

**Análisis de Factores de Riesgos Geológicos del Valle Medio del Magdalena Frente a la  
Implementación de la Técnica del Fracturamiento Hidráulico en Yacimientos en Roca  
Generadora (Fracking)**

**Kelly Johana Osorio Jaimes, Jennifer Yolima Mejía Araque**

**Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniera de Petróleos**

**Director:**

**Harving Díaz Consuegra**

**Especialista en Ingeniería Ambiental**

**Co-Director:**

**Danilo Alfonso González Pacheco**

**Geólogo**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad Físico-Químicas**

**Escuela de Ingeniería de Petróleos**

**Bucaramanga**

**2020**

**Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	15
1. Objetivos .....	17
1.1 Objetivo general.....	17
1.2 Objetivos específicos .....	17
2. Marco Teórico.....	18
2.1 Fracturamiento hidráulico multietapas en pozos horizontales (fracking).....	18
2.1.1 Breve historia. ....	18
2.1.2 Generalidades.....	19
2.1.3 Orientación de las fracturas.. ....	21
2.1.4 Fracturas horizontales. ....	21
2.1.5 Fracturas Verticales. ....	22
2.1.6 Ámbito internacional sobre el fracking.....	22
2.2 Geología del Petróleo.....	24
2.2.1 Roca Generadora.....	24
2.2.2 Roca Almacenadora. ....	25
2.2.3 Roca Sello. ....	25
3. Metodología .....	25

4. Descripción del área de estudio .....	27
4.1 Localización del área de estudio .....	27
4.1.1 Límites de la cuenca Valle Medio del Magdalena.....	29
4.2 Geología Estructural .....	30
4.3 Geología histórica .....	30
4.4 Evolución tectónica estructural de la cuenca del Valle Medio del Magdalena. ....	31
5. Geología Estratigráfica y estructural en el área de estudio.....	33
5.1 Estratigrafía de la zona de estudio .....	33
5.1.1 Formación Tambor.....	33
5.1.2 La Formación Rosa Blanca.....	33
5.1.3 Formación paja.....	34
5.1.4 Formación Tablazo. ....	34
5.1.5 Formación Simití. ....	35
5.1.6 Formación La Luna.....	36
5.1.7 Formación Umir.....	39
5.1.8 Formación Lisama. ....	40
5.1.9 Formación La Paz. ....	41
5.1.10 Formación Esmeralda. ....	42
5.1.11 Formación Mugrosa. ....	42
5.1.12 Formación Colorado. ....	43
5.1.13 Grupo real. ....	43
5.1.14 Formación mesa. ....	44
5.2 Geología de la zona de estudio énfasis rocas generadoras .....	46

5.2.1 Formación Tablazo. ....	46
5.2.2 Formación Simití. ....	46
5.2.3 Formación Luna. ....	46
5.3 Geología estructural de la zona de estudio .....	47
5.3.1 Fallas .....	47
5.4 Análisis de la dinámica tectónica de la zona de estudio .....	56
5.4.1 Corte A – A’ .....	58
5.4.2 Corte B-B’ .....	66
5.4.3 Corte C-C’ .....	73
5.4.4 Corte D-D’ .....	83
5.4.5 Corte E-E’ .....	90
6. Análisis de la sismología del área de estudio.....	99
7. Análisis de riesgos en la zona de estudio en roca generadora .....	107
7.1 Vulnerabilidad asociada a la estratigrafía y dinámica tectónica.....	107
7.2 Vulnerabilidad asociada a la sismicidad. ....	108
8. Conclusiones .....	111
9. Recomendaciones .....	112
Referencias bibliográficas.....	114
Apéndices.....	121

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<i>Figura 1.</i> Esquema de la técnica “fracking”.....	20
<i>Figura 2.</i> Descripción del área de estudio. ....	28
<i>Figura 3.</i> Localización del VMM, configuración estructural.....	29
<i>Figura 4.</i> Estratigrafía del VMM.....	45
<i>Figura 5.</i> Visualización del corte A-A' en la zona de estudio .....	58
<i>Figura 6.</i> Adelgazamiento y acuñaamiento de las rocas de la cuenca al costado occidental.....	59
<i>Figura 7.</i> Engrosamiento de las unidades litoestratigráficas en el costado oriental de la cuenca VMM.....	59
<i>Figura 8.</i> Formación Rosa Blanca.....	60
<i>Figura 9.</i> Adelgazamiento y acuñaamiento de la Fm Tablazo sector occidente de la cuenca. ....	61
<i>Figura 10.</i> Acuñaamiento de la fm el Salto, sector occidente de la cuenca.....	62
<i>Figura 11.</i> Adelgazamiento y acuñaamiento fm Umir.....	63
<i>Figura 12.</i> Homoclinal parte occidental de la cuenca.....	64
<i>Figura 13.</i> Falla de Simití.....	65
<i>Figura 14.</i> Falla cabalgamiento y monoclinal.....	65
<i>Figura 15.</i> Visualización del corte B-B' en la zona de estudio.....	66
<i>Figura 16.</i> Geometría de la cuenca.....	67

<i>Figura 17.</i> Formación Rosa Blanca. ....	68
<i>Figura 18.</i> La figura señala las discordancias referenciadas en el texto: saeta roja corresponde al contacto entre la fm Paja y Simití, la saeta azul corresponde al contacto entre las fm Umir y Mugrosa, la saeta negra muestra la discordancia angular y el contacto. ....	70
<i>Figura 19.</i> SFBSM que muestran un estilo estructural en flor positiva asimétrica al costado oriental de la cuenca.....	72
<i>Figura 20.</i> Fallas cañabral (saeta verde) y cañaletal que afectan el basamento y las rocas de la cuenca. ....	72
<i>Figura 21.</i> Visualización del corte C-C' en la zona de estudio.....	73
<i>Figura 22.</i> Sector central de la cuenca donde se evidencia la formación Tambor acuñada por un cabalgamiento y retrocabalgamiento por la falla Arrugas. ....	74
<i>Figura 23.</i> Depositación de la fm Rosa Blanca sobre el basamento por la ausencia de la fm Tambor. Límite occidental definido por la falla de casa Nueva. Faltante de tiempo entre las formaciones La Luna y Esmeralda. ....	79
<i>Figura 24.</i> Sistema de cabalgamientos entre las fallas Casabe, Arrugas e Infantas, que configura la geometría de los grupos de roca. Disconformidades de las rocas del grupo Real sobre las formaciones Colorado y Esmeralda (Saeta Roja). Disconformidades de la forma.....	80
<i>Figura 25.</i> Sector Occidental, rocas subhorizontales y con menor influencias de fallas. Bordes de la cuenca por sistema de transcurrancia de la falla Casa Nueva. ....	81
<i>Figura 26.</i> Sector central. Sistema de pliegues y cabalgamientos asociados con patrones estructurales compresionales. ....	82
<i>Figura 27.</i> Sector Oriental, Dominado principalmente por fallas de transcurrancia que cortan en alto ángulo incluso el basamento cristalino. La cinemática de estas fallas imprime la geometría	

de estos cuerpos de roca. Característica en este grupo de fallas La falladle San Vicente y Falla del Suarez.....	82
<i>Figura 28.</i> Visualización del corte D-D' en la zona de estudio .....	83
<i>Figura 29.</i> Sector occidental de la cuenca con estratos subhorizontales. El límite occidental es la falla Casa Nueva. Las rocas de este sector hacen parte del bloque yacente de la falla Casabe....	88
<i>Figura 30.</i> Sistema de cabalgamientos imbricados de las fallas Casabe, Infantas y La Salina generadas a partir de una falla de despegue (Despegue saeta azul). Estructura del sinclinal de nuevo mundo (Saeta roja). Monoclinal en el sector central (saeta naranja). Pliegue de arrastre generado por la falla Infantas (saeta negra), sistema de pliegues en el bloque yacente de la falla la Salina (saeta morada).....	89
<i>Figura 31.</i> Sistema transcurrente en el borde oriental de la cuenca que afecta el basamento cristalino.....	89
<i>Figura 32.</i> Visualización del corte E-E' en la zona de estudio .....	90
<i>Figura 33.</i> Margen occidental de la cuenca. Pinchamiento en ángulo de las rocas de la cuenca contra su límite occidental. Hiato que pone en contacto la formación Mugrosa con las rocas del grupo Real (Saeta Negra). Adelgazamiento de la formación Mesa hasta no depositarse en el borde occidental de la cuenca. ....	92
<i>Figura 34.</i> Depositación lenticular de la Formación Mesa en el sector central de la cuenca (Saeta negra). ....	93
<i>Figura 35.</i> Homoclinal en el sector occidental de la cuenca. (Homoclinal = Basculamiento).....	97
<i>Figura 36.</i> Fallas geológicas en el sector central de la cuenca. Generación de pliegues por flexión y flexura de falla. ....	98
<i>Figura 37.</i> Sistemas de cabalgamiento de las Fallas La Salina y Landázuri. ....	99

---

<i>Figura 38.</i> Mapa de sismicidad del valle medio del Magdalena. ....	100
<i>Figura 39.</i> Mapa de Sismicidad asociado a sismos con hipocentros de 6 a 35Km. ....	102
<i>Figura 40.</i> Sismicidad a profundidades entre 6-35 km.....	103
<i>Figura 41.</i> Sismos en la cuenca del VMM con profundidades de 0 a 6km.....	105
<i>Figura 42.</i> Sismos a profundidades entre 0 y 6 km. ....	106

**Lista de apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Corte A-A' plasmado en la zona de estudio con la respectiva leyenda y simbología. .....	121
Apéndice B. Corte B-B' plasmado en la zona de estudio con la respectiva leyenda y simbología.....	122
Apéndice C. Corte C-C' plasmado en la zona de estudio con la respectiva leyenda y simbología.....	123
Apéndice D. Corte D-D' plasmado en la zona de estudio con la respectiva leyenda y simbología. .....	124
Apéndice E. Corte E-E' plasmado en la zona de estudio con la respectiva leyenda y simbología.....	125

## Resumen

**Título:** Análisis de factores de riesgos geológicos del valle medio del Magdalena frente a la implementación de la técnica del fracturamiento hidráulico en yacimientos en roca generadora (FRACKING).\*

**Autores:** Kelly Johana Osorio Jaimes Y Yolima Mejía Araque\*\*

**Palabras claves:** Fracturamiento Hidráulico, Valle Medio Del Magdalena, Geología Estructural.

**Descripción:** Colombia se ha inclinado en la exploración y explotación de yacimientos no convencionales implementando la técnica del fracturamiento hidráulico para abastecer en crudo y gas en un futuro. Debido que este tema ha sido muy polémico en los últimos años por la posible contaminación ambiental, este proyecto fue enfocado en el análisis de los riesgos geológicos asociados a la vulnerabilidad del Valle Medio del Magdalena, específicamente en los departamentos de Cesar y Santander delimitando la cuenca para la implementación del fracturamiento hidráulico “fracking” en yacimientos en roca generadora, preferencialmente en las formaciones Tablazo y Simití debido a sus características particulares. Se realizaron 5 cortes geológicos que cubrieron la zona de estudio en los bloques adjudicados por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) en los departamentos de Cesar y Santander, con el fin de analizar la estratigrafía y dinámica tectónica de la zona en conjunto con el análisis de sismología, utilizando los sismos registrados desde la fecha 1 de junio de 1983 hasta el 30 de Abril de 2019 en el Servicio Geológico Colombiano. De esta manera se determinó las zonas con un mejor prospecto para la implementación de la técnica teniendo en cuenta la vulnerabilidad asociada a geología estructural, estratigrafía, fallas geológicas y sismicidad.

Los eventos sísmicos de mayor intensidad (especialmente los sismos de 5 MI) se registraron en el sector oriental, asociados a la cordillera y a las fallas que delimitan la cuenca, lo cual permite inferir que en estas zonas la probabilidad de activación o desencadenamiento de sismos es más alta, que en las zonas central y norte.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad Físico-Químicas. Escuela de ingeniería de petróleos. Director: Harving Díaz Consuegra, Especialista en Ingeniería Ambiental. Co-Director: Danilo Alfonso González Pacheco, Geólogo.

### Summary

**Title:** Analysis of geological risk factors of the Middle Magdalena Valley against the implementation of the technique of hydraulic fracturing in deposits in generating rock (FRACKING).\*

**Authors:** Kelly Johana Osorio Jaimes and Yolima Mejía Araque\*\*

**Keywords:** Hydraulic fracturing, Middle Magdalena Valley, Structural Geology.

**Description:** Colombia has been inclined in the exploration and exploitation of unconventional deposits, implementing the technique of hydraulic fracturing to supply oil and gas in the future. Because this issue has been very controversial in recent years due to the possible environmental pollution, this project was focused on the analysis of the geological risks associated with the vulnerability of the Middle Magdalena Valley, specifically in the departments of Cesar and Santander delimiting the basin for the implementation of the hydraulic fracking “fracking” in deposits in generating rock, preferably in the Tablazo and Simití formations due to their particular characteristics. 5 geological cuts were made that covered the study area in the blocks awarded by the National Hydrocarbons Agency (NHA) in the departments of Cesar and Santander, in order to analyze the stratigraphy and tectonic dynamics of the area in conjunction with the analysis of seismology, using earthquakes registered from June 1, 1983 until April 30, 2019 in the Colombian Geological Service. In this way, the areas with a better prospectus for the implementation of the technique were determined taking into account the vulnerability associated with structural geology, stratigraphy, geological faults and seismicity.

The most intense seismic events (especially the 5 MI earthquakes) were recorded in the eastern sector, associated with the mountain range and the faults that delimit the basin, which allows to infer that in these areas the probability of earthquake activation or triggering is higher, than in the central and northern areas. The most intense seismic events (especially the 5 MI earthquakes) were recorded in the eastern sector, associated with the mountain range and the faults that delimit the basin, which allows to infer that in these areas the probability of earthquake activation or triggering is higher, than in the central and northern areas.

---

\* Degree work

\*\* Physical-Chemical Faculty. Petroleum engineering school. Director: Harving Díaz Consuegra, Environmental Engineering Specialist. Co-Director: Danilo Alfonso González Pacheco, Geologist.

## Introducción

El Valle Medio Magdalena (VMM) es una cuenca sedimentaria situada al noroeste de Colombia, cuenta con depósitos de petróleo, es una región con una complejidad geológica y se encuentra en una zona en la que se produce la interacción entre diferentes placas tectónicas.

A medida que pasa el tiempo la demanda de energía aumenta y los recursos en yacimientos convencionales disminuyen, generando un desbalance energético del cual estamos directamente relacionados y afectados todos los colombianos; Teniendo en cuenta esto, Colombia se ha inclinado por la exploración y explotación en yacimientos no convencionales utilizando la técnica del fracturamiento hidráulico, lo cual generan un aporte significativo al abastecimiento del crudo y gas en un futuro.

Este problema de producción ha llevado a diversos debates de la implementación del “fracking” en Colombia. El principal tema de discusión es la conservación ambiental, en especial la contaminación de aguas subterráneas. La Agencia Internacional de Energía (2012), sugirió las reglas para la explotación de yacimientos no convencionales en las que evalúa diversos aspectos socio-económicos y científicos. En el ámbito geológico sugieren la importancia de definir una zona donde el “fracking” no afecte fallas profundas asociadas a sismos u aspectos como escape de fluidos a través de estratos geológicos, además mantener en constante monitoreo las fracturas generadas asegurando que éstas no se extiendan más allá de la zona de producción de hidrocarburo.

Este trabajo se realizó sobre la cuenca Valle Medio Magdalena, específicamente sobre municipios pertenecientes a los Departamentos Cesar y Santander delimitando la zona de estudio, con el objetivo de evaluar y analizar los factores de riesgo geológicos que se puedan presentar

frente a la implementación de la técnica de fracturamiento hidráulico en yacimientos de roca generadora, haciendo consulta en ANH, Servicio Geológico Colombiano, sobre el mapas de tierras, el estado de cartografía geológica actual, a modo de poder identificar estructuras geológicas influyentes en la migración de hidrocarburos y su relación con acuíferos aprovechables, estilos estructurales, también se llevó a cabo revisión de la sismicidad histórica para ver la influencia que puede tener la cuenca en la implementación del fracking.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo general

Identificar los riesgos geológicos de un sector del Valle Medio del Magdalena frente a la implementación de la técnica del fracturamiento hidráulico en yacimiento en roca generadora.

### 1.2 Objetivos específicos

- Definir la zona de estudio, identificando los bloques adjudicados por la ANH en el Valle Medio de Magdalena en los departamentos de Santander y Cesar, para exploración/explotación de yacimientos en roca generadora.
- Revisar las estructuras regionales y locales que rigen la dinámica tectónica del Valle Medio del Magdalena en la zona de estudio.
- Analizar la información de las últimas dos décadas de la actividad sísmológica en el área de estudio discriminando zonas profundas y de basamento cristalino; a la profundidad de la cuenca, profundidad de la roca generadora y conexiones con fallas geológicas regionales.
- Identificar los riesgos de la zona de estudio a la exploración/explotación de yacimientos en roca generadora.

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Fracturamiento hidráulico multietapas en pozos horizontales (fracking)

**2.1.1 Breve historia.** Antes de descubrir la tecnología de fracturamiento hidráulico y su aplicación, esta técnica ha sido aplicada en pozos de abastecimiento de agua para mejorar su permeabilidad y aumentar los caudales extraídos dando lugar a un aprovechamiento más eficiente de los recursos hídricos. Se trata de aislar los tramos productivos, mediante obturadores en el pozo e inyectar en ellos agua a alta presión hasta vencer la resistencia de la roca y crear fracturas que aumenten la permeabilidad y transmisibilidad del acuífero. (Suárez & Martínez, sf)

Las primeras aplicaciones de técnicas precursoras del "fracking" pueden ser rastreadas hasta 1860, cuando en varios estados del este de Estados Unidos se usaba nitroglicerina, primero líquida y luego sólida, para estimular la producción de petróleo en rocas someras de alta compresibilidad. A pesar del riesgo, el carácter ilegal de la actividad, la técnica, conocida como el "disparo", fue de alta efectividad para incrementar la producción en pozos de petróleo.

En 1930 nace la idea de inyectar fluidos no explosivos usando un tipo de ácido para estimular los pozos. Sin embargo, si tratamos de encontrar el verdadero "padre" de la técnica, fue solamente hasta los años 40 donde se presentaron los primeros procesos de experimentación y aplicación comercial de la técnica por parte de Floyd Farris, de la compañía Stanolind Oil and Gas Corporation (Amoco). (Arbeláez González, 2016)

En 1947, se realiza el primer tratamiento experimental de "hidrofracking" (Bustos Cedeño, 2012-2013) que fue probado en el campo de Hugoton, Kansas, usando ácido nafténico

( $C_nH_{2n+1}COOH$ ), que es un ácido de origen orgánico y palmítico mezclado con gasolina, con el fin de incrementar y estimular la producción de los pozos de gas.

Años más tarde el grupo Amoco obtuvo la patente del proceso y Halliburton pasó a ser la primera compañía en implementar fracturamiento hidráulico. (Montgomery and Smith, 2010).

Después de numerosas aplicaciones de campo, se empezó a usar el agua como materia prima en el proceso de hidrofractura, enfocándose la práctica a las fases secundarias de recobro de hidrocarburos en yacimientos convencionales, gracias a esta técnica se ha incrementado el factor de recobro en algunos pozos alcanzando hasta un 90%.

En los años 50, se desarrollaron nuevas variantes de la técnica al incorporar nuevos materiales y productos químicos que permitían aumentar el rendimiento y la eficiencia de la práctica, permitiendo su aplicación en yacimientos convencionales de diversos países del mundo como Noruega, Polonia, Checoslovaquia, Francia, Austria, Italia, Bulgaria, Rumania, Turquía, Túnez, entre otros.

**2.1.2 Generalidades.** El fracturamiento hidráulico es un tratamiento de estimulación que es utilizado para el aprovechamiento de pozos de gas o petróleo de baja permeabilidad, mediante la inyección de un fluido a alta presiones y velocidades para vencer la resistencia de la roca, generando agrietamiento o fracturas perpendiculares al pozo y se propaguen dentro de la formación, creando redes de drenaje artificiales.

Las fracturas permanecen abiertas gracias a la inyección de arena u otro material granular en varias etapas (Figura 1). Estos actúan como micropilares o columnas de sostenimiento, de manera que la fractura queda abierta y deja fluir el gas o petróleo. (Isabel Suarez y Roberto Martínez, “Fracking”).

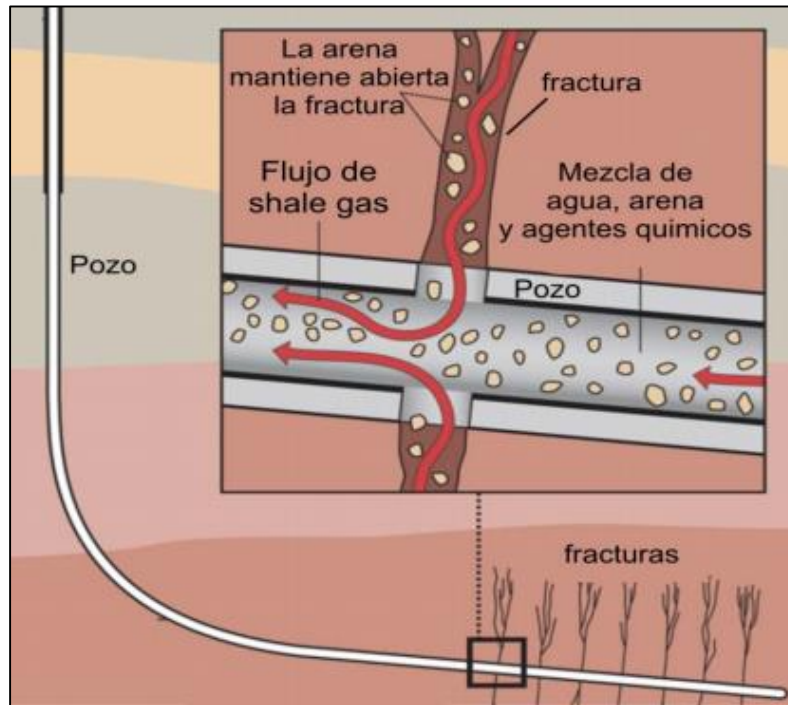


Figura 1. Esquema de la técnica “fracking”. Modificado de The Royal Society and The Royal Academy of Engineering 2012.

Como lo indica Pye, (Hydraulic Fracturing Process, 1971) la técnica consiste en la perforación de un pozo, inicialmente vertical, que al encontrar la formación productora, es orientada de manera paralela a la inclinación de la estratificación (se curva hasta la horizontal si la capa está horizontal). Una vez perforado, el pozo queda aislado de la formación por una tubería, mediante un cable es bajada una herramienta que consiste en un pequeño cañón que realiza una serie de perforaciones en la tubería y pone en contacto el pozo con la formación.

Por medio de la herramienta la operación consiste en introducir por bombeo un fluido fracturante compuesto por fases acuosas o aceitosas y productos químicos como reductores de fricción y reductores de pérdida de fluido, al pozo a altas presiones, con el fin de someter una porción de la formación a una presión hidráulica suficiente para causar la apertura del cuerpo

rocoso y de esta manera formar una fractura que se extiende desde el pozo hasta las formaciones circundantes.

El agente de reducción de pérdida de fluido se deposita sobre las caras expuestas de la formación con el fin de evitar el flujo del fluido por las formaciones permeables. Adicionalmente el fluido fracturante es nuevamente bombeado en el pozo y en la fractura a una velocidad de flujo y a una presión determinada, suficientes para extender la fractura a una distancia deseada desde el pozo.

Cuando se finaliza la perforación y se disminuye la presión de cada uno de los equipos de bombeo empleados se producen flujo de retorno de los fluidos presentes (flow-back) hacia la superficie, una vez colectado se trata en instalaciones adecuadas e indicadas para su disposición final.

**2.1.3 Orientación de las fracturas.** La fractura se crea y se propaga siempre en sentido perpendicular a la menor dirección de esfuerzo de la roca. Los factores que tienen mayor influencia en la orientación de la fractura son: la presión de los poros, la presión de la formación, la geometría de la roca, la elasticidad, la dureza y compresibilidad de la roca (API, 2010).

**2.1.4 Fracturas horizontales.** Si imaginamos la roca como un cubo perfecto, la tensión de confinamiento ejercida sobre el mismo por los tensores de esfuerzo según las tres dimensiones debe ser igual, a fin de que el cubo pueda permanecer inalterable en el espacio. Cuando se aplica presión en el centro de este bloque, la formación se agrieta o fractura en el plano horizontal. En general, estas fracturas son paralelas al plano de estratificación de la formación (API, 2009).

**2.1.5 Fracturas Verticales.** A medida que aumenta la profundidad, el esfuerzo de sobrecarga aumenta en la vertical a tasas de aproximadamente 1 libra/pie, siendo el mayor estrés ejercido sobre la roca. Esta situación, se produce generalmente a una profundidad superior a 2.000 pies (600 m aproximadamente) (API, 2009).

La fractura inducida será perpendicular a esta tensión, es decir, en la vertical. La longitud, espesor e intercomunicación con otras fracturas creadas se propagará en la dirección vertical, hacia cualquier capa está controlada por las condiciones de resistencia o elasticidad y presión de los fluidos inyectados en las formaciones suprayacentes. (API, 2009).

## **2.1.6 Ámbito internacional sobre el fracking**

**2.1.3.1 Estados Unidos:** Ha sido el principal impulsor de la fractura hidráulica y mediante la cual obtienen actualmente las mayores producciones, a nivel global, de gas y petróleo procedentes de YNC. Sus producciones comerciales se remontan desde los años noventa en Texas y Pensilvania; y alrededor de 30 estados como Ohio, Arkansas, Louisiana y Oklahoma explotan yacimientos no convencionales a partir del fracking. Sin embargo, algunas regiones, en donde se practica esta técnica, presentan elevados déficits hídricos (sequía), como Texas, Colorado o parte de California.

Las exploraciones más antiguas se extienden en torno de la cordillera de los Apalaches son; 1981 la firma Mitchell Energy perforó el primer pozo en la formación de gas no convencional denominada Barnett se trata de un yacimiento de lutita negra con un gas carbonífero de 12000km<sup>2</sup> de superficie y 2 km de profundidad y en 1986 se realiza por primera vez el fracking en la gran escala en la formación. (Borbón Bonilla, 2015, pág. 9)

Otra formación importante es Marcellus quién se encuentra directamente ligada con la estimulación hidráulica permitiendo obtener volúmenes económicamente rentables.

El auge del fracking en Estados Unidos, lo convirtió para el 2014 en el mayor productor mundial de petróleo y gas proveniente de yacimientos no convencionales. (Arbeláez González, 2016)

**2.1.3.2 Canadá:** De las 35.000 operaciones de fracking realizadas al año en todo el mundo, Canadá es junto con Estados Unidos el país que presenta el mayor número, ya que en Canadá las reservas de gas en lutitas son considerables, lo que se ve apoyado en dicho país por una infraestructura para la producción y exportación de gas natural bien desarrollada.

**2.1.3.3 Argentina:** En el año 2011, publicó el yacimiento de gas en lutita de Vaca Muerta, el cual sería el más grande fuera de América del Norte, y situaría a Argentina entre los principales productores mundiales de hidrocarburos no convencionales durante las próximas décadas.

**2.1.3.4 Otros países de américa del sur:** Según la Agencia de Energía de Estados Unidos, en orden de mayor a menor lugar en poseer grandes reservas de gas en lutita, se encuentra Brasil, seguido de Venezuela, Paraguay, Colombia y Chile.

