

**AVANCES EN EL ENTENDIMIENTO DE LA CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL
DEL COMPLEJO PAUTO, USANDO LA RELACIÓN
DESPLAZAMIENTO/LONGITUD EN FALLAS INVERSAS, CAMPOS PAUTO Y
FLOREÑA, LICENCIA PIEDEMONTE, COLOMBIA.**

JORGE LUIS CASTILLO ARCHILA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2018

**AVANCES EN EL ENTENDIMIENTO DE LA CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL
DEL COMPLEJO PAUTO, USANDO LA RELACIÓN
DESPLAZAMIENTO/LONGITUD EN FALLAS INVERSAS, CAMPOS PAUTO Y
FLOREÑA, LICENCIA PIEDEMONTE, COLOMBIA.**

JORGE LUIS CASTILLO ARCHILA

Proyecto de grado presentado como requisito para
optar al título de Geólogo

Director:

ROBERTO LINARES PRIETO

Geólogo M. Sc. en Geología Estructural

Codirector

LEONARDO VILLAMIZAR CÁCERES

Geólogo

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

A Dios todopoderoso, por darme la vida y salud, ser mi fiel amigo, llenarme de calma, sabiduría y fuerza en situaciones adversas y al momento de afrontar nuevos retos, regalarme la maravillosa familia que me ha dado y por todas las bendiciones que ha dispuesto en mi camino.

A mis padres, Luz Elena Archila y Jorge Eliecer Castillo, por su amor, comprensión y apoyo incondicional, gracias a sus esfuerzos y entrega he podido alcanzar las diferentes metas y convertirme en la persona que soy, son el motor de mi vida y es a ellos a quien especialmente dedico este logro.

A mis hermanos, Silvia Fernanda, Santiago y Mariana, por ser fuente de mi inspiración, por su apoyo, cariño y carisma, son ustedes mi mayor motivación para querer ser cada día mejor.

AGRADECIMIENTOS

Es mi deseo dar gracias a EQUION ENERGÍA LIMITED, por darme la oportunidad de realizar este proyecto de grado y por este año de gran aprendizaje como estudiante en práctica.

A la Gerencia de Subsuelo, liderada por Luis Soto y al equipo de Manejo del Yacimiento, liderado por Jaime Gómez, por permitirme hacer uso de los datos de los campos para el desarrollo del proyecto y por las experiencias vividas durante este año.

Al equipo de Geólogos, compuesto por Roberto Linares, Fernando Osorio, Laura Rincón y Hernando Pinto, por compartir amablemente su conocimiento en mi tiempo como practicante y su ayuda durante la realización de este proyecto.

En especial, quiero agradecer a Roberto Linares Prieto, director de este proyecto y supervisor durante mi práctica, por su tiempo, paciencia y carisma, por sus enseñanzas y por el soporte técnico brindado durante este gran año.

A la Universidad Industrial de Santander, por la formación recibida durante mi carrera, al profesor y codirector de este proyecto, Leonardo Villamizar, por su apoyo y soporte durante el desarrollo del proyecto.

A mi familia, que siempre estuvo apoyándome y animándome a perseguir mis metas y a cada una de las personas que de una u otra forma han hecho parte de mi formación y me han apoyado durante mi vida, gracias.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	17
1. OBJETIVOS.....	19
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	19
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. LOCALIZACIÓN	20
3. ANTECEDENTES.....	21
4. METODOLOGÍA.....	24
4.1. RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	24
4.2. GENERACIÓN DEL MODELO TEÓRICO	24
4.3. ELABORACIÓN DEL DIAGRAMA DE SEPARACIÓN ESTRATIGRÁFICA... 25	
4.4. INTERPRETACIÓN SÍSMICA.....	25
4.5. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO 3D Y GENERACIÓN DE MAPAS ESTRUCTURALES	25
4.6. VALIDACIÓN DEL MODELO REALIZADO	26
4.7. REDACCIÓN DEL INFORME FINAL.....	26
5. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....	28
5.1. EVOLUCIÓN TECTÓNICA	28
5.2. ESTRATIGRAFÍA REGIONAL.....	30
5.2.1. Estratigrafía mecánica.....	38
6. MARCO TEÓRICO	39
6.1. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	39
6.2. DEFORMACIÓN.....	39
6.3. CINTURONES DE CABALGAMIENTO	40
6.3.1. Mecánica de los cinturones de cabalgamiento.....	40
6.3.2. Reglas de las fallas de cabalgamiento.....	41
6.3.3. Terminología de pliegues en cinturones de cabalgamiento.....	41
6.4. SISTEMAS DE CABALGAMIENTO	43

6.5. PLIEGUES RELACIONADOS A FALLAS	44
6.5.1. Fault-bend fold.....	45
6.5.2. Fault propagation fold.....	45
6.5.3. Detachment fold.....	46
6.6. BALANCEO DE SECCIONES	47
6.6.1. Restauración.....	48
6.6.2. Normas geométricas para la restauración.....	48
6.7. REGLA DEL ARCO Y FLECHA	49
6.8. DIAGRAMA DE SEPARACIÓN ESTRATIGRÁFICA.....	51
7. MODELO TEÓRICO	53
8. DIAGRAMA DE SEPARACIÓN ESTRATIGRÁFICA.....	63
9. MODELO ESTRUCTURAL DE LAS ESCAMAS A, B Y C.....	67
9.1. ESCAMA A.....	72
9.2. ESCAMA B.....	76
9.3. ESCAMA C	79
10. CONCLUSIONES	84
11. RECOMENDACIONES	86
12. BIBLIOGRAFÍA.....	87

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Esquema de la localización de la zona de trabajo. Mapa político de Colombia (izq.), mapa departamental y mapa geológico local (Der. Sup. e Inf.)..	20
Figura 2. Representación gráfica de la metodología empleada en el desarrollo del proyecto.....	27
Figura 3. Columna estratigráfica representativa de la cuenca de los Llanos Orientales y la Cordillera Oriental con la terminología temporal de las unidades. .	34
Figura 4. Columna estratigráfica generalizada para las unidades presentes en la Licencia Piedemonte, enmarcadas las unidades de interés económico.	37
Figura 5. Esquema general de la geometría y los elementos de un pliegue relacionado a una falla de cabalgamiento.....	42
Figura 6. Ilustración de los principales elementos que componen los sistemas de cabalgamientos.....	43
Figura 7. Esquema generalizado de un Fault-Bend Fold.....	45
Figura 8. Ilustración general de un Fault Propagation Fold.....	46
Figura 9. Esquema representativo de un Detachment Fold.....	46

Figura 10. Esquema del McConell Thrust en vista de mapa en donde se muestran los elementos en el uso de la Regla del Arco y Flecha.	50
Figura 11. Esquema que representa la distribución del desplazamiento a lo largo de una falla inversa.....	51
Figura 12. Ejemplo de un Diagrama de Separación Estratigráfica.....	52
Figura 13. Sección estructural representativa del pozo PDMPb.	54
Figura 14. Representación de una sección del Modelo Teórico con los parámetros mencionados.	55
Figura 15. Vista de mapa de las secciones realizadas en la construcción del modelo teórico.	55
Figura 16. Representación gráfica de los siete (7) estados, aplicados a cada escama.	57
Figura 17. Evolución de las escamas A, B y C en la sección E	58
Figura 18. Representación de los horizontes en las diferentes secciones.....	60
Figura 19. Ilustración de las superficies generadas a partir de los horizontes.....	60
Figura 20. Contornos estructurales de la escama A en vista de mapa.	61
Figura 21. Contornos estructurales de la escama A en vista 3D.	61

Figura 22. Volumétricos de la Formación Mirador en las escamas A, B, C y el Foreland.....	62
Figura 23. Zonas de traslape de las estructuras.	62
Figura 24. Columna estratigráfica generalizada de las formaciones presentes en el Anticlinal de Monterralo y Sinclinal de Nunchía.	63
Figura 25. Diagrama de Separación Estratigráfica para el análisis de la Falla de Monterralo.....	64
Figura 26. Esquema por medio del cual se realizó la estimación del desplazamiento de la Falla de Monterralo en la zona de mayor separación estratigráfica.	65
Figura 27. Sección sísmica de Buzamiento (Inline) del cubo sísmico de la Licencia Piedemonte.....	67
Figura 28. Configuración general de las estructuras presentes en la Licencia Piedemonte, enmarcadas las escamas A, B y C del Complejo Pauto.....	68
Figura 29. Esquema teórico de la configuración estructural de las escamas en vista de mapa, antigua interpretación.	69
Figura 30. Esquema teórico de la configuración estructural de las escamas en vista de mapa, nueva interpretación.	70
Figura 31. Fotografía de fracturas en afloramiento.	71

Figura 32. Representación de una sección sísmica de Rumbo interpretada. Crossline 500(PSDM).	72
Figura 33. Ubicación de secciones sísmicas de rumbo conforme los topes de la Formación Mirador (círculos verdes) en vista de mapa. De fondo <i>Depth Slice</i> del cubo sísmico.	73
Figura 34. Secciones estructurales realizadas para generar el mapa estructural de la escama A.	73
Figura 35. Mapa estructural del tope de la Formación Mirador en la escama A del Complejo Pauto, representado en el área de la Licencia Piedemonte	74
Figura 36. Sección sísmica de Rumbo A-A', Ilustrada en el mapa de la Figura 35. Crossline 476 (PRE STACKED DEPTH MIGRATION, PSDM).	75
Figura 37. Secciones estructurales realizadas para la generación del mapa estructural de la escama B. De fondo <i>Depth Slice</i> del cubo sísmico.	76
Figura 38. Mapa estructural del tope de la Formación Mirador en la escama B del Complejo Pauto, representado en el área de la Licencia Piedemonte.	77
Figura 39. Sección sísmica de Rumbo A-A', Ilustrada en el mapa de la Figura 38. Crossline 500 (PSDM).	78
Figura 40. Secciones estructurales realizadas para la generación del mapa estructural de la escama C. De fondo <i>Depth Slice</i> del cubo sísmico.	79

Figura 41. Mapa estructural del tope de la Formación Mirador en la escama C del Complejo Pauto, representado en el área de la Licencia Piedemonte.	80
Figura 42. Sección sísmica de Rumbo A-A', Ilustrada en el mapa de la Figura 41. Crossline 520 (PSDM).	81
Figura 43. Sección sísmica general de buzamiento (Inline) de las escamas A, B y C del Complejo Pauto. InLine 70 (PSDM).....	82
Figura 44. Vista 3D de los mapas estructurales del tope de la Formación Mirador. Escamas A, B y C del Complejo Pauto.....	83

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Distribución de los estados en las secciones. Los estados se explican en la Figura 16.....	57
--	----

RESUMEN

TÍTULO: AVANCES EN EL ENTENDIMIENTO DE LA CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL DEL COMPLEJO PAUTO, USANDO LA RELACIÓN DESPLAZAMIENTO/LONGITUD EN FALLAS INVERSAS, CAMPOS PAUTO Y FLOREÑA, LICENCIA PIEDEMONTE, COLOMBIA*

AUTOR: Jorge Luis Castillo Archila**

PALABRAS CLAVE: Regla del arco y flecha, Diagrama de separación estratigráfica, Dúplex, Complejo Pauto, Licencia Piedemonte.

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo de investigación fue desarrollado en área de la Licencia Piedemonte, en la parte central del Piedemonte Llanero Colombiano, esta área se caracteriza por presentar alta complejidad estructural, que sumada a factores como la topografía del terreno y zonas ambientalmente protegidas (en las cuales no es permitido realizar adquisición sísmica), no permite obtener buena calidad en la información sísmica. El objetivo de este proyecto es mejorar el entendimiento de la geometría y tamaño de las escamas de la cuña tectónica del Complejo Pauto, mediante la generación de un modelo estructural producto de la integración de un modelo teórico, interpretación de sísmica 3D y el modelo estructural oficial del equipo subsuelo de Equion Energía, operador de la Licencia Piedemonte.

Inicialmente se realizó un Modelo Teórico, el cual permitió identificar zonas de conectividad vertical entre las escamas del Complejo Pauto, este modelo tiene como fundamento teórico la distribución del desplazamiento a lo largo de una falla inversa propuesta en la Regla del Arco y Flecha de Elliott (1976). Posteriormente se elaboró un Diagrama de Separación Estratigráfica, el cual permitió representar gráficamente y estimar cuantitativamente el desplazamiento máximo de la Falla de Monterralo; con este diagrama se determinó que la relación desplazamiento/longitud de la falla de Monterralo (0.09) corresponde a la estimada por la Regla del Arco y Flecha (0.07 – 0.12). En la elaboración del modelo estructural de las escamas A, B y C, de la cuña tectónica, se interpretaron 65 líneas sísmicas, en las cuales se identificó compartimentalización producto de la presencia de fallas de desgarre (*tear faults*). Posterior a la elaboración del modelo estructural se generaron mapas estructurales, estos permitieron evidenciar las zonas de relevo de fallas, las cuales generan altos y bajos estructurales en cada escama, algunos de estos han sido corroborados en pozos perforados.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Roberto Linares Prieto, Geólogo M.Sc. en Geología Estructural. Codirector: Leonardo Villamizar Cáceres, Geólogo.

ABSTRACT

TITLE: ADVANCES IN THE UNDERSTANDING OF STRUCTURAL CONFIGURATION OF THE PAUTO COMPLEX, USING DISPLACEMENT/LENGTH RATIO IN THRUST FAULTS, PAUTO AND FLOREÑA FIELDS, PIEDEMONTE LICENSE, COLOMBIA*

AUTHOR: Jorge Luis Castillo Archila**

KEYWORDS: Bow and Arrow Rule, Stratigraphic Separation Diagram, Duplex, Pauto Complex, Piedemonte License.

DESCRIPTION:

This thesis was developed in an area belonging to the Piedemonte License, in the central part of the Colombian Llanos Foothill, this area is structurally characterized by its complexity. Factors such as the topography and environmentally protected areas (where seismic acquisition is not allowed), affect the quality of the seismic data. The objective of this project is to improve the understanding of the geometry and size of the structural sheets of the Pauto Complex, by generating a structural model. The model integrates the results of the forward modeling, 3D seismic interpretation and the previous structural model done by the Subsurface team of Equion Energía.

A forward modeling was made initially, which allowed to identify areas of vertical connectivity between the structural sheets of Pauto Complex. This model has as a theoretical fundamentals the distribution of the displacement along a thrust fault presented in the Bow and Arrow Rule of Elliott (1976). Then, the Stratigraphic Separation Diagram was elaborated of the Monterral Fault, this diagram represents and quantitatively estimates the maximum displacement of the Monterral Fault. With this diagram it was determined the displacement/length ratio of the Monterral Fault (0.09) which corresponds to that presented by the Bow and Arrow Rule (0.07 – 0.12). For the elaboration of the structural model of the several thrust sheets, 65 seismic lines were interpreted. One of the main conclusion is that the compartmentalization was identified as a result of tear faults. After the construction of the structural model, structural maps were generated; they show that fault relay zones, generate highs and lows structural in each sheet, as is evidenced in the perforated wells.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Roberto Linares Prieto, Geólogo M.Sc. en Geología Estructural. Codirector: Leonardo Villamizar Cáceres, Geólogo.

INTRODUCCION

La zona de trabajo se encuentra localizada en el sector central del Piedemonte Llanero Colombiano, en una franja dentro de la Licencia Piedemonte, operada actualmente por la compañía Equion Energía Limited, en territorio perteneciente al Departamento de Casanare. El desarrollo de la industria de los Hidrocarburos allí, se ha visto enfrentado a grandes retos producto de la incertidumbre sobre la geometría y tamaño de las estructuras, esto debido a que es una zona estructuralmente compleja, que sumado a factores como la topografía del terreno y zonas ambientalmente protegidas (en las cuales no se logra hacer adquisición sísmica) no permiten obtener buena calidad en la información sísmica.

Este proyecto tiene como objetivo principal mejorar el entendimiento de la configuración estructural de las escamas A, B y C del Complejo Pauto utilizando la relación desplazamiento/longitud en fallas inversas, relación representada en la Regla del Arco y Flecha de Elliott (1976).

Este proyecto se llevó a cabo a través de la integración de un modelo teórico, interpretación de sísmica 3D y el modelo Actual del Equipo Subsuelo de Equion Energía. El Modelo teórico representa gráficamente la distribución del desplazamiento a lo largo de una falla y su implicación con la conectividad de los yacimientos del Complejo Pauto, adicionalmente, la construcción de un Diagrama de Separación Estratigráfica permitió realizar análisis cuantitativos de la relación presentada en la Regla del Arco y Flecha para la Falla de Monterralo. Respecto a la información sísmica, se realizó la interpretación del tope de la Formación Mirador (reservorio de las escamas del Complejo Pauto) en 65 líneas sísmicas en total, de las cuales 26 son líneas de rumbo (*Crossline*), estas permitieron identificar las zonas de compartimentalización de las escamas, resultado de fallas de desgarre (*tear faults*). Como resultado final se construyó el modelo de las escamas A, B y C del Complejo Pauto y sus respectivos mapas estructurales; estos últimos son la base

para el desarrollo de nuevos proyectos de producción y generación de modelos dinámicos.

Dada la confidencialidad de la información, no se consignan aquí datos puntuales de ingeniería de yacimientos ni ubicación exacta de los pozos, los nombres de los pozos y escamas descritos en el documento no corresponden a los nombres reales y únicamente se proporciona aquella información que Equion Energía Limited de manera oficial permitió hacerlo.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Mejorar el entendimiento de la configuración estructural del Complejo Pauto, usando la relación desplazamiento/longitud de fallas inversas, en la Licencia Piedemonte.

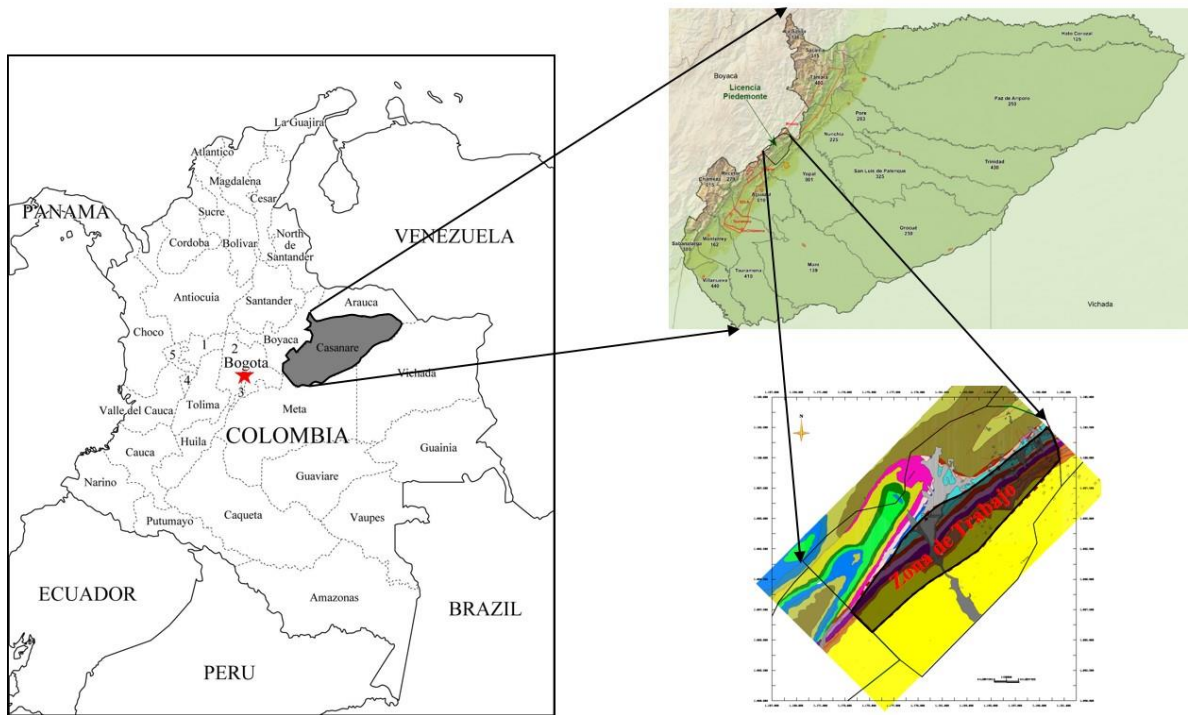
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar un modelo estructural de las escamas A, B y C del Complejo Pauto, producto de la integración de un Modelo Teórico, sísmica 3D y el Modelo Estructural actual del Equipo Subsuelo de Equion Energía.
- Proponer una explicación del proceso de uniformización de presiones en los diferentes yacimientos del Complejo Pauto en la Licencia Piedemonte.
- Explicar geológicamente los altos y bajos estructurales que presentan las escamas del Complejo Pauto a lo largo de la Licencia Piedemonte.

2. LOCALIZACIÓN

La zona de trabajo se localiza en el sector central del Piedemonte Llanero Colombiano, dentro de la Licencia Piedemonte operada actualmente por la compañía Equion Energía Limited, Bloque 2379 según el Mapa de Tierras de la ANH del 2017¹, en territorio perteneciente al Departamento de Casanare y a 200 Km al NE de la ciudad de Bogotá y 15 Km al W de Yopal.

Figura 1. Esquema de la localización de la zona de trabajo. Mapa político de Colombia (izq.), mapa departamental y geológico local (Der. Sup. e Inf.).



Fuente: Mapa político de Colombia (Izq) modificado de www.mapasinteractivos.didactalia.net, mapas departamental y geológico local (Der. Sup e Inf) modificados de reportes internos Equion Energía.

¹ AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Mapa de Tierras. Escala 1:2'000.000. 17 de febrero de 2017. Disponible en: http://www.anh.gov.co/Asignacion-de-areas/Documents/2m_tierras_170217.pdf.

3. ANTECEDENTES

El Piedemonte Llanero Colombiano (PLC) ha sido objeto de diversos trabajos de investigación a nivel regional, enfocados, tanto en estratigrafía y estructural, como en su evolución tectónica, esto debido principalmente al gran potencial de Hidrocarburos que posee este cinturón plegado. La historia evolutiva de dicho cinturón ha sido ampliamente estudiada por reconocidos autores como Fabre² y Colleta³, en el cual los autores describen que la Cordillera Oriental (y en efecto el PLC) es el resultado de la inversión tectónica de una cuenca de rift Mesozoica durante la Orogenia Andina, desde mediados del Mioceno hasta el Presente, otro de los trabajos más reconocidos es el de Cooper⁴, en el cual se describen las diferentes rocas sedimentadas depositadas a lo largo de las diferentes fases evolutivas de la cuenca. Campbell, *et al.* (1965), Dengo y Covey (1993), Fabre (1987) y Branquet, *et al.* (2002) son algunos de los muchos autores que han documentado la evolución tectónica que dio origen a la Cordillera Oriental y sus respectivos piedemontes.

Respecto a la configuración estructural regional, varios autores coinciden en afirmar que existen diferentes estilos estructurales a lo largo del Piedemonte Llanero Colombiano, aumentando su complejidad de Sur a Norte (Cooper, *et al.* 1995; Poveda, 2017; Rowan and Linares, 2000; Silva, 2010; Martínez, 2003; Linares, 1996) en donde los estilos estructurales de dicho cinturón plegado puede variar a lo

² FABRE, Antonio. Subsistencia, maduración de materia orgánica y generación de hidrocarburos: un modelo sencillo para representar la evolución de la Cordillera Oriental y los Llanos durante el Cretácico y Terciario. I Congreso Colombiano del Petróleo, 1984, p. 421-422.

