades aflorantes en el área de interés.

5. Resultados

A continuación, se dará a conocer el análisis cinemático a partir de planos de diaclasas presentes en la zona de interés.

5.1 Marco geológico

Inicialmente, se puede destacar que el municipio de Lourdes, se encuentra ubicado en la parte oriental de la Cordillera Oriental y en la sección occidental de la cuenca sedimentaria del Catatumbo. En esta zona afloran diversos tipos de rocas (metamórficas, ígneas y sedimentarias), con espesores y edades que varían en el tiempo geológico.

En su componente tectónico se puede definir qué, es un área muy compleja, resultado de la interacción entre tres placas tectónicas: Nazca, Sudamérica y el Caribe. La cual, esta interacción se manifiesta en la superficie en forma de estructuras geológicas como fallas, anticlinales, sinclinales, entre otros.



Figura 2: Marco tectónico del noroeste de Sudamérica del Sur. NAB = Bloque Andino Septentrional; Car = placa del Caribe; Nzc = Placa de Nazca; Coc = Placa de Cocos; Nam = Placa Norteamericana; Afr = Placa Africana; GS = Escudo Guayanés; Ec, Col, Ve = límites geográficos de Ecuador, Colombia y Venezuela, respectivamente.
Fuente: [15].

A su vez, [16] caracterizan esta zona, como una zona que compone cuenca del Catatumbo, que a su vez asocian con una zona de deformación a la que definen como el “Bloque Tectónico de Maracaibo”. Cabe destacar, que, en su descripción, mencionan que esta zona se caracteriza por un estilo estructural de fallamiento inverso con múltiples plegamientos, donde el cabalgamiento se presenta en bloques y pliegues con dirección NE-SW [16]. Por otra parte, y como principal elemento de interés en este trabajo, se define que el rasgo estructural más destacado para el municipio de Lourdes es la Falla de Las Mercedes, cuyo trazo afecta desde el oeste del área urbana del municipio, poniendo en contacto rocas cristalinas precámbricas con rocas sedimentarias cretácicas, como es el Caso de La Fm La Luna con el Ortoneis de Bucarasica (Fig 3).

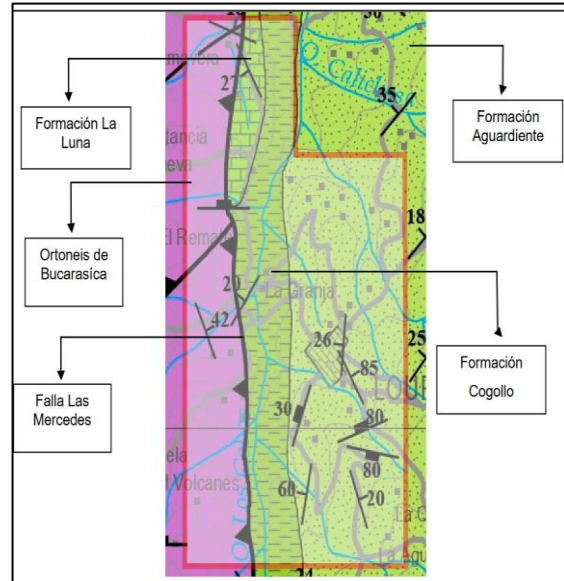


Figura 3. Unidades Geológicas en el área de estudio, definidas en la plancha 87-Sardinata.

Fuente: [12]

5.1.1 Unidades del Precámbrico

5.1.1.1 Neis de Bucaramanga (PEb)

El término fue propuesto por [15], quienes describen una serie de rocas metasedimentarias de alto grado metamórfico. Esta unidad está compuesta principalmente por paragneis pelíticos, semi-pelíticos y arenosos, junto con esquistos, y en menor proporción, por gneis, mármol, gneis hornbléndico y anfibolita. El Gneis de Bucaramanga incluye zonas de migmatita, con rocas de paragneis mezcladas con granitos gnéisicos y áreas en las que ambas litologías son atravesadas por múltiples intrusiones de granito no foliado.[14]

5.1.2 Unidades del Paleozoico

5.1.2.1 Ortoneis de Bucarasica

Unidad descrita por [17] como un gneis cuarzo feldespático, distribuido en rocas que van de alto a medio de metamorfismo. La unidad aflora al oeste de la Falla de Las Mercedes, distribuida en dos fajas principales, la primera se encuentra limitando el sur de la Plancha 98 – Durania, por otro, la segunda faja se encuentra ubicada en la zona centro donde es limitada al este por la Falla de Las Mercedes, y hacia el norte se presenta un contacto estructural con el batolito de Agua Blanca y la Formación Silgará.

Generalmente las rocas presentes se describen como rocas de protolito ígneo granítico con una estructura gnéisica, muestran una composición general con minerales como Cuarzo, Feldespato, Moscovita y Biotita.

El Ortoneis de Bucarasica, muestra afloramientos con pendientes pronunciadas, con dimensiones de 2 a 20 metros aproximadamente, presentando alteraciones, formando suelos residuales.

5.1.3 Unidades del Cretácico

5.1.3.1 Formación Tibú-Mercedes (K1tm)

Estas unidades fueron inicialmente descritas en el área de la Concesión Barco como miembros inferior y medio del Grupo Uribante [3]. Posteriormente, estas unidades se elevaron al rango de formaciones, conocidas como Tibú y Mercedes. Debido a la confusión en sus contactos, se consideran como una única unidad denominada Formación Tibú-Mercedes.

Esta unidad, se describe como una secuencia de calizas biomicríticas y calizas tipo wackstone y packstones, grises oscuros, intercaladas localmente con capas de lodolitas y areniscas grises oscuras, fosilíferas, micáceas y glauconíticas.

5.1.3.2 Formación Aguardiente

Formación descrita por [6], se le da el nombre para caracterizarla como uno de los miembros del grupo Uribante.

Esta Formación Aguardiente en su localidad tipo (Quebrada Santa Elena, Cuadrángulo G-13), está constituida principalmente por areniscas con presencia de glauconita, calcáreas de color gris a gris verdoso, de grano fino a grueso, presentando intercalaciones de capas finas de shales negros y capas finas de caliza en la parte inferior.

La Formación Aguardiente aflora principalmente en forma de faja al este de la Falla Las Mercedes con una dirección suroeste – noreste siendo la unidad de mayor área de extensión dentro de la plancha, exponiendo un total de 245 km².

En términos generales la Formación Aguardiente es caracterizada por presentar afloramientos con altas pendientes con espesores que llegan hasta los 30 metros, esta Formación se compone de rocas siliciclásticas con gran presencia de glauconita. En la plancha 87, gracias a su bajo buzamiento, la unidad engloba una gran extensión, donde presenta en su parte inferior material suelto y depósitos coluviales. La Falla Las Mercedes se encuentra cortando la Formación en el sector SE generando un contacto fallado con las Formaciones Ortoneis de Bucarasíca y Formación Silgará.

A esta Formación se le asigna una edad Aptiana según [6], en base a la presencia de fósiles como *Exogyra aff. boussingauli* y otros *Ostreidos* de edad Cretácica que ayudan a correlacionar la Formación a esta edad.

5.1.3.3 Formación Cogollo

Según [18]. Se nombra Formación Cogollo en relación al Río Cogollo, Distrito de Perijá, Venezuela y la sección tipo se encuentra a lo largo de este río. El espesor total de esta Formación se ha determinado principalmente a registros de perforaciones, debido a la abundante presencia de Shales y fallas que no permiten determinar un valor absoluto respecto a su grosor, en base a esto, se estima que la magnitud de la Formación Cogollo oscila entre los 250 y 273 metros.

Se compone principalmente de Shales fisiles de color gris oscuro a negro, con intercalaciones de Calizas fosilíferas de color gris oscuro y limolitas arcillosas grises.

Según [6] La Formación Cogollo se divide en Cogollo inferior, el cual está compuesto de Shales negros muy calcáreos y Calizas de color gris oscuro, este miembro compone una quinta parte de la Formación aproximadamente y logra ser distinguible en todas las secciones.

Por otra parte, el miembro Cogollo medio, compuesto principalmente de Shales no calcáreos de color gris oscuro a negro, y algunas calizas fosilíferas y representa aproximadamente tres quintas partes de la Formación en su totalidad.

Finalmente, se encuentra el miembro Guayacán, denominado de esta manera por la Quebrada Guayacán. Este miembro presenta capas de Calizas grisáceas con abundantes fósiles y gran espesor, con intercalaciones de Shales no calcáreos de color gris oscuro y pequeñas capas de limolitas grises.

5.1.3.4 Formación La Luna

Según [6] La Formación La Luna queda limitada en su parte inferior por la Formación Cogollo y en su parte superior por Colon Shale, esta Formación se caracteriza por presentar afloramientos de pendientes altamente pronunciadas.

La edad de la Formación está asociada a el Turoniano y Santoniano según [17] Por otra parte,[19], nombra los siguientes miembros dentro de la Formación, empezando por el Miembro Laguada que presenta un espesor de 11,2 metros compuesto por una secuencia de capas tabulares a cuneiformes de calizas con contenido de foraminíferos y fósiles como el *Belonostomus* y el *Inoceramus Labiatus*, posteriormente aflora el Miembro Chejendé, este tiene un espesor de 14,5 metros, con capas delgadas que varían de tabulares a lenticulares que están compuestas mayormente por Shales y limolitas calcáreas de color negro. Este miembro exhibe variedad de concreciones calcáreas que tienen un tamaño aproximado de 30 cm y la presencia *Amonite coilopoceras springeri hyat*.