**2.1.3.5 Zonas con yacimientos no convencionales en Colombia:** Según la Agencia de Energía de Estados Unidos, Colombia presenta un potencial alto de YHNC. Así mismo, la Asociación Colombiana del Petróleo (ACP), considera que la explotación de YNC es una oportunidad para incrementar las reservas y producción del país, autoabastecer energéticamente a la Nación, consolidar su perfil exportador de hidrocarburos y aumentar los recursos por cuenta de la renta

petrolera. Adicionalmente, la ACP estima que los proyectos de YNC generarán empleos directos e indirectos en las regiones donde se llevarán a cabo dichos proyectos, permitiendo un desarrollo económico para la región en general.

La cuenca sedimentaria del Valle Medio del Magdalena es una zona que manifiesta un alto potencial de formaciones conformadas por litologías que cumplen con las características de baja permeabilidad y porosidad, como la Formación La Luna, en la cual se pueden llevar a cabo perforaciones del tipo exploratorio para YHNC, como el Oil Shale y Gas Shale.

## 2.2 Geología del Petróleo

**2.2.1 Roca Generadora.** Las rocas generadoras son el resultado de una convergencia de procesos físicos, bioquímicos y geológicos, que culminan en la formación de rocas sedimentarias de grano fino con contenido de materia orgánica rica en carbono e hidrógeno. La cantidad y tipo de material orgánico incorporado en una roca generadora son controlados, en parte, por las condiciones ambientales y depositacionales. Las rocas generadoras se forman en donde las condiciones ambientales sustentan actividades biológicas que producen grandes cantidades de materia orgánica, en donde las condiciones depositacionales concentran esta materia y en donde las condiciones post-depositacionales permiten su preservación. (Jacobson, 1991, págs. 3-11)

**2.2.2 Roca Almacenadora.** Hasta hoy, el 99,9% de las reservas descubiertas se encuentran en rocas terciarias. No obstante, los campos Buturama (1953), Totumal (1959) y recientemente los pozos Olivo-1 y Catalina-1 (1998), han mostrado producción de hidrocarburos en rocas calcáreas cretácicas. Asociadas a la secuencia terciaria han sido probadas como rocas almacenadoras las formaciones Colorado, Mugrosa, Esmeraldas y La Paz. En la secuencia cretácica han sido probadas las formaciones La Luna y Rosablanca (Buchelli et al., 2000).

En la actualidad se tienen como unidades potenciales para futuros prospectos, las calizas del Grupo Calcáreo Basal del Valanginiano - Barremiano y, en menor proporción, los niveles siliciclásticos de la Formación Los Santos del Berriasiano (Buchelli et al., 2000).

**2.2.3 Roca Sello.** Son rocas sellos los niveles arcillosos intra-formacionales de las unidades terciarias y las unidades arcillosas del Cretácico, siendo éstas últimas las más efectivas dado su espesor y extensión regional (Buchelli et al., 2000).

### 3. Metodología

Este trabajo fue realizado en varias fases divididas en: recopilación de material bibliográfico, agrupación de la cartografía de la zona de estudio, consulta de datos de la sismicidad histórica y elaboración del informe final, que permitieron obtener los resultados e interpretaciones referenciados en capítulos posteriores.

Recopilación material bibliográfica: Consistió en la consulta y recopilación de material bibliográfico para soporte teórico y condiciones geológicas estructurales asociada al área de estudio.

Para la definición del área de estudio fue necesario acudir al mapa de tierras ubicado en la página de la ANH identificando los bloques asignados para la exploración y explotación de yacimientos no convencionales. Posteriormente los bloques adjudicados se ubicaron en el mapa de Colombia con el fin de determinar el sector de estudio correspondiente al sur del Cesar y Santander

Agrupación de la cartografía: Se realizó una consulta en el Servicio Geológico Colombiano (SGC) el estado de la cartografía geológica actual que oferta y la integración de las planchas del área de estudio correspondiente a las planchas 65,75,76, 85, 86, 96, 97, 108, 109, 118, 119, 120, 133, 134, 149 y 150.

Llevado a cabo la agrupación de las respectivas planchas, las cuales fueron escogidas mostrando los municipios que contienen los bloques adjudicados, se construyó un mapa con el fin de realizar cinco cortes geológicos con su respectivo perfil topográfico digitalizado en el software CorelDRAWx7y así determinar los límites y la distribución de las unidades estratigráficas de la cuenca, observar las relaciones de corte entre las estructuras para poder reconocer las profundidades y el perfil de las formaciones de interés en el estudio, conocer los estilos estructurales y por último reconocer que fallas pueden ser inconvenientes a la hora de realizar la técnica del fracking.

Consulta de datos de la sismicidad histórica: Los datos fueron obtenidos de la base de datos de la Red Sismológica Nacional con fechas que van desde 01 de junio de 1983 hasta el 30 de abril de

2019. Se realizó un mapa de sismicidad en la zona de estudio de la cuenca del VMM seleccionando profundidades que varían entre 0 y 6 km.

Elaboración de informe final, presentación de resultados e interpretaciones basados en todos los datos obtenidos en las diferentes fases anteriores.

## **4. Descripción del área de estudio**

### **4.1 Localización del área de estudio**

El área de estudio de este proyecto se encuentra ubicada en los municipios: la Gloria, Gamarra, Aguachica, Rio de Oro, San Martín, San Alberto, Puerto Wilches, Río Negro, Sabana de Torres, Barrancabermeja, Simacota, Puerto Parra, El Carmen, Cimitarra y Bolívar. La figura 2 muestra la ubicación del área del estudio dentro de la cuenca del Valle Medio del Magdalena.

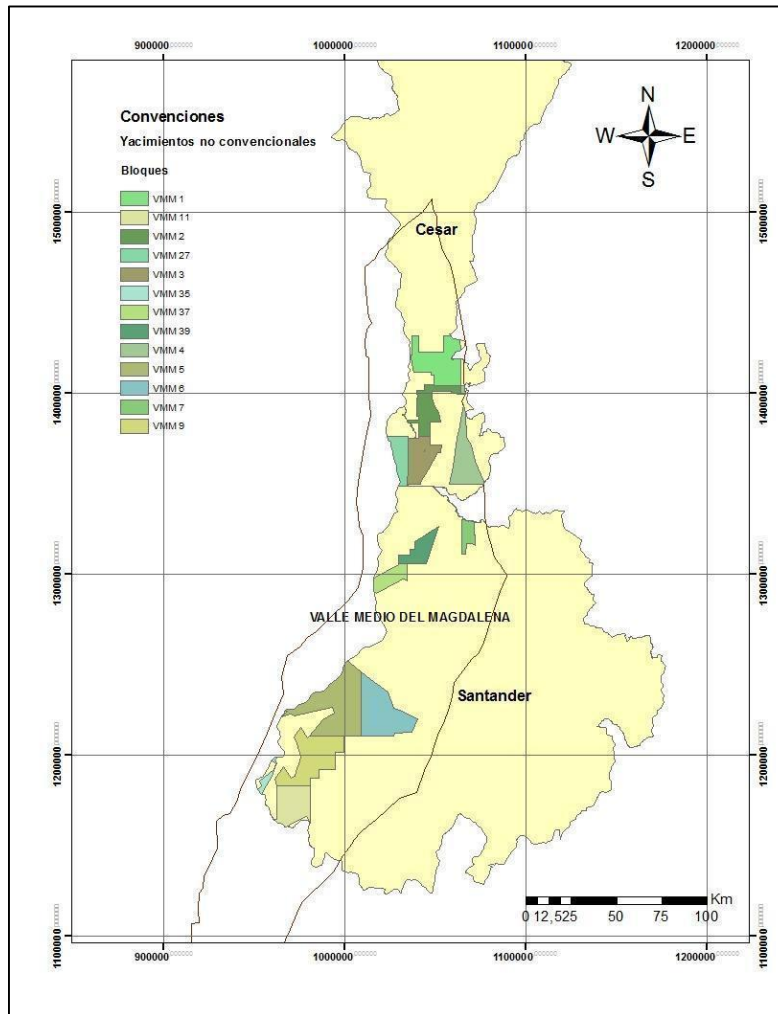


Figura 2. Descripción del área de estudio.

La cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM) está localizada geomorfológicamente a lo largo de la porción central del valle cursado por el río Magdalena, entre las cordilleras Oriental y Central de Los Andes colombianos, cubriendo un área de 32.000 km<sup>2</sup>. Comprende parte de los departamentos de Boyacá, Santander, Cundinamarca y Antioquia entre otros. En la figura 3 se observa el mapa de clasificación de las cuencas sedimentarias en Colombia, resaltando la localización de la cuenca del VMM modificado de (Barrero, Pardo, Vargas, & Marinez, 2007)

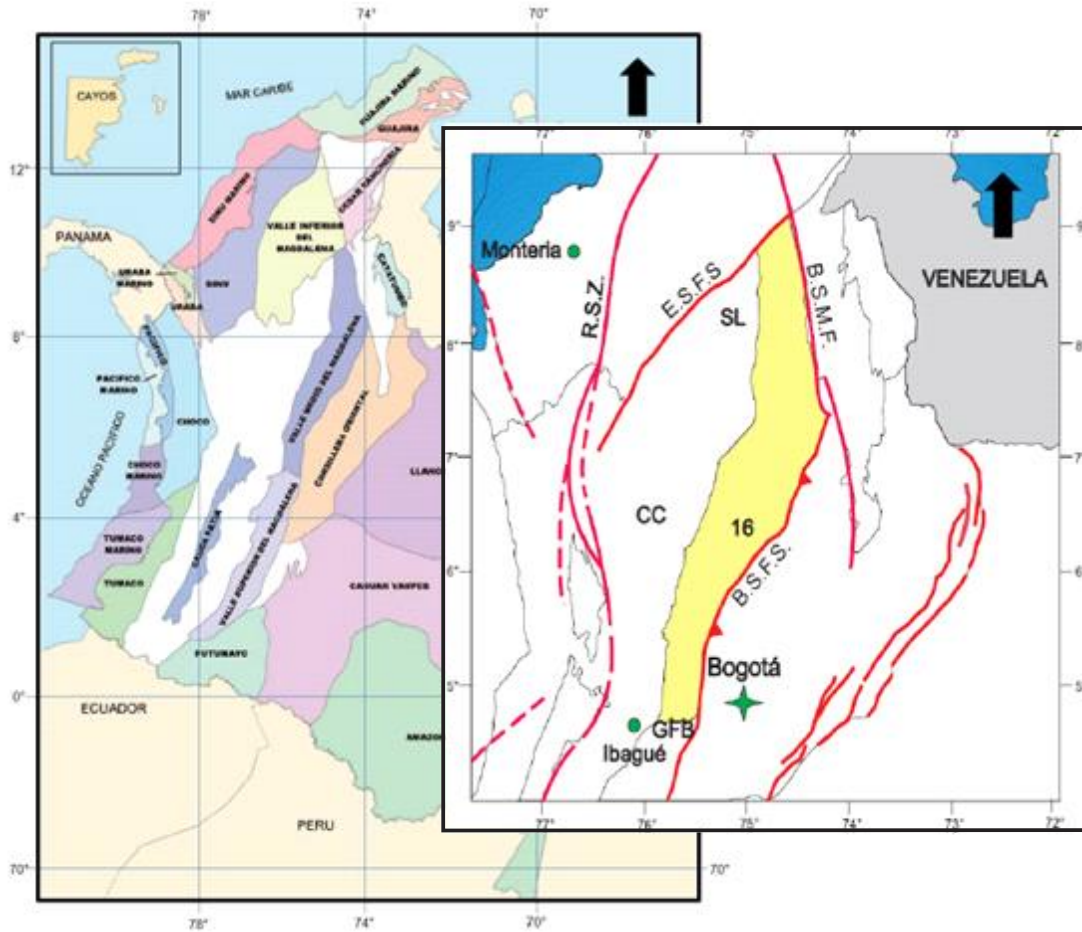


Figura 3. Localización del VMM, configuración estructural. Modificado de (Barrero, Pardo, Vargas, & Martinez, 2007)

Se observa el Mapa de clasificación de las Cuenas Sedimentarias en Colombia; y el otro mapa, muestra con más detalle, los límites de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.

**4.1.1 Límites de la cuenca Valle Medio del Magdalena.** La cuenca del VMM limita al sureste con el sistema de fallas La Salina y Bituima (Bituima and La Salina Fault Systems, B.S.F.S.); al norte con el sistema de fallas Espíritu Santo (Espíritu Santo Fault System, E.S.F.S.); al oeste con el onlap de sedimentos neógenos sobre la Serranía de San Lucas (SL) y el basamento de la

Cordillera Central (CC); al Sur con el cinturón plegado de Girardot (Girardot Fold Belt, GFB) y al noreste con el Sistema de Fallas Bucaramanga – Santa Marta (Bucaramanga– Santa Marta Fault System, B.S.M.F.)

#### **4.2 Geología Estructural**

Los estilos estructurales que caracterizan al Valle Medio del Magdalena pueden agruparse en tres (3) zonas diferenciadas: la zona oriental, caracterizada por la presencia de estructuras con tendencia NE-SO, representadas predominantemente por sistemas de cabalgamientos con vergencia principal hacia el Occidente, en profundidad se presentan estructuras de tipo duplex y en menor cantidad, estructuras de inversión heredadas de fallas jurásicas y cretácicas. La zona occidental que presenta fallas inversas y cabalgamientos convergencia principal hacia el Oriente con una fuerte componente transpresiva. La zona central poco deformada, con algunas fallas normales fosilizadas (Buchelli et al., 2000).

#### **4.3 Geología histórica**

Según ConocoPhillips (s.f) el Valle Medio del Magdalena es una cuenca compleja, formada a partir del resultado de varios eventos tectónico divididos en dos fases tectónicas principalmente, una distensiva y una compresiva; la fase distensiva, ocurre entre el Triásico Tardío y el Cretácico Superior, periodo durante el cual se forma un graben o “rift” supra continental, bordeado por paleofallas normales, con subsidencia tectónica de bloques, que generó una transgresión que duró

hasta principios del Terciario, donde se depositaron formaciones de origen marino (formaciones Rosablanca, Tablazo, Simití, La Luna y Umir).

La segunda fase es de carácter compresional, que inicia en el Paleoceno hasta la actualidad con el levantamiento de la provincia de los macizos de Santander y Floresta, que marca un cambio en los patrones de sedimentación lo que genera una regresión, con la formación de la gran discordancia regional del Eoceno; la erosión remueve gran parte de la megasecuencia cretácica, aportando el material que forma las potentes unidades terciarias de origen continental. Durante el Paleógeno se depositó la Formación Lisama, compuesta por lutitas con intercalaciones de areniscas y durante el Eoceno temprano al Mioceno se depositaron las formaciones La Paz, Esmeraldas, Mugrosa y Colorado.

Durante el Mioceno – Plioceno, continúa el levantamiento de la cordillera Oriental y en el área de Aguachica se inicia un levantamiento diferencial desde la periferia hacia el centro del valle. En el Mioceno Medio a Tardío se presenta una fase de compresión más intensa, que provoca que las paleofallas normales se reactiven como fallas inversas y para el Mioceno Tardío – Plioceno – Pleistoceno se deposita la secuencia molásica del Grupo Real, constituida por capas gruesas de areniscas conglomeráticas, intercaladas con capas medias a gruesas de areniscas cuarzosas con matriz arcillosa y lodolitas, los depósitos semiconsolidados de abanicos pliocénicos y finalmente en el Holoceno los depósitos más recientes. (ConocoPhillips, s.f)

#### **4.4 Evolución tectónica estructural de la cuenca del Valle Medio del Magdalena.**

El período Jurásico Tardío a Cretáceo Temprano se caracterizó por procesos distensivos de bloques, permitiendo el desarrollo de grabens, en respuesta al proceso de rifting (fracturamiento o

agrietamiento de la corteza terrestre) que ocurrió durante la separación del margen noroeste del continente suramericano, con respecto al norteamericano. Dicho evento generó el crecimiento de un gran aulacógeno (cuenca) dispuesto en sentido noroeste – sureste, que propició el ingreso del mar cretácico. La fase de sedimentación del sistema de grabens fue rellenado por depósitos clásticos de carácter fluvial \*(informe de e interpretación sísmica componente horizontal y vertical- programa ANH línea regional Trasandina 4ª).

Posteriormente, a comienzos del Berriasiano - Valanginiano ocurrió la sedimentación de eventos marinos someros en dos cuencas de rift, separadas por el alto del paleo-macizo de Floresta-Santander (Cooper et. al., 1995). Las tasas de subsidencia en estas dos cuencas fueron relativamente altas, especialmente en el lapso Valanginiano – Hauteriviano. Los eventos de subsidencia cesaron a comienzos del Aptiano y las dos cuencas se unen formando una macro cuenca en la cual se depositan sedimentos de plataforma media a externa, la máxima profundización de esta fase es alcanzada en el Albiano medio.

El comienzo de la sedimentación post-rift se da a partir del Turoniano - Coniaciano y se mantiene hasta finales del Cretáceo, cuando se da una fase tectónica de esfuerzos compresivos en respuesta a la posición de la Cordillera Occidental. Este evento tectónico estructural origina un cambio en los patrones sedimentarios durante el Paleoceno Temprano, desarrollándose entonces ambientes de pantanos y llanuras de inundación.

A nivel del Paleoceno Tardío hasta el Oligoceno la sedimentación fue controlada por los pulsos tectónicos del levantamiento de la Cordillera Central, generando en primer lugar espacio y en segundo lugar aporte de materiales en ambientes de carácter fluvial, predominando el desarrollo de facies clásticas arenosas en las áreas cercanas al oeste de la cuenca. Desde el Oligoceno Medio

hasta el presente se está llevando a cabo el levantamiento de la cuenca Oriental de Colombia (Valentín et al., 2000)

## 5. Geología Estratigráfica y estructural en el área de estudio

### 5.1 Estratigrafía de la zona de estudio

**5.1.1 Formación Tambor.** La Formación Tambor comprende la mayor extensión en la CERS, con niveles bien definidos de cuarzoareniscas de grano muy grueso a fino, con superficies de oxidación, intercaladas con lodolitas silíceas, fisiles, de color gris hacia el contacto superior que es concordante con la formación Rosablanca. Por otro lado, se observan niveles de areniscas oscuras, con algún aporte de tipo carbonáceo. En la microcuenca la Formación Tambor se encuentra afectada por un juego de fallas de tipo normal, colocando bloques unos encima de otros que definen una repetición de la secuencia.

**5.1.2 La Formación Rosa Blanca.** Su nombre proviene del Cerro Rosa Blanca localizado por el Río Sogamoso, ahora Represa de Hidrosogamoso, cerca al poblado El Tablazo, donde fue propuesta su localidad tipo por Morales *et al.* (1958), en este sector reposa concordantemente sobre la Formación Tambor conformando parte del flanco E del Sinclinal de Nuevo Mundo.

Descrita originalmente por Wheeler (1929) y estudiada en detalle por Cardozo y Ramírez (1985) en la región de Villa de Leiva (Boyacá) y Gámbita (Santander). Se encuentra ampliamente

distribuida en el Departamento de Santander. Está compuesta en su parte inferior por capas de caliza y yeso, con oolitos, ostrácodos y dolomías; hacia la parte superior consta de areniscas y lodolitas calcáreas. En la parte inferior presenta depósitos evaporíticos como yeso y polihalita que indican una hipersalinidad y tranquilidad en las condiciones de depositación; el resto de la secuencia se depositó en un medio marino somero en condiciones neríticas. La edad comprende el intervalo Valanginiano - Hauteriviano inferior.

**5.1.3 Formación paja.** La Formación Paja deriva su nombre de la Quebrada La Paja afluente del Río Sogamoso (Morales *et al.* 1958), en el flanco E del Sinclinal de Nuevo Mundo (vía a San Vicente de Chucurí). Inicialmente descrita por Wheeler (en Morales, *et al.*, 1958); su localidad tipo es el Cerro Rosablanca al oriente del puente sobre el Río Sogamoso. Esta unidad está constituida por lutitas y shales gris oscuros a azulosos, fosilíferos, con intercalaciones de areniscas gris amarillentas, de grano fino, con algunas intercalaciones de shales grises, localmente arenosos, calcáreos, fosilíferos, con intercalaciones de areniscas gris amarillentas, de grano fino, también pequeñas intercalaciones de calizas grises, fosilíferas. La edad ha sido determinada del Barremiano inferior al Aptiano inferior.

**5.1.4 Formación Tablazo.** La Formación Tablazo fue propuesta por Morales *et al.* (1958) para definir un conjunto de capas de calizas fosilíferas masivas (bioesparitas).

Se ubica en el sitio El Tablazo, donde la carretera Bucaramanga - San Vicente de Chucurí atraviesa el Río Sogamoso; se encuentra constituida por «capas macizas de caliza extremadamente fosilíferas y margas, las primeras predominando en su parte superior y las últimas en la inferior».

Apunta además que: «las margas son muy calcáreas y que las calizas son macizas, de textura gruesa, extremadamente fosilíferas, opacas y de color gris azulado».

La edad se estima entre el Aptiano superior y el Albiano inferior, por comparación con las formaciones supra e infrayacentes, ya que no se reportan amonitas en la localidad.

Pertenece a la secuencia estratigráfica del Valle Medio del Río Magdalena, donde fue definida; se encuentra: al sureste y noreste de Aguachica, formando una franja al norte del municipio de Ayacucho, y sobre la carretera central al norte de Pelaya. Está representada por calizas grises a gris claras, en bancos gruesos, micríticos, duras, localmente con abundantes conchas de bivalvos, intercalaciones delgadas de lodolitas calcáreas con nódulos elipnoidales, en la base conglomerado gris con cantos de caliza, chert y cuarzo.

**5.1.5 Formación Simití.** Para Morales *et al.* (1958) la Formación Simití consiste de un conjunto de shales carbonosos, grises a negros, laminados y blandos, localmente calcáreos con concreciones comúnmente fosilíferas impregnadas de aceite que forman un espesor de 410m. En Mantilla *et al.* (2006 b), los afloramientos en la localidad tipo son escasos al estar cubiertos o anegados por el sistema fluvial actual del Río Magdalena. Estima que el 70% podrían ser arcillolitas fósiles con laminación plana paralela, formando conjuntos de capas gruesas y muy gruesas. En la parte media registran intercalaciones de areniscas calcáreas con concreciones fosilíferas y hacia el techo capas micríticas con amonitas del Albiano medio. En capas concrecionales se reconocen amonitas del Albiano superior cerca al contacto con la Formación Calizas del Salto.

**5.1.6 Formación La Luna.** La Formación La Luna, originalmente “La Luna Limestone” en Morales *et al.* (1958) deriva de la Quebrada del mismo nombre en la Serranía de Perijá en Venezuela (Hedberg, 1931; Hedberg & Sass, 1937, en: Morales *et al.* 1958). Según Morales *et al.* Este nombre fue tomado por la industria petrolera por su marcada similitud litológica a la unidad aflorante en el VMM y aunque se ha extendido a otras áreas del territorio colombiano, agrupando intervalos no equivalentes, en el VMM mantiene los descriptores fundamentales como unidad estratigráfica donde fue subdividida en los Miembros Salada, Pujamana y Galembo.

Ha sido considerada la roca generadora por excelencia de hidrocarburos tanto en Venezuela como en el VMM en Colombia. En otras áreas como en la Cuenca del Catatumbo, sector de la Sierra Nevada del Cocuy e incluso en la parte sur del VMM y Valle Superior del Magdalena, su nombre se ha utilizado refiriéndose a parte de la misma, ya que cambios de facies representados en intromisión de sedimentos terrígenos la modifican, de acuerdo a la posición dentro de la amplia cuenca de depósito, desarrollada en el intervalo de tiempo en que la unidad se depositó.

**5.1.6.1 Formación La Luna. Miembro Galembo:** El Miembro Galembo o parte superior de la Formación La Luna toma su nombre del cerro del mismo nombre, en inmediaciones a la desembocadura de la Quebrada Pujamana en la Quebrada Arenal a su vez afluente del Río Sogamoso (Morales *et al.* 1958).

El contacto entre los dos miembros se reconoce claramente en afloramiento con la aparición del primer nivel de fosforitas o biomicritas fosfáticas intercaladas entre las biomicritas que mantienen su aspecto de material endurecido. Las fosforitas se destacan en capas medias y gruesas e incluso muy gruesas en las que se aprecia la laminación afectada por bioturbación y formando secuencias

granocrecientes. Estas secuencias al tope presentan cambios netos a biomicritas endurecidas con láminas plano paralelas de mayor o menor densidad de microfósiles.

En la Quebrada La Sorda el Miembro Galembo puede ser subdividido en dos segmentos separados por una contrastante superficie de inundación. El segmento inferior forma 3 secuencias granocrecientes separadas por superficies de inundación en las que se reconocen biomicritas de foraminíferos bentónicos, limo fino a muy fino de cuarzo, con matriz de micrita, lodo fosfático en general afectado por procesos intensos de silicificación, tal que algunos de estos intervalos de la base de las parasecuencias están totalmente silicificados y con apariencia de chert diagenético.

El segmento superior es de mayor espesor y con desarrollo de parasecuencias más discretas, no obstante, se diferencian al menos tres de ellas en las que se mantiene el mismo esquema de superficies de inundación y sucesiones de capas granocrecientes. Las capas de la base de estas secuencias son biomicritas de foraminíferos bentónicos con textura wackestone y packestone variable, con abundancia de estos fragmentados y aplastados en las que es notoria la porosidad primaria entre los elementos del armazón y ocupada por kerógeno.

**5.1.6.2 Formación La Luna. Miembro Pujamana:** El Miembro Pujamana es la unidad intermedia y la localidad tipo definida en la Quebrada Pujamana o Pujamanes, localizada 4 km al norte de la localidad anterior. Morales *et al.* (1958), la describen como un intervalo de shales grises a negros, calcáreos finamente estratificados. Respecto al espesor por la distorsión de los afloramientos y la plasticidad de los shales, las medidas de superficies son poco precisas.

**5.1.6.3 Formación La Luna. Miembro Salada:** EL Miembro Salada fue definido con localidad tipo en la desembocadura de la Quebrada Salada al Río Sogamoso y yace en contacto conforme con la infrayacente Formación Calizas del Salto. Morales *et al.* (1958) incluye en esta parte inferior shales calcáreos duros, negros finamente laminados en capas delgadas con aspecto de pizarras en afloramiento.

El segmento inferior, está conformado por un conjunto de capas gruesas de biomicritas endurecidas con laminación plana paralela e intercalaciones de eventuales capas medias a gruesas de biomicritas recristalizadas de color gris claro que en sección delgada son pseudoesparitas, a lo largo del segmento se ocurre baja densidad de concreciones discoidales de diagénesis temprana que deforman las biomicritas en la compactación.

En las láminas wackestone se generan láminas lentiformes micrita algo recristalizada y la formación de porosidad secundaria saturada con kerógeno. Las capas de pseudoesparita resaltan en afloramiento por su apreciable dureza y recristalización. Originalmente fueron biomicritas con impurezas de cuarzo o sílice donde durante el proceso diagenético se presenta recristalización alta o total, casi desapareciendo las porosidades primaria y secundaria y quedando la materia orgánica original reducida a pequeños parches. Las concreciones discoidales submétricas y esféricas centimétricas, se formaron durante procesos diagenéticos tempranos, anteriores a la compactación y cementación del entorno, tal que la laminación se aprecia contorneándola.