³ COLLETA, B., *et al.* Tectonic style and crustal Structure of the Eastern cordillera (Colombia) from a balanced cross-section, in: Petroleum and Tectonics in Mobile Belts, 1990, p. 81-100.

⁴ COOPER, Mark, *et al.* Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia, in: The American Association of Petroleum Geologists, 1995, p. 1421-1440.

largo del *trend* desde estructuras frontales de cabalgamiento simple hasta una serie de imbricados de hasta cuatro escamas apiladas en una zona triangular⁵.

En la zona específica de trabajo (Licencia Piedemonte) se han elaborado diferentes modelos conforme a los datos obtenidos en el desarrollo de los campos, sin embargo, muy pocos de ellos se han publicado ya que se documentan principalmente en reportes internos de la compañía operadora, entre los documentos publicados se encuentra el presentado por Martínez⁶, en donde describe la presencia de una zona triangular con estructuras tipo dúplex conformadas por láminas cabalgantes estacadas una sobre otra y con esquemas que muestran presencia de fallas de *Backthrust*, también interpreta despegues en las formaciones Fómeque, Gachetá y Carbonera. Este autor también hace énfasis en la baja calidad de la sísmica debido principalmente a la complejidad estructural y recalca la importancia de realizar secciones balanceadas y restauradas.

Linares⁷, presentan la más reciente publicación con un modelo que valida la información existente hasta ese momento junto con la realización de secciones restauradas y balanceadas usando algoritmos en el software Move®, en dicho modelos los autores interpretan que las estructuras presentes en la Licencia Piedemonte corresponde a un *antiformal stack dúplex*, con presencia de hasta cuatro escamas, en donde el fallamiento es de *forethrust* en lugar de la zona triangular con *backthrust* propuesta por Martínez⁸.

Parte de la interpretación estructural de Linares⁹ es la identificación de un marco estructural de Cuña Tectónica (*Tectonic wedge*) con un *trend* SW-NE, en la cual el Sinclinal de Nunchía actuaría como techo de dicha cuña tectónica. Es en este

⁵ MARTINEZ, Jaime. Modelamiento estructural 3D y aplicaciones en la exploración y explotación de hidrocarburos en el cinturón de cabalgamiento del Piedemonte Llanero, cordillera Oriental, Colombia. Bogotá, 2003, p. 1.

⁶ *Ibíd.*, p. 2-10.

⁷ LINARES, Roberto, *et al.* New insights into the Piedemonte License triangle zone in the Llanos Foothills- Colombia. Bogotá, 2009, p. 1-2.

⁸ MARTINEZ, Jaime. Structural evolution of the Llanos foothills, Eastern cordillera, Colombia. Bogotá, 2006, p. 1-10.

⁹ LINARES, Op. cit., p. 3-4.

documento en el que se dan los primeros indicios de que las estructuras se encuentran altamente compartimentalizadas horizontalmente y conectadas verticalmente con la existencia de hasta cuatro escamas, en lo que hoy día se conoce como Complejo Pauto, por último, los autores sugieren que el modelo estructural debe ser actualizado conforme a la nueva información de perforación de pozos.

La nomenclatura del Complejo Pauto fue mencionada por primera vez en Palencia¹⁰, para referirse a una serie de escamas imbricadas y apiladas producto del levantamiento de la Cordillera Oriental, Gutiérrez¹¹ presenta los nombres actuales de las estructuras pertenecientes al Complejo Pauto.

La principal técnica a utilizar como fundamento teórico es la propuesta por Elliott¹², en la cual el autor denomina Regla del Arco y Flecha (*Bow and Arrow Rule*) a la relación existente entre el desplazamiento y la longitud total de una falla, la cual explica el proceso en el cual se lleva a cabo la disipación de la energía en sistemas fallados, estudios realizados principalmente en las *Canadian Rockies*. Con base en esta regla se han hecho diversos estudios, principalmente en el *McConnell Thrust System* en Alberta (Canadá), entre estos estudios se destacan Woodward, et al. (1989), Boyer and Elliott (1982), Watkins, et al. (2017) y Marshak and Wilkerson en Pluijm and Marshak (2004), en donde usan esta técnica para estimar la dirección y cantidad de desplazamiento a lo largo de las fallas. En Colombia no se tiene registro del uso de esta técnica en sistemas fallados.

¹⁰ PALENCIA, Clara; OCAMPO, Alonso y ALZATE, Juan Carlos. Building a petrophysical model for a low porosity and highly tectonized reservoir. Field case: Pauto Complex – Colombia. Bogotá, June 2012, p. 1-2.

¹¹ GUTIERREZ GRANADOS, Zorel. Efecto del espaciamiento y longitud de fracturas sobre la permeabilidad de un yacimiento naturalmente fracturado: caso Piedemonte Llanero Colombiano. Tesis de Magister en Ingeniería de Petróleos. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, 2016, 116p.

¹² ELLIOTT, David. The energy balance and deformation mechanisms of thrust sheets. En: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1976, vol. 283. p. 289-312.

4. METODOLOGÍA

Este proyecto se llevó a cabo en siete etapas, las dos primeras etapas tienen enfoque teórico, las tres posteriores tienen énfasis en aplicar lo desarrollado en las dos primeras etapas a las escamas A, B y C del Complejo Pauto, junto a la interpretación sísmica y construcción del modelo estructural; las dos últimas etapas consistieron principalmente en verificar si el modelo valida la información existente, principalmente de ingeniería de yacimientos y la elaboración del documento final.

4.1. RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA

Esta etapa consistió en recopilar la información disponible, como documentos existentes sobre la geología del Piedemonte Llanero Colombiano de manera regional y local (Licencia Piedemonte), fundamentos conceptuales y estudios en los cuales se ha utilizado la Regla del Arco y Flecha de Elliott y el Diagrama de Separación Estratigráfica.

4.2. GENERACIÓN DEL MODELO TEÓRICO

El Modelo Teórico se realizó en el software Move®, este modelo tiene como objetivo representar la comunicación vertical entre las escamas del Complejo Pauto, teniendo como fundamento la distribución del desplazamiento a lo largo de la longitud de fallas inversas denotada en la Regla del Arco y Flecha.

En la construcción de este modelo se realizaron nueve secciones, se tomaron parámetros fijos tales como la pendiente de las fallas, distancia entre las escamas, algoritmos de desplazamiento y únicamente se generaron variaciones en los desplazamientos de las fallas.

4.3. ELABORACIÓN DEL DIAGRAMA DE SEPARACIÓN ESTRATIGRÁFICA

En esta etapa se realizó el Diagrama de Separación Estratigráfica para la Falla de Monterralo, este se elaboró graficando la estimación del desplazamiento que debe tener la falla al exponer en superficie unidades litológicas de diferentes edades. Para lograr dicha estimación se tomaron espesores promedio de las formaciones (tomados de reportes internos), posteriormente se midió la longitud en mapa de dicha falla y se analizó si la longitud tiene la relación presentada en la Regla del Arco y Flecha de Elliott, esta etapa se llevó a cabo en el Software Canvas®.

4.4. INTERPRETACIÓN SÍSMICA

Inicialmente se exportaron los horizontes de las escamas pertenecientes al Complejo Pauto (A, B y C) del Modelo Estructural Actual del Equipo de Subsuelo, desde el software Move® al software DecisionSpace®; posteriormente se realizó la interpretación sísmica del tope de la Formación Mirador en 65 secciones del programa sísmico 3D (PSDM) de la Licencia Piedemonte.

4.5. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO 3D Y GENERACIÓN DE MAPAS ESTRUCTURALES

Con base en los horizontes de los topes de la Formación Mirador, interpretados en la sísmica, se generaron las superficies de dicha formación para las escamas A, B y C, atando las superficies generadas a los topes registrados en las perforaciones, los cuales se encontraban cargados en el software DecisionSpace®.

Con las superficies generadas se realizaron los mapas estructurales, los cuales permitieron realizar los análisis de la compartimentalización de los yacimientos.

4.6. VALIDACIÓN DEL MODELO REALIZADO

Durante la interpretación sísmica y la generación de las superficies se tuvo en cuenta la información de perforación, como topes formacionales, datos de rumbo y buzamiento de las capas y fallas.

Fue en esta etapa en la cual se comprobó que el modelo estructural, generado en este proyecto, valida la información dinámica de los campos obtenida hasta la fecha, en especial información de ingeniería de yacimientos como presiones y trazadores.

4.7. REDACCIÓN DEL INFORME FINAL

Esta última etapa consistió en plasmar en este documento lo realizado durante el desarrollo del proyecto y los resultados obtenidos. Las normas utilizadas en la redacción de este informe corresponden a las establecidas por la Universidad Industrial de Santander para la entrega de Proyectos de Grado.

5. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

5.1. EVOLUCIÓN TECTÓNICA

Los mayores eventos tectónicos que han influenciado el desarrollo de la cuenca de los Llanos Orientales y parte de la Cordillera Oriental se enmarcan regionalmente en el desarrollo del margen Occidental de Suramérica, de manera general se reconocen ocho eventos principales¹³.

- Durante el Triásico – Jurásico y Cretácico Temprano (235 – 130 Ma), el extremo noroccidental del continente Suramericano fue afectado por un evento expansivo (*rifting*), asociado a la separación de Norte y Sur América y al desarrollo de un margen activo en el occidente con el establecimiento de un arco magmático, representado por un extenso cordón de plutones calcoalcalinos localizados en el flanco oriental de la actual Cordillera Central¹⁴.
- Durante el Barremiano a Maastrichtiano y como producto del evento anteriormente mencionado, se crea una gran cuenca de extensión en la parte posterior del arco (*Back-arc*), en la cual se desarrollan depocentros controlados por fallas normales y se depositaron sedimentos volcanoclásticos y carbonáticos poco profundos. Para este tiempo, en el área de la actual Cordillera Oriental, se crean dos grandes depocentros: La Cuenca del Cocuy al este y la Cuenca Tablazo – Magdalena al oeste, separadas por el paleoalto del Macizo de Santander¹⁵.

¹³ COOPER, Op. cit., p.1421-1440.

¹⁴ ECOPETROL-ICP. Modelamiento Estructural en Zonas Complejas del Piedemonte Llanero. Piedecuesta. 2003.

¹⁵ ACEVEDO RUEDA, Rafael Antonio y HERNÁNDEZ MENDOZA, Yohn Forthis. Modelamiento y análisis estructural del anticlinal de Medina, Piedemonte de los Llanos Orientales. Tesis de pregrado

- Durante el Maastrichtiano – Paleoceno Temprano (74 – 65 Ma) ocurre la acreción final de la Cordillera Occidental, causando levantamiento y erosión de la Cordillera Central y el inicio de la megasecuencia de la cuenca de antepaís (*Foreland basin*) Pre-Andina¹⁶.
- En el Eoceno Medio (49 – 42 Ma) ocurrió un evento temprano de deformación compresional en el Valle del Magdalena y en la margen occidental de la Cordillera Oriental como resultado de un aumento en la velocidad de convergencia de las placas de Nazca y Suramérica¹⁷.
- Durante el Eoceno Tardío al Oligoceno Tardío (39 – 29 Ma) un período prolongado de subsidencia y fallamiento normal localizado ocurrió en respuesta a la flexión de la litosfera en la cuenca de antepaís, creada por la carga de deformación de las cordilleras occidental y central¹⁸.
- En el Oligoceno Tardío – Mioceno Temprano (29 – 16.5 Ma), la deformación en el Valle del Cauca y el Valle del Magdalena causó continuación de la subsidencia de la Cuenca de los Llanos Orientales¹⁹.
- Durante el Mioceno Medio, una fase de subsidencia rápida ocurrió cuando la deformación, levantamiento y erosión se iniciaron en la Cordillera Oriental, y se estableció el depocentro de la cuenca de antepaís en el Piedemonte de los Llanos Orientales²⁰.

en Geología. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, 2004, p. 46.

¹⁶EQUION ENERGÍA LIMITED. Informe Técnico Anual a la Agencia Nacional de Hidrocarburos. Bogotá D.C. 2016. p. 5.

¹⁷ *Ibíd.*, p. 6.

¹⁸ AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Cuenca Llanos Orientales, Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos, 2012. p. 36.

¹⁹ *Ibíd.*, p. 6.

²⁰ *Ibíd.*, p. 6.

- Por último, durante el Mioceno Tardío – Presente (10.5 – 0 Ma), ocurrió la última fase de compresión y de inversión asociados con el plegamiento frontal y cinturón de cabalgamiento de la Cordillera Oriental²¹.

A medida que la deformación en la Cordillera Oriental migraba hacia el oriente, el área del Piedemonte se involucró en el cinturón frontal de pliegues y cabalgamientos, dentro del cual se formaron las estructuras petrolíferas probadas. El último evento tectónico en el área, corresponde al desplazamiento del sistema de fallas de Yopal, originado dentro de la secuencia T40 (Figura 3), lo cual generó la formación de estructuras apiladas (*duplex structures*). Estas estructuras se caracterizan por la repetición de los reservorios, observada en los pozos de la Licencia Piedemonte y constituyendo una cuña tectónica (*tectonic wedge*)²².

5.2. ESTRATIGRAFÍA REGIONAL

El marco de referencia estratigráfico para el Piedemonte Llanero Colombiano está basado en la estratigrafía de secuencias y en la litoestratigrafía publicada para la región de la Cuenca de Los Llanos y la Cordillera Oriental.

Estratigráficamente, los Llanos Orientales y el borde Este de la Cordillera Oriental están constituidas por rocas cuya edad oscila entre el Precámbrico y Cuaternario, separadas entre sí por discordancias regionales²³. La historia de la Cuenca de los Llanos Orientales inicia en el Paleozoico con la generación de fosas tectónicas, en las cuales se lleva a cabo la deposición de sedimentos marinos someros,

²¹ *Ibíd.*, p. 6.

²² EQUION ENERGÍA LIMITED. *Op. cit.*, p. 7.

²³ BRUNETON, P., *et al.* Contribución a la Geología del Oriente de las comisarias del Vichada y del Guainía (Colombia), *Geología Norandina*, 1983, No. 6, p. 3-12.

representados por rocas sedimentarias y metasedimentarias de edad Paleozoico, perforadas al Oriente de la Licencia Piedemonte en el Foreland²⁴.

Datos regionales de la cuenca, sugieren que no se tiene registro de rocas de edad Triásico-Cretácico Inferior, exceptuando secuencias “*synrift*” preservadas localmente, por lo tanto, de manera general tanto los sedimentos del Cretácico Superior como del Terciario yacen directamente sobre el Basamento o sobre secuencias del Paleozoico²⁵.

Durante el Cretácico Superior, Albiano Tardío – Cenomaniano (100.5 – 93.9 Ma), en la cuenca se presentó un evento transgresivo que generó la deposición de areniscas litorales a deltaicas conocidas como Areniscas Inferiores (K50), las cuales a partir de datos regionales se interpretan como la secuencia equivalente a la Formación Une²⁶.

Durante el Turoniano - Coniaciano Temprano (91-88 Ma), inició la secuencia K60 debido a una elevación global del nivel del mar con condiciones anóxicas que dio como resultado la deposición de una sucesión de arcillas marinas, cherts y fosfatos, asociadas a este evento se encuentran excelentes formaciones generadoras como la Formación Villeta en la Cuenca del Magdalena Superior y la Formación La Luna en el Valle Medio del Magdalena y su equivalente en la Cuenca de los Llanos y el Piedemonte Llanero, la Formación Gachetá²⁷. Para el área particular de la Licencia Piedemonte, no se han perforado rocas más antiguas que la Formación Gachetá.

Las condiciones anóxicas durante el Coniaciano – Santoniano permitieron la deposición de la secuencia K60, la cual se vio interrumpida por un descenso del nivel relativo del mar, lo que desplazó la deposición a una cuenca intra cordillerana

²⁴ PIEDRAHÍTA LORDUY, JESÚS ALBERTO. Caracterización petrofísica de un área en el bloque CPO 16 en la cuenca de los Llanos Orientales – Colombia. Tesis de pregrado en Geología. Medellín: Universidad EAFIT, Escuela de Ciencias, 2016, 84p.

²⁵ AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Petroleum Geology of Colombia: Eastern Cordillera Basin. Medellín, Universidad EAFIT, 2011. P 43.

²⁶ COOPER. Op. cit., p. 1429.

²⁷ MILLER, T. The geology of the Eastern Cordillera between Aguazul-Sogamoso-Villa de Leiva, part I, En: Geological field-trip, Colombia. 1979, p. 349 – 396.

con dirección noreste, extendiéndose hasta la Cuenca de Maracaibo, dejando el área del Piedemonte Llanero en la margen oriental de este sistema²⁸.

La depositación de las secuencias K70 – K80 representan dos ciclos mayores de progradación, agradación y retrogradación de la línea de costa hacia el noreste, dominada por areniscas de borde de playa de alta energía con área de aporte de sedimentos desde el Escudo de Guayana²⁹, asociada a estos eventos se encuentra la Formación Guadalupe, depositada sobre una plataforma marina creada por la caída del nivel del mar³⁰.

La secuencia K70 dio inicio con una regresión forzada (*lower forced regression system tract*), representada por areniscas marinas de agua poco profunda que corresponden a la Formación Arenisca Dura del Grupo Guadalupe³¹, al no ser continua dicha regresión, se generaron pequeños eventos transgresivos, representados por facies de sedimentos silíceos y fosfáticos de grano fino, los cuales corresponden a la Formación Plaeners y que equivalen a la Unidad Areniscas Fosfáticas Inferiores de la Formación Guadalupe en el Piedemonte Llanero³².

La secuencia K80 (Santoniano – Campaniano Temprano) en la Cordillera Oriental corresponde a una parte de la sección superior del Grupo Guadalupe que comprende a la Formación Arenisca Tierna o Arenisca Labor y Plaeners Superior³³, equivalente a estas unidades en el Piedemonte se encuentran las denominadas Cuarzo-arenitas, Areniscas Fosfáticas Superiores y Lodolitas del Guadalupe, las

²⁸ COOPER, Op. cit., p. 1429.

²⁹ COOPER, Op. cit., p. 1430.

³⁰ HUBACH, Enrique. Contribución a las unidades estratigráficas de Colombia (enumeración regional, de más reciente a más antigua) En: Servicio Geológico Nacional, 1957, Informe No. 1212, 165p.

³¹ *Ibíd.*, p. 165.

³² COOPER, Op. cit., p. 1430.

³³ JULIVERT, M. *Léxico Estratigráfico Internacional, América Latina*. Vol. 5, 1968, Fascículo 4^a, p. 275-276.

cuales son el reservorio comercial más antiguo probado en el Piedemonte Llanero Colombiano³⁴.

La secuencia K90 (Maastrichtiano Temprano) corresponde a la sección más superior de la Formación Guadalupe y su deposición ocurrió en un “*transgressive system track*” dominado por arenas y cubierto por un pobremente desarrollado “*highstand system track*” dominado por lutitas, esta secuencia no se encuentra presente en el Piedemonte, ya que es correlacionado con el hiato registrado sobre la secuencia K80³⁵.

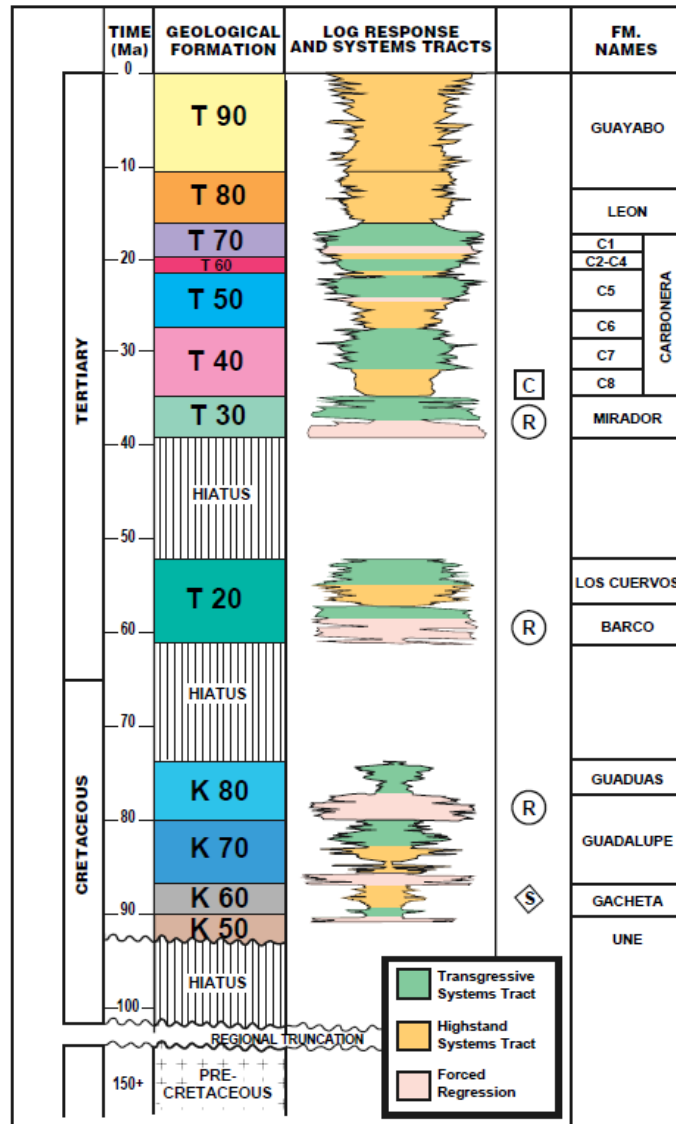
Un descenso relativo en el nivel del mar, probablemente relacionado con la compresión asociada al evento de acreción de la Cordillera Oriental que comenzó a finales del Cretácico, ocasionó la exposición sub-aérea y erosión parcial de una gran parte del área actual del Piedemonte, como consecuencia se dio un hiato de 15 – 20 Ma, el cual cubre el límite Cretácico – Terciario, por lo tanto, aunque la secuencia T10 está presente en la Cordillera Oriental, se encuentra ausente en el Piedemonte³⁶.

³⁴ COOPER, Op. cit., p. 1430.

³⁵ COOPER, Op. cit., p. 1431.

³⁶ COOPER, Op. cit., p.1431.

Figura 3. Columna estratigráfica representativa de la cuenca de los Llanos Orientales y la Cordillera Oriental con la terminología temporal de las unidades.



Fuente: COOPER, Mark, *et al.* Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia, in: The American Association of Petroleum Geologists, 1995, p. 1428.

En el Terciario Inferior (Secuencias T20 – T30), la deposición se reinició en el área durante el Paleoceno Inferior (60 Ma) como respuesta a una transgresión que se extendió hacia una cuenca de antepaís en la cuenca de los Llanos. La Formación Barco constituye la parte basal transgresiva de la secuencia T20, acumulada sobre

una superficie de discordancia mayor en ambientes estuarianos³⁷, la composición detrítica de las areniscas basales es altamente madura, lo que sugiere un continuo aporte de sedimentos re TRABAJADOS. El depósito de areniscas de la secuencia T20 concluyó al finalizar la transgresión del Paleoceno Tardío, durante la subsiguiente regresión se establecieron condiciones que permitieron la formación de llanuras costeras, generando los sedimentos característicos de la Formación Los Cuervos, la cual consta principalmente de lutitas y arcillas intercaladas con limolitas, areniscas de grano fino y carbones, con algunas capas de caliza y arcillas con presencia de nódulos de siderita³⁸. La depositación de las unidades T20 finalizó con una caída abrupta en el nivel relativo del mar hace aproximadamente 54 Ma, lo cual condujo a un gran desplazamiento de las zonas de depósito hacia el norte y oeste, en la Cuenca de los Llanos el hiato deposicional duró alrededor de 16 Ma, originando una discordancia sin componente angular³⁹. La sedimentación fue restablecida durante el final del Eoceno Medio (40.5 Ma), en respuesta a una transgresión que se extendió hacia el sur y este de la cuenca de antepaís, dicha secuencia (T30) corresponde a la Formación Mirador, la cual consta de areniscas de grano fino a grueso y localmente conglomerático con intercalaciones de lutitas y lutitas arenosas⁴⁰.