El siguiente miembro se le nombra Timbetes, muestra un espesor de 30 metros aproximadamente, donde empiezan a surgir las primeras capas tabulares de chert intercalado con capas medianas a finas de calizas masivas de color gris oscuro, presentando grandes concreciones que alcanzan longitudes superiores a los 100 cm.

Finalmente, se encuentra el Miembro Ftanita del Táchira, exhibe un espesor de 16 metros, constituido casi en su totalidad de capas tabulares de chert, intercalado con capas delgadas a medias de calizas que presentan foraminíferos.

5.1.3.5 Formación Colón-Mito Juan

Aunque, [6] que han realizado estudios sobre esta unidad las dividen y las definen como Formación Colón Shale y Formación Mito Juan; en la actualizada se conoce que puede agruparse como una sola Formación, esto debido a que no se puede distinguir con certeza la zona de contacto entre las Formaciones Colón y Mito-Juan. Por lo cual, en

trabajos previos se caracterizan ambas formaciones como una sola unidad, adoptando el nombre de Formación Colón Mito-Juan. Esta Formación se describe como compuesta por shales grises verdosos, que gradualmente se transforman en shales limosos a arenosos, y hacia la parte superior, en limolitas y areniscas de grano muy fino.

PERIOD	EPOCH	AGE	PICKS (Ma)	THICKNESS (feet)	UNITS	LITHOLOGY	
						State Sandstone Clay Sandstone Clay	
QUATERN	PLEIST. PLIOC.		0.0	>160	Rec. depos. Reservoir Fm.		
NEOGENE	MIOCENE	L	5.0	1500-8500	Guayabo Gr.		
		M	11.6				
		E	13.8				
			16.0				
			20.4				
PALEOGENE	OLIGOC.	L	22.0	1135-1718	Ledón Fm.		
		E	28.4				
			33.0	1309-2210	Carapachó Fm.		
			37.2				
			40.4				
	EOCENE	L	40.6	426-1485	Mirador Fm.		
		M					
		E	48.6				
			53.8	718-1136	San Juan Fm.		
			56.7	288-897	San Juan Fm.		
CRETACEOUS	PALEOC.	L	61.7	480-1362	San Juan Fm.		
		M	65.5	1345-1460	San Juan Fm.		
		E	70.0	720-1284	Colón Fm.		
	LATE	MAASTRICHTINE	85.5	184-301	La Luna Fm.		
		CHAMPAGNE	89.3				
		SANTONIAN	89.3				
		CONKIAN	93.5				
		TURONIAN	99.5	663-809	Capacho Fm.		
EARLY	ALBION		112	530-595	Agardito Fm.		
JURASSIC			145.5	458-515	Marcedón Fm.		
PALEOZOIC				425-830	Tibá Fm.		
PROTEROZOIC				23-76	Sierrita Fm.		
			201.8				

Figura 4. Columna estratigráfica generalizada de La Cuenca del Catatumbo.

Fuente: Tomado de [21]

5.1.4 Estructuras y Fallas

Como se puede definir, la geología estructural contribuye como un factor relevante para comprender la dinámica de la zona de estudio, su evolución tectónica y sus características geomorfológicas. Para lo cual, previo al trabajo de campo, se pudo reconocer mediante fotogeología, análisis de información secundaria e interpretación de fotografías aéreas, que el municipio de Lourdes está afectado por estructuras discontinuas (fallas y lineamientos) que se localizan principalmente en su lado oeste, correspondientes con la vertiente occidental del Río Riecito, y oriental del Río Sardinata. Algunas de las fallas marcan los límites de algunas unidades litoestratigráficas sedimentarias y de unidades metamórficas.

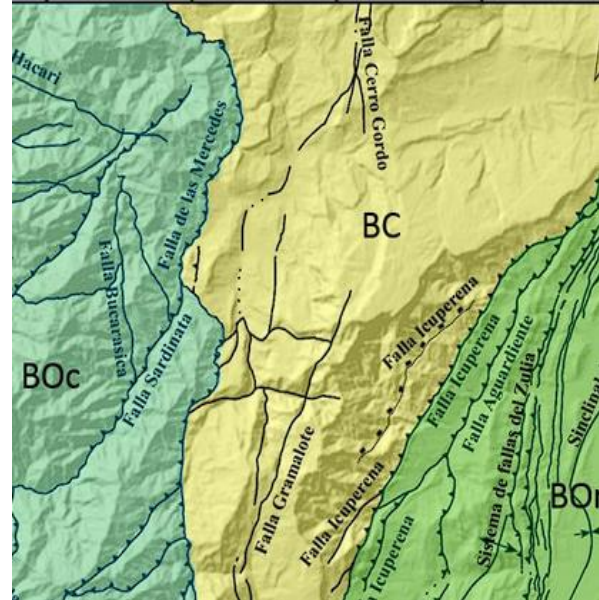


Figura 5. Mapa estructural de la Plancha 87 Sardinata en el que se observa la falla de Las Mercedes. BOC: Bloque Occidental, BC: Bloque Central, BOR: Bloque Oriental.

Fuente: [12]

5.1.4.1 Falla Las Mercedes

Falla inicialmente nombrada por [6], años después, [2] la define como una falla regional que hace parte del sistema de Fallas Morronegro- Las Mercedes, afirmando que se trata de una falla de cabalgamiento con segmentos que presentan componente dextral, el ángulo de buzamiento es variable y revela una vergencia hacia el este, exhibiendo una extensión aproximada de 214.7km

Cabe destacar, que esta falla delimita las rocas del Macizo de Santander y la Cuenca del Catatumbo. Esta estructura, se define como la más significativa caracterizada en el área de estudio. Debido a que, su trazo pone en contacto los dos dominios litológicos de la zona, este y oeste, identificados como rocas del Macizo de Santander y de la Cuenca de Catatumbo, respectivamente. Se clasifica como una falla inversa con orientación norte-sur, que conecta rocas ígneas y metamórficas (caracterizadas por alta densidad de drenaje, mayores alturas y pendientes) con rocas sedimentarias ubicadas al este de la Plancha.

El sistema de falla de Las Mercedes se localiza en la parte occidental del área de estudio. Morfológicamente, se caracteriza por la presencia de facetas triangulares y silletas (Figura 7), las cuales le confieren a esta estructura de falla el rasgo tectónico y estructural más prominente dentro de la zona de estudio y a escala regional.



Figura 6: Fotografía panorámica donde se observa la Falla de Las Mercedes.
Fuente: Autor



Figura 7: Facetas triangulares.
Fuente: Autor

5.1.4.2 Falla Gramalote

La Falla de Gramalote es una estructura menor, satélite al sistema de Fallas de Las Mercedes, con una dinámica de cabalgamiento de escama de piel delgada [13]

5.1.4.3 Falla Sardinata

Esta estructura se encuentra en el límite oeste del municipio de Lourdes, con una dirección predominante N33°E. La Falla Sardinata se define como una falla con cinemática de cabalgamiento con vergencia al sureste y un ángulo de buzamiento de aproximadamente 40°.[12]

5.1.4.4 Falla Fátima

Esta estructura se ubica en el límite noroeste del municipio de Lourdes. Es una falla sinistral inferida que afecta el basamento cristalino de la Formación Ortoneis de Bucarasica. [12]

5.1.4.5 Falla Las Brisas

Se localiza en la parte norte centro del municipio de Lourdes, en la vereda Las Brisas. Corresponde a una falla inferida, inversa, la cual se encuentra afectando y acomodando las rocas de la Formación Ortoneis de Bucarasica [12]

5.1.4.5 Falla San Isidro.

Se localiza en la parte central del municipio y presenta una dirección W-E. Se define como una falla oblicua con desplazamiento lateral izquierdo y de componente inverso [12]

5.1.4.6 Falla el Pórtico

Se localiza al sur del municipio. Dicha falla se define como una estructura oblicua con desplazamiento lateral y de componente inverso [12]

5.2 Fotointerpretación

El análisis morfológico mediante a la fotointerpretación es una herramienta fundamental para estudiar y caracterizar la geología de una zona. Esta técnica utiliza imágenes aéreas y de satélite para identificar y analizar las características geológicas de una zona, como la litología, la estructura, la geomorfología y la distribución de las unidades estratigráficas.

5.2.1. Unidades litológicas:

Se delimitaron cinco unidades litológicas en las fotografías aéreas mediante la observación de cambios en tonalidad, textura y forma del terreno. Se diferenciaron los tipos de drenajes para separar la unidad cristalina de las unidades sedimentarias además del cambio de pendiente notable que se encuentra entre estas, el patrón de drenaje que muestra la unidad cristalina es totalmente distinto, además, Los drenajes paralelos dan lugar a la formación de valles en forma de V poco profundos y laderas de pendiente suave a moderada. Estas características se asocian con unidades de roca sedimentaria. Los contactos litológicos se identificaron por zonas de cambio de pendiente entre otras características.

5.2.2 Depósitos

Esta unidad (F) se identifica mediante la observación de superficies donde hay incidencias antrópicas como el casco urbano y sus alrededores, también son identificables en zonas con pendientes medianamente moderadas, donde hay escasas de drenajes y mucha vegetación. Algunos de estos depósitos se forman de clastos que provienen de la unidad E que presenta pendientes pronunciadas donde los fragmentos de roca caen y se acumulan en la base del cerro.