#### Facies de Shale Calcáreo laminado y Wackestone (SWI)

Esta facies consiste de capas de gran espesor, algunas de ellas alcanzan espesores de 3m, las capas de Shale calcáreo presentan laminación y algunas de ellas presentan foraminíferos. Esta facies se encuentra hacia la base del Miembro. El Wackestone presenta fragmentos de Shale

calcáreo y concreciones ovaladas y redondeadas de tamaños variables, esta facies representa la base del Miembro Salada.

Facies de Wackestone y Packestone laminado con concreciones (WPlc)

Esta facies consiste de Wackestone ligeramente laminado en algunos sectores con concreciones de gran tamaño, presenta restos de conchas, venas de calcita, el Packestone es muy similar presentando también concreciones calcáreas redondeadas. Esta facies se presenta hacia el tope del Miembro Salada y representan gran parte de la sección levantada en el Miembro Salada.

Facies de Shale no calcáreo con Shale calcáreo laminado (SSncl)

Esta facies consiste de Shale no calcáreo con capas de 30cm a 40cm de espesor, el Shale calcáreo con laminación planoparalela presenta algunas concreciones redondeadas y ovalados con alto contenido de foraminíferos pero bajo de fosfatos.

**5.1.7 Formación Umir.** La Formación Umir fue propuesta por Huntley en 1917 (en Morales *et al.* 1958); se encuentra localizada al nororiente del Valle Medio del río Magdalena y al occidente del Macizo de Santander, dentro del área denominada la Tigra su localidad tipo se describió en la quebrada del mismo nombre, afluente del Río Oponcito, en la vía Barrancabermeja - San Vicente de Chucurí, sector suroccidental del Sinclinal de Nuevo Mundo, en el Departamento de Santander.

En forma general se define como un conjunto de shales grises a negros, carbonosos, micáceos, con concreciones ferruginosas e intercalaciones cada vez más abundantes hacia el techo de areniscas líticas, limolitas grises y presencia de mantos explotables de carbón, reposa en contacto

neto sobre biomicritas fosfáticas limosas del Miembro Galembo de la Formación La Luna, aunque algunos autores la reportan en discordancia angular de bajo ángulo (Rangel *et al.* 2002).

La Formación Umir es una singular unidad del VMM tanto por el apreciable espesor acumulado como por el contrastante cambio litológico y composicional que la caracteriza. Aunque en su gran mayoría son lodolitas grises, son comunes las intercalaciones de arenitas y capas de carbón que se hacen más frecuentes hacia la parte media superior, donde se reconocen mantos explotables. Las areniscas de base a techo presentan composicionalmente aumento de los componentes líticos variando de sub-litoarenitas a litoarenitas siendo las partículas líticas predominantes en clásticos volcánicos y metamórficos de bajo grado (Guerrero, 2011).

**5.1.8 Formación Lisama.** Fue descrita originalmente por Link (en Morales, et al., 1958). Esta unidad aflora al occidente de Santander y su sección de referencia está en la Quebrada Lisama, afluente del Río Sogamoso. La unidad se encuentra constituida por una secuencia de lutitas abigarradas, alternadas con areniscas grises, verdosas y pardas, de grano fino a medio y algunas capas delgadas de carbón. El depósito de estos sedimentos ocurrió en un ambiente bajo condiciones lagunares deltáicas.

La edad es Paleoceno Tardío (Van Der Hammen, 1958).

La formación Lisama conformada por capas irregulares de conglomerados de intraclastos que se van haciendo menos frecuentes en espesor y tamaño hacia el techo, capas de arenitas con estratificación cruzada e intercalaciones menores de lodolitas y arenitas finas.

**5.1.9 Formación La Paz.** La Formación La Paz toma su nombre de la serranía o escarpe extendido entre el Río Sogamoso y el Río Lebrija, ríos que cortan perpendicularmente a la unidad, al igual que el Río Sucio. El contacto con la Formación Lisama es neto, erosivo, mostrando un evidente cambio litológico y por ende en los medios sedimentarios y una fuerte activación de las áreas de aporte terrígenas y su edad de la Formación La Paz es Eoceno Medio a Tardío.

La secuencia estratigráfica está compuesta por areniscas grises, conglomeráticas, conglomerados, limolitas y grandes paquetes de lutitas grises. El depósito de los sedimentos de esta unidad se desarrolló en un ambiente de corrientes trenzadas. Conforme a su posición estratigráfica, la unidad se considera del Eoceno superior. Es correlacionable con la parte inferior de la Formación Mirador.

La Formación La Paz están constituidos por capas gruesas de conglomerados de guijos gruesos a cantos finos y a areniscas gruesas a finas. Los clastos redondeados de los conglomerados son compuestos de chert diagenético, biomicritas y biomicritas parcialmente silicificadas, cuarzo y otros tipos de líticos de afinidad volcánica, sedimentaria y metamórfica.

Las capas varían desde macrocuneiformes de espesor a conjuntos de capas gruesas cuneiformes con estratificación cruzada. Estas capas están separadas por arenitas de grano grueso a fino con estratificación cruzada angular a laminación plano paralela.

Sobre este segmento continúa un conjunto de arenitas de grano medio a muy fino y lodolitas con moteado pardo y tonos violáceos por efectos de pedobioturbación.

Sobre esta sucesión se reconoce lodolitas varicoloreadas, moteadas por procesos pedogenéticos e intercalaciones subordinadas de areniscas conglomeráticas y estratificación cruzada (Rojas, 1985; Caballero *et al.* 2010). Estas facies se desarrollan en llanuras de inundación con eventuales flujos de mayor energía. El resto de la secuencia es un espeso segmento de areniscas muy gruesas

a medias con estratificación cruzada tangencial y en artesa, en capas amalgamadas de contactos erosivos, a veces definidos por niveles conglomeráticos y de intraclastos.

**5.1.10 Formación Esmeralda.** A la Formación Esmeraldas se le asignó la localidad tipo por el Río Sogamoso en el Flanco E del Sinclinal de Nuevo Mundo. Su contacto inferior se define en el inicio del predominio de lodolitas sobre los paquetes arenosos de la formación La Paz. Esta unidad se compone de areniscas grises y verdosas, de grano fino, con intercalaciones de limolitas y lutitas moteadas de rojo, púrpura y pardo; contiene algunas capas delgadas de carbón. El ambiente deposicional fue bajo condiciones lagunares deltáicas. La unidad es del Oligoceno. Es correlacionable con la parte superior de la Formación Mirador y parte inferior de la Formación Carbonera.

El ambiente corresponde a sistemas fluviales de llanuras aluviales y ríos meándricos que varían hacia el norte a llanuras bajas lacustres afectadas al parecer por influencia marina, donde se desarrolla el nivel fosilífero “Los Corros” de gasterópodos, bivalvos y macrofragmentos vegetales (Caballero *et al.* 2010).

**5.1.11 Formación Mugrosa.** La Formación Mugrosa su nombre fue introducido por Gill (en Morales, *et al.*, 1958) y corresponde a la parte inferior del grupo Chuspas; su sección tipo se encuentra en la quebrada Mugrosa.

Según Caballero *et al.* (2010), la unidad está compuesta en su parte inferior por areniscas gris verdosas, de grano fino a medio, con intercalaciones de lodolitas grises a azulosas y algunas capas de areniscas conglomeráticas. La parte media consta de shales moteados con algunas

intercalaciones de arenisca. Hacia la parte superior hay lodolitas moteadas, fosilíferas. Es una de las unidades más productivas de petróleo en la Concesión de Mares.

El ambiente de depósitos se considera como continental fluvial, conformada por canales meandriformes que se caracterizan por ser granodecrecientes hacia el tope en la facie de canal y granocreciente en la facie de crevasse splay (Ortiz, A. 2001).

La unidad es considerada del Eoceno superior – Oligoceno inferior.

**5.1.12 Formación Colorado.** La formación Colorado toma su nombre del Río Colorado al sur del SNM en el Campo Cira – Infantas para definir una espesa secuencia de 1.250m que incluye el horizonte fosilífero de “La Cira” su edad se ha asignado al oligoceno tardío y mioceno temprano.

Para Caballero *et al.* (2010) es una sucesión estrato creciente con facies que permiten predecir abanicos aluviales canaliformes (ríos trenzados) hacia el SNM.

**5.1.13 Grupo real.** De acuerdo a Morales *et al.* (1958) se denomina Grupo Real a la unidad del Neógeno cuya localidad tipo se establece en inmediaciones a la desembocadura de la Quebrada Real en el Río Opón al SW del SNM.

En general es muy espesa formada de conglomerados de guijos de chert negro, cuarzo, arenisca y suprayacidos de areniscas guijosas con estratificación cruzada e intercalaciones de lodolitas varicoloreadas.

Presenta lodolitas varicoloreadas y areniscas subordinadas con estratificación cruzada, areniscas en las que son comunes los fragmentos de troncos silicificados o carbonizados. Sobre este material se presentan lodolitas varicoloreadas con intercalaciones de areniscas con grandes

cantidades de horblenda y augita. Esta unidad se acumula discordantemente sobre la Formación Colorado, su edad del Grupo Real se ha asignado al Mioceno Tardío.

**5.1.14 Formación mesa.** La Formación Mesa aflora en el área comprendida entre La Dorada y La Victoria (Departamento de Caldas), de edad Plioceno temprano, se encuentra constituida siguiendo el criterio de Hettner se compone de una alternancia de gravas de rocas metamórficas, cuarzo y principalmente rocas de tipo volcánico: dacita y andesita; en algunos niveles existe gran cantidad de piedra pómez.

Las rocas ígneas y las rocas sedimentarias si bien están presentes tienen poca importancia por su pequeña proporción. Son también frecuentes los bancos de arena tobáceas y pequeñas capas de lutitas blancas.

Los diferentes tipos identificados corresponden a estructuras de carga, estructuras de escape de agua, intrusiones de sedimentos blandos, laminaciones, derrumbamientos y estratificaciones inclinadas trastornadas.

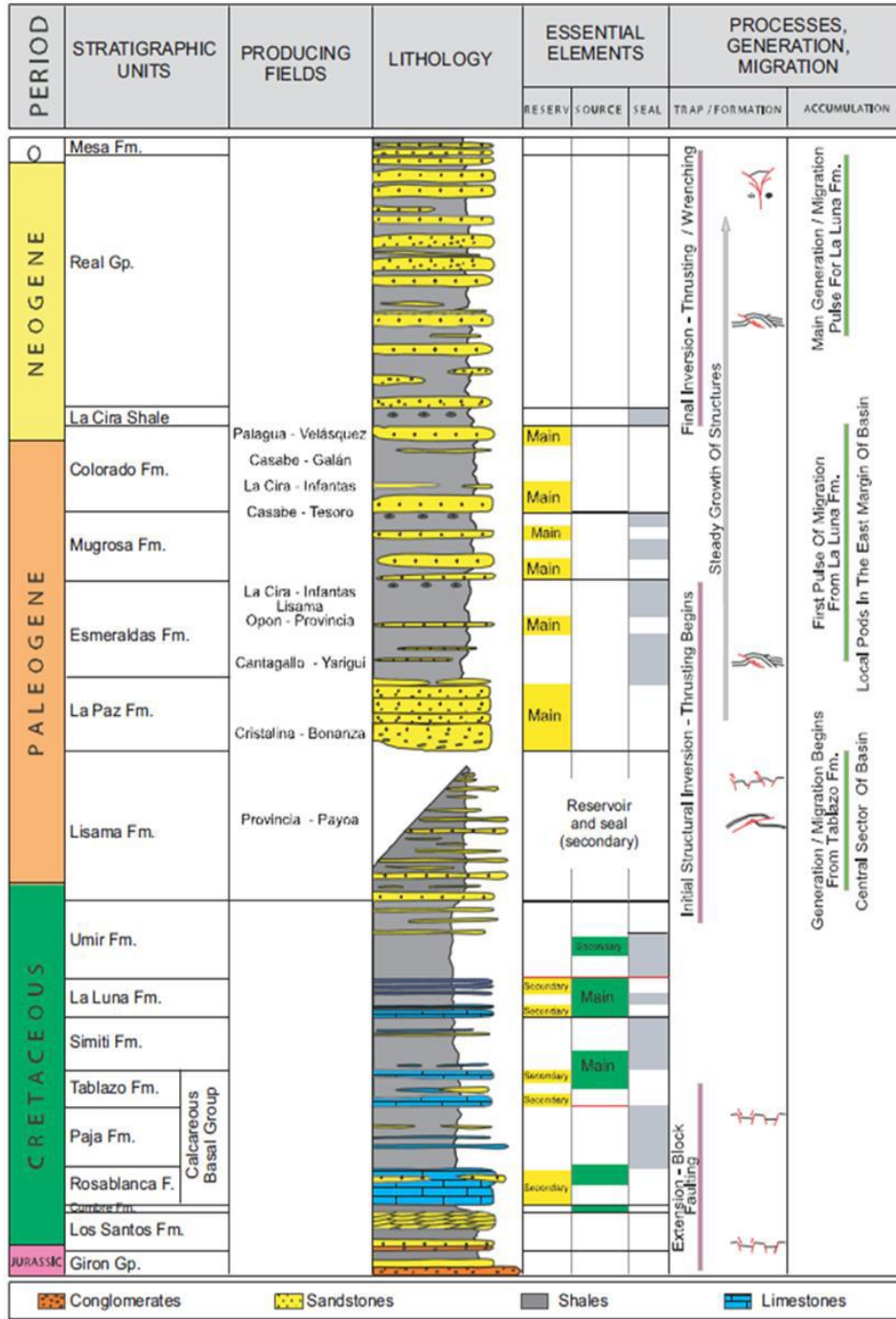


Figura 4. Estratigrafía del VMM. Tomado de (Barrero, Pardo, Vargas, & Marinez, 2007)

## 5.2 Geología de la zona de estudio énfasis rocas generadoras

**5.2.1 Formación Tablazo.** Este intervalo estratigráfico, de edad Barremiano- Albiano, según el informe de avance de la Integración Geológica prevista para cuenca del Valle Medio del Magdalena, enfocándose en Pozo Cira Infantas 1613, llevado a cabo por INGRAIN para la Agencia Nacional de Hidrocarburos, presenta propiedades geoquímicas y en este intervalo incluye valores promedio de (TOC 4,6%), asociado a un kerógeno tipo III y con índices regionales de vitrinita en el rango de 1.0-1.27% Ro, que lo sitúa en la ventana de generación de gas (condensados/gas-seco). (ANH, 2012, p.62).

**5.2.2 Formación Simití.** “El contenido TOC muestra valores bajos llegando a un promedio aproximado de 2.6%, el kerógeno asociado es de tipo II y III; y se sitúa en zonas termalmente maduras para la generación de recursos de gas” (UPME, 2018, p.99)

**5.2.3 Formación Luna.** Este nivel estratigráfico está asociado con el evento Anòxico oceánico, el cual presenta contenido TOC entre un rango de 4 a 6% asociado a un kerogeno tipo II, con índices regionales de vitrinita en el rango de 0.6-1.07% Ro y se sitúa en un nivel estratigráfico dentro de la ventana de generación de aceite. (UPME, 2018, p.98).

*“Estos porcentajes varían dependiendo del miembro donde se encuentran, presentando bajo contenido de TOC en la lutitas del miembro Pujamana, pero hacia las calizas arcillosas del miembro Salada se incrementa significativamente” (ANH, 2012, p.61).*

Miembro Galembó: COT (2.9%) y 60% de Ro estado termal, inicio ventana de generación de aceite. Miembro Pujamana: COT (1.71%) potencial petrolífero regular a bueno, el valor de la reflectancia de la vitrinita (0,75%Ro), estado termal medio ventana de generación. Miembro Salada: COT (1,0-1,5%) potencial petrolífero muy bueno, valores de Ro (1.0%), roca madura en estado termal tardío, en la generación del hidrocarburo. (UPME, 2018, P.105)

### 5.3 Geología estructural de la zona de estudio

#### 5.3.1 Fallas

**5.3.1.1 Falla Bucaramanga: (SFBS):** La Falla de Bucaramanga es una de las estructuras más nombradas en la geología de Colombia y corresponde al segmento meridional del Sistema de Fallas Bucaramanga-Santa Marta (SFBS) en el sentido de Ujueta (2003) y París et al. (2000). Este sistema de fallas tiene una orientación aproximada de N15°W y una longitud total entre 550 y 600 km si se asume con un trazo único.

Por la naturaleza de los movimientos de la falla existen trabajos como de Rod (1956), Raasveld (1956), Moody and Hill (1956) Young et al (1956), O. Renz (1956), Alberding (1957), Campbell (1965) y otros autores quienes consideran la Falla de Bucaramanga como una gran falla de rumbo. Sin embargo Julivert (1958-1961) considera la Falla de Bucaramanga como una falla marginal de un bloque montañoso levantado, dándole más importancia al desplazamiento vertical.

En cuanto a la edad de la falla solo se puede decir que es posterior a la formación Bucaramanga, con movimiento en las orogenias siguientes, algunos de ellos relacionados con el levantamiento del macizo. Aunque se han propuestos diversas edades para este sistema de fallas, sin embargo la

opinión de los autores se puede dividir en dos grupos: un primer grupo se inclina por el Cenozoico temprano (Young et al., 1956; Irving, 1971; Tschanz et al., 1974; Cáceres et al., 1980); un segundo grupo se inclina por una edad más reciente en el Cenozoico tardío (Campbell, 1968; Duque Caro, 1980). Incluso algunos autores han considerado el sistema activo desde el Precámbrico durante la Orogenia Grenville-Orinoco (Boinet et al., 1989; Cediél y Cáceres, 2000).

**5.3.1.2 Falla Lebrija:** La Falla de Lebrija es otra estructura que tiene continuidad regional paralela a la Falla de Bucaramanga, pero al W; configurando una nueva zona relativamente elongada y levantada por el movimiento sinistral de las dos fallas principales. En la cartografía geológica de Vargas & Arias (1981b) y Ward *et al.* (1977b) es evidente el trazo de la Falla de Lebrija porque pone en contacto rocas del Paleozoico y Jurásico en el bloque colgante al E, y unidades sedimentarias del Cretácico y Paleógeno en el bloque yacente al W. Pero además de esta relación como falla inversa, también se identifican rasgos transcurrentes asociados, tales como pliegues oblicuos y trazos sintéticos (R) y antitéticos (R') indicando movimiento sinistral de la Falla de Lebrija (Figura 1-8). La continuidad de la falla al sur de Lebrija es similar a los lineamientos que se plantearon Ward *et al.* (1977b), pero que hoy se pueden definir mejor con base en modelos digitales y control de campo. La estructura adquiere un carácter regional al unirse con la Falla Los Santos, la cual también presenta rasgos sintéticos e indicativos de transcurrencia sinistral (Ward *et al.*, 1977b); Pulido, 1985; Velandia, 2010) hasta unirse con la Falla de Boyacá.

**5.3.1.3 Falla Palestina:** La Falla Palestina está localizada sobre la franja occidental de la plancha 118 del SGC y está definida por un alineamiento de drenajes de segundo y tercer orden, silletas, colinas y cerros, con una tendencia N17°E a N-S y buzamiento subvertical; corresponde a

una falla oblicua con desplazamiento lateral izquierdo inverso y una longitud aproximada de 41 km.

Feininger (1970) indica que “*la Falla Palestina tiene una longitud de 350 km, con un desplazamiento de rumbo dextralateral de 27,7 km, de edad Aptiano-Albiano*”. Royero & Clavijo (2000) indican que “en el Departamento de Bolívar, tiene una longitud de 120 km con dirección predominante N-S y trazo rectilíneo”.

París *et al.* (2000) Consideran que “la Falla Palestina presenta un movimiento sinistral inverso, desarrollado durante el Pleistoceno y que durante el Cretácico Superior hasta el Neógeno superior el movimiento de la falla fue dextral”.

La Falla Palestina en el sector de la vereda La Cruz, sobre la vía carretable que conduce de Remedios a Puerto Berrío pone en contacto rocas de las Sedimentitas de Segovia de edad cretácica con Metasedimentitas de La Cruz del Paleozoico, generando deformación en las dos unidades. (Ingeominas, 2013, p. 192).

**5.3.1.4 Falla de Suárez:** Esta falla pasa por el extremo suroriental de la plancha 150 afectando el flanco oriental del Anticlinal de Los Cobardes, su trazo tiene una dirección N20°E y N25°E, con inclinación al occidente y sigue el curso de la Quebrada El Ropero (ANm-1: cuadrículas H11 y G12). Es una falla inversa de ángulo alto, con una componente vertical importante. “*Se trata de una falla de rumbo con desplazamiento sinistral. El desplazamiento vertical se ha calculado entre 400 y 2.300 m*” (Ward, et al., 1973). (Ingeominas, 2007, p. 145).

**5.3.1.5 Falla Cáchira:** Es de tipo normal, presenta un alto ángulo de inclinación a lo largo del valle del río cáchira, esta corta casi directamente a través de la directriz estructural y el rumbo de las formaciones en la parte norte. Aparentemente ha ocurrido movimiento lateral derecho para causar los grandes desplazamientos a través de la falla.

Después de cortar a través el rumbo de gran parte de la sección del cretáceo a lo largo de su mitad sur, la Falla de Río Cáchira toma dirección casi exactamente sur, pero no puede trazarse donde los aluviones del río Lebrija cubren la Formación Umir.

El desplazamiento vertical a través de la falla es grande, ya sea producido por el movimiento lateral o vertical o por ambos. (Ingeominas, 1978, p. 31).

**5.3.1.6 Sistema de Fallas la Salina (SFLS):** La falla La Salina se ubica en el departamento de Santander, en una región de alta sismicidad y es definida como de tipo inversa con una longitud 160 Km, lo que explica el levantamiento del altiplano Cundiboyacense.

El carácter regional, la geometría de la falla, el control estratigráfico y estructural que ejerce sobre las secuencias que afecta, permiten clasificarla como una estructura “clave” en el desarrollo del margen Oeste del rift Mesozoico del Norte de Colombia y en la configuración del borde Oeste de la Cordillera Oriental (Ingeominas – GRP, 2008).

Durante la Orogenia Andina principalmente en el Cenozoico, la Falla de La Salina se reactivó creando una dirección de esfuerzos compresionales, oblicuo a las antiguas estructuras, dando lugar a la reactivación de las mismas y en consecuencia, al origen de estructuras cuya arquitectura se asocia con estos movimientos de carácter transpresivo.

Esta reactivación estuvo relacionada con los cabalgamientos más externos del SFLS involucrando rocas del Paleógeno – Neógeno, que se ven cortadas por cabalgamientos con

vergencia Este con el desarrollo de estructuras pseudo - triángulares en las secuencias Meso - Cenozoicas y despegues en los sedimentos Terciarios.

**5.3.1.7 Falla de Infantas:** Es considerada una de las fallas más importante en este sector a partir de la interpretación sísmica se puede observar como una falla inversa de basamento que afecta toda la secuencia sedimentaria, con rumbo de dirección Norte – Sur y vergencia hacia el Oeste, la cual coloca en contacto superficial a formaciones Terciarias, incluso en algunos sectores sedimentos de una misma formación.

Regionalmente se extiende desde el Rio Opón al sur hasta el Rio Sogamoso en su expresión más Norte y corresponde a un rasgo estructural con una expresión clara como lineamiento y evidencia de falla a partir de la observación de la discontinuidad de estratos buzantes hacia el oriente.

La falla de Infantas limita al oriente al anticlinal que origina la acumulación de hidrocarburos correspondiente al Campo de La Cira-Infantas, siendo el producto de una reactivación terciaria postmioceno, afectando la secuencia terciaria en menor desplazamiento. (INGEOMINAS, 2008, p, 75).

**5.3.1.8 Falla de Casabe:** La Falla de Casabe se presenta como un fallamiento normal, con plano de falla buzante al occidente y con una dirección de rumbo noreste - suroeste.

A partir de la interpretación sísmica se puede observar que la falla es vertical, de basamento que afecta toda la secuencia sedimentaria. En profundidad es claro ver el desplazamiento vertical de formaciones cretácicas, mientras que dentro de las formaciones terciarias no es claro apreciar este desplazamiento.

Esta falla constituye el límite occidental de los campos de hidrocarburos correspondientes a Casabe y Peñas Blancas.

**5.3.1.9 Falla Casa Nueva:** Se define como estructura como una falla satélite de la Falla Cimitarra, con una longitud aproximada de 25 km, de dirección N45°E, subvertical, entre la quebrada Bijagual (H5) y San Francisco (C9). Geomorfológicamente marca el contraste topográfico entre un relieve ondulado al Sureste y uno plano al Noroeste, asociados al valle del río Cimitarra. En campo se observaron efectos tectónicos de cizalla en rocas del Grupo Real y por su relación con la Falla Cimitarra, se considera que tiene un movimiento de rumbo de carácter dextral.

**5.3.1.10 Falla cimitarra:** La Falla Cimitarra hace parte del Sistema de Falla Palestina buzando al SE sin un ángulo definido (Feininger, 1970) y en la Plancha 133 - Puerto Berrío, defleca el rumbo del río Alicante (Fonseca et al., 2011). Esta falla ha sido considerada de tipo transcurrente, con movimiento dextral, originada en el Neógeno, extendiéndose a lo largo del flanco occidental del Valle Medio del Magdalena.

Por su expresión topográfica fuerte y una zona de brecha amplia, la Falla Cimitarra se considera más joven que las fallas Nus y El Bagre, teniendo en cuenta que estas últimas cortan las Sedimentitas de Segovia del Aptiano-Albiano. (SGC, 2011, p. 123).

**5.3.1.11 Falla de Arrugas:** La Falla de Arrugas corresponde a un fallamiento inverso de alto ángulo con un rumbo general norte - sur y con una vergencia que va cambiando de oriental a occidental hacia el norte al dividirse en dos fallas en el extremo norte de la plancha. Esta falla pone en contacto superficial sedimentos de la Formación Mugrosa, mientras que hacia el norte el

fallamiento va ganando desplazamiento vertical hasta colocar en contacto rocas de la Formación Mugrosa, en su bloque levantado, con rocas de la Formación Colorado las cuales hacen parte del bloque hundido de la Falla de Arrugas. (Ingeominas, 2009, p. 101).

**5.3.1.12 Falla de San Cayetano (FSC):** Posee rumbo SSW – NNE subparalelo a los cabalgamientos anteriormente mencionados. Se trata de una estructura con poco desplazamiento vertical y una importante componente de rumbo con desplazamiento lateral izquierdo en rocas del Cretáceo inferior. Afecta directamente el anticlinal de Los Medios en el área norte cercana a su cabeceo, al oriente de la población de Landázuri implicando rocas de las formaciones Rosablanca, Paja, Tablazo y Simití.

Probablemente se trata de una estructura heredada de una tectónica mesozoica por su alto ángulo. Separando un área donde la Formación Rosablanca tiene un grosor de 513 m de otra donde el grosor es de solo 50 m (Ulloa & Rodríguez, 1978), y que se interpreta como producto de la formación local de un corto Horst al límite oriental del depocentro de la cuenca. (Ingeominas, 2008, P. 144).

**5.3.1.3 Sistema de Fallas de Landázuri (SFL):** Este sistema con rumbo SSW – NNE es subparalelo al SFS, posee una vergencia occidental y salto estratigráfico de unos pocos cientos de metros. Es una estructura típica cordillerana que afecta las secuencias del Cretáceo. Son cabalgamientos con marcados rasgos geomorfológicos en el drenaje y la topografía de la región. Limita en sus flancos occidentales importantes estructuras como el sinclinal de Vélez y el anticlinal de Los Medios.