Para el Piedemonte, la deposición inicial de la secuencia T30 (Formación Mirador) consiste en areniscas fluviales y estuarios con influencia marina contenidos en sedimentos lodosos de planicie costera, en la zona media de la secuencia aparecen unidades lodosas de planicie aluvial, mientras en la zona superior se encuentran principalmente areniscas bioturbadas⁴¹. Las areniscas presentes en esta formación corresponden a cuarzo areniscas extremadamente maduras, para la Licencia

³⁷ NOTESTEIN, Frank; HUBMAN, Carl and BOWLER, James. Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America. In: GSA Bulletin, Vol. 55, 1944, p. 1190-1992.

³⁸ *Ibíd.*, p. 1191.

³⁹ DENGÓ, C. and COVEY, M. Structure of the Eastern Cordillera of Colombia: implications for trap styles and regional tectonics, in: AAPG Bulletin, 1993, Vol. 77, p. 1315-1337.

⁴⁰ NOTESTEIN. *Op. cit.*, p. 1991.

⁴¹ COOPER, *Op. cit.*, p.1434.

Piedemonte, esta unidad constituye el principal reservorio y se caracteriza por ser muy apretada.

Posterior a la secuencia T30 ocurrieron cuatro ciclos mayores de depósito de planicie costera baja con influencia marina (secuencias T40-T70), las cuales se extendieron desde 34 hasta 16.5 Ma (Oligoceno – Mioceno Medio) y corresponden a la denominada Formación Carbonera⁴². Las secuencias T40-T70 son mejor conocidas con la nomenclatura usada en la industria petrolera (C1 a C8), en donde las unidades pares (C2, C4, C6 y C8) corresponden a las secuencias depositadas durante las máximas superficies de inundación (*highstand system track*) con litologías predominantemente lodosas, seguidas por sistemas de regresión forzadas representadas por las unidades impares (C1, C3, C5 y C7) con dominancia arenosa⁴³. Para el Mioceno Medio un ascenso global del nivel del mar, coincidente con la primera significativa deformación y levantamiento de la Cordillera Oriental, se refleja en la deposición de la unidad de Lodolitas T80, las cuales corresponden a la Formación León⁴⁴. La evidencia de que la Cordillera Oriental estaba siendo parcialmente emergida durante este tiempo es el hecho de que la secuencia perteneciente a dicha formación se hace más arenosa en la parte oeste del Piedemonte que en la parte este, sugiriendo una zona de aporte de clastos gruesos desde el oeste. La secuencia T90 (10-2 Ma) consta de depósitos continentales de clastos gruesos sin-orogénicos depositados en la cuenca de los Llanos Orientales y que corresponden a la Formación Guayabo⁴⁵. Esta última fase de depositación evidencia el levantamiento definitivo de la Cordillera Oriental y la migración de la cuenca de Foreland a la posición actual. El depósito de esta unidad molásica causó un enterramiento rápido de las unidades del Cretácico Tardío – Terciario Temprano en las áreas del Piedemonte y los Llanos Orientales. La Figura 4 representa la columna estratigráfica generalizada para las unidades presentes en la Licencia

⁴² NOTESTEIN. Op. cit, p. 1992.

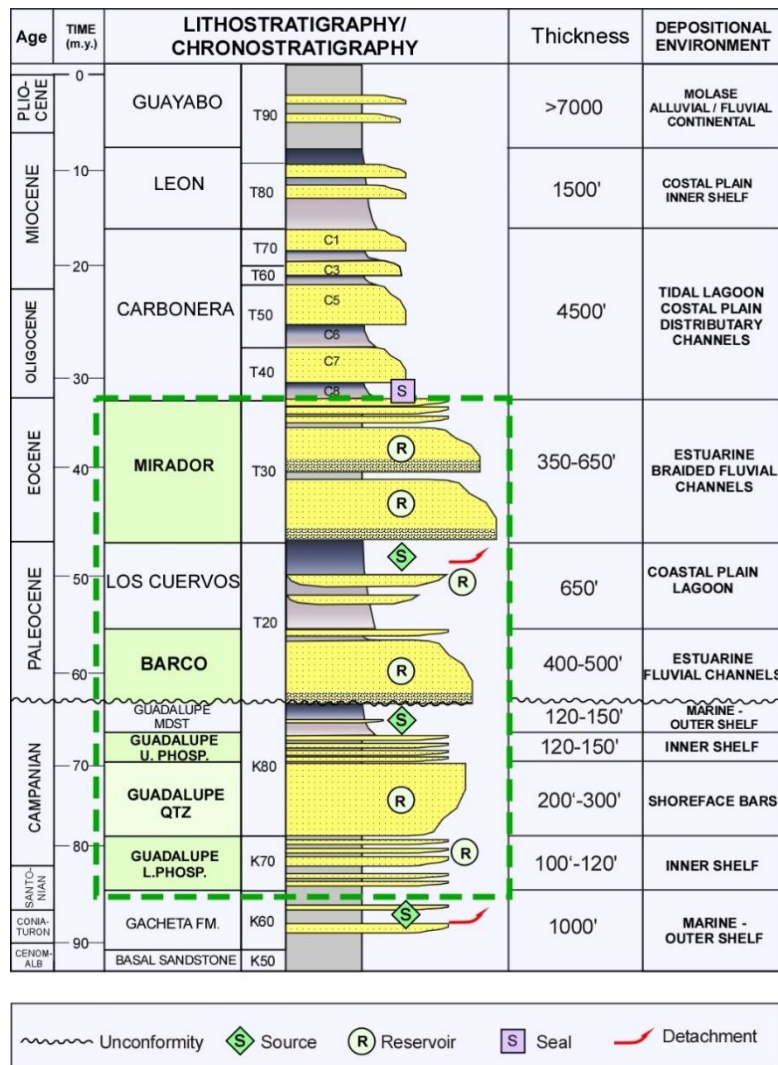
⁴³ COOPER, Op. cit., p.1434.

⁴⁴ NOTESTEIN. Op. cit, p. 1992.

⁴⁵ AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS, Op. cit, p.50.

Piedemonte, con espesores promedio medidos a partir de información de los Campos Floreña y Pauto.

Figura 4. Columna estratigráfica generalizada para las unidades presentes en la Licencia Piedemonte, enmarcadas las unidades de interés económico.



Fuente: Reporte Interno BP Exploration – Equion Energía.

5.2.1. Estratigrafía mecánica. La estratigrafía mecánica permite caracterizar las formaciones según el comportamiento mecánico de las rocas que las componen, aquellas compuestas predominantemente por arcillolitas y limolitas tienen un comportamiento mecánico dúctil mientras las formaciones compuestas por areniscas y conglomerados poseen comportamiento mecánico frágil.

Respecto a las formaciones que componen la secuencia estratigráfica de interés presente en la Licencia Piedemonte, las formaciones Gachetá, Los Cuervos, Carbonera (C8, C6, C4, C2) y el miembro Mudstone de la Formación Guadalupe, compuestas principalmente por arcillolitas y shales, tienen comportamiento mecánico dúctil y conforman los principales sellos de los yacimientos presentes en la Licencia Piedemonte, además, las formaciones Gachetá, Los Cuervos y Carbonera (C6), de acuerdo a la información de perforación de pozos, se consideran *décollement*⁴⁶ o unidades litológicas en las cuales se encuentran los despegues (*detachment*) de las estructuras. Las Formaciones Guadalupe, Barco, Mirador, Carbonera (C7, C5, C3, C1), compuestas principalmente por areniscas y conglomerados tienen comportamiento mecánico frágil, y componen principalmente rampas en las estructuras, las Formaciones Guadalupe, Barco y Mirador conforman los reservorios presentes en la Licencia Piedemonte.

⁴⁶ MACKAY, Paul A., *et al.* Triangle Zones and Tectonic Wedge: an Introduction. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1996, Vol. 44, No. 2, p. 1-2.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La geología estructural es la rama de la geología que se encarga de estudiar la corteza terrestre, sus estructuras y la relación de las rocas que las forman, así como la geometría de las estructuras y la posición en que aparecen en superficie e interpreta y estudia la deformación de los materiales terrestres, cuyas representaciones más habituales son la formación de pliegues y fallas. La geología estructural tiene relación directa con disciplinas geológicas como la mecánica de suelos, de rocas y la geotecnia. La importancia de esta disciplina para la sociedad se manifiesta particularmente en estudios para obras de ingenierías y como elemento fundamental en la exploración y producción del sector minero-energético⁴⁷.

6.2. DEFORMACIÓN

Se define deformación como cualquier cambio en la posición o en las relaciones geométricas internas sufridas por un cuerpo como consecuencia de la aplicación de un campo de esfuerzos, esta deformación puede constar de hasta cuatro componentes: translación, rotación, dilatación y distorsión. En el caso general, una deformación las incluye todas, pero deformaciones particulares pueden constar de tres, dos o una de las componentes. Las deformaciones son causadas por esfuerzos, de forma que ambos conceptos están ligados por una relación causa y efecto, los esfuerzos se definen y se analizan para un instante dado, mientras que

⁴⁷ GARCÍA RODRÍGUEZ, Manuel. Geología estructural. Esfuerzos y deformaciones de las rocas. Deformación dúctil: los pliegues y sus tipos. Mecanismos de plegamiento. Deformaciones frágiles: diaclasas y fallas. Características y tipos. Asociaciones de pliegues y fallas, 2012. p.6. ISBN: 978-84-92767-65-6.

las deformaciones miden cambios producidos en un intervalo de tiempo y se analizan comparando un estado final con uno inicial.

Un criterio que se utiliza para clasificar la deformación es el de los resultados físicos, según este, se clasifican en frágil y dúctil. La deformación frágil es la que produce roturas como el caso del fallamiento, mientras que la deformación dúctil se realiza sin que el cuerpo se fracture (plegamiento), siendo la deformación frágil discontinua y la dúctil continua ⁴⁸.

6.3. CINTURONES DE CABALGAMIENTO

Las deformaciones dúctiles más relevantes a escala regional se encuentran representadas por los sistemas plegados asociados a la generación de cadenas montañosas, entre los cuales se encuentran la Cordillera Oriental y el Piedemonte Llanero Colombiano.

6.3.1. Mecánica de los cinturones de cabalgamiento. Los cinturones de cabalgamiento exhiben una serie de propiedades generales en común⁴⁹:

- Una superficie de despegue basal por debajo de la cual se observa poca deformación y que se inclina hacia el interior del cinturón donde se observa que los cabalgamientos se unen. Todos los cabalgamientos se unen asintóticamente a uno basal que es subhorizontal y que acaba enraizándose en el basamento.
- Alta compresión horizontal en el material localizado por encima del despegue basal. Los pliegues son frecuentes y suelen corresponder a uno de los tipos de pliegues asociados a cabalgamientos: Pliegue por flexión de falla, pliegue por propagación de falla y pliegue de despegue.

⁴⁸ MARTÍNEZ CATALÁN, José Ramón. Geología estructural y dinámica global, 2002. Universidad de Salamanca.

⁴⁹ ACEVEDO. Op. cit., p. 46.

- Poseen geometría de cuña que se adelgaza hacia el margen del cinturón de cabalgamiento.

6.3.2. Reglas de las fallas de cabalgamiento. Las principales reglas generales usadas para el análisis de cinturones asociados a fallas de cabalgamiento son las siguientes⁵⁰.

- Los cabalgamientos colocan rocas más antiguas sobre rocas más jóvenes, produciendo repeticiones de la secuencia estratigráfica.
- Levantan las capas por encima de la Elevación Regional, la cantidad de elevación depende principalmente del buzamiento y longitud de la rampa y cantidad de desplazamiento.
- Ascenden en la secuencia estratigráfica en dirección del transporte tectónico.
- Generan estructuras en el bloque levantado como resultado del movimiento sobre el bloque yacente, normalmente las estructuras se propagan hacia el Foreland.

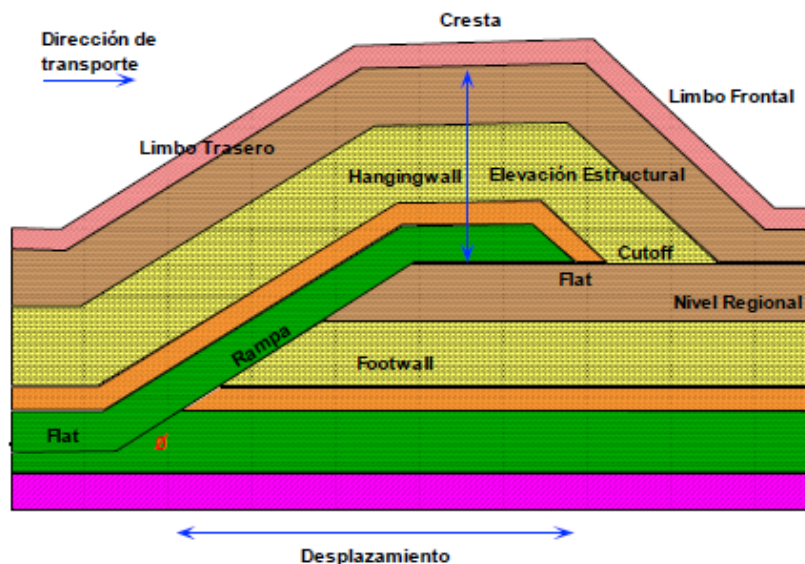
6.3.3. Terminología de pliegues en cinturones de cabalgamiento. Algunos términos comunes en cinturones plegados son los siguientes:

- **Flats o Planos:** Zonas largas y planas, paralelas a la estratificación sedimentaria, coincidiendo con las capas menos competentes o con los contactos entre las capas.
- **Rampas:** Zonas cortas y abruptas que cortan la estratificación, el ángulo de la rampa usualmente está entre 10° y 30°. Estas rampas pueden ser frontales (perpendicular a la dirección de transporte), oblicua (oblicua a la dirección de transporte) o laterales (paralelas al desplazamiento).

⁵⁰ LINARES, Roberto. Balanceo de secciones estructurales, 2016. Curso. p.35.

- **Cutoff:** Punto de intersección entre un contacto estratigráfico y una falla, existen cutoffs tanto en el bloque colgante como en el yacente.
- **Detachment (Despegue):** Falla subhorizontal o poco inclinada a lo largo de la cual una masa de roca se ha movido con respecto al substrato infrayacente.
- **Thrust Fault (Falla de cabalgamiento):** Falla inversa cuyo ángulo de despegue es menor de 45°
- **Backthrust (Retrocabalgamiento):** Son cabalgamientos con vergencia opuesta al cabalgamiento principal, que ascienden en las secciones estratigráficas hacia el cinturón orogénico (*hinterland*) en contraste con los de *forethrust*.
- **Splay:** Falla secundaria, de menor tamaño y desplazamiento, que emerge de un cabalgamiento principal.

Figura 5. Esquema general de la geometría y los elementos de un pliegue relacionado a una falla de cabalgamiento.

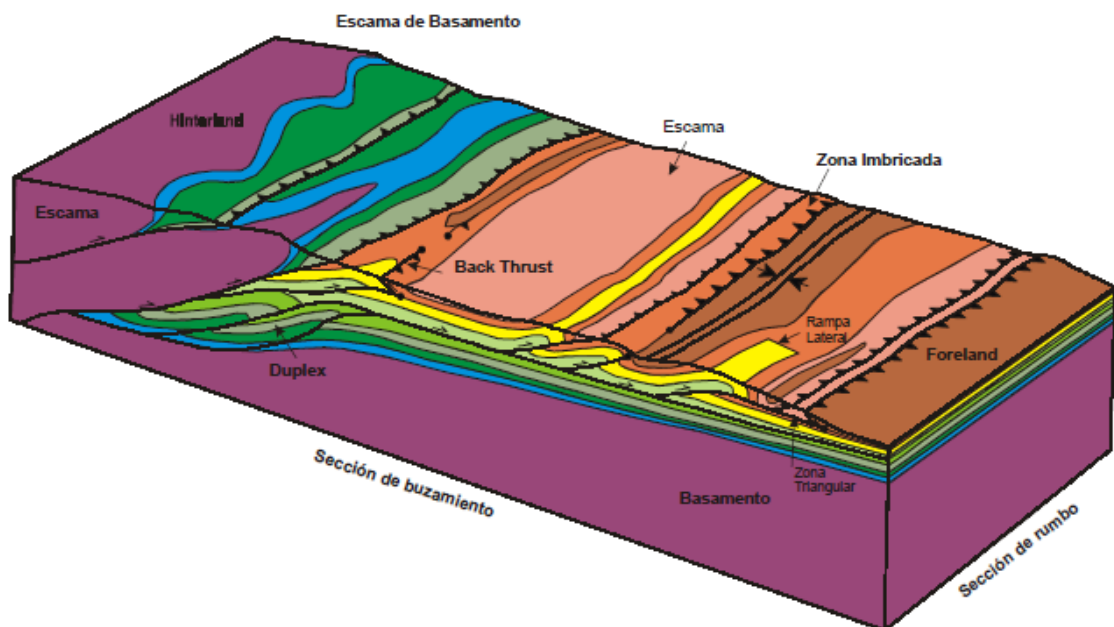


Fuente: ACEVEDO RUEDA, Rafael Antonio y HERNÁNDEZ MENDOZA, Yohn Forthis. Modelamiento y análisis estructural del anticlinal de Medina, Piedemonte de los Llanos Orientales. Tesis de pregrado en Geología. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, 2004, p. 48.

6.4. SISTEMAS DE CABALGAMIENTO

Es una zona en donde los cabalgamientos están geométrica, cinemática y mecánicamente relacionados, entre los sistemas de cabalgamiento más comunes se encuentran los dúplex, abanicos imbricados y zonas triangulares⁵¹ (Figura 6).

Figura 6. Ilustración de los principales elementos que componen los sistemas de cabalgamientos.



Fuente: ACEVEDO RUEDA, Rafael Antonio y HERNÁNDEZ MENDOZA, Yohn Forthis. Modelamiento y análisis estructural del anticlinal de Medina, Piedemonte de los Llanos Orientales. Tesis de pregrado en Geología. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, 2004, p. 50.

- **Abanicos imbricados:** Son sistemas en los que un grupo de cabalgamientos se desprende de un despegue basal y terminan arriba en *tip points*. Tiene una geometría regular con mucha de su deformación

⁵¹ ACEVEDO. Op. cit., p. 50.

debida al movimiento de los cabalgamientos más nuevos, los cuales proporcionan evidencia de la secuencia de propagación.

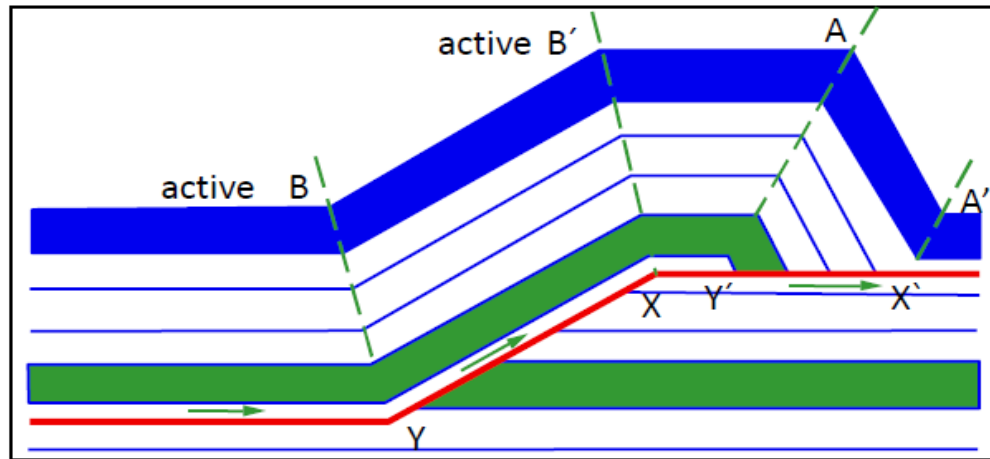
- **Dúplex:** Se define como un grupo de cabalgamientos imbricados menores que se conectan en un despegue basal o cabalgamiento de piso (*floor thrust*) a un despegue superior (*roof thrust*). Los dúplex son un método altamente eficiente de acortamiento y engrosamiento de la corteza terrestre (Figura 6).
- **Zona triangular:** Este término se refiere a una combinación de dos cabalgamientos con vergencia opuesta, dichas zonas triangulares son básicamente cuñas intercutáneas que involucran un *thrust* de techo y uno de piso, conectados por cabalgamientos imbricados, los cuales se forman en secuencia y diferencialmente elevan el *thrust* de techo. El *thrust* de techo es paralelo a la estratificación y tiene un sentido de desplazamiento tipo *backthrust*. Las zonas triangulares ofrecen una solución conveniente, pero no única, al rápido cambio de elevación estructural de los frentes montañosos

6.5. PLIEGUES RELACIONADOS A FALLAS

Existen tres tipos de pliegues asociados al desarrollo de geometrías de rampas y planos en la falla, los cuales ocurren simultáneamente.

6.5.1. Fault-bend fold. Este tipo de pliegues se desarrolla en el *hangingwall*, el cual se pliega para acomodar los cambios en la forma de la falla, el plegamiento ocurre mediante la formación de *kink bands*, las cuales permiten acomodar el desplazamiento de la falla sin producir vacíos o traslapes⁵² (Figura 7).

Figura 7. Esquema generalizado de un Fault-Bend Fold.



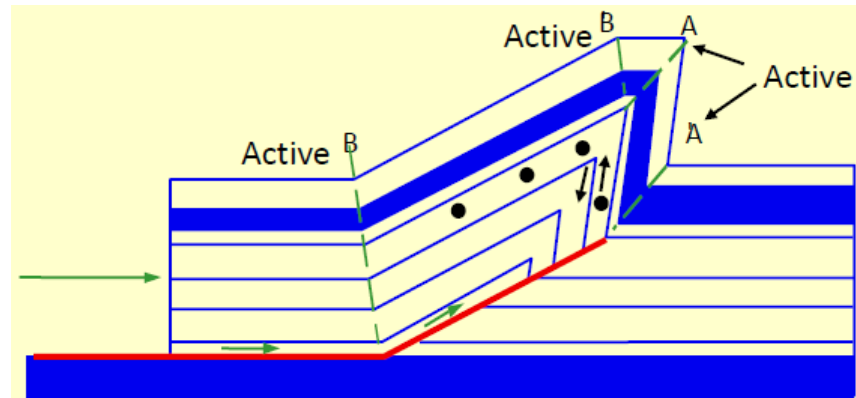
Fuente: SUPPE, John. Geometry and kinematics of fault-bend folding. En: American Journal of Science. September, 1983, Vol. 283, p. 684-721. En: LINARES, Roberto. Balanceo de secciones estructurales, 2016. Curso.

6.5.2. Fault propagation fold. Estos pliegues son el resultado de una deformación flexural de las capas por encima del punto de desarrollo de la falla, el pliegue asume el acortamiento de la falla, es decir, son pliegues con un *tip* activo. Son los pliegues más comúnmente observados en afloramientos y sísmica⁵³ (Figura 8).