Figura 8. Interpretación de Fotografía aérea R-1202-0126
Fuente: Autor

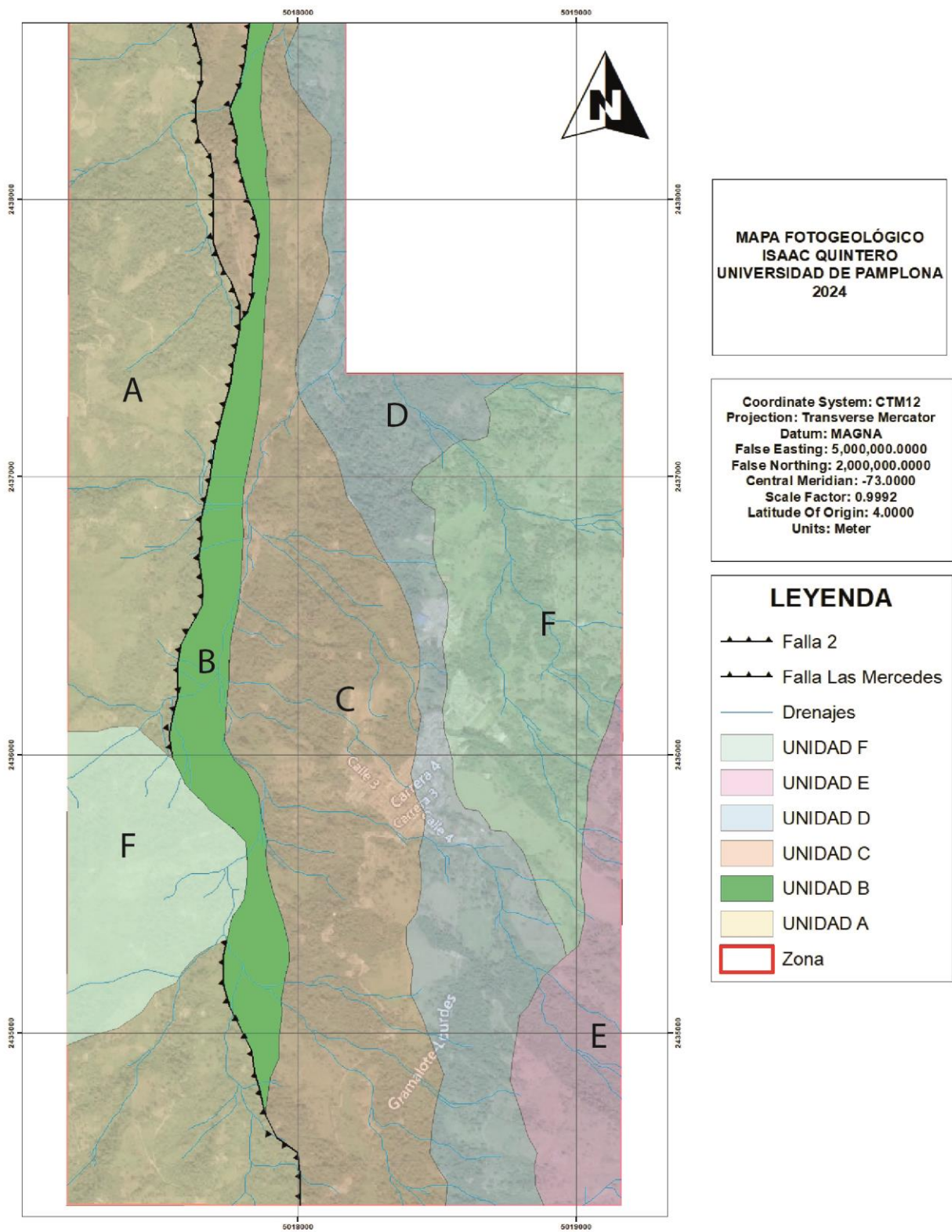


Figura 9. Mapa Fotogeológico Digitalizado
 Fuente: Autor

5.3 Cartografía

Durante el levantamiento cartográfico y estructural en el municipio de Lourdes y algunas de sus veredas aledañas, se ubicaron las rocas metamórficas pertenecientes al Ortoneis de Bucarasica y las rocas sedimentarias de las formaciones

Colón Mito-Juan, La luna con sus miembros de base a tope que la conforman: La Aguada, Chejendé, Tímbetes y Ftanita del Táchira según [15], también se ubica a las formaciones Cogollo y Aguardiente; este levantamiento da como resultado un mapa geológico como se puede observar en la figura 10.

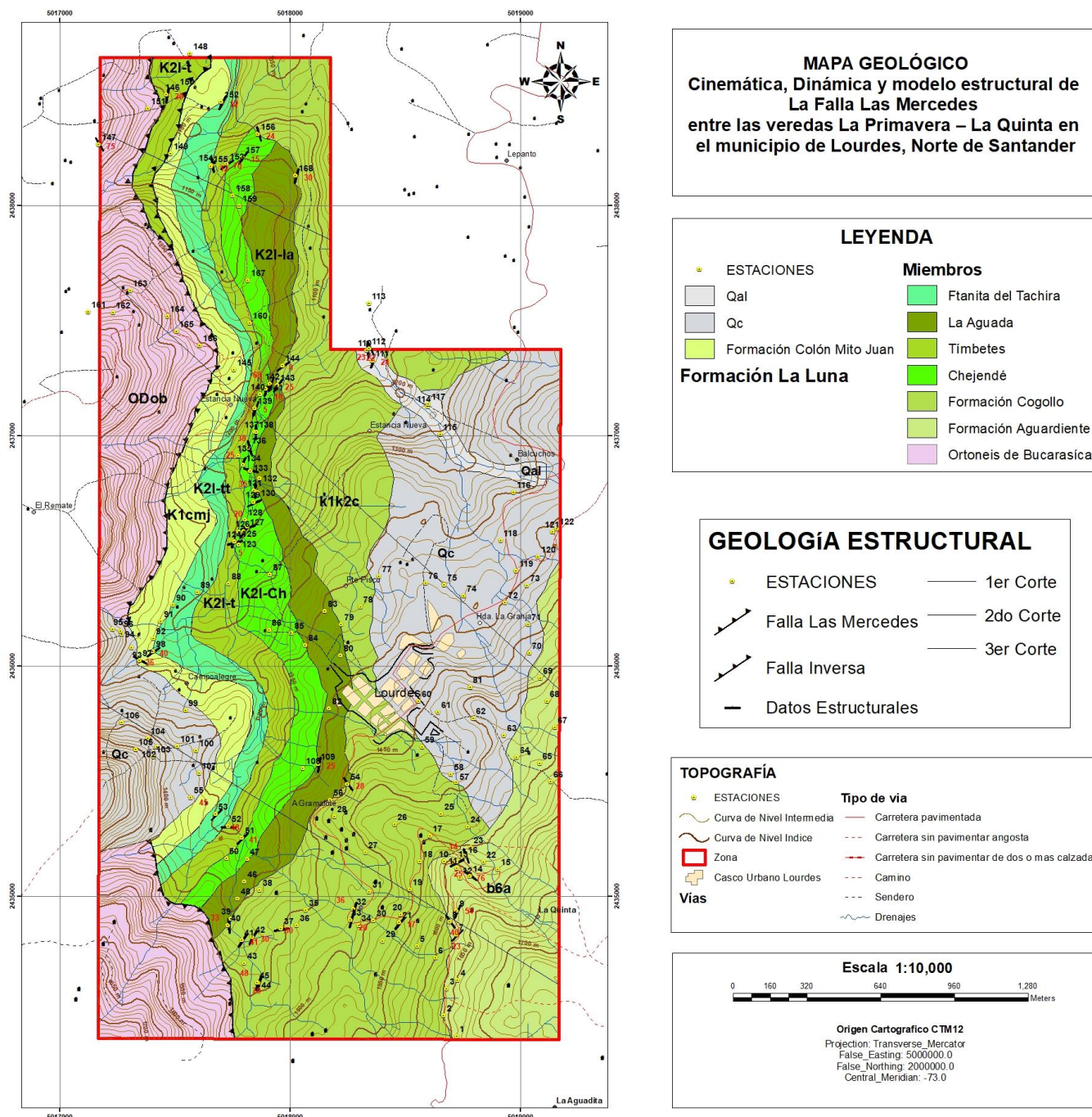


Figura 10: Mapa Geológico del área de estudio
Fuente: Autor

5.3.1 Formaciones Cartografiadas

5.3.1.1 Ortoneis de Bucarasica (PDob)

Formación ubicada en la parte Oeste de la zona de estudio, en este lugar se encontraron rocas de protolito ígneo con estructura gnéissica compuestas por cristales finos de cuarzo, plagioclasa, hornblenda y biotita. Los minerales muestran una gran deformación exhibida en sus fracturas, presenta textura augen en cristales de Qz y Plg, su protolito es máfico; debido a las litologías presentadas se relaciona a un metamorfismo de medio a alto grado, es importante recalcar la presencia de mucho material rocoso alterado formando saprolitos que exhiben texturas arenosas (ver figura 12).