Este sistema con rumbo SSW – NNE es subparalelo al SFS, posee una vergencia occidental y salto estratigráfico de unos cientos de metros. Es una estructura típica cordillerana que afecta las secuencias del Cretáceo. Son cabalgamientos con marcados rasgos geomorfológicos en el drenaje y la topografía de la región. Limita en su flanco occidental importantes estructuras como los anticlinales de El Carmen, Honduras y La Aragua. El SFL corresponde a una intrincada red de estructuras Preandinas reactivadas durante la orogenia Andina con una componente transpresional revelada por el arreglo escalonado de los pliegues y la ocurrencia de espejos y estrías de fricción oblicuas al rumbo regional. Las fallas son de alto ángulo con trayectoria ligeramente lítrica y despegues profundos en rocas precretáceas. (Ingeominas, 2008, p. 144).

**5.3.1.4 Sistema santa Rosa- Coroncoro:** Es la estructura más extensa consta de 110 km de longitud, aunque en un trazo no es continuo. Está conformado por una serie de fallas escalonadas que se inician en cercanías de la quebrada Chicamoque (Kassem, y Arango, 1977) y finaliza en la plancha 65. En el área de estudio tiene una extensión de 46 km, cubierta en su totalidad por depósitos cuaternarios. Aunque fuera del área de estudio se comporta como un sistema de fallas normales, en esta es de carácter inverso de ángulo alto con inclinación preferencial al NW. (Ingeominas, 1995, p. 34).

**5.3.1.5 Lineamiento el Dique:** Es una estructura inferida por imágenes de satélite, que muestran el alineamiento en segmentos del Río Magdalena y el Brazo del Dique en sentido N70W. Tiene una longitud de 44 km. (Ingeominas, 1995, p. 35).

**5.3.1.6 Falla de Aguachica:** Tiene una longitud de 63 km (45 en la Plancha 75) y se continúa en la Plancha 65, donde desaparece al ser cortada por la falla de Mulatos. Cerca del 60% de su trazo está cubierto por depósitos cuaternarios. En la región oriental de la plancha, donde aflora, es de carácter inverso con inclinación al NE. Pone en contactos a las rocas del conjunto efusivo dacítico (Jned) con las de la Unidad Conglomerática de Arenal (Jsa) y la Formación Tablaso (Kit). (Ingeominas, 1995, p. 34).

**5.3.1.7 Falla Gamarra- Pica Pica:** Tiene una extensión aproximada (110 km aproximadamente) que se prolonga desde la quebrada Humareda (Plancha 84) hasta la ciénega Simití (Plancha 85), cruza la Plancha 75 y desaparece en la 76. En la Plancha 75 cerca de las dos terceras partes de su trazo está cubierto por depósitos cuaternarios. Es una falla normal reactivada posteriormente como sinistral con componente inversa. (Ingeominas, 1995, p. 34).

**5.3.1.8 Las fallas de Morales y Simoa:** La de Morales es una de las principales estructuras del área y su trazo parece sugerir que se trata de una falla profunda, que limita la región occidental (bloque San Lucas) con la central (cuenca del Valle Medio del Magdalena). Su extensión total se estima en unos 210 km; se prolonga desde cercanías del Banco (Magdalena) donde es truncada por Falla de Mucurrucú en el norte, hasta el Río Cimitarra (Santander) donde desaparece frente a la Falla de Cimitarra. En la Plancha 75 sigue el curso del brazo Morales, de donde deriva su nombre. Es una falla normal, reactivada posteriormente como inversa con inclinación hacia el Este. Su trazo es paralelo al de la Falla de Palestina. (Ingeominas, 1995, p. 35).

**5.3.1.9 Fallas de dirección SW-NE:** Las fallas de este sistema son las más numerosas y extensas y sus trazos se pueden observar en la región occidental, central y oriental de la plancha 75.

Tienen una dirección que fluctúa entre N20E y N60E, con una extensión máxima de 40 km (algunas continúan en las planchas adyacentes (65, 74, 76, 85)). Forman un grupo de fallas normales bien definido por su paralelismo, especialmente visible en la región occidental de la plancha, donde presentan una dirección N40-60E; en la región central esta continuidad se disipa al ser interceptado por el sistema SSE-NNW, lo que hace que cambie su dirección en sentido N30E y N20E. En las regiones central y oriental el sistema presenta carácter inverso.

Conforman este grupo las fallas El Piñal, Norosí, Caño Hondo, La Dorada-La Gloria, Arenal La Honda, La Labranza, San Pedro, San Francisco y Morales, todas ellas situadas en las regiones occidental y central; en la región centro-oriental se tienen las fallas Gamarra-Ayacucho y Noreán, en la región oriental las fallas de Piedra Rica y Besote. Estas fallas afectan a la formación Bocas, Unidad Volcanoclástica de Noreán (jn) y a las unidades sedimentarias cretácicas, formando bloques escalonados, principalmente en la región occidental. A continuación, se describen las fallas y sistema de fallas principales en este grupo. (Ingeominas, 1995, p. 33).

#### **5.4 Análisis de la dinámica tectónica de la zona de estudio**

Utilizando la consulta en el Servicio Geológico Colombiano (SGC) el estado de la cartografía geológica actual que oferta y la integración de las planchas del área de estudio, se construyó un mapa con el fin de realizar cinco cortes geológicos y así determinar los límites y la distribución de las unidades estratigráficas de la cuenca (figura 5).

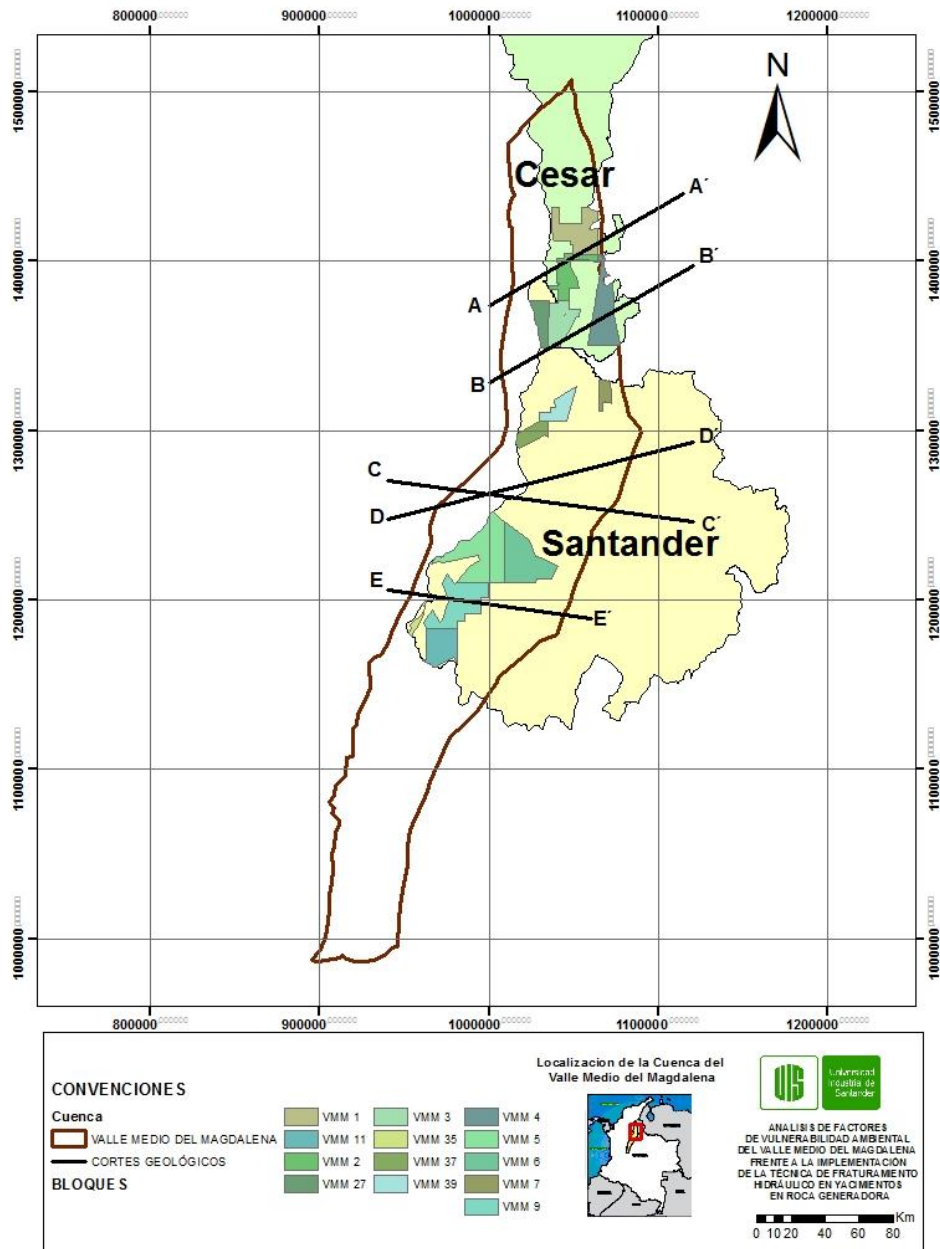


Figura 5. Localización de los cortes en la zona de estudio

### 5.4.1 Corte A – A'

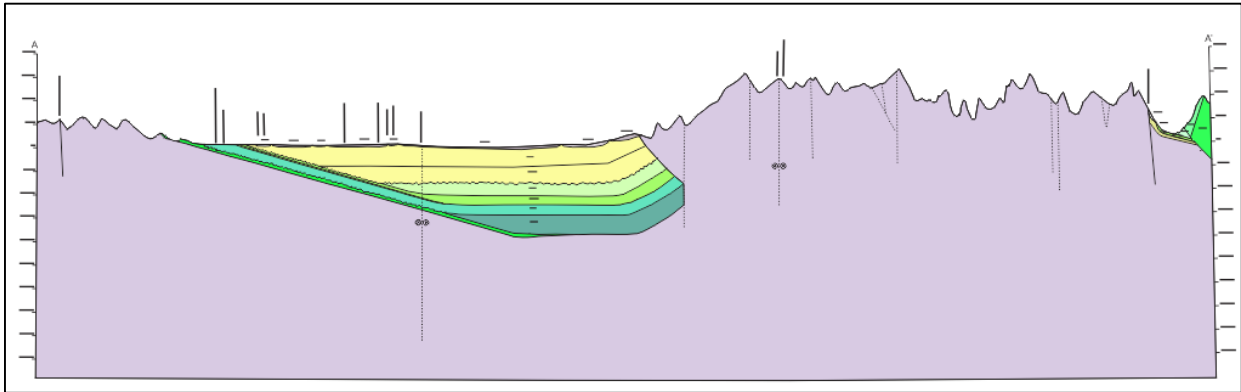


Figura 6. Visualización del corte A-A' en la zona de estudio

**5.4.1.1 Geometría de la cuenca:** En sector del corte A – A' (ver apéndice A) para la cuenca del Valle Medio del Magdalena se observa una depresión topográfica asimétrica, delimitada por el Macizo de Santander al Este y por La Cordillera central al oeste.

La distribución de las rocas que corresponden a cuenca, se encuentra geoméricamente más delgadas al costado occidental, mostrando un característico adelgazamiento de las unidades litoestratigráficas (Figura 7). Al margen oriental de la cuenca se observa un engrosamiento en el espesor de estas unidades y se encuentran en contacto fallado con el basamento. (Figura 8).

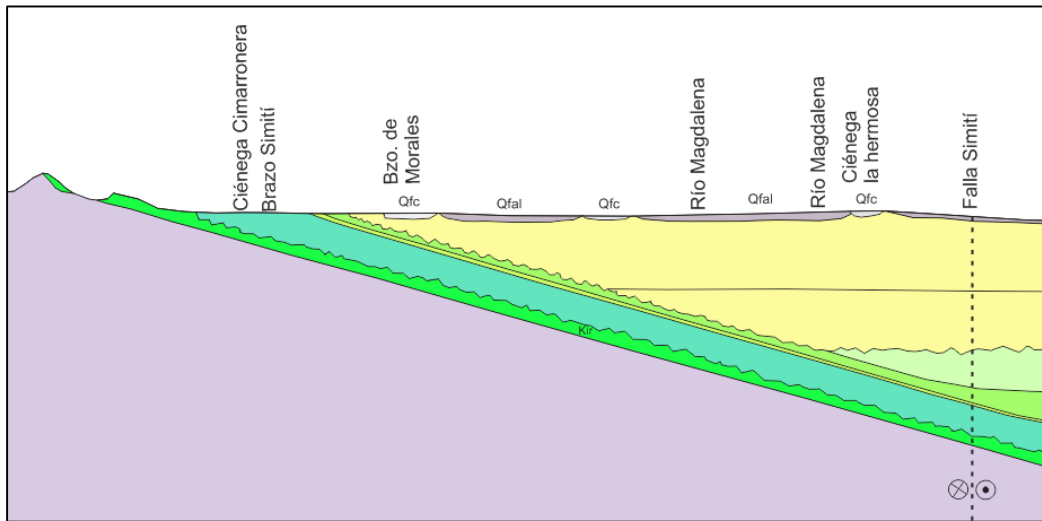


Figura 7. Adelgazamiento y acuñamiento de las rocas de la cuenca al costado occidental.

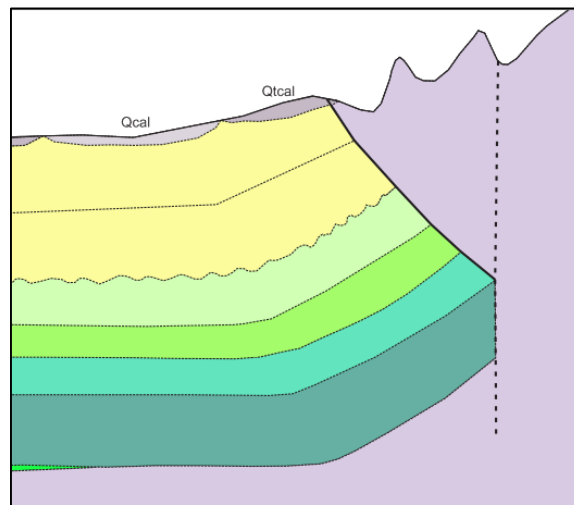


Figura 8. Engrosamiento de las unidades litoestratigráficas en el costado oriental de la cuenca VMM.

**5.4.1.2 Estratigrafía: Formación Rosa Blanca:** La formación Rosa Blanca en este sector se encuentra distribuida de manera asimétrica. Esta unidad se encuentra depositada sobre el basamento a una profundidad de 1900 m y en el sector occidental muestra su máximo espesor 67 m en el sector central se adelgaza hasta no depositarse en el margen occidental. (Figura 9).

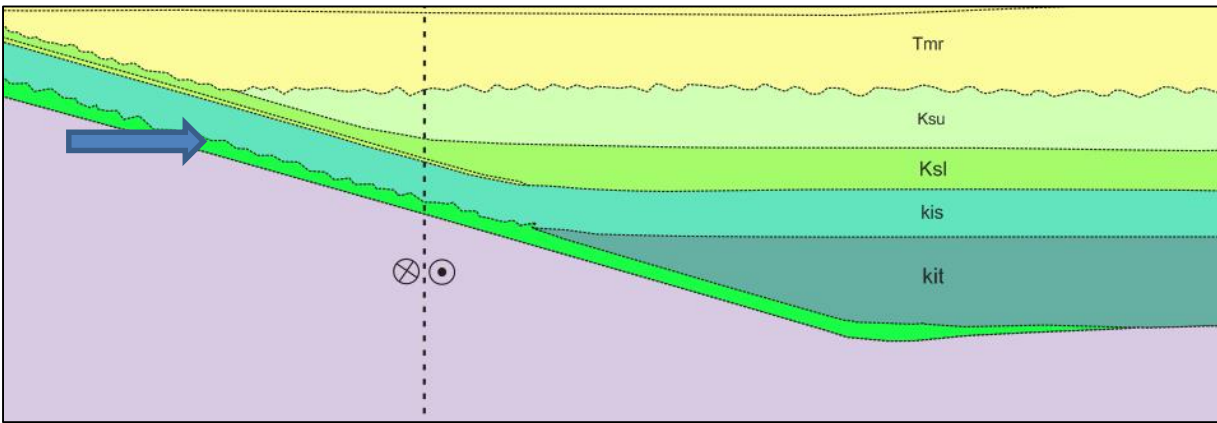


Figura 9. Formación Rosa Blanca.

**Formación Tablazo:** Ocurre principalmente en los sectores central y oriental de la cuenca, con profundidades de 1835 m y espesor de 500 m, mostrando su máximo espesor en estos sectores. Esta unidad al occidente configura un adelgazamiento hasta acunarse y no estar depositada, conformando una discordancia litológica que pone en contacto las formaciones Rosa Blanca y Simití. (Figura 10).

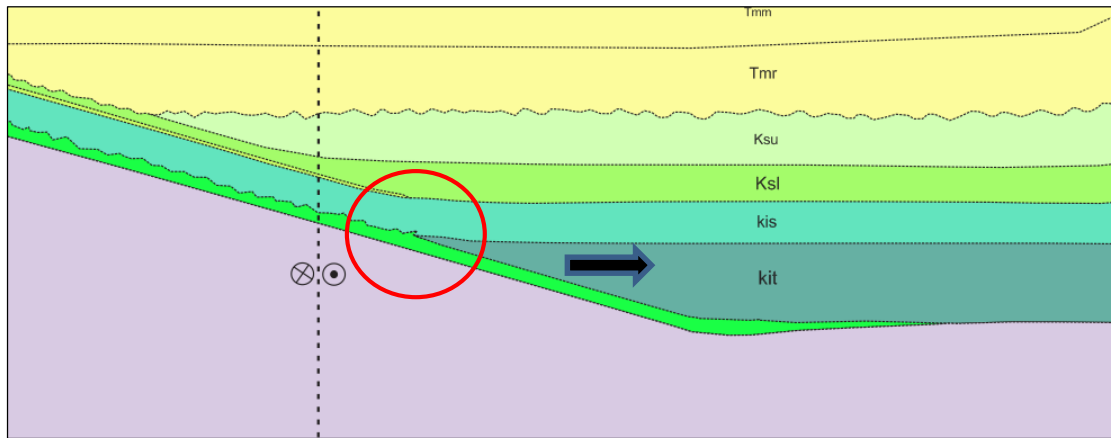


Figura 10. Adelgazamiento y acuñaamiento de la Fm Tablazo sector occidente de la cuenca.

*Formación Simití:* Es la primera unidad litoestratigráfica que se encuentra distribuida del margen occidental al margen oriental de la cuenca. Al occidente se encuentra depositada en contacto discordante sobre la formación Rosa Blanca y en contacto neto con la formación Tablazo. Está de objetivo exploratorio para depósitos no convencionales se encuentra a profundidades que varían entre 1435 m y con espesores que varían entre 220 m.

*Formación El Salto:* Se observa como una unidad geológica delgada y depositada de manera concordante sobre la formación Simití al occidente y centro de la cuenca. En el Sector occidental se adelgaza y acuña, constituyendo un hiato que pone en contacto las formaciones Simití y La Luna (Figura 11). Esta formación se encuentra a una profundidad de 1200m y con espesores desde 30 m.

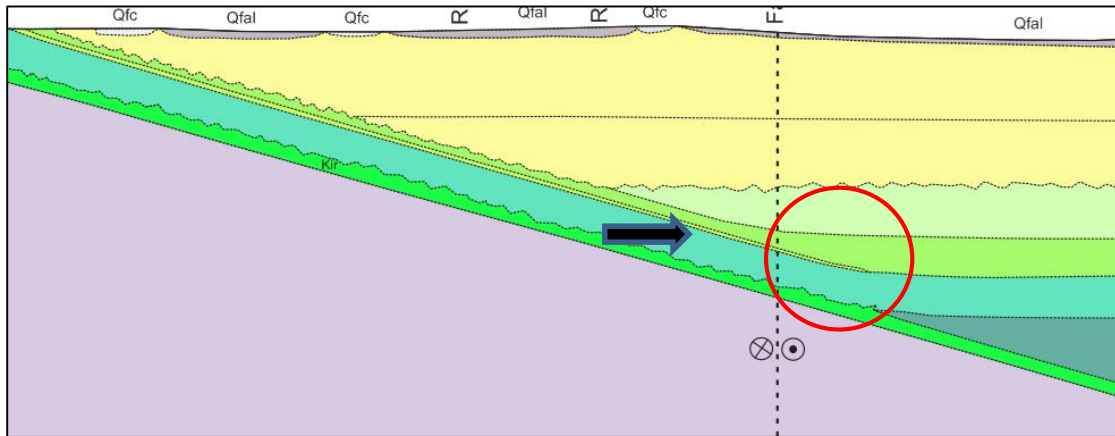


Figura 11. Acuñaamiento de la fm el Salto, sector occidente de la cuenca.

*Formación La Luna:* En el margen occidental de la cuenca se comporta como una delgada unidad litoestratigráfica que se deposita concordantemente sobre la formación el salto y a medida que su distribución avanza hacia el borde oriental, su espesor va aumentando. En el sector occidental se observa suprayaciendo como una discordancia angular las rocas del grupo Real y la Formación Mesa. En el sector central subyace de manera concordante con la formación Umir. Presenta profundidad de 1200 m con un espesor de 200 m.

*Formación Umir:* La formación Umir sólo ocurre en los sectores central y oriental de la cuenca, presenta profundidad de 1035 m y su espesor varía entre 295 m depositándose de manera concordante sobre la formación La Luna y subyaciendo con un contacto erosivo a las rocas del grupo Real. En el sector occidental muestra un adelgazamiento y acuñaamiento que permite la formación de un hiato entre la formación La Luna y el grupo Real. (Figura 12).

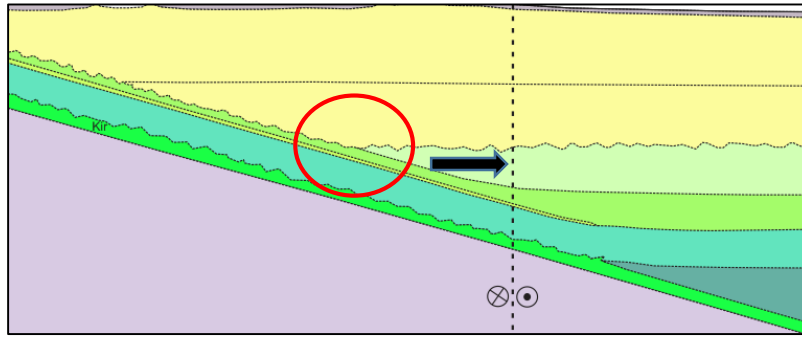


Figura 12. Adelgazamiento y acuñaamiento fm Umir.

*Grupo Real:* Corresponde a rocas del terciario que fueron depositadas sobre las unidades del cretácico de manera discordante angularmente y por erosión. Estas rocas se distribuyen en la extensión de la cuenca de oeste a este. Con espesores y profundidades que varían entre 340 m y 1240 m respectivamente.

*Formación Mesa:* Corresponde a rocas que se depositaron de manera concordante sobre el grupo Real, presenta una profundidad de 410 m y espesor de 400 m, al occidente de la cuenca se encuentran en contacto discordante con la formación La luna. Esta unidad aflora en superficie o subyace los depósitos cuaternarios correspondientes a procesos coluviales y aluviales.

*Formaciones del Cuaternario:* Se encuentran depositadas sobre la formación Mesa y están distribuidas de W-E de la siguiente manera: Qfc – Qfal – Qfc – Qfal – Qfc – Qfal – Qcal y QTcal, donde presentan erosión ya que se encuentran aflorando en la mayor parte de la cuenca.

**5.4.1.3 Geología Estructural:** Estructuralmente en este sector la cuenca presenta deformaciones clasificadas como descamaciones de piel delgada y de piel gruesa (que incluye al basamento). El estilo estructural principal en esta región corresponde a un sistema transpresivo donde predomina la deformación en el rumbo.

En el sector occidental de la cuenca, se observan rocas del cretácico que se depositan de manera concordante al basamento, pero que muestran un basculamiento con una vergencia hacia el centro de la cuenca, buzando hacia el este, conformando un homoclinal. (Figura 13).

Las unidades estratigráficas del cretácico superior y el terciario se encuentran conformando una discordancia angular.

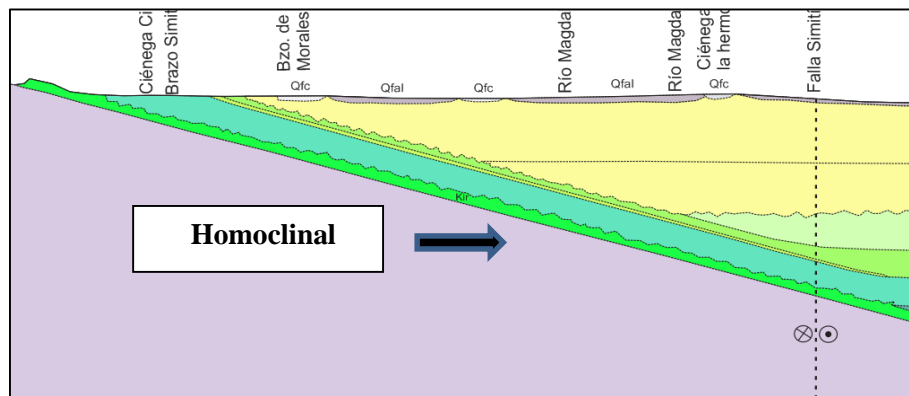


Figura 13. Homoclinal parte occidental de la cuenca.

En el sector central de la cuenca, se observa una distribución sub horizontal de la cuenca y donde no se observan fallas de extensión regional excepto la Falla de Simití (Figura 14).

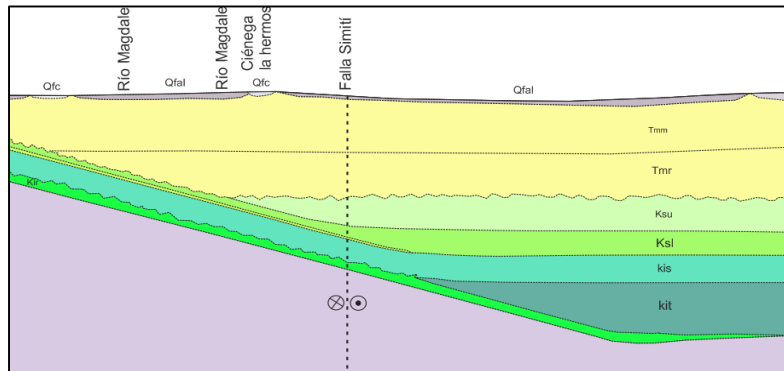


Figura 14. Falla de Simití.

En el margen oriental de cuenca se encuentra delimitada por un contacto fallado con el basamento, esta falla corresponde a una estructura de tipo cabalgamiento, puesto a que suprayace en el bloque colgante las rocas del basamento sobre las de la cuenca.

Estructuralmente estas rocas se comportan como un monoclinal generado por el cabalgamiento. (Figura 15).

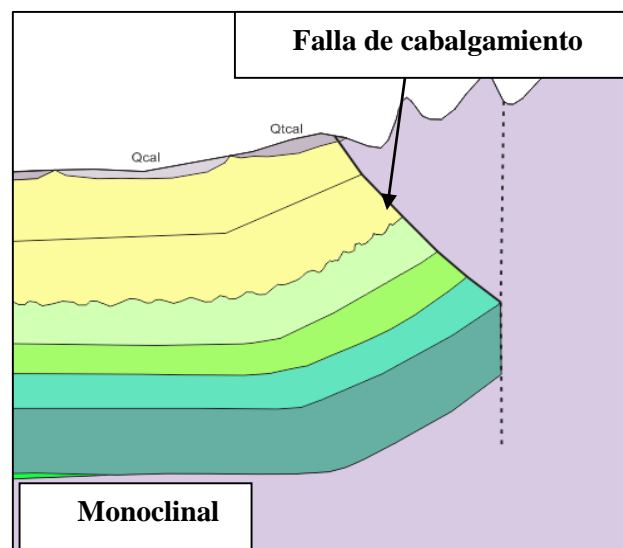


Figura 15. Falla cabalgamiento y monoclinal.