⁵² SUPPE, John. Geometry and kinematics of fault-bend folding. En: American Journal of Science. September, 1983, Vol. 283, p. 684-721. En: LINARES, Roberto. Balanceo de secciones estructurales, 2016. Curso.

⁵³ SUPPE, Jhon and MEDWEDEFF, Donald. Geometry and kinematics of fault-propagation folding. En: Eclogae geol. March, 1983, p. 409-454. En: LINARES, Roberto. Balanceo de secciones estructurales, 2016. Curso.

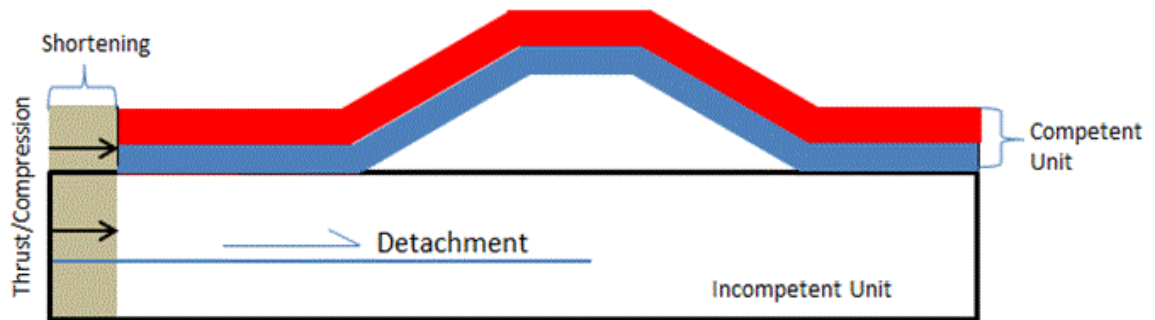
Figura 8. Ilustración general de un Fault Propagation Fold.



Fuente: SUPPE, Jhon and MEDWEDEFF, Donald. Geometry and kinematics of fault-propagation folding. En: *Eclogae geol.* March, 1983, p. 409-454. En: LINARES, Roberto. *Balaceo de secciones estructurales*, 2016. Curso.

6.5.3. Detachment fold. Son pliegues que no están asociados directamente con rampas, se desarrollan en respuesta al acortamiento por encima de una zona de despegue⁵⁴ (Figura 9).

Figura 9. Esquema representativo de un Detachment Fold.



Fuente: LINARES, Roberto. *Balaceo de secciones estructurales*, 2016. Curso.

⁵⁴ LINARES, Op. cit, p. 38

6.6. BALANCEO DE SECCIONES

El balanceo de secciones más que una herramienta de la geología estructural, es un método que conduce al entendimiento de la evolución geológica, tectónica, estratigráfica y en particular del sistema petrolífero de una cuenca. El objetivo del balanceo es comprobar la validez de las geometrías interpretadas en una sección, ya que permite postular modelos estructurales admisibles y validar las geometrías interpretadas, a través de su implementación se puede reconstruir y entender la evolución tectónica de un área. Esta herramienta es de gran utilidad en el estudio de cinturones plegados ya que estos sectores presentan complejidad estructural y la calidad de la información sísmica es regular o mala⁵⁵.

Algunos de los fundamentos claves a tener en cuenta en la implementación del balanceo de secciones son los siguientes:

- La materia no se crea ni se destruye, solamente se transforma.
- El hecho de que los estratos estuvieran originalmente sin deformar representa una oportunidad para probar la interpretación estructural de una sección balanceada.
- Una sección que no puede ser geoméricamente restaurada a su estado predeformado es imposible que exista.
- Una sección estructural que balancea no necesariamente es cierta, pero una sección que no balancea es errónea.

⁵⁵ LINARES, Op. cit, p. 8.

6.6.1. Restauración. La restauración es el paso más importante del balanceo de secciones, ésta consiste en ubicar estratos en las posiciones que se encontraban antes de la deformación⁵⁶. Los principales métodos para restaurar una sección son:

6.6.1.1. Conservación del área. Si la deformación de una capa involucra únicamente plegamiento y fallamiento, el volumen y por lo tanto el área de la capa no debe cambiar durante la deformación. La conservación del área no siempre puede ser asumida, pues la deformación involucra grandes pérdidas de volumen por disolución (clivaje).

6.6.1.2. Conservación de la longitud. Este método tiene como fundamento que la longitud de una capa no debe variar durante la deformación, es decir, la longitud de las capas en la sección deformada debe ser la misma que la sección restaurada.

6.6.2. Normas geométricas para la restauración. Las normas geométricas aplicadas a la restauración son las siguientes⁵⁷:

1. El número de rampas y flats debe ser igual, tanto en el *Hangingwall* como en el *Footwall*.
2. La longitud de los flats debe ser aproximadamente igual, no así, la longitud de las rampas.
3. En ángulo de las rampas del *Hangingwall* debe ser igual al ángulo de las del *Footwall*.

⁵⁶ MARSHAK, S. and Woodward, N. Introduction to cross-section balancing. En: MARSHAK, Stephen and MITRA, Gautam. Basic methods of structural geology, 1988. p. 303-322. ISBN: 0130651788.

⁵⁷ LINARES, Op. cit, p. 20-25.

4. El nivel estratigráfico en el cual se encuentra la falla debe ser el mismo tanto para el *Hangingwall* como para el *Footwall*.
5. La magnitud del desplazamiento de una falla debe ser constante a lo largo de su trazo o debe variar de una manera explicable.

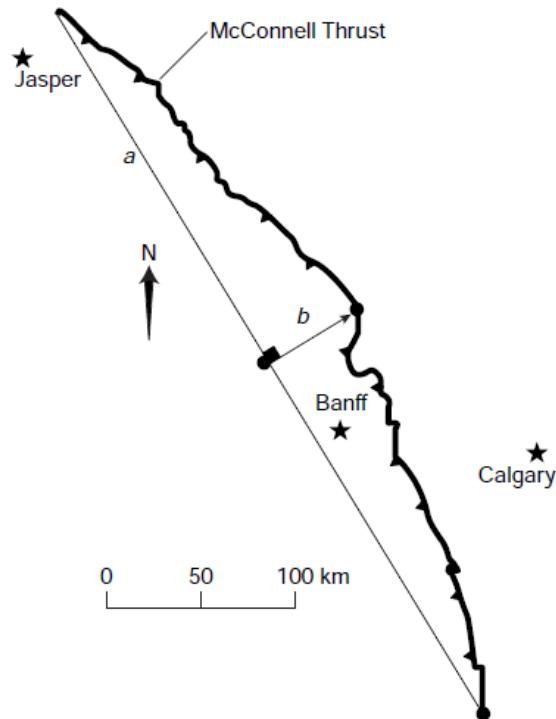
6.7. REGLA DEL ARCO Y FLECHA

Presentada por Elliott (1976), la Regla del Arco y Flecha tiene como objetivo presentar cómo, dónde y bajo qué mecanismos se genera la disipación de la energía durante el emplazamiento de fallas inversas⁵⁸(*thrust faults*), Elliott realizó sus estudios en el McConell Thrust System (Figura 10) en cercanías a Calgary en la provincia de Alberta (Canadá) en donde concluyó que la energía de la falla, ligada al desplazamiento, tiene una relación directa con la longitud en vista de mapa de dicha falla, (*a* en la Figura 10). La Regla del Arco y Flecha dice que el desplazamiento máximo de una falla inversa es menor que el 10% de la longitud del trazo que une los *tips* de la falla (Figura 10), publicaciones más recientes muestran que dicha relación entre el desplazamiento y longitud del arco la falla (*b/a*) puede estar alrededor de 0.07 – 0.12⁵⁹.

⁵⁸ ELLIOTT. Op. cit., p. 289-302

⁵⁹ MARSHAK, Stephen and WILKERSON, Scott. Fold-Thrust Belts. En: VAN DER PLUIJM, Ben and MARSHAK, Stephen. Earth Structure, 2004. p. 466. ISBN 0-393-92467-X.

Figura 10. Esquema del McConnell Thrust en vista de mapa en donde se muestra los elementos en el uso de la Regla del Arco y Flecha.



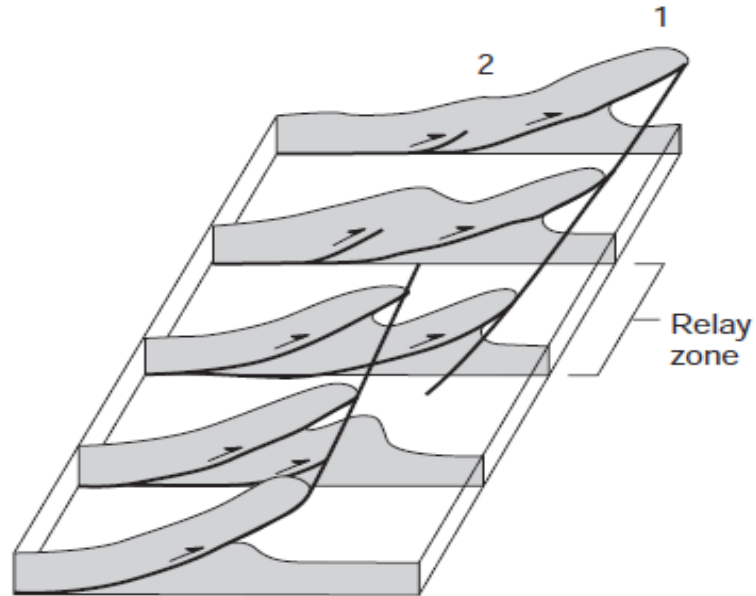
Fuente: MARSHAK, Stephen and WILKERSON, Scott. Fold-Thrust Belts. En: VAN DER PLUIJM, Ben and MARSHAK, Stephen. Earth Structure, 2004. p.466. ISBN 0-393-92467-X.

La distribución del desplazamiento a lo largo de una falla inversa, que en vista de mapa generalmente es curva o en forma de arco (Figura 10), se da teniendo el máximo desplazamiento en la zona de mayor curvatura y decrece progresivamente a lo largo de la falla hasta el tip⁶⁰ (Figura 11), en el caso en que existan dos o más fallas, la zona en que el desplazamiento pasa de una falla a otra es denominada zona de transferencia o *relay zone*⁶¹.

⁶⁰ *Ibíd.*, p. 466

⁶¹ LEBEL, D. "What about transfer zones?"- One of Eric Mountjoy's provocative questions. Search and Discovery Article #30321, 2014. p. 2-3.

Figura 11. Esquema que representa la distribución del desplazamiento a lo largo de una falla inversa.



Fuente: MARSHAK, Stephen and WILKERSON, Scott. Fold-Thrust Belts. En: VAN DER PLUIJM, Ben and MARSHAK, Stephen. Earth Structure, 2004. p.466. ISBN 0-393-92467-X.

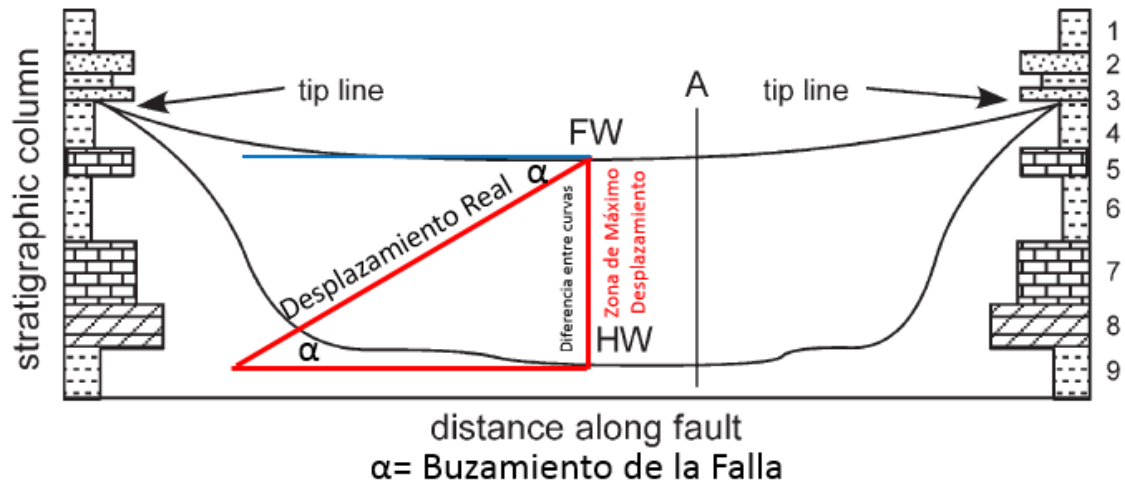
6.8. DIAGRAMA DE SEPARACIÓN ESTRATIGRÁFICA

Un diagrama de separación estratigráfica (SSDs) grafica la posición estratigráfica vertical de una falla contra su posición geográfica⁶², es decir, mapea los cutoffs de las unidades estratigráficas, tanto del *hangingwall* como del *footwall*, teniendo en cuenta la posición geográfica de estos con respecto a la falla. En el eje vertical del diagrama se presenta la columna estratigráfica a escala y en el horizontal la distancia a lo largo de la falla, las curvas en el diagrama muestran las unidades

⁶² WILKERSON, Scott; APOTRIA, Ted and FARID, Tammer. Interpreting the geologic map expression of contractional fault-related fold terminations: lateral/oblique ramps versus displacement gradients. En: Journal of structural Geology, 2002, vol. 24. p. 603 – 604.

estratigráficas en las que se encuentra la falla en un punto en particular⁶³ (Figura 12).

Figura 12. Ejemplo de un Diagrama de Separación Estratigráfica.



$$\text{Desplazamiento Real} = \frac{\text{Diferencia entre curvas}}{\text{Sen } \alpha}$$

Fuente: Modificado de GROSHONG, Richard. 3-D Structural Geology: A practical guide to quantitative Surface and subsurface map Interpretation. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. Cap. 7., p. 209-210. ISBN: 978-3-540-31054-9.

La zona de mayor separación entre la curvas es a su vez la zona de mayor desplazamiento de la falla, dicho desplazamiento es posible cuantificarlo teniendo espesores medidos de las unidades que componen la columna estratigráfica, sin embargo, este sería un falso desplazamiento ya que la falla no es completamente vertical, por lo tanto, para obtener un dato más preciso es necesario tener información sobre la inclinación de la falla y mediante la ley del seno lograr estimar datos de desplazamiento con menor incertidumbre (Figura 12).

⁶³ GROSHONG, Richard. 3-D Structural Geology: A practical guide to quantitative Surface and subsurface map Interpretation. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. p. 209-210. ISBN: 978-3-540-31054-9.

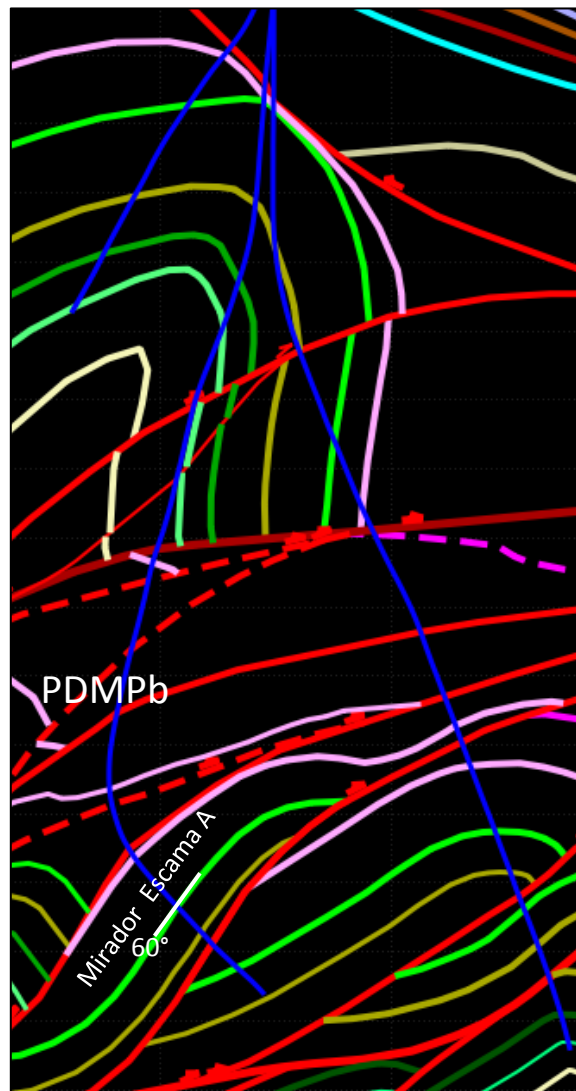
7. MODELO TEÓRICO

El modelo teórico de las escamas A, B y C del Complejo Pauto fue construido en el Software de modelamiento estructural Move® (Midland Valley Exploration Limited). Este modelo tiene como objetivo visualizar las zonas en donde la Formación Mirador de las diferentes escamas se traslapan, permitiendo la interacción de los fluidos contenidos en cada una de ellas. Para la construcción de este modelo se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

- Distancia entre las fallas: 1.5 km, valor promedio estimado a partir de las secciones balanceadas del Modelo Estructural del equipo de Subsuelo, Equion Energía.
- Ángulo de la rampa: 25°, este parámetro se obtuvo a partir de diferentes pruebas con diferentes ángulos de falla; la prueba realizada con fallas con inclinación de 25° representa de mejor manera las inclinaciones en la escama A, obtenida a partir del registro de buzamientos, en especial la máxima inclinación medida (60°), en el pozo PDMPb (Figura 13).
- Algoritmo de desplazamiento: Fault Parallel Flow, método en el cual los nodos del material se mueven paralelamente al plano de falla y en dirección al desplazamiento. Se utilizó este algoritmo ya que representa de manera eficiente las geometrías conocidas de las estructuras.
- Espesor de las Formaciones: Se tomaron espesores estratigráficos (TST) de las formaciones que están involucradas en las estructuras del Complejo Pauto, a partir de información en datos internos de Equion Energía; C6 (182m), C7 (152m), C8 (200m), Mirador (138m), Los Cuervos (167m).

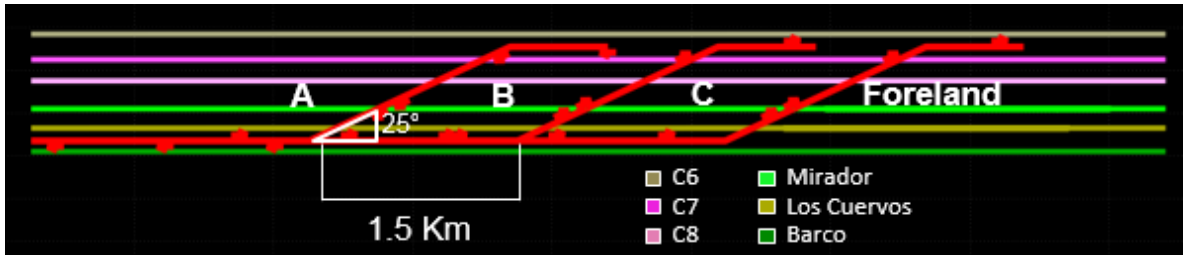
- Despegue: El despegue, probado con pozos, de las estructuras del Complejo Pauto se encuentra en la Formación Los Cuervos, con rampa que corta las formaciones Mirador, Carbonera C8, C7 y un flat intra C6. (Figura 14). En el modelo, el despegue se ubica 91 metros bajo el tope de la Formación Los Cuervos y el flat 91 metros bajo el tope de la Formación Carbonera C6.

Figura 13. Sección representativa del pozo PDMPb.



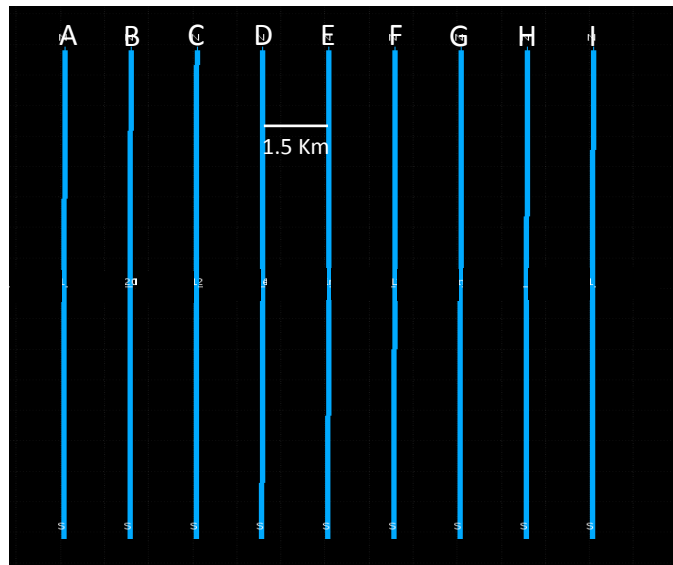
Fuente: Reporte Interno, Equion Energía Limited

Figura 14. Representación de una sección del Modelo Teórico con los parámetros mencionados.



- Secciones: En total, se realizaron nueve (9) secciones denotadas por letras que van de A - I, separadas entre sí 1.5 Km (Figura 15).

Figura 15. Vista de mapa de las secciones realizadas en la construcción del modelo teórico.



- Cada escama cuenta con siete (7) estados (**Figura 16**):

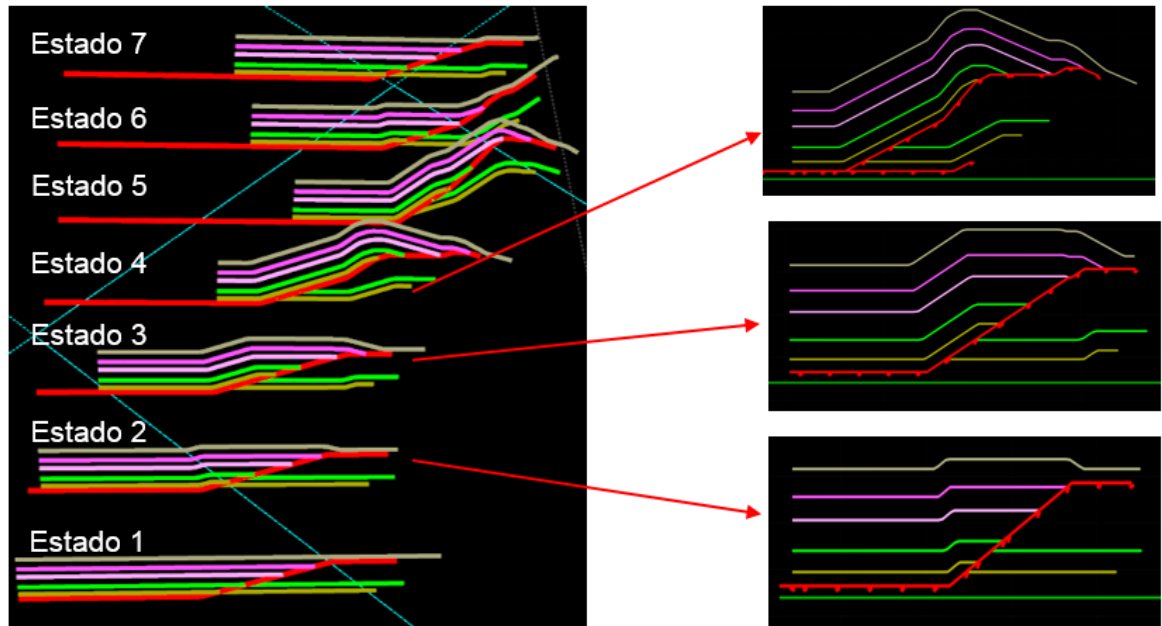
1. Estado sin deformación. Desplazamiento de falla = 0 metros.
 2. Estado en el cual el desplazamiento no es suficiente para separar la Formación Mirador del bloque colgante y yacente. Desplazamiento de falla = 150 metros.
 3. Estado en el cual el desplazamiento es suficiente para separar la Formación Mirador. Desplazamiento de falla = 600 metros.
 4. Estado de máximo desplazamiento de falla.
 5. Estado en el cual el desplazamiento es suficiente para separar la Formación Mirador. Desplazamiento de falla = 600 metros.
 6. Estado en el cual el desplazamiento no es suficiente para separar la Formación Mirador del bloque colgante y yacente. Desplazamiento de falla = 150 metros.
 7. Estado sin deformación. Desplazamiento de falla = 0 metros.
- Desplazamiento máximo de falla: Este fue estimado midiendo la longitud en vista de mapa de las escamas en el modelo actual del Equipo de Subsuelo y aplicando la Regla del Arco y Flecha, en la cual el desplazamiento máximo es menor al 10% (se tomará como sí el máximo desplazamiento posible fuese igual al 10%) de dicha longitud de la falla. Los valores obtenidos fueron los siguientes:

Escama A: 1180 metros

Escama B: 950 metros

Escama C: 700 metros.