Figura 11: Afloramiento compuesto de Gneises perteneciente a el Ortoneis de Bucarasica.
Fuente: Autor

Estas rocas afloran de manera predominante hacia la parte occidental del área de estudio. Sin embargo, a medida que nos aproximamos a La Falla de Las Mercedes, se observa un incremento significativo en el grado de meteorización de estas rocas.



Figura 12: Afloramiento altamente meteorizado de coloración rojiza perteneciente al Ortoneis.
Fuente: Autor

5.3.1.2 Formación Colón Mito Juan (K1cmj)

Formación que recorre de Norte a Sur la zona ubicándose al este de la falla de Las Mercedes, generando un contacto con el Ortoneis, esta unidad se compone de Shales de color Gris oscuro, compuesto por granos de tamaños limos y arcillas en un 100%, presenta alta fisibilidad, su estructura interna es plano paralela, y por otro lado existe la presencia de algunas arenitas de grano fino, con alta esfericidad y alta porosidad.



Figura 13. Afloramiento de Shales de color gris oscuro a negro que presentan meteorización
Fuente: Autor.

5.3.1.3 Formación La Luna (k2k3k4l)

5.3.1.3.1 Miembro Ftanita del Táchira (K2l-ft)

Unidad litología cartografiada como miembro superior de la luna; esta formación se compone de capas delgadas de chert negros que presentan estructuras de masivas a plano paralelas, donde se observa una intercalación de calizas con contenido fósil, en campo se encontró un contacto con las arenitas de la Formación Colón Mito Juan.



Figura 14. Afloramiento de Chert negro pertenecientes al Miembro Ftanita del Táchira
Fuente: Autor

5.3.1.2 Miembro Timbetes (K2l-t)

Este miembro está formado de capas tabulares de Chert negro con espesores variables, se presentan intercalaciones de calizas biomicríticas que contienen concreciones de tamaño superior a 80 cm. El contacto entre el Miembro Timbetes y la Ftanita del Táchira se caracteriza por una intercalación de capas delgadas a medianas de Chert negro, con intercalaciones de calizas de color gris oscuro con presencia de fósiles como bivalvos y restos de peces.



Figura 15: Afloramiento del Miembro Timbetes, donde se observan grandes concreciones.
Fuente: Autor

5.3.1.3 Miembro Chejendé (K2l-che)

Esta unidad se encuentra aflorando a lo largo del Río Recito con sentido N-S en el área de trabajo, este miembro se caracteriza por la intercalación de calizas grisáceas con presencia de fósiles como foraminíferos y algunos bivalvos, intercalados con capas notables de Shales grises a negros con contenido calcáreo.



Figura 16: Afloramiento del miembro Chejendé
Fuente: Autor

5.3.1.4 Miembro La Aguada (K2l-la)

Unidad cartografiada como el miembro inferior de la Formación La Luna; este miembro, se compone principalmente de intercalaciones muy delgadas de limolitas calcáreas y capas delgadas de calizas que van de Wackestone a Mudstone).

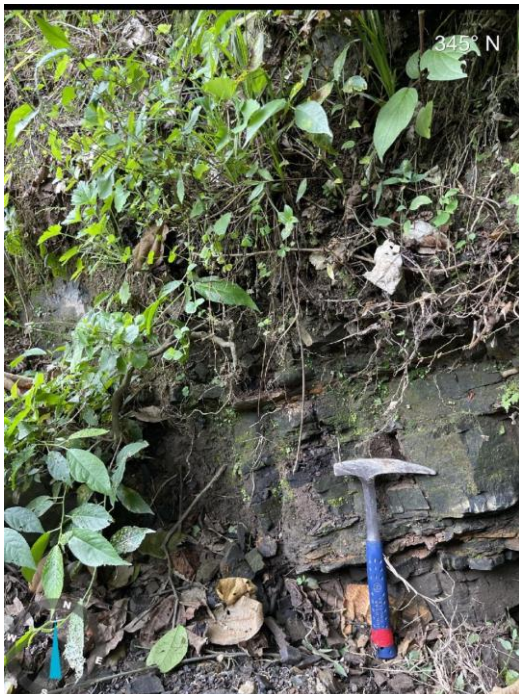


Figura 17. Afloramiento del miembro la Aguada

Fuente: Autor

5.3.2 Formación Cogollo (K1k2c)

Unidad litología que aflora en la región centro-este del área de investigación, donde afloran distintas litologías, en la parte superior afloran capas de Shales muy gruesas y capas de calizas biomicríticas que presentan fósiles de bivalvos. Hacia la parte media del miembro afloran arenitas de color gris oscuro de grano fino.



Figura 18. Afloramiento de capas gruesas de caliza perteneciente a la Formación Cogollo.
Fuente: Autor

5.3.3 Formación Aguardiente (b6a)

Formación que se encuentra aflorando en la Quinta, siendo esta la parte sur - Este de la zona de estudio, donde se encuentran expuestas, arenitas de color gris claro a blanco, estas sufren alta meteorización y presentan clastos tamaño arena muy fina, compuestas mineralógicamente de Cuarzo (96%), Feldespatos (3%) y líticos (1%).



Figura 19: Afloramiento de Cuarzo arenita perteneciente a la Formación Aguardiente.
Fuente: Autor

5.3.4 Depósitos Coluviales (Qc):

Zonas donde se presenta acumulación de material debido a desprendimiento de bloques, generalmente en la zona donde se presentan, estos cuerpos están compuesto de un matriz arenosa de color café oscuro, se presentan clastos con tamaños que van de bloques a guijos compuestos por rocas sedimentarias en su mayoría de cuarzo arenita.



Figura 20. Depósitos coluviales
Fuente; Autor

5.3.5 Depósitos Aluviales (Qal):

Estos depósitos están compuestos por rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias, con tamaños que varían desde bloques hasta guijarros. Además, se observa un mayor desarrollo de estos depósitos en tramos a lo largo del Río Riecito y drenajes que se desprenden de este.

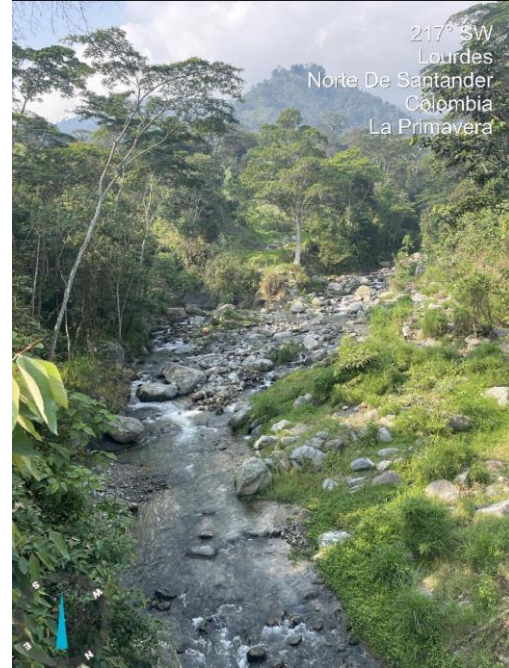


Figura 21. Depósitos aluviales en un sector del Río Riecito.
Fuente: Autor

5.4 Análisis cinemático

Se han identificado 2 bloques tectónicos entre las veredas La Primavera y La Quinta. Estas unidades tectónicas se distinguieron según la localización y distribución de las estructuras geológicas generales presentes en el área de estudio. (Figura 10).

Para este estudio el área que se trabajó se dividió en 2 bloques tectónicos, el bloque A y el bloque B.

5.4.1 Bloque Tectónico A



Figura 23.: Afloramiento de la Formación La Luna que evidencia el levantamiento del bloque A.
Fuente: Autor

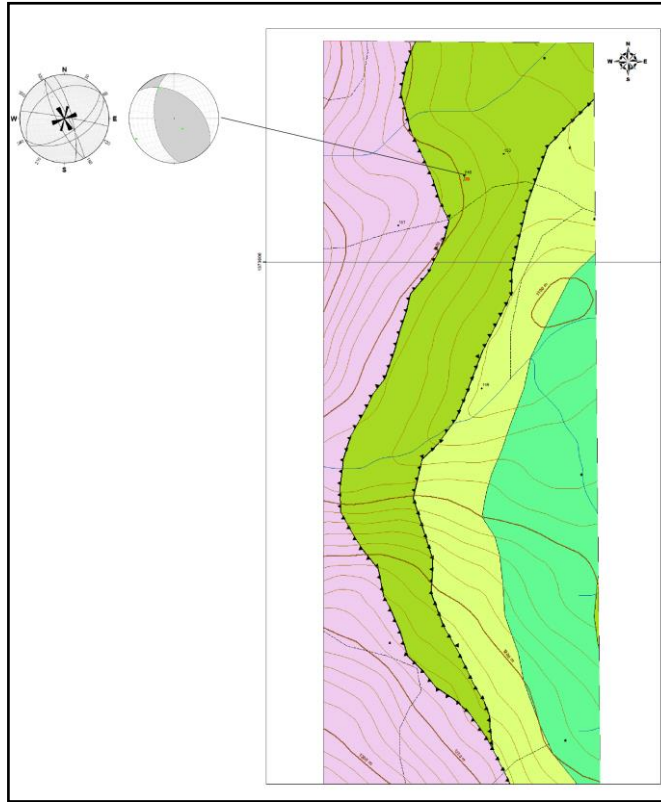


Figura 22. Representación gráfica de las diaclasas medidas en el bloque A en la estación 146.