**5.4.1.4 Fallas Geológicas:** Las fallas geológicas que se observan en el corte corresponden a fallas de rumbo de cinemática lateral derecha y que en su buzamiento subvertical cortan ortogonalmente las rocas de la cuenca hasta llegar al basamento cristalino.

La falla de Simití es la única falla que muestra en este sector una extensión regional y una cinemática en el rumbo, por su parte en el sector oriental se observa una falla de cabalgamiento, generada como una ramificación de una estructura en flor positiva de una falla de rumbo del basamento y que afecta las rocas de la cuenca, que se encuentran subyaciendo como el bloque yacente de la mencionada falla.

#### 5.4.2 Corte B-B'

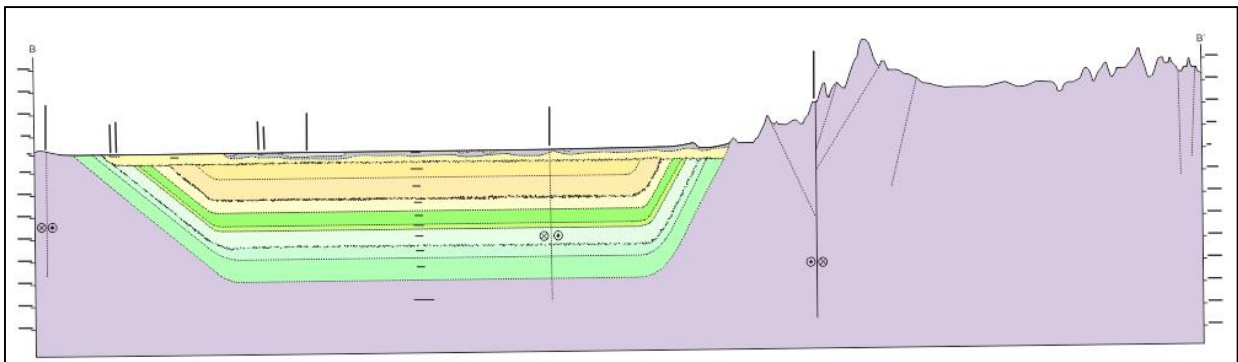


Figura 16. Visualización del corte B-B' en la zona de estudio

**5.4.2.1 Geometría de la cuenca:** En este sector la cuenca (ver apéndice B) se observa como una depresión topográfica entre la cordillera oriental y la cordillera central, teniendo esta influencia directa de la configuración tectónica que las rige.

La cuenca muestra su mayor subsidencia en la parte central, donde las rocas que la componen presentan un mayor espesor, con una tendencia general de actitud subhorizontal.

La profundidad de la cuenca decrece hacia sus márgenes orientales y occidentales donde las formaciones geológicas presentan los menores espesores debido al alto ángulo definido en las zonas de menor subsidencia. (Figura 17).

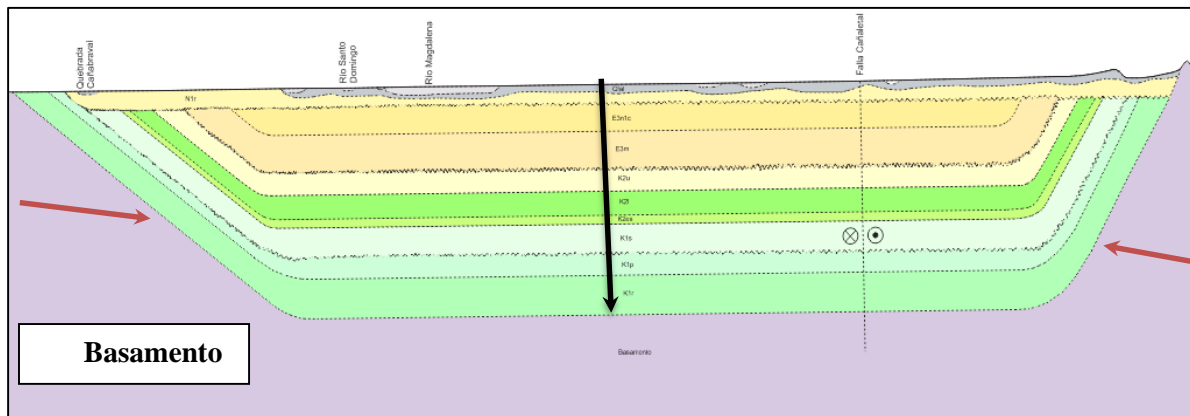


Figura 17. Geometría de la cuenca.

En la figura las saetas rojas muestran la geometría de alto ángulo de la cuenca y de menor subsidencia. La saeta negra identifica la zona de mayor subsidencia y donde las unidades geológicas presentan un mayor espesor.

#### 5.4.2.2 Estratigrafía

- **Formación Rosa Blanca**

Corresponde a la unidad de rocas más antigua dentro de la cuenca, está depositada de manera concordante sobre el basamento y conforme a la geometría de la cuenca (Figura 18). Para este sector se encuentran a espesores y profundidades que varían desde 490 y 2880 metros respectivamente.

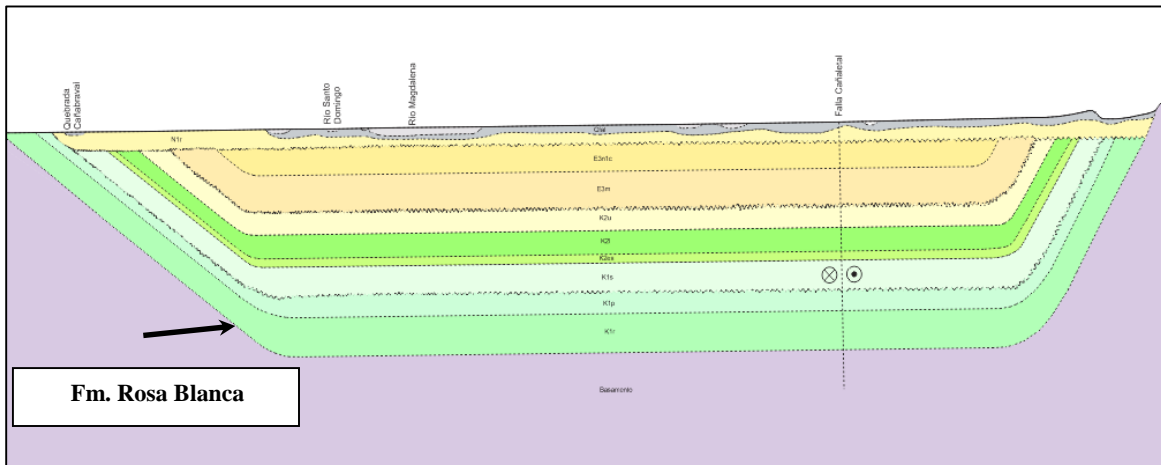


Figura 18. Formación Rosa Blanca.

Las siguientes formaciones en términos generales presentan una misma distribución y configuración dentro de la cuenca, varían sus espesores y profundidades dependiendo de su localización geográfica y geológica.

- Discordancias estratigráficas:

Fm Paja – Fm Simití: Corresponde a una discordancia estratigráfica que identifica un faltante de tiempo o hiato en la secuencia característica de la cuenca, por su origen no muestra indicios erosivos en los contactos, la formación paja tiene un espesor de 270 m y se encuentra a una profundidad de 2490 m mientras que la formación Simití presenta espesor de 370 m y una profundidad de 2120 m.

- Formación el Salto

La depositación en la formación el Salto se encuentra controlada por la geometría de la cuenca y es la formación que presenta menor espesor. Su profundidad corresponde a 1.730 m con un espesor de 110 m. Se observa que descansa sobre la formación Simití y subyace la formación Luna.

- Formación Luna

En el margen W-E se encuentra depositada sobre la formación el Salto y presenta un contacto discordante con el grupo Real en la parte superior, a medida que desciende aumenta su espesor hasta unos 300 m, presentando una geometría tabular. La formación Luna subyace la formación Umir y se encuentra a una profundidad de 1.630 m.

- Fm Umir – Fm Mugrosa

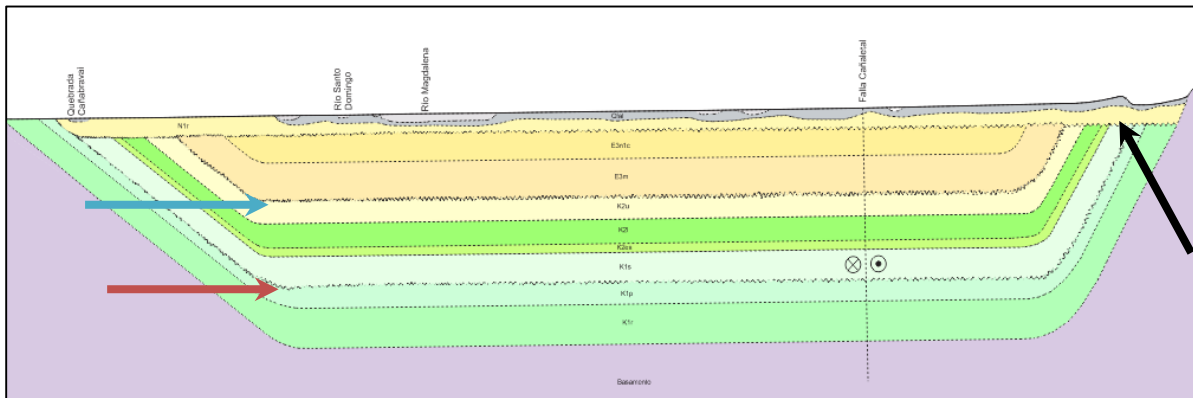
Corresponde a un límite litoestratigráfico y geocronológico, pues en esta discordancia se ponen en contacto rocas del Mesozoico y el Cenozoico, específicamente del cretácico superior y el paleógeno. Por su origen clástico la formación mugrosa genera un contacto erosivo al depositarse suprayaciendo la formación Umir. Estas formaciones presentan espesores de 275 m, 470 m y profundidades de 1060 m respectivamente.

- Formación Colorado

Está depositada sobre la formación Mugrosa y subyace el grupo Real, se evidencia un espesor máximo de 340 m sobre toda la cuenca teniendo una geometría tabular. Se encuentra a una profundidad más somera de 570 m.

- Grupo Real

El grupo Real presenta un espesor aproximado de 235 m con una profundidad de 190 m, muestra sobre las rocas de la cuenca dos tipos de contacto discordantes, uno correspondiente a una discordancia angular que es evidenciable en los bordes orientales y occidentales de la cuenca, donde las demás formaciones que lo suprayacen están deformadas mientras este se configura con una actitud subhorizontal y una discordancia erosiva que se genera al depositarse desde la formación Rosa Blanca hasta la formación Colorado. (Figura 19).



*Figura 19.* La figura señala las discordancias referenciadas en el texto: saeta roja corresponde al contacto entre la fm Paja y Simití, la saeta azul corresponde al contacto entre las fm Umir y Mugrosa, la saeta negra muestra la discordancia angular y el contacto.

**5.4.2.3 Geología estructural:** Las estructuras predominantes según la escala de este trabajo muestran de cierta forma concordancia con la geometría de la cuenca, y los estratos de las unidades litoestratigráficas toman actitudes semejantes a la de los bordes de la cuenca y el basamento cristalino.

En la parte central de cuenca, se observa principalmente grupos de rocas con una tendencia subhorizontal y con contactos bien definidos, además de mantener espesores semejantes en la extensión del sector.

En los bordes de la cuenca muestran una pendiente pronunciada y de la misma forma los grupos de roca allí depositados. Se configuran entonces al costado occidental un monoclinal con vergencia oriental y al costado oriental un monoclinal con vergencia occidental.

**5.4.2.4 Fallas Geológicas:** La cuenca está controlada principalmente por fallas geológicas cuya deformación proviene del basamento y que se propagan en la cuenca como cabalgamientos de menor escala como consecuencia a la tectónica transpresiva.

En el margen oriental de la cuenca se observa la influencia del sistema de fallas Bucaramanga – Santa Marta (SFBSM) con su cinemática lateral izquierda y estilo en flor positiva asimétrica (Figura 17), de la misma forma fallas de descamación de piel gruesa en el costado occidental como la falla de Cañabraval. Dentro de la cuenca se observa una falla con características estructurales y cinemáticas similares a la falla Cañabraval y que recibe el nombre de falla Cañaletal con cinemática lateral derecha (Figura 21) y que afecta todas las unidades de la cuenca por su geometría subvertical.

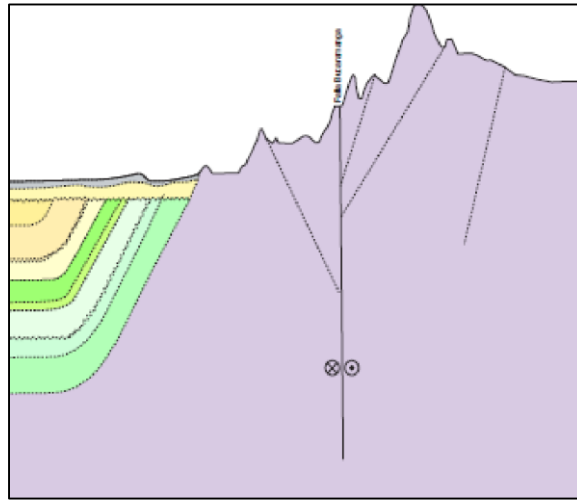


Figura 20. SFBSM que muestran un estilo estructural en flor positiva asimétrica al costado oriental de la cuenca.

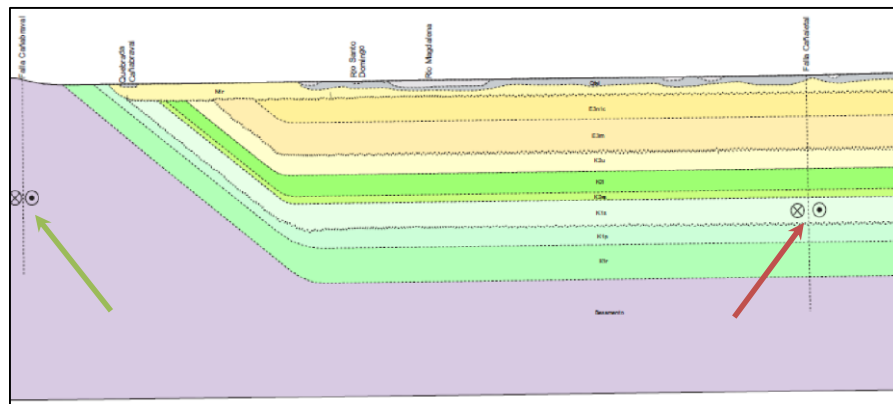


Figura 21. Fallas cañabral (saeta verde) y cañaletal que afectan el basamento y las rocas de la cuenca.

### 5.4.3 Corte C-C'

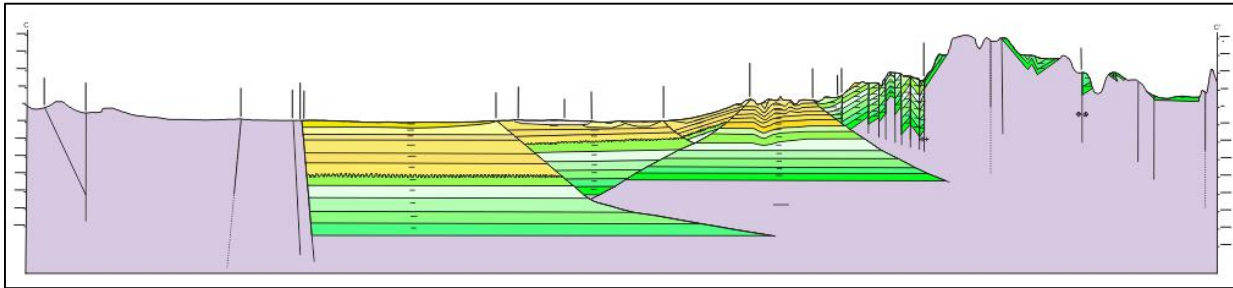


Figura 22. Visualización del corte C-C' en la zona de estudio.

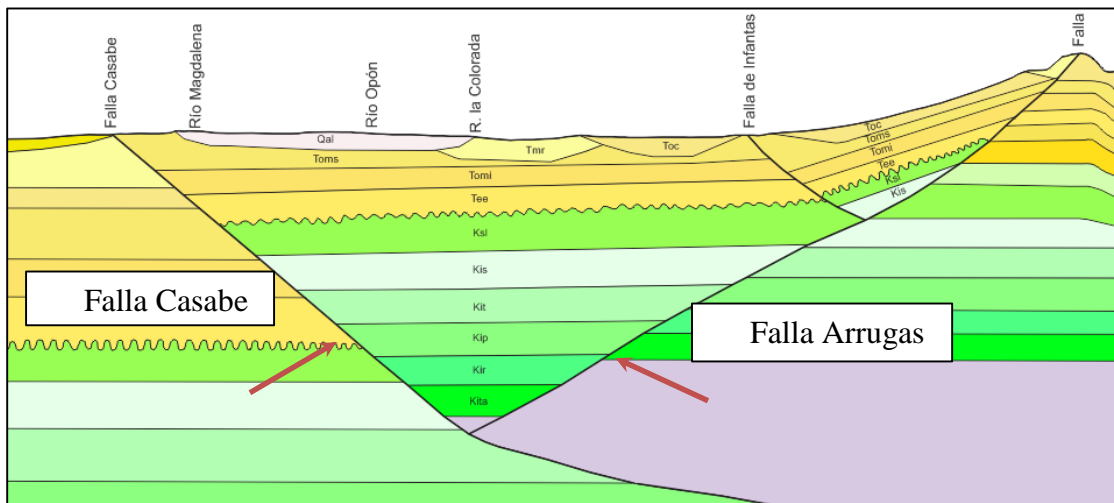
**5.4.3.1 Geometría de la cuenca:** En este sector la cuenca del VMM (ver apéndice C) se comporta como un conjunto de rocas altamente deformadas, delimitados por fallas geológicas.

En el margen occidental de la cuenca la secuencia litoestratigráfica, se encuentra delimitada por la zona de falla correspondiente a la falla de Casa Nueva (Figura 24), con una tendencia subvertical.

En el sector central y oriental se observa la cuenca como sistemas cabalgados donde es común encontrar aflorando el basamento sobre las rocas de la cuenca, o que las rocas de la cuenca muestren un patrón de deformación similar que el del basamento cristalino incluso en las cotas más altas de la topografía.

**5.4.3.2 Estratigrafía:** Formación Tambor: La formación Tambor corresponde a la unidad más antigua de la cuenca a una profundidad de 3070 m y está en contacto discordante con el basamento cristalino. En el sector occidental de la cuenca la fm Tambor no se depositó mostrando un adelgazamiento lateral. En el sector central de la cuenca la formación Tambor aparece en forma de cuña por un cabalgamiento y retrocabalgamiento (falla Arrugas) de la falla Casabe (Figura 23).

Al oriente de la cuenca la formación tambor muestra características de actitud subhorizontal haciendo parte del bloque yacente de las fallas Arrugas y La Salina, alcanzando acá su máximo espesor. En el sector oriental esta formación se encuentra con un espesor de 235 m y siguiendo los patrones estructurales del basamento.



*Figura 23.* Sector central de la cuenca donde se evidencia la formación Tambor acuñada por un cabalgamiento y retrocabalgamiento por la falla Arrugas.

- Formación Rosa Blanca

En el sector occidental la formación rosa blanca se deposita sobre el basamento cristalino, por la ausencia de la formación tambor (Figura 24). Presenta espesor y profundidad de 340 m y 4240 m respectivamente. En la parte central se encuentra nuevamente en contacto con el basamento, como rocas del bloque colgante de la falla de Casabe. Además, en el sector central este conjunto de rocas se encuentra como una cuña formada entre los cabalgamientos de Casabe y Arrugas. En el sector oriental la formación Rosa Blanca suprayace de manera concordante a la fm Tambor en

el bloque yacente de las fallas Arrugas y La Salina y además siguiendo los patrones de deformación del basamento cristalino.

- Formación Paja

En la zona W de la cuenca presenta su mayor espesor, aproximadamente 330 m. Se depositada sobre la formación Rosa Blanca y subyace la formación Tablazo a una profundidad de 3900 m. Debido a la falla Casabe sufre un cabalgamiento entrando en contacto con la formación Esmeralda y la formación la Luna y hacia el E de la formación con el Basamento. Presenta una geometría tabular en la mayor parte de la cuenca, excepto en el occidente de la cuenca que presenta una discordancia progresiva producto de los cambios geológicos en su depositación.

Posteriormente la formación Paja debido a un retrocabalgamiento entra en contacto en la parte W con la formación Simití y Tablazo, y en la parte E con el Basamento.

- Formación Tablazo

En el W de la cuenca la formación Tablazo está depositada sobre la formación Paja y se observa que en esta zona presenta su mayor espesor aproximado de 330 m. Producto del cabalgamiento de la falla Casabe la formación Tablazo entra en contacto con formaciones del Terciario y la formación Paja y Rosa Blanca. Esta formación presenta una geometría tabular en sentido W-E llegando a un punto que debido a unas inclinaciones y variaciones angulares finaliza en una discordancia progresiva. Se evidencia una profundidad aproximada de 3.560 m.

- Formación Simití.

Además de presentar las características anteriores se observa como una cuña entre los cabalgamientos de la Falla Infantas y la Falla Arrugas, la fm Simití llega hasta una profundidad de 3167 m y su máximo espesor es de 360 m.

- Formación La Luna

Además de presentar las características anteriores a la fm Tablazo y fm Paja. En el sector occidental se encuentra en contacto discordante con la formación Esmeralda, debido a un hiato o faltante de tiempo que puede seguirse hasta la parte central (Figura 24). Esta discordancia desaparece en el bloque yacente de la Falla Arrugas por la depositación de las Formaciones Umir, Lisama, y La Paz.

En el sector central se observa como disconformidades entre las rocas del grupo Real y Los cuerpos de roca de la formación Mugrosa y Colorado, generando superficies de erosión y geometrías lenticulares características de canales. Esta fm presenta profundidad aproximada de 2815 m y un espesor 300m.

- Formación Umir

En la parte oriental de la cuenca se ve afectada por un sinclinal, se encuentra depositada la formación Luna y subyace la formación Lisama. En el sistema de falla de San Vicente de Chucurí la formación Umir presenta su máximo espesor de 170 m aproximadamente y su profundidad es cercana a los 960m. Hacia la parte Oriente presenta una discordancia progresiva y aflora en algunas zonas afectadas por la erosión.

- Formación Lisama

La formación Lisama aparece hacia el occidente de la cuenca entre las fallas Arrugas y Salina depositada sobre la formación Umir y subyace la formación La Paz. Cerca de la falla Putana dicha formación aflora y se ve afectada por la erosión. Esta formación se ve perjudicada por un sinclinal obteniendo su máxima profundidad aproximada a unos 800 m y tiene un espesor promedio de 200 m.

- Formación La Paz

Esta formación solo se evidencia entre las fallas Arrugas y Salina, se deposita sobre la formación Lisama y subyace a la formación Esmeralda. Tiene una profundidad aproximada entre de 650 m y tiene un espesor cercano de 140 m.

- Formación Esmeralda

En el margen W-E la formación Esmeralda se deposita discordantemente sobre la formación Luna debido a un faltante de formación formando un hiato y subyace la formación Mugrosa (Figura 24). En este sector presenta su máximo espesor aproximado de 370 m, presentando una geometría tabular. Entre los retrocabalgamientos de las fallas Infantas y Arrugas esta formación se ve afectada y toma una inclinación generando que entre en contacto con la formación La Paz posiblemente por una discordancia angular. Esta formación se encuentra a una profundidad máxima en la parte W de la cuenca cercana a los 2.550 m.

- Formación Mugrosa

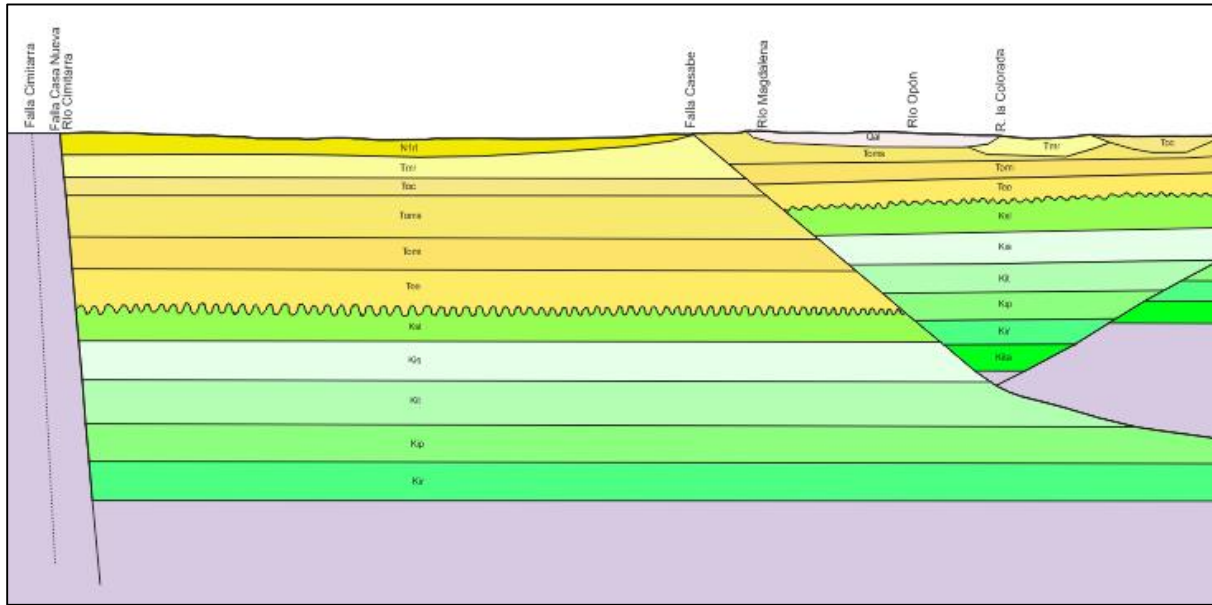
Se encuentra conformada por Tomi y Toms las cuales se depositan sobre la formación Esmeralda y subyace la formación Colorado. Hacia el W de la cuenca presenta su máximo espesor promedio de 675 m. En el centro de la cuenca en la formación Mugrosa subyace formaciones de Cuaternario, Grupo Real y formación Colorado. Entre las fallas de Arrugas y Salina esta formación se ve afectado por un conjunto de sinclinales y anticlinales deformándolo en esta zona. Su depositación más profunda en la cuenca se encuentra a 2.170 m como se evidencia en el corte.

- Formación Colorado

En el margen W-E la formación Colorado se deposita sobre la formación Mugrosa y subyace el grupo Real. Se encuentra a una profundidad aproximada de 1500 m obteniendo un espesor promedio de 170 m. Hacia el Oriente de la cuenca, la formación Colorado aflora siendo afectado por la erosión. Presenta de W-E una geometría tabular, seguidamente se puede observar que presenta una discordancia angular.

- Grupo Real

Está conformado por N1r1, Tmr. En el Occidente de la cuenca el grupo real presenta su máximo espesor, aproximado 335 m y con una profundidad cercana a los 845 m con una geometría tabular. Se deposita sobre la formación Colorado y subyace la formación del cuaternario (Figura 25).