Figura 16. Representación gráfica de los siete (7) estados, aplicados a cada escama.



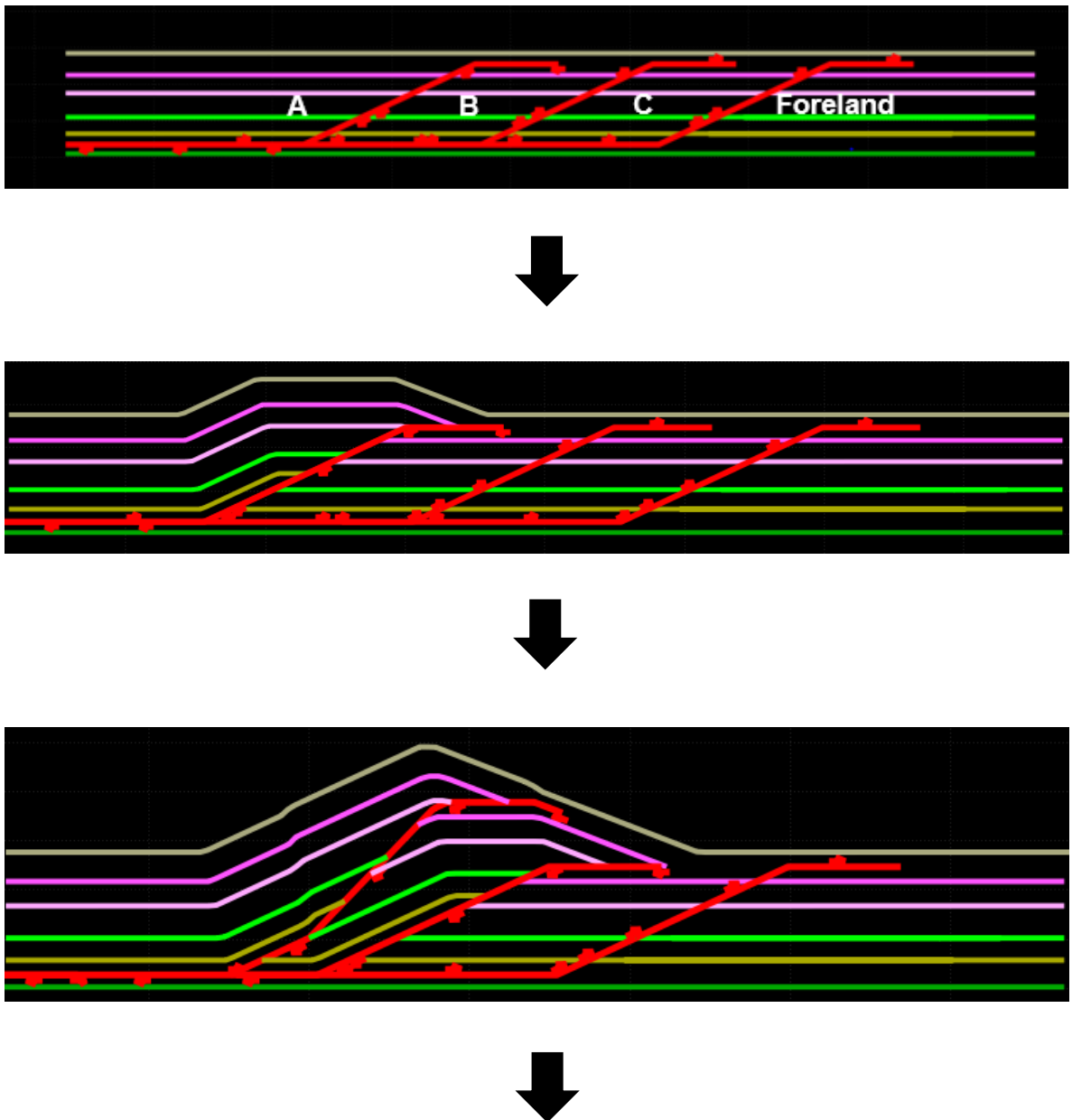
La Tabla 1 muestra la distribución de los estados evolutivos de las escamas con respecto a las secciones, ya que las secciones representan un momento dado en dicha evolución y permiten visualizar cómo las escamas superiores son afectadas directamente por el desplazamiento de falla que tenga la escama inferior.

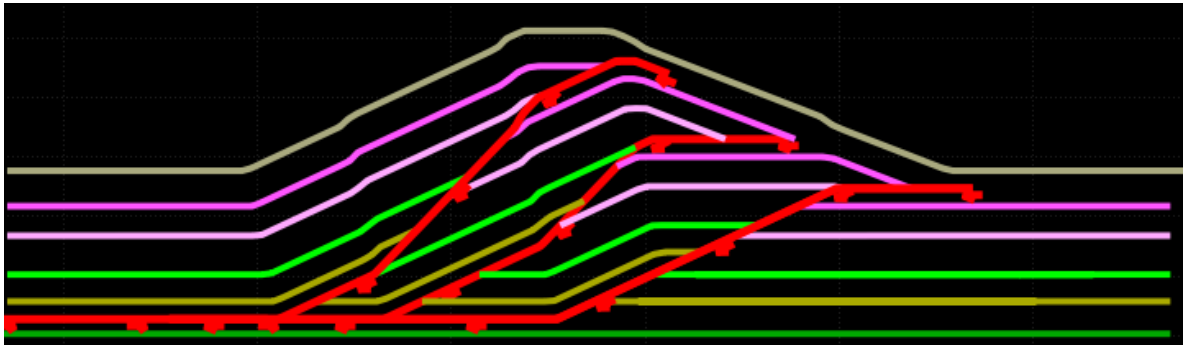
Tabla 1. Distribución de los estados en las secciones. Los estados se explican en la Figura 16.

	Estado								
Escama A	1	2	3	4	5	6	7	7	7
Escama B	1	1	2	3	4	5	6	7	7
Escama C	1	1	1	2	3	4	5	6	7
Sección	A	B	C	D	E	F	G	H	I

La Figura 17 muestra la evolución de las estructuras en la sección E, en donde las escamas A y C tienen desplazamiento suficiente para separar la Formación Mirador y la escama B tiene el máximo desplazamiento (Tabla 1).

Figura 17. Evolución de las escamas A, B y C en la sección E.





En el caso de la sección E, se observa que la Formación Mirador de las tres escamas se encuentran separados, producto del desplazamiento de las fallas, también se observa que cuando una falla deja de ser activa se convierte en un plano de discontinuidad que se pliega conjuntamente con los horizontes, producto de la posterior deformación de las escamas inferiores (Figura 17).

A partir de los horizontes creados en las secciones (Figura 18) se construyeron superficies (Figura 19) de las fallas y las Formación Mirador y Los Cuervos, con estas superficies se generaron las superficies 3D de la Formación Mirador (Figura 22) y con estas superficies se realizaron los análisis de las zonas de traslapes a través de las cuales se genera comunicación entre los fluidos presentes en las escamas.

Estas zonas corresponden a franjas en las que las fallas no tienen el desplazamiento suficiente para separar la Formación Mirador de las estructuras (Figura 23), es decir, aquellas zonas donde el desplazamiento es menor que el espesor total de la Formación Mirador.

Figura 18. Representación de los horizontes en las diferentes secciones.

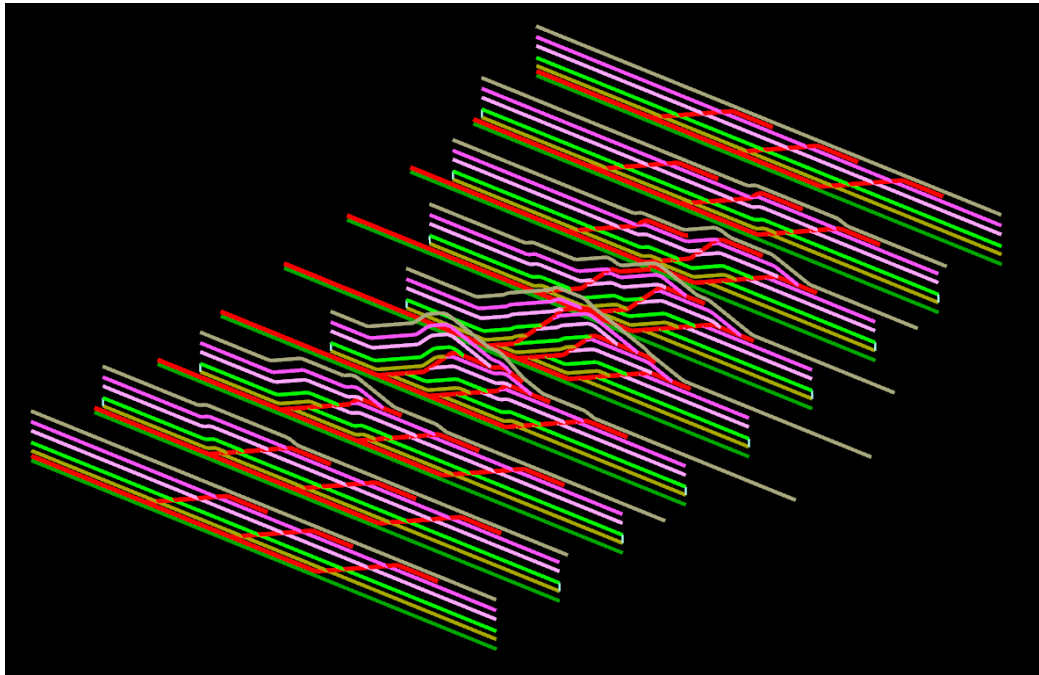


Figura 19. Ilustración de las superficies generadas a partir de los horizontes.

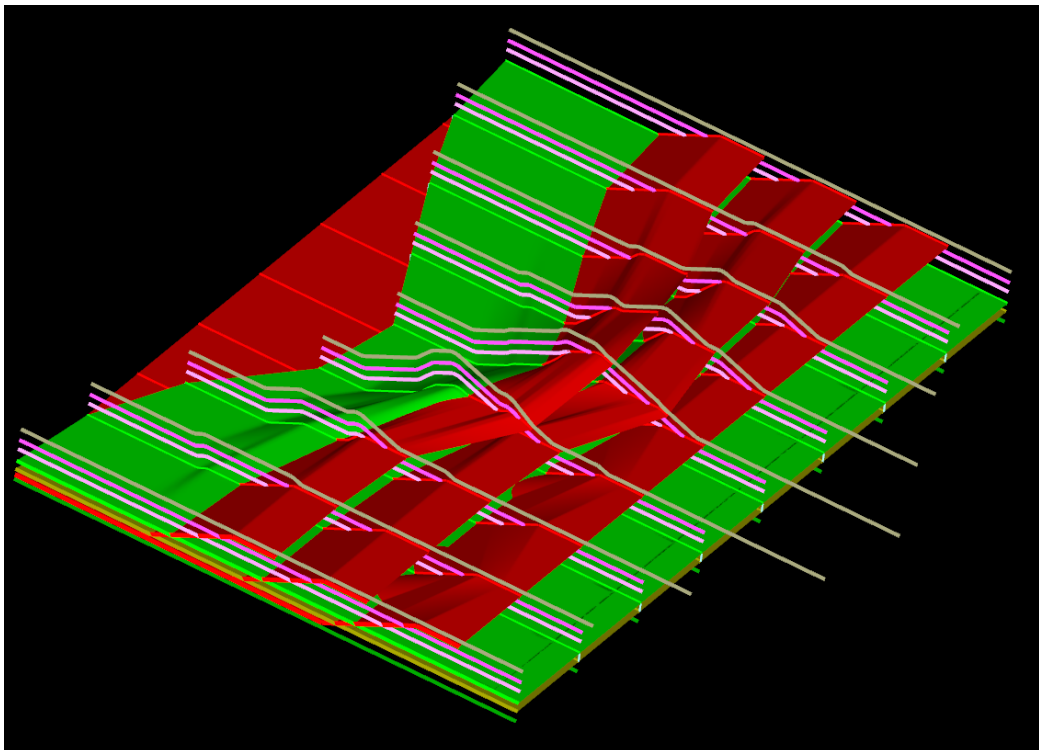


Figura 20. Contornos estructurales de la escama A en vista de mapa.

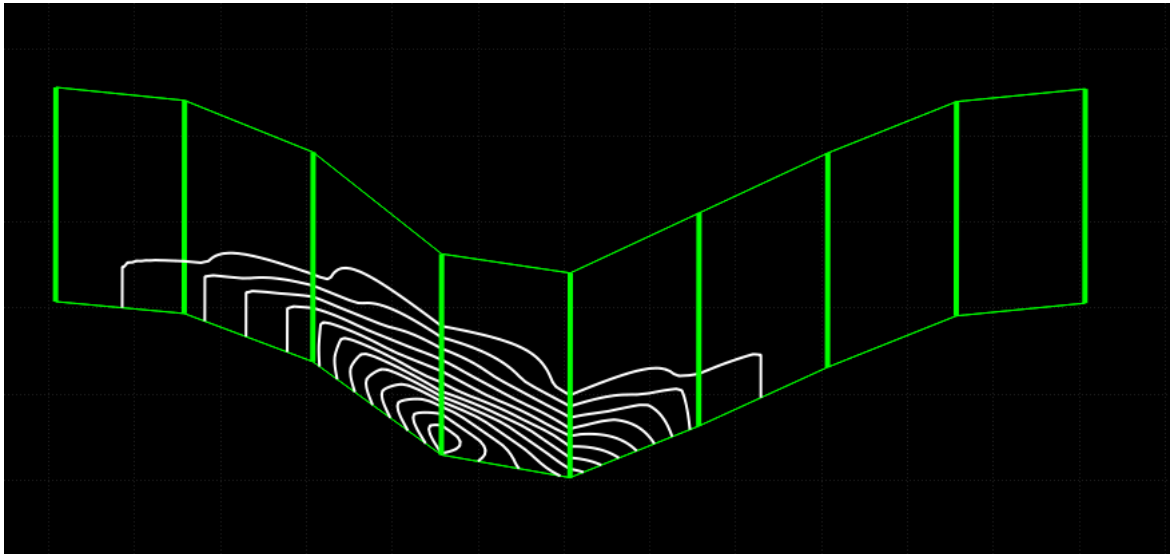


Figura 21. Contornos estructurales de la escama A en vista 3D.

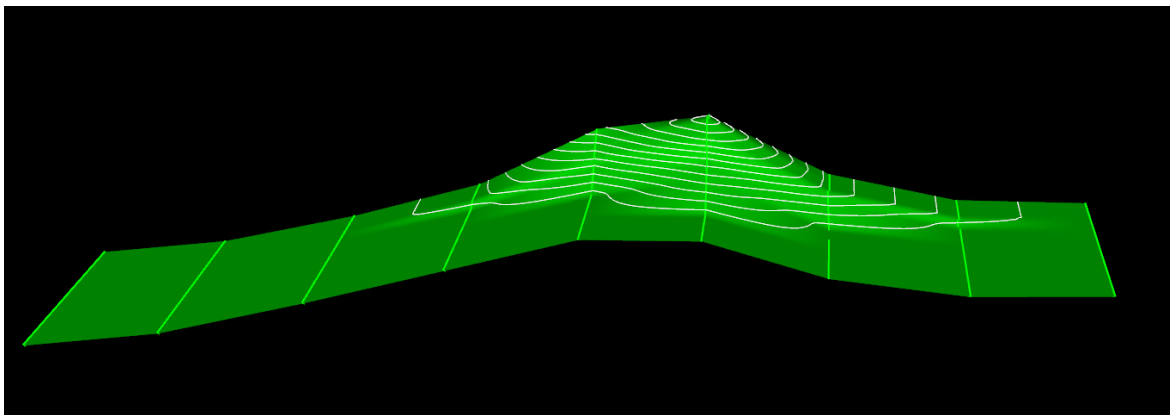
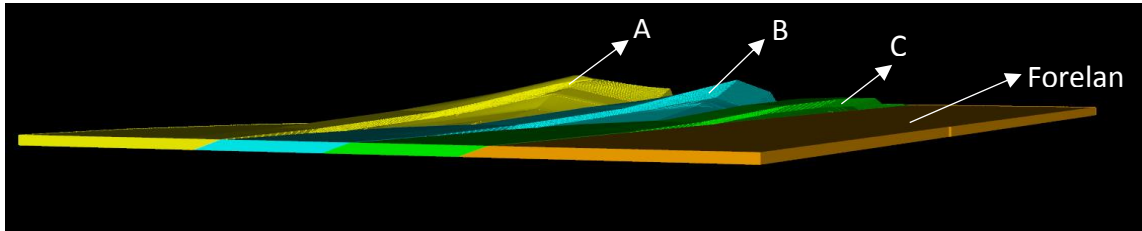
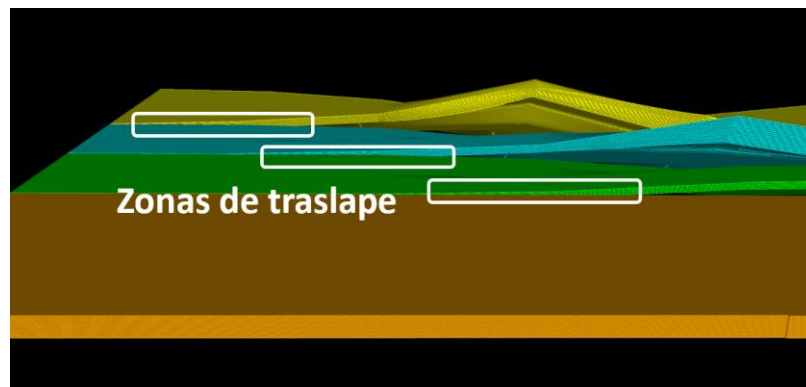


Figura 22. Volumétricos de la Formación Mirador en las escamas A, B, C y el Foreland.



Para que haya conectividad entre las escamas no es necesario que se traslapen grandes espesores de formación, basta con tener un par de pies de conexión efectiva para que los fluidos migren de una a otra estructura o el depletamiento en una escama afecte las presiones de formación de los demás yacimientos.

Figura 23. Zonas de traslape de las estructuras.

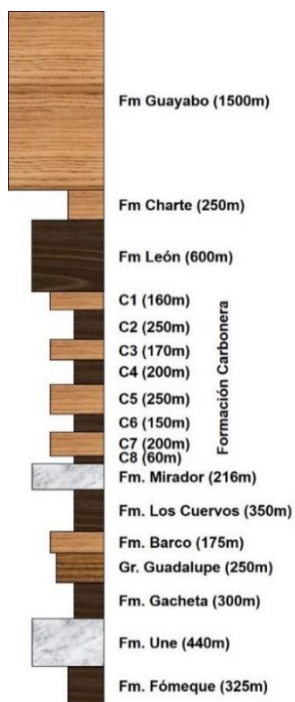


En el modelo realizado se observa que la estructura con mayor deformación es la escama A, esto es debido a que al ser la primera en formarse es afectada por la deformación de las siguientes escamas, es decir, es afectada por varios eventos de deformación. Esta observación también es soportada con datos de perforación de pozos, ya que esta estructura presenta las capas más inclinadas de las estructuras del Complejo Pauto. Este modelo permitió observar las zonas de traslape a través de las cuales se conectan los fluidos presentes en cada escama, lo cual es una posible explicación al proceso de uniformización de las presiones de los yacimientos del Complejo Pauto.

8. DIAGRAMA DE SEPARACIÓN ESTRATIGRÁFICA

Este diagrama fue elaborado en el software Canvas® (ACD Systems), el objetivo de realizar este Diagrama de Separación Estratigráfica es representar gráficamente y estimar cuantitativamente el desplazamiento máximo de la Falla de Monterrallo, además de analizar si la longitud medida en vista de mapa es correspondiente a la relación desplazamiento/longitud presentada en la Regla del Arco y Flecha. Para la construcción a escala de la columna estratigráfica se tomaron espesores promedios de las unidades presentes en el Anticlinal de Monterrallo (Bloque Colgante) y Sinclinal de Nunchía (Bloque Yacente) medidos en la Licencia Piedemonte (Figura 24) y reportados por ARIANA LTDA⁶⁴.

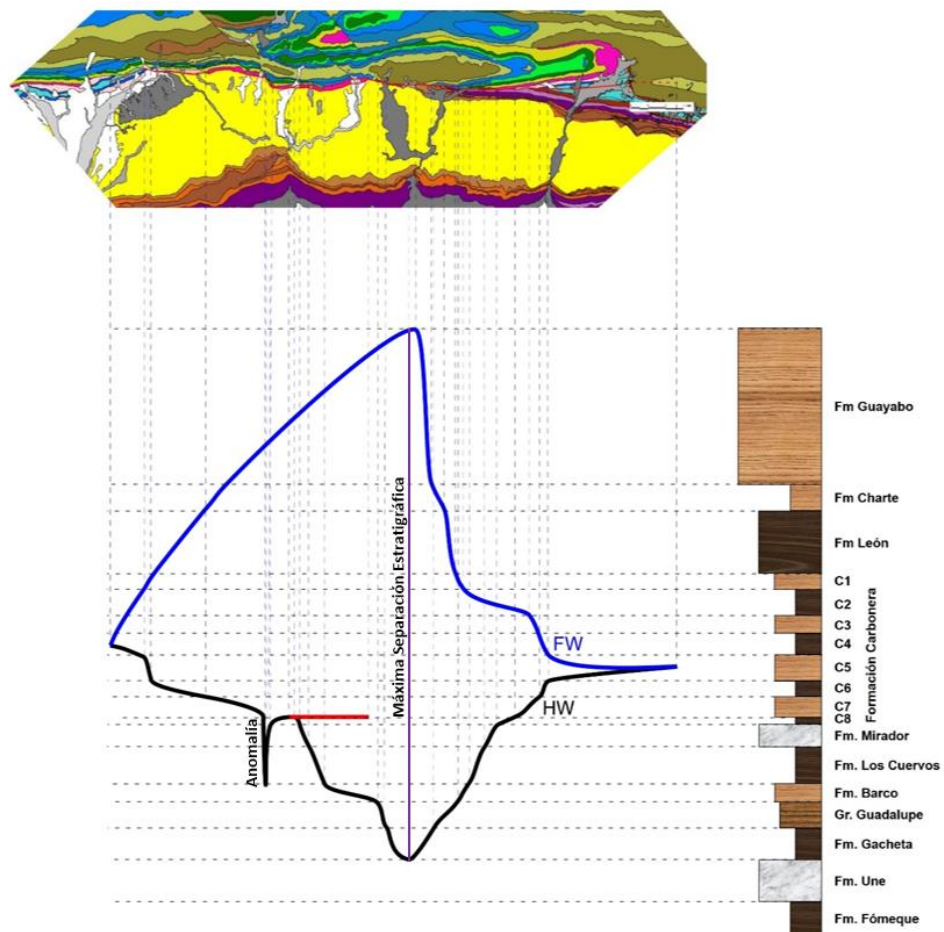
Figura 24. Columna estratigráfica generalizada de las formaciones presentes en el Anticlinal de Monterrallo y Sinclinal de Nunchía.