Fuente: Autor

En este bloque, los datos tomados en campo arrojaron un tensor principal de compresión 24/255 (W-E), este tensor antiguo genera esfuerzos compresivos que ocasionan el levantamiento de las unidades paleozoicas de la zona.

La secuencia estructural comienza con la falla de Las Mercedes, caracterizada por un plano de falla de 28°. Posteriormente, como consecuencia de los esfuerzos compresivos, se desarrolla una segunda falla inversa, situada al norte, con un ángulo menor (16°) que la falla de Las Mercedes. Esta segunda estructura se relaciona con la propagación de los esfuerzos compresivos, originando el levantamiento estratigráfico de la Formación La Luna sobre la Formación Colón Mito-Juan.

Es importante destacar que la falla de menor ángulo presenta una vergencia hacia el este, al igual que la falla de Las Mercedes. Este bloque es limitado al oeste por la Falla Las Mercedes y al este por la Falla resultante de los esfuerzos de compresión.

Finalmente se presenta esfuerzos relacionados a la neotectónica de la zona asociados a esfuerzos de un régimen transpresivo con un σ_1 04/342 como resultado de estos esfuerzos se obtendría un esfuerzo oblicuo de rumbo sinistral.

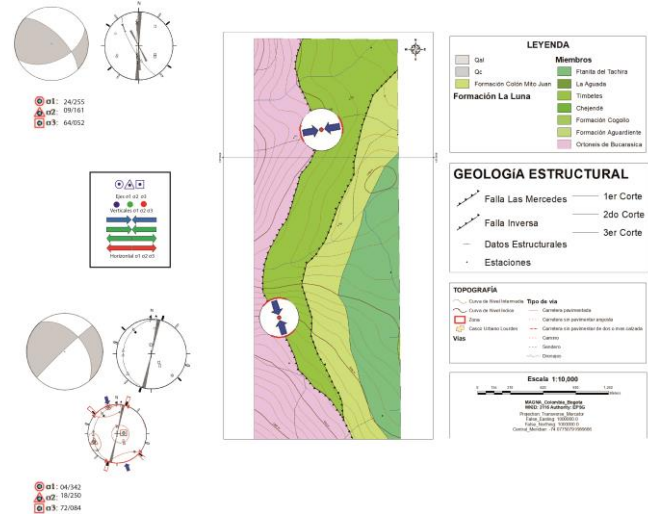


Figura 24. Representación gráfica de los tensores dominantes en el bloque A.

Fuente: Autor

5.4.2 Bloque Tectónico B

Este bloque está compuesto por las formaciones Colón Mito-Juan, La Luna, Cogollo y Aguardiente, las cuales conforman una secuencia sedimentaria afectada por los tensores generados por el desplazamiento de la falla (Figura 25).

El set uno exhibe un tensor principal (σ_1) de 24/074, que origina esfuerzos de compresión pura en dirección NE-SW. Este fenómeno se relaciona con el primer evento de deformación experimentado por el bloque uno, siguiendo la misma dirección general de esfuerzo E-W. Por consiguiente, se infiere que ambos eventos son coetáneos, dado que presentan la misma dirección y tipo de esfuerzo general.

Posteriormente, se identifican dos sets que responden al mismo evento de deformación compresiva, en este caso con el tensor principal (σ_1) presentando valores de 03/170 (SE-NW) y un σ_2 con valor 32/262 con dirección (SW-NE). El ultimo set presenta un σ_1 que expone un valor de 08/203 (SW-NE) se relacionan a esfuerzos compresivos vinculados a los pliegues manifestados en la zona.



Figura 25. Presencia de pliegues en el Bloque B

Fuente: Autor

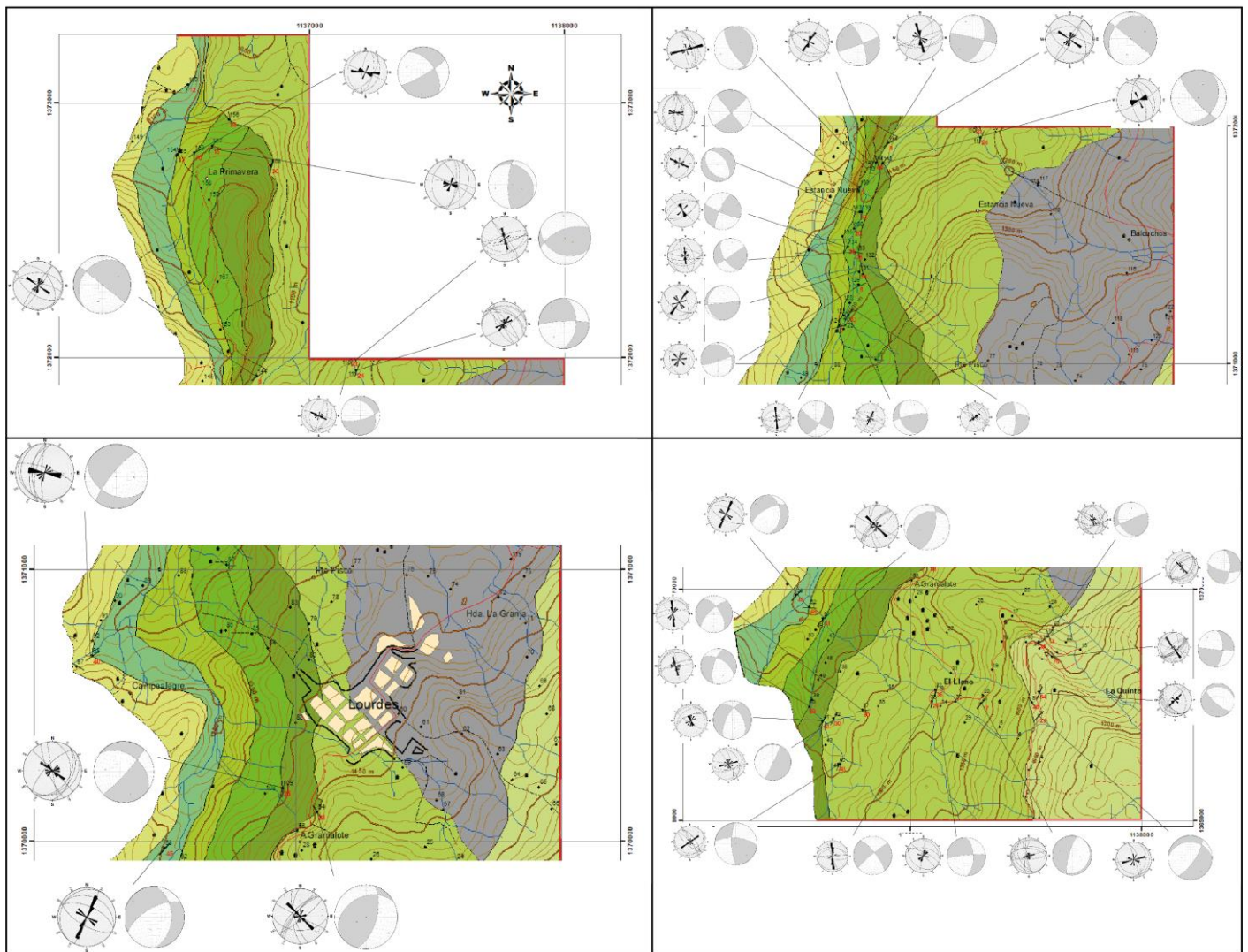


Figura 26. La representación gráfica en balones de playa y diagramas de rosa de las diaclasas medidas en el Bloque B permite visualizar la orientación y distribución espacial de las diaclasas observadas en esta zona.

Fuente: Autor.