*Figura 24.* Depositación de la fm Rosa Blanca sobre el basamento por la ausencia de la fm Tambor. Límite occidental definido por la falla de casa Nueva. Faltante de tiempo entre las formaciones La Luna y Esmeralda.



Sector Oriental: Corresponde a rocas deformadas con los mismos patrones del basamento cristalinos, influenciados por rocas profundas que les imprimen a estas una deformación controlada principalmente por transurrencia (Figura 28).

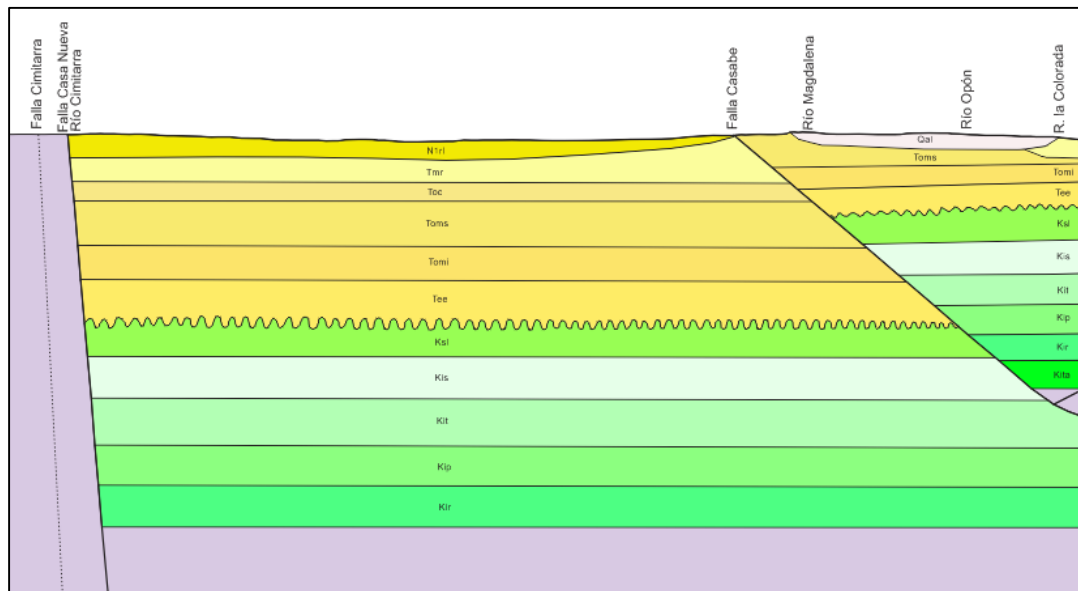


Figura 26. Sector Occidental, rocas subhorizontales y con menor influencias de fallas. Bordes de la cuenca por sistema de transurrencia de la falla Casa Nueva.



#### 5.4.4 Corte D-D'

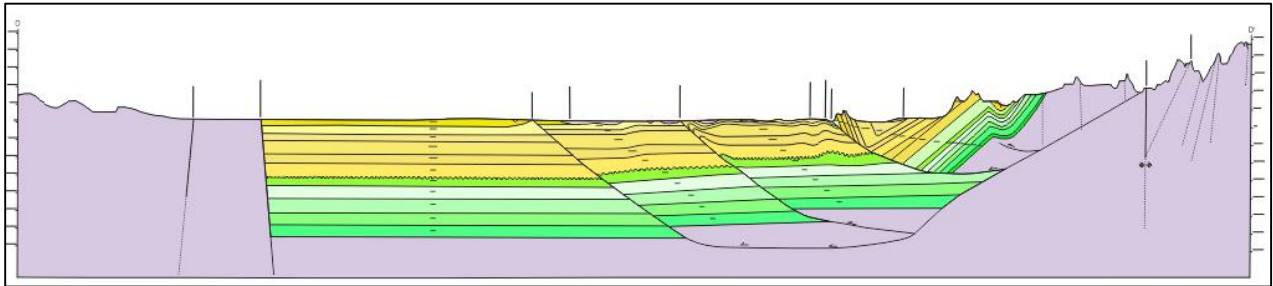


Figura 29. Visualización del corte D-D' en la zona de estudio

**5.4.4.1 Geometría de la cuenca:** Corresponde a una depresión topográfica en los sectores occidental y central, con rocas que muestran una actitud subhorizontal, el sector oriental corresponde a un alto topográfico definido por la deformación impresa por fallas de cabalgamiento y pliegues (ver apéndice D).

**5.4.4.2 Estratigrafía:** Fm Tambor: Ocurre únicamente en el margen oriental de la cuenca como una delgada franja que aflora en el flanco oriental del sistema sinclinal de Nuevo Mundo. Esta estructura es encontrada como bloque colgante de la falla La Salina donde la unidad es cortada. Su profundidad y espesor son 1445 y 300 m respectivamente.

- Fm Rosa Blanca

Ocurre en el sector occidental de la cuenca depositada sobre el basamento cristalino como estratos subhorizontales. Se encuentra a una profundidad de 3255 m y con un espesor de 360 m. En el sector central de la cuenca se observa haciendo parte de las rocas de los bloques yacientes de las fallas Casabe, Infantas y La Salina, a una profundidad de 2965 m y un espesor de 360 m. En el

sector oriental ocurre como rocas plegadas conformado el sistema sinclinal de Nuevo Mundo con una disminución en su espesor y profundidad.

- Formación Paja

En el margen W-E la formación Paja se deposita sobre la formación Rosa Blanca y subyace la formación Tablazo. En el Occidente de la cuenca alcanza su mayor espesor aproximado de 345 m, y se encuentra a una profundidad 2.920 m. Se puede observar que se encuentra depositado en la mayor parte de la cuenca presentando una geometría tabular, excepto en la parte E donde se ve afectado por una discordancia principalmente angular y sinclinales y anticlinales presente en esa zona.

- Formación Tablazo

En el margen W-E la formación Tabalzo se deposita sobre la formación Paja y subyace la formación Simití, se encuentra a una profundidad aproximada de 2.570 m y presenta un espesor máximo promedio de 400 m.

Se observa que su geometría es tabular en ciertas zonas y se ve afectada por una discordancia angular, notándose más pronunciada en la parte Oriental de la cuenca.

- Formación Simití

En el margen W-E la formación Simití se deposita sobre la formación Paja y subyace la formación Luna. En el centro de la cuenca alcanza su mayor espesor aproximado de 390 m y alcanza una profundidad de 2.200 m en base y 1.800 m respecto al techo de la formación.

Al oriente de la cuenca presenta su menor espesor y presenta una discordancia angular, aunque hacía el W de la cuenca tiene una geometría tabular.

- Formación la Luna

En el margen W-E en toda la cuenca está depositada sobre la formación Simití y subyace de manera discordante sobre la formación Esmeralda debido a un faltante de formación presentando un hiato, en excepción hacia el E que subyace la formación Umir. Hacia el oriente de la cuenca se ve afectada por el sinclinal y el anticlinal presentes en la zona. La formación La Luna se encuentra depositada a una profundidad máxima aproximada de 1.830 m y tiene un espesor promedio de 250 m.

- Formación Umir

En toda la cuenca se puede observar que se encuentra presente hacia el lado oriente siendo afectado por un sinclinal y un anticlinal. Presenta una discordancia angular causante de que su profundidad llegue aproximadamente a 1.330 m y un espesor promedio de 340 m máximo.

- Formación Lisama

Sobresale solo en la parte E de la cuenca depositado sobre la formación Umir y subyace la formación la Paz. Tiene un espesor promedio de 270 m aproximadamente y llega a una profundidad de 1.200 m presentando una discordancia angular.

- Formación la Paz

Puede evidenciarse que sobresale solo en el oriente de la cuenca y se encuentra depositado sobre la formación Lisama y subyace la formación Esmeralda. A medida que decrece desde superficie va aumenta su espesor hasta llegar al máximo de 220 m aproximadamente y una profundidad de 1.100 m hasta entrar en contacto con la formación la luna debido a una discordancia angular.

- Formación Esmeralda

En el margen W-E la formación Esmeralda se deposita de manera discordante sobre la formación la Luna por un faltante de tiempo, excepto en la parte oriental que se deposita sobre la formación la Paz y de igual manera subyace sobre la formación Mugrosa en toda la cuenca. Presenta una espesor y profundidad aproximada de 400 m y 1.580 m respectivamente. Su geometría es tabular, aunque en la mayor parte de la cuenca es afectado por los sinclinales y anticlinales presente en esa zona.

- *Formación Mugrosa*

Conformada por las formaciones Tomi y Toms la cual se encuentra deposita sobre la formación Esmeralda y subyace la formación Colorado. Tiene un espesor promedio de 640 m y a una profundidad máxima 1.200 m con una geometría tabular y discordancia angular en el oriente de la cuenca.

- Formación Colorado

En el margen W-E se deposita sobre la formación Mugrosa y subyace la formación del Grupo Real, en la parte E de la cuenca presenta su mayor espesor aflorando una parte mientras subyace

de formación Cuaternario. Presenta un espesor aproximado de 200 m a una profundidad de 550 m y se observa una geometría tabular.

- Grupo Real

Está depositado sobre la formación Colorado a lo largo de la cuenca y subyace formaciones del Cuaternario, aunque aflora en su mayor parte afectada por erosión presentando una geometría tabular. Se encuentra depositado a una profundidad de 365 m y un espesor de 435 m aproximadamente.

**5.4.4.3 Geología Estructural:** En el margen occidental las rocas de la secuencia estratigráfica muestran una tendencia subhorizontal hasta conectar con el límite de cuenca que es la falla de Casa Nueva.

En el sector central estratigráficamente a partir de la fm Esmeralda muestra la generación de un monoclinas como acción de la falla de Casabe.

En la zona de deformación de la falla Infantas se genera un pliegue de arrastre de tipo antiformal que afecta principalmente las unidades La Luna hasta el techo de la secuencia.

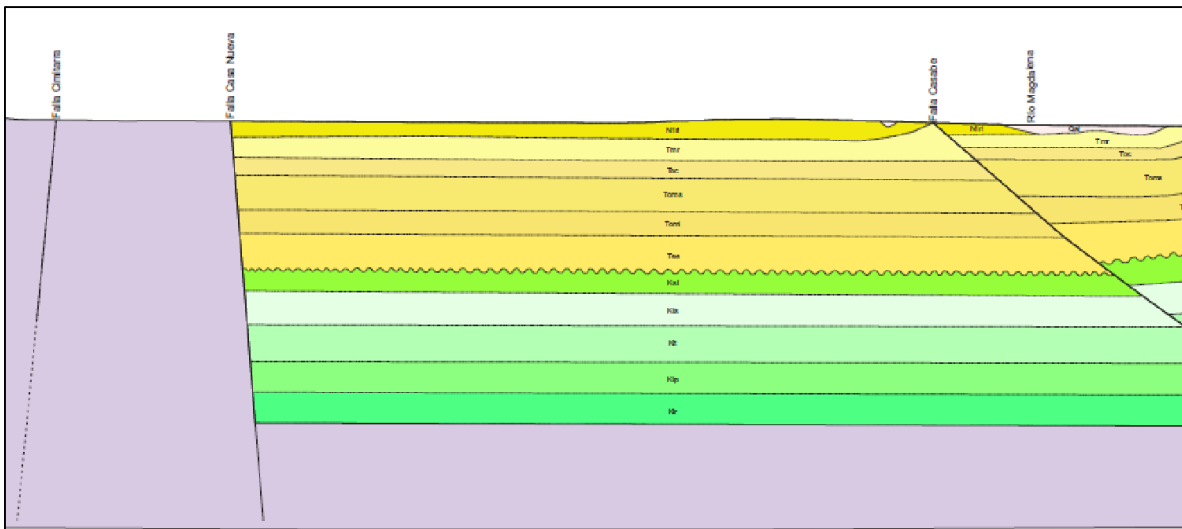
En el bloque yacente de la falla La Salina las rocas muestran deformación continua de tipo plegamiento en un sistema sinclinal, anticlinal por la impresión del fuerza generado en la mencionada falla.

Sinclinal de Nuevo Mundo Corresponde a un sistema de plegamientos sinformes y antiformales generado por el cabalgamiento de la falla La Salina.

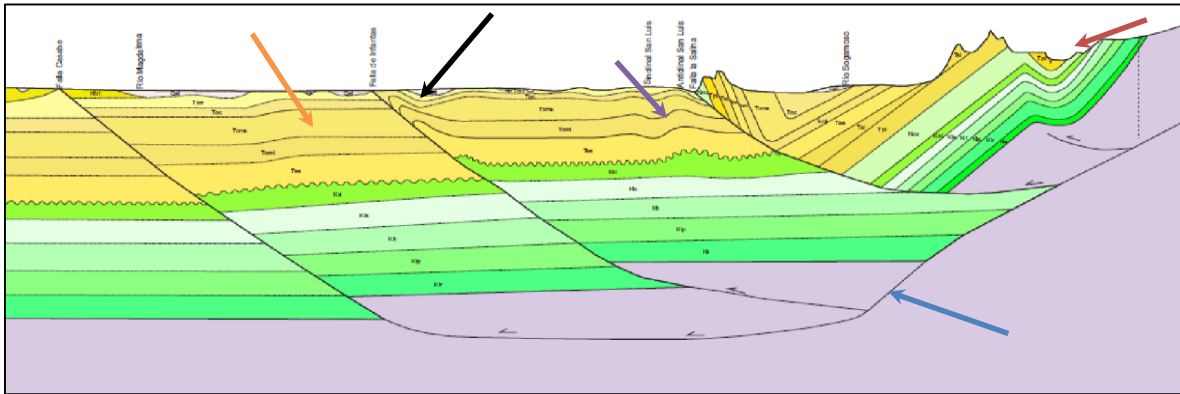
**5.4.4.4 Fallas Geológicas:** En el sector occidental las Fallas de Cimitarra y Casa Nueva (Figura 30), que se comportan como fallas de rumbo de alto ángulo, la segunda se determina como límite occidental de la cuenca.

En el sector central se observa un sistema de cabalgamientos imbricados que se generan a partir de un despegue. De oriente a occidente se van imbricando las fallas La Salina, Infantas, y Casabe con ángulos menores o iguales a  $45^\circ$ . (Figura 31).

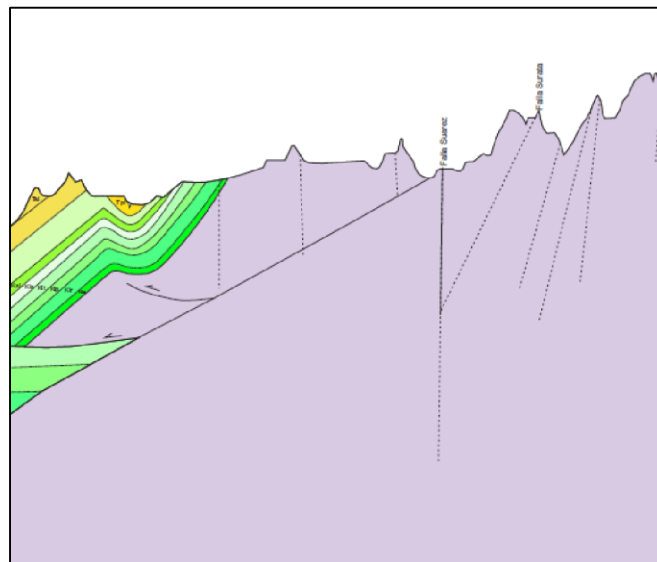
En el sector oriental se observa la generación de fallas de transcurrencia que influyen de manera directa el sector central de la cuenca (Figura 32). Estas fallas de transcurrencia muestran estilos estructurales en flor positiva asimétrica, como es característico en la cordillera oriental colombiana.



*Figura 30.* Sector occidental de la cuenca con estratos subhorizontales. El límite occidental es la falla Casa Nueva. Las rocas de este sector hacen parte del bloque yacente de la falla Casabe.



*Figura 31.* Sistema de cabalgamientos imbricados de las fallas Casabe, Infantas y La Salina generadas a partir de una falla de despegue (Despegue saeta azul). Estructura del sinclinal de nuevo mundo (Saeta roja). Monoclinal en el sector central (saeta naranja). Pliegue de arrastre generado por la falla Infantas (saeta negra), sistema de pliegues en el bloque yacente de la falla la Salina (saeta morada).



*Figura 32.* Sistema transcurrente en el borde oriental de la cuenca que afecta el basamento cristalino.

### 5.4.5 Corte E-E'

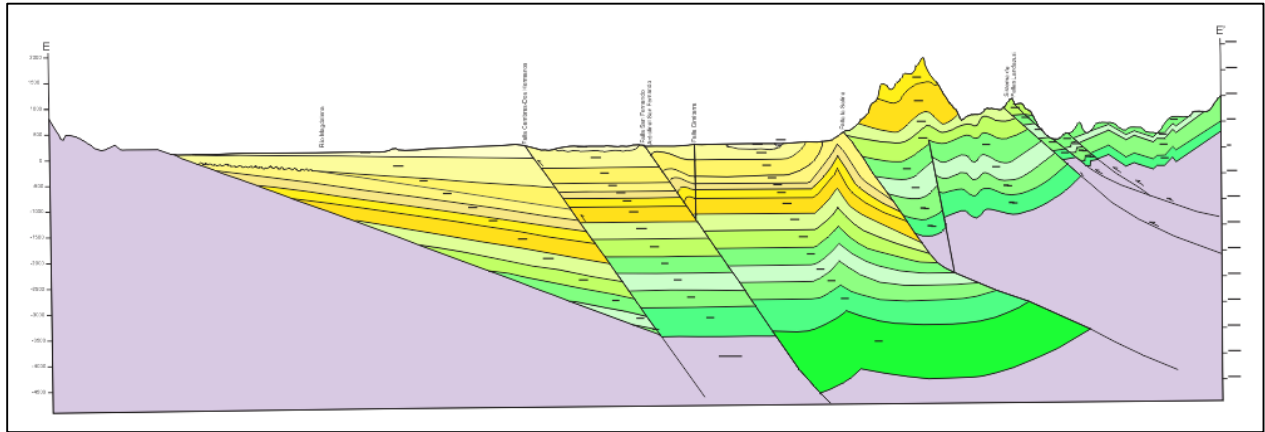


Figura 33. Visualización del corte E-E' en la zona de estudio

**5.4.5.1 Geometría de la cuenca:** En el margen occidental la cuenca muestra una geometría definida por la inclinación de sus límites. Las rocas que la conforman se encuentran en un ángulo de 15 grados. Y que finalmente se acuña contra el límite occidental.

En el sector central de la cuenca las rocas se comportan de manera subhorizontal, aunque en algunos sectores la deformación por la acción tectónica de las fallas es inminente, formando estructuras de deformación continua como pliegues entre otros.

En el sector oriental la cuenca se observa como un cinturón altamente plegado y afectado por fallas geológicas que se propagan desde el basamento hasta cortar rocas de la cuenca (ver apéndice E).

#### 5.4.5.2 Estratigrafía

- Formación Cumbre

Ocurre en la parte central de la cuenca formando una estructura anticlinal en el bloque yacente de la falla La Salina. Sus espesores y profundidades varían desde 4.500 m y 1,035 m respectivamente.

- Formación Rosa Blanca

Ocurre en el sector central de la cuenca presentando espesor de 565m y una profundidad de 3.425 m, depositada de manera discordante sobre el basamento, entre las fallas Dos Hermanos y San Fernando. De la misma manera se encuentra depositada sobre la formación Cumbre conformando una estructura anticlinal. En el sector Oriental su espesor decrece y muestra claras evidencias de alta deformación siguiendo los patrones del basamento cristalino y su configuración tectónica local.

- Formación Paja

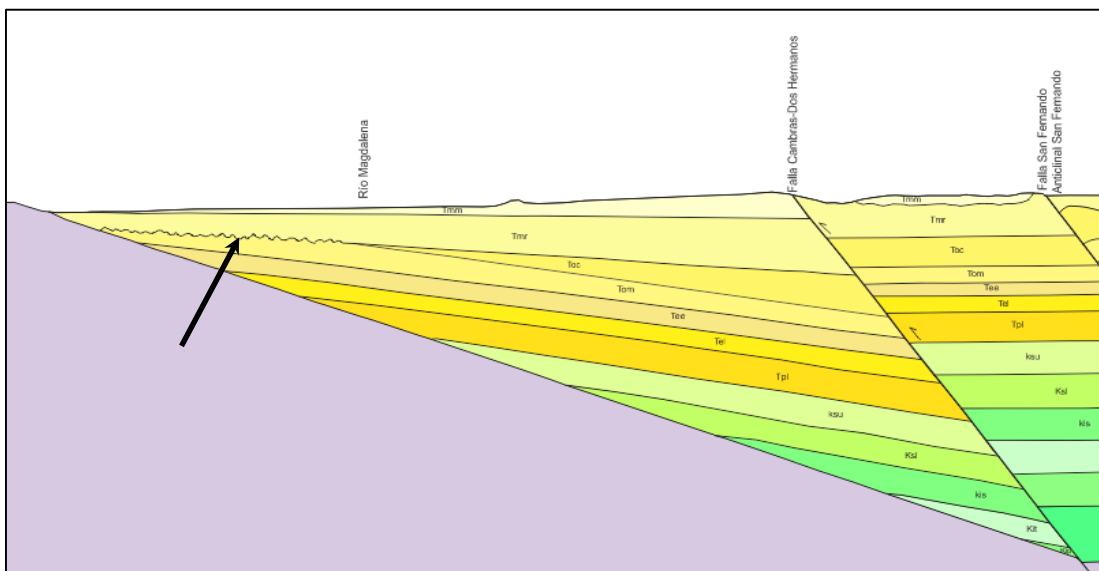
Ocurre en el sector occidental de la cuenca como una pequeña cuña entre el límite occidental de la cuenca y la falla Cambras – Dos Hermanos, depositada de manera discordante sobre el basamento a una profundidad de 2.845 m. En el sector central la formación paja muestra su máximo espesor de 200 m formando un anticlinal asociado a la falla La Salina. En el sector oriental se comporta de manera semejante a las unidades de roca antes mencionadas.

Formación tablazo: En el occidente de la cuenca la formación Tablazo presenta una acuñaamiento debido a un faltante de formación. Se deposita sobre la formación Paja y subyace la

formación Simití, desde el centro de la cuenca hacia el oriente se ve afectada por sinclinales y anticlinales y se observa que en esta zona presenta su mayor espesor aproximado de 335 m y llega a una profundidad de 2.530 m.

- Discordancias

En el sector occidental de la cuenca se observa la ocurrencia de una discordancia estratigráfica correspondiente a un faltante de tiempo que pone en contacto las rocas de la formación mugrosa y las rocas del grupo Real, debido al adelgazamiento y pinchamiento al occidente de la formación Colorado (Figura 34).



*Figura 34.* Margen occidental de la cuenca. Pinchamiento en ángulo de las rocas de la cuenca contra su límite occidental. Hiato que pone en contacto la formación Mugrosa con las rocas del grupo Real (Saeta Negra). Adelgazamiento de la formación Mesa hasta no depositarse en el borde occidental de la cuenca.

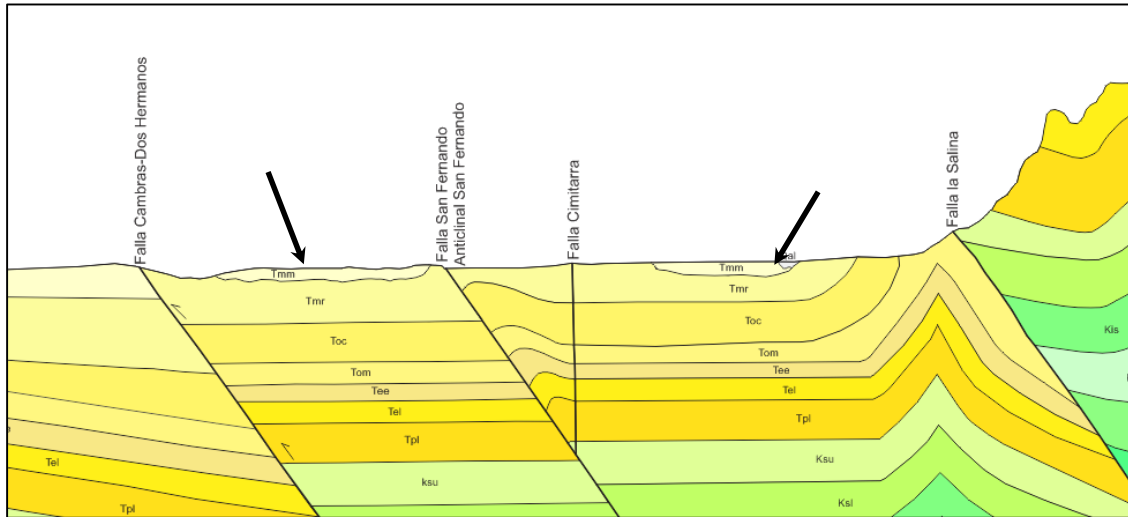


Figura 35. Deposición lenticular de la Formación Mesa en el sector central de la cuenca (Saeta negra).

- Formación Simití

Presenta una acuñaamiento hacia el W de la cuenca depositandose sobre la formación Tablazo y subyace la formación la Luna. Presenta su máximo espesor promedio de 450 m hacia el E de la cuenca, donde es notoria la deformación por la geología estructural presente en la zona. Su profundidad máxima es de 3.000 m, se observa que esta formación muestra una discordancia angular en la mayor parte del corte.

- Formación Luna

Hacia la parte E de la cuenca presenta un acuñaamiento debido a un faltante de tiempo, depositandose sobre la formación Simití y subyace la formación Umir. Se encuentra a unos 2.700 m de profundidad en la zona más profunda, cuenta con un espesor aproximado de 350 m. En la mayor parte de la cuenca se ve afectado por los sinclinales y anticlinales presentes en la zona y por una discordancia angular, excepto un tramo hacia el W donde su geometría es tabular.

- Formación Umir

En el W se evidencia un acuñaamiento provocado por un faltante de formación generando un hiato. Hacia el E de la cuenca se deposita sobre la formación Luna y subyace la formación Lisama, se encuentra deformado por sinclinales y anticlinales en la gran parte de la cuenca y también por la deformación angular, aunque en la región del W su geometría se atribuye tabular. Su profundidad y espesor aproximado es de 2.300 m y 300 m respectivamente.

- Formación Lisama

Se presenta un acuñaamiento terminando en un hiato al lado W de la cuenca, se deposita sobre la formación Umir y subyace la formación la Paz. Presenta su máximo espesor promedio de 500 m hacia el E de la cuenca, y su profundidad aproximada se encuentra a unos 2.000 m; esta formación inicia con una discordancia angular, seguidamente su geometría es tabular y luego se ve afectado por sinclinales y anticlinales presentes.

- Formación la Paz

En el occidente de la cuenca esta formación presenta un acuñaamiento por un faltante de tiempo. Se deposita sobre la formación Lisama y subyace la formación Esmeralda. Hacia el oriente se observa que es afectado por el sinclinal y anticlinal presentes en esta zona y aflora en superficie donde muestra su mayor espesor de 500 m aproximadamente; se encuentra a 1.600 m de profundidad hacia el W de la cuenca donde se muestra más profunda.

- Formación Esmeralda

Se deposita sobre la formación la Paz y subyace sobre la formación mugrosa. Hacia el W de la cuenca presenta un acuñamiento colocando en contacto a las formaciones con el basamento, en esta misma zona presenta su mayor espesor promedio de 190 m a una profundidad de 1.400 m aproximadamente. En el margen W-E se observa una discordancia angular, seguidamente una geometría tabular y luego una afectación por presencia de un sinclinal y anticlinal en la zona.