⁶⁴ ARIANA LTDA. Cartografía geológica de las áreas Floreña y Pauto, Bloque Piedemonte, Departamento de Casanare: Realizado para BP Exploration. Bogotá, 2007, p. 12 – 38.

El mapa utilizado en la elaboración del diagrama corresponde al mapa geológico interno de la compañía BP Exploration⁶⁵, hoy día Equion Energía. La Figura 25 muestra el Diagrama de Separación Estratigráfica que se obtuvo, las variaciones en las curvaturas de las líneas que representan el Bloque Colgante (HW) y el Bloque Yacente (FW) evidencian la presencia de más de un evento de deformación, posterior a la formación del Anticlinal de Monterralo, algo común en las estructuras del Piedemonte Llanero Colombiano.

Figura 25. Diagrama de Separación Estratigráfica para el análisis de la Falla de Monterralo.

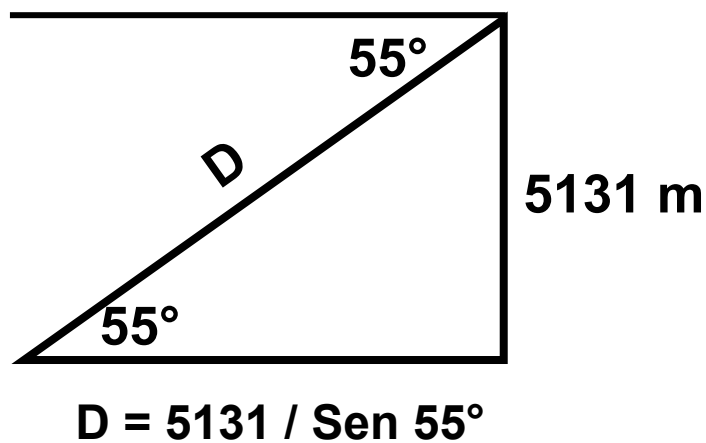


⁶⁵ BP Exploration Company. Mapa geológico contrato de Asociación Recetor, En: Informe Técnico Anual. Escala 1:50000. Bogotá, 2005.

Con el diagrama construido (Figura 25) se pueden describir principalmente tres eventos; el primero correspondiente a la Falla de Monterralo, evidenciado con la formación del Anticlinal de Monterralo, el segundo relacionado con una falla de rumbo dextral (anomalía en la Figura 25), la cual se ve reflejada en la gráfica con un cambio abrupto en el Bloque Colgante (HW) y el tercer evento relacionado a la aparición local en superficie de la Formación Carbonera (C7), producto de una falla adicional localizada en el Bloque Yacente de la Falla de Monterralo, esta falla adicional se denota con una línea roja en la gráfica (Figura 25).

La mayor separación estratigráfica se da en la zona donde la falla pone en contacto la Formación Une en el Bloque Colgante y la Formación Guayabo en el Bloque Yacente, lo que sugiere que la falla en este punto desplaza como mínimo una secuencia de 5131 metros. El ángulo de la falla con el que se realizó la estimación del desplazamiento máximo es de 55° , obtenido a partir de información del pozo PDMFc.

Figura 26. Esquema por medio del cual se realizó la estimación del desplazamiento de la Falla de Monterralo en la zona de mayor separación estratigráfica.



Con el esquema presentado en la Figura 26 se estimó que el desplazamiento máximo de la Falla Monterralo es de 6264 metros.

La longitud del arco de la falla medida en el mapa (Figura 25) es de 64300 metros, aplicando la Regla del Arco y Flecha, el desplazamiento máximo de la falla sería 6430 metros, sin embargo, la relación desplazamiento máximo/Longitud del arco ($6264/64300$) de los datos obtenidos con el Diagrama de Separación Estratigráfica es de 0.09, valor que se encuentra en el rango propuesto por Marshak y Wilkerson⁶⁶ (0.07-0.12) para la Regla del Arco y Flecha.

En la elaboración del Diagrama de Separación Estratigráfica y su posterior análisis es necesario tener en cuenta que existen factores que aportan cierto grado de incertidumbre, algunos de estos factores son:

- Los cutoffs que se grafican en el Diagrama de Separación Estratigráfica son de las formaciones que está presentes en el mapa actual, sin tener en cuenta la posibilidad de haber perdido formaciones por erosión, generando posibles imprecisiones con la cantidad de unidades que la falla haya desplazado.
- Cuando se realiza el cálculo del “desplazamiento real” a través de la Ley del Seno (Figura 26) se toma como base que el plano de falla mantiene la inclinación constante y es completamente diagonal, esto no es siempre el caso real, ya que la inclinación del plano de falla puede tener variaciones de inclinación, tendiendo a aplanarse a medida que se acerca a la zona de despegue.
- El Diagrama de Separación Estratigráfica toma como base un mapa geológico, por la tanto la calidad de la información de dicho mapa afecta directamente al diagrama.

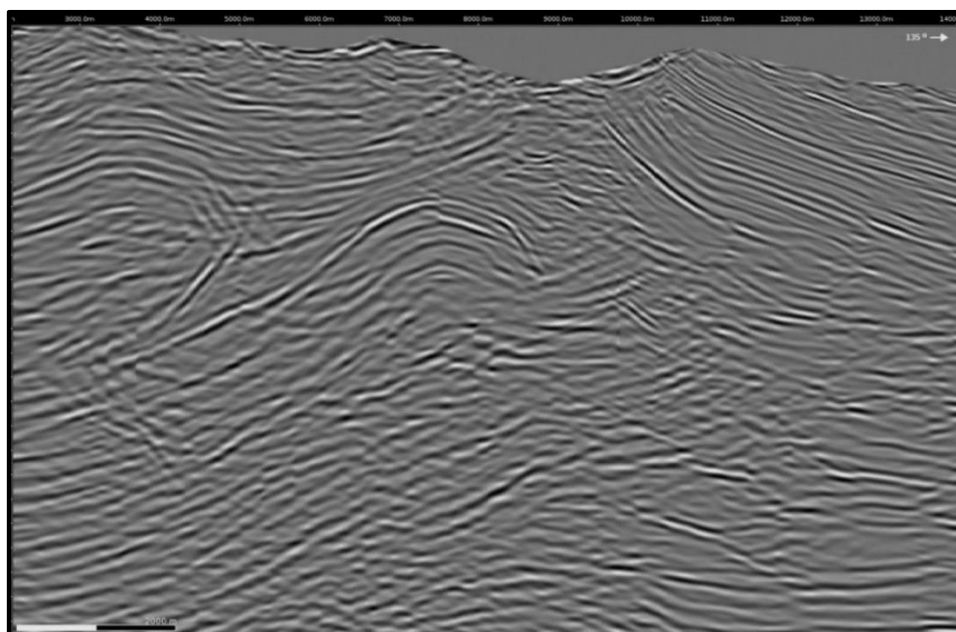
⁶⁶ MARSHAK, Op. cit. p. 466.

9. MODELO ESTRUCTURAL DE LAS ESCAMAS A, B y C

El modelo estructural realizado para las escamas A, B y C del Complejo Pauto es producto de la integración del Modelo Estructural actual del Equipo de Subsuelo (Equion Energía), un Modelo Teórico y la interpretación sísmica, principalmente de líneas de rumbo.

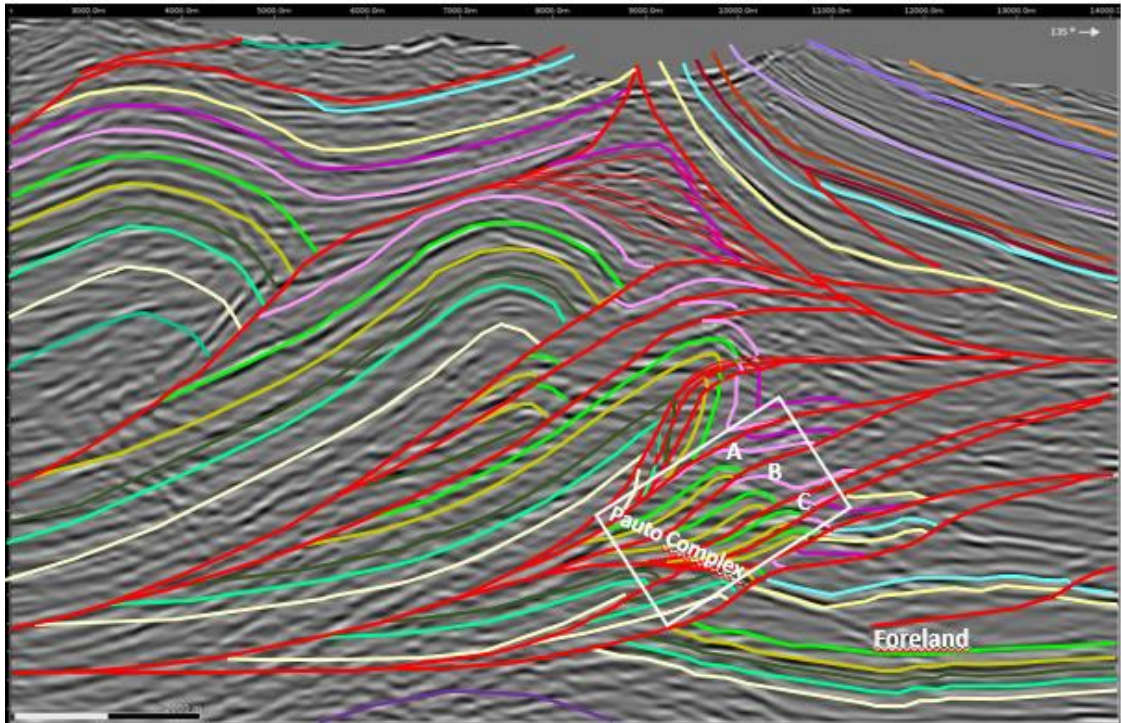
El Modelo Estructural del Equipo de Subsuelo está basado en información adquirida de perforación de pozos e interpretación sísmica, teniendo en cuenta que la información sísmica es de baja calidad (Figura 27) se ha realizado balanceo de secciones 2D y 3D con el fin de validar geológica y geoméricamente las secciones y reducir la incertidumbre sobre la geometría de las estructuras de la Licencia Piedemonte (Figura 28).

Figura 27. Sección sísmica de Buzamiento (Inline) del cubo sísmico de la Licencia Piedemonte.



Fuente: Reporte Interno, Equion Energía

Figura 28. Configuración general de las estructuras presentes en la Licencia Piedemonte, enmarcadas las escamas A, B y C del Complejo Pauto.



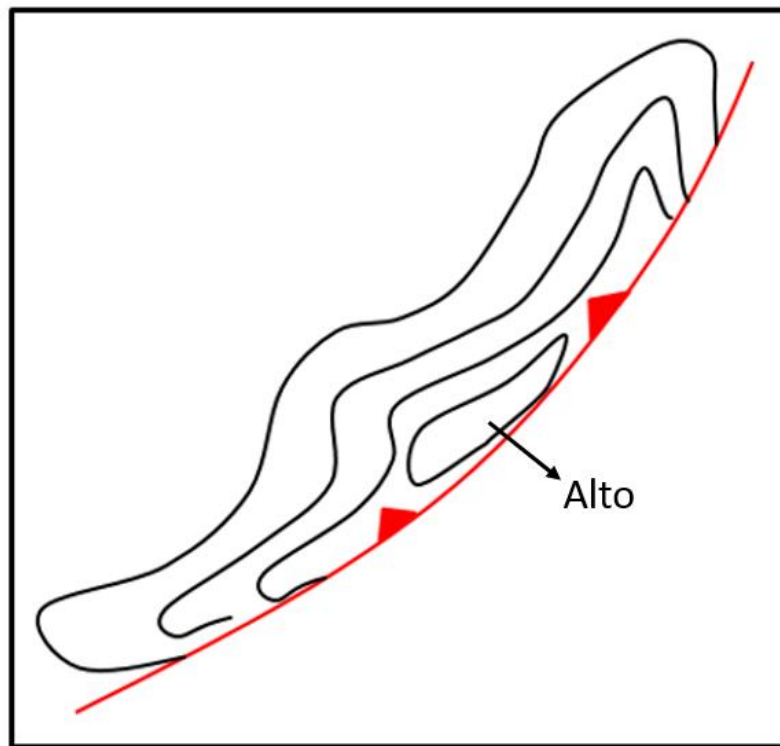
Fuente: Modificado de Reporte Interno, Equion Energía.

El Modelo Teórico base utilizado es el presentado con anterioridad en este informe, este proporciona los conceptos de la relación desplazamiento/longitud presentados en la Regla del Arco y Flecha, la cual permite dar una explicación plausible al proceso de uniformización de presiones de los diferentes yacimientos del Complejo Pauto, entre ellos las escamas A, B y C, esto a través de las zonas en las que las fallas no presenten desplazamiento suficiente para separar la Formación Mirador de las diferentes escamas, permitiendo la conexión entre los fluidos.

Esta regla también es base para la explicación de los altos y bajos estructurales (probados por pozos) que se presentan horizontalmente en cada escama, debido a que no es un solo trazo de falla la que conforma la escama (Figura 29) sino una

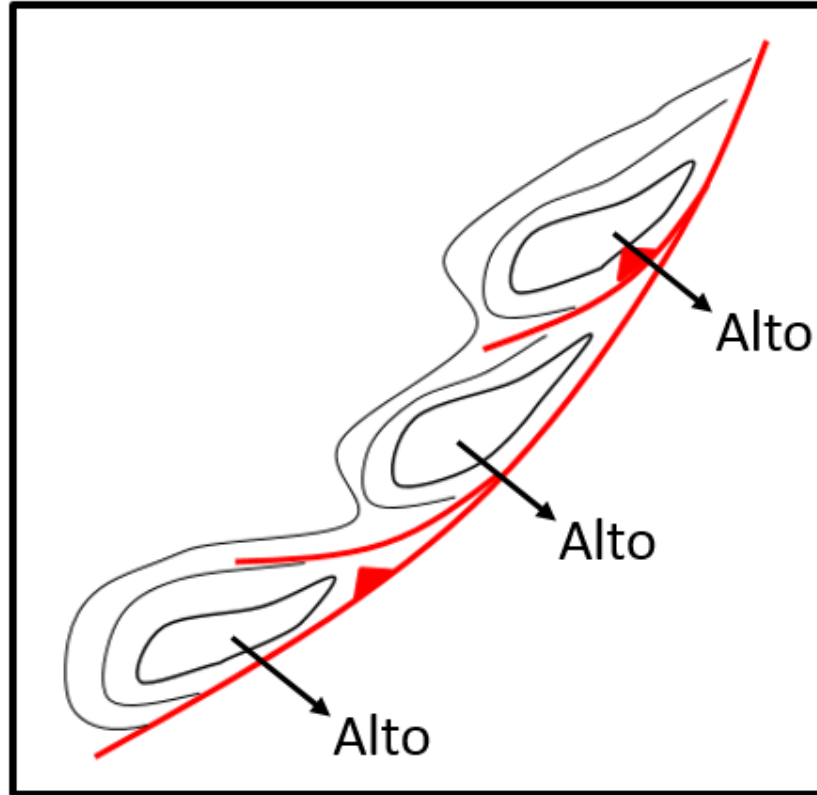
serie de fallas que se relevan entre sí, generando zonas estructuralmente altas y bajas conforme al número de fallas que la conforman (Figura 30).

Figura 29. Esquema teórico de la configuración estructural de las escamas en vista de mapa, antigua interpretación.



Fuente: Modificado de Reporte Interno, Equion Energía.

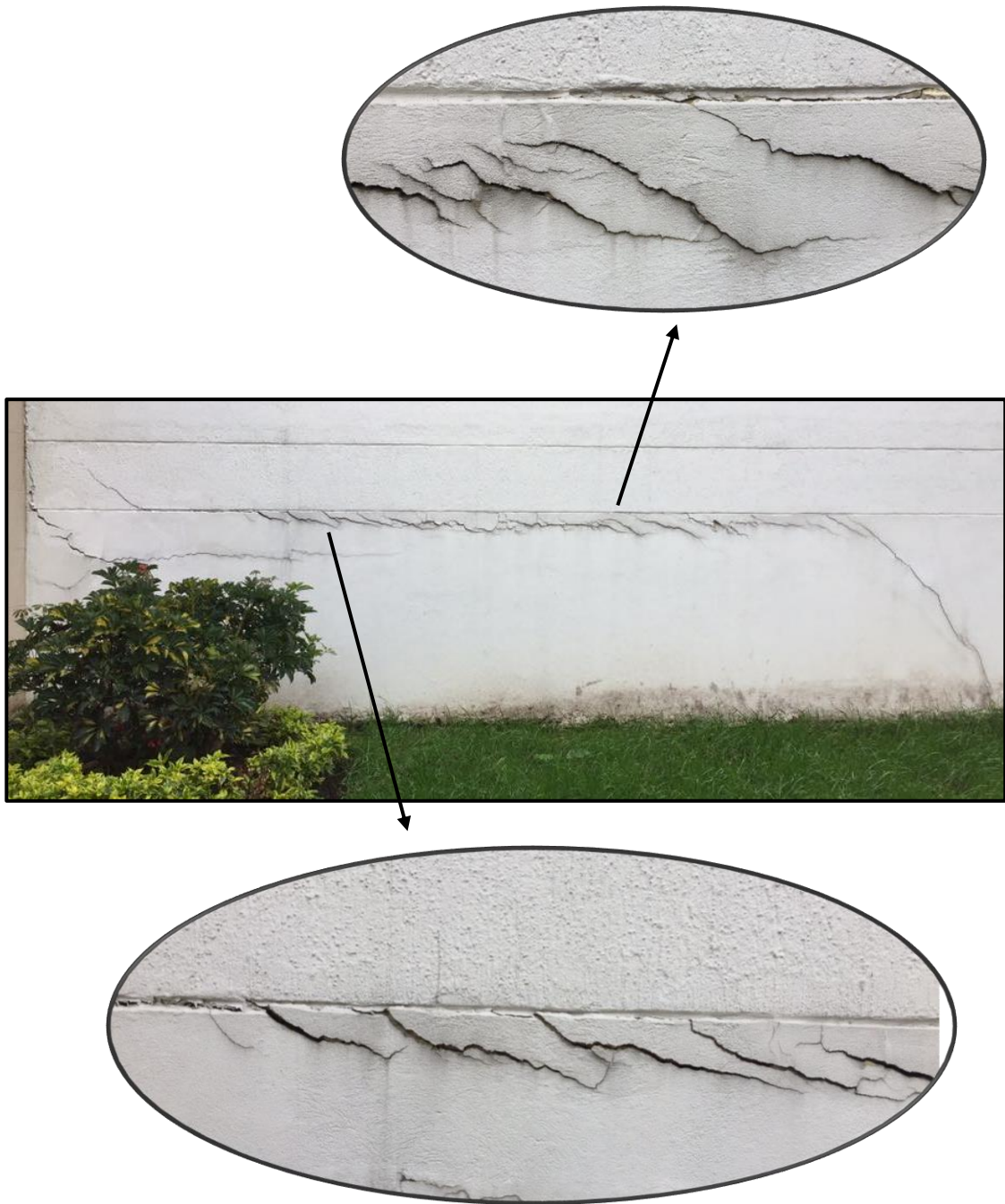
Figura 30. Esquema teórico de la configuración estructural de las escamas en vista de mapa, nueva interpretación.



Fuente: Modificado de Reporte Interno, Equion Energía.

Este comportamiento de distribución de las fallas como trazos y no como un solo plano es un comportamiento fractal natural de las fallas, es decir, que se da en muchas escalas, desde pequeños afloramientos (Figura 31) hasta grandes estructuras como las del Complejo Pauto.

Figura 31. Fotografía de fracturas en afloramiento.



Fuente: Fotografías tomadas por Roberto Linares.

La integración del Modelo Estructural del Equipo de Subsuelo de Equion Energía se realizó exportando 21 secciones de buzamiento (In Line). Para cada escama se realizaron diferentes secciones, dependiendo de la extensión y complejidad de las mismas.

9.1. ESCAMA A

Para esta escama se realizó interpretación sobre 7 secciones de rumbo (Figura 32), de manera general las secciones de rumbo son realizadas conforme a los topes de la Formación Mirador en vista de mapa (Figura 33), ya que esto permite tener puntos de amarre con los datos pozo, teniendo estas secciones de rumbo (Crossline) y las secciones importadas del Modelo oficial de la Licencia Piedemonte, se construyeron secciones de buzamiento con el fin de tener mayor control en el mapeo de la estructura. En total se interpretaron 46 secciones (Figura 34), con los horizontes de las formaciones Mirador y Los Cuervos y la Falla A se obtuvieron las superficies, con las cuales se generó el mapa estructural (Figura 35), con este se visualiza la compartimentalización local de la estructura y los relevos de las fallas que generan altos y bajos estructurales.

Figura 32. Representación de una sección sísmica de Rumbo interpretada. Crossline 500(PSDM).

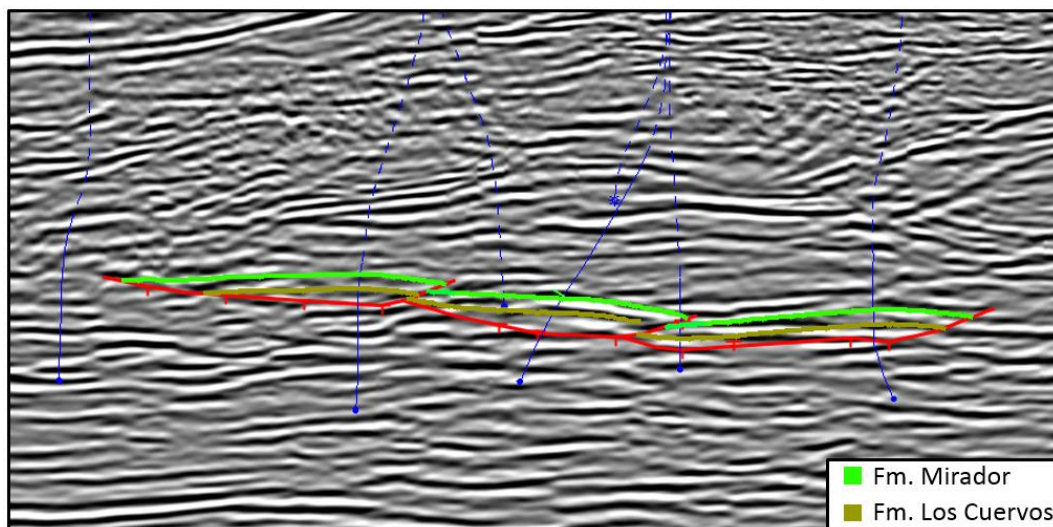


Figura 33. Ubicación de Secciones de rumbo conforme los topes de la Formación Mirador (círculos verdes) en vista de mapa. De fondo *Depth Slice* del cubo sísmico. Los colores cálidos (rojos) representan zonas estructurales altas y los fríos (azules) zonas estructurales bajas.