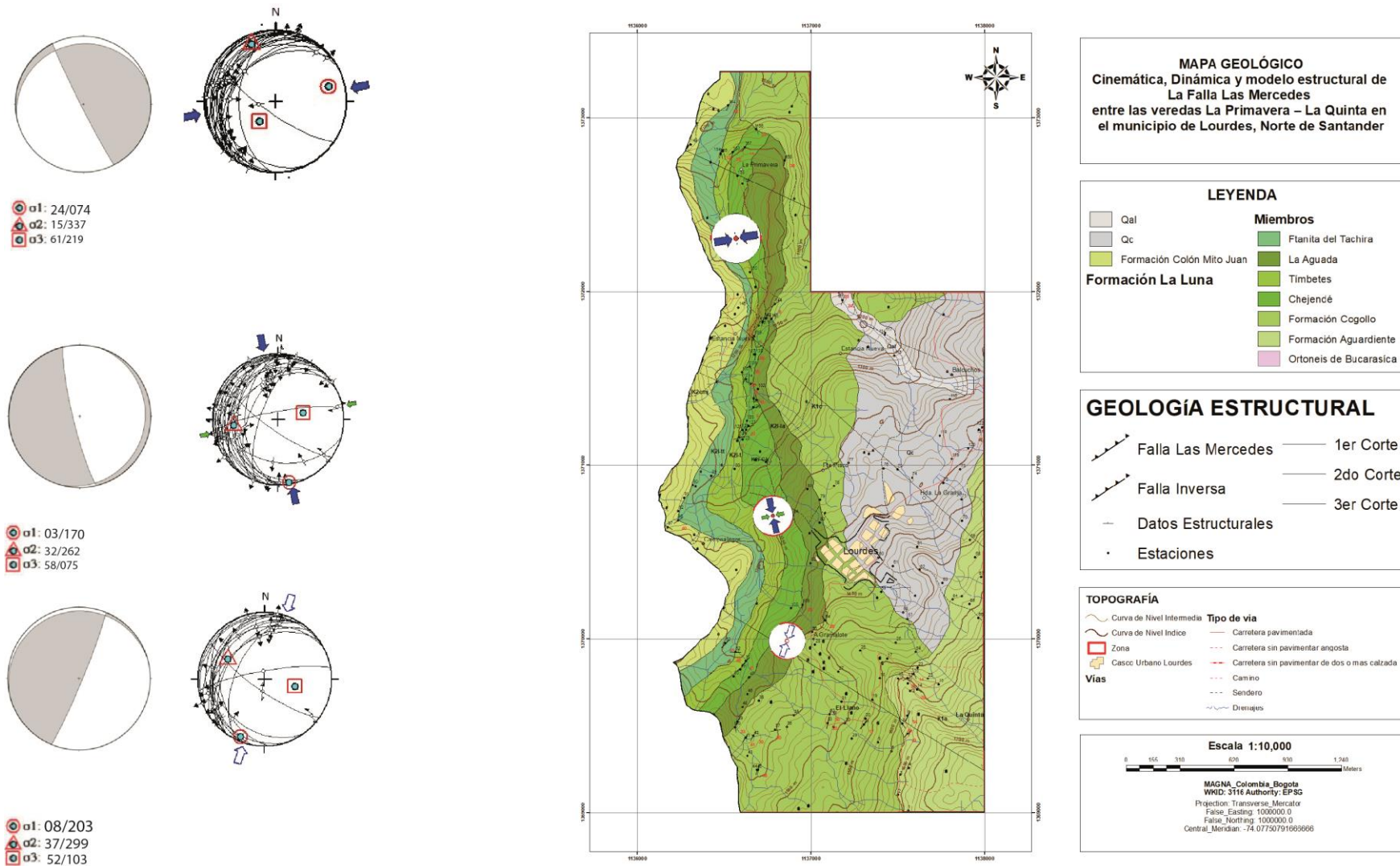


Figura 27. Representación gráfica de los sets del bloque B
Fuente: Autor

5.5 Diaclasas

Gracias al marco estructural de la zona y los sitios donde se midieron las diaclasas fue posible deducir los tensores por áreas cercanas a la falla las mercedes. En el primer bloque obtener diaclasas con una dirección preferente NW-SE. Por otra parte, en el bloque B las diaclasas no tienen una dirección

preferente, mostrándose de una manera aleatoria, aun así, pueden ser significativos para representar todo el marco de los esfuerzos ocurridos en esta zona.

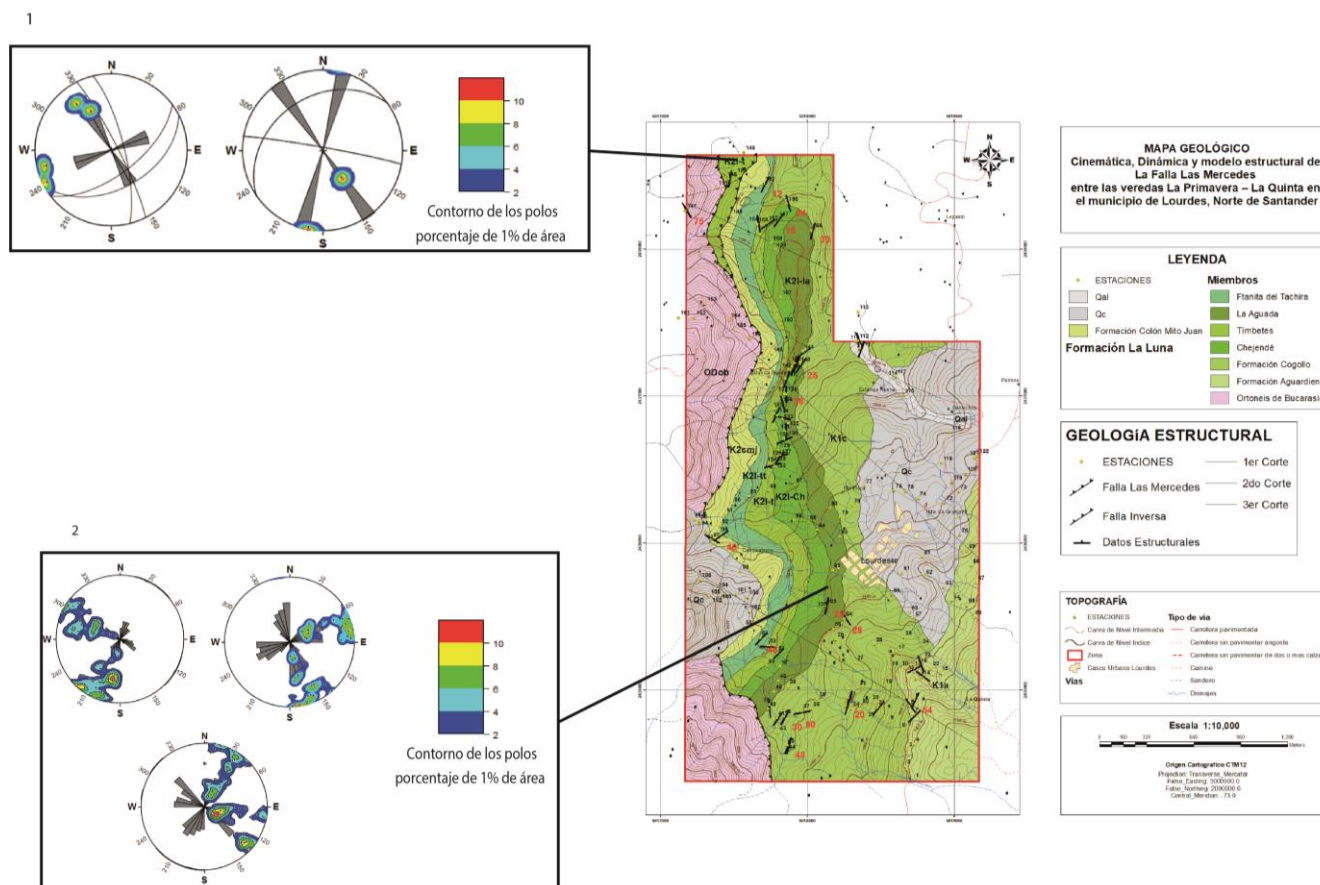


Figura 28: Distribución de las diaclasas medidas en la totalidad de terreno estudiado. 1. Bloque A. 2 Bloque B. Los gráficos presentan datos direccionales acumulativos por Sets y densidad de polos

Fuente: Autor

5.4.3 Cortes Geológicos

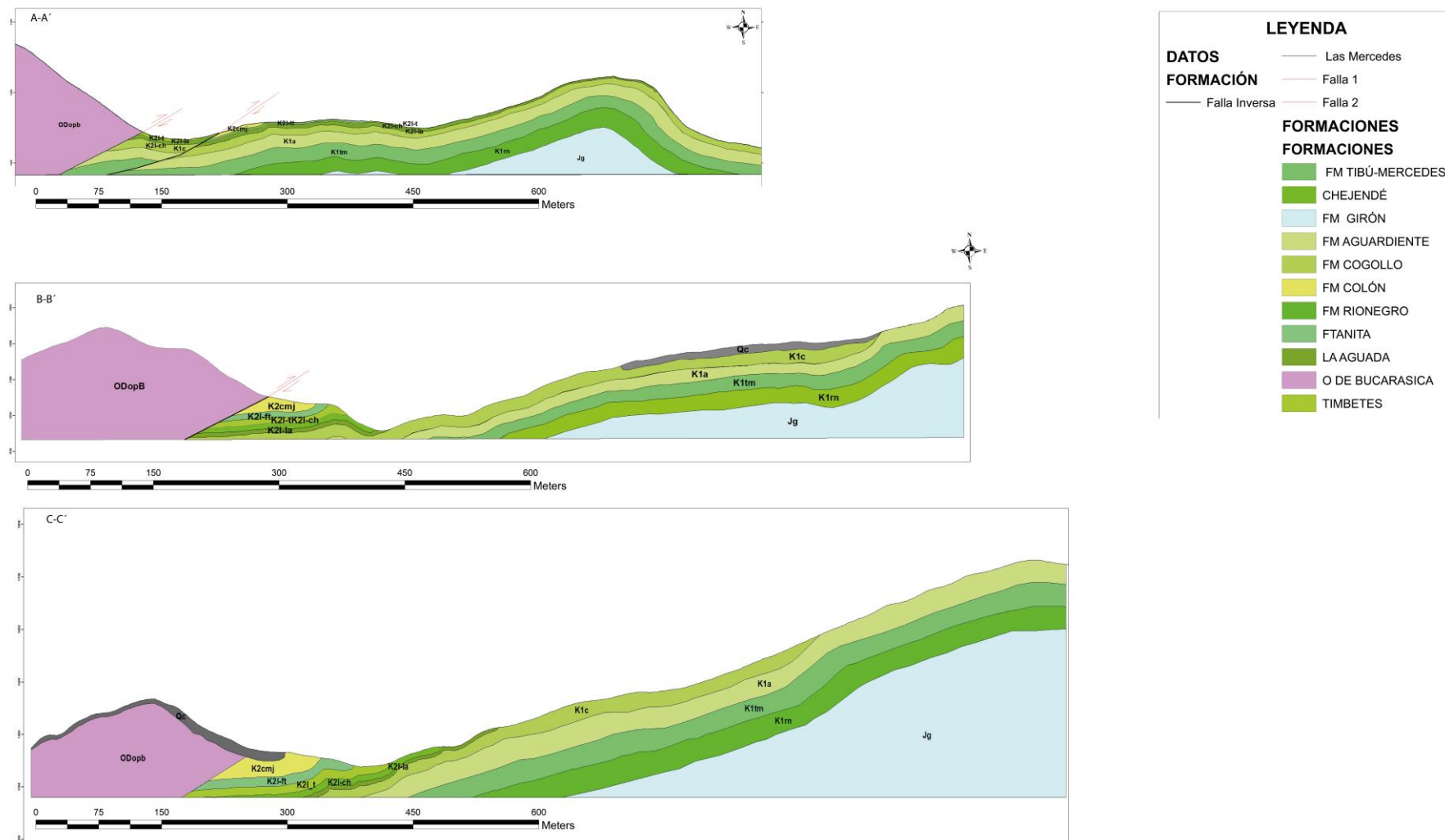


Figura 29. Cortes Geológicos (A-A')-(B-B')-(C-C')