- Formación Mugrosa

Se encuentra depositada sobre la formación Esmeralda y subyace hacia la parte Oeste con la formación Colorado y de manera discordante con el Grupo Real debido a un hiato (Figura 34). Muestra una discordancia angular al W de la cuenca, posteriormente se evidencia una geometría tabular y afectada por geología estructural presente en esa zona. Su profundidad y espesor aproximado de 1.200 m y 200 m respectivamente.

- Formación Colorado

Esta formación se encuentra depositada sobre la formación Mugrosa y subyace la formación Grupo Real; hacia el W de la cuenca presenta un acuñamiento finalizando en un hiato donde pone en contacto el Grupo Real con la formación Mugrosa. A medida que decrece va aumentando su espesor hasta llegar a su máximo de 340 m y tiene una profundidad aproximada de 900 m. Se observa una discordancia angular y geometría tabular.

- Grupo Real

En el margen W- E el Grupo real que está conformado por Tmr y Tmm, aumenta su espesor llegando a su máximo aproximado de 700 m hacia la parte Occidente. En el centro de la cuenca subyace una mínima parte del cuaternario. El Grupo Real aflora en casi la mitad de la cuenca siendo afectada por la erosión. Se encuentra a una profundidad de 450 m y presenta una geometría tabular con cierta discordancia angular.

- *Formación Mesa*

En el occidente de la cuenca se encuentra depositada presentando un adelgazamiento (figura 34), su espesor aproximado es de 200 m, yace sobre el grupo real. En el centro de cuenca presenta una depositación lenticular (figura 35).

**5.4.5.3 Geología Estructural:** En el sector occidental de la cuenca es característico la generación de un homoclinal o basculamiento de las unidades litoestratigráficas. Estas rocas hacen parte del bloque yacente de la falla Cambras Dos Hermanos. En el sector central se observa la generación de pliegues antiformes asociados a la falla de San Fernando en su bloque colgante y al bloque yacente de la falla La Salina.

Asociado al sistema de fallas La Salina se observa un sistema de plegamentos sinformes y antiformes por flexión y propagación de falla, de la misma forma ocurre con el sistema de fallas de Landázuri.

**5.4.5.4 Fallas Geológicas:** En el sector central de la cuenca se observan dos fallas inversas de alto ángulo que no causan cabalgamiento en las rocas de la cuenca. Estas fallas muestran un fuerte componente en el rumbo y son denominadas falla Cambras – Dos Hermanos y La falla de San Fernando.

A partir de la Falla San Fernando se genera una ramificación conocida como la falla de Cimitarra con una actitud subvertical y con un componente principal en el rumbo. (Figura 37)

La falla La Salina se comporta como un sistema de fallas de Cabalgamiento que ponen en contacto rocas más antiguas sobre más jóvenes incluyendo el basamento cristalino.

El Sistema de falla de Landázuri está relacionado con fallas de cabalgamiento que deforman rocas de la cuenca y del basamento. (Figura 38).

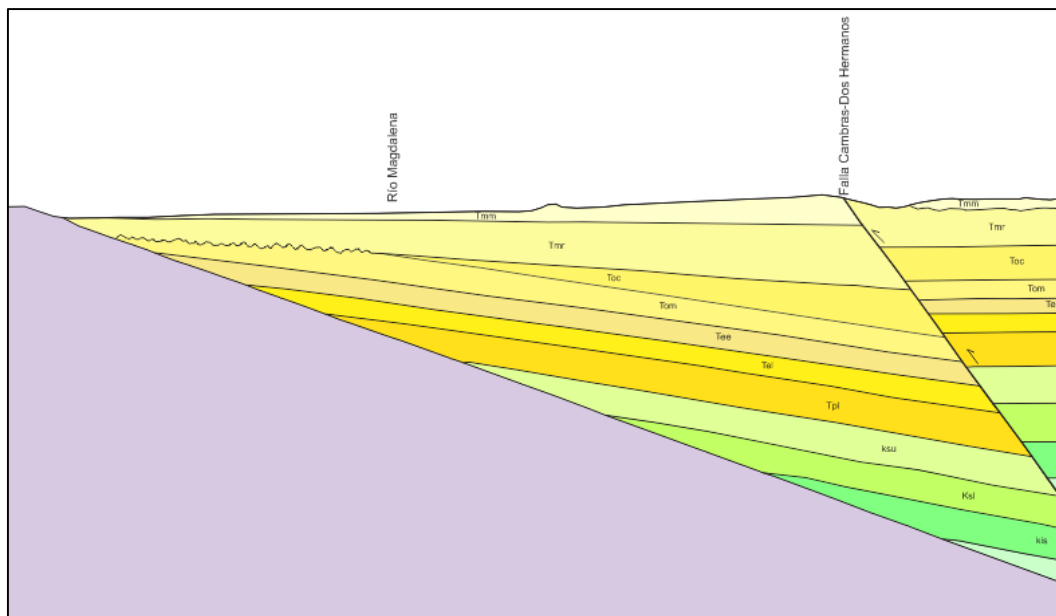
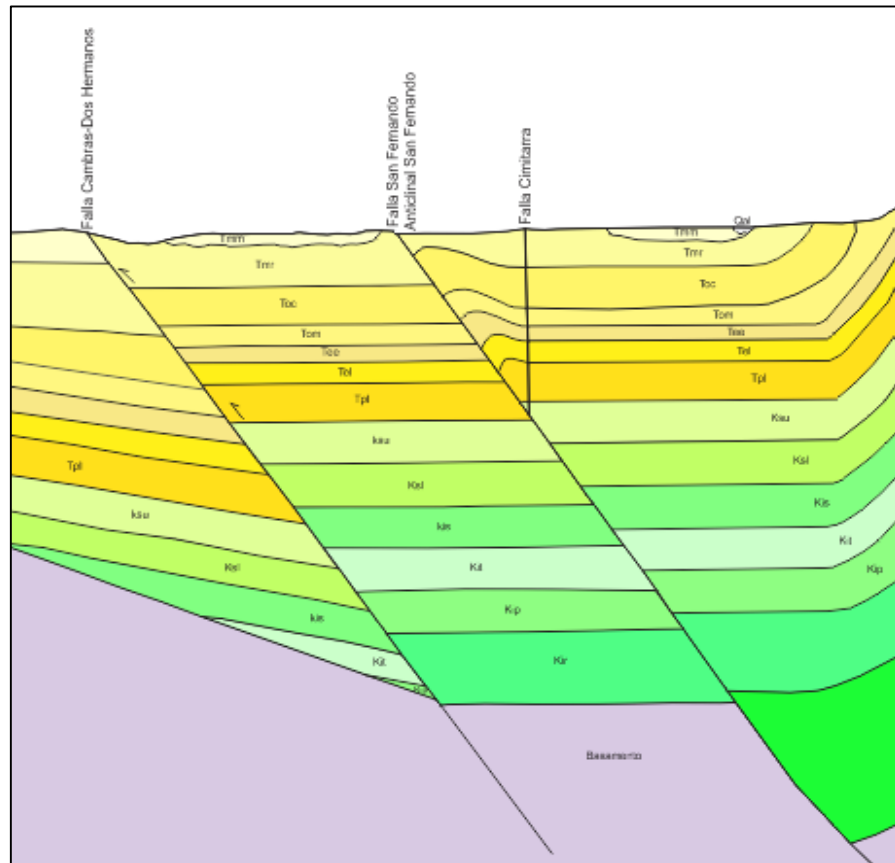


Figura 36. Homoclinal en el sector occidental de la cuenca. (Homoclinal = Basculamiento).



*Figura 37.* Fallas geológicas en el sector central de la cuenca. Generación de pliegues por flexión y flexura de falla.



de todos y cada uno de los sismos asociados a las regiones internas y aledañas a la delimitación del VMM. (Ver figura 39.)

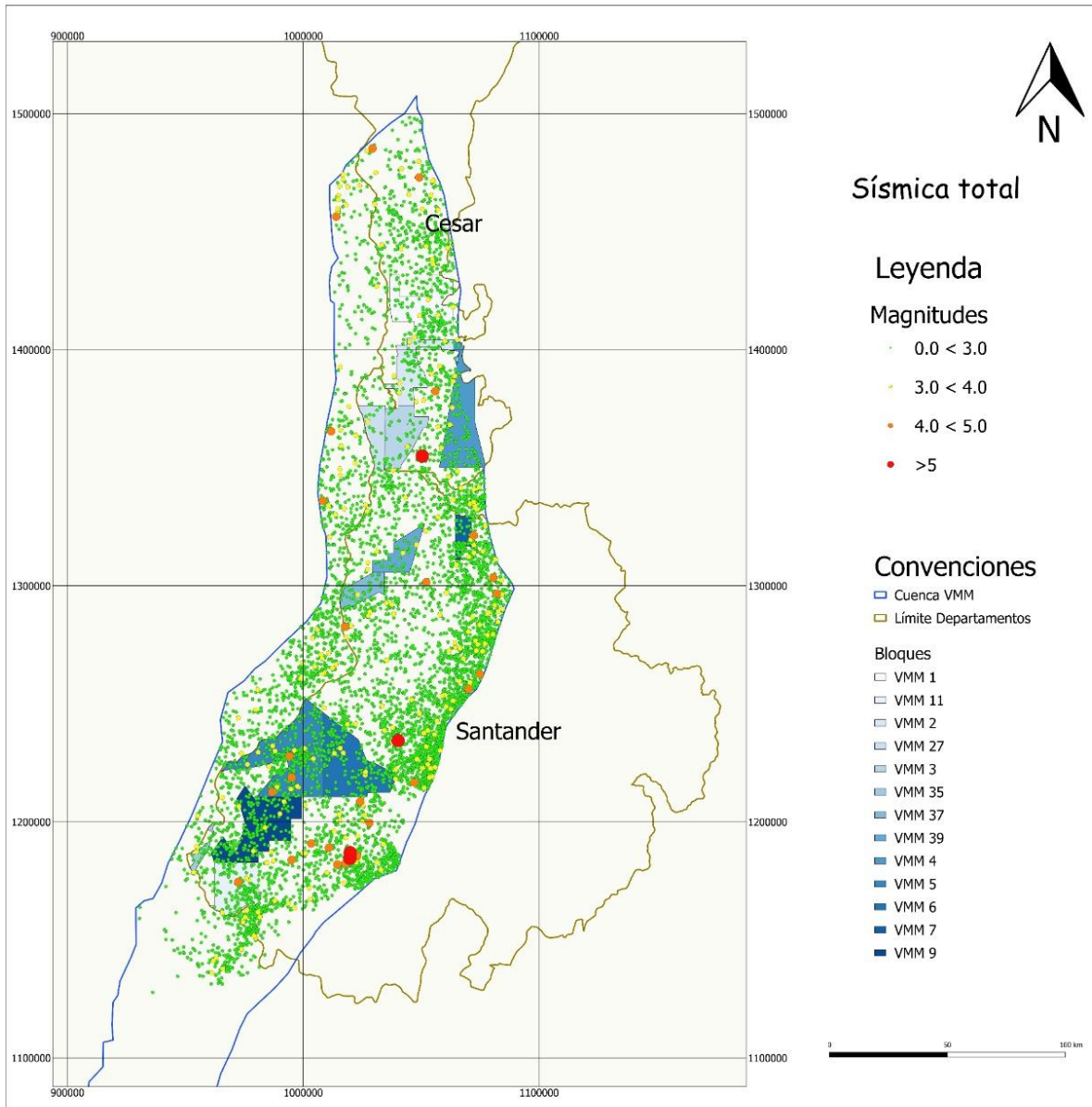


Figura 39. Mapa de sismicidad del valle medio del Magdalena.

En el mapa de sismicidad puede identificarse la región de la cuenca del VMM con un total de 16648 sismos cuyos orígenes varían, interpretándose por la profundidad del hipocentro. Se entiende entonces que los sismos que superan el espesor de la corteza terrestre están asociados a fenómenos tectónicos que según Londoño., et al (2019) son correspondientes con la interacción a profundidad de las placas Nazca, Suramericana y Caribe, y a fenómenos de rupturas que ocurren a profundidades mantélicas por el fracturamiento de las placas.

A nivel cortical, como se ha explicado en capítulos anteriores, el VMM presenta una fuerte influencia tectónica por fallas geológicas, que ocurren como estilos estructurales asociados con descamación de piel gruesa, encargada de deformar, tanto el basamento cristalino, como las rocas de la cuenca.

Dentro de la cuenca se observa una cantidad considerable de sismos (1.292) para los sismos menores a 6 km de profundidad que se identificarán en la figura 40 y que deben estar relacionados con fallas geológicas con estilos estructurales característicos de descamación de piel gruesa y piel delgada.

De acuerdo con la profundidad de la cuenca determinada en los diferentes cortes generados, se clasificaron sismos de 0 a 6 km (ver figura 40), los cuales presentan su hipocentro dentro de las rocas de la cuenca, y que afectan directamente el sistema petrolífero de esta, ya sean rocas generadoras, reservorio o sello, del mismo modo que depósitos cuaternarios que suprayacen la cuenca. Es decir, estos sismos son los más relevantes para este estudio.

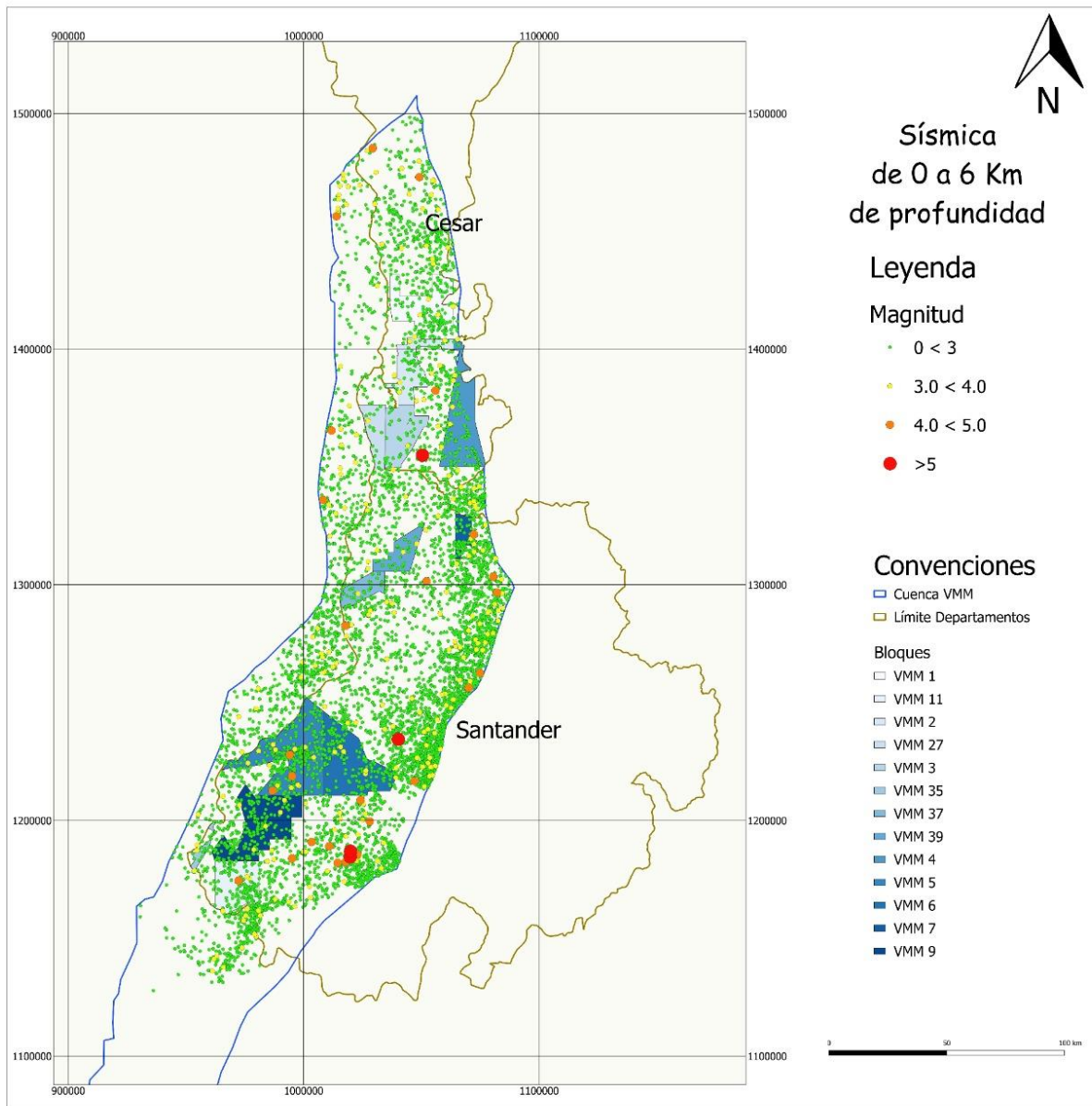


Figura 40. Mapa de Sismicidad asociado a sismos con hipocentros de 0 a 6 Km.

Graficando los sismos a profundidades que varían entre 0 y 6 km se puede observar que en la zona de estudio el mayor porcentaje (90%) se encuentra entre el rango de 0 a 3 MI (escala de Richter), con un total de 1.089 sismos; un 8% está entre el rango de 3 a 4 MI con 98 sismos, 1%

para las magnitudes 4 y 5 con 14 sismos y finalmente un 0.25% para magnitudes mayores a 5 MI con una frecuencia de 3 sismos.

Observando el diagrama de barras se evidencia que los sismos con magnitudes superiores a 4 presentan una baja frecuencia en la zona de estudio y en la figura (41) se observa que estos sismos se encuentran ubicados en el sector oriental de la zona de estudio en proximidades a la cordillera.

Por su parte los sismos de intensidades entre 3 y 5 MI se encuentran distribuidos en toda el área de estudio, con lo cual no se puede establecer un patrón de distribución geográfica. Solo los sismos de 4 a 5 MI parecen concentrarse más en el sector Sur del bloque, coincidiendo con los sectores con más presencia de fallas, de acuerdo con los cortes C-C', D-D' y E-E', particularmente hacia el corte EE.

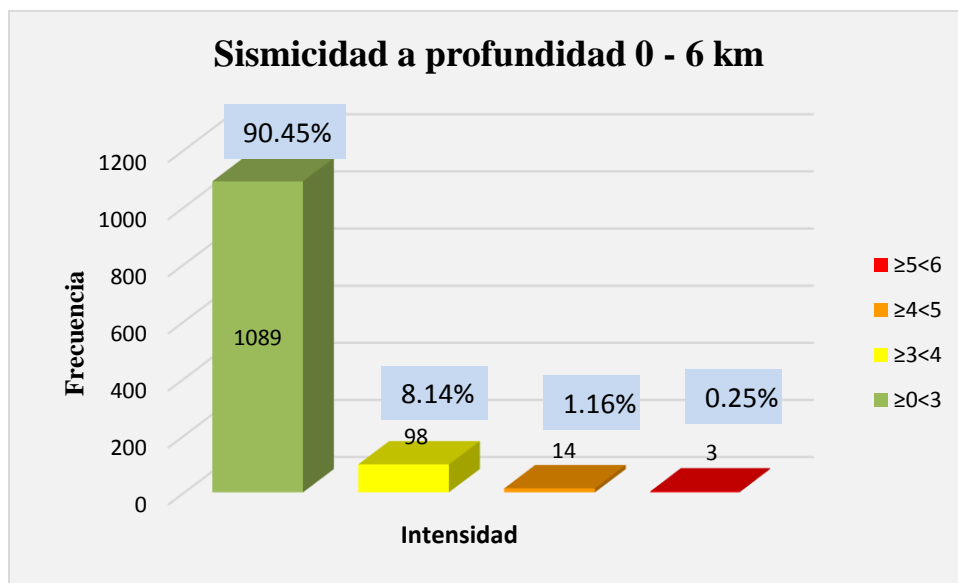


Figura 41. Sismicidad a profundidades entre 0-6 km.

En términos generales, de la figura 40 se puede afirmar que los eventos sísmicos se concentran principalmente en el sector Sur y Centro-Oriental del área de estudio, correspondiente a las zonas con más presencia de fallas y a la cordillera respectivamente, ligadas a fallas de extensión regional y las fallas que delimitan la cuenca. Hacia el centro y el norte de la cuenca, disminuye la concentración de sismos en general y son en su mayoría de baja intensidad (<3MI).

La relación de sismos a profundidades desde los 6 a los 35 Km hace referencia a rupturas asociadas a estas fallas y que en Valle Medio del Magdalena está más relacionado con fallas de extensión regional. A continuación, en la figura 42, se ilustra la ocurrencia de estos sismos.

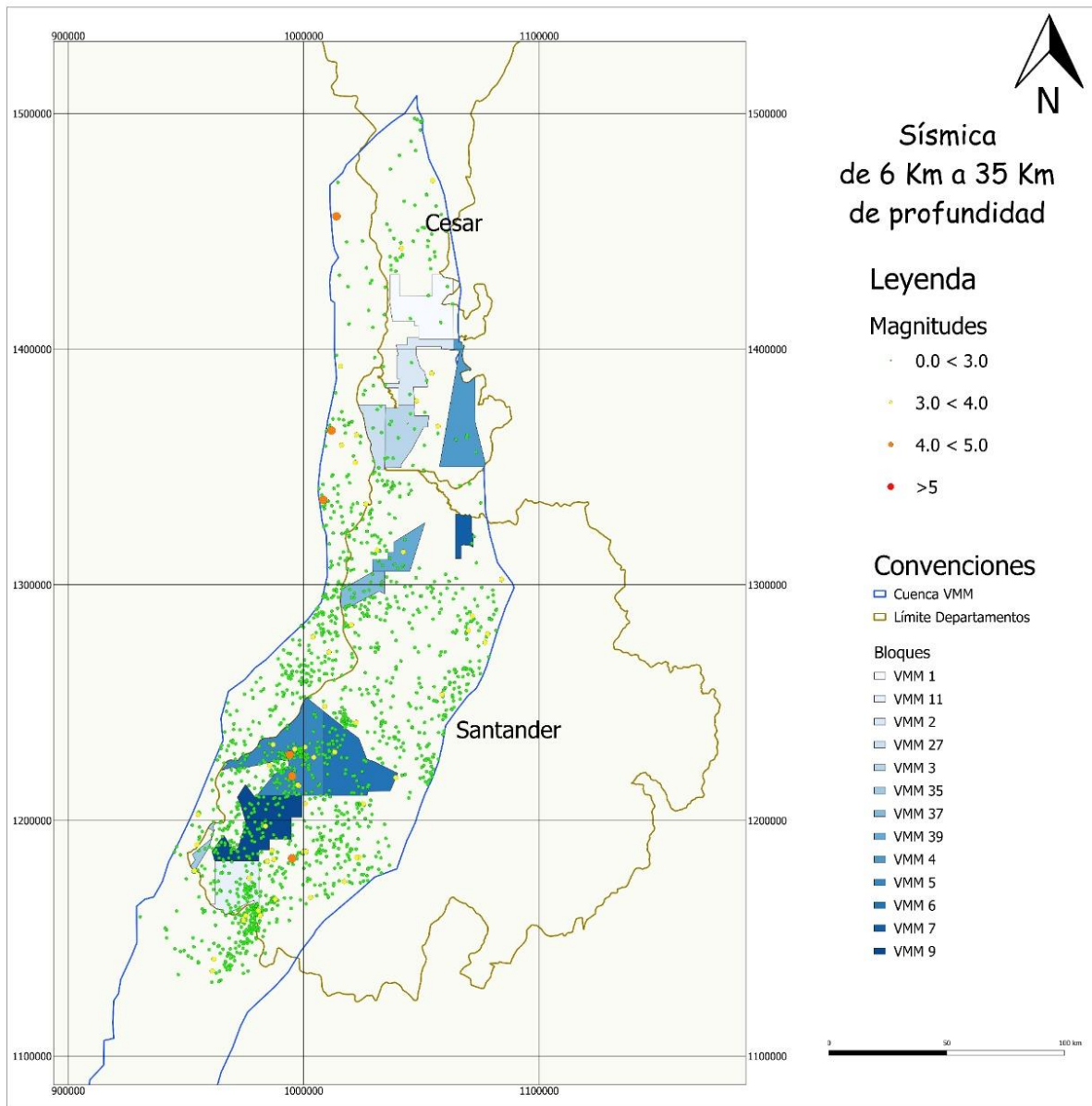


Figura 42. Sismos en la cuenca del VMM con profundidades de 6 a 35 km.

La sismicidad asociada a fallas geológicas está sectorizada principalmente a los márgenes de la cuenca, al costado oriental, delimitada por fallas rumbo deslizantes a asociadas a la dinámica transcurrente – compresional del Macizo de Santander y la Cordillera Oriental, mientras en el

sector occidental, la mayor influencia está dada por las fallas transpresionales que delimitan la cuenca con la cordillera central.

Graficando los sismos presentes en el diagrama de barras figura (43), los de mayor frecuencia (2.475) están ubicados en el rango de 0 a 3 MI que corresponde a un 96%, los restantes se distribuyen entre los rangos siguientes a 3, donde se evidencia que las magnitudes mayores a 5 es prácticamente nula la intensidad de sismos.

Con ayuda del diagrama es claro observar que a la profundidad de 6 - 35 km, la intensidad y frecuencia es baja para las magnitudes de interés siendo las  $>3$  MI, y estos datos observándolos en el mapa de la figura (42) se evidencia que los sismos con magnitudes superiores a 4 se encuentran agrupados en mayor porcentaje en el sector sur de la zona de estudio y tienden estar disperso en el norte de la cuenca.

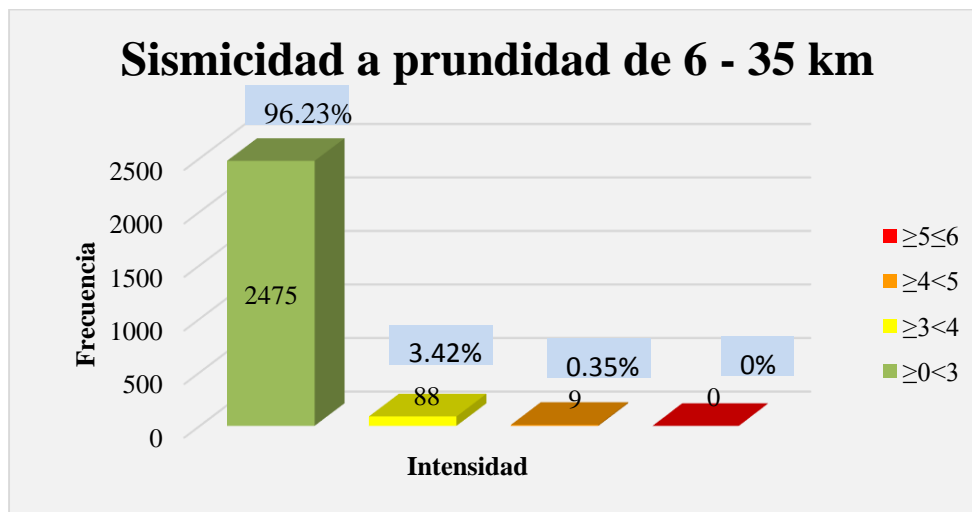


Figura 43. Sismos a profundidades entre 0 y 6 km.

## 7. Análisis de riesgos en la zona de estudio en roca generadora

### 7.1 Vulnerabilidad asociada a la estratigrafía y dinámica tectónica

Este estudio fue enfocado en las formaciones Tablazo y la Luna debido a sus características particulares cumpliendo con los estereotipos de roca generadora, favorables para la implementación del “fracking”.