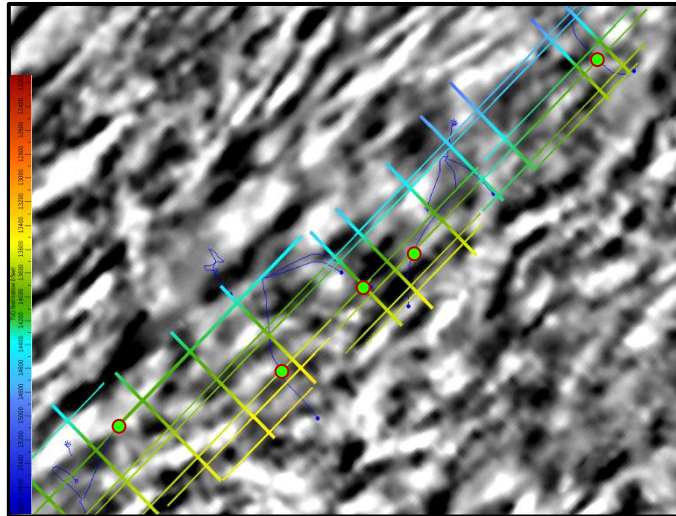


Figura 34. Secciones estructurales realizadas para generar el mapa estructural de la escama A. De fondo *Depth Slice* del cubo sísmico. Los colores cálidos (rojos) representan zonas estructurales altas y los fríos (azules) zonas estructurales bajas.

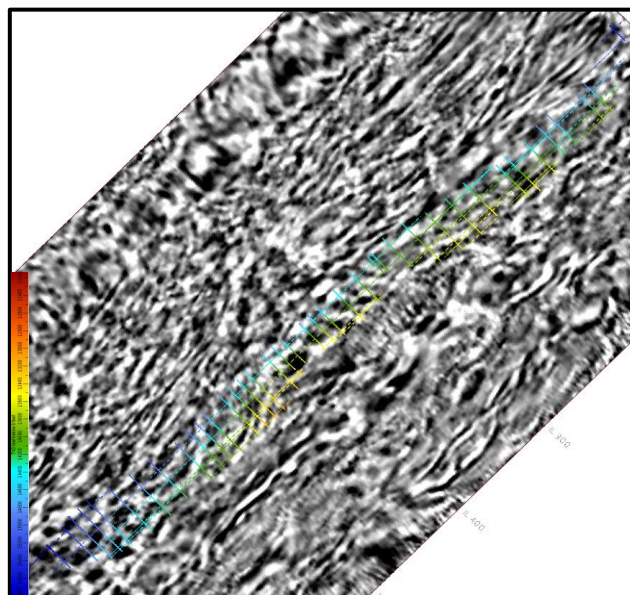
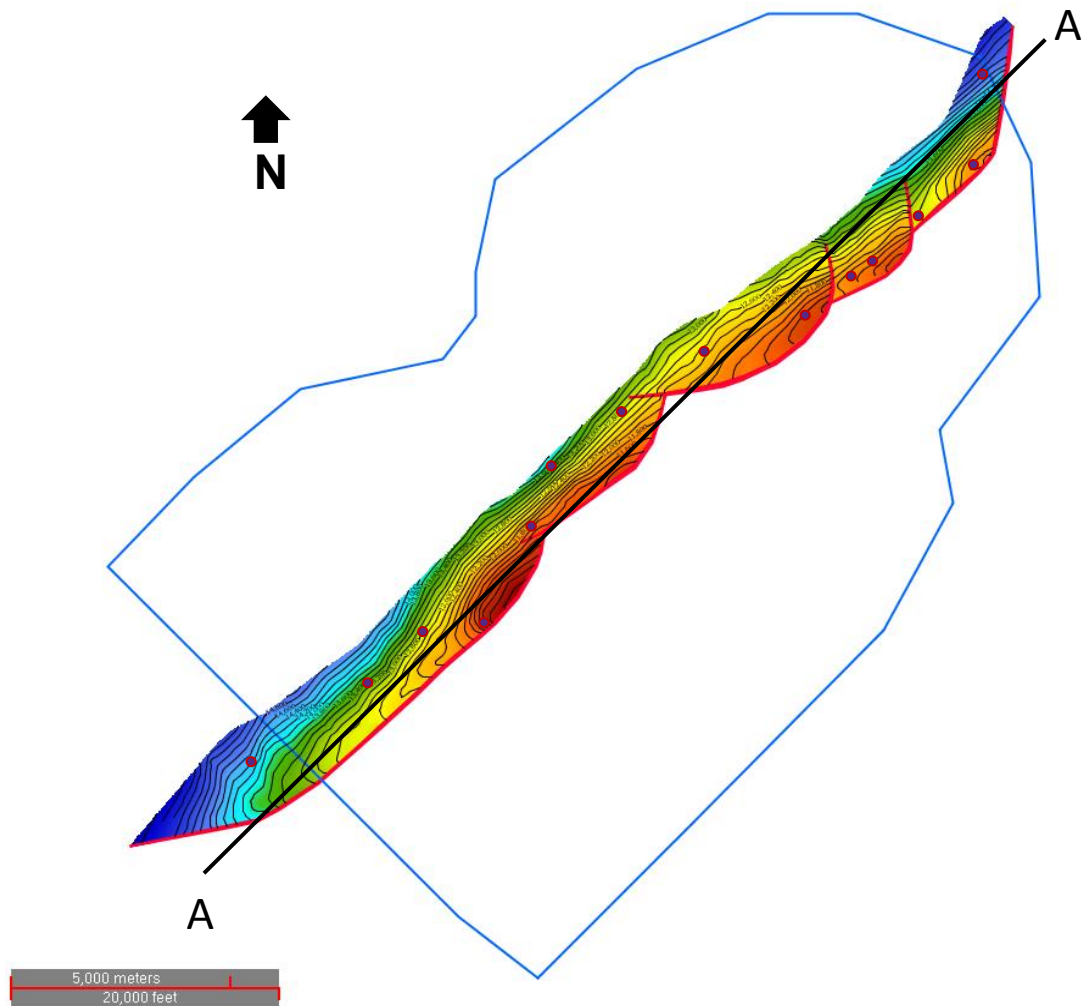
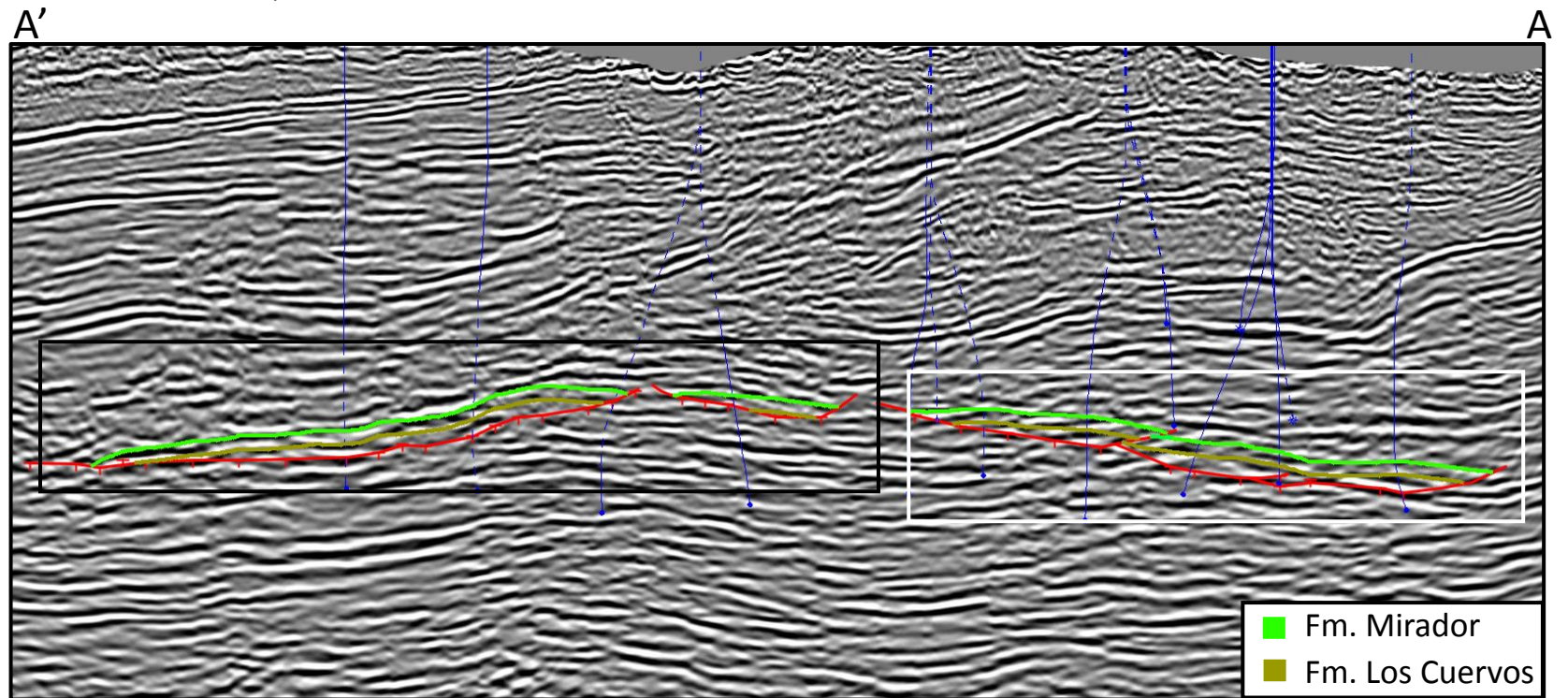


Figura 35. Mapa estructural del tope de la Formación Mirador en la escama A del Complejo Pauto, representado en el área de la Licencia Piedemonte. Los colores cálidos (rojos) representan zonas estructurales altas y los fríos (azules) zonas estructurales bajas. Los círculos morados representan topes de los pozos que perforaron la Formación Mirador de esta escama.



En la Figura 36, la franja enmarcada en negro corresponde a una zona de compartimentalización de la escama, es decir, que no hay conexión entre dos zonas del mismo yacimiento, producto del desplazamiento de las fallas, mientras la franja enmarcada en blanco corresponde a una zona en la cual, aunque hay presencia de fallas de desgarre (*tear faults*), hay conectividad lateral en el yacimiento.

Figura 36. Sección de Rumbo A-A', Ilustrada en el mapa de la Figura 35. Crossline 476 (PRE STACKED DEPTH MIGRATION, PSDM)



9.2. ESCAMA B

En la generación del mapa estructural de la escama B, siguiendo la metodología descrita en la escama A, se realizaron en total 50 secciones (Figura 37), 37 de buzamiento y 13 de rumbo.

La escama B presenta una complejidad adicional, ya que los pozos PDMFdST y PDMFm, muestran una zona estructuralmente alta en la zona trasera de la escama B. Con base en la información sísmica, datos de producción y trazadores, se interpreta como un Splay de la Falla B, y se le denomina B Splay (Figura 38).

Figura 37. Secciones realizadas para la generación del mapa estructural de la escama B. De fondo *Depth Slice* del cubo sísmico. Los colores cálidos (rojos) representan zonas estructurales altas y los fríos (azules) zonas estructurales bajas.

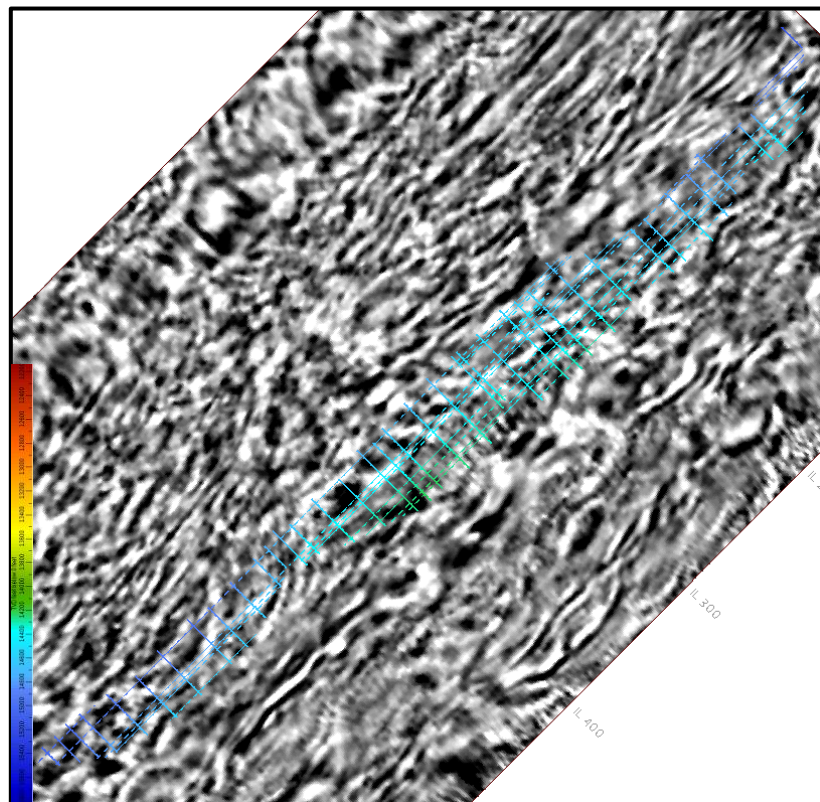


Figura 38. Mapa estructural del tope de la Formación Mirador en la escama B del Complejo Pauto, representado en el área de la Licencia Piedemonte. Los colores cálidos (rojos) representan zonas estructurales altas y los fríos (azules) zonas estructurales bajas. Los círculos morados representan topes de los pozos que perforaron la Formación Mirador de esta escama.

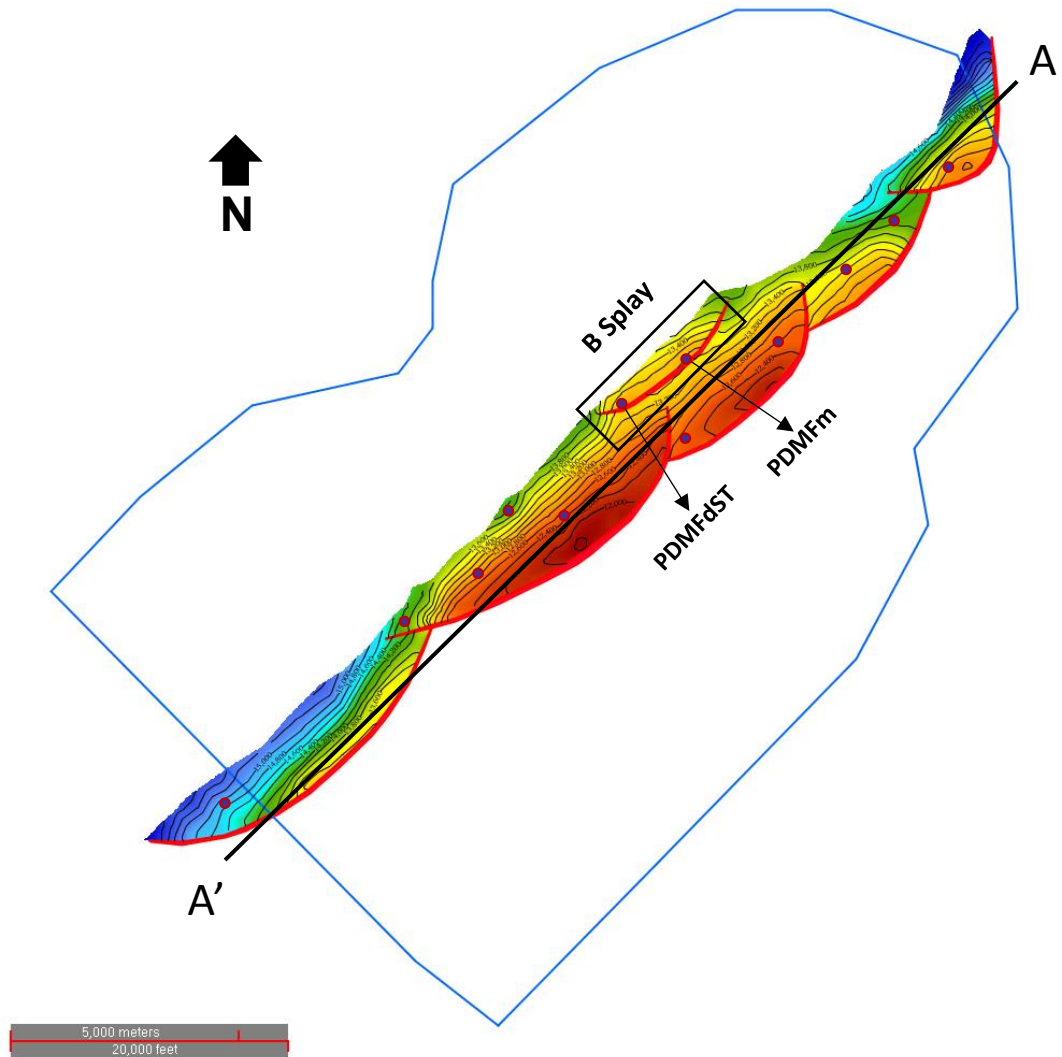
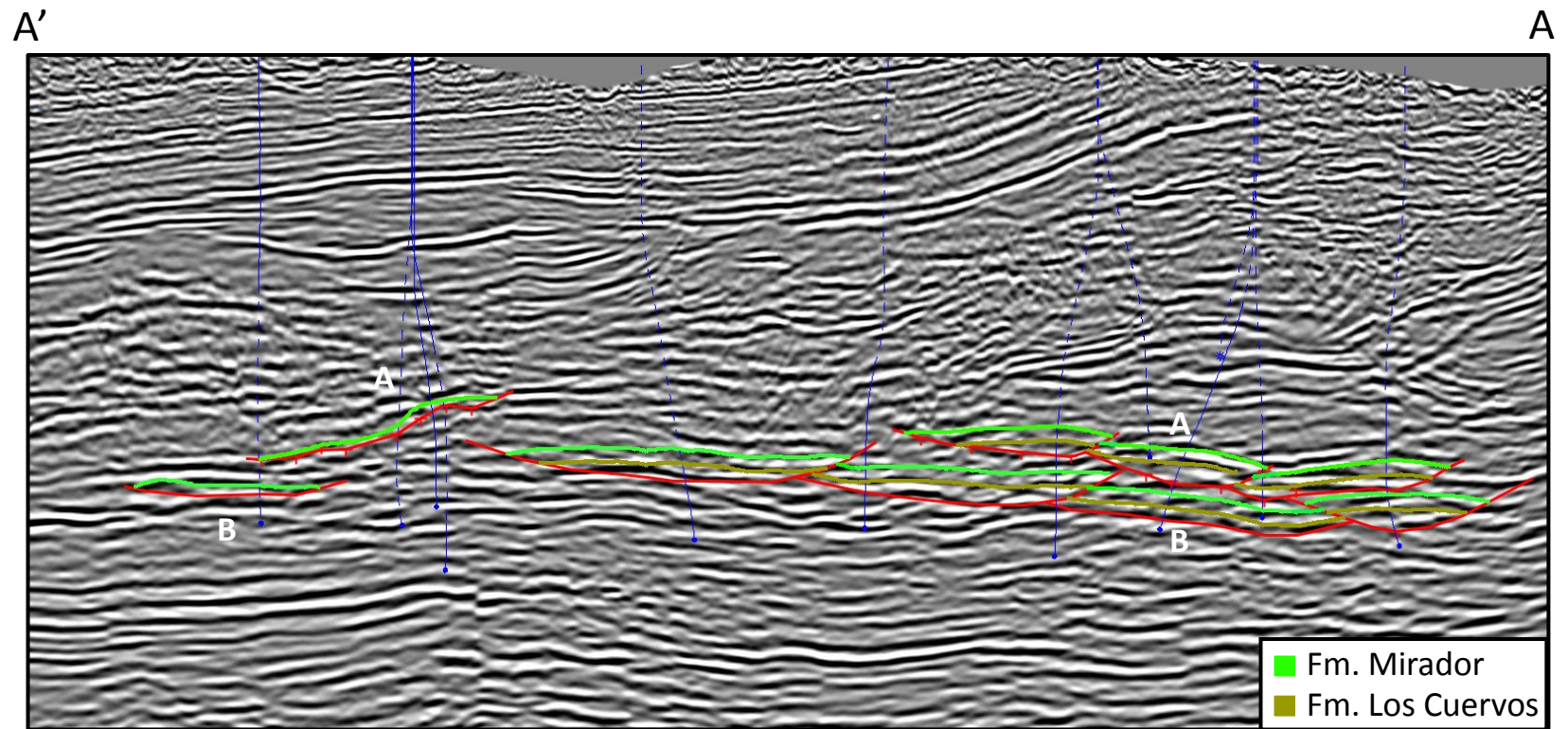


Figura 39. Sección de Rumbo A-A', Ilustrada en el mapa de la Figura 38. Crossline 500 (PSDM).



9.3. ESCAMA C

Siguiendo la metodología descrita en la escama A para la generación del mapa estructural, en esta escama se interpretaron en total 29 secciones (Figura 40), 23 de buzamiento y 6 de rumbo.

En la Figura 41, los pozos PDMFI y PDMFo muestran topes fallados en la Formación Mirador de esta escama, lo cual indica que en esta zona no se tiene registro del tope de esta formación, condicionando la extensión del limbo trasero (*back limb*).

Figura 40. Secciones realizadas para la generación del mapa estructural de la escama C. De fondo *Depth Slice* del cubo sísmico. Los colores cálidos (rojos) representan zonas estructurales altas y los fríos (azules) zonas estructurales bajas.

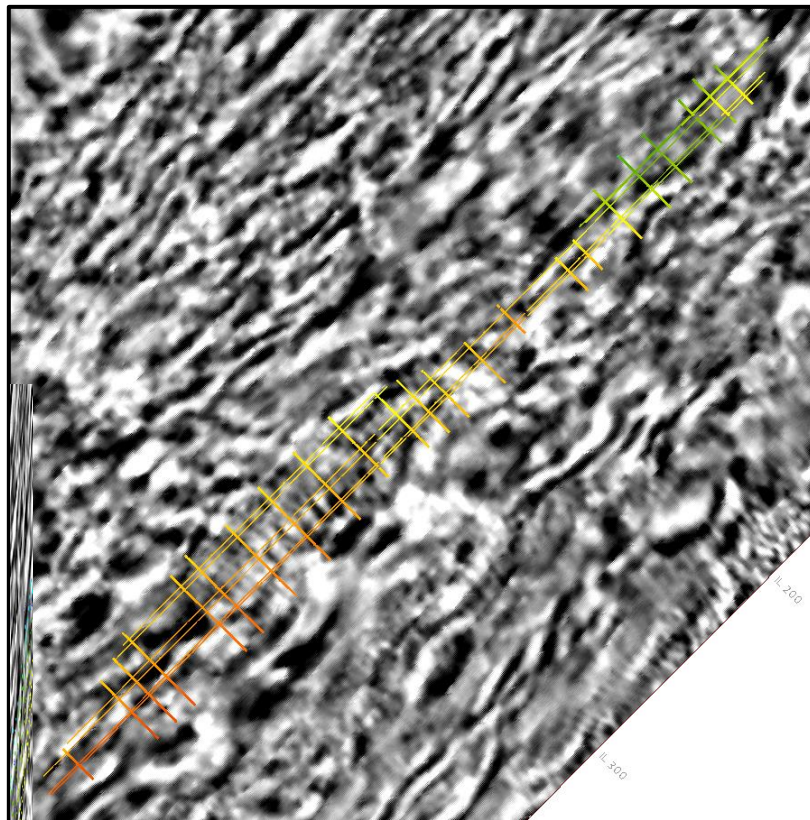


Figura 41. Mapa estructural del tope de la Formación Mirador en la escama C del Complejo Pauto, representado en el área de la Licencia Piedemonte. Los colores cálidos (rojos) representan zonas estructurales altas y los fríos (azules) zonas estructurales bajas. Los círculos morados representan topes de los pozos que perforaron la Formación Mirador de esta escama. Los círculos rojos representan los topes fallados.