Fuente: Autor

6. Discusiones

El origen de las principales fallas inversas longitudinales, como la Falla Las Mercedes, probablemente se asocia a un tensor de esfuerzos antiguos, cuya dirección de máxima compresión (P) presentaba una orientación de 268/03. Este tensor de esfuerzos fue calculado a partir del análisis de datos obtenidos de planos de falla estriados, empleando un método de análisis de incompatibilidades.

Es muy probable que este tensor de esfuerzos antiguo con orientación este-oeste (E-W) haya sido el responsable de la generación de esta serie de fallas inversas, con rumbos aproximados (N-S) (NNE-SSW), las cuales se ubican en la porción suroeste del área de estudio. Estas fallas inversas se han desarrollado siguiendo un estilo estructural de piel delgada, conformando un abanico imbricado con vergencia hacia el este.[21]

Los Análisis cinemáticos realizados en la Sección de las Quebradas La Patilla y Garrochero, y las veredas Alto del Ángulo y La Patilla, sugieren una variación temporal del vector de máxima compresión en la zona de estudio. Esta evolución inicia con un vector antiguo de orientación E-W que dio origen al sistema de Fallas de Las Mercedes y la Falla de Gramalote. Posteriormente, se registra un segundo pulso de deformación con orientación noreste-suroeste (NE-SW), el cual se relaciona con posibles reactivaciones del Sistema de Fallas de Gramalote, generando un modelo transtensivo a lo largo de dicho corredor de falla.[13]

En el desarrollo del actual proyecto, se busca complementar la información sobre la Falla Las Mercedes, específicamente en la zona de Lourdes, en las veredas La Primavera y La Quinta. En este lugar, se tomaron datos de planos de diaclasas agrupadas por bloques tectónicos, encontrando un tensor antiguo de esfuerzos de compresión con un σ_1 con valor 24/255 (W-E) que se relaciona a un primer evento. En el bloque A, el set uno exhibe un tensor principal (σ_1) de 04/342, que origina esfuerzos de compresión en dirección noreste-suroeste (NW-SE) evidenciando así la rotación que menciona [21] y [13], donde se presenta un tensor antiguo y su variación con dirección NW-SE. Por lo tanto, estos esfuerzos relacionados con la neotectónica de la zona, los cuales están asociados a un régimen transpresivo con un esfuerzo principal (σ_1) de 04/342, (σ_2) 18/250 y (σ_3) 72/084. Como resultado de estos esfuerzos, se obtendría un esfuerzo oblicuo de rumbo sinistral.

En última instancia se presentan esfuerzos asociados a plegamientos en las zonas más alejadas de la falla.

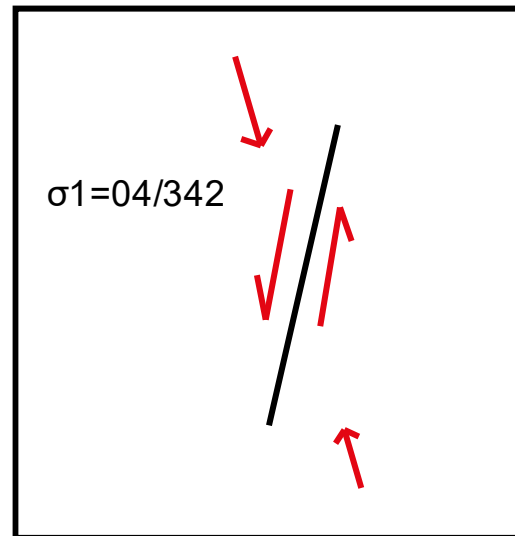


Figura 30. Esquema donde se ilustra cinemática de la falla Las Mercedes. Bajo una máxima compresión en sentido W-E la cinemática sería sinistral.

7. Modelo Evolutivo

El área del estudio está situada al noreste de la Cordillera Oriental, en la cuenca del Catatumbo, considerada una extensión de la cuenca de Maracaibo. Diversos autores han analizado su evolución geológica [1,23] a través de terrenos alóctonos y bloques que conforman el mosaico Norandino de la Cordillera Oriental [7.15].

Durante el Proterozoico Superior, se depositó una secuencia significativa de granos decrecientes en un ambiente de talud submarino del Paleozoico Inferior, que posteriormente fue afectada por metamorfismo regional de grado medio durante la orogenia Caledoniana (410-450 Ma), alcanzando la facies de esquistos verdes en la Formación Silgará [24,15]. Simultáneamente, se emplazaron intrusivos graníticos y dioríticos conocidos como la Formación Ortogneis, en un margen de Supra-subducción, con dataciones radiométricas K-Ar entre 465 a 421 Ma, situándolos en el Ordovícico Medio-Tardío a Devónico Temprano [17]. Los registros geocronológicos del Paleozoico Medio al Superior no se encuentran en el área de estudio ni en los alrededores, lo que podría interpretarse como un hiato estratigráfico o el desarrollo de procesos erosivos y abruptos movimientos tectónicos al finalizar la Orogenia Caledoniana en ese sector de la Cordillera Oriental.

Durante el Cretácico Tardío, se inició un proceso de subsidencia térmica que registró el punto máximo de inundación marina a nivel global. Análisis faciales de la Formación La Luna en la zona de estudio reportan una subdivisión de la plataforma continental que varía desde una cuenca tipo I hasta una plataforma restringida tipo VIII, en concordancia con lo propuesto por [23]. Hacia el Maastrichtiano, se generó una

regresión marina que depositó la Formación Colón-Mito Juan con ambientes transicionales lacustres [10]. A finales del Cretácico y principios del Cenozoico, ocurrió el retiro del mar, finalizando la etapa distensiva y dando inicio a un proceso de inversión tectónica. Esto generó la exhumación y erosión de la Cordillera Oriental, sin registro estratigráfico en la zona de estudio de las Formaciones Los Cuervos, Mirador y Carbonera, depositadas en ambientes transicionales.

Durante el Mioceno Medio, se inició el levantamiento de la Cordillera Oriental, intensificándose en una etapa compresiva durante el Mioceno Tardío. Esto dio origen a una cadena montañosa plegada y cabalgante, con fallamiento en bloques pequeños que han sufrido levantamientos y hundimientos por la acción de fallas regionales de gran importancia. El Macizo de Santander se comporta como un Pop-Up, cuyo extremo oriental cabalga sobre la cuenca del Catatumbo en la zona de estudio [9]. Los estudios cinemáticos realizados en la zona sugieren una variación temporal del vector de máxima compresión, con un vector antiguo W-E que dio origen al sistema de Fallas de Las Mercedes, y un segundo pulso de deformación NE-SW que posiblemente se relacione a reactivaciones del Sistema de Fallas de Gramalote, controladas por la interacción de la tectónica activa de los sistemas de fallas de Bucaramanga y el Indentor de Pamplona. Existen dos momentos tectónicos principales relacionados con la Falla Las Mercedes: el evento más antiguo generó la exhumación (exposición a la superficie) del Ortoneis de Bucarasica, un proceso asociado a los paleo tensores; posteriormente, se produjeron esfuerzos tectónicos relacionados con un movimiento de desgarre sinistral (movimiento lateral izquierdo) a lo largo de la falla; finalmente, se presentaron tensores de compresión tectónicos que dieron lugar a la formación de pliegues en la zona adyacente a la falla. Estos tres eventos tectónicos han modelado la geología y la estructura de la región a lo largo del tiempo geológico.

En el Pleistoceno-Holoceno, se registra la sedimentación de depósitos cuaternarios como terrazas aluviales, abanicos fluviales, coluviones y llanuras aluviales [9].

8. Conclusiones

En este estudio, se coincide con los dos estudios anteriormente mencionados, afirmando que existen dos momentos tectónicos principales relacionados a la Falla Las Mercedes, siendo el más antiguo el que genera la exhumación del Ortoneis de Bucarasica. Posterior este proceso, se generan esfuerzos relacionados un movimiento de rumbo sinistral.