En la parte estructural y estratigráfica es notoria la diferencia de complejidad que muestra cada una de las zonas estudiadas, específicamente en cuanto a presencia de fallas, siendo más notorio en la parte oriental, correspondiente al piedemonte de la cordillera.

Del análisis de los cortes realizados, se podría afirmar que las condiciones favorables para la exploración y explotación de no convencionales se encuentran en la zona centro-norte del área de estudio presentando baja vulnerabilidad, en los cortes A-A' y B-B'. En donde los cortes reflejan continuidad de las formaciones presentes y una escasa presencia de fallas.

En cuanto a los cortes C-C', D-D' y E-E', como se puede ver en las figuras 22, 29 y 33 respectivamente, hay una presencia importante de fallas en la zona de estudio.

En el corte C-C', la figura 25, muestra que del río Magdalena hacia el oriente, se encuentran fallas de gran extensión como Casabe y Arrugas. De acuerdo con el perfil se comportan como un sistema de despegue horizontal y rampa, conectando rocas del basamento con rocas objetivo para fracturamiento hidráulico.

El Corte D-D' (figura 31), presenta hacia la parte oriental las fallas Infantas y la Salina mostrando un sistema de cabalgamientos imbricados que se genera a partir de un despegue, quienes influyen

de manera directa en el sector central de la cuenca. La falla infantas genera un pliegue de arrastre de tipo antiformal que afecta principalmente las unidades la Luna, mientras la Salina muestra de formación continua de tipo plegamiento en las rocas por la impresión del esfuerzo generado por estas.

En el corte E-E' (Figura 34), muestra que del río Magdalena hacia el oriente se ubican las fallas Cambras - Dos hermanos, San Fernando, Simitarra, la Salina y Landazuri, afectando la cuenca ya que se muestra como un cinturón altamente plegado propagándose desde el basamento hasta cortar las rocas de la cuenca.

De lo anterior se desprende que, en el área de estos cortes, la cuenca se encuentra afectada por fallas, plegamientos y poca uniformidad en la estratigrafía, originando de norte a sur un aumento de complejidad en la zona de interés, lo cual generaría riesgos para la aplicación de la técnica, cuya probabilidad de activación y vulnerabilidad de consecuencias dependería específicamente de la cercanía de las zonas a estimular a las fallas existentes y las condiciones de aplicación de la técnica.

Cabe resaltar que en el capítulo 1, artículo 12 de la resolución 90341 expedida por el Ministerio de Minas y Energía en el año 2014 establece que no se permite realizar estimulación hidráulica a menos de 1 km de una falla activa identificada potencialmente peligrosa.

## **7.2 Vulnerabilidad asociada a la sismicidad.**

En cuanto a sismicidad este ha sido un tema muy polémico a nivel mundial debido que en ciertas partes del mundo principalmente Estados Unidos se han asociado sismos y terremotos a la aplicación de la técnica conocida como fracking. Aunque científicamente no se ha comprobado que tal vinculación sea verídica, se le atribuyen debido a que a partir de la fecha en que se

implementa la técnica se han registrado más sismos. A manera de ejemplo, en el estado de Texas en la ciudad de Fort Worth en el año 2018, se desencadenó una ola de terremotos en zonas que llevaban 300 millones de años inactivas, como también se han reportado en Argentina, en los pozos de vaca muerta.

Teniendo en cuenta lo anterior y ya que en Colombia no se ha implementado la técnica y no existe la experiencia documentada; se recopiló la información de sismicidad con profundidades menores a los 35 km, ya que la cuenca es una zona activa sismológicamente. Teniendo en cuenta que las formaciones a estimular, se ubican por debajo de los 6km, se considera crítico para esta investigación, los sismos que se encuentran entre 0 y 6 km de profundidad. Lo cual se puede evidenciar en la bibliografía, como en el caso de Azle en Texas, a finales de 2013, donde fueron reportados 27 sismos por el Centro Nacional de Información sobre Terremotos (NEIC) del Servicio Geológico de los Estados Unidos, a profundidades de entre 1,5 y 8 km en dos fallas conjugadas de buzamiento abrupto compatibles en el rumbo general de la zona de falla de Newark East. Y un segundo caso en Youngstown, Ohio 2011 donde se sintieron sismos después de perforados pozos destinados a la inyección, estudio realizado por la División de Estudios Geológicos del departamento de Recursos Naturales de Ohio; reportando sismos de magnitud 2.7 en el rango de distancia de 1,9 a 6,5 km de profundidad. (Cabal y Fortunato, 2019).

Cabe destacar que según Richter es de vital importancia entender que los valores asignados a cada nivel de sismicidad aumentan de manera exponencial, no lineal, lo que significa que un sismo de  $M_L = 4$  es 32 veces más intenso que un  $M_L = 3$ . Y un sismo de  $M_L = 5$  representa 1000 veces la energía liberada por un  $M_L = 3$ , es decir, que un sismo de  $M_L = 6$  representa 32000 veces la energía de un  $M_L = 3$ . (Cabal y Fortunato, 2019).

Por otra parte, los sismos más relevantes para el estudio son aquellos de profundidad de 0 a 6 km (ya que en esa franja se ubican las estructuras a estimular) y mayores de 4  $M_L$ , considerando que en la escala de Richter una magnitud de 4 en adelante son los sismos perceptibles por el hombre, aunque difícilmente generen daños a las infraestructuras y pongan en riesgo físico a la sociedad.

De acuerdo con el análisis de los registros sísmicos en la zona de estudio indica que el 90.45 % son de baja intensidad y alta frecuencia, y que los sismos mayores de 4  $M_L$  (ver figura 41) representan 1,25 % ubicándose en mayor proporción en el sectores sur, mientras que al norte presentan baja frecuencia, y no comprometen los bloques adjudicados de estudio en la cuenca del VMM (ver figura 40) lo cual permite considerar, como una zona de baja vulnerabilidad sísmica.

De acuerdo con los análisis de estratigrafía, dinámica tectónica y sismicidad de este estudio, es posible afirmar que la zona con características más favorables para la implementación de la técnica del fracking, sería la parte centro-norte de la zona de estudio, pues la sismicidad en esta zona presenta baja frecuencia e intensidad de eventos sísmicos y desde el punto de vista de dinámica tectónica tiene poca presencia de fallas de extensión regional. Por otra parte, las zonas Sur y Centro Oriental del área de estudio, son las zonas con mayor actividad sísmica y con una dinámica tectónica más compleja, por lo cual se deben hacer evaluaciones más detalladas y específicas al considerar su intervención para la aplicación de la técnica conocida como fracking

## 8. Conclusiones

Se considera importante destacar, que este estudio llevó a cabo un análisis regional del área de estudio, con base en la información pública de las entidades del estado, por lo tanto, las conclusiones aquí expuestas no son aplicables a un proyecto específico. Este último requeriría un análisis más preciso de los riesgos del fracturamiento, con mayor énfasis y detalle de las áreas puntuales a intervenir, riesgos tectónicos y sísmicos locales, presencia de micro fallas y su conectividad con las fallas regionales, entre otros aspectos.

- El Valle Medio del Magdalena es una de las cuencas más exploradas de Colombia, pero también una de las áreas que presenta mayor complejidad de fallas, pliegues, cabalgamientos y retrocabalgamientos; En el sector oriental de la zona de estudio se observan sinclinales y anticlinales y en este estudio se lograron identificar las fallas más significativas de la zona excluyendo micro fallas que eventualmente podrían estar conectadas con las principales. Lo anterior pone en evidencia que, aunque es una zona aparentemente muy estudiada, aún quedan muchas preguntas por resolver en cuanto a su estratigrafía, dinámica tectónica y en general su favorabilidad para la aplicación del fracturamiento hidráulico.

- De acuerdo con el análisis de los cortes realizados para este estudio, desde el punto de vista estratigráfico y tectónico, la zona más favorable para la aplicación del fracking es la zona Central y Norte, como se evidenció en los cortes A-A' y B-B', que reflejan continuidad de las formaciones presentes y una escasa presencia de fallas de extensión regional. A su vez, la zona menos favorable o con mayor dificultad y alta vulnerabilidad para la aplicación de la técnica, es la zona Sur y la

zona Oriental de la cuenca reflejadas en los cortes C-C', D-D' Y E-E'. Estas zonas están afectadas por fallas, plegamientos y poca uniformidad en la estratigrafía, originando de norte a sur un aumento de complejidad en la zona de interés. Lo anterior generaría riesgos para la aplicación de la técnica, con probabilidad de activación de fallas, aunque la gravedad de las posibles consecuencias dependería específicamente de la cercanía de las zonas a estimular a las fallas existentes y las condiciones de aplicación de la técnica.

- Del análisis de la sismología reportada para el área de estudio, se desprende que la zona central y norte, es una zona de baja actividad sísmica en cuanto a intensidad y frecuencia de eventos sísmicos, siendo posible afirmar que es una zona con características favorables y baja vulnerabilidad para la implementación de la técnica del fracking. Los eventos sísmicos de mayor intensidad (especialmente los sismos de 5 MI) se registraron en el sector oriental, asociados a la cordillera y a las fallas que delimitan la cuenca, lo cual permite inferir que en estas zonas la probabilidad de activación o desencadenamiento de sismos es más alta, que en las zonas central y norte.

## 9. Recomendaciones

- Para disminuir la incertidumbre asociada a la técnica de fracking, es necesario la adquisición de información y estudios más detallados de geología, estratigrafía y dinámica tectónica detallada en las áreas puntuales a intervenir, con el fin de evaluar la probabilidad de que las zonas a estimular puedan conectarse con microfallas y fallas regionales, que puedan generar sismicidad o que puedan

permitir la migración de fluidos de fracturamiento o fluidos de producción, hacia formaciones suprayacentes o la superficie, con los consecuentes efectos ambientales y sociales.

- Se recomienda que los Pilotos Integrales se realicen en las zonas de menor complejidad tectónica y sísmica, como el sector centro y centro norte de la zona de estudio, o, dicho de otra manera, que se eviten las zonas de más complejidad y con mayor presencia de fallas y de actividad sísmica, como el sector Sur y Oriental de la cuenca.

**Referencias bibliográficas**

- Agencia Nacional de Hidrocarburo. (s.f.). Indicadores y estrategias de crecimiento del sector hidrocarburos Colombiano. Recuperado de <https://www.anh.gov.co/Sala-de-Prensa/Documents/ALAME%20-%20Colombia%20Offshore.pdf>
- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (12/12). Integración geológica de la digitalización y análisis de núcleos. Recuperado de <http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/6.%20Informe%20Final%20VMM.pdf>
- Arias, A., y Vargas, R. (1978). Geología de las planchas 86 Abrego y 97 Cáchira, departamento Norte de Santander (1759). Recuperado de <http://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010024259/documento/pdf/0101242591101000.pdf>
- Aydin, A. (2000). Fractures, faults, and hydrocarbon entrapment, migration and flow. *Marine and Petroleum Geology*, 17, 797-814.
- Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C. A. y Martínez, J. (2007). Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and petroleum geology, a new proposal. ANH.
- Beltrán Gil, Eliana Carolina. Estudio sedimentológico comparativo entre las formaciones Mugrosa y Colorado; y modelamiento de los niveles de las arenas A2 de la formación Colorado en el campo Casabe en la cuenca del Valle Medio del Magdalena, Colombia. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2012. p. 22-23.
- Bertinat, P., D'Elia, E., Observatorio petrolero sur., Ochandio, R., Svampa, M y Viale, E. (2 de Septiembre de 2014). 20 Mitos y realidades del fracking. Buenos Aires: El colectivo.

- Borbón, C. (2015). . Identificación de los posibles impactos ambientales por el fracturamiento hidráulico (fracking) de yacimientos no convencionales (tesis de posgrados). Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- Casadiegos, E. (2008). Estudio de la continuidad lateral y vertical de las arenas de la formación Mugrosa en el campo Casabe y Llanito, Valle Medio del Magdalena (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Santander, Colombia.
- Castillo, L., y Gómez, E. (2003). Actividad de la falla la salina a partir de instrumentación sísmológica. Geofísica Colombiana, 5-12.
- Clavijo, J. (1995). Mapa geológico de Colombia, plancha 75 – Aguachica. Recuperado de <http://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010018548/documento/pdf/0101185481101000.pdf>
- ConocoPhillips. (s.f). Estudio de impacto ambiental para la perforación exploratoria de hidrocarburos - área de perforación exploratoria (ape) plata. Recuperado de <http://www.anla.gov.co/>
- El fracking desencadena una ola de terremotos en zonas de Texas que llevaban millones de años inactivas. (10 de enero de 2018). El diario. Recuperado de [https://www.eldiario.es/theguardian/fracking-desencadena-terremotos-Texas-inactivas\\_0\\_727577917.html](https://www.eldiario.es/theguardian/fracking-desencadena-terremotos-Texas-inactivas_0_727577917.html)
- EPA; (2016). Hidraulic Fracturning for oil and Gas: Impacts from the hidraulic Fracturing Water Cycle on Drinking Water Resorces in the United States. Office of Research and Development Washington, DC.
- Fossen, H. (2010). Structural Geology, 1 Ed. Cambridge University Press.
- Fossen, H. (2016). Structural Geology, 2 Ed. Cambridge University Press.
- Frohlich, C., DeShon, H., Stump, B. et al. 2016. A Historical Review of Induced Earthquakes

- Galvís, M. (2016). Análisis estructural del segmento sur de la falla de Bucaramanga en el municipio de Onzaga, Santander. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Gómez, L., Lancheros, J., López, C., Patiño, A., Beltrán, A., Renzoni, G.,... Guerra, A. (2008). Cartografía geológica y muestreo geoquímico escala 1:100.000 de la plancha 150 – Cimitarra (398). Recuperado de <http://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008010024353/documento/pdf/2105243531101000.pdf>
- Gómez, L., Lancheros, J., Manrique, M., Patiño, A., Beltrán, A., Renzoni, G.,... Guerra, A. (2009). Cartografía geológica y muestreo geoquímico, escala 1:100.000 de la plancha 134 Puerto Parra (398). Recuperado de <http://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008010024351/documento/pdf/2105243511101000.pdf>
- Gómez, L., Patiño, A., Renzoni, G., Beltrán, A., Quintero, C., y Manrique, M. (2008). Cartografía geológica y muestreo geoquímico escala 1:100.000 de la plancha 119 – Barrancabermeja (398). Recuperado de <http://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008010024350/documento/pdf/2105243501101000.pdf>
- Goodman, P., Galatioto, F., Thorpe, N., Namdeo, A., Davies, R. y Bird, R. (2012). Investigating the traffic-related environmental impacts of hydraulic- fracturing (fracking) operations. Environment International.
- Hornbach, M. J., DeShon, H. R., Ellsworth, W. L. et al. 2015. Causal Factors for Seismicity Near Azle, Texas. Nature Communications in Texas. Seismological
- Ingeominas. (1994). Evaluación del agua subterránea en el departamento del Cesar. Recuperado de <https://www.corpocesar.gov.co/files/INFORME%20GEOLOGICO.pdf>

- Jacobson, SR. (1991). Petroleum source rocks and organic facies. *Merrill RK (ed): Source and migration processes and evaluation techniques*. Tulsa: AAPG (1991), 3-11.
- Jiménez, G., López, O., Jaimes, L., y Mier, U. R. (2016, abril-junio). Variaciones en el estudio estructural relacionado con anisotropías de basamento en el Valle Medio del Magdalena. *Revista de la academia colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales*. Recuperado de <https://accefyn.org.co/>
- Kim, W.-Y. (2013), Induced seismicity associated with fluid injection into a deep well in Youngstown, Ohio, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118, 3506–3518
- Mantilla, L., Bernal, L., Clavijo, J., Osorio, J., Pinto, J., Castro, E.,... Castellano, O. (2006). Cartografía geológica de 9.600 km<sup>2</sup> de la serranía de San Lucas: planchas 55 (el banco), 64 (Barranco de loba), 85 (Simití) y 96 (Bocas del rosario): aporte al conocimiento de su evolución geológica (004). Recuperado de <http://recordcenter.sgc.gov.co/B13/23008010024370/documento/pdf/2105243701101000.pdf>
- McCarthy, K., Rojas, K., Niemann, M., Palmowski, D., Peters, K., y Stankiewicz Artur. (2011). La geoquímica básica del petróleo para la evaluación de las rocas generadoras. *Oilfield Review*, 23(2), 36-47. Recuperado de <http://usuarios.geofisica.unam.mx/gvazquez/geoquimpetrolFI/zonadesplegar/Lecturas/ultimas/Geoquimica%20basica%20para%20la%20evalua%20de%20RG.pdf>
- Mesa, L., Talero, C., Pérez, O., Porras, J., Gavidia, O., Pacheco, S.,... Amaya, E. (2011). Cartografía geológica de la plancha 133 – Puerto Berrio, escala 1:100.000 (041). Recuperado de <http://recordcenter.sgc.gov.co/B13/23008010024508/documento/pdf/2105245081101000.pdf>

Ministerio de Minas y Energía. (27/03/2014). Resolución 90341 Recuperado de <https://www.opsur.org.ar/blog/wp-content/uploads/2015/06/2014-20-Mitos-Final.pdf>

Montaño, P.C., Nova, G., Bayona, G., Mahecha, H., Ayala, C., Jaramillo, C., y De La Parra, F. 2016. Análisis de secuencias y procedencia en sucesiones sedimentarias de grano fino: un ejemplo de la Formación Umir y base de la Formación Lisama, en el sector de Simacota (Santander, Colombia). Boletín de Geología, 38 (1), 51-72.

Niño, Diana. (2015). Identificación del impacto ambiental generado por el uso del suelo para el desarrollo de yacimientos no convencionales (shale plays) (monografía de posgrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Núñez, M. (2016). Estimación de las variables de riesgo y manejo ambiental involucradas en la planeación y ejecución de proyectos de fracturamiento hidráulico en yacimientos no convencionales (tesis pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Petroseis LTDA. (2011). Informe final de interpretación sísmica componente horizontal y vertical. Recuperado de [http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/INTERPRETACION\\_2011\\_CORDOBA\\_ANTIOQUIA\\_REGIONAL\\_2006.pdf](http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/INTERPRETACION_2011_CORDOBA_ANTIOQUIA_REGIONAL_2006.pdf)

Piamonte, D., y Mayorga, A. (2015). Caracterización de Yacimientos tipo shale gas y oil shale en la formación la Luna en el flanco oriental en la cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM), Santander, Colombia (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Santander, Bucaramanga.

Prieto, M., y Quiñonez, O. (2017). Análisis de experiencias de contaminación con fluidos de fracturamiento en operaciones de yacimientos no convencionales en estados unidos (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

- Rossello, E., (2015): Fracturación: causas mecánicas y aplicaciones geomecánicas. XV congreso colombiano de geología.
- Sarmiento, G., Puentes, E., Y Sierra, C. (2015). Estratigrafía y petrofacies de la Formación La Luna en el Sinclinal del nuevo mundo, Valle Medio del Magdalena. Lewis Energy Group, (12), 23-40.
- Sarmiento, G., y Moreno, G. (2002). Estratigrafía Cuantitativa de las Formaciones Tablazo y Simití en las localidades de Sáchica (Boyacá) y Barichara - San Gil (Santander), Colombia. *Geología Colombiana*, 27, 51-76. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/31587/31609>
- Sarmiento, L. F. (2011). ANH: Petroleum Geology of Colombia. University EAFIT: Medellín. Recuperado de <http://www.anh.gov.co/>
- Scotchman, I. C. (2016). Shale gas and fracking: exploration for unconventional hydrocarbons. *Proceedings of the Geologist's Association*.
- Suárez Rueda, Carlos Orlando. Arenas basales del Cretáceo inferior, potencial roca hidrocarburífera en la región central de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, Colombia. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia, 2016. p. 3-13.
- Tchegliakova, N. (1995). Los Foraminiferos de la Formación Umir (Sección Quebrada La Julia): Registro del Cretacico Superior cuspidal (Maastrichtiano) en el Valle Medio del Magdalena, Colombia. *Geología Colombiana*, 19, 109-130. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/31347/31354>
- Torres, L., Yadav, O. P., y Khan, E. (2016). A review on risk assessment techniques for hydraulic fracturing water and produced water management implemented in onshore unconventional oil and gas production. *Science of the Total Environment*, 539, 478-493.

U.S. Energy Information Administration. (2015). Technically recoverable shale oil and shale gas resources: Northern South America. U.S. Department of Energy. Recuperado de [www.eia.gov](http://www.eia.gov).

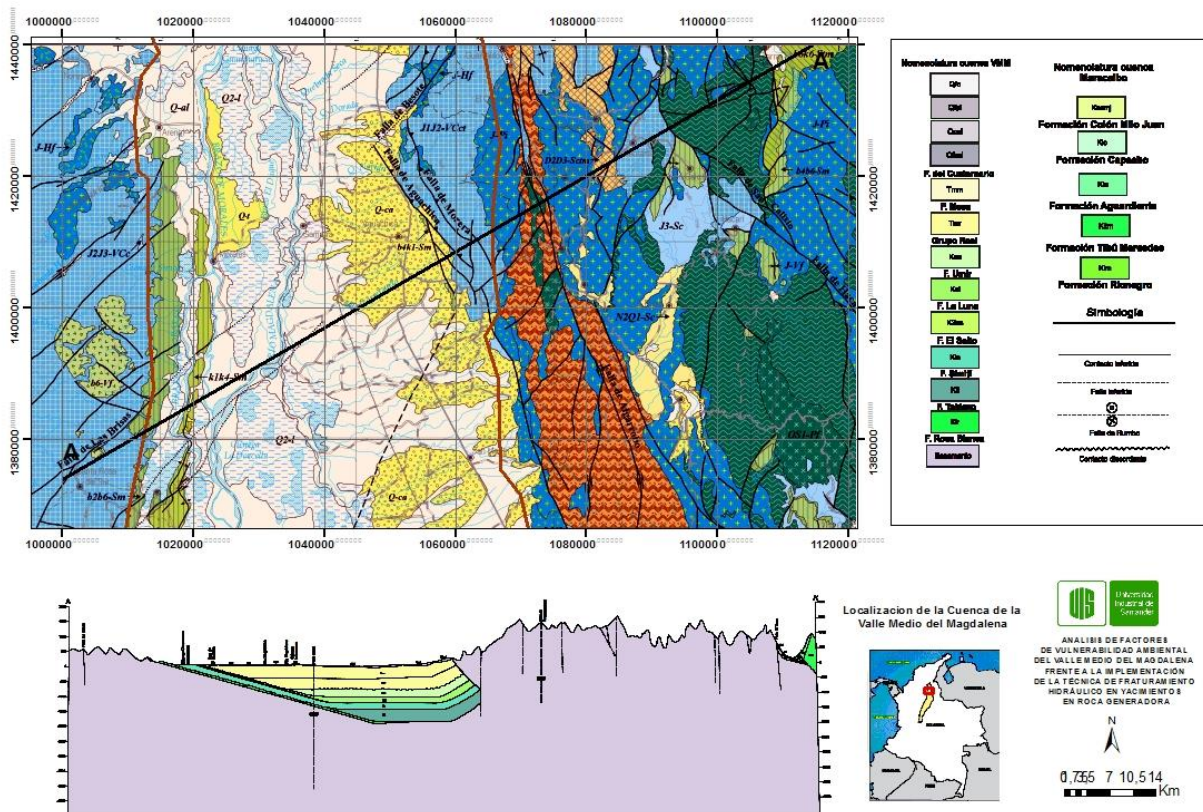
Unión Temporal prospección UPME (Unidad de Planeación Minero Energética). (2018). Evaluación de las cuencas y estructuración de escenarios de oferta de hidrocarburos convencionales y no convencionales. Recuperado de <file:///C:/Users/Felipe%20Mejia/Downloads/v.4.pdf>

Velandia, F. (2017). Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander - énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga. (Tesis doctoral). Recuperado de [http://bdigital.unal.edu.co/63487/1/TesisDoct\\_FranciscoVelandia.pdf](http://bdigital.unal.edu.co/63487/1/TesisDoct_FranciscoVelandia.pdf)

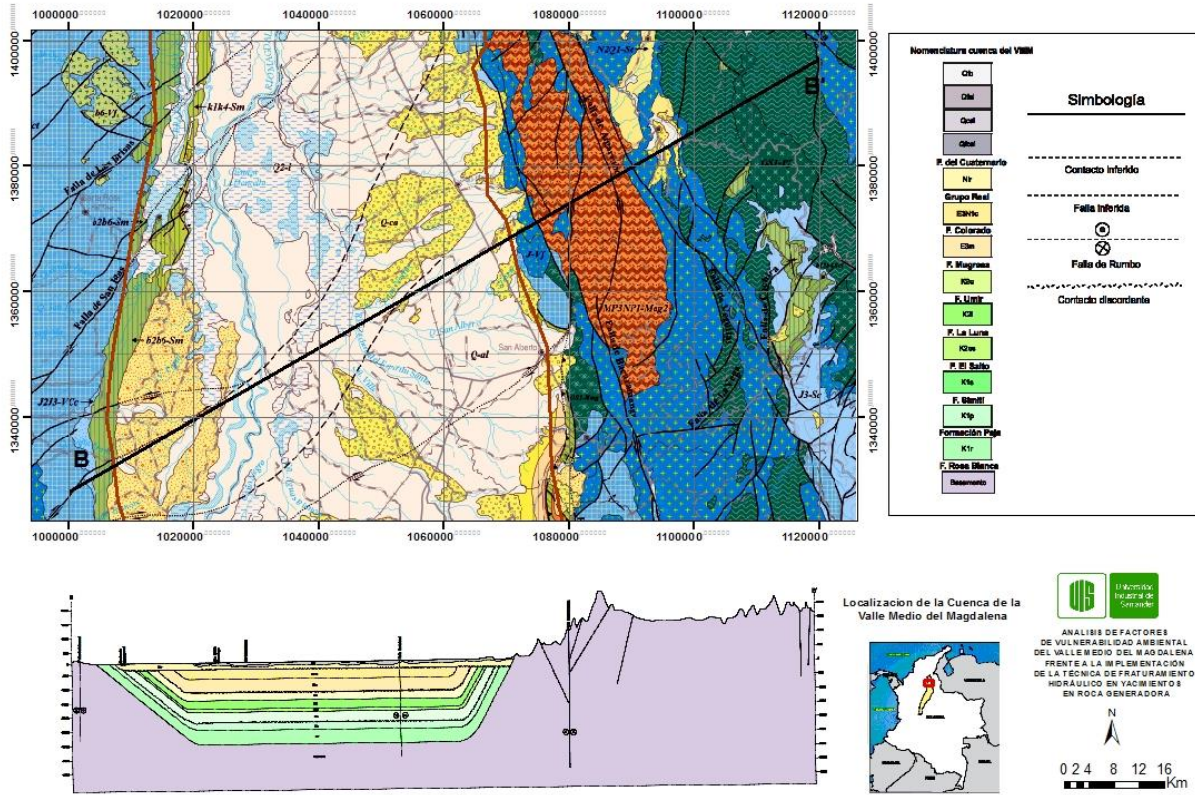
Youngstown, Ohio, J. Geophys. Res. Solid Earth, 118, 3506–3518

Apéndices

Apéndice A. Corte A-A' plasmado en la zona de estudio con la respectiva leyenda y simbología.



Apéndice B. Corte B-B' plasmado en la zona de estudio con la respectiva leyenda y simbología.







Apéndice E. Corte E-E' plasmado en la zona de estudio con la respectiva leyenda y simbología.