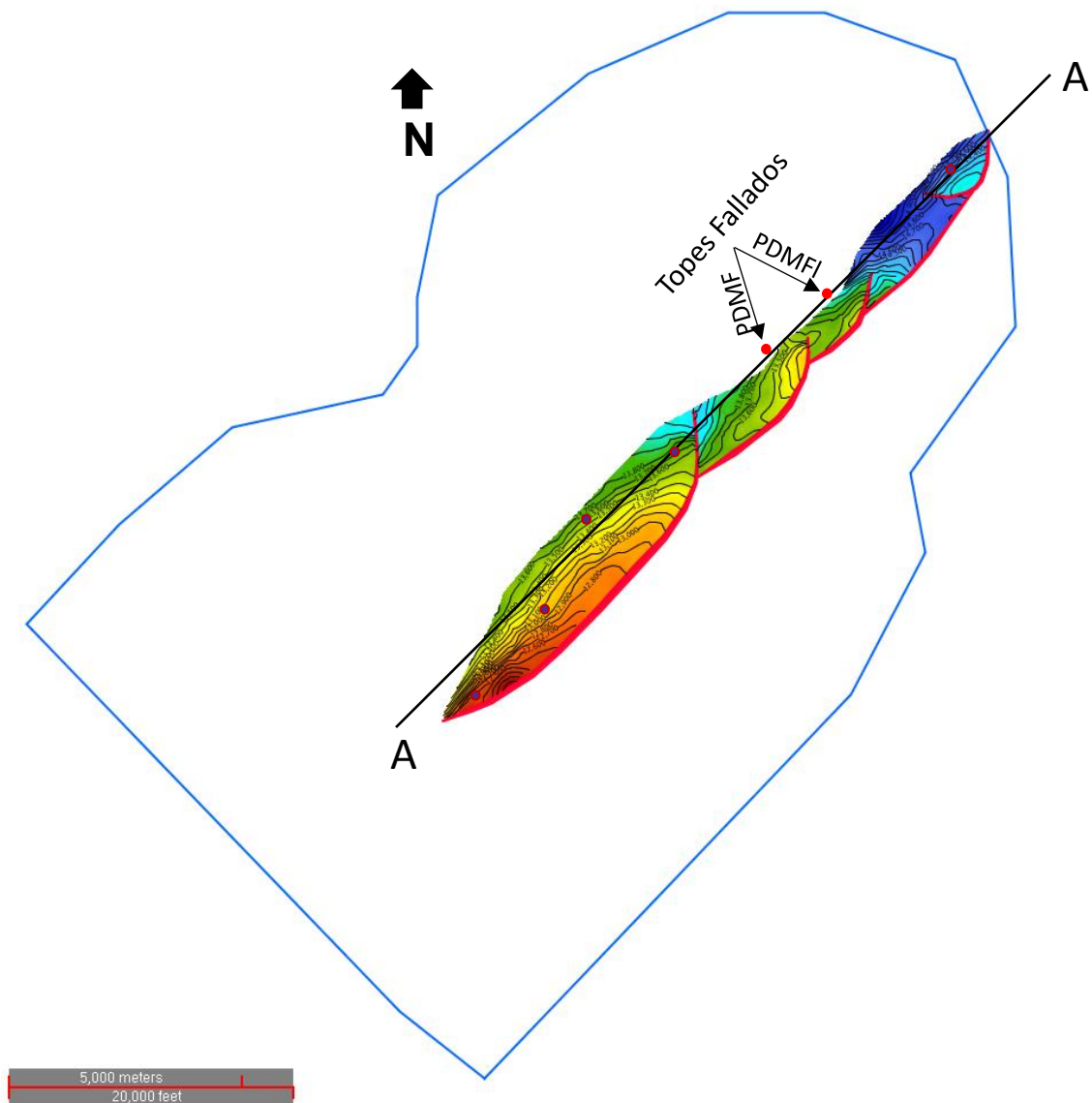


Figura 42. Sección de Rumbo A-A', Ilustrada en el mapa de la Figura 41. Crossline 520 (PSDM).

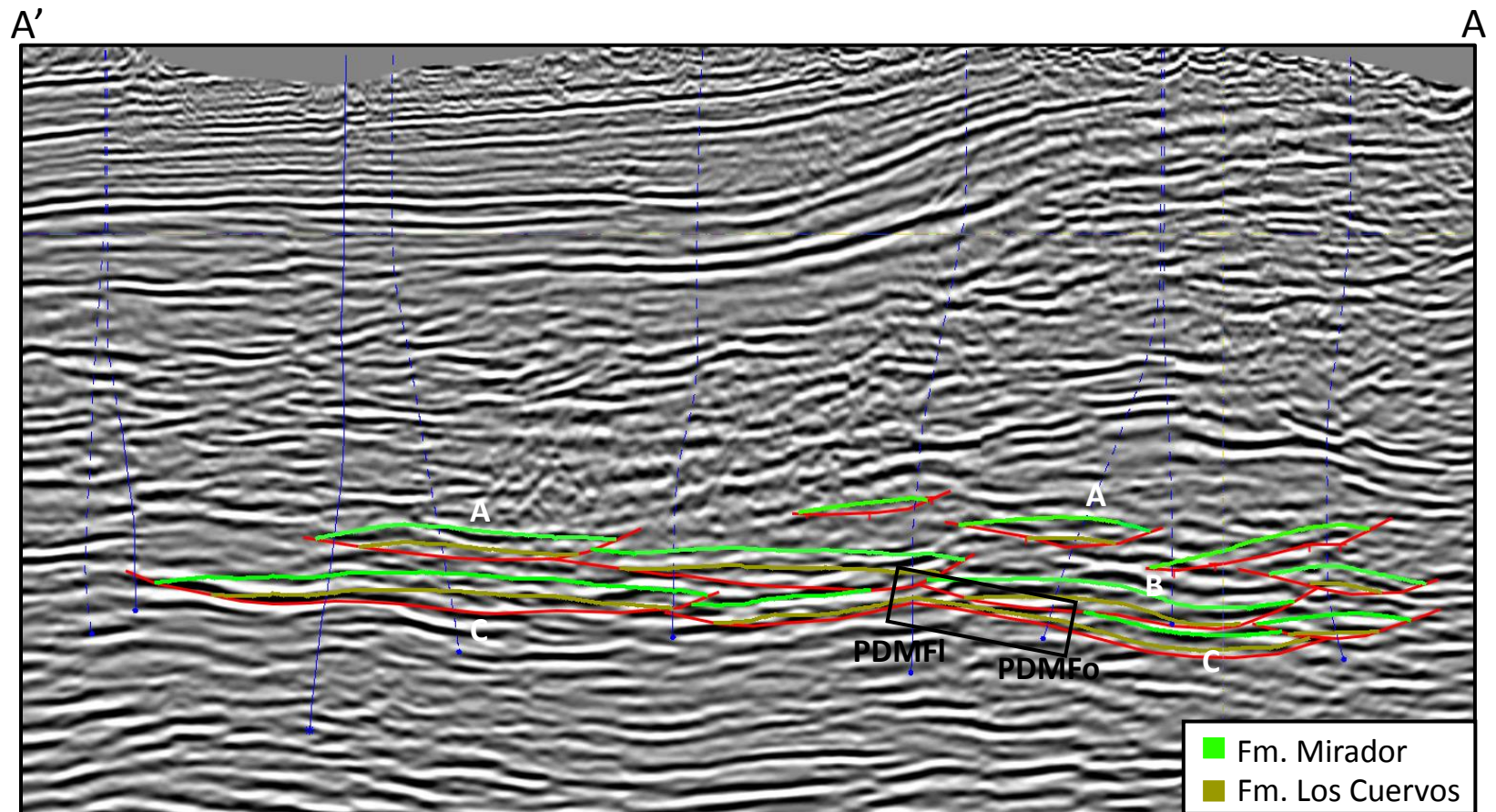


Figura 43. Sección general de buzamiento (Inline) de las escamas A, B y C del Complejo Pauto. Inline 70 (PSDM).

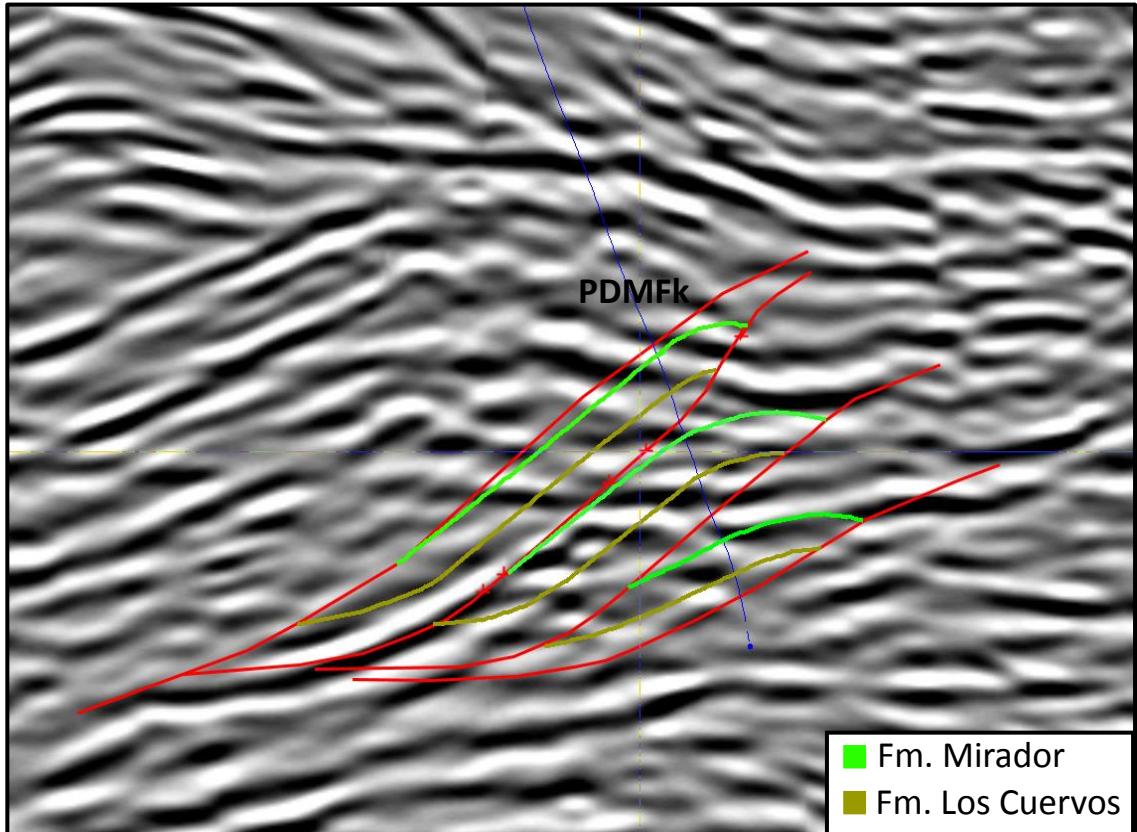
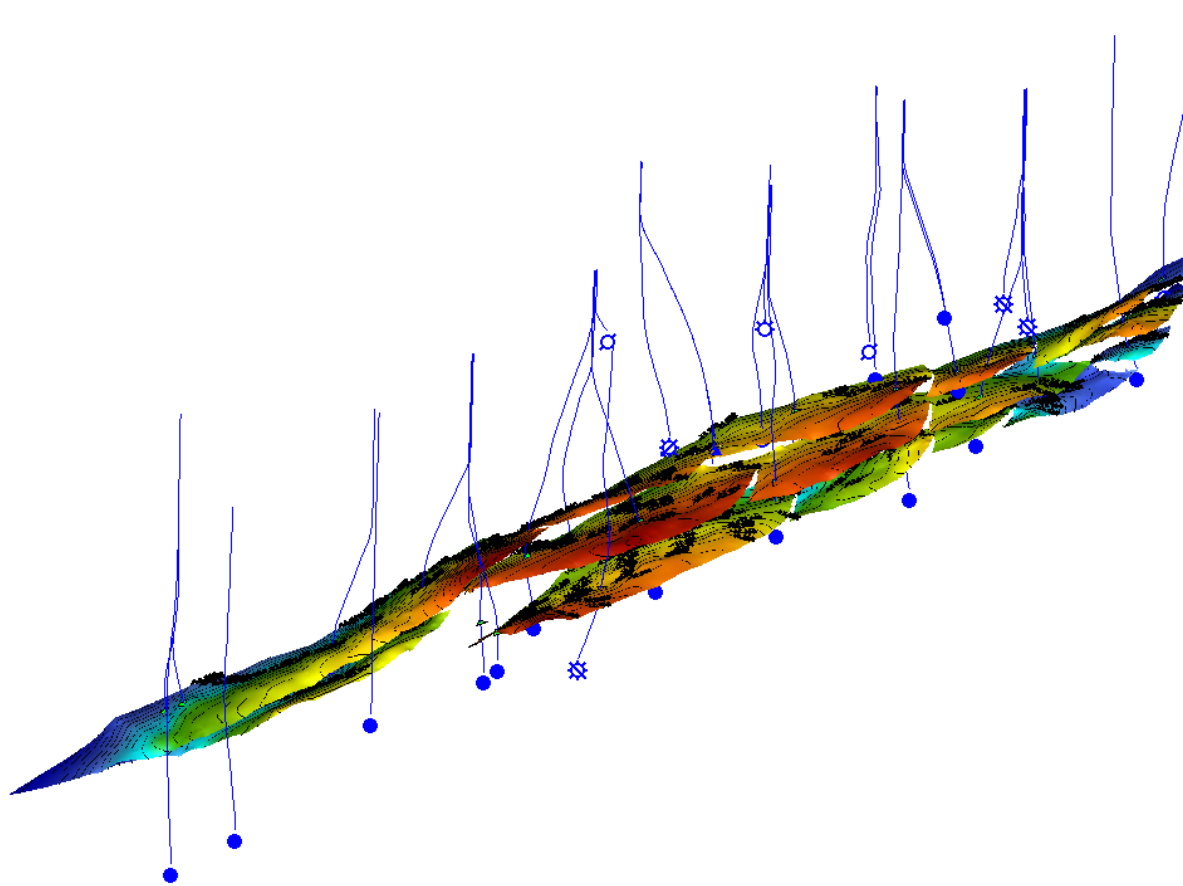


Figura 44. Vista 3D de los mapas estructurales del tope de la Formación Mirador. Escamas A, B y C del Complejo Pauto.



10. CONCLUSIONES

- La conectividad entre las escamas, producto de las zonas en las que el desplazamiento de la falla no es suficiente para separar la Formación Mirador (reservorio de las escamas del Complejo Pauto), presenta una posible explicación al proceso de uniformización de presiones en los yacimientos del Complejo Pauto, ya que estas zonas permiten la interacción entre los fluidos presentes en las diferentes escamas.
- La identificación de zonas de relevo producto de las *tear faults* (Fallas de desgarre), interpretadas con la información sísmica, permite explicar la presencia de altos y bajos estructurales (probados con datos de pozos) identificados en cada escama del Complejo Pauto.
- El desplazamiento máximo de la Falla de Monterraló es de 6264 metros, estimado a partir del Diagrama de Separación Estratigráfica, teniendo en cuenta que la longitud de la falla en vista de mapa es de 64300 metros, la relación desplazamiento/longitud es de 0.09, lo cual corresponde al rango presentado en la Regla de Arco y Flecha.
- El alto estructural encontrado por los pozos PDMFdST y PDMFm en el limbo trasero de la escama B corresponde a una estructura de menor tamaño, formada por una falla secundaria (splay) de la falla B, a esta estructura se le denominó B Splay.

- La compartimentalización presente en las escamas del Complejo Pauto es producto de la presencia de *tear faults*, las cuales tienen zonas en las que el desplazamiento es suficiente para desconectar lateralmente los yacimientos.
- La aplicación de la regla del arco y la flecha permite probar que las estructuras están conformadas por varios compartimientos en lugar de uno solo; esto en virtud que es la única manera de explicar el desplazamiento de las fallas, confirmados por los pozos, versus la extensión total de cada una de las fallas principales a lo largo de la Licencia Piedemonte.

11. RECOMENDACIONES

- Balancear las secciones realizadas y las superficies generadas del tope de la Formación Mirador.
- Validar la interpretación sísmica realizada (PSDM_2012), en futuros reprocesamientos del programa sísmico.
- Actualizar el modelo estructural de las escamas A, B y C conforme se obtengan nuevos datos de perforación de pozos.

12. BIBLIOGRAFÍA

ACEVEDO RUEDA, Rafael Antonio y HERNÁNDEZ MENDOZA, Yohn Forthis. Modelamiento y análisis estructural del anticlinal de Medina, Piedemonte de los Llanos Orientales. Tesis de pregrado en Geología. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, 2004, p. 46 - 50.

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Cuenca Llanos Orientales, Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos, 2012. p. 6 - 36.

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Mapa de Tierras. Escala 1:2'000.000. 17 de febrero de 2017. Disponible en: http://www.anh.gov.co/Asignacion-de-areas/Documents/2m_tierras_170217.pdf.

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Petroleum Geology of Colombia: Eastern Cordillera Basin. Medellín, Universidad EAFIT, 2011. p. 43 - 50.

ARIANA LTDA. Cartografía geológica de las áreas Floreña y Pauto, Bloque Piedemonte, Departamento de Casanare: Realizado para BP Exploration. Bogotá, 2007, p. 12 – 38.

BRUNETON, P., *et al.* Contribución a la Geología del Oriente de las comisarias del Vichada y del Guainía (Colombia), Geología Norandina, 1983, No. 6, p. 3-12.

BP Exploration Company. Mapa geológico contrato de Asociación Recetor, En: Informe Técnico Anual. Escala 1:50000. Bogotá, 2005.

COLLETA, B., *et al.* Tectonic style and crustal Structure of the Eastern cordillera (Colombia) from a balanced cross-section, in: Petroleum and Tectonics in Mobile Belts, 1990, p. 81-100.

COOPER, Mark, *et al.* Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia, in: The American Association of Petroleum Geologists, 1995, p. 1421-1440.

DENGO, C. and COVEY, M. Structure of the Eastern Cordillera of Colombia: implications for trap styles and regional tectonics, in: AAPG Bulletin, 1993, Vol. 77, p. 1315-1337.

ECOPETROL-ICP. Modelamiento Estructural en Zonas Complejas del Piedemonte Llanero. Piedecuesta. 2003.

ELLIOTT, David. The energy balance and deformation mechanisms of thrust sheets. En: Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1976, Vol. 283. p. 289-312.

EQUION ENERGÍA LIMITED. Informe Técnico Anual a la Agencia Nacional de Hidrocarburos. Bogotá D.C. 2016. p. 5 - 7.

FABRE, Antonio. Subsistencia, maduración de materia orgánica y generación de hidrocarburos: un modelo sencillo para representar la evolución de la Cordillera Oriental y los Llanos durante el Cretácico y Terciario. I Congreso Colombiano del Petróleo, 1984, p. 421-422.

GARCÍA RODRÍGUEZ, Manuel. Geología estructural. Esfuerzos y deformaciones de las rocas. Deformación dúctil: los pliegues y sus tipos. Mecanismos de

plegamiento. Deformaciones frágiles: diaclasas y fallas. Características y tipos. Asociaciones de pliegues y fallas, 2012. p.6. ISBN: 978-84-92767-65-6.

GROSHONG, Richard. 3-D Structural Geology: A practical guide to quantitative Surface and subsurface map Interpretation. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, p. 209-210. ISBN: 978-3-540-31054-9.

GUTIERREZ GRANADOS, Zorel. Efecto del espaciamiento y longitud de fracturas sobre la permeabilidad de un yacimiento naturalmente fracturado: caso Piedemonte Llanero Colombiano. Tesis de Magister en Ingeniería de Petróleos. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, 2016, 116p.

HUBACH, Enrique. Contribución a las unidades estratigráficas de Colombia (enumeración regional, de más reciente a más antigua) En: Servicio Geológico Nacional, 1957, Informe No. 1212, 165p.

JULIVERT, M. Léxico Estratigráfico Internacional, América Latina. Vol. 5, 1968, Fascículo 4ª, p. 275-276.

LEBEL, D. "What about transfer zones?"- One of Eric Mountjoy's provocative questions. Search and Discovery Article #30321, 2014. p. 2-3.

LINARES, Roberto. Balanceo de secciones estructurales, 2016. Curso. p.1 - 48.

LINARES, Roberto, *et al.* New insights into the Piedemonte License triangle zone in the Llanos Foothills- Colombia. Bogotá, 2009, p. 1-9.

MACKAY, Paul A., *et al.* Triangle Zones and Tectonic Wedge: an Introduction. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1996, Vol. 44, No. 2, p. 1-2.

MARTÍNEZ CATALÁN, José Ramón. Geología estructural y dinámica global, 2002. Universidad de Salamanca.

MARTINEZ, Jaime. Modelamiento estructural 3D y aplicaciones en la exploración y explotación de hidrocarburos en el cinturón de cabalgamiento del Piedemonte Llanero, cordillera Oriental, Colombia. Bogotá, 2003, p. 1-10.

MARTINEZ, Jaime. Structural evolution of the Llanos foothills, Eastern cordillera, Colombia. Bogotá, 2006, p. 1-10.

MARSHAK, Stephen and WILKERSON, Scott. Fold-Thrust Belts. En: VAN DER PLUIJM, Ben and MARSHAK, Stephen. Earth Structure, 2004. p. 466. ISBN 0-393-92467-X.

MARSHAK, S. and Woodward, N. Introduction to cross-section balancing. En: MARSHAK, Stephen and MITRA, Gautam. Basic methods of structural geology, 1988. p. 303-322. ISBN: 0130651788.

MILLER, T. The geology of the Eastern Cordillera between Aguazul-Sogamoso-Villa de Leiva, part I, En: Geological field-trip, Colombia. 1979, p. 349 – 396.

NOTESTEIN, Frank; HUBMAN, Carl and BOWLER, James. Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America. In: GSA Bulletin, Vol. 55, 1944, p. 1190-1992.

PALENCIA, Clara; OCAMPO, Alonso y ALZATE, Juan Carlos. Building a petrophysical model for a low porosity and highly tectonized reservoir. Field case: Pauto Complex – Colombia. Bogotá, June 2012, p. 1-2.

PIEDRAHÍTA LORDUY, JESÚS ALBERTO. Caracterización petrofísica de un área en el bloque CPO 16 en la cuenca de los Llanos Orientales – Colombia. Tesis de pregrado en Geología. Medellín: Universidad EAFIT, Escuela de Ciencias, 2016, 84p.

SUPPE, John. Geometry and kinematics of fault-bend folding. En: American Journal of Science. September, 1983, Vol. 283, p. 684-721.

SUPPE, Jhon and MEDWEDEFF, Donald. Geometry and kinematics of fault-propagation folding. En: Eclogae geol. March, 1983, p. 409-454.

WILKERSON, Scott; APOTRIA, Ted and FARID, Tammer. Interpreting the geologic map expression of contractional fault-related fold terminations: lateral/oblique ramps versus displacement gradients. En: Journal of structural Geology, 2002, vol. 24, p. 603 – 604.