En la región se observa una clara evidencia de una tectónica compresiva de escamación de piel delgada en las rocas sedimentarias cretácicas, como la Formación La Luna, la Formación Colón Mito Juan, la Formación

Cogollo y la Formación Aguardiente, las cuales presentan múltiples pliegues, lo que demuestra su comportamiento dúctil. Por otro lado, en las rocas cristalinas, como el Ortoneis, se aprecia una tectónica de piel gruesa.

Los esfuerzos compresivos relacionados a los paleo tensores que generaron la exhumación del ortoneis, estos esfuerzos, posteriormente generan una geometría de propagación de fallas inversas.

En la región de estudio, afloran rocas cretácicas de las formaciones Colón Mito Juan y La Luna en dirección N-S. Estas rocas ilustran un panorama altamente plegado, debido a la alta intensidad de deformación observada a lo largo de la Falla Las Mercedes. Morfológicamente, esta falla se caracteriza por presentar facetas triangulares (Figura 7), lo que la convierte en el rasgo tectónico y estructural más relevante tanto a nivel local como regional. La falla, que se extiende de N-S, se caracteriza a partir de los tensores tomados en campo principalmente un tensor 24/255 (W-E) (Figura 31) que indica compresión generando fallas inversas. Su patrón de deformación de alta intensidad está asociado con un nivel estructural medio debido a la presencia de varios pliegues y fallas, y su interacción con las rocas paleozoicas del Ortoneis y las rocas cretácicas de las formaciones Colón Mito Juan y La Luna.

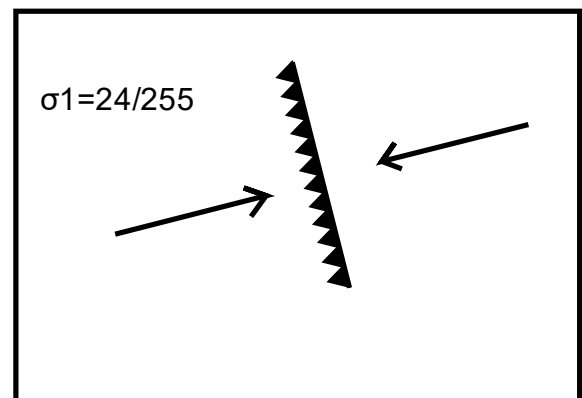


Figura 31. Esquema donde se ilustra el paleo tensor W-E cinemático de la falla Las Mercedes. Bajo una máxima compresión, una falla inversa.

Fuente: Autor

9. Recomendaciones

Seguir realizando estudios y cartografía a detalle en otras zonas afectadas por la falla en donde se puedan identificar desplazamientos que permitan confirmar e inclusive refutar los resultados obtenidos en el presente estudio.

Es de vital importancia realizar estudios sobre el ortoneis y otros cuerpos cristalinos que se encuentren en contacto con esta falla. Esto se puede llevar a cabo mediante la medición de indicadores cinemáticos como planos de falla.

Además, se puede profundizar en el análisis utilizando láminas delgadas de estas rocas, lo que permitiría detallar de manera más contundente la tectónica presente en la zona. Es crucial cubrir las áreas que no han sido muestreadas.

Todo con el fin de obtener los tensores de esfuerzos que reflejen las tendencias de fallamiento de la región.

10. Reconocimientos

Me llena de inmensa alegría y satisfacción el haber podido cumplir este sueño que una vez parecía inalcanzable.

En primer lugar, debo expresar mi más sincero agradecimiento a mi director de tesis, Ilich Sebastián Villamizar Solano. Su guía y paciencia fueron fundamentales para que pudiera llevar a buen término esta investigación. Agradezco profundamente tu confianza en mí y el haberme motivado a dar lo mejor de mí.

Asimismo, deseo agradecer a mi grupo de tesis, quienes han sido un pilar fundamental durante este recorrido. Aprecio enormemente su compañerismo, los valiosos aportes que realizaron y las palabras de aliento que fueron cruciales para mantener la motivación y culminar este proyecto de manera exitosa. Mis queridos amigos de la universidad, ustedes han sido un apoyo inestimable.

Por otro lado, debo expresar mi más sincera gratitud a la Universidad de Pamplona por haberme brindado la oportunidad de estudiar y formarme como geólogo. Esta prestigiosa institución ha sido el escenario perfecto para desarrollar mis habilidades y cumplir este sueño profesional.

Por último, pero no menos importante, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia. A mi madre, Karina Villalba Hernandez Moreno, y a mi padre, Carlos Alberto Quintero Picón, por ser mi mayor inspiración y por brindarme su apoyo incondicional. A mis hermanas, Karoll Quintero y Keren Quintero, gracias por su cariño y comprensión durante esta etapa y a mi Abuelo José Antonio Quintero Nova QEPD.

11. Referencias

- [1] Toussaint, J., & Restrepo, A. (1976). Geología de la Cordillera Oriental de Colombia entre Ibagué y Tunja. Boletín Geológico del INGEOMINAS
- [2] París, G., Machette, M., Dart, R.L. y Haller, K.M. (2000). Map and database of quaternary faults and folds in Colombia and its offshore regions: U.S. Geological Survey, Open-File report. Denver, USA
- [3] Adams, A., MacKenzie, W., & Guilford, C. (1984). Atlas de Rocas sedimentarias.
- [4] Ramsay, J., & Huber, M. (1987). The Techniques of Modern Structural Geology, Volume 2 Folds and Fractures.
- [5] Gonzales, L., & Ferrer, I. (2002). Ingeniería Geológica.
- [6] Notestein, F., Hubman, C., & Bowler, J. (1944). Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America. Bulletin of the Geological society of America.
- [7] Fúquen, J., Leonardo, L., Marín, E., Patiño, A., & Pedraza, A. (2011). Geología de las planchas 98-Durania y 99-Villa del Rosario Norte de Santander-Colombia. Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS).
- [8] Boinet, T., Bourgois, J., & Mendoza-Forero, H. (1981). Tectónica de sobrecoimiento y sus implicaciones estructurales en el área Pamplona-Labateca Cordillera Oriental de Colombia. Boletín de Geología. Estructurales.
- [9] Clavijo, J. (1994). Mapa geológico generalizado de Norte de Santander. Escala 1: 250.000. Mapa interno. Bucaramanga. Ingeominas
- [10] Royero, J., & Clavijo. (2001). Mapa Geológico generalizado departamento de Santander. Bogotá: Ingeominas
- [11] Oviedo, J. (2015). Geomorfología Tectónica del Sistema de Fallas del Zulia en el flanco occidental del Sinclinal del Zulia, Norte de Santander – Colombia. Bogotá.: Universidad Nacional de Bogotá.
- [12] Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2016) Cartografía geológica de la plancha 87 – Sardinata departamento de Norte de Santander Bogotá D.C
- [13] Ovallos, L. (2018) Sección estructural en las quebradas La Patilla y Garrochero, y las veredas Alto del Angulo y La Patilla, en el municipio de Salazar de las Palmas, Norte de Santander, Colombia. Villa del Rosario.: Universidad de Pamplona.
- [14] Cedié, F.; Shaw, R. P., and Cáceres, C. (2003). Tectonic assembly of the northern Andean block. En Bartolini, C.; Buffler, R.T., and Blickwede, J. (Eds.) The Circum-Gulf of Mexico and Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation and plate tectonics. American Association of Petroleum Geologists.
- [15] Ward, D.; Goldsmith, R.; Cruz, J. & Restrepo, A. (1973). Geología de los cuadrángulos H- 12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, Departamento de Santander.: Ingeominas, Boletín Geológico. Bogotá
- [16] Alfonso, C., & Mondragón, J. (2001). Evaluación regional de la Cuenca del Catatumbo Fase 1. Ecopetrol, 124.
- [17] Renz, O., (1982). The Cretaceous Ammonites of Venezuela, 40-Lams. Editada Por Maraven S.A.,

- Subsidiaria De Petróleo De Venezuela Birkhausen Verlag, Baselrenz.
- [18] Hedberg, H. D. (1928). Some Aspects of Sedimentary Petrography in Relation to Stratigraphy in the Bolivar Coast Fields of the Maracaibo Basin, Venezuela. *Journal of Paleontology*. <http://www.jstor.org/stable/1297891>.
- [19] Pacheco, R. (2017). Posición Estratigráfica, Espesor Y Génesis De Los Niveles De Roca Fosfórica De La Formación La Luna En La Quebrada La Patilla En El Municipio De Salazar De Las Palmas, Norte De Santander.
- [20] Pedraza, P., & Ramírez, Y. (2011). Catatumbo Basin Vol. 5 (p. 135). Medellín, Colombia: ANH-University EAFIT. Department of Geology.
- [21] López, N. (2014). Estilo estructural asociado al sistema de fallas Las Mercedes en el sector de Lourdes y Gramalote, norte de Santander. Bucaramanga: Servicio Geológico Colombiano.
- [22] Willson, J.L. (1975) Carbonate Facies In Geologic History, Pp. 1-25. Springer-Verlag, Berlin.
- [23] Etayo-Serna, F., Barrero, D., Lozano, H., Espinosa, A., González, H., Orrego, A., Ballesteros, I., Caro, H., Vargas, R., Nuñez, A., Alvarez, J., Ropaín, C., Cardozo, E., Galvis, N., Y Sarmiento, L. 1983. Mapas De Terrenos Geológicos De Colombia. Ingeominas.